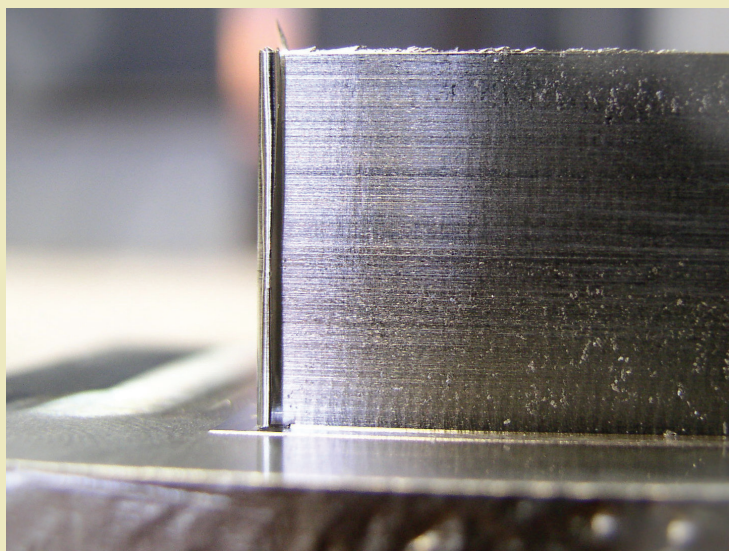




Jakub Matuszak

Kazimierz Zaleski

Usuwanie zadziorów po frezowaniu stopów aluminium i magnezu



Lublin 2016

MONOGRAFIE

Usuwanie zadziurów po frezowaniu
stopów aluminium i magnezu

Monografie – Politechnika Lubelska



Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



Jakub Matuszak
Kazimierz Zaleski

Usuwanie zadziorów po frezowaniu stopów aluminium i magnezu



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Józef Kuczmazewski, Politechnika Lubelska

prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp, Politechnika Rzeszowska

Redakcja i skład: Jakub Matuszak

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-229-1

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Streszczenie.....	7
Abstract.....	8
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	9
Wprowadzenie.....	10
1. ANALIZA STANU WIEDZY	12
1.1. Charakterystyka stanów krawędzi przedmiotów po obróbce.....	12
1.2. Podstawowe operacje wykonywane na krawędziach przedmiotów w budowie maszyn.....	15
1.3. Podstawy teoretyczne procesu formowania się zadziórów	15
1.4. Charakterystyka i klasyfikacja zadziórów powstałych po obróbce skrawaniem	18
1.5. Przegląd metod obróbki krawędzi.....	24
1.5.1. Ręczna obróbka krawędzi	24
1.5.2. Ręczno-maszynowa obróbka krawędzi.....	25
1.5.3. Maszynowa obróbka krawędzi	25
1.6. Charakterystyka obróbki szczotkowaniem	37
1.7. Podstawy teoretyczne procesu obróbki szczotkowaniem	41
1.8. Podsumowanie	44
2. OGÓLNA METODYKA I ZAKRES BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH	46
2.1. Materiały stosowane w badaniach.....	47
2.2. Opis stanowiska badawczego	49
2.2.1. Oprzyrządowanie technologiczne	49
2.2.1.1. Stanowisko do wyznaczania średnicy dynamicznej szczotek	52
3. BADANIA PROCESU FORMOWANIA SIĘ ZADZIÓRÓW	56
3.1. Metodyka badań procesu formowania się zadziórów	56
3.2. Badania wpływu parametrów obróbki na wielkość zadziórów	58
4. BADANIA STANU KRAWĘDZI PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM	64
4.1. Obróbka krawędzi metodą szczotkowania	64
4.1.1. Charakterystyka narzędzi wykorzystanych w badaniach.....	64
4.1.2. Parametry technologiczne szczotkowania	64
4.2. Badania stanu krawędzi po obróbce szczotkowaniem	65
4.2.1. Metodyka badań stanu krawędzi.....	65

4.2.2. Wpływ parametrów szczotkowania na stan krawędzi – badania wstępne.....	66
4.2.3. Badania wpływu parametrów szczotkowania na stan krawędzi	69
4.2.4. Analiza statystyczna wyników badań stanu krawędzi	79
5. BADANIA CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM	89
5.1. Badania wpływu parametrów obróbki szczotkowaniem przedmiotów frezowanych kształtująco na chropowatość powierzchni.....	90
5.2. Badania wpływu parametrów obróbki szczotkowaniem przedmiotów frezowanych wykończeniowo na chropowatość powierzchni.....	101
6. BADANIA MIKROTWARDOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM	111
6.1. Metodyka badań mikrotwardości.....	111
6.2. Badania wpływu obróbki szczotkowaniem na mikrotwardość warstwy wierzchniej	112
6.3. Analiza składu chemicznego obrabianego materiału na powierzchni szczotkowanej.....	117
7. BADANIA NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM	123
7.1. Metodyka badań naprężeń własnych	123
7.2. Badania wpływu rodzaju szczotki oraz medium obróbkowego na naprężenia własne.....	125
8. USUWANIE ZADZIORÓW – ZALECENIA DLA PRZEMYSŁU.....	129
8.1. Usuwanie zadziorów po frezowaniu kształtującym.....	130
8.2. Usuwanie zadziorów po frezowaniu wykończeniowym.....	134
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	137
Literatura	140

Streszczenie

W monografii przedstawiono wyniki badań procesu usuwania zadziorów po frezowaniu stopów aluminium i magnezu.

We wstępie wyjaśniono pojęcia związane ze stanem krawędzi oraz scharakteryzowano typy zadziorów powstałych po obróbce skrawaniem.

W rozdziale poświęconym ocenie stanu wiedzy w zakresie usuwania zadziorów sklasyfikowano metody obróbki krawędzi oraz omówiono typowe metody usuwania zadziorów stosowane najczęściej w zakładach przemysłowych. Przedstawiono również analizę literatury krajowej i zagranicznej związanej z procesem formowania się zadziorów, metodami usuwania zadziorów oraz obróbki szczotkowaniem.

Dalsze części pracy opisują badania procesu formowania się zadziorów oraz ich usuwania metodą szczotkowania. Badania prowadzono na próbkach wykonanych ze stopów magnezu AZ31 i AZ91HP oraz na próbkach wykonanych ze stopów aluminium 7075-T651 i AlSi10Mg. Badania prowadzono dla trzech typów szczotek, których sztywność różniła się z uwagi na zastosowany materiał włókien. Badania przeprowadzono dla różnych zestawów parametrów technologicznych szczotkowania oraz medium obróbkowego.

Jedne z kluczowych wyników badań zostały przedstawione w rozdziale poświęconym analizie stanu krawędzi po obróbce szczotkowaniem, na podstawie którego można wytypować narzędzia oraz zakres parametrów, przy którym następuje skuteczne usuwanie zadziorów.

Analizowano również wpływ chropowatości wyjściowej (po obróbce frezowaniem) na strukturę geometryczną powierzchni po obróbce szczotkowaniem. Chropowatość wyjściową ustalono na dwóch przyjętych poziomach generowanych poprzez obróbkę umownie zwaną frezowaniem kształtującym oraz wykończeniowym.

Przedstawiono wyniki badań mikrotwardości w obrębie krawędzi po procesie usuwania zadziorów. Wykazano, że obróbka szczotkowaniem może być skutecznym sposobem na utwardzenie stref przykrawędziowych, co stanowi niejako dodatkowe zabezpieczenie przed uszkodzeniem wyrobów.

Przedstawiono wyniki badań naprężeń własnych w próbkach po obróbce szczotkowaniem. Badano wpływ rodzaju szczotki oraz zastosowanego medium na charakter i rozkład naprężeń własnych.

W końcowej części przedstawiono w formie tabelarycznej zalecenia dla przemysłu związane z wyborem narzędzi i parametrów w procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania.

W ostatniej części podsumowano uzyskane wyniki oraz sformułowano wnioski.

Abstract

The paper presents the results of deburring process after milling aluminum and magnesium alloys.

The introduction gives an explanation of terms related to edge states, and a characterization of burr types formed after machining.

In the chapter devoted to assessing the state of knowledge in the field of deburring, methods of edge finishing were classified and typical methods of edge deburring commonly used in industrial plants were discussed. An analysis of Polish and foreign literature associated with the process of the burr formation, deburring methods and the process of wire brushing was presented.

Further sections of the work presents the study of burr formation and deburring by wire brushing. The studies were performed on samples made of AZ31 and AZ91HP magnesium alloys and samples of 7075-T651 and AlSi10Mg aluminum alloys. Studies were carried out for three types of brushes with different stiffness due to the use of different fiber materials. Research was carried out on different brushing technological parameters and machining fluid.

Some of the key findings of the study are presented in the chapter on the analysis of the edge state after brushing process, on the basis of which the tools and the range of parameters, at which the efficient deburring process can be chosen.

Moreover, the influence of initial roughness (after milling) on the surface after wire brushing was analyzed. The initial roughness set on two levels called shaping and finishing mill.

Results of microhardness within the edge range after deburring process were presented. It has been shown that the brushing process can be an effective way to hardening the edge zones, which is a kind of additional protection against damage of the products.

The results of studies on residual stress in the samples treated by brushing were presented. The effect of the brush type and medium upon stress character and stress distribution was analyzed.

In the final section – a table – recommendations for the industry related to the choice of tools and parameters in the process of deburring by brushing were presented.

The final section of the paper is a summary of the obtained research results and presents conclusions formulated on the basis of the studies.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

AFM	– obróbka przetłoczno-ścierna (ang. <i>Abrasive Flow Machining</i>)
B	– szerokość frezowania
D	– średnica narzędzia
D_d	– średnica dynamiczna szczotki
ECD	– elektrochemiczne usuwanie zadziorów (ang. <i>Electrochemical Deburring</i>)
EDM	– obróbka elektroerozyjna (ang. <i>Electrical Discharge Machining</i>)
F	– siła
F_n	– siła normalna
F_s	– siła styczna
f_z	– posuw na ostrze
g	– współczynnik zadzioru
h_o	– wysokość zadzioru
HPC	– skrawanie wysokowydajne (ang. <i>High Performance Cutting</i>)
HSC	– skrawanie szybkościowe (ang. <i>High Speed Cutting</i>)
HSM	– obróbka wysokowydajna (ang. <i>High Speed Machining</i>)
L	– długość włókna szczotki
M02	– szczotka walcowa wykonana z drutu mosiężnego o średnicy pojedynczego włókna 0,2 mm
MAF	– obróbka magneto-ścierna (ang. <i>Magnetic Abrasive Finishing</i>)
n	– prędkość obrotowa
OP	– odkształcenia plastyczne
OS	– odkształcenia sprężyste
R	– promień narzędzia
r_h	– promień osadzenia włókien szczotki walcowej
S02	– szczotka walcowa wykonana z drutu stalowego o średnicy pojedynczego włókna 0,2 mm
S03	– szczotka walcowa wykonana z drutu stalowego o średnicy pojedynczego włókna 0,3 mm
v_c	– prędkość obwodowa, prędkość skrawania
v_f	– prędkość ruchu posuwowego
W	– szerokość szczotki
Φ	– kąt wyjścia narzędzia ze strefy skrawania
Δ	– dosuw

Wprowadzenie

Efektywny proces produkcyjny polega na zachowaniu ciągłości w dynamicznie zmieniających się warunkach rynkowych, przy jednoczesnej redukcji kosztów wytwarzania. Równocześnie redukcja kosztów nie może mieć negatywnego wpływu na jakość produkowanych wyrobów, ich niezawodność oraz nie może odbywać się kosztem ochrony środowiska.

Kształtowanie części maszyn poprzez obróbkę skrawaniem odgrywa wiodącą rolę w wytwarzaniu. Trendy rozwojowe frezowania na pierwszy plan wysuwają skrawanie z dużymi prędkościami (HSC – ang. High Speed Cutting) oraz skrawanie wysokowydajne (HPC – ang. High Performance Cutting). Jest to szczególnie zauważalne w przemyśle lotniczym, gdzie uzyskanie pożądanego kształtu elementu często związane jest z usunięciem ponad 90% materiału z półfabrykatu. W ostatnich latach duży nacisk kładzie się na obróbkę wykończeniową i powierzchniową, traktując często obróbkę frezowaniem, jako ostatni zabieg w procesie kształtowania finalnego wyrobu. Jednak podczas obróbki frezowaniem, jak również wszystkich sposobów obróbki ubytkowej, w momencie wyjścia narzędzia ze strefy skrawania powstaje niepożądane zjawisko formowania się zadziorów w postaci odkształconego plastycznie materiału na krawędziach przedmiotów wytwarzanych w czasie obróbki.

Obróbka krawędzi wytwarzanych elementów jest konieczna z wielu powodów. Usunięcie zadziorów ułatwia, a często zapewnia możliwość prawidłowego wykonania operacji obróbkowych, montażowych oraz kontrolnych. Dodatkowo, aby zapewnić prawidłowe działanie części w złożeniu, krawędzie powinny charakteryzować się określonym, zdefiniowanym stanem wykonania (zaokrąglona, stępiona, sfazowana). Ponadto, oprócz aspektów technologiczno-konstrukcyjnych, usunięcie zadziorów istotne jest także ze względów bezpieczeństwa pracy, gdyż w procesie wytwarzania oraz w czasie użytkowania wyrobu zadziory i ostre krawędzie stwarzają zagrożbę skażeń, zadrapań.

Jak wynika z konsultacji z sektorem przemysłu lotniczego, usuwanie zadziorów wiąże się z takimi czynnikami jak: zaangażowanie dodatkowych zasobów ludzkich, czas związany z procesem usuwania zadziorów, wydzielenie gniazda w zakładzie produkcyjnym na dodatkową operację technologiczną. Natomiast nieusunięcie zadziorów może prowadzić do produkcji wadliwych egzemplarzy, których wymiary nie mieszczą się w przedziale dopuszczalnej tolerancji, a także uszkodzenia finalnych wyrobów. Obróbka krawędzi w większości przypadków jest kosztownym, żmudnym, ręcznie wykonywanym procesem, dlatego opracowanie metody usuwania zadziorów na obrabiarkach sterowanych numerycznie za pomocą wirujących szczotek o ostrzach sprężystych, poprzez planowanie ścieżki narzędzia, jest alternatywnym sposobem dla dotychczas stosowanych metod. Zautomatyzowanie procesu usuwania zadziorów za pomocą

szczotki o innowacyjnej konstrukcji pozwoli skrócić czas obróbki krawędzi przedmiotów wytwarzanych poprzez obróbkę skrawaniem.

W niniejszej monografii zaprezentowano kompleksową analizę procesu usuwania zadziorów metodą szczotkowania po frezowaniu stopów aluminium i magnezu stosowanych w przemyśle lotniczym.

Opracowanie składa się z dziewięciu rozdziałów.

W pierwszym rozdziale dokonano analizy literaturowej stanu zagadnienia. Dokonano podziału metod obróbki krawędzi i opisano poszczególne z nich. Scharakteryzowano stany krawędzi i sposoby ich oznaczania w dokumentacji technicznej. Przedstawiono podstawy teoretyczne procesu formowania się zadziorów oraz opisano rodzaje zadziorów występujących w obróbce ubytkowej. Wyjaśniono podstawy teoretyczne procesu obróbki za pomocą elastycznych włókien, a także przedstawiono obróbkę szczotkowaniem jako metodę automatycznego usuwania zadziorów.

Rozdział drugi opisuje przyjętą metodykę badawczą oraz zakres badań doświadczalnych.

Rozdział trzeci został poświęcony scharakteryzowaniu procesu formowania się zadziorów. Opisano różnice w procesie formowania się zadziorów materiałów plastycznych i kruchych.

W rozdziale czwartym przedstawiono kompleksowe wyniki badań stanów krawędzi, takich jak zaokrąglenie czy sfazowanie otrzymane po procesie usuwania zadziorów.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań jakości powierzchni generowanej po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania.

Rozdział szósty i siódmy opisuje zjawiska zachodzące w warstwie wierzchniej. W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki mikrotwardości w obrębie krawędzi, na którą oddziałują uderzające włókna szczotki. Natomiast w rozdziale siódmym zobrazowano rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni.

Rozdział ósmy przedstawia zalecenia dla przemysłu, co do doboru warunków obróbki szczotkowaniem w celu usuwania zadziorów po frezowaniu.

Rozdział dziewiąty przedstawia podsumowanie i wnioski końcowe.

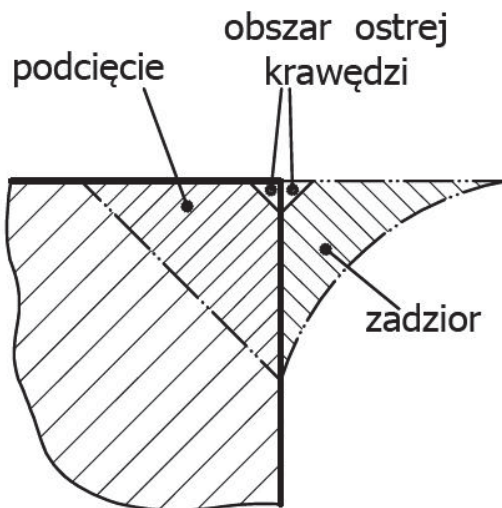
1. ANALIZA STANU WIEDZY

1.1. Charakterystyka stanów krawędzi przedmiotów po obróbce

Przez tysiące lat nie było znane określenie "zadzior". Pierwsze zapisy pojawiły się w 1784 roku. W słowniku wydawnictwa Oxford zadziory opisano jako nieobrobioną krawędź pozostawioną na metalu lub innym materiale po obróbce skrawaniem (ang. rough ridge or edge left on metal or other substance after cutting). Zadziorem określano nierówności wytworzone na płycie miedzianej po grawerowaniu, krawędź otrzymaną po przebicciu kartki papieru [2].

W obróbce skrawaniem w momencie wyjścia narzędzia z materiału często pojawiają się zadziory na krawędziach obrabianych przedmiotów. Zadzior określany jest jako ostry, nierówny występ wytworzony na powierzchni przedmiotu, który może powstać podczas obróbki skrawaniem lub podczas tłoczenia blach [8]. Zgodnie z [124] zadzior jest chropowatym zewnętrznym odchyleniem materiału od idealnego geometrycznego kształtu, powstałym na krawędzi zewnętrznej jako rezultat obróbki skrawaniem. W obróbce plastycznej takie występy materiału nazywane są wypływkami, a w odlewnictwie zalewkami.

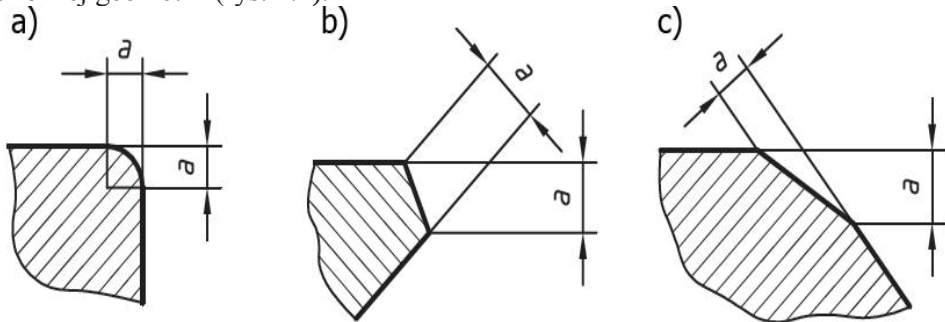
Krawędzie przedmiotów na rysunkach w dokumentacji technicznej przedstawiane są bez oznaczeń o stanie krawędzi. Niekiedy spotyka się informację, aby stępić ostre krawędzie. Jednak w wielu przypadkach istnieje potrzeba zdefiniowania stanu krawędzi. Dotyczy to zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych krawędzi.



Rys. 1.1. Stany krawędzi zewnętrznej [124]

Norma ISO 13715 definiuje stan krawędzi jako geometryczny kształt i wymiar krawędzi. Zgodnie z normą istnieją trzy stany występujące na zewnętrznych krawędziach przedmiotów, są to: zadzior, podcięcie oraz ostra krawędź (rys. 1.1). Kształt i miejsce powstawania zadziorów uzależnione jest od wielu czynników, takich jak: właściwości materiału, rodzaj, odmiana i parametry obróbki, zużycie narzędzia, zastosowanie cieczy obróbkowych itp.

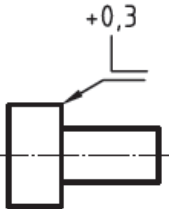
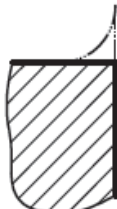
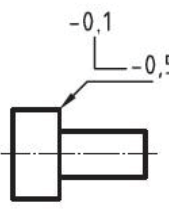
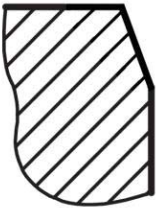
Polska Norma dotycząca wyrobów tłoczonych [125] klasyfikuje zadziory w zależności od wytrzymałości materiału na rozciąganie R_m , na cztery grupy: od 100 do 250 MPa – A, powyżej 250 do 400 MPa – B, powyżej 400 do 630 MPa – C, powyżej 630 MPa – D. Dalszy podział dotyczy klas wykonania: dokładna – E, średnio dokładna – F oraz zgrubna – G. Proces usuwania zadziorów wiąże się ze zmianą stanu krawędzi. W zależności od metody usuwania zadziorów na zewnętrznych krawędziach można uzyskać podcięcie krawędzi o różnej geometrii (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Schemat wymiarowania podcięcia po procesie usuwania zadzioru na krawędzi powstałej przez przecięcie powierzchni przedmiotu pod kątem: a) prostym, b) ostrym, c) rozwartym [124]

Oprócz rodzaju podcięcia istotny jest także jego wymiar oznaczany literą "a". W celu pełnej identyfikacji stanu krawędzi, poza wymiarem, istotne są jeszcze dwie kwestie. Pierwsza z nich to znak. Jeśli jest dodatni „+”, to dopuszczalne jest istnienie zadzioru, jednak niedopuszczalne jest podcięcie. Natomiast znak „-” dopuszcza podcięcie, tym samym wskazując, że niedopuszczalne jest pojawienie się zadzioru na krawędzi. Druga kwestia to umiejscowienie wartości liczbowej wraz ze znakiem w obrębie symbolu dotyczącego stanu krawędzi, podczas oznaczania na rysunku technicznym, co jednoznacznie określa kierunek istnienia zadzioru lub podcięcia. Zagadnienie to przedstawia tabela 1.1.

Tabela 1.1. Przykładowe oznaczenia stanu krawędzi na rysunku technicznym i ich interpretacja [124]

Przykład 1		Przykład 2	
			

Przy pewnym granicznym wymiarze "a" uzyskuje się stan ostrej krawędzi (rys. 1.3). Wymiar ten jest kwestią umowną uzależnioną od klasy wykonania wyrobu czy też ustaleń na linii dostawca – klient. W przypadku małych, precyzyjnych wyrobów wartości wymiaru "a" są mniejsze.

Wymiar	Rodzaj stanu krawędzi
a	Krawędź z dopuszczalnym zadziorem, podcięcie niedozwolone
+ 2,5	
+ 1	
+ 0,5	
+ 0,3	
+ 0,1	
+ 0,05	Ostra krawędź
+ 0,02	
-0,02	
-0,05	
- 0,1	Krawędź z dopuszczalnym podcięciem, zadziór niedozwolony
- 0,3	
- 0,5	
-1	
- 2,5	
a	
a – wymiar stanu krawędzi	

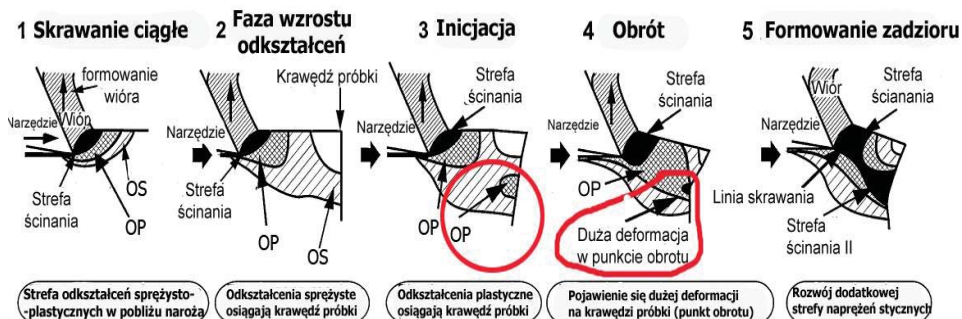
Rys. 1.3. Wartości odchyłki od nominalnej krawędzi [124]

1.2. Podstawowe operacje wykonywane na krawędziach przedmiotów w budowie maszyn

W wielu przypadkach stan krawędzi przedmiotów wykonanych ze stopów aluminium i magnezu po obróbce frezowaniem jest niezadowalający i wymaga dalszej obróbki. Wyróżnić można kilka podstawowych operacji związanych ze zmianą stanu krawędzi, a mianowicie: fazowanie, zaokrąglanie, stępienie i usunięcie zadziorów. Fazowaniem nazywa się wykonanie na krawędzi przedmiotu powierzchni o określonej szerokości i położonej pod określonym kątem, której śladem przecięcia płaszczyzną prostopadłą do teoretycznej krawędzi przedmiotu jest odcinek linii prostej. Zaokrągleniem określa się wykonanie na przedmiocie wypukłej powierzchni łączącej dwie powierzchnie przedmiotu schodzące się pod kątem, której śladem przecięcia płaszczyzną prostopadłą do teoretycznej krawędzi przedmiotu jest odcinek łuku o określonym promieniu styczny na końcach do powierzchni przedmiotu. Stępieniem nazywa się zabieg obróbkowy mający na celu usunięcie drobnych ilości materiału z ostrych krawędzi przedmiotu, bez ścisłego określenia rodzaju i położenia katowego otrzymanej powierzchni łączącej dwie powierzchnie przedmiotu schodzące się pod kątem. Natomiast usuwanie zadziorów polega na pozbyciu się z krawędzi przedmiotu wystających, nieregularnych fragmentów materiału powstających podczas procesu wytwarzania [85].

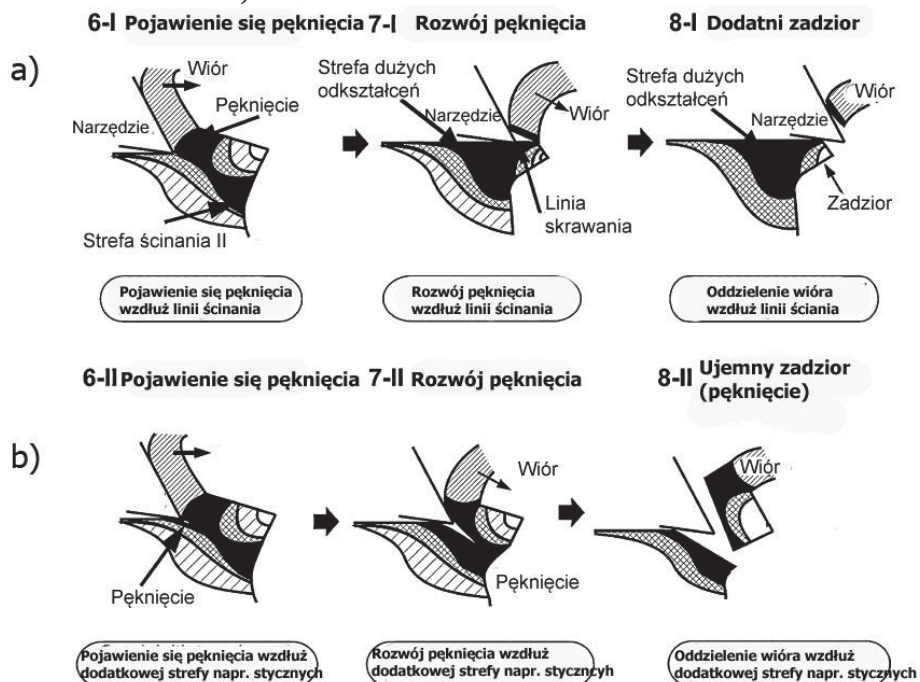
1.3. Podstawy teoretyczne procesu formowania się zadziorów

Newralgicznym miejscem, jeśli chodzi o proces formowania się zadziorów, jest krawędź próbki. W momencie kiedy krawędź skrawająca narzędzia zbliża się do krawędzi próbki może rozpocząć się proces formowania zadziorów. Przypadek skrawania ortogonalnego analizowany był w pracach [37, 101, 105, 14]. Podczas skrawania ortogonalnego proces formowania się zadziorów można podzielić na kilka etapów. Na rysunku 1.4 przedstawiono etapy, w których krawędź skrawająca narzędzia, usuwając materiał, zbliża się do krawędzi przedmiotu. W momencie oddzielania się warstwy skrawanej i przekształcania jej w wiór zachodzą silne odkształcenia sprężyste OS oraz plastyczne OP (1. Skrawanie ciągłe). W chwili, gdy narzędzie zbliża się do krawędzi próbki odkształcenia sprężyste osiągają krawędź próbki (2. Faza wzrostu odkształceń). Następnie odkształcenia plastyczne pojawiają się na krawędzi próbki (3. Inicjacja), rozpoczynając proces silnej deformacji materiału w punkcie obrotu (4. Obrót). Kolejny etap związany jest z powstawaniem zadzioru (5. Formowanie zadzioru).



Rys. 1.4. Zjawiska zachodzące przed procesem formowania się zadzioru [38]

Na rysunku 1.5 przedstawione są etapy formowania się zadzioru w przypadku materiałów plastycznych (rys. 1.5a) oraz materiałów kruchych (rys. 1.5b). W przypadku materiałów plastycznych pojawia się pęknięcie wzdłuż linii, którą przemieszcza się narzędzie skrawające (6 – I Pojawienie się pęknięcia). Pęknięcie to rozwija się aż do momentu osiągnięcia krawędzi materiału skrawanego (7 – I Rozwój pęknięcia), po czym następuje separacja warstwy skrawanej i przekształcenie jej w wiór oraz pojawienie się zadzioru na krawędzi (8 – I Dodatni zadziór).



Rys. 1.5. Zjawiska zachodzące podczas procesu formowania się zadziorów: a) materiały plastyczne, b) materiały kruche [38]

W przypadku materiałów kruchych (Rys. 1.5b) pęknięcie pojawia się wzdłuż dodatkowej strefy naprężeń stycznych (6 – II Pojawienie się pęknięcia), poniżej linii ścinania. Pęknięcie to rozwija się aż do momentu osiągnięcia krawędzi materiału (7 – II Rozwój pęknięcia). Ostatnim etapem jest oddzielenie się wióra wzdłuż dodatkowej strefy naprężeń stycznych i utworzenie podcięcia lub podcięcia z zadziorem (8 – II Ujemny zadziór).

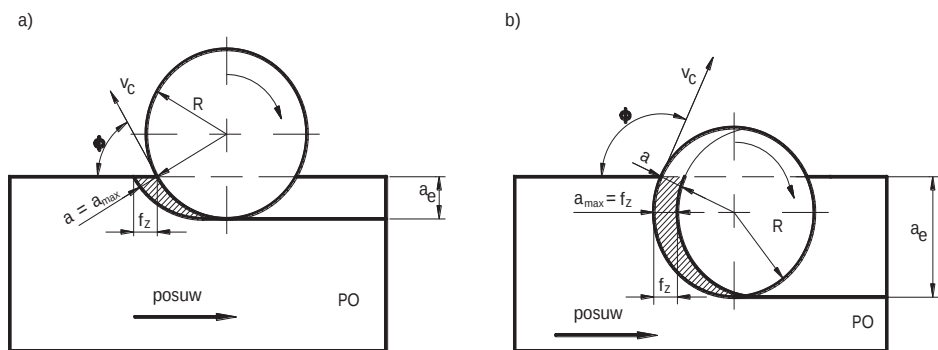
Prowadzona była także analiza formowania się zadziorów w przypadkach różnych od skrawania ortogonalnego. W pracy [39] analizowano wpływ kąta pochylenia krawędzi skrawającej λ na proces formowania się zadziorów. Zauważono, że propagacja pęknięcia w momencie, gdy krawędź skrawająca narzędzia osiąga krawędź próbki jest inna w porównaniu ze skrawaniem ortogonalnym. Ponadto, w zależności od kąta pochylenia krawędzi skrawającej, wzdłuż krawędzi badanej próbki może nastąpić nałożenie się dwóch zjawisk – występowania zadzioru oraz pęknięcia poniżej linii ścinania.

Inne podejście do złożonego procesu skrawania przedstawiono w pracy [54], gdzie wykorzystano specjalną głowicę frezarską z jednym ostrzem z możliwością zmiany ustawienia płytki skrawającej. Wykazano, że jednym z kryteriów przewidywania występowania zadziorów, a także ich wymiarów, jest kolejność wyjścia charakterystycznych punktów krawędzi skrawającej ze strefy skrawania. Przeanalizowano sześć różnych sekwencji wyjścia (EOS – ang. Exit Order Sequence) i ich wpływu na grubość i wysokość zadzioru. Sterując geometrią wykazano, że istnieje możliwość minimalizacji występowania zadziorów, a tym samym zmniejszenia kosztów i pracochłonności usuwania zadziorów w dalszych etapach produkcji.

Oprócz parametrów technologicznych skrawania, mających wpływ na proces formowania się zadziorów, bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na wysokość zadziorów jest kąt wyjścia, co analizowane było w pracach [13, 38, 70, 93]. Kąt wyjścia zawarty między wektorem prędkości skrawania v_c , a krawędzią próbki w miejscu wyjścia narzędzia ze strefy skrawania można wyznaczyć z zależności:

$$\Phi = \arccos\left(\frac{R-B}{R}\right) \quad (1.1)$$

Na rysunku 1.6 przedstawiono graficzną prezentację kąta wyjścia Φ . Jeżeli szerokość frezowania B jest mniejsza od promienia narzędzia R wtedy przy wyjściu grubość warstwy skrawanej osiąga maksimum $a = a_{\max}$. W zależności od promieniowego udziału narzędzia w procesie skrawania zmienia się kąt wyjścia. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem kąta wyjścia wzrasta wysokość zadziorów. W pracy [13] uzależniono także kształt zadziorów od kąta wyjścia. Wyznaczono przedziały kąta Φ , w których pojawiał się określony rodzaj zadziorów.



Rys. 1.6. Kąt wyjścia

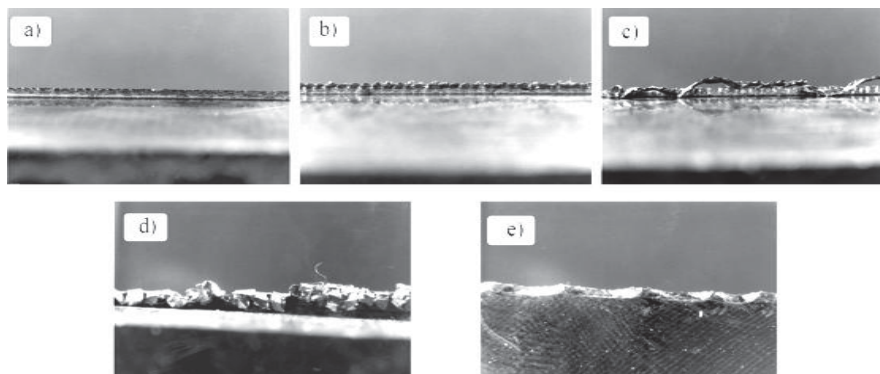
Analiza procesu formowania się zadziórów doprowadziła do opracowania metod zmierzających do minimalizowania zadziórów. Lepszym rozwiązaniem jest minimalizacja bądź niekiedy wyeliminowanie zadziórów na etapie obróbki niż usuwanie ich w kolejnych operacjach [18, 19, 40]. Często producenci narzędzi skrawających podają zalecenia co do strategii obróbkowej jeśli chodzi o wejście i wyjście w materiał [119]. Przejście narzędzia można podzielić na trzy fazy: wejście, faza przejścia narzędzia przez materiał oraz wyjście. Wyjście z materiału jest najbardziej wrażliwą fazą, dlatego istotne jest utrzymanie frezu w stałym zaangażowaniu, a także wszędzie, gdzie jest to możliwe zaleca się frezowanie współbieżne, które prowadzi do zmniejszenia wysokości zadziórów.

1.4. Charakterystyka i klasyfikacja zadziórów powstałych po obróbce skrawaniem

Wytwarzanie poprzez obróbkę skrawaniem odgrywa wiodącą rolę w kształtowaniu części maszyn. Trendy rozwojowe widoczne w obróbce frezowaniem na pierwszy plan wysuwają skrawanie z dużymi prędkościami (HSC ang. High Speed Cutting) oraz skrawanie wysokowydajne (HPC ang. High Performance Cutting) [1, 72, 74]. W przemyśle lotniczym, uzyskanie pożądanego kształtu elementu często związane jest z usunięciem ponad 90% materiału z półfabrykatu [92]. Niestanny rozwój narzędzi skrawających (geometria, materiały narzędziowe, powłoki) pozwala poprzez obróbkę frezowaniem realizować obróbkę wykończeniową przedmiotów, także w stanie utwardzonym. Dlatego też frezowanie może być ostatnim zabiegiem w procesie kształtowania finalnego wyrobu [75]. Jednak podczas obróbki frezowaniem, jak również wszystkich odmian obróbki skrawaniem, w momencie wyjścia narzędzia ze strefy skrawania powstaje niepożądane zjawisko formowania się zadziórów w postaci odkształconego plastycznie materiału na krawędziach przedmiotów wytwarzanych w czasie obróbki.

Obecnie istnieje wiele różnych definicji i klasyfikacji typów zadziorów w zależności od procesu wytwarzania, kształtu zadziorów, mechanizmu ich formowania oraz rodzaju obróbki. Jedną z pierwszych klasyfikacji zadziorów [32] bazująca na mechanizmie ich formowania się dzieliła je na cztery grupy. Zadziór Poisson'a (ang. Poisson burr) powstawał na skutek bocznego spęczania materiału wzdłuż obrabianej krawędzi, wywołanego naprężeniami ściskającymi powodowanymi przez narzędzie skrawające. Drugi typ to zadziór zwinięty (ang. roll-over burr), który w gruncie rzeczy stanowi nieodcięty przez narzędzie wiór w momencie wyjścia ze strefy skrawania. Kolejnym rodzajem jest zadziór powstały na skutek rozerwania materiału (ang. tear burr). Zadziór ten najczęściej tworzy się w przypadku operacji wykrawania i jest rezultatem deformacji materiału na granicy stempel – matryca. Podobnie jak zadziór zwinięty powstaje na krawędzi obrabianego przedmiotu w miejscu wyjścia narzędzia. Wielkość zadzioru zależy od luzu między stemplem a matrycą. Ostatni rodzaj zadzioru (ang. cut-off burr) definiowany jest jako fragment materiału pozostający po procesie oddzielania przedmiotu obrabianego od półfabrykatu. Zjawisko to najczęściej ma miejsce podczas cięcia na pile lub frezem palcowym, a także obserwowane jest w osi przedmiotów odcinanych podczas toczenia.

W literaturze można spotkać wyniki badań, w których zaprezentowano pięć typów zadziorów, podzielonych ze względu na kształt [57]. Pierwszy typ (rys. 1.7a) (ang. knife-type), charakteryzujący się ostrą prostoliniową krawędzią u szczytu zadzioru, rozciąga się nieprzerwanie wzdłuż całej krawędzi, na której występuje. Drugi typ zadzioru (rys. 1.7b) silnie pofalowany wzdłuż całej krawędzi nazywany jest zadziorem piłkowym (ang. saw-type). Kolejny typ zadzioru (rys. 1.7c) o charakterze nieregularnym nazywany jest zadziorem złamanym (ang. breakage burr). Jego kształt niekiedy utrudnia pomiar i precyzyjne wyznaczenie wysokości zadzioru. Czwarty typ (rys. 1.7d) określany jest jako zadziór wywinięty (ang. curl type burr). Może on powstawać przy dużym zużyciu ostrza. Piąty typ zadzioru (rys. 2.7e) to zadziór falisty (wave-type burr) mogący pojawiać się w zakresie dużych głębokości skrawania. Zbliżona klasyfikacja przedstawiona została w pracy [13]. W niniejszej pracy, z uwagi na właściwości badanych materiałów (stopy aluminium), zaobserwowano dodatkowo pęknięcie krawędzi poniżej płaszczyzny toru narzędzia oraz zadziór wtórny. Dodatkowo wykazano, że zmiana kształtu zadziorów związana była z kątem wyjścia narzędzia ze strefy skrawania.



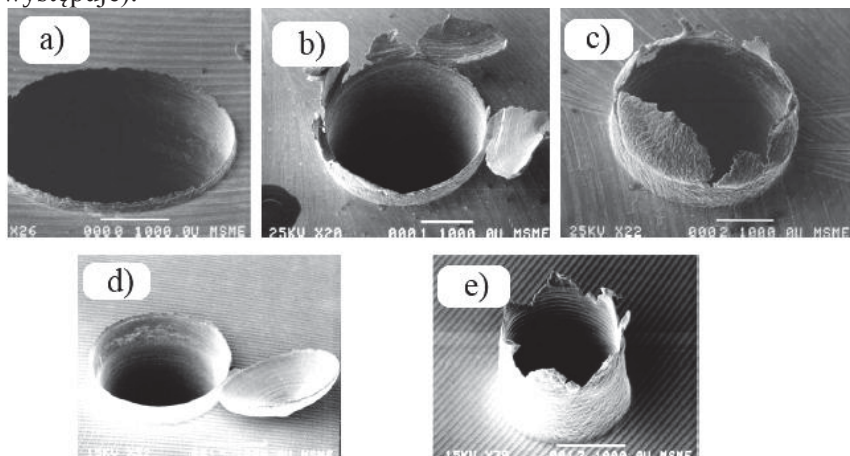
Rys. 1.7. Typy zadziorów wg [57]

Bardzo dużo uwagi w literaturze światowej poświęcone jest powstawaniu zadziorów podczas wiercenia [9, 45, 49, 59, 71, 88]. Jest to spowodowane tym, że z uwagi na charakter obróbki, niemożliwe jest wyeliminowanie zadziorów na etapie wykonywania otworów.

Zadziorzy stanowią duże zagrożenie w przypadku elementów ruchomych. Oddziaływanie narzędzia na materiał obrabiany może spowodować zmiany właściwości materiału. Większość ciepła w obróbce odprowadzana jest wraz z wiórami. Temperatura może doprowadzić do częściowego zahartowania wiórów. Te wióry, które nie zostaną odseparowane od materiału obrabianego, stanowią rodzaj zadzioru. Taki twardy i kruchy materiał stanowi bardzo duże zagrożenie w przypadku konstrukcji, w których otwory służą do transportowania jakiegoś medium. Znane są przypadki pojawienia się zadziorów w otworach wtryskiwaczy paliwa mogące doprowadzić do uszkodzenia silnika [2]. W większości przypadków potrzebna jest dodatkowa operacja w celu usunięcia niepożądanych zadziorów.

Klasyfikacja zadziorów powstających podczas wiercenia dotyczy kształtu, mechanizmu formowania, miejsca występowania oraz rozmiaru zadziorów. Wymieniane w literaturze czynniki, które wpływają na te parametry zadziorów, to: geometria ścinu wiertła, wartość podwójnego kąta przystawienia, kąt wzniosu linii śrubowej rowków wiórowych, kąt przystawienia pomocniczej krawędzi skrawającej, właściwości materiału, parametry obróbki, zużycie narzędzi [45]. Na rysunku 1.8 przedstawiono różne typy zadziorów, pojawiające się podczas wiercenia, sklasyfikowane ze względu na ich kształt. Ze względu na miejsce występowania dzielą się one na wejściowe, wyjściowe oraz międzywarstwowe. Zadziorzy wejściowe pojawiają się w momencie, gdy wiertło wchodzi w materiał. Z reguły charakteryzują się niewielkimi rozmiarami, a ich usunięcie odbywa się na etapie fazowania krawędzi otworu. Największe zagrożenie i trudności w usunięciu sprawiają zadziorzy wyjściowe, szczególnie jeśli występują w trudno dostępnych miejscach. Z reguły ten rodzaj zadziorów jest przedmiotem badań i impulsem do opracowywania geometrii ostrza w celu minimalizowania zadzio-

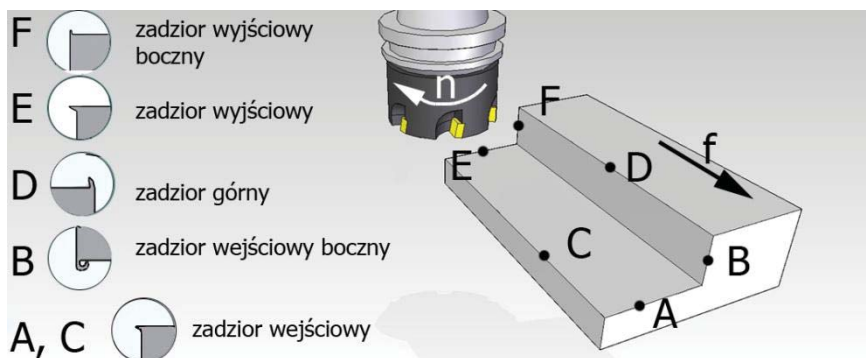
rów bądź wprowadzania innowacyjnych narzędzi i metod dedykowanych do usuwania zadziorów wyjściowych [24]. Zadziory międzywarstwowe mogą wystąpić na styku dwóch warstw i zależą od kombinacji materiałów górnej i dolnej warstwy (lub wielu warstw), a także grubości spoiwa pomiędzy nimi (jeżeli występuje).



Rys. 1.8. Rodzaje zadziorów występujących podczas wiercenia: a, d) jednolity, b) przejściowy, c, e) koronowy [45]

Dużym problemem z punktu widzenia występowania zadziorów jest obróbka otworów w kompozytach. Oprócz występowania zadziorów istnieje zagrożenie rozwarstwienia kompozytu wskutek sił generowanych przez wiertło w momencie wyjścia z materiału. Charakter zadziorów może świadczyć o rozwarstwieniu kompozytu [84].

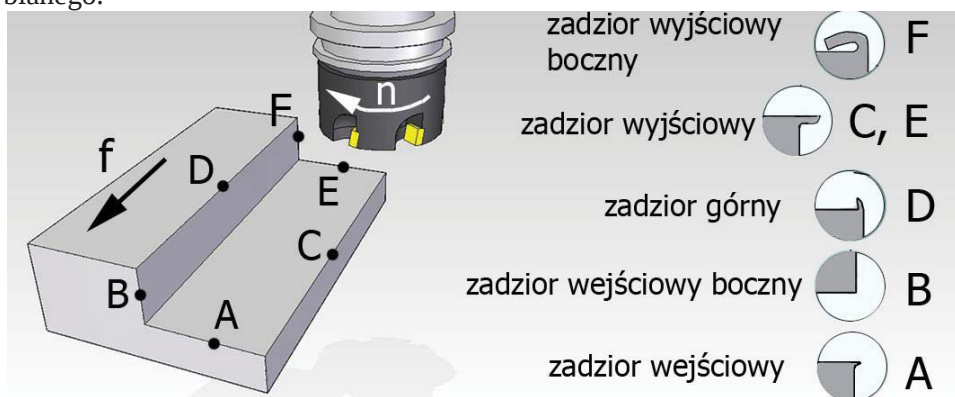
Dosyć problematyczna jest kontrola procesu formowania się zadziorów w przypadku otworów w wyrobach precyzyjnych o małych wymiarach. Istnieje wiele pozycji w literaturze światowej skupiających się na procesie formowania i kontroli zadziorów w przypadku miniaturowych wyrobów [7, 55, 103].



Rys. 1.9. Typy zadziorów powstających podczas frezowania współbieżnego

Podczas frezowania, na każdej z nowo utworzonych krawędzi, może pojawić się zadziór. W zależności od miejsca występowania i rodzaju obróbki zadziory te przyjmują różne kształty. Podczas frezowania współbieżnego zadziór wejściowy pojawia się na przecięciu płaszczyzny wejściowej i płaszczyzny obrobionej (rys. 1.9 oznaczenie A, C). Z racji charakteru pracy narzędzia w miejscu tym ostrze wchodzi do strefy skrawania, a ścinany materiał w przeważającej części przekształcany jest w wiór, natomiast zadziory charakteryzują się niewielkimi wartościami. W zależności od osiowej głębokości skrawania różny jest udział powierzchni walcowej frezu czołowego w procesie usuwania materiału. Na powierzchni przejściowej przedmiotu obrabianego, znajdującej się pomiędzy powierzchnią obrabianą a obrobioną, pojawiają się przy wejściu i wyjściu zadziory boczne (rys. 1.9 oznaczenie B, F). Natomiast na powierzchni obrabianej pojawiają się zadziory górne (oznaczenie D). Podczas gdy frez wychodzi z materiału na powierzchni obrobionej może tworzyć się zadziór wyjściowy (oznaczenie E).

Przy frezowaniu przeciwbieżnym największymi wymiarami cechuje się zadziór wyjściowy (rys. 1.10 oznaczenie C, E). W tym przypadku powstawanie zadzioru może być tłumaczone występowaniem dwóch różnych zjawisk. Pierwsze – to odgięty plastycznie materiał poniżej powierzchni obrobionej na skutek działania ostrza narzędzia, które wychodzi ze strefy skrawania. Drugie zjawisko to materiał pochodzący od wiórów tworzonych w obrębie wyjścia, które nie zostały usunięte (odcięte przez ostrza skrawające). O wysokości zadziorów w przypadku obu tych zjawisk w dużej mierze decyduje rodzaj materiału obrabianego.



Rys. 1.10. Typy zadziorów powstających podczas frezowania przeciwbieżnego

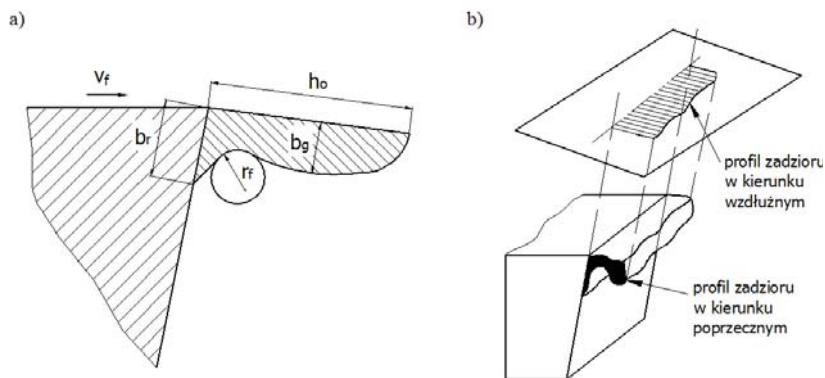
Obróbka HSC jest często ostatnim procesem (w odróżnieniu od HPC) kształtowania gotowego wyrobu. Po tej operacji przedmioty będące elementami składowymi większych konstrukcji podlegają procesom montażowym. Dlatego istotny jest stan krawędzi przedmiotów, który nie stwarza problemów na tym etapie.

Wyróżnić można także cechy zadziorów określające łatwość ich usuwania. Pierwszą grupę stanowi rodzaj połączenia z materiałem podłoża, uwarunkowany właściwościami materiału wyjściowego lub właściwościami nabytymi w czasie procesu obróbki (np. zgniot może powodować utwardzenie materiału i wzrost kruchości). Z uwagi na to, klasyfikuje się zadziory, których podstawę (miejsce połączenia z materiałem) określa się jako:

- a) sztywną i grubą,
- b) cienką i dostatecznie giętą,
- c) cienką i kruchą.

Drugą grupę stanowi miejsce, w którym zadziory występują. Najłatwiej usuwa się zadziory z zewnętrznych naroży i ostrych krawędzi, nieco trudniej usuwa się je z krawędzi utworzonych przez powierzchnie tworzące kąt rozwarty i z środkowych obszarów powierzchni płaskich. Najtrudniej usuwa się zadziory z krawędzi położonych w głębokich otworach nieprzelotowych, na powierzchniach wklęsłych i w narożach wewnętrznych.

Trzecim istotnym czynnikiem wpływającym na łatwość usuwania zadziorów jest ich wysokość.



Rys. 1.11. Geometria zadzioru: a) przekrój poprzeczny, b) profil wzdłużny [87]

Pracochłonność usuwania zadzioru można także przedstawić za pomocą współczynnika. W literaturze [87] można spotkać teoretyczne rozważania dotyczące pracochłonności usuwania zadziorów. Na rysunku 1.11 przedstawiono geometrię zadzioru. Znając wszystkie parametry charakterystyczne można wyznaczyć współczynnik zadzioru z zależności:

$$g = \frac{4 \cdot b_r + 2 \cdot r_f + b_g + h_0}{8} \quad (1.2)$$

gdzie:

b_r – grubość podstawy zadzioru (burr root thickness) – mierzona w przekroju poprzecznym,

h_o – wysokość zadzioru (burr height) – zdefiniowana jako odległość pomiędzy krawędzią nominalną i najdalej odsuniętym punktem, mierzona w przekroju poprzecznym,

r_f – promień podstawy zadzioru (burr root radius) – który określa pozycję środka okręgu stycznego do podstawy zadzioru,

b_g – grubość zadzioru (burr thickness) – mierzona w kierunku równoległym do podstawy zadzioru w przekroju poprzecznym.

W zależności na współczynnik zadzioru (1.2) wartości przy grubości b_r oraz promieniu podstawy r_f podnoszą wpływ tych składowych, w efekcie zwiększając wartość współczynnika zadzioru. Im większa jest podstawa zadzioru stanowiąca o sile jego utwierdzenia do materiału rodzimego, tym trudniej go usunąć.

1.5. Przegląd metod obróbki krawędzi

Powstawanie zadziorów jest zjawiskiem występującym w procesie obróbki skrawaniem. W momencie oddzielania warstwy skrawanej i przekształcania jej w wiór występuje szereg zjawisk, takich jak: odkształcenia sprężyste, tarcie, wydzielanie się ciepła itp. W strefie kontaktu narzędzia skrawającego z przedmiotem obrabianym występują silne odkształcenia plastyczne, będące fundamentem procesu formowania się zadziorów.

Istnieje wiele metod usuwania zadziorów. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć gratowanie ręczne, szlifowanie, frezowanie frezami pilnikowymi. Spotyka się także usuwanie zadziorów z przedmiotów umieszczonych w medium ściernym. Zalicza się do nich obróbkę rotacyjno-ścierną, przetłoczno-ścierną, magneto-ścierną czy też strumieniowo-ścierną [2, 22, 23]. Z uwagi na stopień zautomatyzowania, proces usuwania zadziorów można podzielić na ręczny, ręczno-maszynowy i maszynowy.

1.5.1. Ręczna obróbka krawędzi

Usuwanie zadziorów w sposób ręczny znajduje zastosowanie głównie w produkcji jednostkowej. Jednak w pewnych sytuacjach, np. w przypadku przedmiotów o dużych gabarytach i skomplikowanym kształcie (przemysł lotniczy), stosuje się także w produkcji seryjnej. Najpowszechniejszymi i zarazem najstarszymi narzędziami do usuwania zadziorów są pilniki. Dedykowanymi narzędziami do ręcznego usuwania zadziorów są różnego rodzaju gratowniki. Istnieje też grupa narzędzi do wykonywania fazek wewnętrznych i zewnętrznych rur. Ręczna obróbka krawędzi nie stanowi przedmiotu rozważań teoretycznych, stąd brak publikacji naukowych dotyczących tego zagadnienia. Natomiast producenci tego typu narzędzi często prześcigają się w rozwiązaniach konstrukcyjnych, poprawiających ergonomię pracy, bezpieczeństwo, zapewniających skuteczne usuwanie zadziorów. Nowe rozwiązania są często przedmiotem zgłoszeń

patentowych. Często spotykanym, wygodnym rozwiązaniem ręcznych gratowników jest odsadzone, obrotowe ostrze, które będąc zamocowane mimośrodowo w stosunku do oprawki, dopasowuje się do krzywizny obrabianej krawędzi. Obróbka ręczna jest żmudnym i kosztownym procesem, nie zawsze powtarzalnym, bazującym na doświadczeniu pracowników wykonujących operacje usuwania zadziorów na stanowiskach ślusarskich. Podczas ręcznego usuwania zadziorów nieuniknione są przypadki głębszego niezamierzonego wcięcia w materiał, które mogą być przyczyną pęknięć hartowniczych lub miejscem pęknięć zmęczeniowych.

1.5.2. Ręčno-maszynowa obróbka krawędzi

Bardziej wydajnym procesem jest obróbka ręczno – maszynowa przy użyciu szlifierek taśmowych lub narzędzi szybkoobrotowych, które trzymane są w dłoni. Obróbka krawędzi na szlifierek taśmowych stosowana jest w przypadku przedmiotów o niewielkich gabarytach, przy produkcji jednostkowej. Natomiast obróbka za pomocą narzędzi szybkoobrotowych stosowana jest w przypadku przedmiotów o większych gabarytach, gdzie często łatwiej jest wykonywać precyzyjne ruchy szlifiereką ręczną wzdłuż obrabianych krawędzi przedmiotów. Tego typu obróbka stosowana jest zarówno w produkcji jednostkowej, jak również w przypadku obróbki seryjnej. Część roboczą szybkoobrotowych narzędzi mogą stanowić ściernice, frezy pilnikowe, szczotki trzpieniowe itp. Obróbce ręczno-maszynowej krawędzi na szlifierek niekiedy towarzyszą silne drgania. Długotrwałe narażenie pracowników na działanie drgań może przyczynić się do zespołu chorób wibracyjnych. Ponadto, jak w przypadku obróbki ręcznej, mogą występować niekontrolowane ruchy niosące ryzyko związane z brakiem powtarzalności procesu.

1.5.3. Maszynowa obróbka krawędzi

Biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne najbardziej pożądana jest obróbka zautomatyzowana. Szeroko stosowaną grupą metod zautomatyzowanych są metody, w których pracę wygładzania krawędzi i usuwania zadziorów pełni medium ścierne. Medium ścierne w zależności od rodzaju obróbki może być w różnej postaci. Najczęściej stosowaną metodą tego typu w przemyśle jest obróbka wibrościerna. Przedmioty poddane obróbce wibrościerniej umieszcza się w specjalnych wygładzarkach wibracyjnych wraz z materiałem ściernym w postaci kształtek ściernych lub polerskich. Urządzenie wykonuje ruchy wibracyjne o zadanej częstotliwości i amplitudzie. Z reguły obróbka jest prowadzona na mokro z udziałem płynu wspomagającego, którego zadaniem jest wypłukiwanie produktów obróbki. Problemem w początkowej fazie uruchomienia produkcji jest odpowiedni dobór parametrów obróbki wibrościerniej. Opis matematyczny procesu jest dosyć złożony, stąd wdrożenie procesu obróbki wibrościerniej po-

przedzone jest z reguły próbami eksperymentalnymi, prowadzonymi w celu wyznaczenia pożądanych parametrów dla konkretnego przypadku. Każda zmiana parametrów wyjściowych (np. zmiana chropowatości powierzchni przedmiotów po obróbce wibrościerniej) wymaga ponownych prób eksperymentalnych.

Autorzy pracy [36] przedstawili teoretyczne podstawy procesu obróbki wibrościerniej, prezentując matematyczny model opisujący wynikową chropowatość powierzchni i naddatek materiałowy na obróbkę wibrościerną. Dodatkowo zaproponowali formułę optymalnego procesu z punktu widzenia minimalizacji czasu i kosztów obróbki. Model matematyczny został zweryfikowany poprzez eksperyment.

W pracy [108] badano normalne siły kontaktowe wywierane przez medium obróbkowe na przedmioty ze stopów aluminium AA1100-O oraz AA6061-T6 poddane obróbce wibrościerniej z uwzględnieniem zmian chropowatości powierzchni oraz twardości obrabianych materiałów. Głównymi zmiennymi były rozmiar kształtek ściernych, intensywność smarowania oraz czas trwania obróbki wibracyjnej. Stwierdzono, że główny wpływ na zmianę chropowatości i twardości mają warunki smarowania, chropowatość wyjściowa i wielkość kształtek ściernych, a to z kolei ma wpływ na wzajemne oddziaływanie między elementami ściernymi a przedmiotem obrabianym, a tym samym wpływa na stopień odkształceń plastycznych przypadających na jedno uderzenie. Stwierdzono, że zastosowanie smarowania zmniejsza twardość po obróbce. Spowodowane jest to mniejszym współczynnikiem tarcia i ślizganiem się kształtek po przedmiocie obrabianym. Poprzez to głębokość oddziaływania przypadająca na jedno uderzenie zmniejsza się, co ma wpływ na zmniejszenie stopnia umocnienia.

W publikacji [3] przedstawiono wyniki badań dotyczących sił kontaktowych i zjawisk tribologicznych podczas obróbki wibracyjnej stopów aluminium. Uzyskane wyniki porównano z wcześniejszymi wynikami badań, otrzymanymi dla wygładzarki o innych parametrach (częstotliwość drgań, amplituda, pojemność zasobnika). Zgodność wyników sugeruje, że wyniki badań mogą być uogólnione i nie muszą być ściśle skorelowane z konkretnym typem obrabiarki i parametrami obróbki wibrościerniej.

W pracy [20] wykorzystano specjalny system do zastosowania testu Almeida w bębnie maszyny wibrościerniej. Stanowisko pozwalało na zamocowanie znormalizowanych pasków aluminiowej blachy w specjalnym podciśnieniowym uchwycie, który był odseparowany od układu wibratora. Pozwoliło to na sztywne zamocowanie badanych próbek, dając powtarzalne warunki dla wszystkich prób. Po określonym czasie oddziaływania medium ściernego na próbki, w warstwie wierzchniej pojawiały się naprężenia własne powodujące ugięcie próbek. Następnie dokonano pomiaru ugięcia próbek, które jest miarą efektu obróbki wibrościerniej. Jako medium obróbkowe zastosowano kulki ze stali niestopowej. W celu potwierdzenia hipotezy, że główny wpływ na ugięcie próbek ma składowa normalna siły uderzenia podczas obróbki wibrościerniej, zasymulowano proces nagniatania, wykorzystując specjalne stanowisko, w którym kulki stoso-

wane jako medium w obróbce wibrościerniej w sposób grawitacyjny uderzały w próbki usytuowane tak, aby powierzchnia znajdowała się prostopadle do wektora uderzenia.

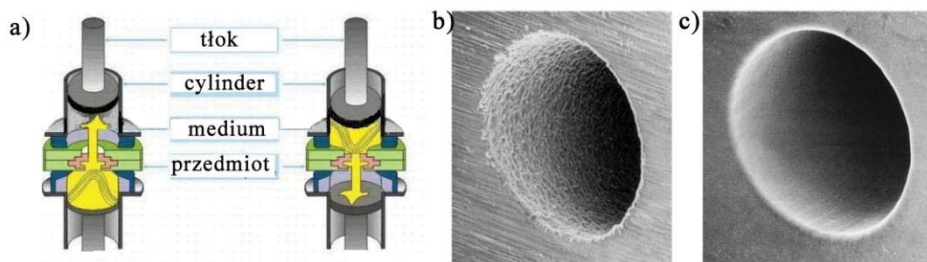
W artykule [21] przedstawiono model procesu odkształcenia plastycznego podczas uderzenia w obróbce wibracyjnej. Model opracowany przy użyciu metody elementów skończonych, pozwala na określenie współczynnika restytucji, wartości naprężeń własnych, wielkości odkształceń plastycznych i profilu wgniecenia. Maksymalne ugięcie próbek w teście Almena może pozwolić na wyznaczenie parametrów obróbki wibracyjnej, przy której następuje maksymalna prędkość uderzenia.

Problemem obróbki wibrościerniej są odpady poszlifierskie, których tempo powstawania jest duże. Specyfika procesu obróbki wibrościerniej powoduje, że intensywny proces ścierny zachodzi nie tylko na granicy medium ściernego – przedmiot obrabiany, ale głównie pomiędzy kształtkami ściernymi czy polerskimi. Kształtki te stopniowo zmniejszają swoje wymiary, do osiągnięcia wymiarów granicznych, po uzyskaniu których są wymieniane na nowe. Jak wykazały badania [79], istnieje problem z zagospodarowaniem odpadów poszlifierskich. W niektórych przypadkach niska zawartość metali w odpadach uniemożliwia ich odzysk lub jest to proces nieopłacalny. Ponadto odpady z obróbki wibrościerniej nie spełniają norm w odniesieniu do wartości granicznych rozpuszczonego węgla organicznego oraz strat przy prażeniu, co nie dopuszcza do ich składowania. Często w celu przyspieszenia procesu i osiągnięcia wymaganych parametrów krawędzi proces obróbki wibrościerniej wspomaga się roztwarzaniem chemicznym.

Istnieją pewne ograniczenia obróbki wibrościerniej. Z ekonomicznego punktu widzenia obróbka ta zalecana jest do niewielkich przedmiotów. W przypadku dużych elementów liczba przedmiotów mogących jednocześnie zmieścić się w zasobniku jest ograniczona. Wiele części wytwarzanych w przemyśle lotniczym (wręgi, wsporniki) osiąga wymiary, dla których obróbka metodą wibrościerną jest nieekonomiczna lub w ogóle nie jest możliwa.

Inną metodą obróbki krawędzi jest metoda przetłoczno-ścierna, która polega na tym, że pod wpływem wywołanego ciśnienia pasta ścierna przemieszcza się względem trudnodostępnych powierzchni lub krawędzi obrabianych. Obróbka ta może odbywać się w cyklu jedno lub dwukierunkowym. Schemat obróbki dwukierunkowej przedstawiono na rys. 2.12a. Pasta ścierna przepływa pod ciśnieniem przez otwory w przedmiocie obrabianym. Na efektywność procesu wpływają właściwości past ściernych, które składają się z osnowy (np. lepko-sprężystego polimeru) oraz ziaren ściernych. Ziarna ściernie wykonywane są z węglików krzemu, węglików boru, tlenku glinu czy diamentu. Ważnymi parametrami past jest ich lepkość oraz nieadhezyjność. Poza parametrami związanymi z pastami istotny, z punktu widzenia skuteczności metody, jest stopień skomplikowania geometrycznego przedmiotu i materiał, z którego jest wykonany. Urządzenia do realizacji tego procesu są każdorazowo dostosowywane do

konkretnego zadania technicznego. Wymagane parametry związane z przedmiotem obrabianym (chropowatość powierzchni, stępienie krawędzi) są sterowane poprzez rodzaj pasty ścierniej, ciśnienie wywierane przez tłok, prędkość przepływu pasty oraz czas obróbki.



Rys. 1.12. Obróbka przetłoczno-ścierna: a) schemat obróbki dwukierunkowej, b) otwór przed obróbką, c) otwór po obróbce [26]

Ważnym parametrem procesu AFM (ang. Abrasive Flow Machining), podawanym analizie w pracach [4, 34], są siły występujące podczas usuwania zadziorów i wygładzania krawędzi metodą przetłoczno-ścierną. Wykazano między innymi, że ciśnienie wytłaczania, mające bezpośredni wpływ na siły osiowe i promieniowe, wprost proporcjonalnie przekłada się na procentowe zmniejszenie parametru chropowatości Ra.

W pracach [26, 27] przedstawiono przegląd zmodyfikowanych odmian obróbki przetłoczno-ścierniej. Jedną z odmian obróbki AFM polegała na jednoczesnym obracaniu przedmiotu obrabianego podczas przetłaczania pasty ścierniej, co pozwoliło na skrócenie czasu obróbki. W innej, magnetycznej odmianie, wykorzystuje się ferromagnetyczne ziarna ceramiczno-węglkowe, co zwiększa siły promieniowe poszczególnych ziaren oraz pozwala na kontrolowane orientowanie ziaren ściernych względem obrabianej powierzchni. Odmiana ta pozwalała na zwiększenie wydajności procesu. W kolejnej odmianie wykorzystywano elektrolit polimerowy jako nośnik ziaren ściernych. Jest to oryginalne rozwiązanie autorów pracy [26, 27]. Współdziałanie obróbki ścierniej i roztwarzania anodowego pozwoliło na wzrost wydajności procesu. Do podstawowych wad metody AFM należy wolne tempo obróbki wykończeniowej powierzchni i krawędzi, stąd wszystkie hybrydowe metody mają na celu zwiększenie wydajności obróbki AFM. Ponadto lokalne zmiany ciśnienia czynnika ściernego, spowodowane zmiennymi przekrojami przepływu, powodują zmiany sił tarcia i podniesienie temperatury. To przyczynia się do zmian lepkości pasty, dlatego koszty metod AFM wzrastają przez dodatkowe oprzyrządowanie służące do schłodzenia obrabianych części [28].

W pracy [30] badano wpływ temperatury na spadek lepkości medium ściernego i wydajność procesu. Zauważono, że wzrost temperatury pasty ścierniej powoduje zmniejszenie lepkości i tendencję do obracania się ziaren ściernych,

będących w kontakcie z przedmiotem obrabianym, co znacznie obniża wydajność procesu.

Celem podstawowym obróbki AFM jest obróbka wykończeniowa powierzchni trudno dostępnych miejsc. Celem dodatkowym jest usunięcie zadziórów i zaokrąglenie krawędzi. W przypadku przedmiotów ze stopów aluminium i magnezu kształtowanych poprzez frezowanie, jakość powierzchni jest często na tyle satysfakcjonująca, że frezowanie jest ostatnią operacją w procesie kształtowania wyrobu. Jedynie krawędzie takich przedmiotów wymagają dalszej obróbki, dlatego aplikacja obróbki AFM uzasadniona jest w przypadku specyficznej grupy przedmiotów, np. w przemyśle motoryzacyjnym w przypadku otworów w korpusie wtryskiwacza silnika wysokoprężnego. Medium ściernie w procesie AFM ulega zużyciu. Oprócz tego, że ostre krawędzie ziaren ściernych ulegają stępieniu, dodatkowe kryterium zużycia może stanowić ilość produktów obróbki pochodzących od przedmiotów obrabianych. Przedwczesna wymiana medium podraża koszty, natomiast zbyt późna wpływa na brak powtarzalności procesu [73].

Inną metodą wykorzystującą medium ściernie do wykonania pracy usuwania zadziórów jest obróbka magneto-ścierna. Obróbka polega na wzajemnym ruchu między medium ściernym a przedmiotem obrabianym. Istnieją dwie odmiany tej obróbki. Pierwszy sposób polega na tym, że medium ściernie o właściwościach magnetycznych znajduje się w stałym polu magnetycznym, natomiast przedmiot obrabiany może wykonywać ruch obrotowy, posuwisto zwrotny lub najczęściej kombinację tych dwóch ruchów. Drugi sposób polega na tym, że przedmiot obrabiany jest nieruchomy natomiast ziarna ściernie o właściwościach magnetycznych są „napędzane” przez wirujące pole magnetyczne. Ziarna ściernie omiatając przedmiot obrabiany usuwają zadziory, wprowadzając dodatkowy efekt polerowania. Obróbka ta charakteryzuje się niewielkimi siłami, stąd ubytek materiału jest niewielki, nie przekracza z reguły kilkunastu mikrometrów. Obróbka MAF (ang. Magnetic Abrasive Finishing) często znajduje zastosowanie do wykończenia trudno dostępnych wewnętrznych powierzchni [109]. Stosowana jest także do miniaturowych części, których ścianki mogłyby ulec uszkodzeniu podczas usuwania zadziórów bardziej inwazyjnymi metodami [42]. Dlatego też rozważania teoretyczne stosowania obróbki magneto-ścierniej dotyczą procesu usuwania zadziórów w przypadku wytwarzania precyzyjnych elementów, gdzie wymagane jest niewielkie oddziaływanie na przedmiot obrabiany.

W pracy [48] wykorzystano induktor elektromagnetyczny do badania procesu usuwania mikrozadziórów. Analizowano wpływ ilości proszku magnetycznego, cieczy obróbkowej, prędkości obrotowej i posuwowej układu wytwarzającego pole magnetyczne na efekty obróbki. Oprócz skuteczności usuwania zadziórów badano również chropowatość powierzchni. Jako medium ściernie zastosowano proszek żelaza.

W artykule [112] przedstawiono wyniki badań wpływu obróbki MAF przy wykorzystaniu wirującego pola magnetycznego na jakość wewnętrznych po-

wierzchni i krawędzi. Analizowano wpływ pola magnetycznego na siły w procesie obróbki i zachowanie się medium ściernego. Zaproponowano również metodę monitorowania procesu poprzez pomiar momentu obrotowego generowanego przez krawędzie ziaren ściernych będących w kontakcie z obrabianą powierzchnią. Sposób ten pozwala na kontrolowanie procesu wykończenia powierzchni. Zauważono, że rodzaj pola magnetycznego może mieć wpływ na uporządkowanie ruchu ziaren ściernych. Regularny ruch ziaren ściernych przyczynia się do uzyskania określonej kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni, natomiast ruch rozproszony pozwala przyspieszyć proces usuwania materiału.

W pracy [110] przedstawiono wpływ obróbki MAF na właściwości eksploatacyjne łożysk ślizgowych. Analizie poddano oddziaływanie stałego pola magnetycznego na ferromagnetyczny przedmiot. Współdziałanie pola magnetycznego i ciepła obróbki przyczyniło się do uzyskania korzystnych właściwości warstwy wierzchniej po obróbce magneto-ścierniej, a w konsekwencji do wzrostu wytrzymałości na zużycie ściernie elementów, kilkukrotnie większe w porównaniu z obróbką szlifowaniem. W badaniach strukturalnych wykazano zmniejszenie ilości niepożądanego austenitu szczątkowego, zwiększenie ilości martenzytu oraz pojawienie się naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zahartowanej stali po obróbce magneto-ścierniej.

Autorzy pracy [6] wykorzystali obróbkę magneto-ścierną do usuwania zadziorów powstających po wierceniu stalowych płyt. Induktor elektromagnetyczny zamocowano we wrzecionie frezarki. Na stole frezarki zamocowano specjalny układ wibracyjny, do którego przymocowano przedmiot obrabiany. Ruch wibracyjny przedmiotu obrabianego zapewniał przyspieszenie procesu usuwania zadziorów, poprzez zwiększenie mobilności proszku ściernego. W badaniach wykorzystano proszki na bazie węgla tytanu TiC oraz węgla niobu NbC o różnej wielkości ziaren. Wykazano, że proszek o wielkości ziarna $400\div 500\text{ }\mu\text{m}$ na bazie żelaza, zapewniającego właściwości magnetyczne i węgla tytanu TiC o wielkości ziarna w granicach $28\div 40\text{ }\mu\text{m}$ dawał najlepsze rezultaty, jeśli chodzi o usuwanie zadziorów występujących na krawędziach wierconych otworów.

Istnieje kilka wad obróbki magneto-ścierniej. Cechą charakterystyczną obróbki są małe wartości sił. Jednak istnieją sytuacje, w których stan krawędzi przedmiotów wymaga zintensyfikowania procesu. W przeciwnym razie czas do usunięcia zadziorów jest długi. Zwiększenie sił podczas obróbki magneto-ścierniej wymaga stosowania oprzyrządowania o znacznych gabarytach i masie [107]. Innym sposobem jest stosowanie dodatkowych rodzajów obróbek wspomagających proces magneto-ścierny. W pracy [113] przedstawiono wyniki badań wpływu obróbki magneto-ścierniej wspomaganej przez obróbkę wibracyjną na wykończenie powierzchni i krawędzi przedmiotów wykonanych ze stopu magnezu. Zauważono znaczne zwiększenie wydajności procesu oraz zmniejszenie wysokości zadziorów dzięki połączeniu dwóch rodzajów obróbki wykończeniowej powierzchni.

Zadziory mogą być usuwane poprzez obróbkę chemiczną, która polega na zanurzeniu przedmiotów w kąpielach trawiących. Przedmioty mocowane są indywidualnie (pojedynczo) lub partiami, na stojakach, w koszach lub bębnach. Obróbka ta stosowana jest do materiałów o skomplikowanych kształtach z wewnętrznymi zadziorami, które trudno jest usunąć innymi metodami. Metoda zanurzeniowa pozwala na szybki dostęp płynnego medium do miejsc trudnodostępnych. Przedmiot dodatkowo może wykonywać ruch obrotowy w celu równomiernego dostępu czynnika trawiącego. Ponieważ czynnik trawiący obejmuje wszystkie powierzchnie przedmiotu, dodatkowym efektem obróbki chemicznej może być zmniejszenie chropowatości powierzchni, usunięcie niewidocznych mikropęknięć występujących na powierzchni oraz nadanie połysku przedmiotom obrabianym. W zależności od rodzaju materiału, z jakiego wytworzone są przedmioty z zadziorami, dobiera się skład kąpeli trawiących. Kontrolą podlega także temperatura kąpeli. W porównaniu z obróbką elektrochemiczną obróbka chemiczna nie wymaga skomplikowanego oprzyrządowania, projektowania elektrod roboczych spełniających rolę katody. Wadami tej obróbki jest wielostopniowy proces mycia i suszenia przedmiotów po procesie obróbkowym, jednak największym problemem jest zagrożenie dla środowiska i bezpieczeństwo pracowników będących w kontakcie z odczynnikami chemicznymi. Pośrednim rozwiązaniem może być poszukiwanie innego rodzaju medium trawiącego, mniej szkodliwego dla środowiska. Przykładem takiego rozwiązania może być zastąpienie mineralnych kwasów (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl) organicznym kwasem szczawiowym, który z powodzeniem może być stosowany w przypadku stopów żelaza. Ponadto kąpiele na bazie kwasu szczawiowego charakteryzują się większą trwałością z racji ograniczenia rozkładu nadtlenu wodoru. Zastąpienie kwasu azotowego pozwala wyeliminować uwalnianie dwutlenku azotu do środowiska, korodowanie materiałów po niedokładnym procesie płukania, nierównomierne trawienie elementów podczas transportu do kąpeli itp.[44].

Bardziej wydajnym sposobem w stosunku do obróbki chemicznej jest obróbka elektrochemiczna. Jest to proces, w którym wykorzystuje się dodatkowo energię elektryczną do procesu roztwarzania elektrochemicznego materiału obrabianego, który przebiega zgodnie z prawami Faradaya. Obróbka z reguły przebiega bez bezpośredniego kontaktu narzędzia, jakim jest elektroda robocza, z przedmiotem obrabianym oraz bez działania pola wysokich temperatur, co jest istotne w przypadkach, kiedy niepożądana jest zmiana właściwości warstwy wierzchniej po obróbce. Pole elektryczne koncentruje się w obrębie krawędzi z zadziorami, co przyspiesza proces ich usuwania. Ilość usuniętego materiału jest proporcjonalna do czasu i natężenia prądu elektrycznego płynącego między elektrodami. Przedmiot obrabiany oraz elektroda robocza zanurzone są w elektrolicie będącym wodnym roztworem związków chemicznych (NaNO_3 , NaCl).

Przedmiot obrabiany podłączony do bieguna dodatniego stanowi anodę, natomiast narzędzie podłączone jest do bieguna ujemnego. Dzięki temu usuwane cząsteczki metalu przechodzą do roztworu tworząc wodorotlenki. Natomiast

wyładowaniom kationów na elektrodzie roboczej towarzyszy proces wydzielania się wodoru. Dzięki temu elektroda robocza praktycznie nie ulega zużyciu.

Parametrami sterującymi w procesie obróbki elektrochemicznej są: gęstość prądu, szczelina międzyelektrodowa, temperatura, rodzaj, koncentracja, ciśnienie i prędkość przepływu elektrolitu. Kontrola procesu usuwania materiału obejmuje wiele czynników i jest skomplikowana. Gęstość prądu dobierana jest na podstawie krzywych polaryzacji dla danego materiału. Szereg parametrów związanych z elektrolitem dobiera się w zależności od obrabianego materiału. W literaturze spotkać można rozważania dotyczące modelowania matematycznego obróbki elektrochemicznej, szczególnie w aspekcie kontrolowanego procesu usuwania zadziorów, gdzie oprócz typowych parametrów obróbki elektrochemicznej należy też wziąć pod uwagę parametry związane z wielkością zadziorów [86].

Obróbka elektrochemiczna znajduje zastosowanie w przypadku obróbki materiałów trudnoobrabialnych oraz w przypadku skomplikowanych kształtów przedmiotów, których krawędzi z zadziorami nie da się obrobić innymi metodami. Obróbka ECD (ang. Electrochemical Deburring) znajduje zastosowanie podczas obróbki elementów turbosprężarek, wysokowydajnych pomp, narzędzi chirurgicznych itp. W takich przypadkach obróbka krawędzi metodą elektrochemiczną może być ogniwem zamykającym automatyzację procesu w elastycznych systemach produkcyjnych. Dlatego też rozważania teoretyczne związane z obróbką elektrochemiczną skupiają się na przypadkach obróbki wewnętrznych krawędzi, otworów o dużym stosunku długości do średnicy, otworów występujących na powierzchniach krzywoliniowych itp. [17, 59]. Możliwe jest także stosowanie obróbki elektrochemicznej w mikrotechnologii do wytwarzania elementów, których wymiary charakterystyczne są rzędu mikrometrów. Dzięki zastosowaniu sterowania impulsowego, można uzyskać rowki o szerokości poniżej mikrometra [25].

Oprócz usuwania zadziorów dodatkowym efektem obróbki elektrochemicznej może być zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz nadanie połysku obrabianym elementom, a także niewielka korekta wymiarów i kształtu przedmiotu. Podwyższenie dokładności obróbki uzyskuje się często poprzez zastosowanie prądu impulsowego, stosowanego w operacjach wykończeniowych. W skutek oddziaływania obróbki elektrochemicznej, z punktu widzenia własności użytkowych, poprawie może ulec nośność powierzchni, opory przepływu cieczy lub gazów, czy też wzrost wytrzymałości zmęczeniowej.

Istnieje kilka istotnych wad procesu elektrochemicznego. Energochłonność obróbki elektrochemicznej jest wysoka ($200\div600\text{ J/mm}^3$) [94]. Dodatkowo wysoki jest koszt urządzeń oraz oprzyrządowania do filtrowania elektrolitu, a także wielostopniowego procesu mycia i suszenia. Czynniki te sprawiają, że metoda ta jest opłacalna głównie w przypadku obróbki seryjnej. W literaturze poruszany jest też problem usuwania zadziorów charakteryzujących się dużą wielkością. W takich przypadkach istnieje konieczność wydłużenia czasu obróbki w celu

skutecznego usunięcia zadziorów. Dłuższy czas oddziaływania obróbki elektrochemicznej na pozostałe powierzchnie i prawidłowo ukształtowane krawędzie przedmiotu może powodować nadmierne roztworzenie materiału i niepożądany ubytek materiału [86]. Jednak głównym ograniczeniem stosowania obróbki elektrochemicznej w przemyśle pozostają wymagania związane z ochroną środowiska. Proces ten prowadzony jest w roztworach o silnie żrącym charakterze. Dodatkowo podwyższona temperatura elektrolitu powoduje przyspieszony proces parowania, co wymusza stosowanie wentylacji o podwyższonych standardach. Producenci urządzeń do obróbki elektrochemicznej reklamują metodę jako bezpieczną, odbywającą się w sposób automatyczny w cyklu zamkniętym, bez ingerencji pracowników, jednak zawsze występuje pośredni kontakt związany z przygotowaniem obrabiarki do obróbki [120, 122]. Odrębnym zagadnieniem są awarie i nieszczęśliwe wypadki mogące zdarzać się na liniach produkcyjnych.

Uzyskanie wymaganego stanu krawędzi może być również prowadzone poprzez obróbkę elektroerozyjną [15]. Cechą charakterystyczną stosowania obróbki elektroerozyjnej, w porównaniu z obróbką elektrochemiczną, jest miejscowa intensyfikacja procesu, co nie powoduje usuwania materiału w miejscach, gdzie nie jest to pożądane. Obróbka ta znajduje zastosowanie w elektronice, medycynie, w przypadku obróbki miniaturowych elementów, na których występują zadziory, co w dobie miniaturyzacji stanowi o perspektywiczności tej metody. W momencie, kiedy wielkość przedmiotów maleje, problem usuwania zadziorów staje się trudniejszy do rozwiązania. W sytuacji, gdy tolerancje zaokrąglenia lub sfazowania krawędzi są mniejsze, może pojawić się zbyt duże usunięcie materiału w obrębie krawędzi. Występować też mogą uszkodzenia mechaniczne przedmiotów, zmiany właściwości materiałowych wykańczanej powierzchni, wymóg dalszej obróbki w celu usunięcia pozostałości odczynników chemicznych itp. Zastosowanie obróbki elektroerozyjnej przy odpowiednio dobranych parametrach procesu (niska energia wyładowań) daje pozytywne rezultaty w przypadku miniaturowych elementów bez względu na twardość materiału. Niska energia oraz mała średnica narzędzia (200 μm [43]) pozwala uniknąć usuwania materiału poza krawędziami z zadziorami.

Kolejną metodą obróbki krawędzi jest obróbka termiczna. W odróżnieniu od innych metod, w których oprócz obróbki krawędzi ważnym, a niekiedy podstawowym celem jest wygładzenie powierzchni, jedynym zadaniem obróbki termicznej (związanej z obróbką krawędzi) jest usunięcie niepożądanych zadziorów. Obróbka termiczna, jak wskazuje nazwa, jest to proces, w którym wykorzystywana jest energia cieplna do usunięcia zadziorów. Przedmioty poddane tej obróbce powinny być odpowiednio przygotowane, wolne od płynów obróbkowych, inhibitorów korozji itp. Wsad zamyka się szczelnie w specjalnej komorze o grubych stalowych ściankach. Nacisk mechanizmu zamykania sięga kilkuset ton. Następnie do komory wprowadzany jest gaz wybuchowy, zwykle mieszanina metanu i tlenu. Iskrowy zapłon powoduje zapłon mieszaniny tworząc silny wybuch. Wysoka temperatura sięgająca kilku tysięcy kelwinów powoduje spale-

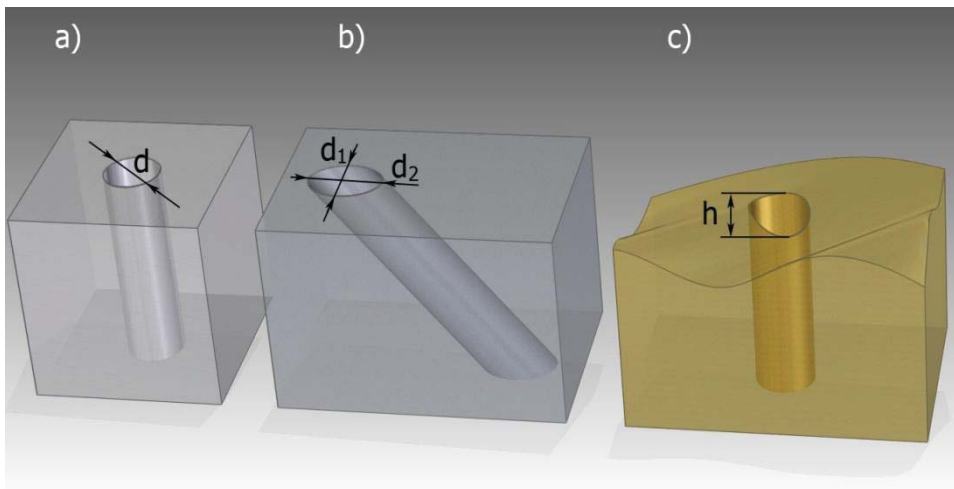
nie i odparowanie tych fragmentów przedmiotu, które charakteryzują się wysokim współczynnikiem powierzchni w stosunku do masy. Jednocześnie krótki czas oddziaływania energii cieplnej, wynoszący kilkadziesiąt milisekund nie powoduje zmian struktury materiału. Ponadto zadziór absorbuje ciepło z dwóch stron. W takich warunkach zadziór ulega szybkiemu procesowi utleniania, pozostawiając krawędź wolną od zadziorów. Przy dopracowanym procesie obróbka ta jest stosunkowo wydajna i skutecznie usuwa zadziory w trudno dostępnych miejscach.

Autorzy pracy [81] badali wpływ parametrów obróbki termicznej na skuteczność usuwania zadziorów. Do istotnych parametrów obróbki termicznej, wpływających na efektywność procesu, zaliczono: skład mieszanki, ciśnienie mieszanki, impuls zapalający oraz wielkość zadziorów. Optymalizację procesu usuwania zadziorów przeprowadzono za pomocą metody Taguchi'ego. Zadziory występujące na przedmiotach podzielono umownie na trzy kategorie (ang. Light burr, Medium burr, Heavy burr) określające stopień trudności ich usuwania. Stwierdzono, przy użyciu analizy wariancji, że spośród badanych czynników najistotniejsza, z punktu widzenia optymalizacji procesu, jest wielkość zadziorów. Najłatwiej efekt usuwania zadziorów można osiągnąć dla zadziorów określonych mianem – Light burr.

Istnieje jednak kilka ograniczeń i wad obróbki termicznej. Ponieważ zadziory często mają charakter nieregularny, w niektórych miejscach przyjmują duże rozmiary. W przypadku zadziorów charakteryzujących się dużą podstawą (silnym przytwierdzeniem do materiału) obróbka termiczna powoduje w tych miejscach stopienie materiału, który w formie małych cząstek utwardzony jest do przedmiotu w obrębie krawędzi. W takich przypadkach potrzebna jest dodatkowa operacja. Istnieje też problem w przypadku materiałów charakteryzujących się dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła, ponieważ są przypadki, w których ciepło szybko odbierane jest przez materiał, powodując nieskuteczne usunięcie zadziorów (przy zbyt małej energii) lub nadmierne nadtopienie krawędzi (przy zbyt dużej energii). Do materiałów o dużym współczynniku przewodzenia ciepła zaliczane są stopy aluminium, co może powodować ograniczenie stosowania obróbki termicznej do tej grupy materiałów. Przy stopach magnezu, jednym z podstawowych problemów związanych z obróbką jest zagrożenie związane z samozapłonem magnezu [35]. Temperatura zapłonu stopów magnezu to ok. 480°C, temperatura spalania powyżej 2000°C. Właściwości te uniemożliwiają zastosowanie obróbki termicznej w przypadku stopów magnezu.

Istnieje też wiele możliwości usuwania zadziorów poprzez typowe odmiany obróbki skrawaniem, jak np. frezowanie. Producenci narzędzi prześcigają się w rozwiązaniach tego typu narzędzi. Przykładem mogą być frezy pilnikowe, które poza kształtami różnią się także geometrią w zależności od obrabianego materiału. Frezy takie mogą być mocowane na centrach obróbkowych lub w ręcznych narzędziach szybkoobrotowych.

Niemal odrębnym działem związanym z procesem usuwania zadziorów, kontrolą stanu krawędzi stanowi obróbka otworów. Generalnie obróbkę otworów można podzielić na dwie grupy determinujące wybór metody usuwania zadziorów z krawędzi. Pierwszą grupę stanowią otwory, których oś jest prostopadła do powierzchni płaskiej (rys. 1.13a). W takich przypadkach obróbkę krawędzi powszechnie przeprowadza się poprzez toczenie, pogłębianie, powiercanie, wytaczanie. Jeśli otwory są gwintowane, w jednej operacji oprócz usunięcia zadziorów można uzyskać otwór do ułatwionego wprowadzenia śruby oraz schowania łba śruby. Zadzioły pojawiają się od strony wejścia i wyjścia narzędzia. W końcowej fazie procesu wiercenia, kiedy krawędź poprzeczna narzędzia "przebija" powierzchnię, silnie odkształcany plastycznie materiał tworzy duże zadzioły, do których dostęp często jest utrudniony. W takich przypadkach stosowane są narzędzia o nietypowej geometrii, która minimalizuje zadzioły wyjściowe [29, 50, 102]. W przypadku wiercenia otworów w dużych arkuszach blach stosowane są specjalne podciśnieniowe systemy mocowania przedmiotów. Powierzchnia od strony wyjścia narzędzia silnie przylega do elementów konstrukcyjnych systemu mocowania, uniemożliwiając formowanie się zadziorów wyjściowych [78].

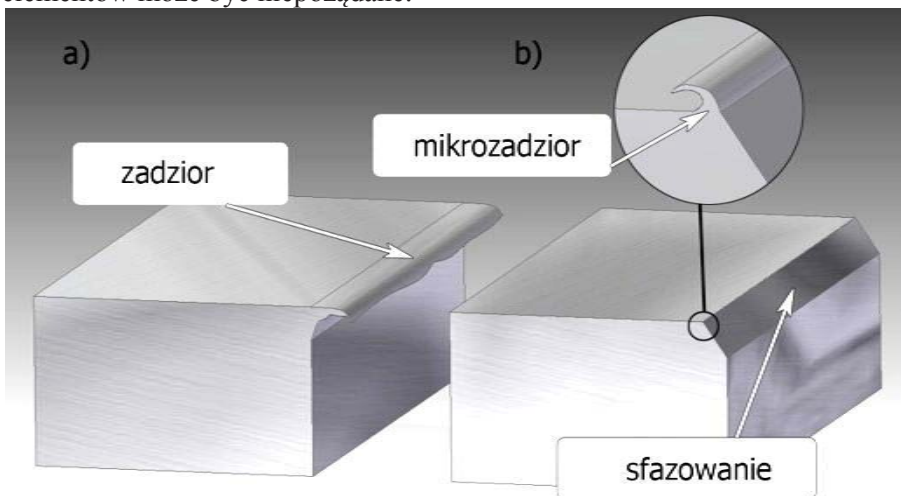


Rys. 1.13. Krawędzie po wykonaniu otworów: a) oś otworu prostopadła do powierzchni, b) oś otworu pochylona w stosunku do powierzchni, c) otwór na powierzchni krzywoliniowej

Drugą grupę stanowią krawędzie powstałe po wykonaniu otworów w przypadku, gdy oś otworu jest pochylona pod pewnym kątem w stosunku do powierzchni płaskiej (rys. 1.13b). Trzecią grupę stanowią krawędzie powstałe po wykonaniu otworów w przypadku, gdy otwór powstał na powierzchni krzywoliniowej lub na krawędziach powstałych w wyniku przecinania się dwóch otwo-

rów (rys. 1.13c). Zadzior powstałe na tego typu krawędziach są trudne do usunięcia, gdyż nie można zastosować typowych, prostych metod usuwania zadziorów. W pracy [5] przedstawiono koncepcję obróbki strumieniowo ścierniej, wykorzystującej wtórną erozję do usuwania zadziorów na trudno dostępnych krawędziach przecinających się otworów. Strumień czynnika ściernego odbija się od specjalnych zaślepek wprowadzanych do otworów. Po odbiciu cząstki czynnika ściernego zmieniają swój kierunek trafiając do trudno dostępnych krawędzi. Energia czynnika ściernego po odbiciu jest na tyle duża by skutecznie wykonać pracę usuwania zadziorów. W literaturze opisywane są narzędzia sprężyste, których krawędzie skrawające dopasowują się do krzywizny krawędzi z zadziorami. Tego typu narzędzia mogą realizować dwukierunkowy proces od strony wejścia i wyjścia otworu. Oprócz usunięcia zadziorów możliwe jest także poprawienie jakości wewnętrznej powierzchni otworu. Sztywność elementu sprężystego dobierana jest w zależności od rodzaju materiału, wielkości zadziorów oraz wielkości oczekiwanej fazy. Skuteczność narzędzi o ostrzach sprężystych zależy także od kąta pochylenia powierzchni w stosunku do osi otworu. Przy kącie większym od 30° obróbka nie zawsze jest skuteczna [16, 56, 104].

Większość sposobów usuwania zadziorów poprzez typowe metody obróbki skrawaniem polega na oddziaływaniu sztywnego narzędzia na przedmiot obrabiany i wykonaniu sfazowania. Istnieje jednak ewentualność, że nowo powstałe krawędzie w wyniku fazowania sztywnymi narzędziami będą ostre lub będą posiadały „mikrozadzior” (rys. 1.14), co podczas wykonywania precyzyjnych elementów może być niepożądane.



Rys. 1.14. Mikrozadzior po obróbce sztywnymi narzędziami: a) typowy zadzior, b) krawędź sfazowana z "mikrozadziozem"

Z racji różnorodności zapotrzebowania, każda z opisanych powyżej metod obróbki krawędzi, czy też usuwania zadziorów znajduje swoje zastosowanie. Jednak w przypadku dużych elementów ze stopów aluminium i magnezu stosowanych w przemyśle lotniczym, może pojawić się szereg ograniczeń. Niektóre metody mogą okazać się nieekonomiczne lub niemożliwe do zastosowania. Metoda automatycznego usuwania zadziorów poprzez obróbkę szczotkowaniem na typowych obrabiarkach CNC może przyczynić się do wyeliminowania drogich (metody wibrościernie, strumieniowo-ściernie) oraz szkodliwych dla środowiska (metody chemiczne, elektrochemiczne, termiczne) technologii usuwania zadziorów obecnie stosowanych w przemyśle. Ponadto racjonalne jest, aby wykorzystując fakt zamocowania elementu na stole w przypadku obróbki na centrach frezarskich, ostatnim narzędziem pobranym z magazynu narzędziowego była szczotka do usuwania zadziorów.

Stopień komplikacji procesu usuwania zadziorów zwiększa się, gdy pojawiają się one na dużych elementach o krawędziach krzywoliniowych lub krawędziach nie leżących w jednej płaszczyźnie. Takie przypadki często spotyka się w przemyśle lotniczym (np. konstrukcje kieszeniowe, uźebrowane), a usunięcie zadziorów z takich konstrukcji możliwe jest dzięki zastosowaniu narzędzi, których włókna robocze są elastyczne i dopasowują się do krzywizny krawędzi podlegającej obróbce.

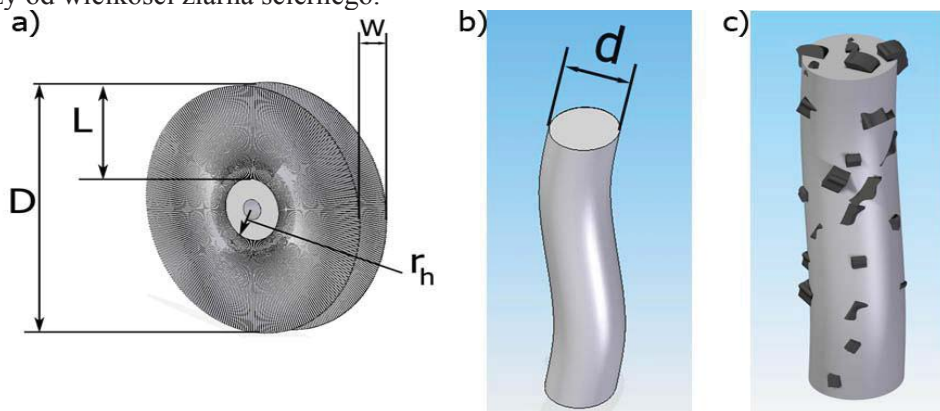
1.6. Charakterystyka obróbki szczotkowaniem

Podstawowy podział obróbki szczotkowaniem związany jest z kinematyką obróbki. Wyróżnia się obróbkę wirującym narzędziem lub narzędziem wykonującym ruch posuwisto-zwrotny. Z punktu widzenia automatyzacji istotne są badania narzędzi obrotowych, mających zastosowanie maszynowe. W takim ujęciu obróbka szczotkowaniem jest to rodzaj mechanicznej obróbki powierzchni za pomocą narzędzia wykonującego ruch obrotowy.

Narzędzia do szczotkowania są stosowane w procesach obróbki powierzchni między innymi do usuwania zadziorów, zaokrąglania krawędzi, nadawania połysku oraz w szeroko pojętym procesie oczyszczania powierzchni. Badania procesu usuwania zadziorów metodą szczotkowania przedstawiono w pracach [62, 64, 65, 115]. Dodatkowo obróbka szczotkowaniem może służyć do wytworzenia określonej kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni dającej efekt dekoracyjny, poprzedza proces łączenia, czy też służy do wygenerowania określonych właściwości warstwy wierzchniej [31, 33, 90]. Ponadto szczotki są łatwe do zastosowania w zautomatyzowanej obróbce, ponieważ giętkie końce włókien, które wykonują operację obróbkową z łatwością dopasowują się do obrabianej powierzchni, niekiedy kształtowej, bez konieczności stosowania kosztownych systemów pozycjonowania narzędzia. Szeroko rozpowszechnione zastosowanie szczotek jako narzędzi spowodowane jest dobrą wydajnością, łatwością zaimplementowania jako ręcznej lub automatycznej obróbki wykończe-

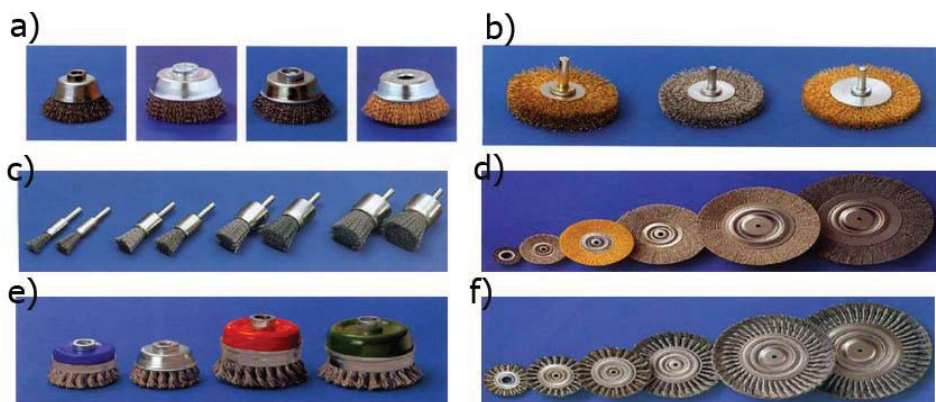
niowej powierzchni, a także równomiernym rozłożeniem sił skrawania na powierzchni obrabianego materiału. To pozwala na kontrolowany proces usuwania materiału, proste mocowanie elementu obrabianego i zmniejsza ryzyko uszkodzenia tak obrabiarki jak i przedmiotu obrabianego.

Budowa typowej szczotki (rys. 1.15) obejmuje charakterystyczne wymiary, do których można zaliczyć szerokość szczotki „W”, średnicę szczotki „D”, długość włókna „L” oraz promień na jakim są osadzone „ r_h ”. Do charakterystycznych wielkości należy średnica włókna „d” oraz całkowita ilość włókien rozmieszczonych na obwodzie szczotki. W przypadku typowego włókna (rys. 1.15b) krawędzią skrawającą jest koniec tego włókna, w odróżnieniu od włókna przedstawionego na rys. 1.15c, które wykonane jest z dwóch oddzielnych materiałów – jednym z nich jest polimer, w którym zatopiony jest materiał ścierny, np. węgiel krzemowy lub tlenek aluminium. Materiał ścierny jest równomiernie rozproszony na całej długości nylonowego włókna (zajmuje około 40% masy całego włókna), stanowiąc wiele krawędzi skrawających o nieokreślonej geometrii. W tym przypadku chropowatość powierzchni po szczotkowaniu zależy od wielkości ziarna ściernego.



Rys. 1.15. Budowa szczotki: a) wymiary charakterystyczne, b) włókno monolityczne, c) włókno kompozytowe [opracowanie własne]

W dużym stopniu temperatura topnienia nylonu nakłada istotne ograniczenia parametrów szczotkowania. Dla przykładu zbyt duża prędkość obrotowa szczotki może spowodować uplastycznienie nylonowego wypełnienia. Nie ma zbyt wielu szczegółowych informacji odnośnie tego typu wypełnień szczotek i dopuszczalnych parametrów, ale ten problem często może być brany pod uwagę przy wyborze szczotki do konkretnego zastosowania.



Rys. 1.16. Rodzaje szczotek: a) czołowa garnkowa, b) walcowa trzpieniowa, c) czołowa pędzlowa, d) walcowa beztrzpieniowa, e) czołowa garnkowa z drutem splecionym, f) walcowa z drutem splecionym [121]

Trwałość szczotek uzależniona jest od docisku oraz prędkości obrotowej. Dla danej szczotki istnieje pewna optymalna wartość dosuwu z punktu widzenia efektywności procesu. Zastosowanie zbyt dużego dosuwu nie tylko nie przyspieszy procesu obróbki, ale także spowoduje szybsze zużywanie się szczotek, ponieważ końce drutów, które stanowią krawędzie skrawające, nie wchodzi prawidłowo w strefę skrawania. Natomiast przy prawidłowym dosuwie, szczotkowanie staje się bardziej efektywne z uwagi na prawidłowe wykorzystanie krawędzi skrawających, czyli końców drutów. Wtedy ma miejsce mniejsze zużycie szczotki.

Dopuszczalne prędkości obrotowe uzależnione są od typu szczotki i jej średnicy. Szczotki z włóknami splecionymi stają się bardziej spójne, co daje możliwość stosowania większych prędkości. Średnica szczotki wpływa na siły odśrodkowe, działające na poszczególne włókna. Im większa średnica szczotki, tym mniejsza dopuszczalna maksymalna prędkość obrotowa. Z reguły optymalne efekty obróbki szczotkowaniem uzyskuje się na poziomie 50÷70% dopuszczalnej prędkości obrotowej.

Wyróżnić można dwie odmiany szczotkowania: walcowe i czołowe (rys. 1.16). Szczotki mogą być trzpieniowe, beztrzpieniowe, z włóknami prostymi, falistymi. W tabeli 1.1 przedstawiono typowe materiały stosowane na wypełnienia szczotek. W zależności od sztywności drutów wyróżnić można wypełnienia miękkie, średniotwarde oraz twarde. Włókna mogą charakteryzować się określonymi właściwościami, takimi jak: odporność chemiczna, termiczna, twardość itp. Odporność chemiczną wyżej wymienionych włókien przedstawiono w tabeli 1.2.

Tabela 1.1. Charakterystyka materiałów stosowanych na wypełnienia szczotek [121]

Symbol	Miękkie	Symbol	Średniotwarde	Symbol	Twarde
M1		S1	druk stalowy o twardości naturalnej, falisty Ø 0,06÷0,80 mm	T1	druk stalowy, hartowany, twardy i ciągliwy, falisty Ø 0,20÷0,50mm
M2	druk z fosforobrazu (CuSn), gładki lub falisty Ø 0,05÷0,5 mm	S2	druk stalowy, hartowany, gładki Ø 0,30÷1,20	T2	druk stalowy mosiądzowany, sprężysty, ciągliwy, pleciony, falisty Ø 0,15÷0,38mm
M3	druk mosiężny (CuZn) gładki lub falisty Ø 0,06÷0,56 mm	S3	druk stalowy, nierdzewny i kwasoodporny, gładki lub falisty Ø 0,30÷1,00 mm	T3	druk stalowy mosiądzowany, pojedynczy, sprężysty, falisty Ø 0,15÷0,38mm
M4	druk z mosiądzu wysokoniklowego (CuNi), falisty Ø 0,06÷0,25 mm	S4	druk specjalny, odporny na korozję, odporny na opary powstające w procesach produkcyjnych do temp. 650°C, gładki lub falisty Ø0,3÷0,50mm	T4	druk stalowy, kartowany, twardy i ciągliwy, gładki Ø 0,35÷0,80mm
		S5	druk specjalny odporny na temperatury do 1350°C, falisty Ø 0,3÷0,50mm	T5	druk płaski, hartowany, gładki 1,1x0,25 do 3,3x0,75 mm

Tabela 1.2. Odporność chemiczna materiałów stosowanych na wypełnienia szczotek [122]

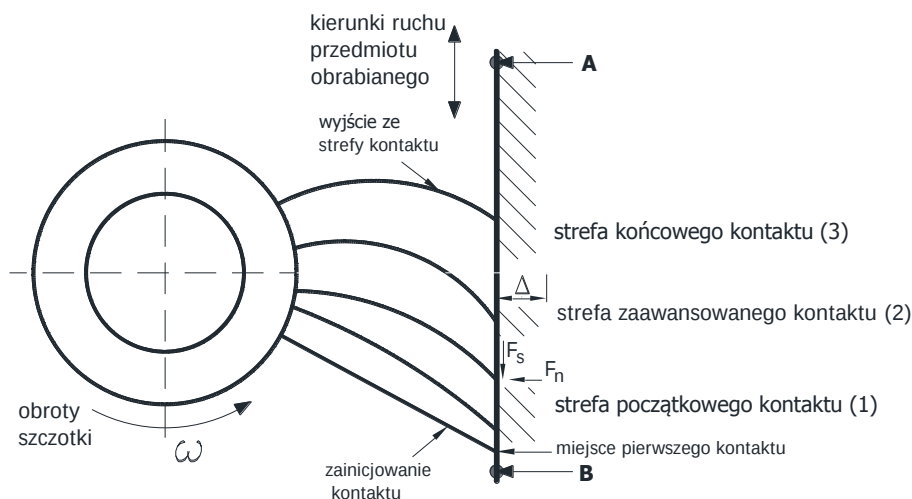
Typ drutu	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3 0H18N9	S3 0H17N12M2T	S4	S5	T1	T2	T3	T4	T5
kwask octowy 10% C ₂ H ₄ O ₂															
kwask octowy 80% C ₂ H ₄ O ₂															
Kwas azotowy do 90% HNO ₃															
kwask solny do 2% HCl															
kwask siarkowy do 1% H ₂ SO ₄															
kwask siarkowy do 80% H ₂ SO ₄															
ług potasowy do 50% KOH															
ług sodowy do 20% NaOH															
ketony, estry															
benzol, benzyna															

 - odporny
  - średnio odporny
  - nieodporny

1.7. Podstawy teoretyczne procesu obróbki szczotkowaniem

Podstawy teoretyczne procesu obróbki szczotkowaniem jako pierwszy opisał prof. Robert J. Stango pracujący na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Marquette w Milwaukee, w stanie Wisconsin [99]. Obróbka szczotkowaniem kojarzona jest z prostymi operacjami oczyszczania powierzchni, usuwania starych powłok lakierniczych. Mało jest natomiast informacji wyjaśniających mechanizm usuwania materiału oraz zachowania się szczotek podczas kontaktu z przedmiotem obrabianym. Automatyzacja procesu szczotkowania w celu usuwania zadziórów wymaga wnikliwej analizy charakterystyki dynamicznej i sztywności narzędzi. Proces szczotkowania dotyczy kontaktu końców włókien z przedmiotem obrabianym. Mechanizm odkształceń poszczególnych włókien analizowano jak belkę jednostronnie utwierdzoną, na którą działa siła w momencie kontaktu z powierzchnią obrabianą. Analiza sztywności bazuje na mechanizmie dużych odkształceń. Na rysunku 1.17 przedstawiono schemat kontaktu włókien szczotki walcowej z płaską powierzchnią przy określonej wartości dosuwu Δ podczas wykonywania ruchu obrotowego. W trakcie kontaktu włókien szczotki, składowa normalna i styczna wypadkowej siły, powstają okresowo (po każdym obrocie) w momencie, gdy włókno jest w kontakcie z przedmiotem obrabianym. Obszar kontaktu został podzielony na trzy charakterystyczne regiony: początkowego styku, zaawansowanego styku oraz miejsce wyjścia końców włókien ze strefy skrawania. Siły w znaczący sposób zależą od prędkości z jaką obraca się szczotka. Jeśli szczotka obraca się w zakresie niewielkich prędkości obrotowych siła pojawiająca się w obszarze początkowego styku jest niewielka i narasta stopniowo w miarę zbliżania się włókna do obszaru zaawansowanego kontaktu. Wraz ze wzrostem wartości lokalnie występujących sił wzrasta też ilość usuniętego materiału. Dla dużych prędkości obrotowych szczotki w momencie uderzenia pojawiają się duże siły. To powoduje lokalne zwiększenie wydajności obróbki oraz zmianę struktury powierzchni obrobionej i właściwości warstwy wierzchniej. Oddziaływanie włókien na powierzchnię obrabianą może mieć wpływ na wzrost twardości obrobionego materiału. Ponadto poprawie ulegają właściwości użytkowe, dzięki generowaniu ściskających naprężeń własnych, które mają korzystny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową zapobiegając mikropęknięciom [31]. Wzrost twardości obrabianego materiału przekłada się na zmniejszenie jego zużycia podczas eksploatacji.

Obszar zaawansowanego kontaktu włókien szczotki z przedmiotem obrabianym charakteryzuje się stabilnymi wartościami sił skrawania. Dla typowych prędkości obrotowych w tej strefie kontaktu oddziaływanie narzędzia (szczotki) jest największe.



Rys. 2.17. Ugięcie pojedynczego włókna w fazie początkowej, przejściowej i wyjścia ze strefy kontaktu [95]

W strefie wyjścia, siły i oddziaływanie włókien zanikają, a końce włókien szczotki wychodzą ze strefy szczotkowania.

Podobna analiza kontaktu włókien z powierzchnią została przedstawiona również w przypadku powierzchni krzywoliniowych [41, 91].

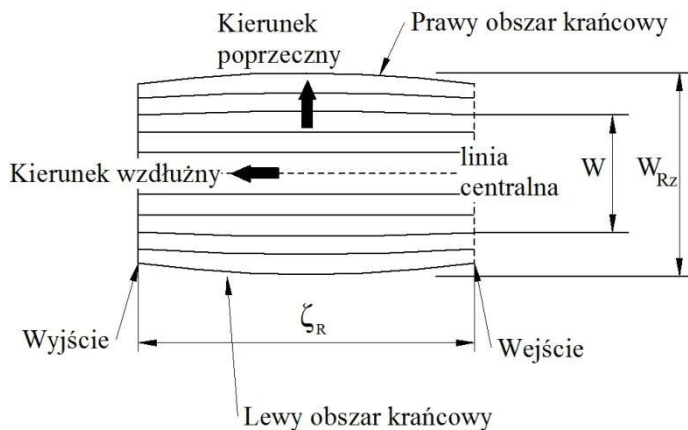
Takie podejście umożliwiło prognozowanie "zasięgu" ugiętego włókna w momencie wyjścia z kontaktu z przedmiotem obrabianym. Analiza pozwoliła na precyzyjnie określenie obszaru wyjścia, a tym samym całościowej strefy kontaktu z przedmiotem obrabianym [91].

Analiza sztywności narzędzia jest istotna zarówno podczas obróbki ręczno-maszynowej, jak i w pełni zautomatyzowanym procesie, ponieważ umożliwia określenie wartości sił, które muszą być przyłożone przez operatora lub obrabiarkę w procesie usuwania zadziorów. Ponadto sztywność narzędzia świadczy bezpośrednio o skuteczności usuwania materiału podczas obróbki [96].

W przypadku szczotek walcowych siły odśrodkowe działające na poszczególne włókna powodują ich rozciąganie w płaszczyźnie normalnej. Natomiast w przypadku szczotek czołowych siły odśrodkowe powodują odginanie włókien. Analiza deformacji włókien tego typu szczotek została przedstawiona w pracach [100, 106].

Z reguły podczas kontaktu siły występujące w procesie szczotkowania, powodują znaczne odkształcenia sprężyste włókien. Okresowy kontakt włókien z przedmiotem obrabianym powoduje ich cykliczne odkształcanie, mogące wpływać na zużycie zmęczeniowe włókien. Analiza sił i naprężeń działających na poszczególne włókna jest ważnym zagadnieniem, mającym istotny wpływ na zużycie oraz przewidywanie trwałości szczotek do usuwania zadziorów.

W pracach [46, 47, 76, 97] skupiono się na analizie powierzchni w obrębie kontaktu szczotki z przedmiotem obrabianym. Na rysunku 1.18 przedstawiono schemat ścieżki włókien wzdłuż obrabianej powierzchni. Podczas obrotu następuje wymuszony ruch włókien wzdłuż strefy kontaktu – R. Z racji odkształceń włókien, znajdujących się w kontakcie z powierzchnią obrabianą, kąt natarcia zmienia się w zależności od położenia włókien względem powierzchni. Ponadto występuje moment, w którym włókna przemieszczają się w innym kierunku niż wzdłużny. Wynika to z niejednorodnej sztywności spowodowanej "upakowaniem" włókien na obwodzie szczotki. Skrajne włókna, znajdujące się w lewym i prawym obszarze krańcowym, wykazują tendencję do odginania się i zakreślają łukowy ruch wzdłuż powierzchni kontaktu. Analiza kontaktu wykazała, że włókna znajdujące się w centralnej części (jeśli chodzi o szerokość szczotki) będące w kontakcie z płaską powierzchnią, ulegają ugięciu w jednej płaszczyźnie, a ich kontakt z powierzchnią obrabianą przebiega prostoliniowo. Natomiast włókna znajdujące się po prawej i lewej stronie odginają się w wielu płaszczyznach. W konsekwencji szerokość rzeczywistego kontaktu W_{RZ} może znacznie wzrosnąć w stosunku do nominalnej szerokości szczotki W .



Rys. 1.18. Kierunkowość struktury po obróbce szczotkowaniem płaskiej powierzchni [97]

W pracach [11, 12, 98] przedstawiono koncepcję automatycznego systemu do usuwania zadziorów. Podstawą była dynamiczna analiza sił w procesie szczotkowania i ewentualne reagowanie poprzez zmianę parametrów obróbki w celu usunięcia zadziorów. Jednak zastosowane szczotki z włóknami z tworzywa sztucznego z zatopionymi ziarnami ściernymi wymagały długiego czasu obróbki w celu usunięcia zadziorów, co w zastosowaniu przemysłowym mogłoby być nieekonomiczne.

W literaturze spotkać można także rozwiązania konstrukcyjne szczotek rozszerzające możliwości tych narzędzi. Prowadzone były badania obróbki oczysz-

czająco-umacniającej, w której zastosowano dwa rodzaje elementów roboczych. Pierwszym rodzajem elementów były tzw. bijaki, rozmieszczone w czterech sekcjach, których zadaniem jest rozbicie zanieczyszczeń występujących na powierzchni obrabianego materiału, a także jednoczesny zgniot warstwy wierzchniej. Drugi rodzaj to włókna wykonane z drutu stalowego, które także rozmieszczone były na obwodzie szczotki w czterech sekcjach. Zadaniem sekcji wykonanych z drutu było usunięcie rozdrobnionych przez sekcje udarowe zanieczyszczeń [89]. Inne koncepcje rozszerzenia możliwości obróbkowych, szczególnie w aspekcie usuwania zadziorów, przedstawione zostały w zgłoszeniach patentowych [117, 118]. Wynalazki dotyczą szczotki walcowej oraz szczotki czołowej do usuwania zadziorów. Szczotka zbudowana jest z trzpienia, służącego do zamocowania we wrzecionie maszyny technologicznej, korpusu oraz części roboczej w postaci włókien rozmieszczonych na powierzchni walcowej (P.394989 – szczotka walcowa do usuwania zadziorów) lub czołowej (P.398956 – szczotka czołowa do usuwania zadziorów). Konstrukcja narzędzia dzięki oryginalnemu rozwiązaniu zapewnia jednocześnie możliwość usuwania zadziorów oraz wygładzania krawędzi, dzięki zastosowaniu odmiennych włókien, których część, uderzając z większą energią, powoduje usunięcie zadziorów, zaś włókna części wygładzającej powodują zmniejszenie mikronierówności ukształtowanych przez włókna usuwające i wygładzenie powierzchni przedmiotów obrabianych w obszarach przylegających do zadziorów. Rozwiązanie to dodatkowo rozszerza też możliwość stosowania jednej szczotki do materiałów charakteryzujących się zupełnie odmiennymi właściwościami.

1.8. Podsumowanie

Krawędzie z zadziorami niosą zagrożenie w automatyzacji procesu. Prawidłowa orientacja przedmiotu przez roboty przechwytyjące w procesie montażu jest bardzo istotnym zagadnieniem. Występowanie zadziorów może hamować płynny i bezpieczny proces montażowy. W przypadku współpracujących elementów występowanie zadziorów nie tylko skutkuje pogorszeniem jakości krawędzi, ale także występujące w konsekwencji obecności zadziorów nadmierne tarcie i zużycie powierzchni może objawiać się występowaniem hałasu i drgań.

Zautomatyzowana metoda usuwania zadziorów poprzez obróbkę szczotkowaniem na typowych obrabiarkach CNC, może spowodować częściowe wyeliminowanie drogich (metody wibrościernie, strumieniowo-ściernie) oraz szkodliwych dla środowiska (metody chemiczne, elektrochemiczne, termiczne) technologii usuwania zadziorów obecnie stosowanych w przemyśle.

Zastosowanie elastycznych szczotek walcowych na obrabiarkach sterowanych numerycznie pozwoli w sposób automatyczny przeprowadzić obróbkę usuwania zadziorów z dużych elementów, poprzez planowanie ścieżki narzędzia wzdłuż krawędzi przedmiotów. Na kartach technologicznych często obróbka frezowaniem, prowadzona na centrach obróbkowych, stanowi przedostatni etap

kształtowania wyrobu. Ostatnią operacją jest obróbka wykończeniowa krawędzi. Wykorzystując fakt zamocowania przedmiotu na obrabiarce, można przy wykorzystaniu szczotek trzpieniowych, znajdujących się w magazynie narzędziowym, przeprowadzić proces usuwania zadziorów. W odróżnieniu od narzędzi sztywnych, z racji elastyczności włókien stosowanych na wypełnienia szczotek, uzyskuje się większe bezpieczeństwo obróbki. Wszelkie błędy operatora obrabiarki, bądź błędy programu NC spowodowane aproksymacją ścieżek przez postprocesor programu CAM, powodujące niezamierzony kierunek ruchu narzędzia w niektórych przypadkach spowodują jedynie ugięcie elastycznych włókien narzędzia szczotkującego bez szkody dla szczotki, obrabiarki, czy też finalnego wyrobu. W przypadku obróbki szczotkowaniem problemem może być nieprawidłowy dobór narzędzi do konkretnego materiału w celu uzyskania wymaganego stanu krawędzi czy też efektów obróbki.

2. OGÓLNA METODYKA I ZAKRES BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Celem przeprowadzonych badań było określenie warunków obróbki szczotkowaniem, przy których następuje skuteczne usuwanie zadziorów. Proces ten nie powinien powodować pogorszenia stanu warstwy wierzchniej badanych materiałów. W wyniku przeprowadzonych badań rozpoznawczych określono zbiór następujących czynników badanych:

1. Zbiór czynników badanych $X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_5)$:
 - $x_1 - v_f$, mm/min – prędkość posuwu,
 - $x_2 - v_c$, m/min – prędkość obwodowa,
 - x_3 – rodzaj medium obróbkowego,
 - x_4 – rodzaj szczotki,
 - x_5 – materiał obrabiany.
2. Zbiór czynników stałych $C(c_1, c_2, c_3, \dots, c_7)$:
 - c_1 – obrabiarka: Fv580A,
 - $c_2 - \Delta = 3$ mm – dosuw szczotki,
 - $c_3 - D = 120$ mm – średnica szczotki,
 - $c_4 - \Phi = 30^\circ$ – kąt wyjścia w procesie formowania zadziorów,
 - c_5 – frez w procesie formowania zadziorów,
 - $c_6 - \theta = 45^\circ$ – kąt między wektorem v_c a krawędzią próbki w procesie usuwania zadziorów,
 - c_7 – strategia obróbki szczotkowaniem.
3. Zbiór czynników zakłócających $H(h_1, h_2, \dots, h_4)$:
 - h_1 – niedokładność wymiarowa szczotek,
 - h_2 – niedokładność wymiarowa próbek,
 - h_3 – niejednorodność materiału próbek,
 - h_4 – niekontrolowane zużycie szczotek.
4. Zbiór czynników wynikowych $Y(y_1, y_2, y_3, y_4)$:
 - $y_1 - R_a - \mu\text{m}$ – chropowatość powierzchni po obróbce szczotkowaniem,
 - $y_2 - R - \mu\text{m}$ – promień zaokrąglenia krawędzi po szczotkowaniu,
 - $y_3 - HV$ – mikrotwardość warstwy wierzchniej po szczotkowaniu,
 - y_4 – naprężenia własne po obróbce szczotkowaniem.

Liczba poziomów poszczególnych czynników wejściowych została zaprezentowana na rysunku 2.1. Wytypowano 7 zestawów parametrów technologicznych szczotkowania.



Rys. 2.1. Zbiór czynników badanych podczas eksperymentu

Zastosowano dwa rodzaje medium – obróbka na sucho oraz obróbka z chłodzeniem przy zastosowaniu cieczy Oementa Estramet 575. W eksperymencie wykorzystano 3 rodzaje szczotek o różnej sztywności, która zmieniana była poprzez rodzaj włókna oraz jego średnicę. Wpływ czynników badanych przeanalizowano na czterech stopach wykorzystywanych w przemyśle lotniczym. Ponadto w eksperymencie dotyczącym analizy wpływu warunków szczotkowania na chropowatość powierzchni dodatkowym czynnikiem badanym była chropowatość wyjściowa, po obróbce frezowaniem, dla której przyjęto dwa poziomy.

2.1. Materiały stosowane w badaniach

Do badań wykorzystano próbki wykonane ze stopów aluminium 7075-T651 oraz AlSi10Mg, a także ze stopów magnezu AZ31 oraz AZ91HP. Materiały te szeroko stosowane są w przemyśle lotniczym.

Na początku ubiegłego wieku podstawowym celem konstrukcji lotniczych było poprawienie wytrzymałości materiałów na rozciąganie (statyczna próba rozciągania), po to by uzyskać możliwość do zmniejszenia masy konstrukcji samolotu, a w konsekwencji zwiększenia ich masy użytecznej. Jako pierwsze stosowane były stopy aluminium z grupy 2XXX. Do budowy samolotów (sterowce Zeppelin) używano między innymi durali miedziowych 2014, czy też 2017. Eksploatacja samolotów przyniosła wiele informacji, dzięki którym po-

wstawały kolejne, coraz lepsze stopy takie jak 2024-T3. Na początku lat czterdziestych wprowadzono do produkcji wysokowytrzymały stop 7075-T6, a na bazie jego powstał stop o większej wytrzymałości na rozciąganie 7178-T6, który został użyty w pierwszym, szeroko stosowanym samolocie Boeing 707. Zrezygnowano z niego w kolejnych modelach z racji problemów z rozwiązaniem zagadnienia trwałości i kontrolowanej tolerancji uszkodzeń, którą przyjęto za istotne kryterium doboru materiału [92].

Obróbka cieplna jest częścią procesu wytworzenia finalnego stopu. Osiągnięcie optymalnych właściwości może być zrealizowane wyłącznie dzięki zastosowaniu odpowiednich zabiegów cieplnych.

Lata sześćdziesiąte to rozwój konstrukcji o większych przekrojach. Obróbka cieplna stosowana w stopach z grupy 7XXX wyeliminowała problem naprężeniowego pęknięcia korozyjnego, a dodatek chromu zahamował proces zdrowienia dynamicznego i zabezpieczył przed rozrostem ziaren zrekrystalizowanych. Stop aluminium 7075 jest dobrze skrawalnym stopem charakteryzującym się dobrą wytrzymałością, przewodnością cieplną i odpornością na korozję, dlatego też powszechnie wykorzystywany jest do konstrukcji cienkościennych.

Stop AlSi10Mg jest typowym odlewniczym stopem wykorzystywanym na cienkościennie elementy o złożonej geometrii. Cechuje się dobrymi właściwościami dynamicznymi, wytrzymałością, twardością, w związku z czym stosowany jest także na elementy podlegające dużym obciążeniom. Pomimo iż udział procentowy stopów aluminium w konstrukcjach lotniczych się zmniejsza, to nadal jest to jeden z wiodących materiałów w konstrukcjach lotniczych. W tabeli 2.1 przedstawiono skład chemiczny wykorzystanych w badaniach stopów aluminium.

Tabela 2.1. Skład chemiczny stopów aluminium (wg kart charakterystyki)

Stopy aluminium	Skład chemiczny (%)								
	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Si	Fe	Ti	Al
7075-T651	1,59	0,01	2,56	0,18	5,78	0,07	0,13	0,05	reszta
AlSi10Mg	0,05	0,45	0,2÷0,45	–	0,1	9÷11	0,55	0,15	reszta

Stopy magnezu z najmniejszą gęstością $1,75 \div 1,85 \text{ g/cm}^3$ spośród metalowych materiałów konstrukcyjnych są szeroko stosowane na konstrukcje lekkie. Wysoki stosunek wytrzymałości do gęstości daje możliwość zredukowania masy o prawie 25% w stosunku do stopów aluminium. W tabeli 2.2 przedstawiono skład chemiczny zastosowanych w badaniach stopów magnezu. W lotnictwie wykonuje się z nich korpusy kompresorów i przyrządów, pokrywy korpusów, korpusy sprężarek i pomp olejowych, części kół lotniczych, drążki kierownicze, widelki kół ogonowych, kratownice, nadwozia, pedały sterowania itd.

Tabela 2.2. Skład chemiczny stopów magnezu (wg kart charakterystyki)

Stopy magnezu	Skład chemiczny (%)							
	Cu	Mn	Zn	Si	Fe	Al	Ni	Mg
AZ91HP	0,016	0,017	0,72	0,03	0,002	9,45	0,025	reszta
AZ31	-	0,25	0,81	0,01	0,003	2,9	0,004	reszta

Spośród kilku wad podczas skrawania stopów magnezu należy wspomnieć o ich łatwopalności, co może powodować niebezpieczeństwo szczególnie przy skrawaniu z niewielkimi przekrojami warstwy skrawanej, ponieważ cienkie wióry są łatwopalne [52, 53]. Ponadto pył magnezowy może eksplodować, dlatego zalecana jest dobra wentylacja maszyn obróbkowych.

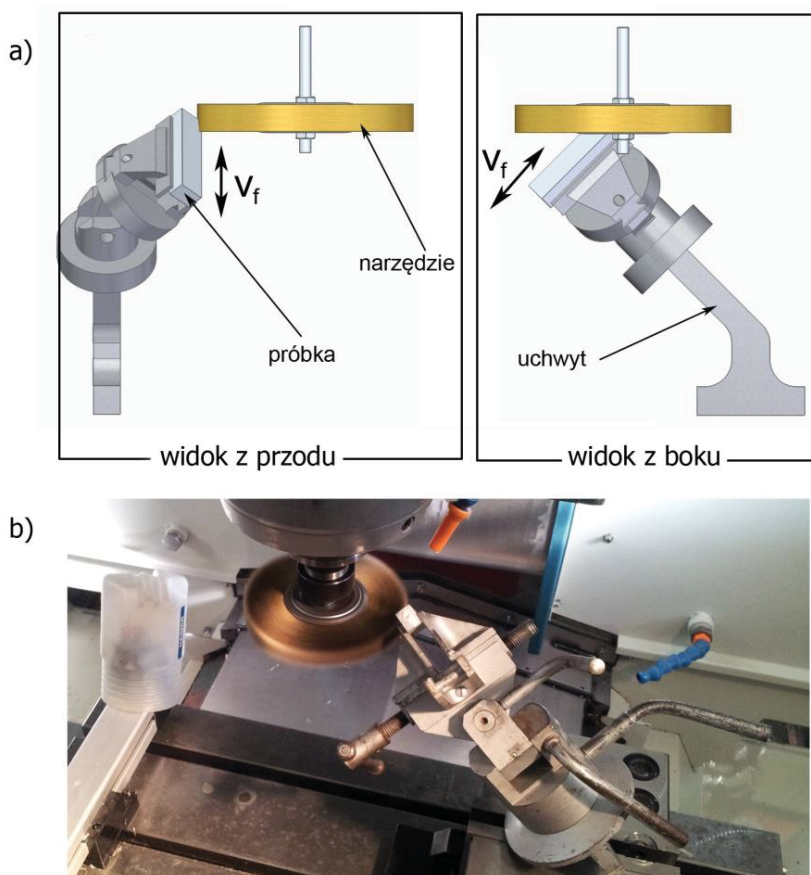
2.2. Opis stanowiska badawczego

Obróbkę frezowaniem oraz szczotkowaniem przeprowadzono na pionowym centrum obróbkowym FV580a, wyposażonym w system sterowania Fanuc 0iMC, znajdującym się w Katedrze Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej. W celu realizacji obróbki szczotkowaniem wykorzystano dodatkowe oprzyrządowanie technologiczne.

2.2.1. Oprzyrządowanie technologiczne

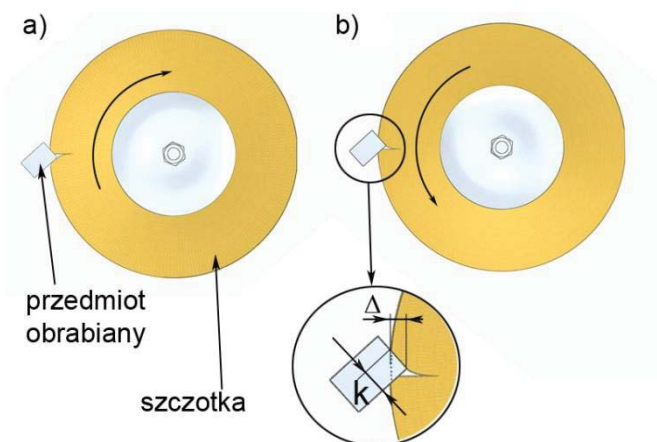
Podczas etapu eksperymentu związanego z analizą wpływu warunków obróbki na chropowatość powierzchni realizacja obróbki szczotkami walcowymi możliwa była przy wykorzystaniu specjalnego uchwytu, przedstawionego na rysunku 2.2, służącego do mocowania próbek tak, by powierzchnia obrabiana usytuowana była w kierunku pionowym, dającym tym samym możliwość szczotkowania na pionowym centrum obróbkowym. Próbkę zaciskane są za pomocą śrub wkręcanych w gwintowane otwory znajdujące się w kołnierzu uchwytu.

Podczas realizacji eksperymentu związanego z analizą wpływu obróbki szczotkowaniem na stan krawędzi próbki mocowano w specjalnym uchwycie (przedstawionym na rysunku 2.3) tak, aby wektor prędkości obwodowej skierowany był pod kątem 45° w stosunku do obrabianej krawędzi. Zastosowanie uchwytu wymusił fakt, że badania przeprowadzono na trzyosiowym centrum obróbkowym. W przypadku obrabiarki pięcioosiowej odpowiednie położenie narzędzia względem obrabianej krawędzi realizowane może być poprzez program NC.



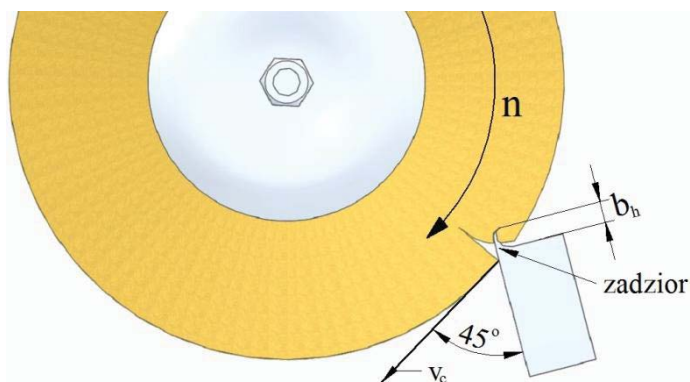
Rys. 2.3. Uchwyt do szczotkowania krawędzi: a) schemat stanowiska, b) widok rzeczywisty

Dodatkowo strategia obróbki szczotkowaniem zakładała zastosowanie dwóch przejść, co przedstawiono na rysunku 2.4. Pierwsze przejście realizowane było na prawych obrotach, natomiast drugie, powrotne, na obrotach lewych. Poprzez to obie powierzchnie, których przecięciem jest krawędź z zadziorem, były w sposób równomierny poddane oddziaływaniu włókien szczotki. Ponadto pierwsze przejście realizowane było od strony powierzchni, względem której w kierunku prostopadłym dokonywano pomiaru wysokości zadzioru, tak jak to zostało przedstawiono na rysunku 2.5. Takie rozwiązanie zapewniało skuteczne usunięcie zadziorów w pierwszym przejściu. W przypadku plastycznych materiałów istnieje możliwość „przebiegnięcia” zadzioru po pierwszym przejściu. W takich przypadkach drugie przejście pozwala na usunięcie pozostałości zadziorów. Ponadto zastosowanie dwóch przejść zapewniało stałość promienia zaokrąglenia krawędzi po obróbce szczotkowaniem.



Rys. 2.4. Dwukierunkowa realizacja procesu usuwania zadziorów: a) pierwsze przejście – obroty prawe, b) drugie przejście – obroty lewe

Konstrukcja handlowych szczotek z reguły umożliwia jedynie obróbkę na prawych obrotach (zgodnych z ruchem wskazówek zegara patrząc od strony wrzeciona). Podyktowane jest to możliwością odkręcenia się, na lewych obrotach, nakrętki zabezpieczającej talerze dociskowe. Podczas obróbki na prawych obrotach składowa główna F_c wypadkowej siły szczotkowania daje moment, który w przypadku pokonania pewnej granicznej siły spowoduje dokręcenie się nakrętki. W ten sposób zwiększy się jedynie docisk talerzy ściskających pierścienie, na których są rozłożone promieniowo włókna. Podczas badań rozpoznawczych na lewych obrotach przy prędkości obrotowej $n = 4479$ obr/min szczotki ulegały uszkodzeniu. W celu rozszerzenia możliwości obróbkowych szczotek o obróbkę na lewych obrotach zastosowano dodatkową nakrętkę konstrującą lub w przypadku zbyt krótkiego trzpienia gwintowanego, metodę łączenia poprzez spawanie.



Rys. 2.5. Schemat realizacji pierwszego przejścia szczotkującego

2.2.1. Stanowisko do wyznaczania średnicy dynamicznej szczotek

W przypadku obróbki frezowaniem na obrabiarkach sterowanych numerycznie znajomość wymiarów geometrycznych narzędzia jest podstawą przy realizacji każdego programu obróbkowego. Precyzyjna wartość średnicy i długości narzędzia musi być uwzględniona w celu zachowania dokładności wymiarowej przedmiotu obrabianego, a także do wyznaczenia prędkości skrawania v_c . Pomiar średnicy sztywnych narzędzi (frezów, wiertel, rozwiertaków itp.) odbywa się przy użyciu sond narzędziowych stykowych bądź laserowych.

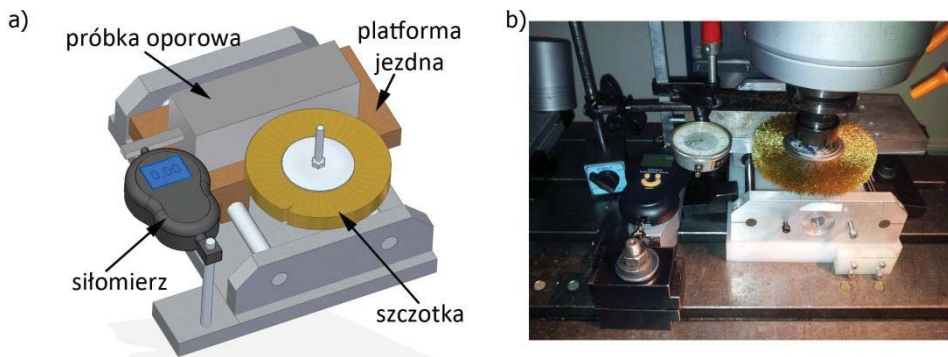
Ważnym parametrem technologicznym jest dosuw Δ , definiowany jako różnica między połową średnicy zewnętrznej szczotki walcowej a odległością osi tej szczotki od powierzchni obrabianej.

Podczas obróbki szczotkowaniem problematyczne staje się ustalenie średnicy szczotki. Producenci podają średnice narzędzi, jednak z uwagi na niedokładności w procesie produkcji rzeczywista wartość średnicy może różnić się od nominalnej nawet o kilka milimetrów (w przypadku narzędzi o średnicy powyżej 100 mm). Poszczególne włókna różnią się od siebie długością (rys. 2.6), co powoduje, że nie wszystkie włókna mogą brać udział w kontakcie z przedmiotem obrabianym w miarę zmniejszania wartości dosuwu. Elastyczne włókna wykonane są często z drutu falistego, co powoduje, że podczas wykonywania ruchu obrotowego siły odśrodkowe działające na poszczególne włókna mogą wpływać na zmiany długości włókien, a tym samym na średnicę szczotki. Ponadto opory powietrza oraz opory cieczy obróbkowych mogą wpływać na odchylanie się włókien, co z kolei wpływa na zmniejszenie średnicy szczotki. W miarę zwiększania się czasu pracy szczotki następuje zużycie włókien, czego skutkiem jest zmniejszenie średnicy szczotki. Pomiar średnicy typowymi metodami może być nieprecyzyjny (w metodach stykowych), a także trudny do przeprowadzenia (w metodach laserowych).



Rys. 2.6. Widok narzędzia z włóknami odstającymi

W celu pomiaru „średnicy dynamicznej szczotek”, czyli średnicy szczotki obracającej się wokół własnej osi, opracowano specjalne stanowisko, będące przedmiotem zgłoszenia patentowego [116]. Model stanowiska oraz widok rzeczywisty przedstawiono na rysunku 2.7. Sposób określania średnicy dynamicznej szczotek walcowych polega na tym, że szczotkę walcową wprawia się w ruch obrotowy dookoła jej osi z prędkością obrotową n . Sterując mechanizmami napędowymi, szczotkę wprawia się także w ruch posuwowy w kierunku próbki oporowej. Po przemieszczeniu się szczotki do położenia, w którym odległość osi szczotki walcowej od powierzchni próbki jest równa połowie średnicy dynamicznej szczotki, włókna uderzając w powierzchnię próbki, powodują wystąpienie siły F , którą mierzy się za pomocą siłomierza. Po osiągnięciu wartości siły F równej określonej doświadczalnie wartości progowej wyłącza się posuw i mierzy się odległość równą promieniowi średnicy dynamicznej szczotki.



Rys. 2.7. Stanowisko do pomiaru średnicy dynamicznej szczotek: a) model stanowiska, b) widok rzeczywisty

Do badań wykorzystano szczotki walcowe o średnicy nominalnej 120 mm. Dla każdego z czterech badanych stopów aluminium i magnezu w przypadku obróbki na sucho oraz z chodzeniem wymieniano szczotkę na nową. W celu wyeliminowania wpływu zmian wymiarów poszczególnych szczotek dokonano pomiaru średnicy dynamicznej na autorskim stanowisku. W tabelach 2.3, 2.4 oraz 2.5 przedstawiono wartości promienia dynamicznego $D_d/2$ dla wszystkich szczotek wykorzystanych w eksperymencie.

Tabela 2.3. Wartości sił (N) przy określonym dosuwie dla szczotki M02

Dosuw Δ	Wyznaczona doświadczalnie wartość promienia dynamicznej szczotki $D_d/2$ (mm)							
	61,8	63,3	61,5	61,7	61,6	61,9	62,2	62,2
(mm)	siła F (N)							
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
0,2	0,3	0,4	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,3
0,3	0,6	0,6	1,1	1,1	0,1	0,9	0,7	0,4
0,5	1,2	1,1	2,1	2,1	1,3	2	1,3	0,9
1	6	2,6	6,6	16,1	6,4	6,1	3,9	4,1
3	19,3	18	24,2	21,1	20,1	20,6	19,6	21,2
Numer szczotki								
	1	2	3	4	5	6	7	8

Badania przeprowadzono przy prędkości obrotowej $n = 2000$ obr/min. Wartość progową siły F, uzależnioną od rozdzielczości siłomierza, ustalono na 0,1 N. Po uzyskaniu tej wartości siły dokonywano pomiaru średnicy dynamicznej szczotek, przyjmując, że dosuw jest równy zero. Ponadto zestawiono wartości sił, jakie uzyskano przy kolejnych wartościach dosuwu.

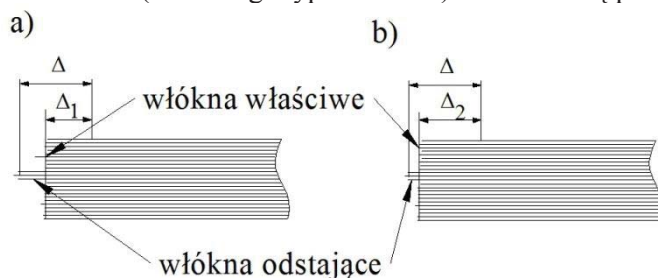
Tabela 2.4. Wartości sił (N) przy określonym dosuwie dla szczotki S02

Dosuw Δ	Wyznaczona doświadczalnie wartość promienia dynamicznej szczotki $D_d/2$ (mm)							
	62,6	62,8	62,2	62,4	62,6	62,5	62,3	62,3
(mm)	Siła F (N)							
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
0,2	0,6	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,4
0,3	0,9	0,8	0,8	0,9	0,7	1,1	1,1	0,6
0,5	1,7	1,9	1,4	1,7	1,3	2	2,2	1,4
1	4,6	5	3,6	4,3	3,7	5,5	4,9	3,8
3	22	23	18,1	21	25	28,6	28	22,1
Numer szczotki								
	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabela 2.5. Wartości sił (N) przy określonym dosuwie dla szczotki S03

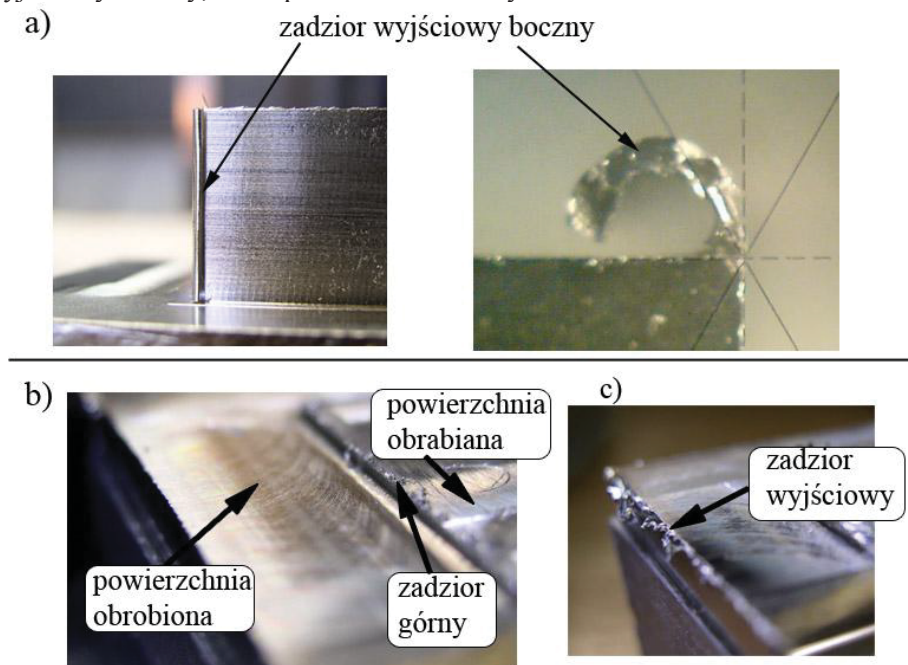
Dosuw Δ (mm)	Wyznaczona doświadczalnie wartość promienia dynamicznej szczotki $D_d/2$ (mm)							
	63,1	62,8	62,6	62,2	62,2	62,4	62,5	63
(mm)	Siła F (N)							
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,1	0,3	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
0,2	0,5	0,5	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
0,3	1	1	0,8	0,7	0,6	0,6	0,4	0,6
0,5	1,4	1,4	1	1	1,1	1,2	1	0,8
1	3,9	3,9	2,9	3,4	3,9	3,5	3,8	1
3	26	26	26	29,7	30	29,6	27,8	28
Numer szczotki								
	1	2	3	4	5	6	7	8

Z punktu widzenia powtarzalności pomiarów istotne jest, by przy założonej wartości dosuwu szczotkowania siły oddziaływania włókien na obrabianą powierzchnię były takie same dla danego typu szczotki. Na rysunku 4.8 przedstawiono wpływ długości włókien odstających na średnicę dynamiczną szczotki. Oddziałujące na powierzchnię oporową włókna odstające są w stanie doprowadzić do uzyskania progowej wartości siły. Zakładając identyczną wartość dosuwu Δ dla przypadków przedstawionych na rys. 2.8 a i b włókna właściwe w innym stopniu będą oddziaływać na powierzchnię obrabianą ($\Delta_2 > \Delta_1$), co wpłynie na różne wartości sił, a tym samym różne efekty szczotkowania. W eksperymencie założono stałą wartość dosuwu $\Delta = 3$ mm. Dlatego też, dla wszystkich szczotek z każdego typu, na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono średnią siłę F przy dosuwie $\Delta = 3$ mm wynoszącą odpowiednio dla szczotek M02 = 20,5 N; S02 = 23,5 N; S03 = 27,9 N. Następnie dla każdej szczotki dokonano korekcji średnicy dynamicznej D_d , by uzyskać jednakowe siły oddziaływania włókien szczotki (dla danego typu szczotki) na obrabianą powierzchnię.

Rys. 2.8. Wpływ długości włókien odstających na średnicę dynamiczną szczotki D_d

3. BADANIA PROCESU FORMOWANIA SIĘ ZADZIORÓW

Proces formowania się zadziórów po frezowaniu poruszany był przez naukowców skupiających się na tym zagadnieniu. W celu weryfikacji oraz analizy wpływu wybranych parametrów technologicznych skrawania na wysokość zadziórów przeprowadzono badania procesu formowania się zadziórów po frezowaniu wytypowanych do eksperymentu stopów aluminium i magnezu. W zależności od miejsca występowania w obróbce frezowaniem istnieje kilka rodzajów zadziórów powstających na krawędziach przedmiotów frezowanych (podrozdział 1.4). Analizie poddano trzy rodzaje zadziórów: górny, wyjściowy oraz wyjściowy boczny, które przedstawiono na rysunku 3.1.

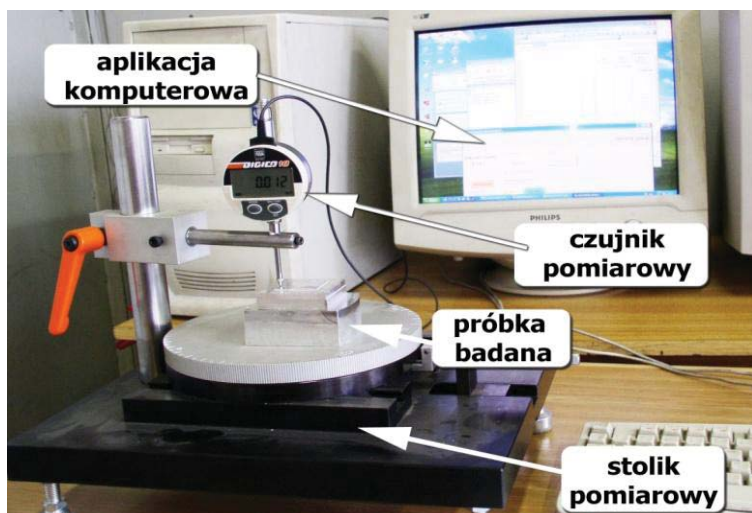


Rys. 3.1. Rodzaje zadziórów analizowanych podczas eksperymentu

3.1. Metodyka badań procesu formowania się zadziórów

Na rysunku 3.2 przedstawiono stanowisko do pomiaru wysokości zadziórów wyposażone w specjalny stół ze śrubą mikrometryczną, czujnik Tesa DIGICO mierzący wysokości zadziórów metodą stykową z dokładnością do 1µm oraz autorską aplikację do komunikacji czujnika z komputerem i przesyłania danych bezpośrednio do programu Excel. Zadziór górny mierzony był

w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej, natomiast zadzior wyjściowy mierzono w kierunku równoległym do powierzchni obrobionej.



Rys. 3.2. Widok stanowiska do badania wysokości zadziorów

Dla stopu aluminium 7075-T651 badania przeprowadzono przy różnych prędkościach skrawania v_c oraz przy różnych wartościach posuwu na ostrze f_z w warunkach charakterystycznych dla obróbki szybkościowej. Głębokość skrawania utrzymano na stałym poziomie. Istotnym czynnikiem z punktu widzenia tworzenia się zadziorów jest kąt wyjścia narzędzia ze strefy skrawania uzależniony od szerokości skrawania. Kąt ten dla stopu 7075 T651 utrzymano na stałym poziomie. Zestawy parametrów technologicznych użytych w badaniach przedstawiono w tabeli 3.1. Jako narzędzie został użyty frez składany dwu-ostrzowy o średnicy 20 mm firmy Iscar, o symbolu HM90 E90A-D20-2-C20-LB, z płytkami dedykowanymi dla stopów lekkich. Analizowano dwa rodzaje zadziorów: górny i wyjściowy.

Tabela 3.1. Parametry technologiczne skrawania podczas frezowania stopu aluminium 7075-T651

Prędkość skrawania	Posuw na ostrze	Głębokość skrawania	Kąt wyjścia
v_c (m/min)	f_z (mm/ostrze)	a_p (mm)	Φ (°)
1257	0,05	0,5	90
	0,1		
	0,2		
1005	0,1		
1257			
1508			

W przypadku frezowania stopu magnezu skupiono się na analizie wpływu kąta wyjścia Φ na wysokość zadziorów, który jest istotnym czynnikiem w procesie formowania zadziorów. Wartości prędkości skrawania przyjęto: 71; 263; 526 m/min. Natomiast wartości posuwu: 0,01; 0,1; 0,2 mm/ostrze. Zastosowano stałą głębokość skrawania $a_p = 1$ mm. Jako narzędzie wykorzystano frez czółowy trzyostrzowy składany o średnicy $d = 25$ mm. Dla przyjętych wartości kąta wyjścia, obliczono promieniową głębokość skrawania, a następnie, uwzględniając posuw na ostrze, wyznaczono grubość warstwy skrawanej przy wyjściu narzędzia (tabela 3.2) w celu oceny wpływu wymiarów warstwy skrawanej na powstawanie zadziorów.

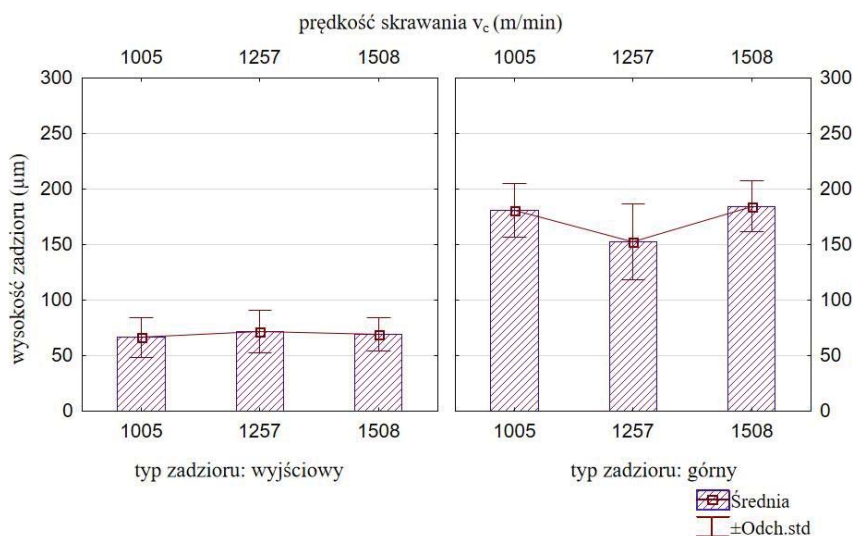
Tabela 3.2. Wartości grubości warstwy skrawanej w zależności od posuwu i kąta wyjścia podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP

Posuw f_z (mm/ostrze)	Kąt wyjścia Φ				
	30°	60°	90°	120°	150°
	Grubość warstwy skrawanej (mm)				
0,01	0,005	0,009	0,01	0,009	0,005
0,1	0,05	0,086	0,1	0,86	0,05
0,2	0,1	0,173	0,2	0,173	0,1

Dla stopu magnezu wykonano także analizę wpływu warunków frezowania na współczynnik zadzioru, który jest wyznacznikiem pracochłonności usuwania zadziorów. Sposób wyznaczania współczynnika zadzioru opisano w podrozdziale 1.4.

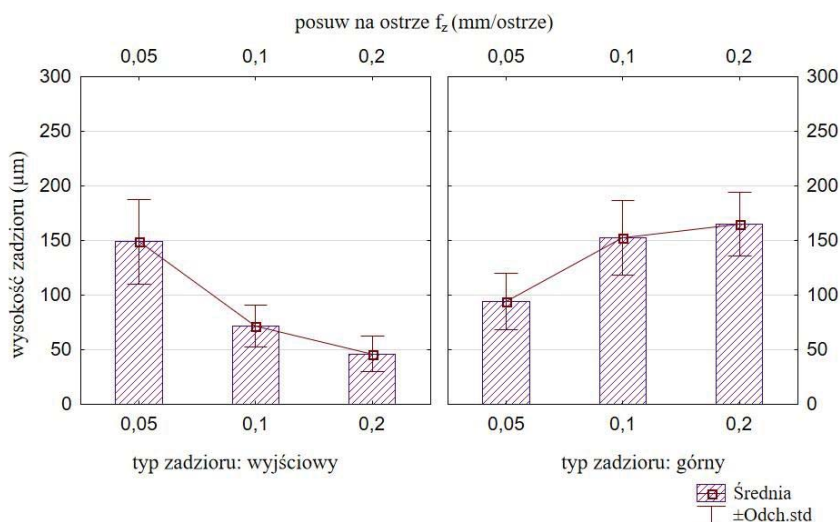
3.2. Badania wpływu parametrów obróbki na wielkość zadziorów

Na rysunku 3.3 przedstawiono wykres wpływu prędkości skrawania na wysokość zadziorów. Dla obróbki szybkościowej HSC w przyjętym zakresie parametrów technologicznych frezowania nie zaobserwowano znaczącego wpływu prędkości frezowania na wysokość analizowanych zadziorów. Dosyć duże wartości odchylenia standardowego spowodowane są nieregularnością występowania zadzioru wzdłuż krawędzi po frezowaniu.



Rys. 3.3. Wpływ prędkości skrawania v_c na wysokość zadziuru wyjściowego oraz górnego – stop aluminium 7075 T651

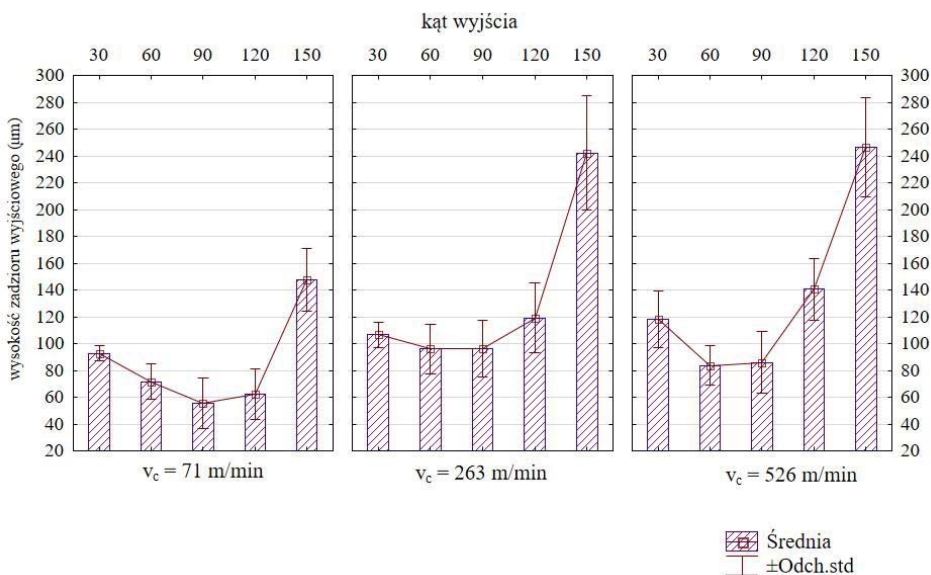
Natomiast w przypadku analizy wpływu posuwu na wysokość zadziuru zauważalna jest tendencja zmniejszania się wysokości zadziuru wraz ze wzrostem posuwu dla zadziuru wyjściowego oraz wzrost wysokości zadziuru wraz ze wzrostem posuwu dla zadziuru górnego (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Wpływ posuwu na ostrze na wysokość zadziuru wyjściowego oraz górnego – stop aluminium 7075 T651

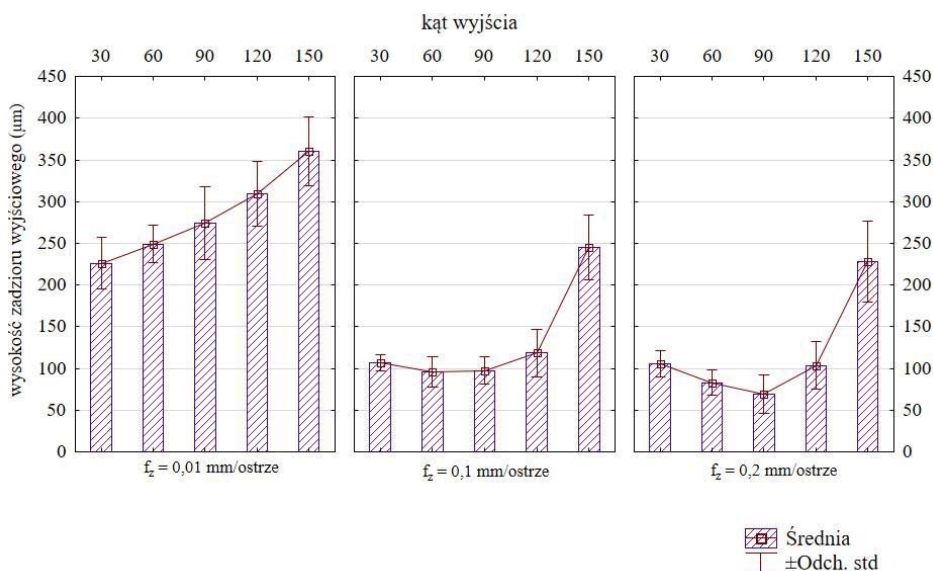
Spowodowane jest to innym miejscem występowania oraz innym charakterem powstawania tych dwóch rodzajów zadziorów. Zadziór górny formowany jest poprzez walcową powierzchnię frezu i uzależniony jest od kąta wzniosu linii śrubowej rowków wiórowych, z kolei zadziór wyjściowy powstaje w momencie osiągnięcia przez główną krawędź skrawającą frezu krawędzi materiału obrabianego. Przeprowadzono również badania dla innych stopów aluminium, które nie są przedmiotem niniejszego opracowania [69].

W przypadku stopu magnezu AZ91HP (rys. 3.5) zaobserwowano przy prędkości $v_c = 71$ m/min mniejsze wysokości zadziorów górnych w porównaniu z prędkościami $v_c = 263$ m/min oraz $v_c = 526$ m/min. Dosyć wyraźny jest wpływ kąta wyjścia na wysokość zadziorów. Na rysunku 3.5 przedstawiono wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru dla zmiennych prędkości skrawania v_c . Dla wszystkich prędkości skrawania przy dużym kącie wyjścia $\Phi = 150^\circ$, zaobserwowano znaczący wzrost średniej wysokości zadziorów.



Rys. 3.5. Wpływ prędkości skrawania i kąta wyjścia na wysokość zadzioru wyjściowego – materiał AZ91HP

Wykresy na rysunku 3.6 przedstawiają wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru dla zmiennych wartości posuwu na ostrze f_z . Przy obróbce z posuwem $f_z = 0,01$ mm/ostrze uzyskano zadziory o znacznie większej wysokości od około 230 μm do 360 μm w porównaniu z obróbką z większymi posuwami (od 80 μm do 240 μm). Dla posuwu $f_z = 0,01$ mm/ostrze wraz ze wzrostem kąta wyjścia Φ wzrasta wysokość zadzioru. W badaniach nie zaobserwowano znaczących różnic w wysokości zadzioru, porównując obróbkę z posuwem $f_z = 0,1$ oraz 0,2 mm/ostrze.

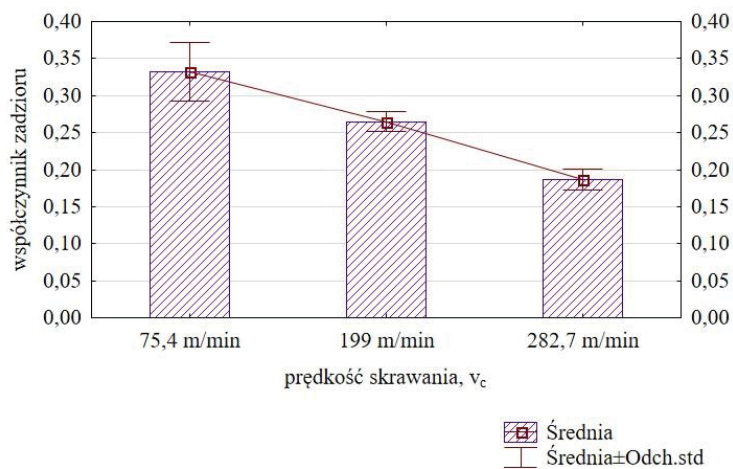
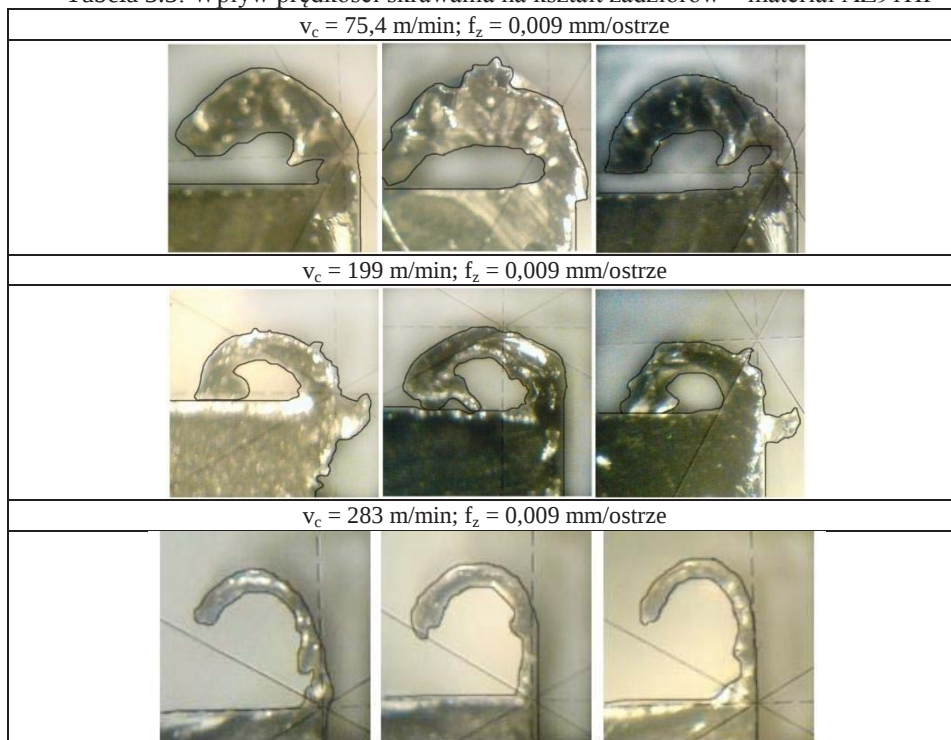


Rys. 3.6. Wpływ posuwu na ostrze i kąta wyjścia na wysokość zadzioru wyjściowego – materiał AZ91HP

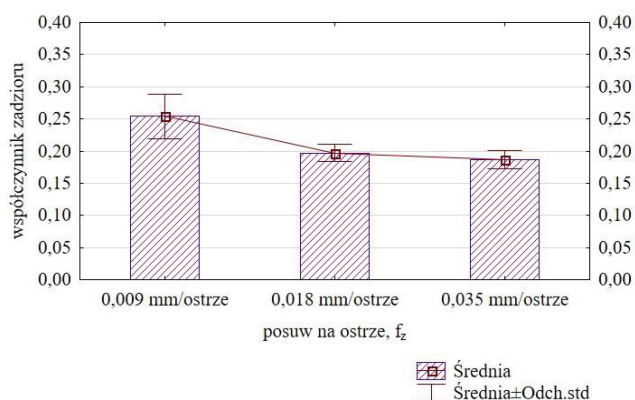
Pracochłonność usuwania zadziorów można wyrazić za pomocą współczynnika. Ważnym parametrem, z uwagi na pracochłonność usuwania, jest grubość podstawy zadzioru. Im większa jest podstawa zadzioru, stanowiąca o sile jego utwierdzenia do materiału rodzimego, tym trudniej go usunąć. W tabeli 3.3 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na kształt zadziorów wyjściowych bocznych. Dla prędkości $v_c = 75,4$ m/min grubość podstawy jest największa, co wpłynęło na współczynnik zadzioru. Natomiast dla prędkości $v_c = 282,7$ m/min podstawa jest na tyle mała, że pracochłonność usuwania zadzioru wyrażana za pomocą współczynnika zadzioru jest najmniejsza (rys. 3.7).

Na rysunku 3.8 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na współczynnik zadzioru. Przy stałej prędkości skrawania, prędkość posuwu uzależniona jest od posuwu na ostrze. Im mniejszy posuw na jedno ostrze, tym narzędzie wolniej zbliża się do krawędzi próbki. W takim przypadku "wywijanie" się materiału na zewnątrz jest silniejsze, co prowadzi do zwiększenia podstawy zadzioru i współczynnika zadzioru.

Tabela 3.3. Wpływ prędkości skrawania na kształt zadziorów – materiał AZ91HP



Rys. 3.7. Wpływ prędkości skrawania na współczynnik zadzioru – materiał AZ91HP



Rys. 3.8. Wpływ posuwu na ostrze na współczynnik zadzioru – stop magnezu AZ91HP

W tabeli 3.4 przedstawiono kształty przykładowych zadziorów wyjściowych bocznych w przypadku frezowania z różnymi posuwami na ostrze. Prezentowane wyniki opublikowano w pracy [60].

Tabela 3.4. Wpływ posuwu na ostrze na kształt zadziorów – materiał AZ91HP

$f_z = 0,009 \text{ mm/ostrze}$; $v_c = 283 \text{ m/min}$			
$f_z = 0,018 \text{ mm/ostrze}$; $v_c = 283 \text{ m/min}$			
$f_z = 0,035 \text{ mm/ostrze}$; $v_c = 283 \text{ m/min}$			

4. BADANIA STANU KRAWĘDZI PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM

4.1. Obróbka krawędzi metodą szczotkowania

4.1.1. Charakterystyka narzędzi wykorzystanych w badaniach

W tabeli 4.1 przedstawiono charakterystykę narzędzi wykorzystanych w badaniach. Szczotki trzpieniowe wykonane były z drutu falistego. Trzpień o średnicy $\varnothing 6$ mm umożliwił szybkie mocowanie w oprawce zaciskowej BT40 pionowego centrum frezarskiego. Generalnie szczotki wytypowane do eksperymentu różnią się sztywnością. Sztywność narzędzi uzależniona jest od materiału zastosowanego na wypełnienie oraz średnicy pojedynczego włókna. Włókna z drutu mosiężnego o średnicy 0,2 mm są najbardziej elastyczne (sprężyste). Większą sztywność od mosiężnego ma włókno stalowe o średnicy 0,2 mm. Natomiast najbardziej sztywne są włókna stalowe o średnicy 0,3 mm. Biorąc pod uwagę sztywność poszczególnych włókien, należy spodziewać się, że największe efekty (promienie zaokrąglenia krawędzi, skuteczność usuwania zadziorów) zapewni szczotka S03 (oznaczenie w tabeli 4.1). Jednak dla największej średnicy włókien gęstość ich upakowania (całkowita liczba włókien) na obwodzie szczotki jest najmniejsza. Czynniki te sprawiają, że mechanizm oddziaływania włókien szczotki na powierzchnię jest procesem złożonym.

Tabela 4.1. Charakterystyka narzędzi stosowanych w eksperymencie

Szczotki	Oznaczenie	M02	S02	S03
	Widok			
Średnica narzędzia		120 mm	120 mm	120 mm
Materiał włókna		mosiądz	stal	stal
Średnica włókna		0,2 mm	0,2 mm	0,3 mm

4.1.2. Parametry technologiczne szczotkowania

W tabeli 4.2 przedstawiono wykaz parametrów technologicznych szczotkowania wykorzystanych w eksperymencie. Wybrano cztery poziomy wartości prędkości ruchu posuwowego v_f w zakresie od 140 do 3700 mm/min oraz cztery poziomy prędkości obwodowej v_c w zakresie od 422 do 1689 m/min. Maksymalna prędkość obwodowa związana jest z dopuszczalną maksymalną prędkością obrotową n podawaną przez producenta dla tego typu szczotek, która wyno-

si $n = 4500$ obr/min. Dla prędkości obwodowej $v_c = 1689$ m/min prędkość obrotowa wynosi $n = 4479$ obr/min. Dosuw ustalono na stałym poziomie $\Delta = 3$ mm.

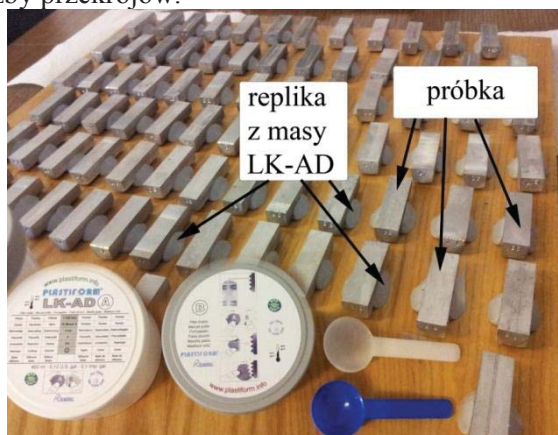
Tabela 4.2. Parametry technologiczne szczotkowania

Lp.	Prędkość posuwu, v_f	Prędkość szczotkowania, v_c	Dosuw, Δ	
	mm/min	m/min	mm	
1	370	422	3	
2		844		
3		1266		
4		1689		
5	140	1266		
6	370			
7	1000			
8	3700			

4.2. Badania stanu krawędzi po obróbce szczotkowaniem

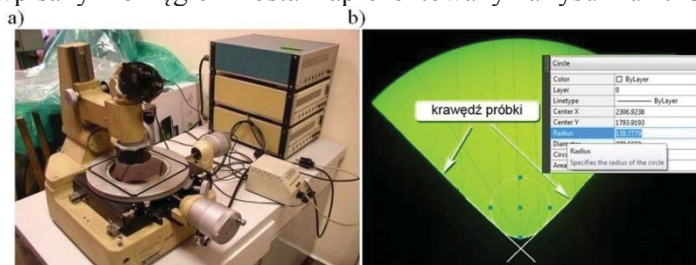
4.2.1. Metodyka badań stanu krawędzi

W celu odwzorowania zarysu krawędzi po procesie usuwania zadziorów wykorzystano metodę replik przy użyciu dwuskładnikowej masy L.K-A.D firmy Plastiform o skurczu poniżej $1\mu\text{m}$. Masy te szeroko wykorzystywane są w pomiarach nieniszczących trudnodostępnych miejsc. Polimeryzacja tego typu masy rozpoczyna się po wymieszaniu dwóch składników. Charakteryzuje się formowaniem z zachowaniem wysokiej dokładności szczegółów powstałych replik. Skurcz masy po polimeryzacji nie przekracza 1 mikrometra. Na rysunku 4.1 przedstawiono serię próbek dla jednego z badanych materiałów po obróbce szczotkowaniem w trakcie polimeryzacji masy. Masa o konsystencji plasteliny odciskana była na krawędziach badanych próbek. Konsystencja masy po utwardzeniu pozwala na przecinanie ostrym narzędziem. Pozwoliło to na szybkie uzyskanie dużej liczby przekrojów.



Rys. 4.1. Sposób przygotowania replik

Tak uzyskane przekroje, będące replikami przekroju próbki wokół krawędzi, fotografowano pod mikroskopem (rys. 4.2). Fotografie importowano do programu AutoCAD z zachowaniem skali. Wpisanie okręgu dopasowanego do konturu próbki pozwoliło na określenie promienia zaokrąglenia krawędzi po procesie usunięcia zadziorów metodą szczotkowania. Przykładowy widok repliki wraz z wpisanym okręgiem został zaprezentowany na rysunku 4.2b.



Rys. 4.2. Stanowisko do wyznaczania promienia zaokrąglenia krawędzi:
a) mikroskop, b) widok repliki

4.2.2. Wpływ parametrów szczotkowania na stan krawędzi – badania wstępne

W celu prowadzenia wnioskowania statystycznego przeprowadzono badania wstępne, dla których określono liczebność próby przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Liczebność próby wyznaczono z zależności:

$$n = \frac{t_{(\alpha;f)}^2 \cdot S_x^2}{\varepsilon^2}, \quad (4.1)$$

gdzie:

S_x^2 – wariancja promienia zaokrąglenia krawędzi na podstawie wyników pomiarów próby wstępnej,

ε – dokładność oceny,

f – liczba stopni swobody,

α – poziom istotności,

t – wartość krytyczna rozkładu t-Studenta.

W celu przeprowadzenia badań wstępnych wytypowano zestaw parametrów technologicznych szczotkowania ($v_c = 1266$ m/min, $v_f = 370$ mm/min), przy których przeprowadzono badania usuwania zadziorów po frezowaniu stopów aluminium i magnezu. Badania wstępne przeprowadzono dla trzech wytypowanych do badań szczotek, przy obróbce na sucho jak również z zastosowaniem cieczy obróbkowej. Na każdej krawędzi za pomocą metody replik dokonano od sześciu do ośmiu pomiarów stanu krawędzi (zaokrąglenia, sfazowania, wysokości zadziorów), uśredniając wynik, który traktowany był jako pomiar z jednej próbki. Eksperyment powtórzono dziesięciokrotnie dla czterech badanych materiałów. W tabeli 4.3 przedstawiono wyniki obliczeń liczebności próby dla stopów 7075-T651 oraz AlSi10Mg. Dokładność oceny ε przyjęto na poziomie 5%

wartości średniej przy danych warunkach obróbki. Po procesie usuwania zadziórów, w przypadku obróbki stopu aluminium AlSi10Mg za pomocą szczotki S02 oraz S03, uzyskano sfazowanie z zadziorem, co jest niepożądanym stanem krawędzi.

Tabela 4.3. Wyniki badań wstępnych prowadzonych w celu wyznaczenia liczebności próby dla stopów aluminium

Materiał	7075-T651						AlSi10Mg					
Medium	na sucho			chłodzenie			na sucho			chłodzenie		
Rodzaj szczotki	M02	S02	S03	M02	S02	S03	M02	S02	S03	M02	S02	S03
Numer próbki	promień zaokrąglenia krawędzi (μm)											
1	327	855	1162	211	440	633	345	-	-	242	1149	1588
2	341	880	1297	183	511	576	321	-	-	245	1072	1710
3	373	912	1220	182	540	633	333	-	-	233	1072	1639
4	382	919	1296	203	516	580	343	-	-	216	1171	1605
5	347	1029	1228	211	478	588	342	-	-	241	1027	1626
6	346	984	1145	184	494	625	319	-	-	249	1189	1769
7	371	885	1361	201	480	557	354	-	-	262	1189	1556
8	366	937	1262	186	475	601	350	-	-	242	1208	1594
9	390	950	1302	208	480	644	296	-	-	225	1049	1562
10	332	900	1185	189	505	558	370	-	-	254	1154	1700
Średnia, $\bar{y}$	357	925	1246	196	492	599	337			241	1128	1635
Odchylenie standardowe, σ	22	52	70	12	28	32	21			14	66	70
Wariancja, S_x^2	467	2713	4854	148	758	1054	440			183	4391	4919
Dokładność oceny, ε	18	46	62	10	25	30	17			12	56	82
Poziom istotności, α	0,05						0,05					
$t_{(0.05,9)}$	2,262						2,262					
Liczebność próby, n	7,48	6,49	6,40	7,90	6,41	6,00	7,92			6,46	7,06	3,77

Tabela 4.4. Wyniki badań wstępnych prowadzonych w celu wyznaczenia liczebności próby dla stopów magnezu

Material	AZ31						AZ91HP					
Medium	na sucho			chłodzenie			na sucho			chłodzenie		
Rodzaj szczotki	M02	S02	S03	M02	S02	S03	M02	S02	S03	M02	S02	S03
Numer próbki	promień zaokrąglenia krawędzi (μm)											
1	137	261	404	144	312	470	-	411	443	96	280	682
2	136	286	371	139	323	473	-	386	435	104	269	747
3	108	279	364	125	322	506	-	449	465	79	245	719
4	115	235	394	139	302	543	-	410	454	87	268	681
5	116	276	378	166	345	467	-	406	451	83	271	643
6	107	272	375	161	296	526	-	425	465	102	294	677
7	122	259	411	154	300	532	-	413	401	72	252	710
8	140	283	363	130	306	485	-	429	424	94	260	723
9	109	250	365	158	330	471	-	397	423	97	250	663
10	136	283	401	132	299	530	-	436	460	83	282	732
Średnia, $\bar{y}$	122	268	382	145	313	500		416	442	90	267	698
Odchylenie standardowe, σ	13	17	18	14	16	30		19	21	10	16	33
Wariancja, S_x^2	179	278	328	201	258	923		347	454	109	241	1108
Dokładność oceny, ε	12	13	19	14	16	25		21	22	9	13	35
Poziom istotności, α	0,05						0,05					
$t_{(0,05,9)}$	2,262						2,262					
Liczebność próby, n	6,12	7,92	4,58	4,92	5,37	7,55		4,09	4,75	6,93	6,92	4,66

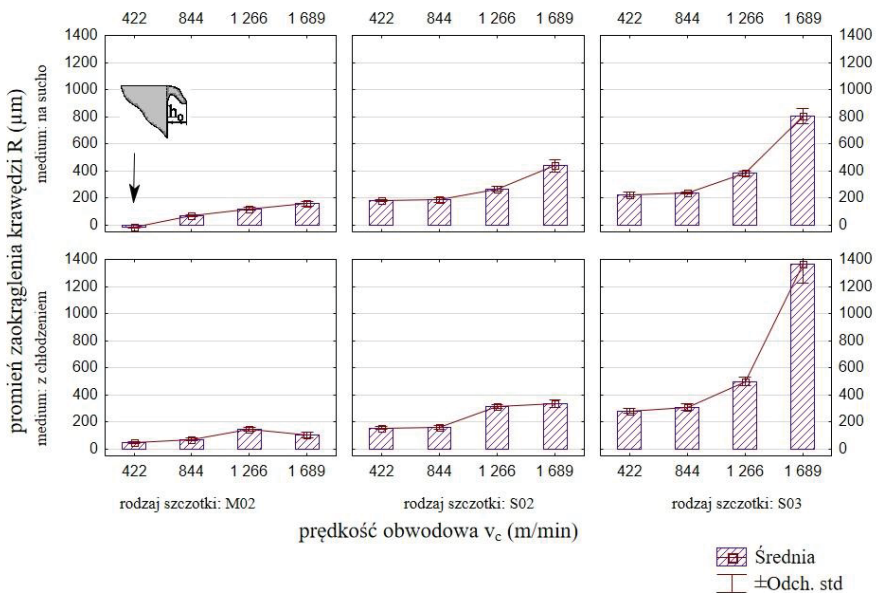
W tabeli 4.4 przedstawiono wyniki wyznaczenia liczebności próby w przypadku stopów AZ31 oraz AZ91HP. Dokładność oceny ε przyjęto na poziomie 5% wartości średniej z wyjątkiem wyników uzyskanych dla szczotki M02, dla których uzyskano bardzo małe wartości promieni zaokrąglenia poniżej 150 μm . Dokładność oceny ε poniżej 10 μm z technologicznego punktu widzenia jest nieuzasadniona.

Z tablicy rozkładu t-Studenta dobrano współczynnik t dla zadanego poziomu istotności α oraz liczby stopni swobody $f = 9$. Ponieważ największa wartość przy wyznaczaniu liczebności próby $n = 7,92$ do dalszych badań przyjęto $n = 8$ dla wszystkich warunków szczotkowania. W przypadku obróbki stopu magnezu AZ91HP na sucho szczotką M02 zadziory znajdujące się na krawędziach próbek nie zostały usunięte.

4.2.3. Badania wpływu parametrów szczotkowania na stan krawędzi

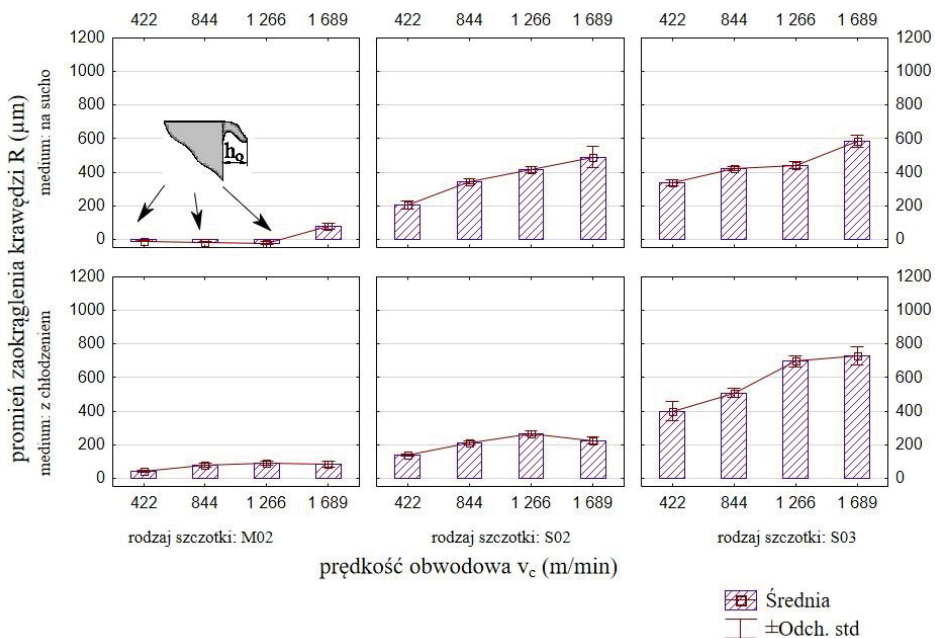
Analizowano wpływ prędkości obwodowej v_c oraz wpływ prędkości ruchu posuwowego v_f na stan krawędzi po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania. Wytypowane zestawy parametrów technologicznych szczotkowania zaprezentowano w tabeli 4.2.

Na rysunkach 4.3÷4.5, 4.7 przedstawiono wykresy wpływu prędkości obwodowej v_c na promień zaokrąglenia krawędzi po procesie usuwania zadziorów dla badanych materiałów.



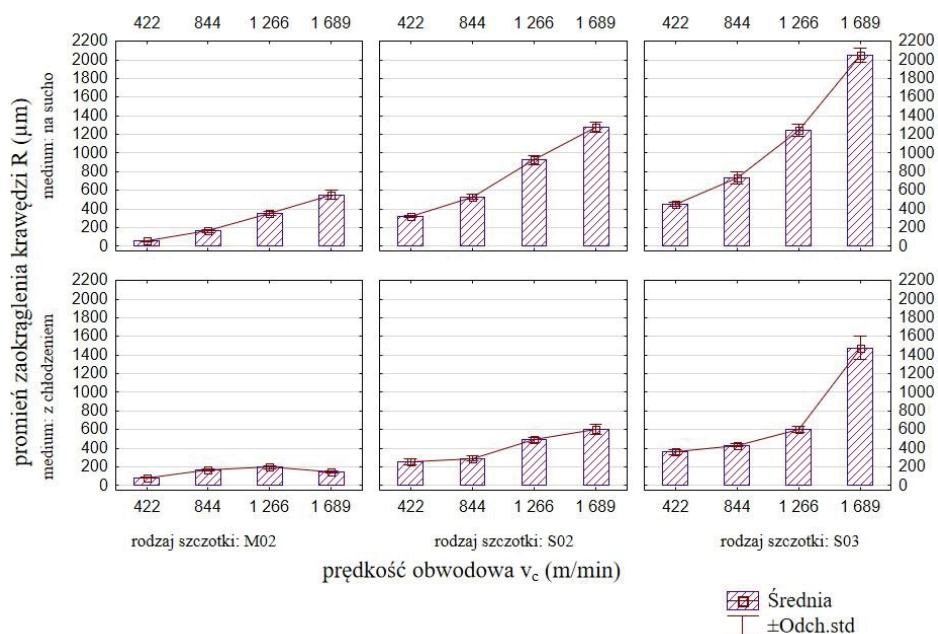
Rys. 4.3. Wpływ prędkości obwodowej na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał AZ31

Wykresy przygotowano w programie Statistica wersja 10. Ponadto poziomo zaprezentowano wpływ prędkości obwodowej v_c dla zastosowanych w badaniach szczotek: M02 – szczotka z drutu mosiężnego o średnicy pojedynczego włókna 0,2 mm; S02 – szczotka z drutu stalowego o średnicy włókna 0,2 mm oraz S03 – szczotka z drutu stalowego o średnicy włókna 0,3 mm. Natomiast pionowo przedstawiono porównanie zastosowanego medium: obróbka na sucho lub z zastosowaniem cieczy obróbkowej. Promień zaokrąglenia krawędzi wyrażono w mikrometrach. Występowanie zadzioru zostało zaznaczone na wykresach symbolem graficznym, natomiast wartość wysokości zadzioru h_0 umownie przedstawiają słupki na wykresie skierowane poniżej wartości zero.



Rys. 4.4. Wpływ prędkości obwodowej na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał AZ91HP

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej n , a tym samym prędkości obwodowej v_c , wzrasta energia kinetyczna poszczególnych włókien. Silniejsze oddziaływanie powoduje zwiększenie promienia zaokrąglenia krawędzi po obróbce szczotkowaniem. W przypadku stopu AZ31 podczas obróbki na sucho z prędkością $v_c = 422$ m/min zadziory nie zostały usunięte. Energia szczotki M02 o najbardziej elastycznych włóknach spośród badanych narzędzi, była zbyt mała, aby przy tej prędkości obwodowej wykonać pracę usunięcia zadziorów.



Rys. 4.5. Wpływ prędkości obwodowej na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał 7075-T651 [61]

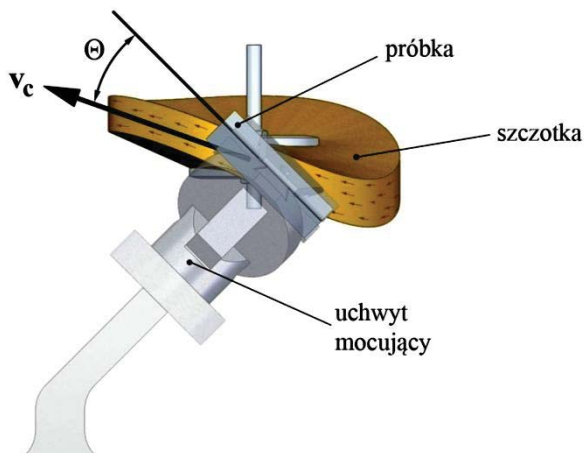
W tabeli 4.5 przedstawiono przykładowe repliki wykonane w przekroju prostopadłym do krawędzi po obróbce szczotkowaniem narzędziem S02 wraz z wpisanymi okręgami w kontur próbki dla stopu aluminium 7075-T651.

Tabela 4.5. Widok replik – stop 7075-T651 po obróbce narzędziem S02

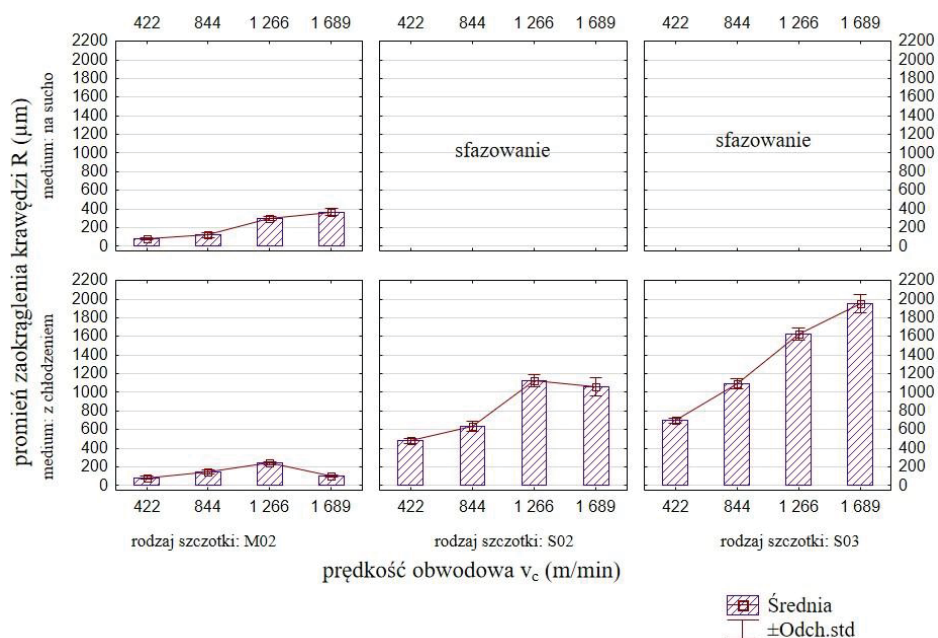
		Prędkość obwodowa v_c (m/min)			
		420	844	1266	1689
Medium	na sucho				
	z chłodzeniem				

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wzrasta promień zaokrąglenia krawędzi. Podczas obróbki na sucho za pomocą szczotek S02 i S03, które charakteryzują się większą sztywnością, znacznie wzrasta temperatura w strefie szczotkowania. Uplastycznienie materiału powoduje uzyskanie większego promienia zaokrąglenia krawędzi.

W niektórych przypadkach przy prędkości $v_c = 1689$ m/min, odpowiadającej prędkości obrotowej $n = 4479$ obr/min, szczególnie dla najbardziej elastycznej szczotki M02 zaobserwowano zmianę tendencji wzrostowej promienia zaokrąglenia krawędzi wraz ze wzrostem prędkości v_c . Zmniejszenie promienia zaokrąglenia krawędzi przy tej prędkości obwodowej może być związane z dynamiką procesu i sztywnością narzędzi. Krawędź podlegająca procesowi usuwania zadziórów ustawiona jest pod kątem 45° w stosunku do wektora prędkości obwodowej v_c swobodnie wirującej szczotki. Warunki jednak mogą zmienić się w momencie, gdy włókno uderza o powierzchnię przystającą do krawędzi z zadziorem usytuowanej pod kątem 45° do wektora v_c . Wypadkowa siła działająca na włókno po uderzeniu w powierzchnię powoduje wyginanie się włókien. Szczotka przy prędkości $v_c = 1689$ m/min wykonuje ponad 70 obrotów na sekundę. Elastyczne włókno szczotki M02 nie jest w stanie przyjąć wyjściowego położenia po każdym obrocie. Podczas eksperymentu zaobserwowano falę odkształcenia włókien po uderzeniu w próbkę, co schematycznie zobrazowano na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Efekt ugięcia włókien podczas obróbki



Rys. 4.7. Wpływ prędkości obwodowej na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał AlSi10Mg

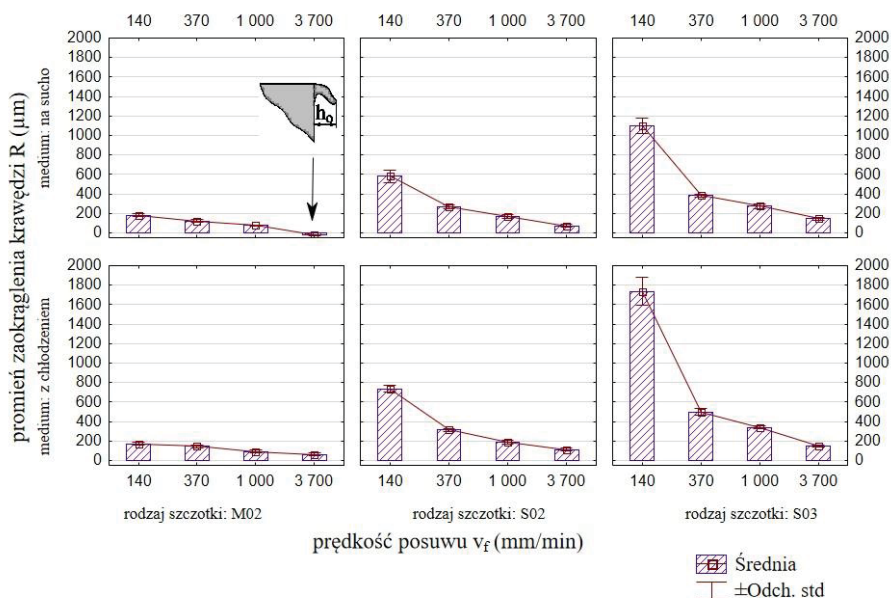
Tabela 4.6. Widok sfazowania z zadziorem po obróbce szczotkowaniem

Parametry obróbki	Widok repliki	Widok rzeczywisty
Rodzaj szczotki S02 $v_c = 1266$ m/min $v_f = 370$ mm/min medium: na sucho		
Rodzaj szczotki S03 $v_c = 1266$ m/min $v_f = 370$ mm/min medium: na sucho		

W wyniku poprzedniego uderzenia włókna szczotki w krawędź obrabianą wektor prędkości obwodowej znajdował się pod kątem $\Theta < 45^\circ$. Zmieniona trajektoria ruchu włókna, w której dominującą rolę miał ruch wzdłuż krawędzi z zadziorem powodowała spadek promienia zaokrąglenia krawędzi przy prędkości $v_c = 1689$ m/min.

W przypadku stopu AlSi10Mg podczas obróbki narzędziami S02 oraz S03 na sucho uzyskano sfazowanie z zadziorem. Uplastycznienie materiału spowodowane wzrostem temperatury spowodowało wypłynięcie materiału, tworząc zadziór z jednej strony krawędzi. W tabeli 4.6 przedstawiono przykładowe repliki z zadziorem dla szczotki S02 oraz S03. Jest to niepożądany stan krawędzi.

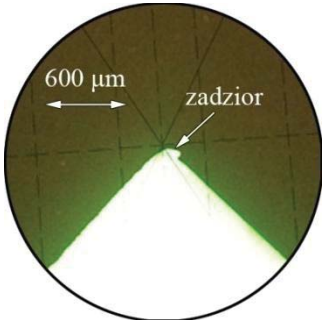
Na rysunkach 4.8, 4.10, 4.11, 4.14 przedstawiono analizę wpływu prędkości ruchu posuwowego na promień zaokrąglenia krawędzi.



Rys. 4.8. Wpływ prędkości posuwu na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał AZ31

Im mniejsza prędkość posuwu, tym czas kontaktu włókien z krawędzią próbki jest dłuższy, a to przekłada się na skuteczniejszy proces usuwania zadziorów. Wraz ze wzrostem posuwu promień zaokrąglenia krawędzi maleje. Z ekonomicznego punktu widzenia istotne jest, aby szczotka poruszająca się wzdłuż krawędzi z zadziorem przesuwała się jak najszybciej, zapewniając przy tym skuteczne usuwanie zadziorów. Istnieje graniczna prędkość, dla której czas kontaktu szczotki z próbką jest zbyt krótki, aby usunąć zadziory. Taki przypadek odnotowano dla stopu magnezu AZ31 podczas obróbki na sucho z wykorzystaniem szczotki M02 przy prędkości ruchu posuwowego $v_f = 3700$ mm/min oraz

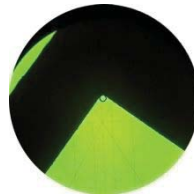
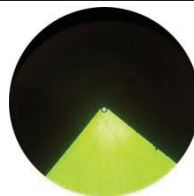
dla stopu magnezu AZ91HP podczas obróbki na sucho z wykorzystaniem szczotki M02 przy prędkościach ruchu posuwowego $v_f = 370; 1000; 3700$ mm/min. Przykładowa replika z zadziorem po obróbce szczotkowaniem dla stopu AZ91HP została przedstawiona na rysunku 4.9.

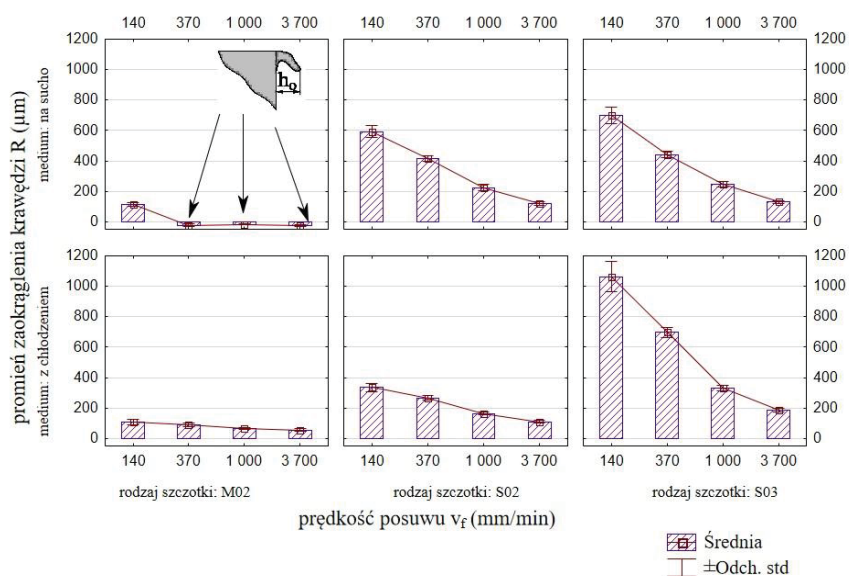


Rys. 4.9. Zadziór po obróbce szczotkowaniem – stop AZ91HP, szczotka M02, medium: na sucho, $v_f = 1000$ mm/min

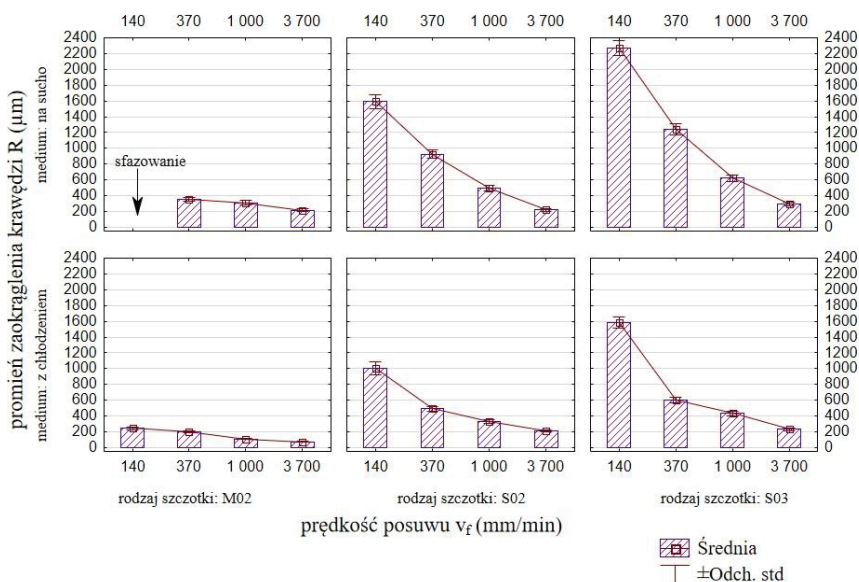
W tabeli 4.7 przedstawiono przykładowe repliki wykonane w przekroju prostopadłym do krawędzi, po obróbce szczotkowaniem narzędziem S02, wraz z wpisanymi okręgami w kontur próbki, dla stopu magnezu AZ31.

Tabela 4.7. Widok replik – stop AZ31 po obróbce narzędziem S02

		Prędkość posuwu v_f (mm/min)			
		140	370	1000	3700
Medium	na sucho				
	z chłodzeniem				

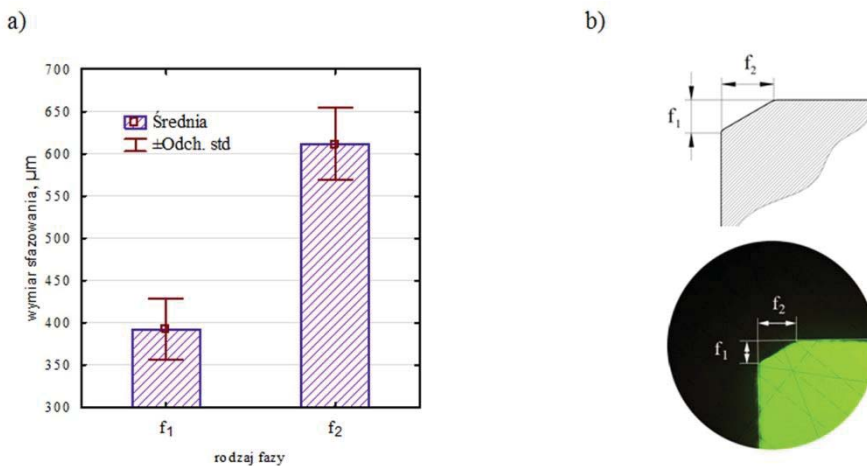


Rys. 4.10. Wpływ prędkości posuwu na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał AZ91HP



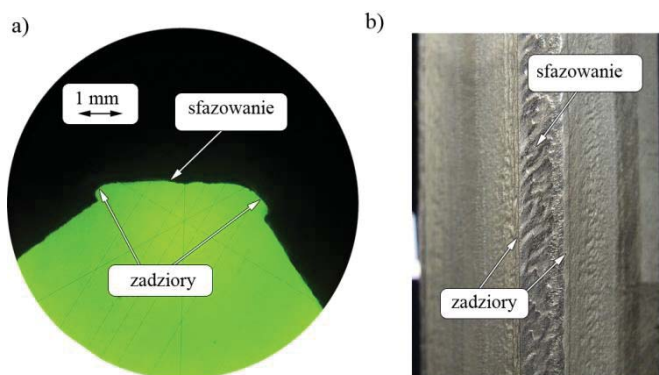
Rys. 4.11. Wpływ prędkości posuwu na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał 7075-T651 [61]

Dla stopów magnezu nie zaobserwowano znaczącego wpływu cieczy chłodzącej na promień zaokrąglenia krawędzi jak to ma miejsce w przypadku stopów aluminium. W przypadku stopu 7075-T651 przy posuwie $v_f = 140$ mm/min czas kontaktu szczotki z obrabianą krawędzią był na tyle długi, że krawędź została sfazowana przy obróbce szczotką M02. Średnica włókna 0,2 mm oraz duża elastyczność mosiężnych włókien skutkuje dużym upakowaniem liczby włókien na obwodzie szczotki. Intensywność oddziaływania dużej liczby włókien mogła przyczynić się do sfazowania krawędzi. Na rysunku 4.12 przedstawiono stan krawędzi w przypadku sfazowania. Tego typu sfazowanie jest pożądanym stanem krawędzi.



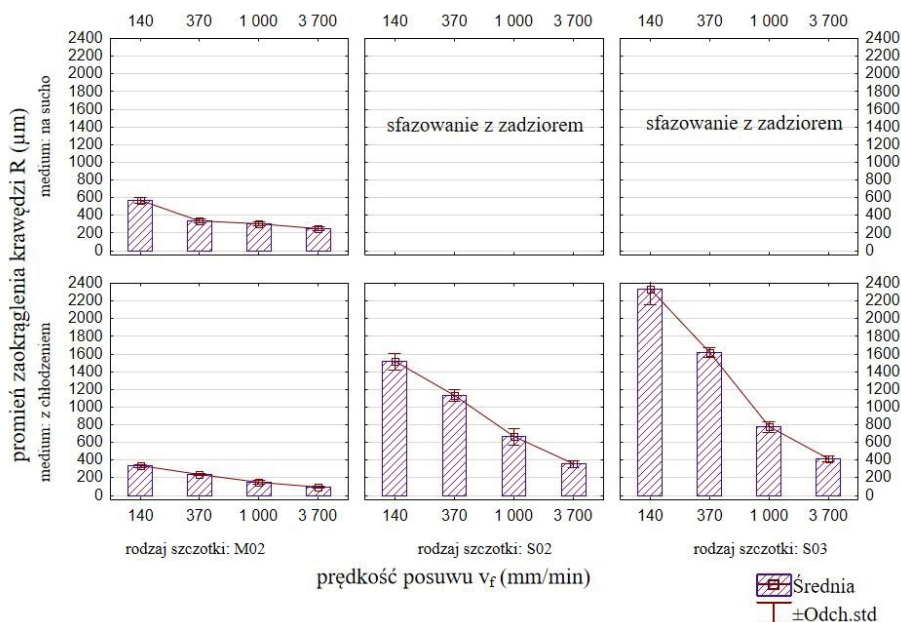
Rys. 4.12. Stan krawędzi – sfazowanie (stop 7075-T651, $v_f = 140$ mm/min, medium: na sucho): a) wymiary, b) schemat i widok rzeczywisty [61]

W przypadku obróbki szczotkowaniem stopu aluminium AlSi10Mg na sucho przy użyciu szczotek S02 oraz S03 zaobserwowano sfazowanie z charakterystycznymi zadziorami z dwóch stron. Podczas pierwszego przejścia na prawych obrotach zadziór w postaci wypływkii pojawił się z jednej strony obrobio-nej krawędzi. Natomiast podczas przejścia powrotnego na lewych obrotach zadziór pojawił się z drugiej strony krawędzi. Na rysunku 4.13 przedstawiono przykładowy widok dla takiego stanu krawędzi. Bardzo miękka osnowa stopu AlSi10Mg, uplastyczniona dodatkowo poprzez znaczny wzrost temperatury podczas obróbki na sucho, uległa znacznym odkształceniom skutkując uzyskaniem takiego stanu krawędzi. Wystąpienie dodatkowych zadziorów po obróbce szczotkowaniem nakazuje zakwalifikować ten stan jako niepożądany.



Rys. 4.13. Widok sfazowania z zadziorami w postaci wypłytki (stop AlSi10Mg, $v_f = 140$ mm/min, medium: na sucho): a) widok repliki, b) widok rzeczywisty

Natomiast zastosowanie cieczy obróbkowej zahamowało wzrost temperatury podczas szczotkowania stopu AlSi10Mg, powodując uzyskanie zaokrąglenia krawędzi po procesie usuwania zadziorów. Z racji miękkiej osnowy promienie uzyskane po obróbce stopu AlSi10Mg są największe zarówno podczas obróbki ze zmiennymi prędkościami ruchu posuwowego v_f (rys. 4.14) jak i podczas zmiennych prędkości obwodowych v_c (rys. 4.7).



Rys. 4.14. Wpływ prędkości posuwu na promień zaokrąglenia krawędzi – materiał AlSi10Mg

4.2.4. Analiza statystyczna wyników badań stanu krawędzi

Obróbka szczotkowaniem jest znana jako jedna z metod mechanicznej obróbki powierzchni. Temat zastosowania tej obróbki do oczyszczania powierzchni i usuwania zadziorów poruszany był w niektórych pozycjach literatury krajowej [90] i zagranicznej [11, 31, 76, 95].

Tabela 4.8. Wyniki badań normalności rozkładu (wartości promienia zaokrąglenia krawędzi R) testem Shapiro-Wilka dla stopów AZ31 oraz AZ91HP przy zmiennych prędkościach obrotowych

Prędkość obrotowa v_c m/min	Rodzaj szczotki	Medium	AZ31				AZ91HP			
			N	W	p	W_{kr}	N	W	p	W_{kr}
422	M02	na sucho								
844			8	0,943	0,636	0,818				
1266			10	0,849	0,056	0,842				
1689			8	0,825	0,052	0,818	8	0,937	0,578	0,818
422	M02	z chłodzeniem	8	0,917	0,404	0,818	8	0,892	0,243	0,818
844			8	0,903	0,306	0,818	8	0,978	0,950	0,818
1266			10	0,938	0,532	0,842	10	0,954	0,720	0,842
1689			8	0,976	0,943	0,818	8	0,919	0,418	0,818
422	S02	na sucho	8	0,921	0,435	0,818	8	0,979	0,957	0,818
844			8	0,877	0,174	0,818	8	0,952	0,733	0,818
1266			10	0,898	0,209	0,842	10	0,982	0,976	0,842
1689			8	0,880	0,189	0,818	8	0,976	0,937	0,818
422	S02	z chłodzeniem	8	0,940	0,609	0,818	8	0,849	0,093	0,818
844			8	0,899	0,283	0,818	8	0,990	0,995	0,818
1266			10	0,910	0,284	0,842	10	0,971	0,897	0,842
1689			8	0,919	0,424	0,818	8	0,857	0,112	0,818
422	S03	na sucho	8	0,940	0,611	0,818	8	0,905	0,318	0,818
844			8	0,941	0,625	0,818	8	0,935	0,563	0,818
1266			10	0,887	0,158	0,842	10	0,922	0,373	0,842
1689			8	0,928	0,500	0,818	8	0,844	0,083	0,818
422	S03	z chłodzeniem	8	0,913	0,373	0,818	8	0,846	0,087	0,818
844			8	0,967	0,874	0,818	8	0,944	0,647	0,818
1266			10	0,854	0,065	0,842	10	0,958	0,761	0,842
1689			8	0,906	0,329	0,818	8	0,861	0,123	0,818

Jednak wykorzystanie tej obróbki do uzyskania konkretnych wartości stanów krawędzi po procesie usuwania zadziórów stopów lekkich, stosowanych w przemyśle lotniczym, jest zagadnieniem nowym. Dlatego też celowe jest sprawdzenie istotności wpływu warunków obróbki szczotkowaniem na efekt wynikowy, jakim jest określona wartość stanu krawędzi.

Tabela 4.9. Wyniki badań normalności rozkładu (wartości promienia zaokrąglenia krawędzi R) testem Shapiro-Wilka dla stopów 7075-T651 oraz AlSi10Mg przy zmiennych prędkościach obwodowych

Prędkość obwodowa v_c m/min	Rodzaj szczotki	Medium	7075-T651				AlSi10Mg			
			N	W	p	W_{kr}	N	W	p	W_{kr}
422	M02	na sucho	8	0,918	0,410	0,818	8	0,927	0,490	0,818
844			8	0,947	0,677	0,818	8	0,952	0,732	0,818
1266			10	0,944	0,601	0,842	10	0,964	0,832	0,842
1689			8	0,953	0,743	0,818	8	0,936	0,571	0,818
422	M02	z chłodzeniem	8	0,864	0,132	0,818	8	0,952	0,732	0,818
844			8	0,958	0,788	0,818	8	0,889	0,227	0,818
1266			10	0,855	0,066	0,842	10	0,969	0,886	0,842
1689			8	0,829	0,057	0,818	8	0,925	0,470	0,818
422	S02	na sucho	8	0,893	0,250	0,818				
844			8	0,832	0,063	0,818				
1266			10	0,957	0,746	0,842				
1689			8	0,919	0,423	0,818				
422	S02	z chłodzeniem	8	0,898	0,279	0,818	8	0,986	0,985	0,818
844			8	0,961	0,822	0,818	8	0,954	0,753	0,818
1266			10	0,965	0,839	0,842	10	0,888	0,162	0,842
1689			8	0,968	0,881	0,818	8	0,936	0,575	0,818
422	S03	na sucho	8	0,918	0,416	0,818				
844			8	0,966	0,867	0,818				
1266			10	0,959	0,769	0,842				
1689			8	0,952	0,733	0,818				
422	S03	z chłodzeniem	8	0,969	0,893	0,818	8	0,909	0,350	0,818
844			8	0,953	0,742	0,818	8	0,987	0,990	0,818
1266			10	0,910	0,284	0,842	10	0,853	0,063	0,842
1689			8	0,942	0,635	0,818	8	0,958	0,794	0,818

Testowanie hipotez dotyczących istotności wpływu czynnika wejściowego na czynnik wynikowy za pomocą testu F wymaga, aby rozkład badanej zmiennej był zbliżony do rozkładu normalnego. W tym celu normalność rozkładu została zweryfikowana za pomocą testu Shapiro-Wilka [123].

Tabela 4.10. Wyniki badań normalności rozkładu (wartości promienia zaokrąglenia krawędzi R) testem Shapiro-Wilka dla stopów AZ31 oraz AZ91HP przy zmiennych prędkościach ruchu posuwowego

Prędkość posuwu v_f , mm/min	Rodzaj szczotki	Medium	AZ31				AZ91HP			
			N	W	p	W _{kr}	N	W	p	W _{kr}
140	M02	na sucho	8	0,953	0,740	0,818	8	0,842	0,079	0,818
370			10	0,849	0,056	0,818				
1000			8	0,909	0,349	0,842				
3700										
140	M02	z chłodzeniem	8	0,874	0,165	0,818	8	0,981	0,967	0,818
370			10	0,938	0,532	0,818	10	0,954	0,720	0,842
1000			8	0,842	0,079	0,842	8	0,921	0,439	0,818
3700			8	0,972	0,911	0,818	8	0,941	0,618	0,818
140	S02	na sucho	8	0,900	0,287	0,818	8	0,930	0,515	0,818
370			10	0,898	0,209	0,818	10	0,982	0,976	0,842
1000			8	0,974	0,929	0,842	8	0,831	0,061	0,818
3700			8	0,975	0,935	0,818	8	0,890	0,235	0,818
140	S02	z chłodzeniem	8	0,896	0,264	0,818	8	0,941	0,622	0,818
370			10	0,910	0,284	0,818	10	0,971	0,897	0,842
1000			8	0,973	0,924	0,842	8	0,891	0,239	0,818
3700			8	0,894	0,254	0,818	8	0,895	0,262	0,818
140	S03	na sucho	8	0,855	0,107	0,818	8	0,908	0,343	0,818
370			10	0,887	0,158	0,818	10	0,922	0,373	0,842
1000			8	0,929	0,508	0,842	8	0,957	0,785	0,818
3700			8	0,989	0,994	0,818	8	0,859	0,116	0,818
140	S03	z chłodzeniem	8	0,873	0,163	0,818	8	0,871	0,153	0,818
370			10	0,854	0,065	0,818	10	0,958	0,761	0,842
1000			8	0,878	0,181	0,842	8	0,958	0,789	0,818
3700			8	0,876	0,173	0,818	8	0,880	0,190	0,818

W tabelach 4.8 i 4.9 przedstawiono wyniki badania normalności rozkładu testem Shapiro-Wilka dla stopów AZ31 oraz AZ91HP (tabela 4.8) oraz stopów 7075-T651 i AlSi10Mg (tabela 4.9) przy zmiennych prędkościach obwodowych.

Tabela 4.11. Wyniki badań normalności rozkładu (wartości promienia zaokrąglenia krawędzi R) testem Shapiro-Wilka dla stopów 7075-T651 oraz AlSi10Mg przy zmiennych prędkościach ruchu posuwowego

Prędkość posuwu v_f , mm/min	Rodzaj szczotki	Medium	7075-T651				AlSi10Mg			
			N	W	p	W_{kr}	N	W	p	W_{kr}
140	M02	na sucho					8	0,862	0,125	0,818
370			10	0,944	0,601	0,842	10	0,964	0,832	0,842
1000			8	0,947	0,677	0,818	8	0,879	0,183	0,818
3700			8	0,937	0,585	0,818	8	0,957	0,785	0,818
140	M02	z chłodzeniem	8	0,859	0,118	0,818	8	0,939	0,599	0,818
370			10	0,855	0,066	0,842	10	0,969	0,886	0,842
1000			8	0,838	0,072	0,818	8	0,961	0,818	0,818
3700			8	0,885	0,211	0,818	8	0,956	0,774	0,818
140	S02	na sucho	8	0,830	0,059	0,818				
370			10	0,957	0,746	0,842				
1000			8	0,922	0,448	0,818				
3700			8	0,982	0,974	0,818				
140	S02	z chłodzeniem	8	0,873	0,160	0,818	8	0,961	0,815	0,818
370			10	0,965	0,839	0,842	10	0,888	0,162	0,842
1000			8	0,880	0,187	0,818	8	0,970	0,898	0,818
3700			8	0,968	0,885	0,818	8	0,913	0,374	0,818
140	S03	na sucho	8	0,945	0,660	0,818				
370			10	0,959	0,769	0,842				
1000			8	0,919	0,418	0,818				
3700			8	0,937	0,586	0,818				
140	S03	z chłodzeniem	8	0,858	0,116	0,818	8	0,862	0,124	0,818
370			10	0,910	0,284	0,842	10	0,889	0,165	0,842
1000			8	0,885	0,209	0,818	8	0,885	0,210	0,818
3700			8	0,829	0,058	0,818	8	0,948	0,687	0,818

Przedstawiono wartości testowe statystyki W oraz wartości krytyczne W_{kr} dla prawdopodobieństwa $p = 0,05$ i dla określonej liczby pomiarów N promienia zaokrąglenia krawędzi R. We wszystkich przypadkach wartość statystyki W

przekracza wartość krytyczną W_{kr} , co oznacza, że zmienna ma rozkład zbliżony do rozkładu normalnego. Ponieważ badania normalności rozkładu dotyczyły wartości promienia zaokrąglenia krawędzi R, w tabelach nie zostały ujęte wartości w przypadkach, gdy uzyskano inny stan krawędzi (sfazowanie, sfazowanie z zadziorem lub zadziór).

Podobne badania normalności rozkładu wykonano dla wartości promienia zaokrąglenia krawędzi R w przypadku zmiennych prędkości ruchu posuwowego v_f . Wyniki przedstawiono w tabelach 4.10 i 4.11. We wszystkich przypadkach wartość statystyki W przekracza wartość krytyczną W_{kr} , co oznacza, że zmienna ma rozkład zbliżony do rozkładu normalnego.

W celu analizy istotności wpływu warunków obróbki szczotkowaniem na wartość stanu krawędzi wykorzystano program statyczny randomizowany kompletny PS/DK [51], (oznaczenie według [80]). Program ten opisany we wcześniejszych źródłach [77], nazywany jest także programem statycznym losowym całkowitym, który opiera się na analizie wariancji.

Hipoteza zerowa zakłada brak istotności wpływu parametrów technologicznych szczotkowania (prędkości obwodowej v_c oraz prędkości posuwu v_f) na promień zaokrąglenia krawędzi po procesie usuwania zadziorów.

Matrycę planowania programu statycznego randomizowanego, służącego do oceny wpływu jednego czynnika wejściowego na czynnik wynikowy, przedstawiono w tabeli 4.12.

Tabela 4.12. Matryca planowania programu statycznego randomizowanego kompletnego

Poziom czynnika wejściowego	Numer doświadczenia		
	1	...	q
1	y_{11}	...	y_{1q}
...	...	...	...
p	y_{p1}	...	y_{pq}

Wartość testową obliczono z zależności [51]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 (n-p)}{\left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (y_{ij} - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \right] (p-1)} \quad (4.2)$$

gdzie:

n_i – liczba pomiarów czynnika wejściowego na danym poziomie,

n – całkowita liczba pomiarów,

$\bar{y}_i$ – średnia wyników pomiarów w i-tym wierszu,

$\bar{y}$ – średnia wyników z wszystkich pomiarów,

y_{ij} – wartość j-tego czynnika wynikowego na poziomie i,

p – liczba poziomów zmienności czynnika wejściowego.

Przykładową analizę istotności wpływu prędkości obwodowej v_c na promień zaokrąglenia krawędzi przedstawiono dla stopu AZ31 obrabianego za pomocą szczotki S02 w przypadku obróbki na sucho.

Tabela 4.13. Promień zaokrąglenia R (μm) po szczotkowaniu

Prędkość obwodowa v_c (m/min)	Numer doświadczenia										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	y_i
422	179	177	194	181	177	188	191	185	-	-	184
844	183	207	207	168	185	162	181	207	-	-	188
1266	261	286	279	235	276	272	259	283	250	283	268
1689	345	488	426	466	441	418	473	462	-	-	440

W tabeli 4.13 przedstawiono średnie wartości promieni zaokrąglenia R po procesie usuwania zadziórów w przypadku zmiennej prędkości obwodowej. Postawiono hipotezę zerową o braku wpływu prędkości obwodowej v_c na promień zaokrąglenia krawędzi R po procesie usuwania zadziórów. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$ i obliczono liczbę stopni swobody dla licznika i mianownika:

$$f_1 = f_i = p - 1 = 4 - 1 = 3,$$

$$f_2 = f_m = n - p = 34 - 4 = 30.$$

Obliczono wartości średnie w poszczególnych wierszach w tabeli 4.13:

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 y_{1j} = \frac{1}{8} \cdot (179 + \dots + 185) = 184,$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 y_{2j} = \frac{1}{8} \cdot (183 + \dots + 207) = 188,$$

$$\bar{y}_3 = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{3j} = \frac{1}{10} \cdot (261 + \dots + 283) = 268,$$

$$\bar{y}_4 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 y_{4j} = \frac{1}{8} \cdot (345 + \dots + 462) = 440,$$

oraz wartości pomocnicze do wzoru:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^8 (y_{ij} - \bar{y})^2 &= (179 - 270)^2 + \dots + (462 - 270)^2 = 363592, \\ \sum_{i=1}^4 n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 &= 8 \cdot (184 - 270)^2 + 8 \cdot (188 - 270)^2 + \\ &+ 10 \cdot (268 - 270)^2 + 8 \cdot (440 - 270)^2 = 344198. \end{aligned}$$

Obliczono wartość empiryczną współczynnika F:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 (n - p)}{\left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (y_{ij} - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \right] (p - 1)}$$

$$= \frac{344198 \cdot (34 - 4)}{(363592 - 344198) \cdot (4 - 1)} = 177,5.$$

Z tabeli wartości krytycznych testu F Fishera-Snedecora [51] przy istotności $\alpha = 0,05$ oraz liczbie stopni swobody $f_1 = 3$ oraz $f_2 = 30$ określono:

$$F_{kr} = F_{(\alpha; f_1; f_2)} = F_{(0,05; 3; 30)} = 2,92.$$

Ponieważ obliczona wartość F znacznie przewyższa wartość krytyczną F_{kr} istnieje podstawa do odrzucenia weryfikowanej hipotezy. Należy zatem stwierdzić, że (w przyjętym zakresie zmienności) prędkość obwodowa v_c w istotnym stopniu wpływa na promień zaokrąglenia krawędzi R po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania.

W tabeli 4.14 zestawiono wartości empiryczne współczynnika F z wartościami krytycznymi dla odpowiedniej liczby stopni swobody licznika i mianownika. We wszystkich przypadkach obliczona wartość F znacznie przewyższa wartość krytyczną F_{kr} , dlatego też istnieje podstawa do odrzucenia weryfikowanej hipotezy. Należy zatem stwierdzić, że (w przyjętym zakresie zmienności) prędkość obwodowa v_c w istotnym stopniu wpływa na promień zaokrąglenia krawędzi R po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania dla wszystkich materiałów, narzędzi oraz medium zastosowanego w eksperymencie.

W przypadku obróbki stopu magnezu AZ31 za pomocą narzędzia M02 na sucho dla prędkości $v_c = 422$ m/min zadziory nie zostały usunięte, dlatego też ten punkt pomiarowy nie został ujęty w analizie istotności wpływu, co wpłynęło na liczbę stopni swobody licznika i mianownika oraz na wartość krytyczną współczynnika F.

W przypadku obróbki stopu AZ91HP za pomocą szczotki M02 zadziory nie zostały usunięte przy prędkościach $v_c = 422, 844, 1266$ m/min stąd brak wartości F przy analizie istotności wpływu dla tych warunków obróbki.

W przypadku obróbki stopu AlSi10Mg za pomocą szczotek S02 i S03 przy zmiennych prędkościach obwodowych v_c uzyskano sfazowanie z zadziorem (niepożądany stan krawędzi), stąd brak wartości F przy analizie istotności wpływu dla tych warunków obróbki.

Szczotka M02 z drutu mosiężnego cechuje się najbardziej elastycznymi włóknami. Najbardziej sztywna jest szczotka S03 z drutu stalowego o średnicy 0,3 mm pojedynczego włókna. Wraz ze wzrostem sztywności narzędzia wartość wyznaczonej statystyki F wzrasta, co oznacza, że wraz ze wzrostem sztywności narzędzia wzrasta istotność wpływu rodzaju szczotki na promień zaokrąglenia krawędzi.

Tabela 4.14. Analiza istotności wpływu prędkości obwodowej v_c na promień zaokrąglenia krawędzi R

Material	Rodzaj szczotki	Medium	f_1	f_2	F	F_{kr}
AZ31	M02	na sucho	2	23	93,3	3,42
	S02		3	30	177,5	2,92
	S03		3	30	650,3	2,92
	M02	z chłodzeniem	3	30	69,8	2,92
	S02		3	30	233,4	2,92
	S03		3	30	411,1	2,92
AZ91HP	M02	na sucho				
	S02		3	30	95,4	2,92
	S03		3	30	146,0	2,92
	M02	z chłodzeniem	3	30	28,4	2,92
	S02		3	30	116,0	2,92
	S03		3	30	105,4	2,92
7075-T651	M02	na sucho	3	30	505,0	2,92
	S02		3	30	880,3	2,92
	S03		3	30	1000,4	2,92
	M02	z chłodzeniem	3	30	203,2	2,92
	S02		3	30	174,4	2,92
	S03		3	30	498,7	2,92
AlSi10Mg	M02	na sucho	3	30	264,8	2,92
	S02					
	S03					
	M02	z chłodzeniem	3	30	152,4	2,92
	S02		3	30	199,4	2,92
	S03		3	30	580,8	2,92

W sposób analogiczny przeprowadzono analizę istotności wpływu prędkości ruchu posuwowego na promień zaokrąglenia krawędzi. W tabeli 4.15 zestawiono wartości empiryczne współczynnika F z wartościami krytycznymi dla odpowiedniej liczby stopni swobody licznika i mianownika. We wszystkich przypadkach obliczona wartość F znacznie przewyższa wartość krytyczną F_{kr} , dlatego też istnieje podstawa do odrzucenia weryfikowanej hipotezy. Należy zatem stwierdzić, że (w przyjętym zakresie zmienności) prędkość ruchu posuwowego v_f w istotnym stopniu wpływa na promień zaokrąglenia krawędzi R po

procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania dla wszystkich materiałów, narzędzi oraz medium zastosowanego w eksperymencie.

Tabela 4.15. Analiza istotności wpływu prędkości ruchu posuwowego v_f na promień zaokrąglenia krawędzi R

Material	Rodzaj szczotki	Medium	f_1	f_2	F	F_{kr}
AZ31	M02	na sucho	2	23	143,5	3,42
	S02		3	30	348,9	2,92
	S03		3	30	880,3	2,92
	M02	z chłodzeniem	3	30	99,8	2,92
	S02		3	30	1209,8	2,92
	S03		3	30	823,2	2,92
AZ91HP	M02	na sucho				
	S02		3	30	610,3	2,92
	S03		3	30	551,3	2,92
	M02	z chłodzeniem	3	30	27,1	2,92
	S02		3	30	295,8	2,92
	S03		3	30	461,0	2,92
7075	M02	na sucho	2	23	79,0	2,92
	S02		3	30	918,2	2,92
	S03		3	30	1480,3	2,92
	M02	z chłodzeniem	3	30	421,6	2,92
	S02		3	30	480,4	2,92
	S03		3	30	1799,2	2,92
AlSi10Mg	M02	na sucho	3	30	113,0	2,92
	S02					
	S03					
	M02	z chłodzeniem	3	30	397,5	2,92
	S02		3	30	371,3	2,92
	S03		3	30	628,8	2,92

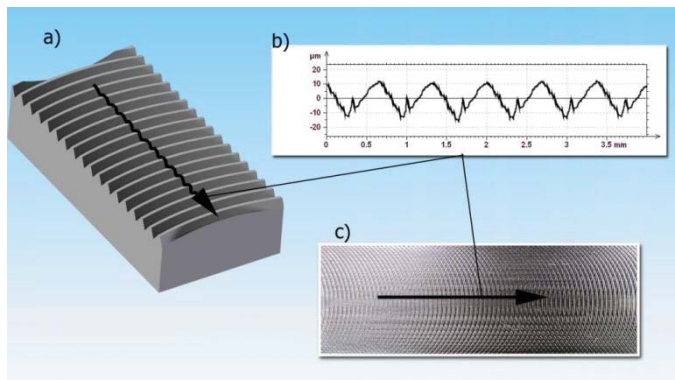
W przypadku obróbki stopu magnezu AZ31 za pomocą narzędzia M02 na sucho dla prędkości ruchu posuwowego $v_f = 3700$ mm/min zadziory nie zostały usunięte, dlatego też ten punkt pomiarowy nie został ujęty w analizie istotności wpływu, co wpłynęło na liczbę stopni swobody licznika i mianownika oraz na wartość krytyczną współczynnika F.

W przypadku obróbki stopu AZ91HP za pomocą szczotki M02 zadziory nie zostały usunięte przy prędkościach $v_c = 370; 1000; 3700$ mm/min, stąd brak wartości F przy analizie istotności wpływu dla tych warunków obróbki.

W przypadku obróbki stopu AlSi10Mg za pomocą szczotek S02 i S03 przy zmiennych prędkościach ruchu posuwowego uzyskano sfazowanie z zadziorem (niepożądany stan krawędzi), stąd brak wartości F przy analizie istotności wpływu dla tych warunków obróbki.

5. BADANIA CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM

Proces usuwania zadziorów musi wiązać się także z utrzymaniem wymaganych właściwości warstwy wierzchniej, do których zalicza się między innymi właściwości stereometryczne. Wartości parametrów chropowatości powierzchni w obrębie krawędzi po usuwaniu zadziorów metodą szczotkowania nie powinny być większe niż uzyskane po obróbce poprzedzającej szczotkowaniem. Dlatego też, obróbka krawędzi metodą szczotkowania powinna być analizowana wielokierunkowo. Po procesie szczotkowania mierzono chropowatość powierzchni, stosując profilografometr laboratoryjny Taylor Hobson model Surtronic 3+. W przypadku pomiarów topografii wykorzystano profilografometr 3D T8000 RC120-400 firmy Hommel-Etamic. Pomiary chropowatości przeprowadzono w kierunku prostopadłym do śladów po operacji frezowania, jak pokazano na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Kierunek pomiaru chropowatości: a) schemat próbki, b) przykładowy profil, c) rzeczywisty widok próbki po frezowaniu [68]

Chropowatość powierzchni po procesie szczotkowania silnie uzależniona jest od chropowatości wyjściowej uzyskanej po obróbce poprzedzającej szczotkowanie oraz od wzajemnego układu mikronierówności powierzchni (kierunkowości struktury).

W przemyśle lotniczym istnieją powierzchnie po obróbce frezowaniem, dla których wymagania co do jakości nie są rygorystycznie narzucone, np. w przypadku niewspółpracujących ze sobą powierzchni elementów konstrukcyjnych oraz takie, gdzie wymagana jest ściśle określona chropowatość. Z tego powodu badania wpływu obróbki szczotkowaniem na chropowatość powierzchni podzielono na dwa etapy.

Pierwszy etap obejmował analizę wpływu obróbki szczotkowaniem na chropowatość powierzchni po frezowaniu kształtującym. Obróbka kształtująca ma na celu usunięcie dużej ilości materiału w krótkim czasie, natomiast jakość

powierzchni w przypadku obróbki kształtującej ma mniejsze znaczenie. Dlatego też przyjęto, że dla obróbki kształtującej, chropowatość wyjściowa (po procesie frezowania) wynosi $Ra = (4,5 \div 5) \mu\text{m}$.

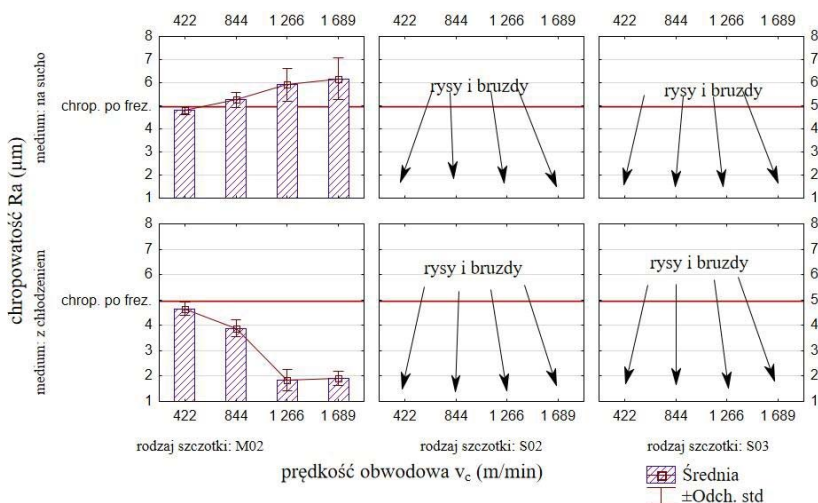
Drugi etap obejmował analizę wpływu obróbki szczotkowaniem na chropowatość powierzchni po frezowaniu wykończeniowym, dla której przyjęto wartość chropowatości wyjściowej w przedziale $Ra = (1,6 \div 1,9) \mu\text{m}$.

5.1. Badania wpływu parametrów obróbki szczotkowaniem przedmiotów frezowanych kształtująco na chropowatość powierzchni

Analizowano wpływ prędkości obwodowej v_c oraz wpływ prędkości ruchu posuwowego v_f na chropowatość powierzchni po obróbce szczotkowaniem. Obróbką poprzedzającą proces szczotkowania było frezowanie kształtujące. Wytypowane zestawy parametrów technologicznych szczotkowania zaprezentowano w tabeli 4.2 (rozdz. 4.1.2).

Podczas analizy wpływu prędkości obwodowej v_c na chropowatość powierzchni prędkość posuwu v_f utrzymano na stałym poziomie $v_f = 370 \text{ mm/min}$.

Na rysunkach 5.2, 5.5÷5.7 przedstawiono wykresy wpływu prędkości obwodowej v_c na chropowatość powierzchni po procesie szczotkowania badanych materiałów. Ponadto poziomo zaprezentowano wpływ prędkości obwodowej v_c na chropowatość dla zastosowanych w badaniach szczotek. Natomiast pionowo przedstawiono porównanie zastosowanego medium: obróbka na sucho lub z zastosowaniem cieczy.



Rys. 5.2. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ31 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Podczas obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ31 w przypadku szczotki M02 przy obróbce na sucho odnotowano nieznaczną tendencję wzrostową parametru R_a wraz ze wzrostem prędkości obwodowej. Wzrost ten widoczny jest powyżej linii oznaczającej wartość parametru R_a chropowatości uzyskanej po obróbce frezowaniem, poprzedzającej proces szczotkowania. Jedynie dla prędkości $v_c = 422$ m/min utrzymano jakość powierzchni na poziomie obróbki frezowaniem. Inna sytuacja ma miejsce podczas obróbki z zastosowaniem cieczy obróbkowej. Podczas obróbki z chłodzeniem wzrost prędkości powodował zmniejszenie parametru chropowatości w stosunku do obróbki wyjściowej – frezowania.

Tabela 5.1. Wpływ prędkości obwodowej na stan powierzchni stopu magnezu AZ31 po szczotkowaniu narzędziem M02 z chłodzeniem

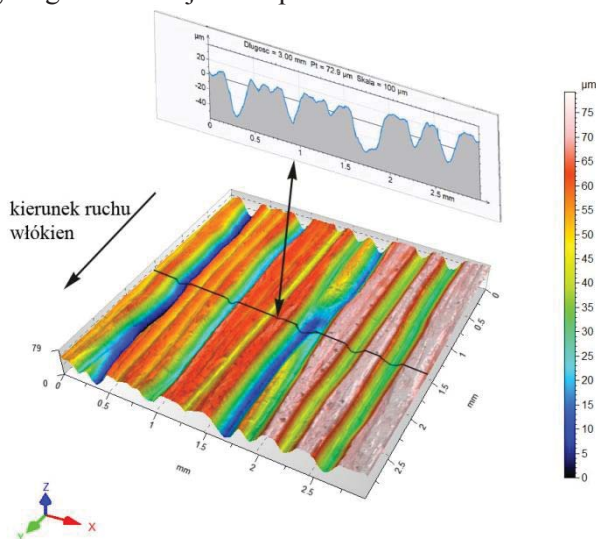
Prędkość obwodowa v_c (m/min)	Profilogram	Widok rzeczywisty powierzchni
422		
844		
1266		
1689		

W tabeli 5.1 przedstawiono przykładowe profilogramy wraz z widokiem rzeczywistych powierzchni po obróbce szczotkowaniem stopu AZ31 narzędziem M02 z zastosowaniem cieczy obróbkowej. Charakterystyczny profil powierzchni, będący wynikiem odwzorowania kolejnych położów krawędzi skrawającej

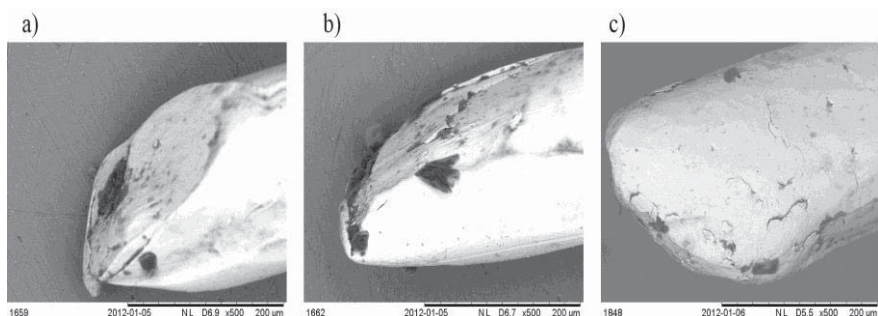
frezu, widoczny jest po obróbce szczotkowaniem z mniejszymi prędkościami obwodowymi ($v_c = 422$ m/min oraz $v_c = 844$ m/min). Oznacza to, że oddziaływanie włókien szczotki z drutu mosiężnego było na tyle delikatne, że nie nastąpił proces usunięcia nierówności po obróbce frezowaniem. Widać, że wraz ze wzrostem prędkości obwodowej szczotkowania ma miejsce ścinanie wierzchołków mikronierówności i zmniejszenie wartości parametrów chropowatości.

W przypadku obróbki stopów magnezu metodą szczotkowania, zaobserwowano charakterystyczne rysy i bruzdy. Szczególnie widoczne jest to dla obróbki sztywnymi szczotkami S02 oraz S03.

Na rysunku 5.3 przedstawiono przykładową mapę powierzchniową z widocznymi bruzdami po obróbce szczotkowaniem. Rysy i bruzdy są wynikiem koncentracji oddziaływania końców włókien, które można traktować jako krawędzie skrawające o nieregularnym kształcie. Podczas produkcji szczotek włókna powstają w procesie cięcia. Na rysunku 5.4 przedstawiono przykładowe włókna dla szczotki M02. Widoczny jest niekontrolowany kąt cięcia włókien nieużywanej szczotki na rysunku 5.4a i 5.4b. Dlatego też istnieją sytuacje, w których włókna są bardziej "ostre". Włókna te, tworząc mikrobruzdy, dają początek do tworzenia dużych bruzd widocznych gołym okiem. Ponieważ włókna są elastyczne to kolejne włókna przechodząc wzdłuż obrabianej powierzchni powielają ścieżkę poprzednich, wpadając w bruzdy i powiększając ich rozmiar. Taki stan stereometryczny powierzchni po obróbce szczotkowaniem, wyklucza stosowanie szczotek S02 i S03 (przy tych zestawach parametrów szczotkowania), przy których wystąpiły bruzdy, szczególnie, jeśli, oprócz usunięcia zadziorów, istnieją wymagania co do jakości powierzchni.



Rys. 5.3. Bruzdy po obróbce szczotkowaniem – narzędzie S03, medium: z chłodzeniem, $v_c = 422$ m/min, $v_f = 370$ mm/min



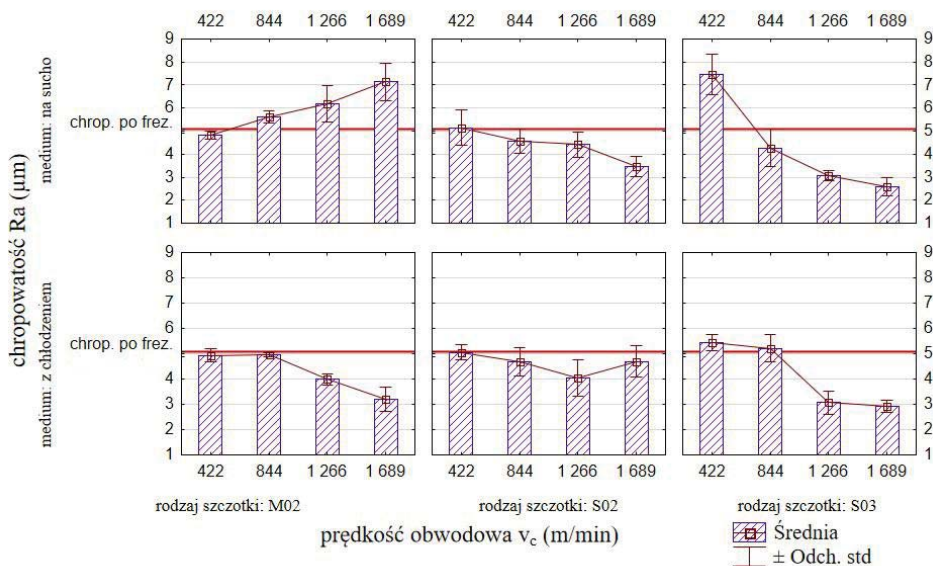
Rys. 5.4. Końce włókien szczotki M02: a i b) nowe włókna, c) używane włókno

W przypadku obróbki na sucho efekt tworzenia bruzd jest inny, co widać w tabeli 5.2. Dla obróbki na sucho ilość występujących bruzd jest większa, jednak ich głębokości są mniejsze, co może być spowodowane płynięciem materiału z uwagi na wzrost temperatury procesu oraz tym, że podczas obróbki z chłodzeniem ciecz obróbkowa zapewnia skuteczne oczyszczanie powierzchni z produktów szczotkowania, powodując bezpośrednie działanie włókien szczotki na powierzchnię obrabianą.

Tabela 5.2. Widok rys i bruzd na powierzchni po obróbce szczotkowaniem – stop AZ31, narzędzie S02

Prędkość obwodowa v_c (m/min)	Medium	
	Na sucho	Z chłodzeniem
422		
844		
1266		
1689		

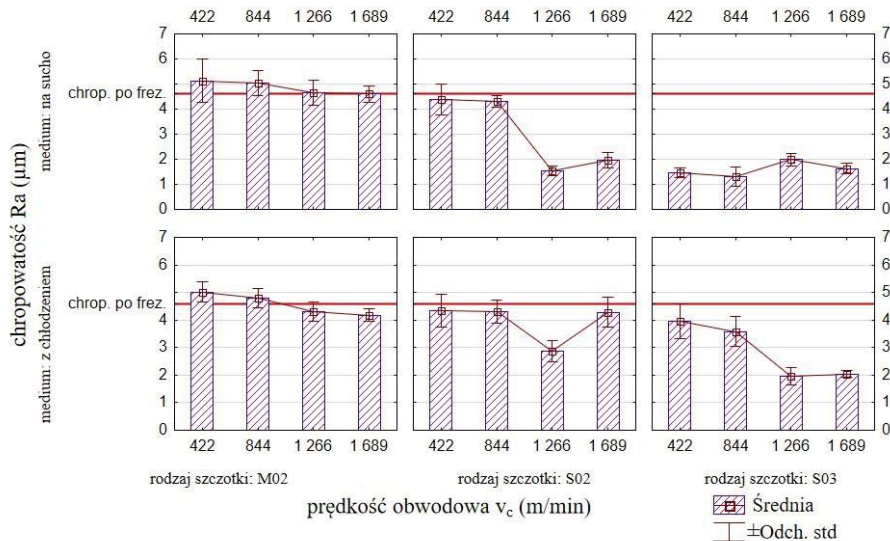
Podczas obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ91HP nie zaobserwowano bruzd (rys. 5.5), tak jak to miało miejsce w przypadku stopu AZ31. Spowodowane jest to różnymi właściwościami odlewniczego stopu AZ91HP w stosunku do stopu AZ31 do przeróbki plastycznej.



Rys. 5.5. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ91HP na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

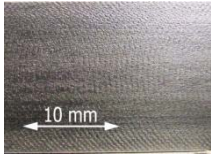
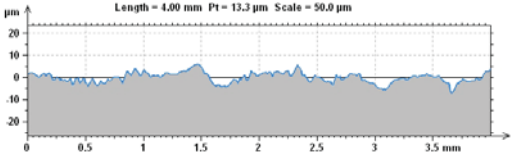
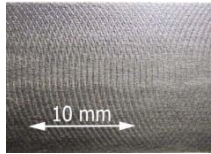
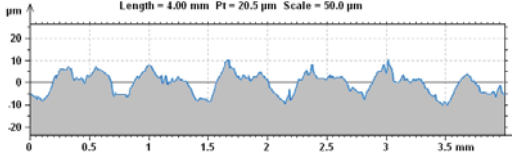
W przypadku obróbki stopu aluminium 7075-T651 za pomocą szczotek S02 oraz S03, zaobserwowano zmniejszenie chropowatości powierzchni, w odniesieniu do frezowania, dla wszystkich prędkości obwodowych v_c . Dla szczotki S02 wraz ze wzrostem prędkości v_c do wartości $v_c = 1266$ m/min obserwowano zmniejszanie chropowatości powierzchni przy obróbce na sucho oraz z chłodzeniem, co przedstawiono na rysunku 5.6. Przy tej prędkości ($v_c = 1266$ m/min), chropowatość osiągnęła wartość minimalną. Przy wyższych prędkościach szczotkowania za pomocą szczotki S02 odkształcenia plastyczne spowodowane przez wysokie temperatury spowodowały zwiększenie chropowatości powierzchni. Ciecz chłodząca obniża temperaturę, a tym samym zmniejsza odkształcenia plastyczne. Powoduje to, że włókna nie są w stanie „wygładzić” powierzchni po frezowaniu, dlatego wyższe wartości chropowatości powierzchni zaobserwowano przy szczotkowaniu z chłodzeniem. Porównując szczotkowanie na sucho i z chłodzeniem, różnice szczególnie widoczne są przy wyższych prędkościach skrawania. Fotografie i profile przedstawione w tabeli 5.3 wyjaśniają to zjawisko. Tabela przedstawia widok dwóch próbek szczotkowanych

z takimi samymi parametrami, prędkości skrawania $v_c = 1266 \text{ m/min}$ i prędkość posuwu $v_f = 370 \text{ mm/min}$. Różnice widoczne na profilogramach spowodowane są tylko przez zastosowanie cieczy obróbkowej. Ślady po frezowaniu widoczne są bardziej dla próbki, która została szczotkowana z chłodziwem.



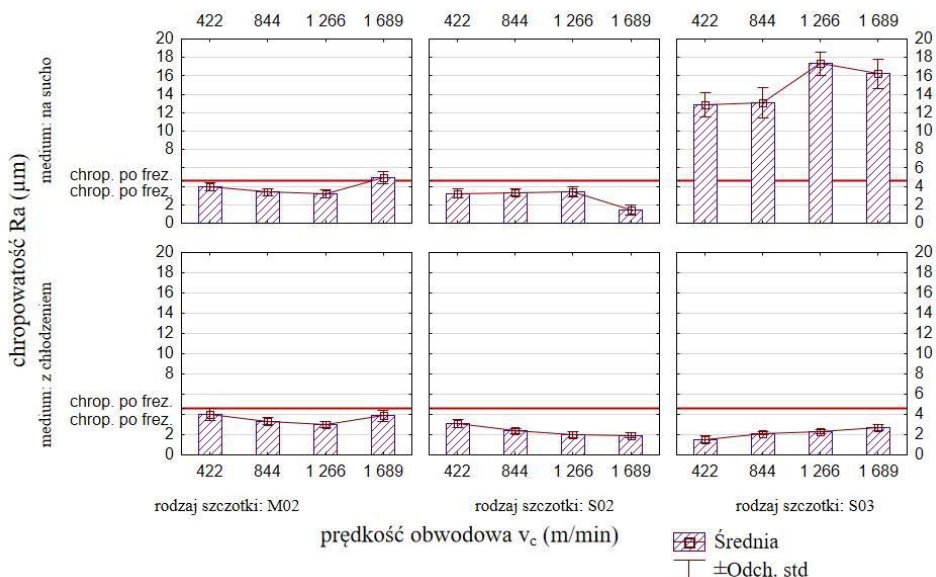
Rys. 5.6. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu aluminium 7075-T651 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Tabela 4.27. Porównanie jakości powierzchni po obróbce z chłodziwem i na sucho dla stopu aluminium 7075-T651: szczotka S02, $v_c = 1266 \text{ m/min}$, $v_f = 370 \text{ mm/min}$

	Widok powierzchni	Profil
Obróbka na sucho		
Obróbka z chłodziwem		

Najbardziej znaczącą poprawę w stosunku do chropowatości początkowej uzyskano dla szczotki stalowej o średnicy włókien 0,3 mm. Sztywne i grube włókna szczotki zapewniają skuteczniejsze odkształcenia plastyczne powierzchni. Przy szczotkowaniu na sucho, niezależnie od zastosowanej prędkości skrawania, zaobserwowano zmniejszenie chropowatości powierzchni (rys. 5.6).

Na rysunku 5.7 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej v_c na chropowatość powierzchni w przypadku stopu AlSi10Mg. Jest to stop o bardzo miękkiej osnowie ($HV_{0,01} = 50$), w której w postaci igłowej rozmieszczony jest krzem. W przypadku tego stopu największą różnicę zaobserwowano między szczotkowaniem narzędziem S03 na sucho oraz z chłodzeniem. Uplastycznienie materiału spowodowane znacznym wzrostem temperatury w przypadku obróbki na sucho powoduje duży wzrost wartości parametrów chropowatości, znacznie przewyższający wartość uzyskaną po obróbce poprzedzającej szczotkowanie.



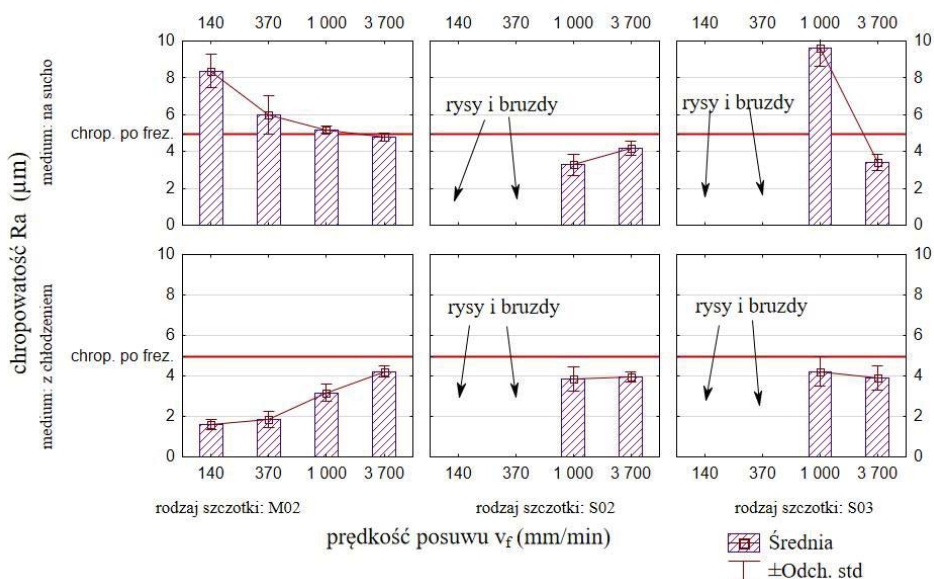
Rys. 5.7. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu aluminium AlSi10Mg na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Analizując wpływ prędkości obwodowej obróbki szczotkowaniem na chropowatość powierzchni oraz zjawiska zachodzące podczas obróbki należy zauważyć, że w przypadku obróbki szczotkowaniem tendencja wzrostowa parametrów chropowatości może być spowodowana różnymi czynnikami. Podczas obróbki zwiększanie prędkości obwodowej szczotkowania może powodować ściskanie wierzchołków mikronierówności i osiągnięcie jakiejś minimalnej wartości parametrów chropowatości powierzchni, a dalsze zwiększanie prędkości obwodowej szczotkowania v_c powoduje degradację powierzchni i wzrost chropowato-

ści. W takim przypadku może nastąpić zwiększenie wartości parametrów chropowatości powierzchni powyżej poziomu uzyskanego poprzez obróbkę wyjściową. Miejsce pojawienia się ekstremum uzależnione jest od właściwości materiału obrabianego oraz warunków procesu (parametrów obróbki, rodzaju medium oraz szczotki).

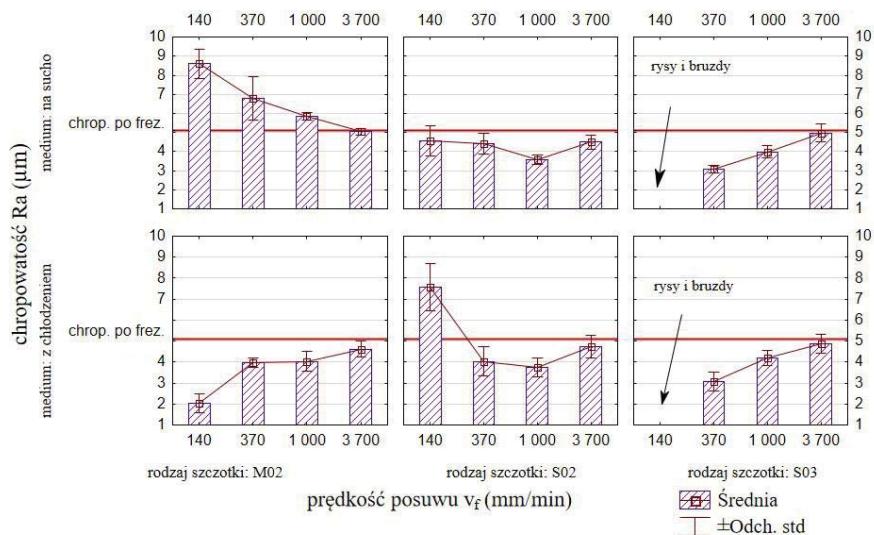
Podczas analizy wpływu prędkości ruchu posuwowego v_f na chropowatość powierzchni obrobionej, prędkość obwodową v_c utrzymano na stałym poziomie $v_c = 1266$ m/min.

Na rysunkach 5.8÷5.11 przedstawiono wpływ prędkości ruchu posuwowego v_f na chropowatość powierzchni po procesie szczotkowania badanych materiałów.

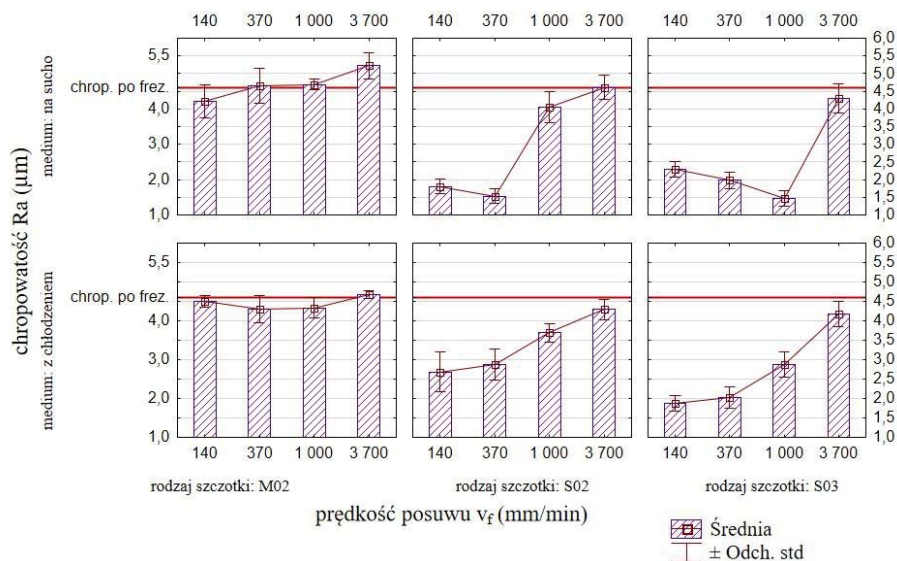


Rys. 5.8. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ31 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

W przypadku szczotkowania stopu magnezu AZ31 z prędkością ruchu posuwowego $v_f = 140$ mm/min oraz $v_f = 1000$ mm/min (szczotkami S02 oraz S03) na powierzchni pojawiły się rysy i bruzdy. Spowodowane jest to długim czasem kontaktu szczotki z przedmiotem obrabianym (rys. 5.8). Natomiast podczas szczotkowania stopu AZ91HP bruzdy pojawiły się w przypadku stosowania szczotki S03 i obróbki z posuwem $v_f = 140$ mm/min (rys. 5.9). Spowodowane jest to tym, że stop AZ91HP ma większą twardość w stosunku do stopu AZ31 i pojawienie się rys i bruzd miało miejsce jedynie dla najdłuższego czasu kontaktu narzędzia i najbardziej sztywnej szczotki S03.



Rys. 5.9. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ91HP na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)



Rys. 5.10. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu aluminium 7075-T651 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Tabela 4.28. Wpływ prędkości ruchu posuwowego na profil powierzchni po obróbce szczotkowaniem, stop 7075-T651, medium: na sucho, szczotka S03

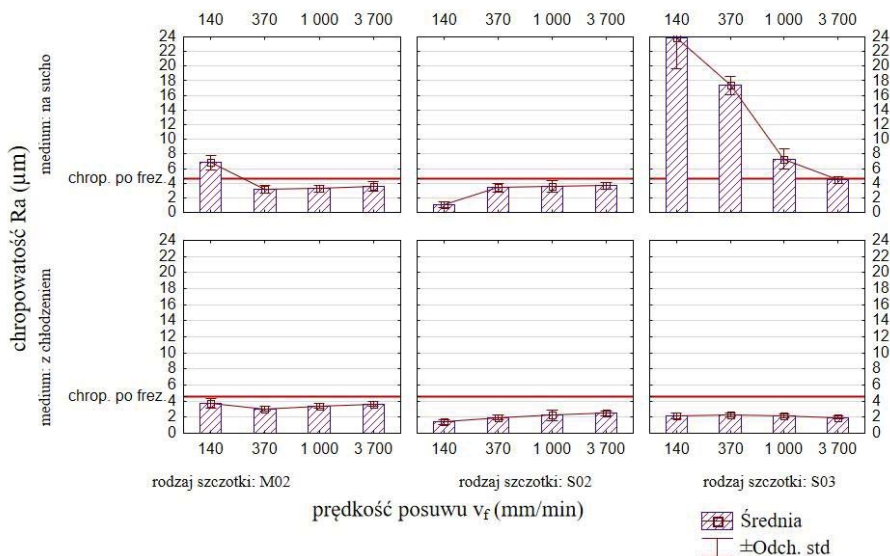
Prędkość posuwu v_f (mm/min)	Widok profilogramu
140	
370	
1000	
3700	

W przypadku obróbki stopu aluminium 7075-T651 z różnymi prędkościami ruchu posuwowego dla obu szczotek stalowych, które charakteryzują się większą sztywnością (w porównaniu ze szczotką z drutu mosiężnego) zaobserwowano podobny wpływ szczotkowania na chropowatość powierzchni, co jest przedstawione na rys. 5.10. Podczas szczotkowania na sucho narzędziem S02 do wartości posuwu nie większej jak $v_f = 370$ mm/min występowała tendencja do poprawy chropowatości. Przy większych wartościach posuwu czas kontaktu jest zbyt krótki by wygładzić nierówności powierzchni powstałe po frezowaniu. Dla szczotki z włóknem o średnicy 0,3 mm minimalną wartość chropowatości uzyskano dla posuwu $v_f = 1000$ mm/min. Oznacza to, że prędkość posuwu jest tak dobrana, że następuje skuteczne ścinanie wierzchołków mikronierówności, prowadzące do zmniejszenia wartości parametrów chropowatości. Jednocześnie prędkość posuwu jest na tyle duża, że nie następuje koncentracja odkształceń

plastycznych materiału, która powoduje wzrost wartości parametrów chropowatości. Te dwa jednocześnie występujące zjawiska (ścinięcie wierzchołków mikronierówności oraz koncentracja odkształceń plastycznych), tłumaczą zobrażowaną na rys. 5.10 tendencję do spadku wartości chropowatości wraz ze wzrostem posuwu do $v_f = 1000 \text{ mm/min}$ dla szczotki S03 oraz wzrost chropowatości przy prędkości $v_f = 3700 \text{ mm/min}$.

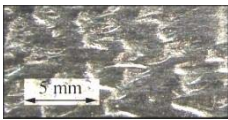
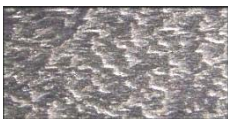
Zjawisko to jest najlepiej widoczne na profilogramach widocznych w tabeli 5.4. Zastosowanie chłodzenia powoduje przesunięcie punktu minimum (parametru chropowatości R_a) w kierunku mniejszych prędkości ruchu posuwowego (rys. 5.10). To może być bardzo przydatne w operacjach wymagających dłuższego kontaktu szczotki z przedmiotem obrabianym w celu usunięcia zadziórów, bez efektu zwiększenia chropowatości powierzchni.

Porównując obróbkę na sucho oraz z chłodzeniem największą różnicę zaobserwowano dla stopu AlSi10Mg przy obróbce szczotką S03. Podczas obróbki na sucho (rys. 5.11) im dłuższy czas kontaktu szczotki z przedmiotem obrabianym (mniejsza prędkość ruchu posuwowego v_f) tym większa wartość parametru R_a . Dla prędkości $v_f = 3700 \text{ mm/min}$, parametr R_a jest na poziomie obróbki poprzedzającej szczotkowaniem. W tabeli 5.5 przedstawiono porównanie powierzchni po obróbce szczotkowaniem.



Rys. 5.11. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu aluminium AlSi10Mg na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

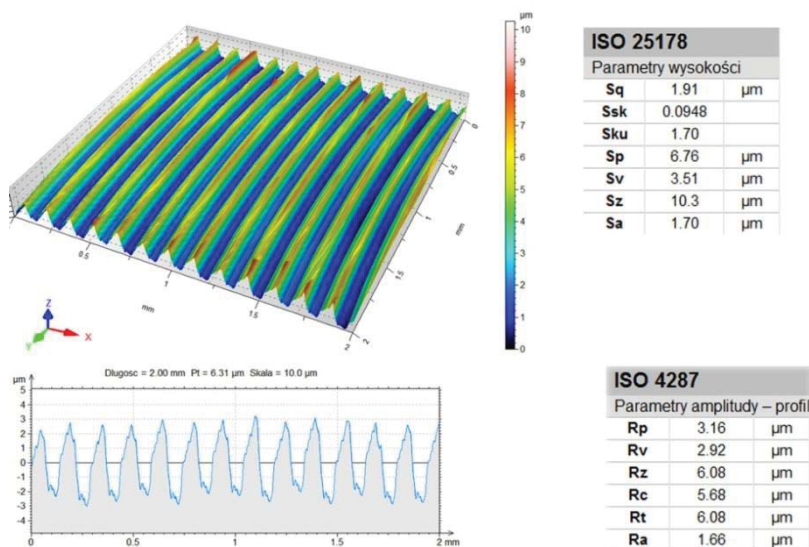
Tabela 5.5. Widok powierzchni po obróbce szczotkowaniem – stop AlSi10Mg, narzędzie S03

Prędkość posuwu v_f (m/min)	Medium	
	na sucho	z chłodzeniem
140		
370		
1000		
3700		

5.2. Badania wpływu parametrów obróbki szczotkowaniem przedmiotów frezowanych wykończeniowo na chropowatość powierzchni

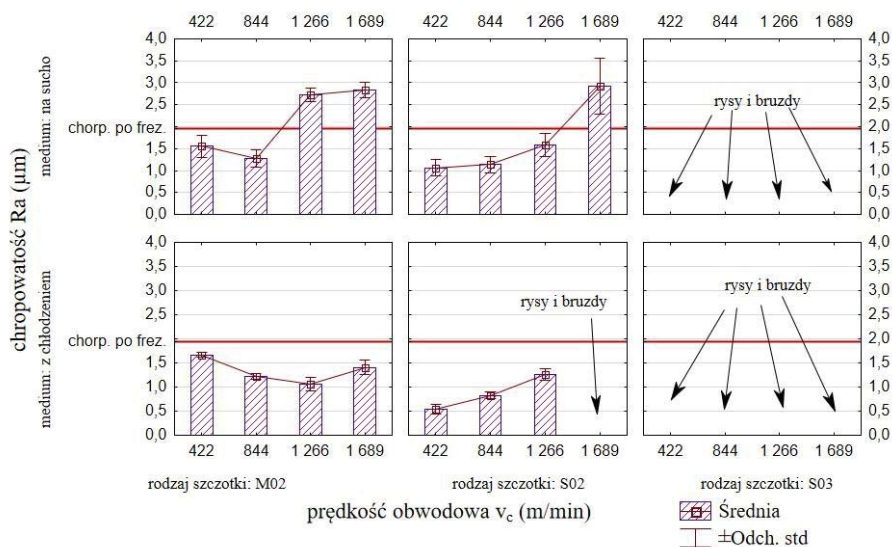
Analizowano wpływ prędkości obwodowej v_c oraz wpływ prędkości ruchu posuwowego v_f na chropowatość powierzchni po obróbce szczotkowaniem. Obróbką poprzedzającą proces szczotkowania było frezowanie wykończeniowe. Wytypowane zestawy parametrów technologicznych szczotkowania zaprezentowano w tabeli 4.2.

Przykładowa mapa powierzchni po obróbce frezowaniem przedstawiona została na rysunku 5.12. Dla wszystkich materiałów dobrano parametry frezowania tak, aby chropowatość mieściła się w przedziale $R_a = (1,6 \div 1,9) \mu\text{m}$. Widoczny jest periodyczny charakter kierunkowości struktury po obróbce frezowaniem, wynikający z odwzorowania zarysu ostrza w przedmiocie obrabianym. Profil chropowatości widoczny na rys. 5.12 wykonano w kierunku x, prostopadłym do śladów po obróbce frezowaniem.



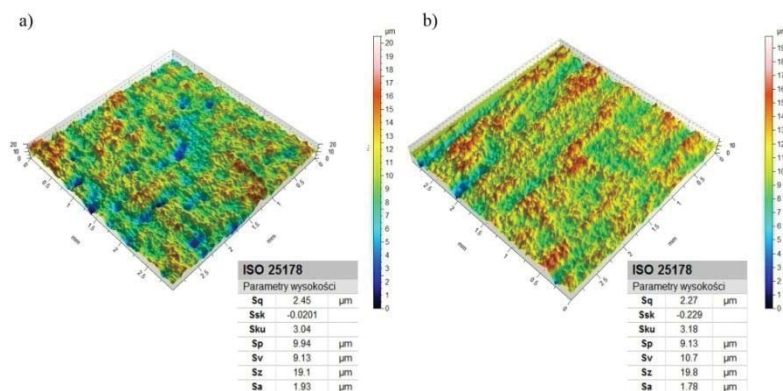
Rys. 5.12. Powierzchniowa mapa po obróbce frezowaniem – stop aluminium 7075-T651

Na rysunkach 5.13, 5.15, 5.17 i 5.18 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej szczotki walcowej v_c na chropowatość powierzchni po obróbce wykończeniowej.

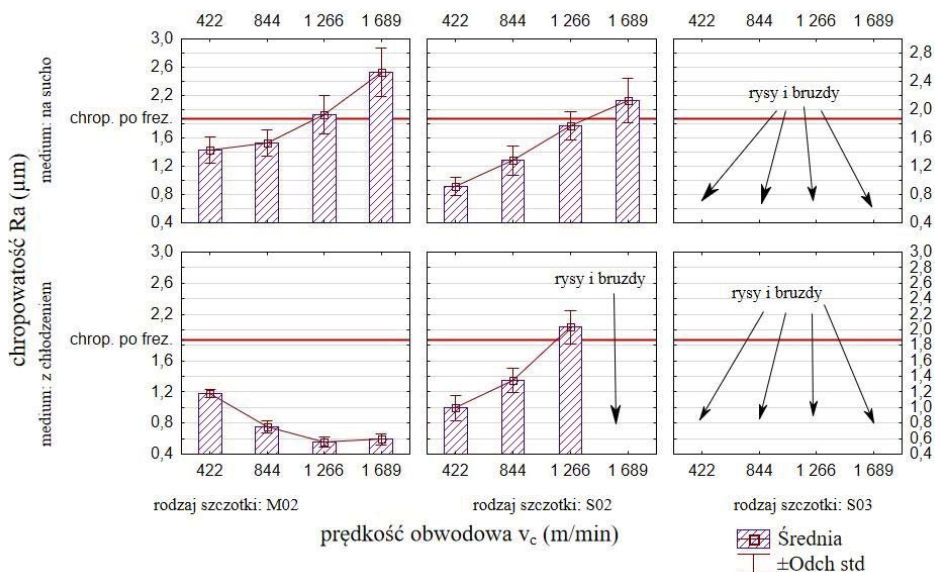


Rys. 5.13. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ31 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

W przypadku obróbki szczotkowaniem stopów magnezu za pomocą szczotki S03 pojawiły się charakterystyczne bruzdy dla wszystkich przyjętych w badaniach wartości prędkości obwodowej v_c . Ponadto bruzdy pojawiły się także po obróbce szczotką S02 podczas obróbki z chłodzeniem przy maksymalnej stosowanej w badaniach prędkości obwodowej $v_c = 1689$ mm/min.



Rys. 5.14. Widok topografii powierzchni po obróbce szczotkowaniem narzędziem S02 stopu magnezu AZ31 ($v_c = 1266$ m/min, $v_f = 370$ mm/min): a) obróbka na sucho, b) obróbka z chłodzeniem

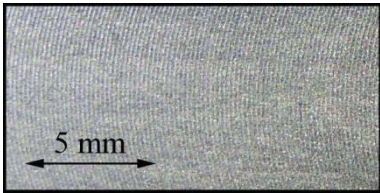


Rys. 5.15. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ91HP na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

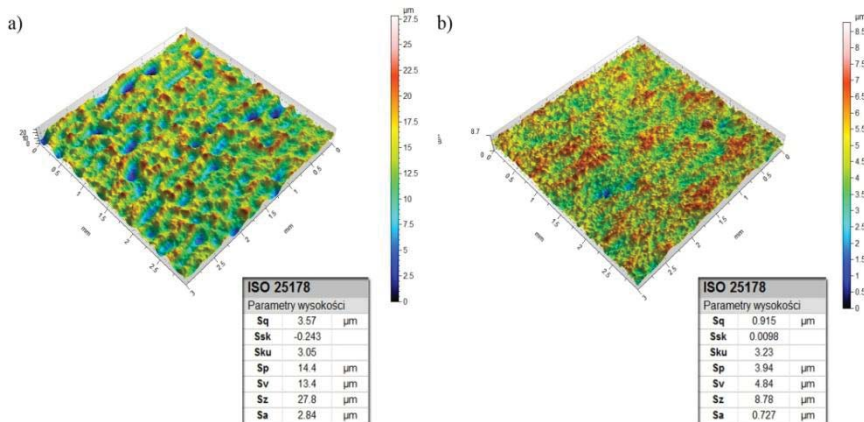
Na rysunku 5.14 przedstawiono przykładowe topografie powierzchni po obróbce szczotkowaniem narzędziem S02 na sucho oraz z zastosowaniem cieczy obróbkowej dla stopu AZ31. Skanowana powierzchnia o wymiarach 3x3 mm wykazuje bezkierunkową strukturę. Świadczy to o usunięciu śladów po obróbce frezowaniem. Wszelkie zagadnienia interakcji dwóch powierzchni to zjawiska trójwymiarowe, a ich opis nie zawsze powinien ograniczać się tylko do analizy profilu dwuwymiarowego. Trójwymiarowe obrazy pozwalają lepiej zaprezentować naturę procesów obróbki oraz współpracy powierzchni [111].

Podczas obróbki szczotkowaniem stopu AZ91HP szczotką M02 przy obróbce na sucho odnotowano wzrost chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem prędkości obwodowej v_c , natomiast odwrotna tendencja pojawiła się przy obróbce z chłodzeniem. Odpowiadające takiemu rozkładowi chropowatości obrazy powierzchni przedstawiono w tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Widok powierzchni po obróbce szczotkowaniem – stop AZ91HP, narzędzie M02, $v_f = 370$ mm/min

Prędkość obwodowa v_c (m/min)	Medium	
	na sucho	z chłodzeniem
422		
844		
1266		
1689		

W przypadku obróbki na sucho wraz ze wzrostem prędkości obwodowej v_c widoczne jest usunięcie śladów po obróbce frezowaniem wraz z degradacją powierzchni (zwiększeniem chropowatości), natomiast zastosowanie cieczy obróbkowej powoduje znaczne zmniejszenie wartości chropowatości wraz ze wzrostem prędkości v_c poprzez stopniowe ścinanie wierzchołków nierówności. Największą różnicę wartości chropowatości, porównując obróbkę na sucho oraz z chłodzeniem (dla szczotki M02), odnotowano dla prędkości $v_c = 1689$ m/min. Na rysunku 5.16 przedstawiono trójwymiarowe obrazy dla wybranych próbek szczotkowanych z tymi parametrami. Widoczny jest brak kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni świadczący o usunięciu śladów po frezowaniu oraz dużą różnicę między parametrem S_a , będącym przestrzennym odpowiednikiem dwuwymiarowego parametru R_a .

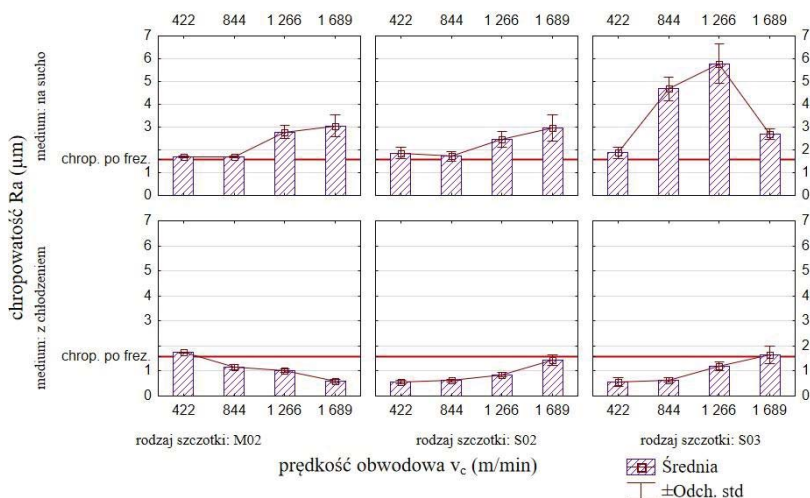


Rys. 5.16. Widok topografii powierzchni po obróbce szczotkowaniem narzędziem M02 stopu magnezu AZ91HP ($v_c = 1689$ m/min, $v_f = 370$ mm/min): a) obróbka na sucho, b) obróbka z chłodzeniem

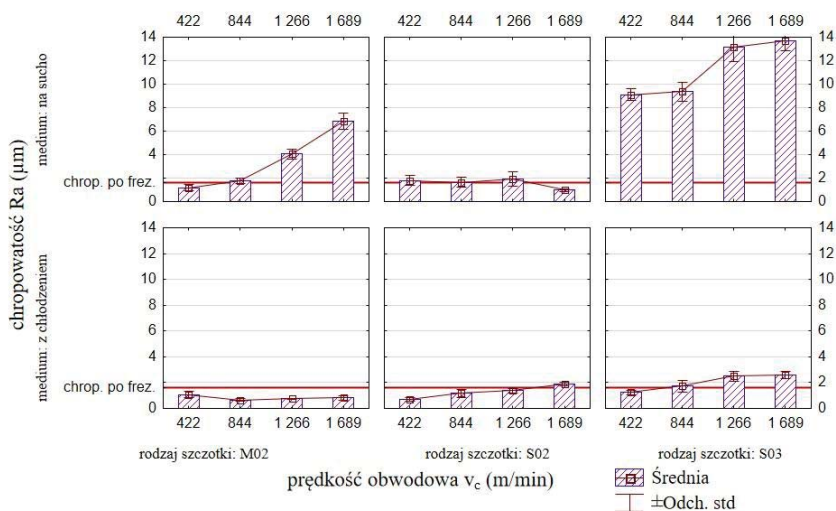
W przypadku obróbki szczotkowaniem stopu aluminium 7075-T651 (rys. 5.17) widoczny jest istotny wpływ zastosowania cieczy obróbkowej na chropowatość powierzchni. Podczas obróbki szczotkowaniem na sucho utrzymano chropowatość na poziomie wykończeniowej obróbki frezowaniem jedynie dla mniejszych prędkości obwodowych v_c . W przypadku konieczności użycia większej energii w aspekcie usuwania zadziorów, a tym samym większych prędkości obwodowych, problemem może być utrzymanie jakości powierzchni na zadowalającym poziomie. Natomiast zastosowanie chłodzenia podczas szczotkowania skutkuje tym, że niemal dla wszystkich warunków szczotkowania (prędkość v_c i rodzaj szczotki) można uzyskać wartości chropowatości poniżej linii oznaczającej chropowatość po frezowaniu.

Podobne tendencje zaobserwowano dla stopu aluminium AlSi10Mg (rys. 5.18). Zastosowanie cieczy obróbkowej zmniejsza temperaturę, ogranicza-

jąc deformację plastyczną powierzchni, co przyczynia się do utrzymania, bądź poprawy, wartości chropowatości powierzchni w stosunku do obróbki wyjściowej. Jedynie dla najbardziej sztywnej szczotki S03 przy większych prędkościach v_c odnotowano zwiększenie chropowatości powierzchni.

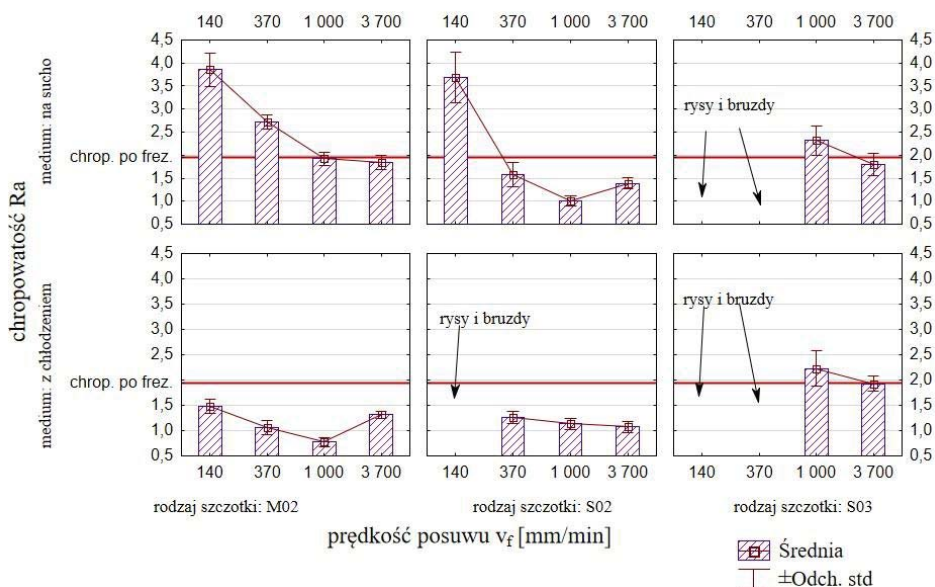


Rys. 5.17. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu aluminium 7075-T651 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe) [61]



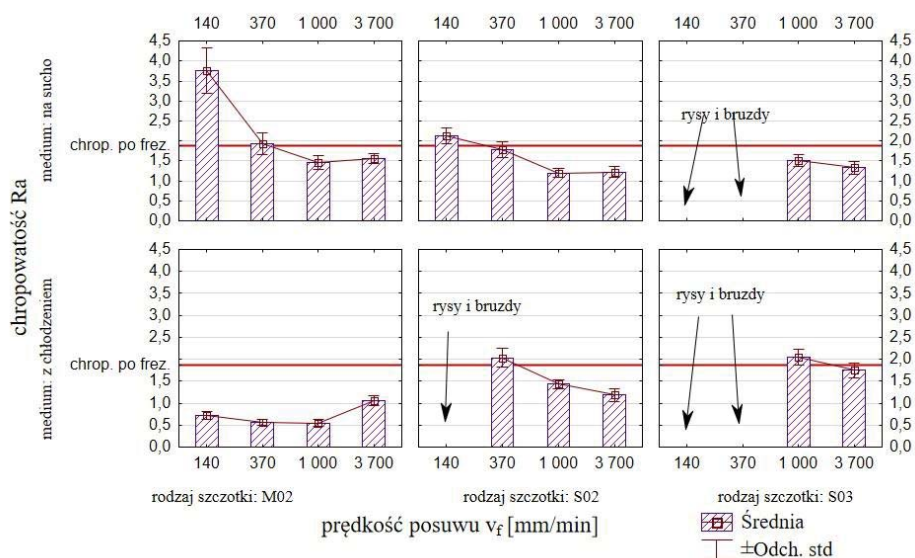
Rys. 5.18. Wpływ prędkości obwodowej w procesie szczotkowania stopu aluminium AlSi10Mg na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

Na rysunkach 5.19, 5.20, 5.21, 5.23 przedstawiono wpływ prędkości ruchu posuwowego na chropowatość powierzchni w przypadku, gdy obróbką poprzedzającą proces szczotkowania było frezowanie wykończeniowe.

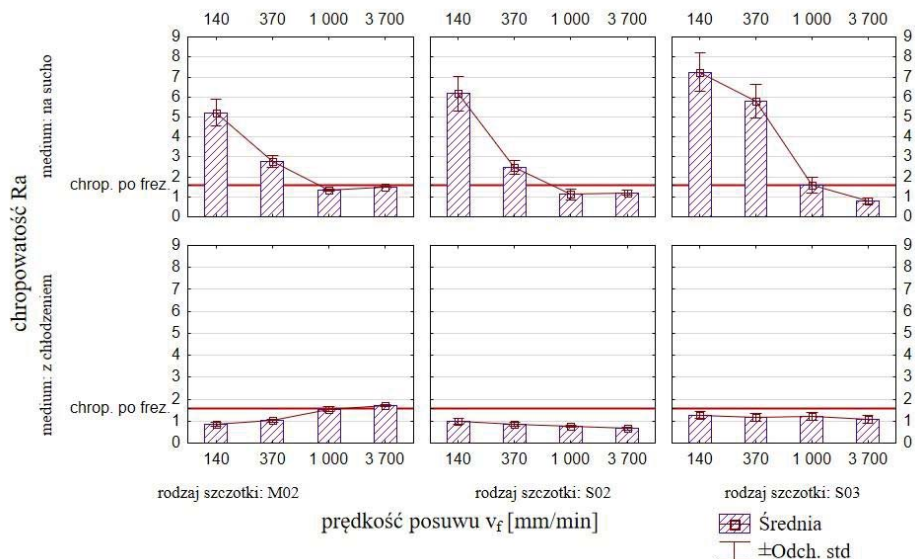


Rys. 5.19. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ31 na chropowatość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

Prędkość obwodową utrzymano na stałym poziomie $v_c = 1266$ m/min. Dla stopów magnezu AZ31 oraz AZ91HP podczas szczotkowania pojawiły się rysy i bruzdy. Taki niekorzystny stan stereometryczny powierzchni wystąpił podczas szczotkowania narzędziem S03 z mniejszymi prędkościami ruchu posuwowego $v_f = 140$ mm/min oraz $v_f = 370$ mm/min, a także dla narzędzia S02 przy obróbce z chłodzeniem z posuwem $v_f = 140$ mm/min. Podczas obróbki na sucho, w przypadku szczotek M02 i S02, obróbka z małymi wartościami prędkości v_f nie jest korzystna. Długi czas kontaktu powoduje zwiększenie chropowatości, a także zapewnia niewielką wydajność procesu. Zastosowanie cieczy obróbkowej przyczynia się do uzyskania niskich wartości chropowatości powierzchni. Dla szczotki M02 i S02 zastosowanie cieczy pozwoliło na zmniejszenie chropowatości powierzchni w stosunku do frezowania dla wszystkich wartości prędkości posuwu v_f (z wyłączeniem punktu, w którym pojawiły się bruzdy). Dla szczotki M02 w przypadku obróbki stopów magnezu, wartość minimalną parametru chropowatości Ra uzyskano przy prędkości posuwu $v_f = 1000$ mm/min.



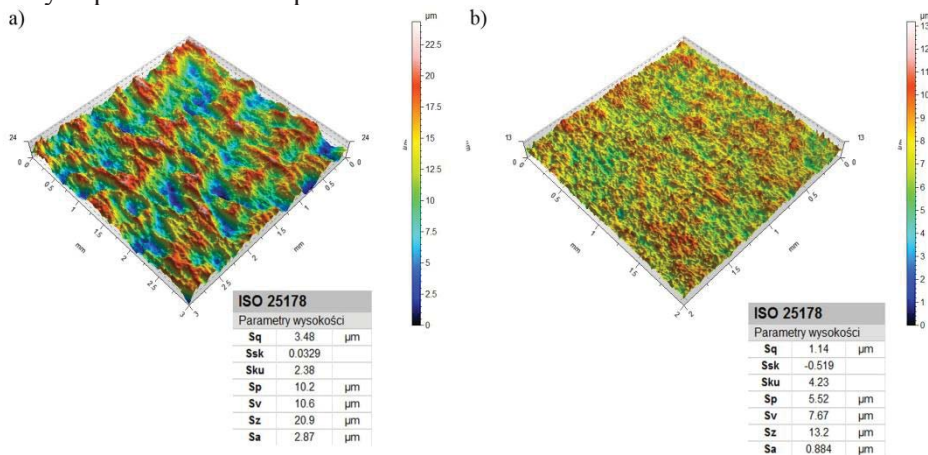
Rys. 5.20. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu magnezu AZ91HP na chropowość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)



Rys. 5.21. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu aluminium 7075-T651 na chropowość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe) [61]

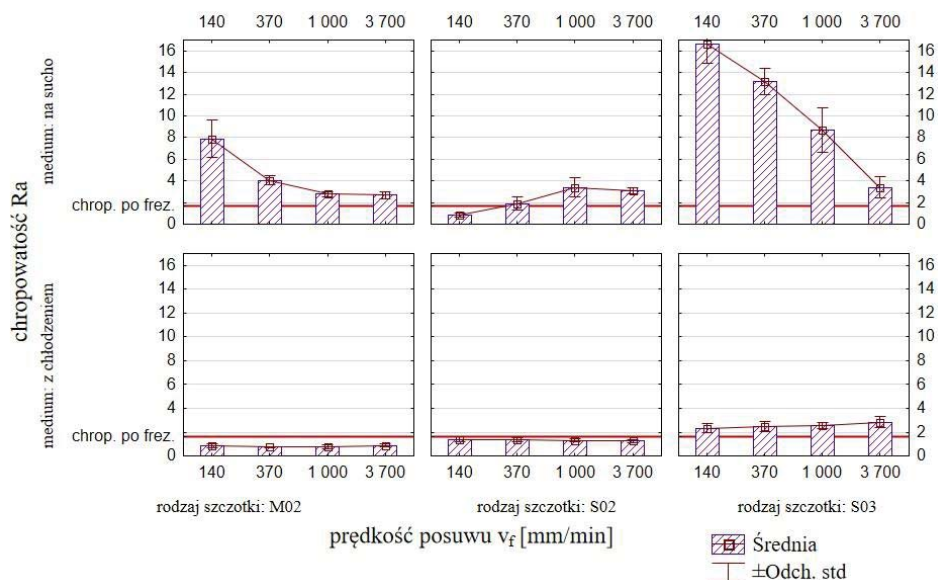
Dla stopu aluminium 7075-T651 (rys. 5.21) niekorzystny wpływ obróbki szczotkowaniem miał miejsce przy obróbce na sucho z prędkościami posuwu $v_f = 140$ mm/min oraz $v_f = 370$ mm/min. W pozostałych przypadkach następowało zmniejszenie lub utrzymanie chropowatości powierzchni na poziomie obróbki poprzedzającej szczotkowanie.

Na rysunku 5.22 przedstawiono porównanie topografii powierzchni po obróbce szczotkowaniem na sucho oraz z chłodzeniem. Widoczny jest rozkład nierówności zbliżony do losowego oraz znacznie większa wartość powierzchniowych parametrów chropowatości dla obróbki na sucho.

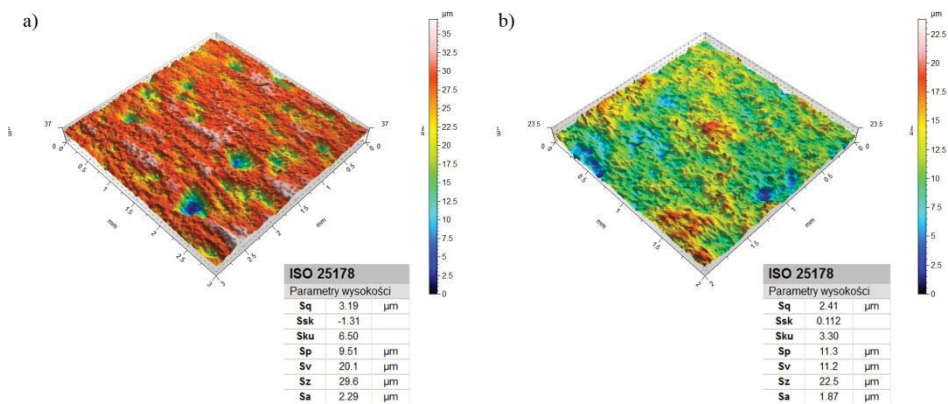


Rys. 5.22. Widok topografii powierzchni po obróbce szczotkowaniem narzędziem S02 stopu aluminium 7075-T651 ($v_f = 370$ mm/min, $v_c = 1266$ m/min): a) obróbka na sucho, b) obróbka z chłodzeniem

W przypadku obróbki szczotkowaniem stopu aluminium AlSi10Mg (rys. 5.23) zastosowanie cieczy obróbkowej znacznie zmniejsza wpływ prędkości posuwu v_f na chropowatość powierzchni. Dla szczotek M02 i S02 słupki oznaczające uśrednioną wartość parametru chropowatości R_a znajdują się poniżej linii oznaczającej chropowatość po obróbce frezowaniem. Natomiast dla szczotki S03 zaobserwowano nieznaczny wzrost chropowatości po szczotkowaniu z chłodzeniem w odniesieniu do frezowania. Na rysunku 5.24 przedstawiono porównanie topografii powierzchni po obróbce szczotkowaniem na sucho oraz z zastosowaniem cieczy obróbkowej



Rys. 5.23. Wpływ prędkości ruchu posuwowego w procesie szczotkowania stopu aluminium AlSi10Mg na chropowość powierzchni (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)



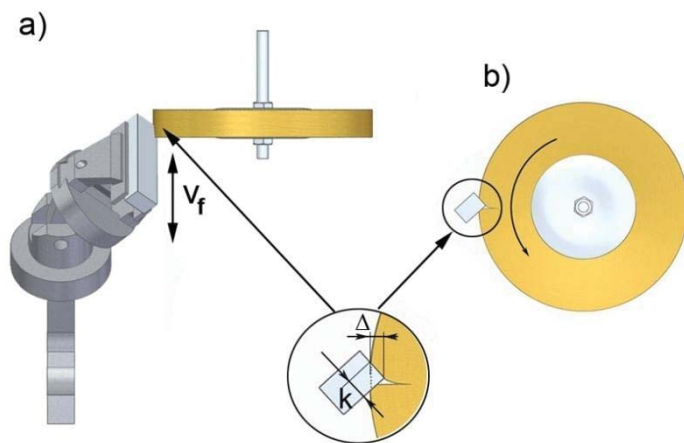
Rys. 5.24. Widok topografii powierzchni po obróbce szczotkowaniem narzędziem S02 stopu aluminium AlSi10Mg ($v_c = 1266$ m/min, $v_f = 370$ mm/min): a) obróbka na sucho, b) obróbka z chłodzeniem

6. BADANIA MIKROTWARDZOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM

Fizyczne właściwości warstwy wierzchniej mają istotne znaczenie z punktu widzenia eksploatacji wyrobów. Oprócz naprężeń własnych, utwardzenie warstwy wierzchniej jest często czynnikiem decydującym o wytrzymałości zmęczeniowej, dlatego też tak istotna jest analiza stanu umocnienia. Opanowanie procesu sterowania właściwościami technologicznej warstwy wierzchniej zapewniłoby w konsekwencji kontrolowanie cech eksploatacyjnych, wydłużenie cyklu życia współpracujących wyrobów. Fakt, że większość uszkodzeń zachodzi na powierzchni lub bezpośrednio pod nią zmusza do troski o jakość warstwy wierzchniej i poprawy jej parametrów [63].

6.1. Metodyka badań mikrotwardości

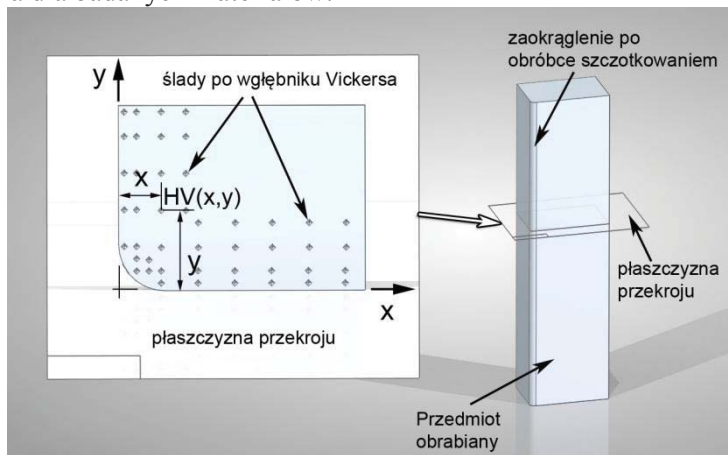
Sposób obróbki szczotkowaniem przedstawiono schematycznie na rysunku 6.1. Zastosowano dwa przejścia, jedno na prawych oraz drugie na lewych obrotach. Zastosowano stały dosuw $\Delta = 3$ mm. Natomiast strefa "k" oddziaływania włókien była odpowiednio większa z uwagi na to, że powierzchnie przystające do krawędzi obrabianej ustawione są pod kątem 45° w stosunku do wektora prędkości obwodowej.



Rys. 6.1. Schemat obróbki szczotkowaniem: a) widok z boku, b) widok z góry

Po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania wykonano zglądy metalograficzne próbek. W celu sporządzenia mapy rozkładu mikrotwardości pomiarów dokonano według schematu przedstawionego na rysunku 4.56. Poza

wartością mikrotwardości uwzględniano także współrzędne każdego odcisku na płaszczyźnie pomiaru. Przyjęto płaszczyznę pomiaru o rozmiarach 4 x 4 mm. Mapy rozkładu mikrotwardości sporządzono w programie Golden Software Surfer 10. Zastosowano stałe obciążenie węgelnika równe 10 g. W celu oceny wpływu samej obróbki szczotkowaniem na mikrotwardość warstwy wierzchniej po obróbce frezowaniem wykonano dodatkowy proces wyżarzania odpuszczającego. Dla stopu magnezu AZ31 wyżarzanie prowadzono w temperaturze 200°C, natomiast dla stopu magnezu AZ91HP oraz stopów aluminium w temperaturze 250°C przez okres czterech godzin przy zastosowaniu powolnego chłodzenia próbek wraz z piecem, co pozwoliło na zmniejszenie mikrotwardości do poziomu rdzenia dla badanych materiałów.



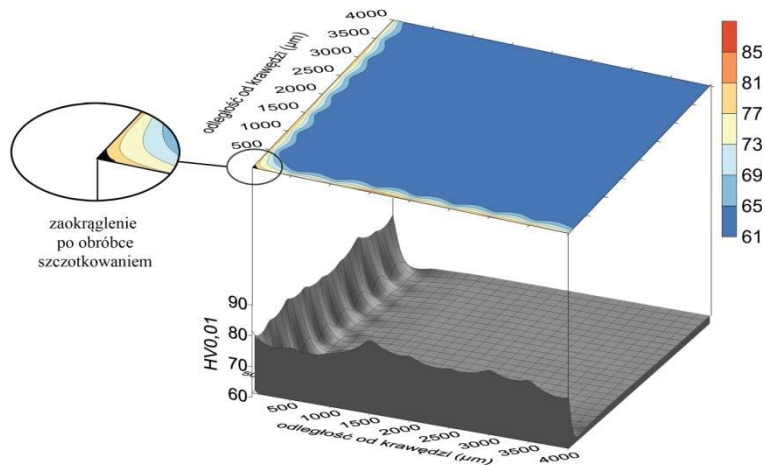
Rys. 6.2. Metodyka przygotowania map rozkładu mikrotwardości w obrębie krawędzi po obróbce szczotkowaniem [67]

Pomiary mikrotwardości na zglądach przeprowadzono po szczotkowaniu ze stałymi parametrami technologicznymi $v_c = 1266 \text{ m/min}$, $v_f = 370 \text{ mm/min}$.

6.2. Badania wpływu obróbki szczotkowaniem na mikrotwardość warstwy wierzchniej

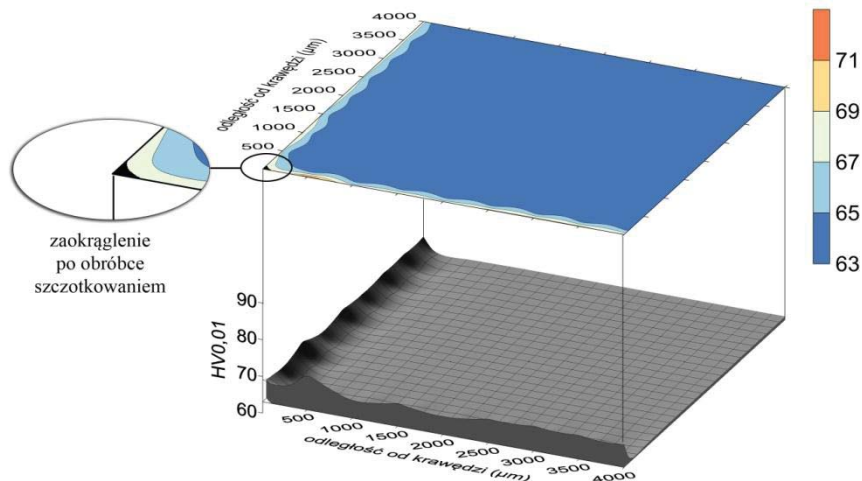
Na rysunku 6.3 przedstawiono mapę rozkładu mikrotwardości w obrębie krawędzi po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania stopu AZ31 w przypadku obróbki na sucho, natomiast na rysunku 6.4 w przypadku obróbki z chłodzeniem. Widoczna jest różnica w stopniu umocnienia warstwy wierzchniej w obrębie krawędzi w zależności od zastosowanego medium. Grubość warstwy wierzchniej zmienionej poprzez obróbkę szczotkowaniem szczotką M02 wynosi około 20÷30 μm . Na przecięciu się powierzchni przystających do kra-

wędzi poddanej obróbce szczotkowaniem widoczne jest zaokrąglenie (schematycznie zaznaczone na mapach rozkładu mikrotwardości).

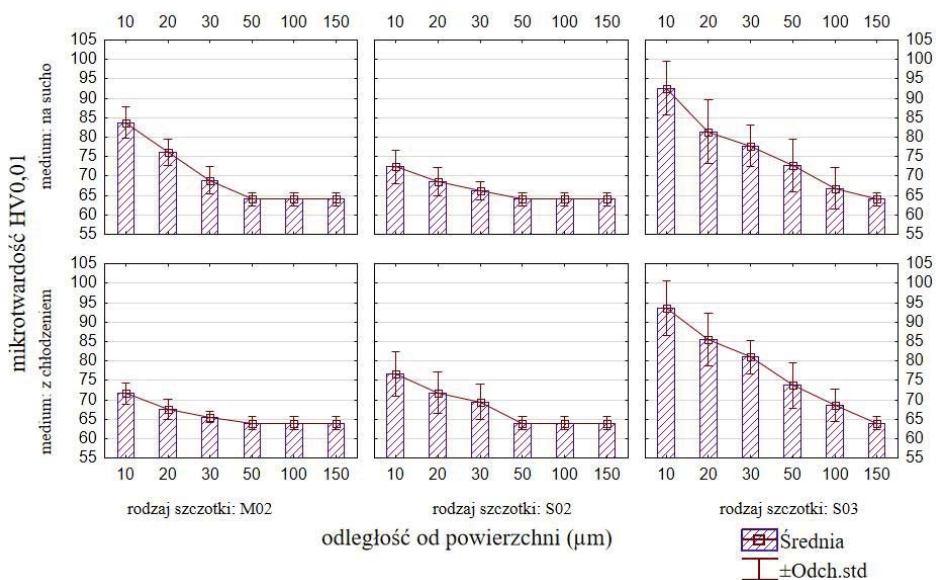


Rys. 6.3. Mapa rozkładu mikrotwardości w obrębie krawędzi po procesie szczotkowania narzędziem M02 w przypadku obróbki na sucho ($v_c = 1266 \text{ m/min}$, $v_f = 370 \text{ mm/min}$) – stop magnezu AZ31

Na rysunku 6.5 przedstawiono rozkład mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni po obróbce szczotkowaniem stopu magnezu AZ31. Największe wartości mikrotwardości zaobserwowano po obróbce szczotką S03. Głębokość utwardzonej warstwy w tym przypadku sięga ok. $100 \mu\text{m}$.

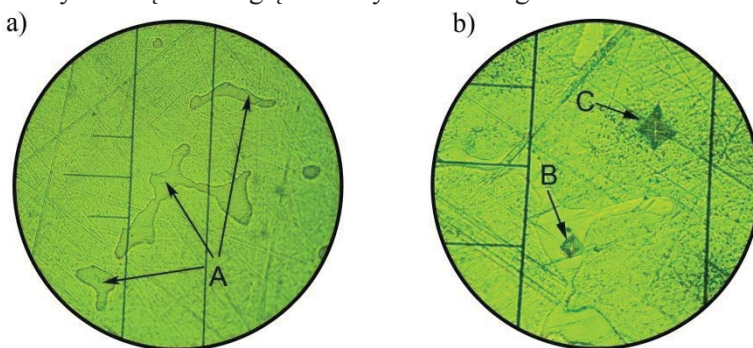


Rys. 6.4. Mapa rozkładu mikrotwardości w obrębie krawędzi po procesie szczotkowania narzędziem M02 w przypadku obróbki z chłodzeniem ($v_c = 1266 \text{ m/min}$, $v_f = 370 \text{ mm/min}$) – stop magnezu AZ31



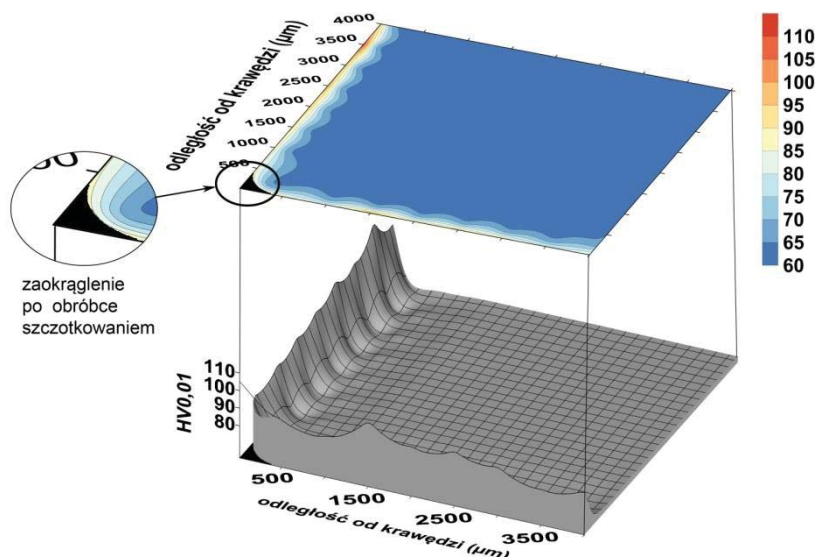
Rys. 6.5. Rozkład mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu stopu magnezu AZ31

W przypadku stopu magnezu AZ91HP pomiarów mikrotwardości dokonywano na osnowie, pomijając twardszą fazę $Mg_{17}Al_{12}$ zaznaczoną na rysunku 6.6a literą A. Na rysunku 6.6b zobrazowano różnicę w wielkości odcisku dla fazy i osnowy. Obciążenie węgelnika było stałe 10 g.



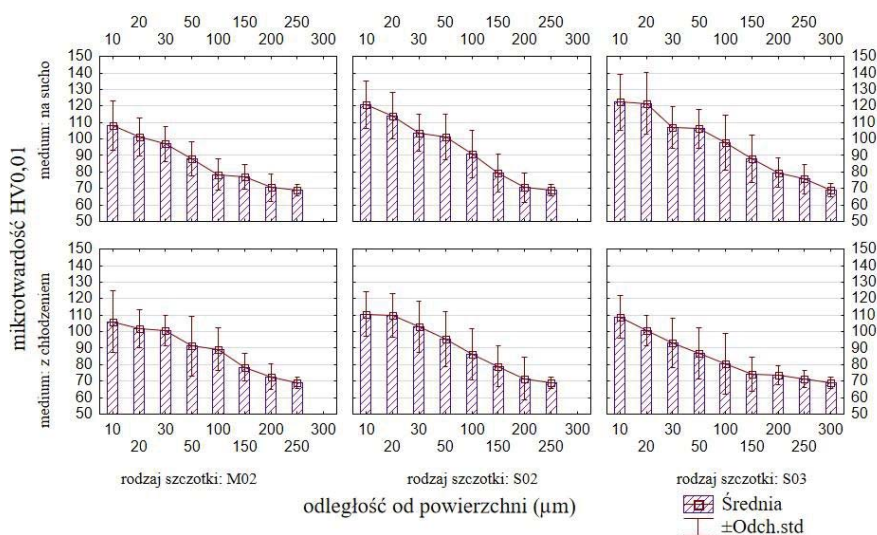
Rys. 6.6. Zgład metalograficzny stopu magnezu AZ91HP: a) faza $Mg_{17}Al_{12}$, b) odciski węgelnika Vickersa

Na rysunku 6.7 przedstawiono mapę rozkładu mikrotwardości w obrębie krawędzi po procesie usuwania zadziórów metodą szczotkowania próbek ze stopu AZ91HP.



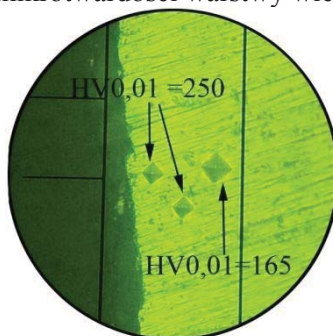
Rys. 6.7. Mapa rozkładu mikrotwardości w obrębie krawędzi po procesie szczotkowania narzędziem S03 w przypadku obróbki na sucho ($v_c = 1266$ m/min, $v_f = 370$ mm/min) – stop magnezu AZ91HP

Widać wzrost mikrotwardości na obu powierzchniach przystających do krawędzi sięgający do głębokości $150 \div 200 \mu\text{m}$. Spowodowane jest to zastosowaniem dwóch przejść oddziaływujących na obie powierzchnie przystające do krawędzi. Zaznaczono charakterystyczne zaokrąglenie krawędzi, które dla szczotki S03 było największe. Podczas eksperymentu zastosowano stały dosuw $\Delta = 3$ mm. Powierzchnie obrabiane ustawione są w stosunku do włókien będących w kontakcie z przedmiotem pod kątem 45° , co wydłuża teoretyczną długość oddziaływania włókien wzdłuż powierzchni przystających do krawędzi szczotkowanej w stosunku do dosuwu " Δ " (rys. 6.1). Zaobserwowana strefa oddziaływania włókien szczotki "k" na powierzchnie przystające do krawędzi wynosiła od $7 \div 9$ mm. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej drut falisty ulega wydłużeniu, co dodatkowo wpływa na wydłużenie strefy oddziaływania "k". Ponadto długość włókien jest zróżnicowana, co wynika z błędów w procesie wykonania szczotek.



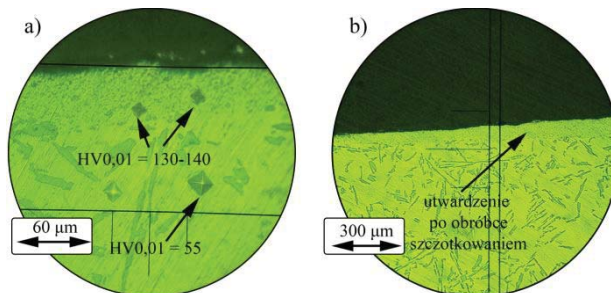
Rys. 6.8. Rozkład mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu stopu magnezu AZ91HP

Na rysunku 6.8 przedstawiono rozkład mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni dla stopu AZ91HP. Zaobserwowano duży stopień umocnienia w zakresie od 56%, dla szczotki M02 przy obróbce na sucho, do 76% dla szczotki S03 przy obróbce na sucho. Zaobserwowano nieznaczny wpływ cieczy chłodzącej na zmniejszenie mikrotwardości warstwy wierzchniej.



Rys. 6.9. Zgląd metalograficzny po obróbce szczotkowaniem stopu aluminium 7075-T651 (szczotka S03; medium: na sucho) [61]

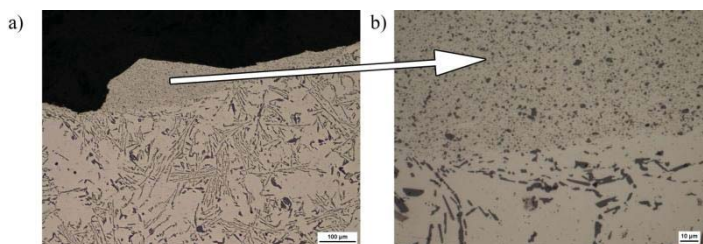
W przypadku obróbki stopu aluminium 7075-T651 zaobserwowano silne utwardzenie jedynie dla szczotki S03 przy obróbce na sucho. Głębokość warstwy utwardzonej wyniosła 50÷70 μm . Na rysunku 6.9 przedstawiono widok zglądu metalograficznego z przykładowymi pomiarami mikrotwardości.



Rys. 6.10. Widok zglądu metalograficznego po obróbce szczotkowaniem stopu AlSi10Mg: a) przykładowe odciski wglębnikiem Vickersa, b) utwardzenie po obróbce szczotkowaniem

W przypadku obróbki stopu aluminium AlSi10Mg utwardzenie warstwy wierzchniej zaobserwowano dla szczotek S02 oraz S03 przy obróbce na sucho. Na rysunku 6.10 przedstawiono widok zglądu metalograficznego z widoczną utwardzoną strefą wynoszącą dla szczotki S02 od 20 do 50 µm oraz dla szczotki S03 od 30 do 100 µm.

Rysunek 6.11 przedstawia fotografie zglądu ze stopu AlSi10Mg wykonaną na mikroskopie stereoskopowym. Widoczne jest rozdrobnienie krzemu spowodowane efektem nagniatania i podwyższonej temperatury podczas obróbki na sucho. Jest to specyficzna, silnie utwardzona faza o twardości HV0,01 = 140÷150.



Rys. 6.11. Mikrostruktura stopu AlSi10Mg po obróbce szczotkowaniem (szczotka S03, medium: na sucho)

6.3. Analiza składu chemicznego obrabianego materiału na powierzchni szczotkowanej

Obróbka szczotkowaniem jest specyficznym rodzajem obróbki powierzchni, której charakter nie jest jednoznaczny. Każdy koniec pojedynczego włókna stanowi integralną krawędź skrawającą. Rozmiary produktów szczotkowania są charakterystyczne dla obróbki ścierniej [66]. Natomiast utwardzenie warstwy wierzchniej świadczy o efekcie nagniatania wywołanego przez uderzające włókna w obrabianą powierzchnię. Zjawiska zachodzące podczas obróbki szczotko-

waniem stanowią zintegrowanie zjawisk występujących podczas obróbki wiórowej, ścierniej oraz obróbki nagniataniem. W celu oceny, czy materiał włókien szczotki nie pozostaje na obrabianej powierzchni w sposób trwały, wykonano analizę składu chemicznego na powierzchni po obróbce szczotkowaniem przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom ProX wraz z analizą składu chemicznego.

Oprogramowanie do analizy składu w sposób automatyczny rozpoznaje określone pierwiastki chemiczne. W trybie manualnym możliwe jest definiowanie poszukiwanych pierwiastków stopowych materiałów obrabianych, miedź "Cu" oraz cynk "Zn" stanowiące składniki drutu mosiężnego. Natomiast w przypadku, gdy narzędziem w obróbce były szczotki S02 oraz S03 do analizy wybie-rano żelazo "Fe". Analizowano wycinek powierzchni 500 x 500 µm.

Tabela 6.1. Analiza składu chemicznego na powierzchni stopu magnezu AZ31 po ob-róbce szczotkowaniem

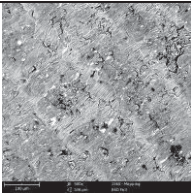
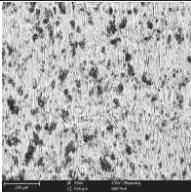
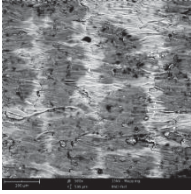
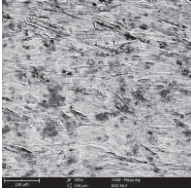
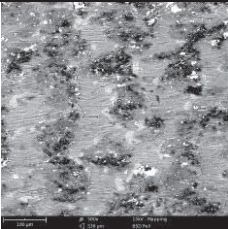
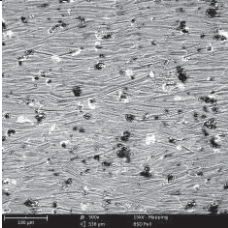
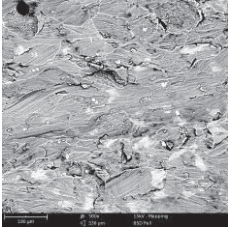
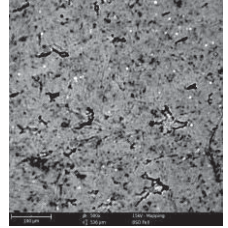
Rodzaj szczotki	Medium	Fotografia SEM	Skład chemiczny na powierzchni	
M02	na sucho		Weight percentage Mg 83.2 % O 11.4 % Zn 2.2 % Al 1.9 % Na 1.1 % Cu 0.3 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 98.9 % 98.1 % 97.3 % 97.4 % 83.6 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Mg 77.3 % O 15.1 % N 2.3 % Al 2.1 % Zn 1.7 % Na 1.2 % Cu 0.2 % Fe 0.0 %	Certainty 99.9 % 99.2 % 97.3 % 97.9 % 97.7 % 97.8 % 83.2 % 100.0 %
S02	na sucho		Weight percentage Mg 80.5 % O 12.7 % Zn 2.8 % Al 2.1 % N 1.9 % Fe 0.0 % Cu 0.0 %	Certainty 99.8 % 99.0 % 98.5 % 97.6 % 96.6 % 100.0 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Mg 77.5 % O 14.8 % Zn 2.9 % N 2.4 % Al 2.2 % Cu 0.1 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 99.1 % 98.6 % 97.3 % 97.9 % 75.8 % 100.0 %

Tabela 6. 2. Analiza składu chemicznego na powierzchni stopu magnezu AZ91HP po obróbce szczotkowaniem

Rodzaj szczotki	Medium	Fotografia SEM	Skład chemiczny na powierzchni	
M02	na sucho		Weight percentage Mg 71.6 % O 16.4 % Al 5.6 % N 2.5 % Zn 2.3 % Na 0.9 % Cu 0.7 % Fe 0.0 % Mn 0.0 %	Certainty 99.8 % 99.2 % 98.9 % 97.5 % 98.4 % 96.0 % 94.5 % 100.0 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Mg 79.4 % O 9.8 % Al 7.8 % Zn 2.8 % Cu 0.1 % Mn 0.0 % Fe 0.0 %	Certainty 99.9 % 98.8 % 99.0 % 98.6 % 61.8 % 100.0 % 100.0 %
S02	na sucho		Weight percentage Mg 84.0 % Al 9.5 % O 3.7 % Zn 2.7 % Mn 0.0 % Fe 0.0 % Cu 0.0 %	Certainty 99.8 % 99.0 % 97.2 % 98.6 % 100.0 % 100.0 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Mg 75.9 % O 12.1 % Al 8.7 % Zn 2.8 % C 0.5 % Cu 0.0 % Mn 0.0 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 99.0 % 99.1 % 98.6 % 95.3 % 100.0 % 100.0 % 100.0 %

W tabeli 6.1 przedstawiono analizę dla stopu AZ31. W składzie chemicznym stopu magnezu AZ31 występuje ok. 0,8 % cynku "Zn". Na podstawie analizy składu na powierzchni wynika, że odnotowano większą ilość tego stopowego (2,3÷2,8%). Jednak w przypadku obróbki szczotką z drutu stalowego, także odnotowano podobne ilości cynku w składzie badanym na powierzchni przedmiotu, co nie pozwala wnioskować o podwyższonej ilości cynku "Zn" spowodowanego obróbką szczotką z drutu mosiężnego, w składzie którego występuje cynk.

Tabela 6.3. Analiza składu chemicznego na powierzchni stopu aluminium 7075-T651 po obróbce szczotkowaniem

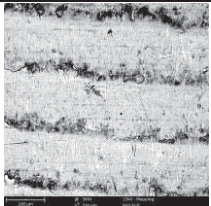
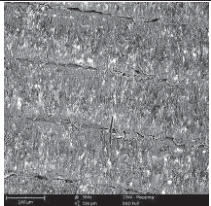
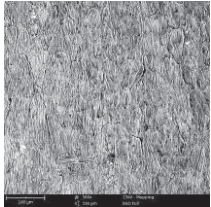
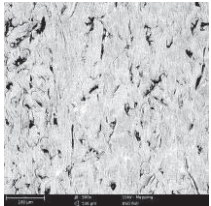
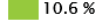
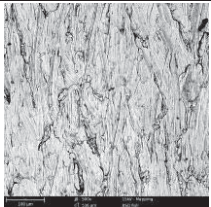
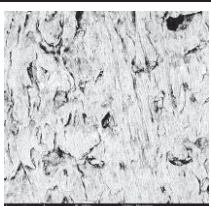
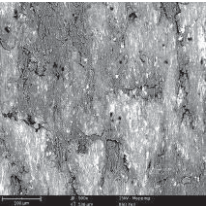
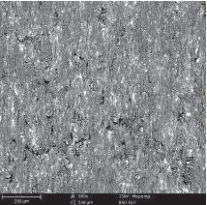
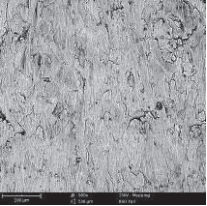
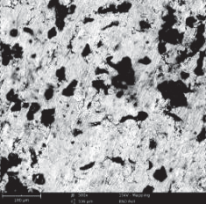
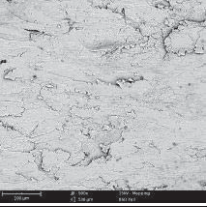
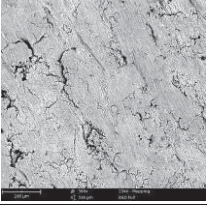
Rodzaj szczotki	Medium	Fotografia SEM	Skład chemiczny na powierzchni	
M02	na sucho		Weight percentage Al  78.5 % O  8.4 % Zn  7.9 % Mg  4.3 % Cu  0.9 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 98.4 % 99.1 % 99.1 % 94.2 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Al  65.2 % O  18.8 % Zn  10.0 % Mg  3.5 % Cu  2.4 %	Certainty 99.8 % 99.1 % 99.2 % 98.9 % 97.4 %
S02	na sucho		Weight percentage Al  79.4 % O  7.9 % Zn  7.6 % Mg  4.3 % Cu  0.8 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 98.3 % 99.1 % 99.1 % 93.3 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Al  77.4 % O  10.6 % Zn  7.3 % Mg  4.2 % Cu 0.5 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 98.6 % 99.0 % 99.1 % 89.4 % 100.0 %
SS03	na sucho		Weight percentage Al  81.1 % Zn  7.7 % O  6.4 % Mg  4.2 % Cu  0.7 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 99.1 % 98.0 % 99.1 % 92.3 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Al  78.4 % O  8.1 % Zn  7.5 % Mg  4.2 % C 0.9 % Cu 0.9 % Fe 0.0 %	Certainty 99.8 % 98.3 % 99.1 % 99.1 % 96.0 % 94.0 % 100.0 %

Tabela 6.4. Analiza składu chemicznego na powierzchni stopu aluminium AlSi10Mg po obróbce szczotkowaniem

Rodzaj szczotki	Medium	Fotografia SEM	Skład chemiczny na powierzchni	
M02	na sucho		Weight percentage Al  69.9 % O  16.1 % Si  8.4 % N  2.1 % Na  1.4 % Mg  1.0 % As  1.0 %	Certainty 99.8 % 98.8 % 99.1 % 95.2 % 97.3 % 97.4 % 97.3 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Al  61.6 % O  22.9 % Si  6.3 % Zn  5.5 % Cu  2.6 % Mg  1.1 % Fe  0.0 %	Certainty 99.8 % 99.2 % 99.0 % 98.6 % 97.5 % 97.2 % 100.0 %
S02	na sucho		Weight percentage Al  75.1 % O  11.2 % Si  10.1 % Mg  1.7 % Zn  1.3 % Fe  0.3 % Cu  0.2 %	Certainty 99.8 % 98.5 % 99.2 % 98.5 % 96.6 % 88.4 % 78.8 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Al  63.4 % O  22.2 % Si  5.8 % N  3.8 % C  2.6 % Zn  1.2 % Mg  1.1 % Fe  0.0 % Cu  0.0 %	Certainty 99.8 % 99.0 % 98.8 % 97.2 % 98.2 % 95.4 % 97.4 % 100.0 % 100.0 %
SS03	na sucho		Weight percentage Al  78.2 % Si  11.4 % O  8.2 % Mg  0.9 % Zn  0.8 % As  0.7 % Fe  0.0 % Cu  0.0 %	Certainty 99.8 % 99.1 % 97.9 % 96.9 % 93.8 % 95.6 % 100.0 % 100.0 %
	z chłodzeniem		Weight percentage Al  72.3 % O  15.8 % Si  8.7 % Mg  1.7 % Zn  1.5 % Fe  0.0 % Cu  0.0 %	Certainty 99.8 % 98.9 % 99.1 % 98.5 % 97.0 % 100.0 % 100.0 %

W tabeli 6.2 przedstawiono analizę dla stopu magnezu AZ91HP. W przypadku obróbki szczotkami z drutu stalowego nie odnotowano podwyższonej ilości żelaza w składzie analizowanym na powierzchni.

W tabelach 6.3 i 6.4 przedstawiono analizę dla powierzchni stopów aluminium poddanych obróbce szczotkowaniem. Dla wszystkich badanych materiałów odnotowano znaczne ilości tlenu obecnego na powierzchni. Jest to wynikiem pokrywania się powierzchni cienką warstwą tlenków.

Na podstawie przeprowadzonej analizy nie można stwierdzić obecności materiału włókien szczotki na powierzchni szczotkowanych elementów. Jest to istotne z punktu widzenia stabilności procesów elektrochemicznych np. podczas nanoszenia powłok ochronnych lub dekoracyjnych metodą anodowania aluminium.

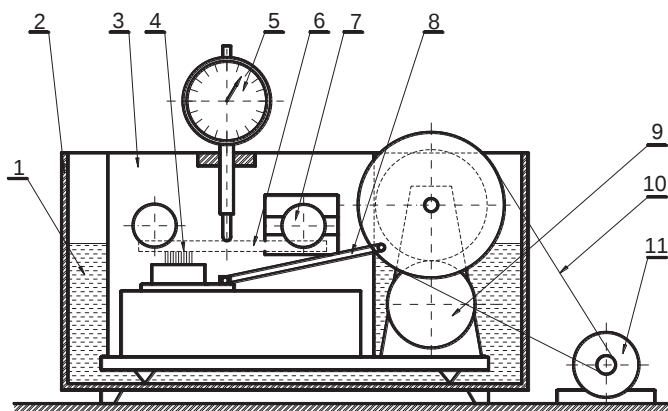
7. BADANIA NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH PO OBRÓBCE SZCZOTKOWANIEM

Naprężenia własne są ważnym parametrem stanu warstwy wierzchniej, ponieważ wywierają istotny wpływ na właściwości eksploatacyjne wyrobów. Warstwa wierzchnia jest najbardziej odpowiedzialną częścią objętości danego elementu, która bezpośrednio współpracuje z innym elementem oraz jest poddana działaniu różnorodnych czynników zewnętrznych. Jak najlepsze właściwości warstwy wierzchniej są pożądane z uwagi na ich wpływ na trwałość całego elementu. Naprężenia w warstwie wierzchniej równoważone są wewnątrz materiału, gdy nie działają już na niego siły zewnętrzne [83, 114].

7.1. Metodyka badań naprężeń własnych

Do badań wykorzystano próbki ze stopów aluminium i magnezu o wymiarach 100 x 15 x 4 mm. Przed procesem szczotkowania próbki zostały poddane procesowi wyżarzania odpężającego. Stop magnezu AZ31 wyżarzano w temperaturze 200°C, natomiast stop AZ91HP oraz stopy aluminium 7075-T651 i AlSi10Mg w temperaturze 250°C w czasie czterech godzin dla wszystkich materiałów z powolnym chłodzeniem wraz z piecem. Następnie jedna z powierzchni próbek została poddana obróbce szczotkowaniem w celu wprowadzenia naprężeń własnych. Proces szczotkowania został przeprowadzony przy stałych parametrach technologicznych szczotkowania: $v_c = 1266$ m/min, $v_f = 370$ mm/min. Czynniki zmiennymi był rodzaj szczotki oraz medium.

Naprężenia własne obliczano poprzez pomiar wielkości odkształcenia próbki wywołanego zdejmowaniem kolejnych warstw materiału, w których to warstwach zalegają naprężenia. Pomiary naprężeń własnych zostały przeprowadzone na stanowisku pomiarowym do trawienia chemicznego z mechanicznym usuwaniem produktów trawienia. Stopy aluminium trawione były w 8% wodnym roztworze kwasu fluorowodorowego, natomiast stopy magnezu w 5% roztworze kwasu octowego. Schemat tego stanowiska przedstawiony jest na rysunku 7.1. Przyrząd pomiarowy 3 umieszcza się w wannie 2 wypełnionej roztworem trawiącym 1. Płaska próbka 6 mocowana jest w dwóch uchwytach: stałym i przesuwным 7. Zastosowanie uchwytu przesuwного zapewnia swobodne odkształcanie się próbki w trakcie usuwania naprężonych warstw. Szczotka 4, poruszająca się ruchem posuwisto-zwrotnym, zapewnia ciągłe usuwanie produktów trawienia. Ruch szczotki zapewnia mechanizm korbowy 8, który połączony jest z przekładnią zębatą 9 napędzaną paskiem 10, za pomocą silnika 11. Odkształceniu próbki odpowiada wskazanie czujnika 5, którego końcówka pomiarowa styka się z powierzchnią trawionej próbki.



Rys. 7.1. Schemat stanowiska do trawienia próbek płaskich

Wartości naprężeń własnych wyznaczono na podstawie wzoru Dawidenkova [10]:

$$\sigma_a = \frac{4 \cdot E}{3 \cdot L_o^2} \left[(h - a)^2 \cdot \frac{df}{da} - 4 \cdot (h - a) \cdot f(a) + 2 \cdot \int_0^a f(\xi) d\xi \right] \quad (7.1)$$

gdzie:

L_o – odległość między podporami [mm],

h – grubość badanej próbki [mm],

a – grubość zdjętej warstwy [mm],

E – moduł Younga [MPa],

$f(a)$ – strzałka ugięcia próbki [mm],

$\frac{df}{da}$ – pochodna krzywizny względem grubości próbki.

Grubość usuniętej warstwy „ a ” określa się wzorem:

$$a = \frac{m - m_1}{L \cdot b \cdot \gamma}, \quad (7.2)$$

gdzie:

m – masa próbki przed trawieniem (g),

m_1 – masa próbki po trawieniu (g),

L – długość próbki (mm),

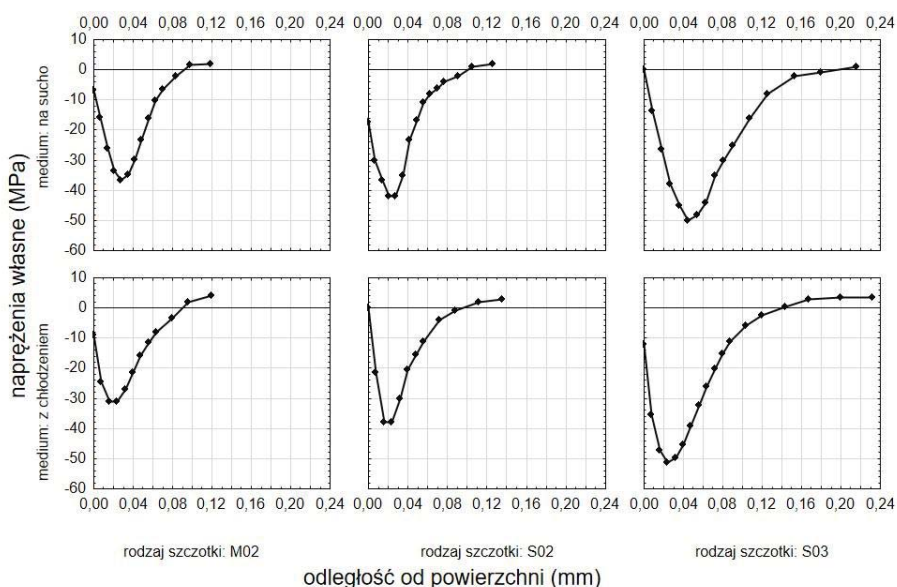
b – szerokość próbki (mm),

γ – masa właściwa badanego materiału (g/mm^3).

Znak minus przy wyliczonych naprężeniach oznacza, że w próbce zalegały naprężenia ściskające, natomiast znak plus świadczy o występowaniu naprężeń rozciągających.

7.2. Badania wpływu rodzaju szczotki oraz medium obróbkowego na naprężenia własne

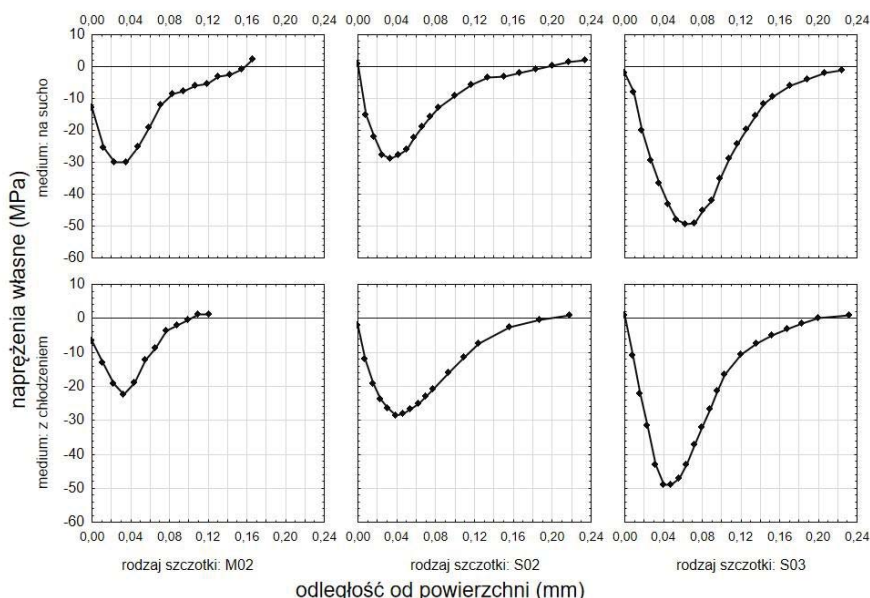
Na rysunkach 7.2÷7.5 przedstawiono rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni. Dla wszystkich badanych materiałów uzyskano ujemne wartości naprężeń świadczące o istnieniu ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Rozkład naprężeń własnych dla wszystkich prób był podobny, maksymalne wartości naprężeń ściskających znajdują się w pewnej, niewielkiej odległości od powierzchni. Kształt krzywych rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek poddanych procesowi szczotkowania jest zbliżony do rozkładów naprężeń, jaki otrzymuje się dla typowych operacji nagniatania, szeroko opisywanych w pracach [58, 82, 83, 115]. Potwierdza to przypuszczenia, że uderzające włókna szczotki w obrabianą powierzchnię wykonują pracę nagniatania, wprowadzając korzystne naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej. Na rysunku 7.2 przedstawiono rozkład naprężeń własnych po szczotkowaniu stopu magnezu AZ31. Zaobserwowano, że maksymalne naprężenia ściskające (wartość bezwzględna) znajdują się w odległości $0,03 \div 0,04$ mm od powierzchni.



Rys. 7.2. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu stopu magnezu AZ31

Największe naprężenia pojawiły się po obróbce szczotką S03, której włókna charakteryzują się największą sztywnością spośród badanych szczotek. Ponadto, dla szczotki S03 głębokość zalegania naprężeń ściskających jest wyraźnie większa, w porównaniu ze szczotkami M02 oraz S02 i sięga do głębokości ok. 0,16 mm.

Na rysunku 7.3 przedstawiono wykres naprężeń dla stopu AZ91HP. Dla szczotek M02 oraz S02 nie zaobserwowano znaczących różnic wartości maksymalnych naprężeń ściskających.

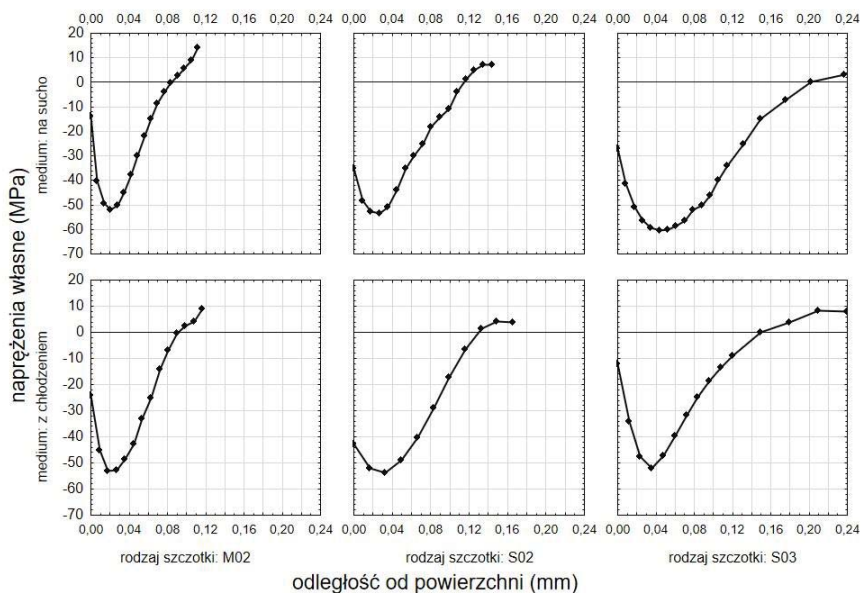


Rys. 7.3. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu stopu magnezu AZ91HP

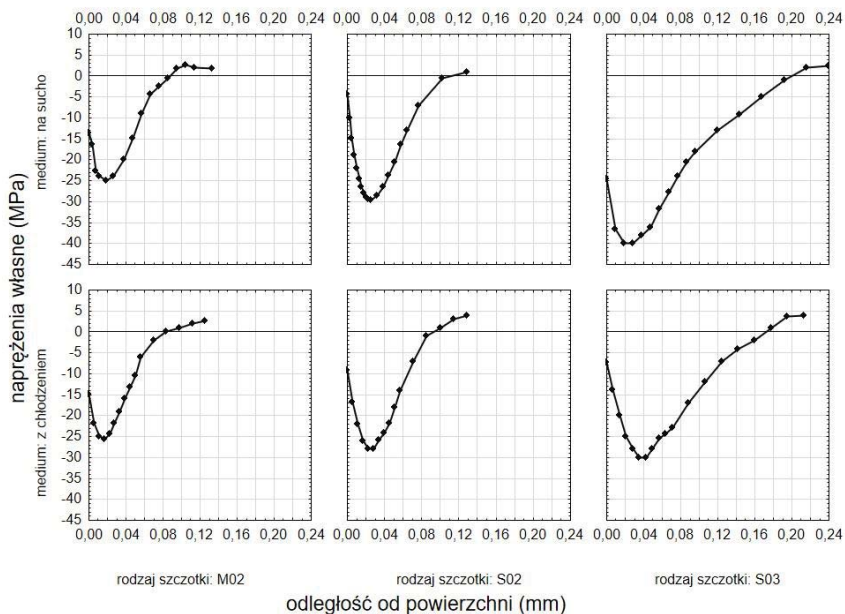
W przypadku szczotkowania stopu aluminium 7075-T651 odnotowano największy, spośród badanych materiałów, poziom maksymalnych naprężeń ściskających dla wszystkich szczotek – na poziomie (50÷60) MPa (rys. 7.4).

Najmniejsze naprężenia własne pojawiły się po szczotkowaniu stopu aluminium AlSi10Mg (rys. 7.5), na poziomie (25÷30) MPa dla szczotek M02 oraz S02 oraz (30÷40) MPa dla szczotki S03.

Podsumowując wpływ rodzaju szczotki na naprężenia własne można stwierdzić, że wzrost sztywności poszczególnych włókien narzędzia wpływa na zwiększenie głębokości zalegania ściskających naprężeń własnych oraz (choć w mniejszym stopniu) na zwiększenie maksymalnych naprężeń ściskających.



Rys. 7.4. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu stopu aluminium 7075 T651 [61]



Rys. 7.5. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu stopu aluminium AlSi10Mg

Stosowanie cieczy chłodzącej nie wpływa znacząco na zmiany charakteru i wartości naprężeń ściskających. Dlatego też, można stwierdzić, że podwyższona temperatura, która pojawia się w procesie szczotkowania na sucho nie wpływa na zmiany tych naprężeń.

Badania naprężeń własnych przeprowadzono przy stałych parametrach technologicznych szczotkowania. Ponieważ charakter oddziaływania włókien na obrabianą powierzchnię nie zmienia się, wnioskować można, że dla innych zestawów parametrów technologicznych szczotkowania, także spodziewać się można występowania naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej. Różnice mogą dotyczyć wartości naprężeń i głębokości zalegania.

Jedną z kluczowych właściwości użytkowych jest wytrzymałość zmęczeniowa. Wpływ ściskających naprężeń własnych na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej przekłada się w sposób zbliżony do liniowego [82]. Ma to bardzo istotne znaczenie w konstrukcjach poddawanych ciągłym obciążeniom zmiennym w procesie eksploatacji.

8. USUWANIE ZADZIORÓW – ZALECENIA DLA PRZEMYSŁU

W badaniach analizowano skuteczność obróbki szczotkowaniem w procesie usuwania zadziorów. Ponadto analizowano właściwości warstwy wierzchniej po obróbce szczotkowaniem. Przyjęto, że pozytywny efekt obróbki szczotkowaniem występuje wtedy, gdy jednocześnie spełnione są następujące warunki:

- 1) usunięcie zadziorów,
- 2) zmniejszenie lub utrzymanie chropowatości na poziomie obróbki wyjściowej,
- 3) brak wpływu lub utwardzenie warstwy wierzchniej,
- 4) brak wpływu lub wprowadzenie naprężeń ściskających.



Rys. 8.1. Czynniki wpływające na pozytywną ocenę procesu szczotkowania

Podejście to schematycznie zaprezentowano na rysunku 8.1. Natomiast przyjęto, że negatywny efekt obróbki szczotkowaniem występuje wtedy, gdy którykolwiek z poniższych, negatywnych czynników zostanie spełniony:

- 1) brak skutecznego usunięcia zadziorów na całej długości krawędzi przedmiotu,

- 2) zwiększenie wartości chropowatości powierzchni,
 - 3) zmniejszenie mikrotwardości warstwy wierzchniej (osłabienie materiału),
 - 4) wprowadzenie naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej.
- Podejście to schematycznie zaprezentowano na rysunku 8.2.



Rys. 8.2. Czynniki wpływające na negatywną ocenę procesu szczotkowania

8.1. Usuwanie zadziorów po frezowaniu kształtującym

W tabelach 8.1÷8.4 przedstawiono charakterystykę procesu szczotkowania w przypadku, gdy obróbką poprzedzającą proces szczotkowania było frezowanie kształtujące. Analizę tabelaryczną wykonano dla wszystkich czynników wejściowych zastosowanych w badaniach. W celu pełnej identyfikacji negatywnych efektów obróbki szczotkowaniem, wprowadzono przy symbolu indeks określający, który czynnik lub czynniki wpłynęły na negatywną ocenę procesu. Tabela 8.1 przedstawia charakterystykę procesu obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ31. W przypadku obróbki narzędziem M02 na sucho prędkość obwodowa $v_c = 422$ m/min jest zbyt mała, aby skutecznie usunąć zadziory (symbol x_1).

Narzędzie w mniejszym stopniu oddziałuje także w przypadku dużych wartości prędkości posuwu v_f , co także negatywnie wpływa na skuteczność usuwania zadziorów dla szczotki M02. W przypadku narzędzi S02 i S03 pozytywny efekt, dla którego spełnione są wszystkie kryteria, ma miejsce w przypadku obróbki z dużymi prędkościami posuwowymi v_f , co jest bardzo korzystne z uwagi na wydajność procesu. Istotne jest, aby czas przejazdu narzędzia wzdłuż krawędzi przedmiotu z zadziorem był jak najkrótszy. Pozytywny efekt dla narzędzi S02 oraz S03 występuje zarówno przy obróbce na sucho jak i z chłodzeniem.

Tabela 8.1. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ31 (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

W przypadku stopu magnezu AZ91HP (tabela 8.2) pozytywny efekt występuje dla znacznie większej palety parametrów obróbki szczotkowaniem, porównując ze stopem AZ31.

Tabela 8.2. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ91HP (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

Z punktu widzenia skuteczności obróbki szczotkowaniem i jej wpływu na właściwości fizyczne oraz stereometryczne warstwy wierzchniej najlepiej wypada stop aluminium 7075 T651, dla którego dla wszystkich narzędzi oraz parametrów technologicznych szczotkowania odnotowano skuteczne usunięcie zadziorów (tabela 8.3). Kryterium utrzymania wartości chropowatości na poziomie obróbki poprzedzającej nie została spełniona jedynie dla szczotki M02 podczas obróbki z prędkościami $v_c = 422$ i 844 m/min oraz przy prędkości posuwu $v_f = 3700$ mm/min przy obróbce na sucho.

Podczas obróbki szczotkowaniem stopu aluminium AlSi10Mg (tabela 8.4) znaczący wpływ na efekty obróbki ma medium obróbkowe. Miękka osnowa stopu aluminium w połączeniu z podwyższoną temperaturą powoduje silne odkształcenia plastyczne w obrębie krawędzi i zwiększenie parametrów chropowatości powierzchni. Zastosowanie cieczy spowodowało, że wszystkie kryteria opisujące pozytywny efekt obróbki szczotkowaniem zostały spełnione w całej gamie parametrów obróbki dla wszystkich zastosowanych szczotek.

Tabela 8.3. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu aluminium 7075-T651 (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

Tabela 8.4. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu aluminium AlSi10Mg (obróbka poprzedzająca – frezowanie kształtujące)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

8.2. Usuwanie zadziorów po frezowaniu wykończeniowym

Tabele 8.5÷8.8 zawierają charakterystykę procesu szczotkowania w przypadku, gdy obróbką poprzedzającą proces szczotkowania było frezowanie wykończeniowe. Chropowatość wyjściowa po frezowaniu wykończeniowym mieściła się w przedziale $Ra = 1,6 \div 1,9 \mu m$. Efekty obróbki szczotkowaniem w istotnym stopniu uzależnione są od chropowatości wyjściowej. Jest to szczególnie istotne, gdy priorytetem oprócz usunięcia zadziorów jest utrzymanie chropowatości na poziomie obróbki poprzedzającej. W tabeli 8.5 przedstawiono charakterystykę procesu obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ31 w przypadku, gdy obróbką poprzedzającą było frezowanie wykończeniowe. Zastosowanie cieczy obróbkowej w istotnym stopniu wpłynęło na pozytywny efekt szczotkowania narzędziem M02. Podobną tendencję zaobserwowano dla drugiego stopu magnezu AZ91HP (tabela 8.6). W przypadku obróbki szczotkowaniem stopów aluminium także zaobserwowano korzystny wpływ zastosowania cieczy obróbkowej (tabela 8.7 i 8.8).

Tabela 8.5. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ31 (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

Tabela 8.6. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu magnezu AZ91HP (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

Tabela 8.7. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu aluminium 7075-T651 (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho								
S02									
S03									
M02	chłodzenie								
S02									
S03									

W przypadku stopu AlSi10Mg stalowe włókna szczotki o średnicy 0,3 mm okazały się zbyt sztywne i nastąpiła silna degradacja struktury powierzchni, co negatywnie wpłynęło na ocenę procesu szczotkowania. Jedynie w zakresie małych prędkości obwodowych w przypadku obróbki z chłodzeniem zaobserwowano pozytywny efekt obróbki szczotkowaniem stopu AlSi10Mg.

Tabela 8.8. Charakterystyka procesu obróbki szczotkowaniem stopu aluminium AlSi10Mg (obróbka poprzedzająca – frezowanie wykończeniowe)

Rodzaj szczotki	Medium	Parametry obróbki							
		v_c (m/min)				v_c (m/min)			
		422	844	1266	1689	1266			
		v_f (mm/min)				v_f (mm/min)			
		370				140	370	1000	3700
M02	na sucho	✓	✓	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂
S02		✗ _{1,2}	✗ ₁	✗ _{1,2}	✗ ₁	✗ ₁	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}
S03		✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}	✗ _{1,2}
M02	chłodzenie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S02		✓	✓	✓	✗ ₂	✓	✓	✓	✓
S03		✓	✓	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂	✗ ₂

W przypadku obróbki szczotkowaniem w większości przypadków zaobserwowano korzystny wpływ cieczy obróbkowej na jakość powierzchni po obróbce szczotkowaniem, dlatego też zaleca się stosowanie obróbki z chłodzeniem w procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej monografii przedstawiono analizę procesu usuwania zadziórów po frezowaniu wybranych stopów aluminium i magnezu. Spośród wielu metod usuwania zadziórów wybrano metodę szczotkowania. W rozdziale 1 scharakteryzowano obecnie stosowane metody usuwania zadziórów stosowane w przemyśle. Badania realizowane były w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”. Na krawędziach obrabianych przedmiotów powstają zadziory, które wymagają usunięcia. Obecnie stosowana jest obróbka ręczno-maszynowa przy wykorzystaniu szybkoobrotowych narzędzi. Biorąc pod uwagę czas obróbki frezowaniem wielkogabarytowych części, który sięga w niektórych przypadkach kilkudziesięciu godzin, uszkodzenie wyrobu w procesie usuwania zadziórów wiąże się z poniesieniem dużych kosztów, a decydować może o tym doświadczenie pracownika, aktualna kondycja psychofizyczna, stopień koncentracji itp. Zastosowanie typowych metod usuwania zadziórów w wielu przypadkach jest nieekonomiczne, szkodliwe dla środowiska bądź niemożliwe do zastosowania. Wykorzystanie zautomatyzowanej obróbki szczotkowaniem do usuwania zadziórów poprzez aplikację szczotki na obrabiarkach sterowanych numerycznie stanowić może wiele potencjalnych korzyści, jednak istotna jest wiedza dotycząca skuteczności tej obróbki oraz jej wpływu na stan warstwy wierzchniej.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz badania eksperymentalne dają podstawę do określenia rezultatów końcowych, które zostały ujęte w dwóch grupach, jako rezultaty poznawcze oraz rezultaty praktyczne.

Rezultaty poznawcze:

1. Poprzez odpowiedni dobór warunków technologicznych obróbki szczotkowaniem możliwe jest skuteczne usuwanie zadziórów powstających podczas frezowania czołowego stopów aluminium i magnezu. Przeprowadzony eksperyment przy określonych wartościach parametrów technologicznych szczotkowania potwierdza skuteczność i efektywność wybranej metody usuwania zadziórów.
2. Możliwe jest określenie takich warunków obróbki szczotkowaniem stopów aluminium i magnezu, aby po tej obróbce nie następowało pogorszenie ukształtowanego w procesie frezowania czołowego stanu warstwy wierzchniej tych stopów.
3. Przyjęte do badań gatunki stopów aluminium i magnezu różniły się składem chemicznym i właściwościami fizycznymi, co wpłynęło na różne efekty procesu usuwania zadziórów metodą szczotkowania. Oznacza to brak możliwości stosowania tych samych parametrów oraz narzędzi do obróbki szczotkowaniem.

4. W przypadku obróbki na sucho stopów magnezu ze stałą prędkością posuwu v_f szczotką z drutu mosiężnego M02 zadziory nie zostały usunięte przy prędkości obwodowej $v_c = 422$ m/min dla stopu AZ31 oraz przy prędkości $v_c = (422, 844, 1266)$ m/min dla stopu AZ91HP.
5. W przypadku obróbki na sucho stopów magnezu ze stałą prędkością skrawania v_c szczotką z drutu mosiężnego M02 zadziory nie zostały usunięte przy prędkości posuwu $v_f = 3700$ mm/min dla stopu AZ31 oraz przy prędkości $v_f = (370, 1000, 3700)$ mm/min dla stopu AZ91HP.
6. Zbyt "duże" parametry szczotkowania w przypadku miękkich stopów (Al-Si10Mg) skutkują silnymi odkształceniami plastycznymi prowadzącymi do sfazowania krawędzi wraz z zadziorami w postaci wypływek.
7. W większości przypadków uzyskiwano zaokrąglenie krawędzi jako typowy stan po obróbce szczotkowaniem.
8. Stopy magnezu wykazują większe tendencje do powstawania bruzd po obróbce szczotkowaniem niż stopy aluminium.
9. Dla wszystkich badanych materiałów zastosowanie cieczy obróbkowej prowadzi do uzyskania mniejszych wartości parametrów chropowatości w porównaniu z obróbką na sucho.
10. Na podstawie przeprowadzonej analizy składu chemicznego na powierzchni po obróbce szczotkowaniem można przypuszczać, że materiał włókien szczotki nie przedostaje się na powierzchnię obrobioną, jednak należy mieć na uwadze, że duża obecność tlenu (spowodowana występowaniem warstwy tlenków) uniemożliwiła precyzyjne wychwycenie obecności na powierzchni szczotkowanej pierwiastków wchodzących w skład włókien poszczególnych szczotek.
11. Po obróbce szczotkowaniem w warstwie wierzchniej generowane są korzystne naprężenia własne ściskające, których wartość maksymalna (bezwzględna) zawiera się w przedziale od 25 MPa do 60 MPa.
12. Dla najbardziej sztywnego narzędzia (szczotki S03) głębokość zalegania naprężeń ściskających jest wyraźnie większa, w porównaniu ze szczotkami M02 i S02, sięgająca 0,2 mm głębokości od powierzchni.
13. Z przeprowadzonych badań wynika, że w aspekcie pozytywnej oceny procesu szczotkowania, którego charakterystyka została przedstawiona w rozdziale 8, najtrudniejszym elementem, w przypadku obróbki szczotkowaniem, jest utrzymanie jakości powierzchni na poziomie obróbki poprzedzającej proces szczotkowania.

Rezultaty praktyczne:

1. Przeprowadzone badania eksperymentalne mogą stanowić wytyczne doboru parametrów technologicznych szczotkowania oraz narzędzi w procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania na centrach obróbkowych.
2. W zdecydowanej większości przypadków krawędzie przedmiotów wykonanych ze stopów aluminium i magnezu wymagają obróbki polegającej na

- zmianie stanu krawędzi (usunięcie zadziorów, zaokrąglenie, sfazowanie lub stępienie).
3. Możliwe jest skuteczne usuwanie zadziorów metodą szczotkowania.
 4. Celowe jest, aby ostatnim zabiegiem (bez demontażu przedmiotu ze strefy obróbki) w procesie frezowania na centrach obróbkowych była obróbka polegająca na usunięciu zadziorów. Szczególnie istotne jest to w przypadku wielkogabarytowych elementów stosowanych w przemyśle lotniczym, dla których inne metody usuwania zadziorów są nieekonomiczne lub technicznie nie jest możliwe ich zastosowanie.
 5. Zautomatyzowanie procesu usuwania zadziorów, za pomocą szczotki, może przyczynić się do skrócenia czasu obróbki krawędzi przedmiotów wytwarzanych poprzez obróbkę skrawaniem.
 6. Spośród palety parametrów i narzędzi dla danego materiału, (przy których uzyskiwany jest pozytywny efekt obróbki szczotkowaniem) zaleca się stosowanie dużych prędkości ruchu posuwowego szczotki wzdłuż krawędzi z zadziorem, celem skrócenia operacji usuwania zadziorów.
 7. Ciecz chłodząca w istotnym stopniu wpływa na chropowatość powierzchni po obróbce szczotkowaniem.
 8. Istnieje możliwość wpływania na stan warstwy wierzchniej poprzez obróbkę szczotkowaniem.
 9. Chropowatość po obróbce szczotkowaniem silnie uzależniona jest od ukształtowanego stereometrycznego stanu powierzchni po obróbce poprzedzającej proces szczotkowania.
 10. Obróbka szczotkowaniem może być skutecznym sposobem na utwardzenie stref przykrawędziowych, co stanowi niejako dodatkowe zabezpieczenie przed uszkodzeniem wyrobów w trakcie montażu i eksploatacji.
 11. Zaleca się stosowanie cieczy obróbkowej w przypadku, gdy istotne jest uzyskanie małych wartości parametrów chropowatości powierzchni.
 12. Nie zaleca się stosowania dużych kątów wyjścia podczas frezowania ($\Phi > 120^\circ$) z racji formowania się zadziorów o znacznych rozmiarach.
 13. Nie zaleca się stosowania prędkości obrotowych zbliżonych do maksymalnych dopuszczalnych przez producenta szczotki z uwagi na trwałość narzędzi. Szczotki zbudowane są z dwóch oddzielnych pierścieni, na których rozmieszczone są włókna. Pierścienie ściśnięte są poprzez dwa talerze dociskowe. Duże siły odśrodkowe, działające przy wysokich prędkościach obrotowych, mogą powodować promieniowe przesunięcie się względem siebie pierścieni.
 14. Przeprowadzone badania, których wyniki przedstawione w przejrzystej tabelarycznej formie w rozdziale 8, pozwolą w szybki sposób wytypować pożądane parametry i narzędzia do skutecznego usuwania zadziorów powstałych po obróbce frezowaniem stopów aluminium i magnezu.

Literatura

1. Adamski W.: *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*. "Mechanik". R. 82, nr 5–6, 2009 s. 540–546.
2. Aurich J.C., Dornfeld D., Arrazola P.J., Franke V., Leitz L., Min S.: *Burrs-Analysis, control and removal*. "CIRP Annals – Manufacturing Technology". 58, 2, 2009 s. 519–542.
3. Baghbanan M.R., Yabuki A., Timsit R.S., Spelt J.K.: *Tribological behavior of aluminum alloys in a vibratory finishing process*. "Wear". 255, 7–12, 2003 s. 1369–1379.
4. Bähre D., Brünnet H., Swat M.: *Investigation of One-way Abrasive Flow Machining and In-process Measurement of Axial Forces*. "Procedia CIRP". 1, 2012 s. 419–424.
5. Balasubramaniam R., Krishnan J., Ramakrishnan N.: *An experimental study on the abrasive jet deburring of cross-drilled holes*. "Journal of Materials Processing Technology". 91, 1–3, 1999 s. 178–182.
6. Baron Y.M., Ko S.L., Park J.I.: *Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring*. "Key Engineering Materials". 291–292, 2005 s. 291–296.
7. Bhandari B., Hong Y.-S., Yoon H.-S., Moon J.-S., Pham M.-Q., Lee G.-B., Huang Y., Linke B.S., Dornfeld D.A., Ahn S.-H.: *Development of a micro-drilling burr-control chart for PCB drilling*. "Precision Engineering". 38, 1, 2014 s. 221–229.
8. Bielecki S., Goliński J., Grzelakowska-Sztabert B., Jurkowski B., Kubus A., Majchrowski M., Zimny L.: *Leksykon naukowo-techniczny*. WNT, Warszawa 2001.
9. Biermann, D., Hartmann, H.: *Reduction of Burr Formation in Drilling Using Cryogenic Process Cooling*. "Procedia CIRP". 3, 2012 s. 85–90.
10. Birger I.A.: *Ostatočnye naprianijenija*. Mańgiz. Moskwa, 1963.
11. Cariapa V., Stango R.J., Chen L., Hermann R.: *Aspects of Process Model for Automatic Control of Edge-Deburring with Filamentary Brush*. "J. Eng. Ind.". 114, 3, 1992 s. 294–300.
12. Chen L., Stango R.J., Cariapa V.: *A Force-Control Model for Edge-Deburring with Filamentary Brush*. "J. Manuf. Sci. Eng.". 123, 3, 1999 s. 528–532.
13. Chern G.-L.: *Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 46, 12–13, 2006 s. 1517–1525.
14. Chern G.-L.: *Study on mechanisms of burr formation and edge breakout near the exit of orthogonal cutting*. "Journal of Materials Processing Technology". 176, 1–3, 2006 s. 152–157.
15. Chern G.-L., Wu Y.-J.E., Cheng J.-C., Yao J.-C.: *Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM*. "Precision Engineering". 31, 2, 2007 s. 122–129.
16. Cho C.-H., Kim K.-H.: *Design of a deburring tool for intersecting holes in aluminum alloys*. "Journal of Materials Processing Technology". 212, 5, 2012 s. 1132–1138.
17. Choi I.-H., Kim J.-D.: *A study of the characteristics of the electrochemical deburring of a governor-shaft cross hole*. "Journal of Materials Processing Technology". 75, 1–3, 1998 s. 198–203.

18. Chu C.-H., Dornfeld D.: *Geometric Approaches for Reducing Burr Formation in Planar Milling by Avoiding Tool Exits*. "Journal of Manufacturing Processes". 7, 2, 2005 s. 182–195.
19. Chu C.-H., Dornfeld D.: *Tool Path Planning for Avoiding Exit Burrs*. "Journal of Manufacturing Processes". 2, 2, 2000 s. 116–123.
20. Ciampini, D. Papini M., Spelt J.K.: *Characterization of vibratory finishing using the Almen system*. "Wear". 264, 7–8, 2008 s. 671–678.
21. Ciampini D., Papini M., Spelt J.K.: *Modeling the development of Almen strip curvature in vibratory finishing*. "Journal of Materials Processing Technology". 209, 6, 2009 s. 2923–2939.
22. Cichosz P., Kuzinovski M.: *Metody wykonywania fazek i gratowania krawędzi*. Cz. 1. "Mechanik". 84, 2011 s. 553–554.
23. Cichosz P., Kuzinovski M.: *Metody wykonywania fazek i gratowania krawędzi*. Cz. 2. "Mechanik". 84, 2011 s. 674–681.
24. Cichosz P., Kuzinovski M., Szymański, W.: *Możliwości kształtowania fazek i gratowania krawędzi narzędziami z ostrzami sprężystymi*. , pod red. Bogdana Kruszyńskiego,. [W:] "W: Obróbka skrawaniem – współczesne problemy". [Red.] B. Kruszyńskiego. p. 75–83. Agencja MAGMA, Łódź 2010.
25. Dąbrowski L., Keller R., Tomczak J.: *Przykłady innowacyjnego wykorzystania precyzyjnych obrabiarek ECM*. "Inżynieria Maszyn". R. 16, z. 4, 2011 s. 129–138.
26. Dąbrowski L., Marciniak M.: *Trendy rozwojowe obróbki przetłoczno-ścierniej cz. 1*. <http://www.designnews.pl/menu-gorne/artukul/article/trendy-rozwojowe-obrobki-przetloczno-sciernej-cz-i/>. , 2007.
27. Dąbrowski L., Marciniak M.: *Trendy rozwojowe obróbki przetłoczno-ścierniej cz. 2*. <http://www.designnews.pl/menu-gorne/artukul/article/trendy-rozwojowe-obrobki-przetloczno-sciernej-cz-ii/>. , 2007.
28. Dąbrowski L., Marciniak M., Wieczorek W., Zygmunt A.: *Advancement of abrasive flow machining using an anodic solution*. "Journal of New Materials for Electrochemical Systems". 9, 2006 s. 439–445.
29. Egashira K., Nomura Y., Murozaki Y., Fukui J.: *Edge finishing and deburring of back surfaces of microholes using micro-cutting tools*. "Precision Engineering". 37, 2, 2013 s. 248–254.
30. Fang L., Zhao J., Sun K., Zheng D., Ma D.: *Temperature as sensitive monitor for efficiency of work in abrasive flow machining*. "Wear". 266, 7–8, 2009 s. 678–687.
31. Fredj N.B., Nasr M.B., Rhouma A.B., Sidhom H., Braham C.: *Fatigue life improvements of the AISI 304 stainless steel ground surfaces by wire brushing*. "J. of Materi Eng and Perform. ". 13, 5, 2004 s. 564–574.
32. Gillespie L.K., Blotter P.T.: *The Formation and Properties of Machining Burrs*. "J. Eng. Ind. ". 98, 1, 1976 s. 66–74.
33. Gillström P., Jarl M.: *Mechanical descaling of wire rod using reverse bending and brushing*. "Journal of Materials Processing Technology". 172, 3, 2006 s. 332–340.
34. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K.: *Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 44, 2–3, 2004 s. 201–211.
35. Halladay J.: *Practical Applications of Thermal Deburring and Electro-chemical Deburring*. "Society of Manufacturing Engineers". 1985.

36. Hashimoto F., DeBra D.B.: *Modelling and Optimization of Vibratory Finishing Process*. "CIRP Annals – Manufacturing Technology". 45, 1, 1996 s. 303–306.
37. Hashimura M., Chang Y.P., Dornfeld D.: *Analysis of Burr Formation Mechanism in Orthogonal Cutting*. "J. Manuf. Sci. Eng. ". 121, 1, 1999 s. 1–7.
38. Hashimura M., Hassamontr J., Dornfeld D.A.: *Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation*. "J. Manuf. Sci. Eng.". 121, 1, 1999 s. 13–19.
39. Hashimura M., Ueda K., Dornfeld D., Manabe K.: *Analysis of Three-Dimensional Burr Formation in Oblique Cutting*. "CIRP Annals – Manufacturing Technology". 44, 1, 1995 s. 27–30.
40. Hassamontr J., Blondaz L., Dornfeld D.A.: *Avoiding Exit Burr in CNC End Milling by an Adapted Tool Path*. "ASME Manufacturing Engineering Division". 1998 s. 497–510.
41. Heinrich S.M., Stango R.J., Shia C.Y.: *Effect of Workpart Curvature on the Stiffness Properties of Circular Filamentary Brushes*. "J. Eng. Ind. ". 113, 3, 1991 s. 276–282.
42. Jang K.-I., Kim D.-Y., Maeng S., Lee W., Han J., Seok J., Je T.-J., Kang S., Min B.-K.: *Deburring microparts using a magnetorheological fluid*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 53, 1, 2012 s. 170–175.
43. Jeong Y.H., HanYoo B., Lee H.U., Min B.-K., Cho D.-W., Lee S.J.: *Deburring microfeatures using micro-EDM*. "Journal of Materials Processing Technology". 209, 14, 2009 s. 5399–5406.
44. Jiang H., Chen X., Hong L.: *Mineral-acid-free chemical polishing solutions for ferrous alloys*. "Applied Surface Science". 218, 1–4, 2003 s. 306–310.
45. Kim J., Min S., Dornfeld D.A.: *Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 41, 7, 2001 s. 923–936.
46. Kitahara H., Yada T., Hashiguchi F., Tsushida M., Ando S.: *Mg alloy sheets with a nanocrystalline surface layer fabricated by wire-brushing*. "Surface and Coatings Technology". 243, 2014 s. 28–33.
47. Kitahara H., Yada T., Tsushida M., Ando S.: *Microstructure and Evaluation of Wire-brushed Mg Sheets*. "Procedia Engineering". 10, 2011 s. 2737–2742.
48. Ko S.L., Baron Y.M., Park J.I.: *Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method*. "Journal of Materials Processing Technology". 187–188, 2007 s. 19–25.
49. Ko S.-L., Chang J.-E., Yang G.-E.: *Burr minimizing scheme in drilling*. "Journal of Materials Processing Technology". 140, 1–3, 2003 s. 237–242.
50. Ko S.-L., Lee J.-K.: *Analysis of burr formation in drilling with a new-concept drill*. "Journal of Materials Processing Technology". 113, 1–3, 2001 s. 392–398.
51. Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu : planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa , 2006.
52. Kuczmaszewski J., Zagórski I.: *Badania masy, temperatury zapłonu oraz temperatury wiórów podczas skrawania wybranych stopów magnezu*. "Mechanik". R. 85, nr 10, 2012 s. 824–828.
53. Kuczmaszewski J., Zagórski I.: *Methodological problems of temperature measurement in the cutting area during milling magnesium alloys*. "Management and Production Engineering Review". Vol. 4, No. 3, 2013 s. 26–33.

54. Kumar S., Dornfeld D.: *Basic Approach to a Prediction System for Burr Formation in Face Milling*. "Journal of Manufacturing Processes". 5, 2, 2003 s. 127–142.
55. Lee K., Dornfeld D.A.: *Micro-burr formation and minimization through process control*. "Precision Engineering". 29, 2, 2005 s. 246–252.
56. Lee K.U., Ko S.L.: *Development of deburring tool for burrs at intersecting holes*. "Journal of Materials Processing Technology". 201, 1–3, 2008 s. 454–459.
57. Lin T.-R.: *Experimental study of burr formation and tool chipping in the face milling of stainless steel*. "Journal of Materials Processing Technology". 108, 1, 2000 s. 12–20.
58. Lipski J., Zaleski K.: *Modelowanie rozkładu naprężeń własnych w przedmiotach obrabianych nagniatającym przepychaniem ślizgowym*. "Eksploatacja i Niezawodność". nr 4, 2004 s. 18–21.
59. Mahdy A.M.: *Economic drilling conditions for a given deburring radius*. "Journal of Materials Processing Technology". 110, 2, 2001 s. 197–205.
60. Matuszak J., Zaleski K.: *Effect of milling parameters upon burr formation during AZ91 HP Magnesium Alloy Face Milling*. [W:] "New materials and it technologies in production engineering". [Red:] Lipski J., Świąć A., 2011 s.31–42.
61. Matuszak J., Zaleski K.: *Analysis of Deburring Effectiveness and Surface Layer Properties around Edges of Workpieces Made of 7075 Aluminium Alloy*. "Aircraft Eng & Aerospace Tech". 2017 in press.
62. Matuszak J., Zaleski K.: *Badania stanu krawędzi przedmiotów ze stopów aluminium po procesie usuwania zadziorów*. "Mechanik". R. 85, nr 8-9CD (SOS), 2012 s. 191–198.
63. Matuszak J., Zaleski K.: *Badania właściwości warstwy wierzchniej stopu aluminium po obróbce szczotkowaniem*. [W:] "Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie". Ed. Przybylski W. 3, 2011 s. 307–318.
64. Matuszak J., Zaleski K.: *Edge states after wire brushing of magnesium alloys*. "Aircraft Eng & Aerospace Tech.". 86, 4, 2014 s. 328–335.
65. Matuszak J., Zaleski K.: *Effect of brushing parameters upon edge states after wire brushing of AZ91 HP magnesium alloy*. "Advances in Science and Technology Research Journal". Vol. 7, nr 20, 2013 s. 55–60.
66. Matuszak J., Zaleski K.: *Wpływ parametrów technologicznych szczotkowania stali S235JR na chropowatość powierzchni obrobionej oraz masę usuniętego materiału*, W: "Zastosowania informatyki w inżynierii produkcji". A. Świąć [Red.]. 3, 2009 s. 69–81.
67. Matuszak J., Zaleski K.: *Analiza mikrotwardości stopu magnezu w obrębie krawędzi kształtowanych szczotkowaniem*. "Mechanik". 8–9, 2013 s. 241–248.
68. Matuszak J., Zaleski K.: *Effect of cutting fluids upon surface quality after wire brushing of 7075 aluminum alloys*. [W:] "Innovative manufacturing technology = Innowacyjne Technologie Wytwarzania". [Red.] Rusek P., 2. s. 203–214 Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków (2012).
69. Matuszak J., Zaleski K.: *Powstawanie zadziorów podczas frezowania stopów aluminium w warunkach HSC*. [W:] "Innovative Manufacturing Technology = Innowacyjne Technologie Wytwarzania". [Red:] Jaworska, L. T1. s. 73–84 Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków (2011).

70. Matuszak J., Zaleski K.: *Wpływ wymiarów warstwy skrawanej na powstawanie zadziórów podczas czołowego frezowania stopu magnezu*. In: Wit, G. (ed.) "Obróbka skrawaniem: nauka a przemysł: V Szkoła Obróbki Skrawaniem". s. 238–245 Wydawnictwo Sutoris, Wrocław/Opole (2011).
71. Min S., Kim J., Dornfeld D.A.: *Development of a drilling burr control chart for low alloy steel, AISI 4118*. "Journal of Materials Processing Technology". 113, 1–3, 2001 s. 4–9.
72. Oczóś K.E.: *Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium*. Cz. 1. "Mechanik". R. 82, nr 3, 2009 s. 153–163.
73. Oczóś K.E.: *Doskonalenie procesów obróbki ścierniej*. Cz. IV. *Gładzenie, dogładzanie i obróbka luźnym ścierniwem*. "Mechanik". R. 83, nr 11, 2010 s. 783–793.
74. Oczóś K.E.: *Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania*. "Mechanik". R. 80, nr 5-6, 2007 s. 325–448.
75. Oczóś K.E.: *Trendy rozwojowe narzędzi skrawających (część 1)*. "Mechanik". R. 77, nr 1, 2004 s. 5–13.
76. Overholser R.W., Stango R.J., Fournelle R.A.: *Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 43, 2, 2003 s. 193–202.
77. Pająk E., Wieczorowski K., Karaśkiewicz-Pająk J.: *Technika planowania doświadczeń*. NOT, Poznań, 1977.
78. Pilný L., De Chiffre L., Piška M., Villumsen M.F.: *Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets*. "CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology". 5, 2, 2012 s. 102–107.
79. Pogan J.: *Odpady po obróbce wibrościerniej*. "Recykling". nr 9, 2007 s. 24–25.
80. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa, 1984.
81. Prathap R.: *A Case Study to Setup Optimum Process Parameters in Thermal Deburring for Removing the Burr in Barrel of Fuel Injector Pump Using Taguchi Approach*. "ResearchGate". 2, 9, 2012 s. 26–35.
82. Przybylski W.: *Obróbka nagniataniem: technologia i oprzyrządowanie*. WNT, Warszawa, 1979.
83. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. WNT, Warszawa, 1987.
84. Rajmohan T., Palanikumar K., Madhavan, Harish G.: *Optimizing the Machining Parameters for Minimum Burr Height in Drilling of Hybrid Composites*. "Procedia Engineering". 38, 2012 s. 56–65.
85. Rodziejewicz M.: *Racjonalne sposoby usuwania zadziórów*. WNT, 1968.
86. Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B.: *Mathematical modeling for controlled electrochemical deburring (ECD)*. "Journal of Materials Processing Technology". 147, 2, 2004 s. 241–246.
87. Schäfer F.: *Entgraten. Theorie, Verfahren, Anlagen*. Mainz, Germany, 1975.
88. Segonds S., Masounave J., Songmene V., Bès C.: *A simple analytical model for burr type prediction in drilling of ductile materials*. "Journal of Materials Processing Technology". 213, 6, 2013 s. 971–977.
89. Sęp J.: *Wybrane właściwości warstwy wierzchniej po szczotkowaniu oczyszczająco-umacniającym*. "Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej". 1991 s. 53–63.
90. Shia C.-Y., Stango R.J.: *Analysis of a Compliant Honing Tool for Brushing Cylindrical Surfaces*. "J. Manuf. Sci. Eng.". 119, 3, 1997 s. 441–444.

91. Shia C.-Y., Stango R.J.: *On the frictional response of a filamentary brush in contact with a curved workpart*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 34, 4, 1994 s. 573–589.
92. Sieniawski J.: *Stopy aluminium stosowane w technice lotniczej*. "Mechanik". R. 82, nr 7, 2009 s. 649–654.
93. da Silva L.C., de Melo A.C.A., Machado Á.R., da Silva M.B., Júnior A.M.S.: *Application of factorial design for studying the burr behaviour during face milling of motor engine blocks*. "Journal of Materials Processing Technology". 179, 1–3, 2006 s. 154–160.
94. Skoczypiec S.: *Obróbka elektrochemiczna (ECM)*, http://www.m6.mech.pk.edu.pl/~skoczyp/UB/UB_03_ECM.pdf, 2008
95. Stango R.J.: *Filamentary brushing tools for surface finishing applications*. "Metal Finishing". 100, 2002 s. 82–91.
96. Stango R.J., Cariapa V., Prasad A., Liang S.-K.: *Measurement and Analysis of Brushing Tool Performance Characteristics, Part 1: Stiffness Response*. "J. Eng. Ind.". 113, 3, 1991 s. 283–289.
97. Stango R.J., Cariapa V., Zuzanski M.: *Contact Zone Force Profile and Machining Performance of Filamentary Brush*. "J. Manuf. Sci. Eng.". 127, 1, 2005 s. 217–226.
98. Stango R.J., Chen L., Cariapa V.: *Automated Deburring with a Filamentary Brush: Prescribed Burr Geometry*. "J. Manuf. Sci. Eng.". 121, 3, 1999 s. 385–392.
99. Stango R.J., Heinrich S.M., Shia C.Y.: *Analysis of Constrained Filament Deformation and Stiffness Properties of Brushes*. "J. Eng. Ind.". 111, 3, 1989 s. 238–243.
100. Stango R.J., Shia C.-Y.: *Analysis of Filament Deformation for a Freely Rotating Cup Brush*. "J. Manuf. Sci. Eng.". 119, 3, 1997 s. 298–306.
101. Sung-Lim K., Dornfeld D.A.: *Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting*. "Journal of Materials Processing Technology". 58, 2, 1996 s. 189–200.
102. Szafarczyk M.: *Usuwanie zadziorów przy wierceniu*. "Mechanik". R. 85, nr 5-6, 2012 s. 392–392.
103. Tang Y., He Z., Lu L., Wang H., Pan M.: *Burr formation in milling cross-connected microchannels with a thin slotting cutter*. "Precision Engineering". 35, 1, 2011 s. 108–115.
104. Ton T.P., Park H.Y., Ko S.L.: *Experimental analysis of deburring process on inclined exit surface by new deburring tool*. "CIRP Annals - Manufacturing Technology". 60, 1, 2011 s. 129–132.
105. Toropov A.A., Ko S.L., Lee J.M.: *A New Burr Formation Model for Orthogonal Cutting of Ductile Materials*. "CIRP Annals – Manufacturing Technology". 55, 1, 2006 s. 55–58.
106. Vanegas Useche L.V., Abdel Wahab M.M., Parker G.A.: *Dynamics of a freely rotating cutting brush subjected to variable speed*. "International Journal of Mechanical Sciences". 50, 4, 2008 s. 804–816.
107. Vinoo T.: *Magnetic Abrasive Finishing of Internal Surfaces*. 1997.
108. Wang S., Timsit R.S., Spelt J.K.: *Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum*. "Wear". 243, 1–2, 2000 s. 147–156.
109. Wang Y., Hu D.: *Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 45, 1, 2005 s. 43–49.

110. Wantuch E., Rajchel B., Burakowski T., Rońda J.: *Wpływ pola magnetycznego podczas polerowania magnetościernego na wybrane cechy warstwy wierzchniej przedmiotu*. "Eksplotacja i Niezawodność". nr 4, 2010 s. 61–71.
111. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: *Przewodnik po pomiarach chropowatości czyli o chropowatości i nie tylko*. Politechnika Poznańska, Poznań, 2003.
112. Yamaguchi H., Shinmura T.: *Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system: Discussion of the characteristic abrasive behavior*. "Precision Engineering". 24, 3, 2000 s. 237–244.
113. Yin S., Shinmura T.: *Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy*. "International Journal of Machine Tools and Manufacture". 44, 12–13, 2004 s. 1297–1303.
114. Zaleski K.: *Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego*. PL, Lublin, 2008.
115. Zaleski K., Matuszak J.: *Badania porównawcze obróbki krawędzi przedmiotów ze stopu aluminium 7075 i stali C45 metodą szczotkowania*. "Technologia i Automatyzacja Montażu". nr 2, 2013 s. 33–39.
116. Zaleski K., Matuszak J.: *Sposób i urządzenie do określania średnicy dynamicznej szczotek walcowych* [Zgłoszenie nr (21) 405625].
117. Zaleski K., Matuszak J.: *Szczotka czołowa do usuwania zadziorów* [Patent nr 221608].
118. Zaleski K., Matuszak J.: *Szczotka walcowa do usuwania zadziorów* [Patent nr 220495].
119. Coromant Sandvik.: *Poradnik obróbki skrawaniem*. 2010.
120. <http://electrochemicaldeburringmachines.com>, 05/30/2013.
121. <http://www.altis-szczotki.pl>, 10/15/(2013).
122. <http://www.extrudehone.com>, 05/30/(2013).
123. <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>, 12/09/2013.
124. ISO 13715:2000, *Technical drawings — Edges of undefined shape – Vocabulary and indications*.
125. PN-90/M-66011, *Obróbka plastyczna. Wyroby tłoczone. Orientacyjne wysokości zadziorów*, 1990.