

Imię i nazwisko autora rozprawy: Dawid Zieliński
Dyscyplina naukowa: Inżynieria Mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Efekty docierania jednotarczowego ceramiki Al_2O_3 narzędziem z poliamidu PA2200 wykonanym metodą selektywnego spiekania laserowego

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Effects of single-sided lapping process of Al_2O_3 ceramic with a polyamide PA2200 tool fabricated by selective laser sintering

Promotor podpis	Drugi promotor
dr hab. inż. Mariusz Deja, prof. PG	
Promotor pomocniczy	Kopromotor



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Dawid Zieliński

Ja, niżej podpisany(a), oświadczam, iż jestem świadomy(a), że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:
Efekty docierania jednotarczowego ceramiki Al_2O_3 narzędziem z poliamidu PA2200 wykonanym metodą selektywnego spiekania laserowego
do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2021.478 t.j.), a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem dr hab. inż. Mariuszem Deją, prof. PG, ~~drugim promotorem <drugi promotor>~~, ~~promotorem pomocniczym <promotor pomocniczy>~~, ~~kopromotorem <kopromotor>~~*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami, zgodnie z przepisem art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam ~~zgodę~~ ~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

*niepotrzebne usunąć

¹ Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotniać w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Dawid Zieliński

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Efekty docierania jednotarczowego ceramiki Al_2O_3 narzędziem z poliamidu PA2200 wykonanym metodą selektywnego spiekania laserowego

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Effects of single-sided lapping process of Al_2O_3 ceramic with a polyamide PA2200 tool fabricated by selective laser sintering

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Mariusz Deja, prof. PG

~~**Drugi promotor rozprawy doktorskiej*:-**~~

~~**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*:-**~~

~~**Kopromotor rozprawy doktorskiej*:-**~~

Data obrony: <dzień, miesiąc, rok>

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: wytwarzanie przyrostowe, Rapid Prototyping/Tooling, metoda selektywnego spiekania laserowego SLS, docieranie jednotarczowe, ceramika techniczna Al_2O_3 , efekty technologiczne, analiza statystyczna, modele matematyczne

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: additive manufacturing, Rapid Prototyping/Tooling, selective laser sintering method SLS, flat lapping, technical ceramic Al_2O_3 , technological effects, statistical analysis, mathematical models

Streszczenie rozprawy w języku polskim:

Przedmiot badań niniejszej rozprawy doktorskiej stanowi analiza procesu docierania jednotarczowego powierzchni płaskich z wykorzystaniem spiekanych z proszku poliamidowego metodą selektywnego spiekania laserowego prototypowych narzędzi ściernych. Tarcze docierające zbudowane zostały z niezależnych segmentów ściernych tworzących płaską powierzchnię czynną narzędzia przeznaczoną do docierania materiałów metalowych i niemetalowych, w tym ceramiki technicznej. W pracy zaprezentowano efekty technologiczne uzyskane w wyniku przeprowadzonych serii badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3 i dotyczących m.in. wielkości ubytku materiałowego, wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni, wydajności procesu obróbki, a także kształtu i wielkości zużycia narzędzi. Dokonano ponadto oceny istotności statystycznej różnic efektów technologicznych uzyskiwanych w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych. Analizowano wpływ zmiennych wielkości wejściowych wraz z oceną istotności statystycznej oddziaływania i ich interakcji na wybrane wielkości wyjściowe. Wyznaczono modele matematyczne wybranych efektów docierania oraz dokonano ich oceny i walidacji. Porównanie rezultatów obróbkowych z wybranymi narzędziami ściernymi stosowanymi w technologii docierania oraz szlifowania z kinematyką docierania wskazało na duży potencjał oraz użyteczność opracowanych narzędzi.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim:

The aim of this dissertation is to analyse the process of single-sided lapping of flat surfaces with prototype abrasive tools sintered from polyamide powder by selective laser sintering method. The lapping plates are composed of independent abrasive segments forming a flat active surface of the tool and intended for lapping of metal and non-metallic materials, including technical ceramics. The paper presents technological effects of a series of experimental tests on the lapping of Al_2O_3 technical ceramics and concerning, among others, the amount of the material loss, the parameters of surface roughness and waviness, the efficiency of the machining process, as well as the shape and amount of the tools wear. In addition, statistical significance of the differences in technological effects obtained in individual series of experimental tests was assessed. Variable input values were analysed and their statistical significance and impact on the selected output values was assessed. Mathematical models of the selected lapping effects were determined and their evaluation and validation were conducted. The comparison of machining effects with selected abrasive tools used for lapping technology and grinding with lapping kinematics indicated a great potential and usefulness of the developed tools.

~~**Streszczenie rozprawy w języku, w którym została napisana**:**~~

~~**Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku, w którym została napisana**:**~~

* *niepotrzebne skreślić*

** *dotyczy rozpraw doktorskich napisanych w innych językach, niż polski lub angielski*

Podziękowanie

Pragnę serdecznie podziękować promotorowi pracy Panu dr hab. inż. Mariuszowi Dei, prof. PG za pomoc w realizacji badań eksperymentalnych, poświęcony czas oraz okazaną życzliwość. Przekazane cenne wskazówki i uwagi merytoryczne przyczyniły się do powstania niniejszej dysertacji.

Dawid Zieliński

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	8
Wstęp	10
Przegląd i analiza literatury	
1. Docieranie technologiczne	13
1.1. Mechanizm docierania.....	16
1.2. Czynniki wpływające na przebieg procesu docierania	18
1.3. Docieraki	21
1.4. Problematyka dokładnej obróbki ścierniej powierzchni płaskich w aspekcie wykorzystywanych narzędzi ściernych	26
2. Addytywne metody wytwarzania.....	29
2.1. Klasyfikacja metod przyrostowych	31
2.2. Etapy procesu szybkiego prototypowania	35
2.3. Metody proszkowe – technologia SLS	36
2.4. Obszar Rapid Tooling.....	38
2.5. Zastosowanie technologii przyrostowych w wytwarzaniu narzędzi ściernych	39
2.6. Zastosowanie technologii SLS w wytwarzaniu narzędzi ściernych.....	48
3. Podsumowanie analizy literatury	50
4. Hipotezy, cele i zakres pracy	51
Badania własne	
5. Narzędzia do docierania powierzchni płaskich.....	53
5.1. Proces szybkiego prototypowania segmentów ściernych	53
6. Schemat badań eksperymentalnych i zastosowane metody.....	56
6.1. Stanowisko badawcze docierania jednotarczowego	59
6.2. Aparatura pomiarowo-badawcza	63
7. Ocena jakości wykonania segmentów ściernych.....	65
7.1. Analiza struktury geometrycznej płaskiej powierzchni czynnej segmentów	65
7.2. Analiza kształtu narzędzia	71
8. Docieranie ceramiki technicznej Al_2O_3	74
8.1. Badania rozpoznawcze docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	75
8.1.1. Badanie czynnej powierzchni narzędzia ściernego.....	79
8.1.2. Badanie topografii powierzchni obrabianych próbek.....	83
8.1.3. Wnioski z badań rozpoznawczych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	84
8.2. Badania właściwe docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	85
8.2.1. Badanie czynnej powierzchni narzędzia ściernego.....	91
8.2.2. Wnioski z badań właściwych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	94
8.3. Badania sprawdzające docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	95
8.4. Badania dodatkowe docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	98
8.5. Wnioski z badań sprawdzających i dodatkowych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	102
9. Badanie i ocena topografii obrabianych powierzchni.....	103
10. Ocena efektów obróbkowych.....	105
10.1. Analiza efektów technologicznych.....	105
10.2. Ocena istotności statystycznej różnic efektów technologicznych	115
11. Analiza kształtu i wielkości zużycia prototypowych tarcz docierających.....	118
11.1. Analiza kształtu i profili płaskich powierzchni narzędzi	118
11.2. Wyznaczanie odchyłek prostoliniowości narzędzi.....	122

12. Modelowanie efektów technologicznych docierania	127
12.1. Efekty technologiczne docierania ceramiki technicznej Al_2O_3	127
12.2. Modele matematyczne analizowanych efektów technologicznych	136
12.3. Ocena i walidacja modeli matematycznych	139
13. Porównanie uzyskanych efektów obróbkowych z wybranymi procesami obróbki ścierniej z kinematyką docierania	149
14. Podsumowanie i wnioski końcowe	153
14.1. Wnioski poznawcze	153
14.2. Wnioski do praktycznego zastosowania	155
14.3. Proponowane kierunki dalszych badań	155
Bibliografia	157
Wykaz rysunków	170
Wykaz tabel	175
Załączniki:	
- nr 1: rysunek pojedynczego segmentu ściernego	
- nr 2: rysunek tarczy docierającej złożonej z niezależnych segmentów ściernych	

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

F – siła nacisku [N]

A – powierzchnia przedmiotu obrabianego [mm²]

p – nacisk jednostkowy [kPa] lub [MPa]

n_t – prędkość obrotowa tarczy docierającej [obr./min]

n_s – prędkość obrotowa pierścieni lub pierścienia prowadzącego [obr./min]

V_d – prędkość liniowa docieraka [m/s]

V_p – prędkość liniowa przedmiotu obrabianego [m/s]

PO – przedmioty obrabiane

v – prędkość względna docierania [m/s]

d_o – średnica zewnętrzna tarczy docierającej [mm]

d_i – średnica wewnętrzna tarczy docierającej [mm]

d_h – wysokość tarczy docierającej [mm]

d_w – średnica zewnętrzna kształtki cylindrycznej z Al₂O₃ [mm]

h_{w0} – wysokość początkowa kształtki cylindrycznej z Al₂O₃ [mm]

Δt – czas pojedynczego testu [s] lub [min]

ΔT – czas serii obróbkowej [min]

t – czas docierania [min]

Δh – liniowy ubytek materiałowy [mm]

Δm – masowy ubytek materiałowy [g]

dh – liniowa wydajność docierania [μ m/min]

dm – masowa wydajność docierania [mg/min]

K – współczynnik kinematyczny

R_{Dz} – promień zewnętrzny tarczy docierającej [mm]

R_{Dw} – promień wewnętrzny tarczy docierającej [mm]

R – odległość środka pierścienia prowadzącego od środka tarczy docierającej [mm]

r_{OP} – odległość pomiędzy środkiem pierścienia prowadzącego, a środkiem przedmiotu obrabianego [mm]

ω_t – prędkość kątowna tarczy [rad/s]

ω_p – prędkość kątowna pierścienia prowadzącego [rad/s]

ω_j – prędkość kątowna wyobraźalnego jarzma [rad/s]

l_r – długość odcinka elementarnego [mm]

l_t – długość odcinka pomiarowego [mm]

\dot{Q}_{lub} – natężenie przepływu nośnika ziaren ściernych (cieczy chłodząco-smarującej) [ml/min]

T_b – współczynnik wysokości spoiwa [%]

R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu [μm]

W_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu falistości [μm]

S_a – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni [μm]

S_q – średnia kwadratowa wysokość powierzchni [μm]

WSTĘP

Współczesne wysokie wymagania stawiane częściom maszyn wymuszają konieczność poszukiwania nowoczesnych metod wytwórczych oraz narzędzi obróbkowych. Przykład mogą stanowić dynamicznie rozwijające się w ostatnich latach technologie proszkowe. Zakres możliwych zastosowań wytwarzanych elementów z proszków metali oraz tworzyw sztucznych znacznie wykracza poza pierwotny obszar związany z wykonywaniem prototypów oraz modeli koncepcyjnych przyszłych wyrobów. Obecnie możliwe jest bowiem tworzenie części o cechach zbliżonych do obiektów wykonanych przy użyciu tradycyjnych metod odlewniczych oraz obróbki skrawaniem, a także w pełni funkcjonalnych części użytkowych maszyn i urządzeń mechanicznych. Jednym z kluczowych obszarów wykorzystania potencjału technologii proszkowych druku 3D jest branża narzędziowa tzw. *Rapid Tooling*, która związana jest z szybkim wytwarzaniem narzędzi oraz oprzyrządowania produkcyjnego. Szereg zalet technologii proszkowych, zwłaszcza wykorzystanej w pracy metody selektywnego spiekania laserowego proszków poliamidowych SLS, determinuje nowe obszary wykorzystania ich potencjału m.in. w technologii docierania powierzchni płaskich **(Deja and Zieliński, 2021; Deja et al., 2021)**.

Docieranie, jako podstawowa metoda obróbki ścierniej bardzo dokładnej, umożliwia uzyskanie wysokiej dokładności kształtowej (głównie płaskości), wymiarowej oraz małej chropowatości powierzchni obrabianej. Z tego powodu znajduje szerokie zastosowanie przemysłowe w obróbce materiałów metalowych i niemetalowych, w tym m.in. ceramiki technicznej. Technologia docierania realizowana na standardowych docierarkach pozwala na uzyskiwanie stosunkowo niskich prędkości do 5 m/s, kilka razy niższych w porównaniu do szlifowania, co czyni ten proces mało wydajnym **(Barylski and Deja, 2010; Deja, 2013a)**. W związku z tym aktualnie jednym z głównych wyzwań i zarazem kierunków rozwoju obróbki ścierniej jest dążenie do jednoczesnego osiągnięcia wysokiej wydajności procesu oraz jakości powierzchni obrabianych przedmiotów. Kolejną istotną kwestią stanowi możliwość efektywnej obróbki materiałów trudnoobrabialnych, takich jak wspomniana ceramika techniczna. Z tego powodu większość aktualnych prac badawczych dotyczących obróbki przez docieranie skupia się na optymalizacji poszczególnych czynników wpływających na uzyskiwane rezultaty obróbkowe, wydajność procesu oraz wartość zużycia narzędzia. Główne zagadnienia badawcze obejmują m.in. analizę układów kinematycznych docierania powierzchni płaskich, badanie wpływu poszczególnych parametrów procesu docierania oraz rodzaju stosowanej zawiesziny ścierniej na uzyskiwane efekty technologiczne i wartość zużycia narzędzi, a także aspekty dotyczące redukcji kosztów procesu docierania **(Barylski and Piotrowski, 2019; Huang et al., 2021)**. Oprócz wyżej wymienionych czynników istotny wpływ zarówno na przebieg procesu, jak również uzyskiwane efekty obróbkowe odgrywa rodzaj i konstrukcja stosowanych narzędzi ściernych. Z tego powodu kolejnym ważnym kierunkiem rozwoju technologii docierania jest opracowywanie nowych oraz modyfikowanie istniejących konstrukcji docieraków, w tym ich struktur wewnętrznych. Celem stosowania tego typu narzędzi jest poprawa uzyskiwanych efektów obróbkowych, a także wydajności i aspektów ekonomicznych procesu docierania m.in. poprzez redukcję kosztów związanych z wytwarzaniem narzędzi. Literatura dotycząca technologii przyrostowych jest bardzo obszerna z uwagi na jej ciągły rozwój. Większość aktualnych prac badawczych skupia się na poprawie własności użytkowych

i jakości wytwarzanych elementów m.in. ich powierzchni zewnętrznych oraz dążeniu do uzyskania jednorodności struktur wewnętrznych (Cader, 2018; Praveena *et al.*, 2022). Kolejnym ważnym obszarem rozwoju jest opracowywanie nowoczesnych materiałów oraz poszukiwanie nowych zastosowań dla drukowanych obiektów, takich jak prototypowe narzędzia stosowane w różnych procesach obróbki ścierniej. Jedną z podstawowych wad technologii przyrostowych, w tym głównie metod proszkowych, jest uzyskiwanie charakterystycznej ziarnistej i chropowatej (porowatej) powierzchni przedmiotu, która wymaga przeprowadzenia dodatkowej obróbki wykończeniowej. Chropowata struktura zewnętrzna w kontekście drukowanych narzędzi ściernych nie stanowi jednak poważnej wady, a nawet jej charakterystyczne właściwości mogą prowadzić do uzyskania pozytywnych efektów obróbkowych.

Biorąc pod uwagę aktualne kierunki rozwoju technologii docierania oraz duży potencjał wytwarzania przyrostowego podjęto próbę wykonania prototypowych narzędzi ściernych. Zastosowanie w tym celu technologii addytywnej stanowi przykład innowacyjnego podejścia do projektowania oraz wytwarzania nowoczesnych narzędzi ściernych. Jednocześnie realizowane zagadnienie wpisuje się w aktualne tendencje rozwojowe dotyczące opracowywania i badania nowych narzędzi ściernych, jak również wpływa na rozwój obszaru Rapid Tooling. W pracy zaprezentowano obszernie wyniki badań eksperymentalnych docierania jednostronnego powierzchni płaskich próbek z ceramiki technicznej z zastosowaniem prototypowych narzędzi ściernych wytwarzanych metodą selektywnego spiekania laserowego SLS. Poczynione analizy oraz przedstawione praktyczne wskazówki i kierunki dalszych badań wnoszą istotny wkład w rozwój obszaru dokładnej obróbki ścierniej. Uzyskane rezultaty stanowią jednocześnie podstawę do realizacji dalszych prac rozwojowych i wdrożeń.

Praca została podzielona na dwie główne części: literaturową oraz projektowo-badawczą. W rozdziale 1 autor skupił się na omówieniu mechanizmu procesu docierania oraz charakterystyce jego poszczególnych czynników. Zaprezentowano również problematykę obróbki ścierniej powierzchni płaskich, w tym głównie technologii docierania, w aspekcie wykorzystywanych narzędzi ściernych. Druga część przeglądu literatury zawarta w rozdziale 2 dotyczy omówienia najistotniejszych aspektów związanych z technologią addytywną, wiodących metod przyrostowych oraz charakterystyki poszczególnych etapów procesu szybkiego prototypowania. Zaprezentowano ponadto główne grupy narzędzi ściernych wykonanych metodami przyrostowymi, wskazując jednocześnie obszary ich zastosowania, potencjalne korzyści oraz aktualnie występujące ograniczenia. Następnie przedstawiono rozważania teoretyczne autora dotyczące możliwości oraz potencjalnych korzyści związanych z wykorzystaniem wytwarzanych w technologii selektywnego spiekania laserowego proszków poliamidowych narzędzi w obróbce ścierniej powierzchni płaskich. Pierwszą część pracy kończy podsumowanie przeanalizowanej literatury stanowiące zawartość rozdziału 3, które pozwoliło na sformułowanie hipotez i celów niniejszej dysertacji wskazanych w rozdziale 4.

Część projektowo-badawczą związaną z badaniami własnymi rozpoczęto od przedstawienia w rozdziale 5 najistotniejszych informacji dotyczących procesu szybkiego prototypowania segmentów ściernych, zastosowanego materiału oraz konstrukcji prototypowej tarczy docierającej. W rozdziale 6 zaprezentowano schemat badań eksperymentalnych oraz wykorzystaną aparaturę pomiarowo-badawczą. Szczególną uwagę poświęcono charakterystyce prototypowej konstrukcji obrabiarki, która



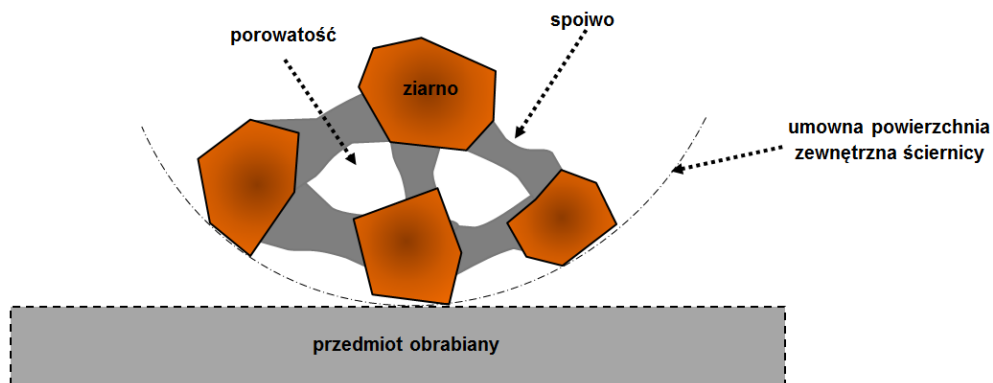
posłużyła do przeprowadzenia badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z Al_2O_3 . W rozdziale 7 przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy struktury geometrycznej płaskiej powierzchni segmentów ściernych w układach 2D oraz 3D, a także kształtu narzędzia przed rozpoczęciem procesu obróbki. Efekty technologiczne uzyskane w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 stanowią zawartość rozdziałów 8 i 9. Zaprezentowano w nich wyniki badań rozpoznawczych, w których analizowano wpływ poszczególnych zmiennych wejściowych na wybrane rezultaty obróbkowe, a także badań właściwych, sprawdzających i dodatkowych. Ponadto dokonano kompleksowej analizy mikroskopowej płaskiej powierzchni czynnej prototypowego narzędzia ściernego po określonych etapach obróbki, a także struktury geometrycznej powierzchni obrabianych próbek z ceramiki technicznej w układach 2D oraz 3D. Porównanie rezultatów obróbkowych uzyskiwanych w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych, w tym także wyniki oceny istotności statystycznej różnic pomiędzy średnimi, stanowią zawartość rozdziału 10. W rozdziale 11 skupiono się natomiast na określeniu wartości zużycia oraz kształtu prototypowych narzędzi po poszczególnych seriach i rodzajach badań eksperymentalnych. W tym celu analizowano kształt i profile płaskich powierzchni narzędzi oraz wyznaczono wartości powstałych błędów prostoliniowości. W rozdziale 12 analizowano wpływ zmiennych parametrów docierania na efekty technologiczne obróbki wraz z oceną statystyczną uzyskanych wyników oraz wyznaczeniem modeli matematycznych dla wybranych zmiennych wyjściowych procesu. W rozdziale 13 uzyskane rezultaty obróbkowe porównano z wynikami obróbki z zastosowaniem wybranych narzędzi stosowanych w technologiach obróbki ścierniej dokładnej powierzchni płaskich. W zakończeniu pracy wskazano najważniejsze wnioski z przeprowadzonych analiz, a także proponowane kierunki dalszych badań.

PRZEGLĄD I ANALIZA LITERATURY

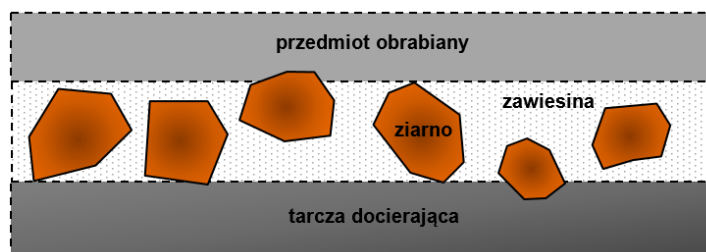
1. DOCIERANIE TECHNOLOGICZNE

Konwencjonalne procesy obróbki ścierniej, takie jak szlifowanie oraz docieranie, stanowią wciąż jedne z najczęściej stosowanych metod obróbki wykończeniowej w wielu obszarach przemysłu. Uwzględniając możliwy mechanizm obróbki ścierniej należy wskazać jego dwa podstawowe rodzaje: obróbkę ścierniwem wiązonym (*ang. 2-body abrasive wear*), w którym ziarna ściernie są trwale połączone ze spoiwem – rysunek 1a oraz obróbkę ścierniwem luźnym (*ang. 3-body abrasive wear*), związaną ze stosowaniem luźnych ziaren ściernych – rysunek 1b. Narzędzia ściernie zawierające ziarna trwale związane ze spoiwem m.in. tarcze szlifierskie oraz narzędzia galwaniczne wykorzystywane kolejno w procesach szlifowania oraz szlifowania z kinematyką docierania, umożliwiają przeprowadzenie wydajnego procesu obróbki. Z drugiej zaś strony stosowanie luźnych ziaren ściernych w technologii docierania pozwala na uzyskiwanie wysokiej dokładności kształtu oraz niskich parametrów struktury geometrycznej powierzchni obrabianych części. Z tego powodu podczas opracowywania nowoczesnych narzędzi ściernych m.in. dla technologii docierania powierzchni płaskich materiałów trudnoobrabialnych, należy dążyć do jednoczesnego uzyskiwania wysokiej wydajności procesu obróbki oraz zadowalających efektów technologicznych związanych z jakością kształtowanych powierzchni oraz wartością zużycia narzędzi (**Kim et al., 2015; Pyun et al., 2018; Deja et al., 2021**).

a)



b)



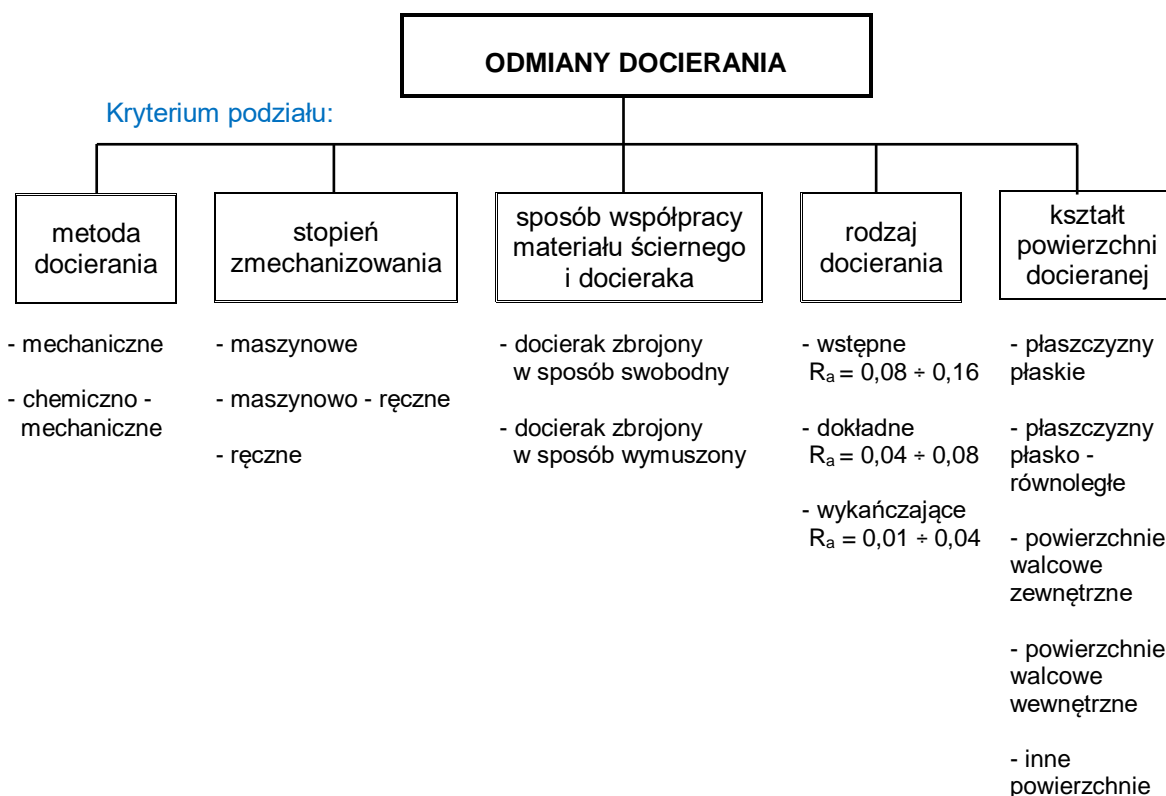
Rysunek 1. Mechanizm obróbki ścierniej: a) obróbka ścierniwem wiązonym (*2-body abrasive wear*) podczas szlifowania; b) obróbka ścierniwem luźnym (*3-body abrasive wear*) podczas docierania (**Deja et al., 2021**)

Docieranie stanowi jedną z najstarszych i tym samym podstawowych metod obróbki ścierniej bardzo dokładnej. Umożliwia uzyskanie wysokich dokładności wymiarowo-kształtowych (01=7 klasa

dokładności ISO) oraz niskiej chropowatości powierzchni obrabianych elementów ($R_a=0.16\pm 0.01 \mu\text{m}$), przy jednoczesnym wykorzystaniu stosunkowo prostych środków produkcji. Cechą charakterystyczną powierzchni po docieraniu jest wielokierunkowość śladów pozostawionych przez mikroziarna ściernie, co zapewnia właściwą szczelność przylegania współpracujących ze sobą powierzchni części mechanicznych. Ukształtowana w ten sposób stereometria powierzchni warstwy wierzchniej odznacza się dużą nośnością oraz zdolnością do utrzymywania warstwy smaru, dzięki czemu może być wykorzystywana zarówno w połączeniach spoczynkowych, jak również ruchowych. Docieranie przeprowadzane jest zazwyczaj w dwóch operacjach jako wstępne, którego celem jest usunięcie błędów kształtu oraz wykończeniowe, umożliwiające uzyskanie wysokiej klasy jakości powierzchni **(Tymowski, 1970; Feld and Barylski, 1979; Barylski and Deja, 2009; Barylski, 2013c)**.

Nieustannie zwiększające się wymagania jakościowe w stosunku do elementów części maszyn wytwarzanych zarówno przy użyciu tradycyjnych procesów wytwórczych, jak również dynamicznie rozwijających się technologii przyrostowych, determinują obszary zastosowania obróbki ścierniej bardzo dokładnej. Docieranie umożliwia obróbkę szerokiego spektrum materiałów metalicznych i niemetalicznych, szkła, szafiru, węglików krzemu, wolframu, materiałów naturalnych, a także trudnoobrabialnych m.in. ceramiki technicznej oraz diamentu. Z tego powodu znajduje zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, takich jak: branża lotnicza, motoryzacyjna, maszynowa, a także narzędziowa **(Klocke, 2009; Gutzeit et al., 2015; Li et al., 2017; Kemet, 2019a)**. Przykłady elementów najczęściej poddawanych tego typu obróbce ścierniej stanowią: części pneumatyczne i hydrauliczne (zawory, uszczelki, podkładki, pierścienie tłokowe, korpusy pomp), elementy przekładniowe (łożyska, sworznie tłokowe, przekładnie, koła zębate, tarcze sprzęgłowe), półprzewodnikowe oraz optyczne (płytki krzemowe i szafirowe wykorzystywane w urządzeniach elektronicznych np. w smartfonach), narzędzia tnące (wierzchołki i noże tnące), sprzęt kontrolny i pomiarowy (kowadełka mikrometryczne, bloki pomiarowe, płytki wzorcowe), a także części wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym (elementy uszczelniające oraz żyroskopowe) **(Stähli and Stähli, 2005; Olszak, 2008; Production Lapping Company, 2019)**.

Obróbkę przez docieranie można sklasyfikować według różnych kryteriów podziału. Każda z odmian docierania różni się zarówno przebiegiem samego procesu, jak również uzyskiwanymi końcowymi efektami technologicznymi. Ogólny schemat podziału technologii docierania ze względu na wybrane kryteria przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Podział docierania ze względu na wybrane kryteria (Feld and Barylski, 1979)

W praktyce zazwyczaj docierane są powierzchnie płaskie oraz płasko-równoległe. W przypadku konieczności obróbki innych kształtów wykorzystuje się specjalnie ukształtowane do tego celu narzędzia oraz zmodyfikowane metody obróbkowe. Innym ważnym kryterium jest podział na docieranie jednotarczowe oraz dwutarczowe, podczas którego obrabiane są jednocześnie dwie równoległe powierzchnie. Obecnie najczęściej stosowanym w przemyśle rodzajem docierania jest obróbka powierzchni płaskich oraz płasko-równoległych, które przeznaczone są kolejno do docierania jedno- lub dwustronnego na docierarkach tarczowych (Barylski and Deja, 2011; Lai et al., 2019).

Docieranie jedno- lub dwutarczowe, oprócz uzyskania wysokich dokładności wymiarowo-kształtowych obrabianych powierzchni, wykazuje wiele innych zalet. Do najważniejszych z nich należy możliwość jednoczesnej obróbki kilku elementów umieszczonych w separatorze przedmiotowym oraz brak konieczności stosowania uchwytów obróbkowych, co zapobiega występowaniu odkształceń obrabianych przedmiotów. Ponadto w trakcie docierania, w przeciwieństwie do pozostałych metod obróbki wykończeniowej, generowana jest mniejsza ilość ciepła. Niska temperatura procesu minimalizuje tym samym występowanie strukturalnych zmian w obrabianych elementach. Docieranie charakteryzuje się również niskim natężeniem hałasu oraz stanowi przykład bezpyłowej obróbki (Marinecsu, Uhlmann and Doi, 2006; ClubTechnical, 2018).

Głównymi wadami docierania są natomiast niska wydajność procesu związana z małymi prędkościami względnymi w układzie roboczym (prędkość skrawania kilka razy niższa niż podczas szlifowania) oraz nierównomierny rozkład zawiesiny ścierniej pomiędzy obrabianym przedmiotem a narzędziem. Kolejną wadę stanowi brak efektywnego wykorzystania ścierniwa, które w większości przypadków jest dawkowe w nadmiarze, a jego powtórne zastosowanie ekonomicznie nieuzasadnione. Ponadto jakość

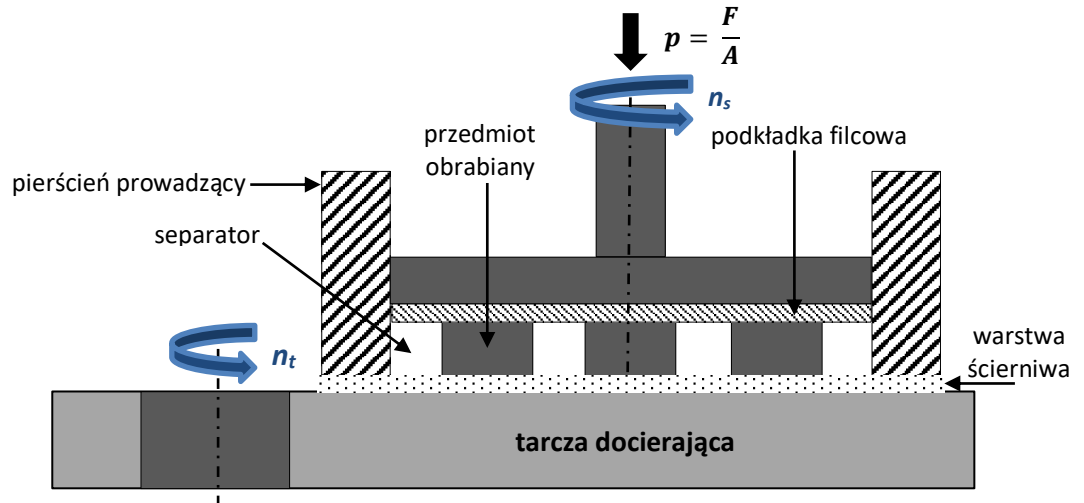
powierzchni obrabianej zależy w znacznym stopniu od rodzaju i stanu płaskości narzędzia, stąd wymagana jest kontrola jego kształtu oraz przeprowadzanie zabiegu kondycjonowania. Tym samym proces docierania stanowi stosunkowo drogą obróbkę m.in. z uwagi na koszty związane z wytwarzaniem narzędzi, ich okresowym wyrównywaniem, a także koniecznością stosowania zawiesziny ścierniej (**Barylski, 2013c; Deja, 2013b**).

1.1. Mechanizm docierania

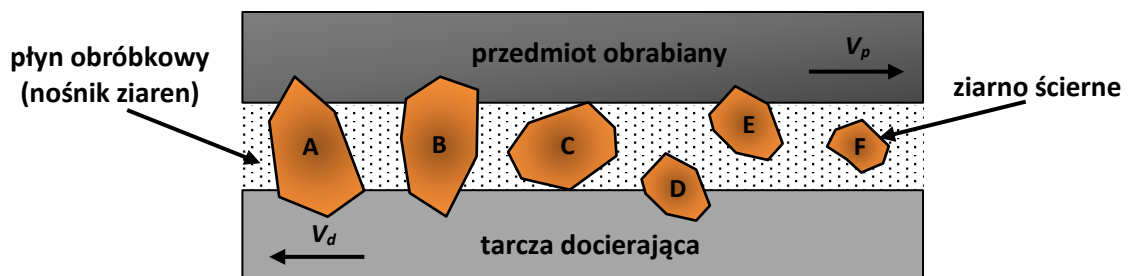
Proces docierania polega na wzajemnym ruchu przedmiotu obrabianego oraz narzędzia stosowanego w obróbce docieraniem – tarczy docierającej, popularnie nazywanej docierakiem, pomiędzy którymi znajduje się warstwa luźnego ścierniwa – rysunek 3a. Może ona być podawana kropelkowo w formie zawiesziny w płynie w trakcie obróbki lub nałożona na płaską powierzchnię czynną docieraka przed rozpoczęciem obróbki w postaci pasty ścierniej (**Kaczmarek, 1971**). Podczas docierania przedmiot obrabiany dociskany jest siłą F do powierzchni docieraka A , co powoduje wytworzenie nacisku p pomiędzy przedmiotem obrabianym a tarczą docierającą. Dodatkowo zastosowanie podkładki filcowej zapewnia bardziej równomierne rozłożenie nacisku, które wywierane jest na obrabiane przedmioty. Ich dociążenie może odbywać się przy użyciu układu obciążnikowego lub pneumatycznego (**Barylski, 2013c**).

Jedno z podstawowych kryteriów obróbki przez docieranie stanowi prędkość względna w układzie tarcza docierająca oraz przedmiot obrabiany (**Ardelt, 2001a**). W standardowym układzie kinematycznym docierania jednostronnego tarcza docierająca, która porusza się z prędkością obrotową n_t , powoduje ruch pierścieni prowadzących wskutek wystąpienia momentu sił tarcia po powierzchni roboczej docieraka. Ruch pierścieni prowadzących z prędkością obrotową n_s umożliwia natomiast przemieszczanie się umieszczonych w ich wnętrzu separatorów, w których znajdują się przedmioty obrabiane (**Barylski, 2013a**). Podczas obróbki przedmioty poruszają się również wokół własnej osi. Znajdujące się pomiędzy nimi ziarna ściernie wykonując ruch swobodny o zmiennym kierunku pełnią rolę ostrzy skrawających w trakcie mikroskrawania. Ostre krawędzie ziaren ściernych o nieregularnych kształtach wciskane są w płaską powierzchnię czynną docieraka, znajdują w nim chwilowe utwierdzenie, a następnie są przeciągane po powierzchni obrabianego przedmiotu. Jednym z głównych mechanizmów procesu docierania jest zatem zużycie ściernie. Z tego powodu, podobnie jak w przypadku innych metod obróbki ścierniej, dąży się do minimalizowania zużycia ściernego narzędzia oraz tarcia występującego pomiędzy przedmiotem obrabianym i narzędziem oraz maksymalizowania wielkości ubytku przedmiotu obrabianego (**Lapmaster, 2019a**).

a)



b)



Rysunek 3. Schemat docierania jednotarczowego (a) z luźnymi i utwardzonymi ziarnami ściernymi podczas obróbki (b) (Marinecsu, Uhlmann and Doi, 2006; Klocke, 2009; Molenda and Charchalis, 2015)

Podczas procesu docierania ziarna ścierniwa mogą toczyć się lub ślizgać pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym poruszającymi się odpowiednio z prędkościami liniowymi V_d oraz V_p oraz przyjmować różne położenie – rysunek 3b. Dodatkowo, wskutek występowania ruchów względnych pomiędzy narzędziem a obrabianym przedmiotem, część ziaren ściernych znajduje się poza strefą obróbki, nie biorąc tym samym udziału w procesie mikroskrawania. Proces docierania stanowi zatem kombinację ściernia dwu- oraz trzyczęściowego. Na rysunku 3b wskazano następujące typy ziaren ściernych biorących udział w procesie (Marinecsu, Uhlmann and Doi, 2006; Molenda and Charchalis, 2015):

- A, B oznaczają mikroziarna ścierniwa, które wbijane są kolejno w powierzchnię tarczy docierającej oraz przedmiotu obrabianego. Takie usytuowanie, w zależności od miejsca utwierdzenia mikroziarna ściernego, wpływa na wystąpienie mikroskrawania oraz odkształceń przedmiotu obrabianego lub tarczy docierającej;
- C przedstawia przykład mikroziarna ściernego mogącego toczyć się lub ślizgać pomiędzy tarczą docierającą a przedmiotem obrabianym. Takie ułożenie powoduje mikroskrawanie i odkształcenie obu tych elementów;
- D, E oznaczają mikroziarna ścierniwa wbite kolejno w powierzchnię narzędzia oraz obrabianego przedmiotu, co uniemożliwia oddziaływanie osadzonego ziarna na przeciwny element;

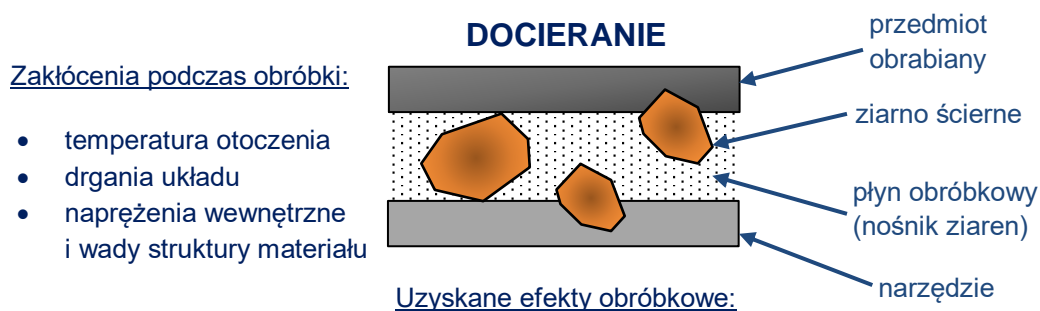
- F przedstawia przykład tzw. mikroziarna biernego, które nie uczestniczy w mikroskrwaniu żadnego z elementów w określonym czasie obróbki.

1.2. Czynniki wpływające na przebieg procesu docierania

Docieranie, pomimo że jest realizowane przy użyciu stosunkowo prostych środków produkcji, wymaga bardzo dużego doświadczenia i wiedzy z zakresu stosowanej zawiesiny ścierniej, doboru właściwych narzędzi oraz parametrów obróbkowych (**Li, Wang and Wu, 2008; Li et al., 2016; Wang et al., 2016**). Uzyskane rezultaty technologiczne oraz wydajność całego procesu docierania uzależnione są od szeregu parametrów oraz zmiennych. Czynniki wejściowe procesu docierania związane z przedmiotem obrabianym, zastosowanym docierakiem, czynnikiem docierającym, a także przebiegiem procesu docierania (**Evans et al., 2003; Barylski, 2017**) należą do grupy tzw. kontrolowanych parametrów. Oprócz czynników wejściowych istotny wpływ na jakość docierania wywierają również wskazane w pracach (**Deaconescu and Deaconescu, 2008, 2015**) występujące niekorzystne dla przebiegu i jakości obróbki zakłócenia, które stanowią niekontrolowane parametry procesu docierania. Na rysunku 4 przedstawiono w sposób schematycznych czynniki wejściowe oraz wyjściowe procesu docierania wraz z uwzględnieniem możliwych zakłóceń występujących podczas obróbki.

Czynniki wejściowe docierania:

Przedmiot obrabiany	Narzędzie	Czynnik docierający	Przebieg procesu docierania
<ul style="list-style-type: none"> rodzaj i stan materiału własności warstwy wierzchniej odchyłki kształtu i położenia naddatki na docieranie 	<ul style="list-style-type: none"> rodzaj i własności materiału kształt i chropowatość powierzchni roboczej płaskość powierzchni konstrukcja 	<ul style="list-style-type: none"> rodzaj, własności i wymiary mikroziarna ściernego oraz pozostałych składników zawiesiny ścierniej dawkowanie czynnika docierającego 	<ul style="list-style-type: none"> kinematyka obróbki i szybkość docierania obrabiarka i oprzyrządowanie metoda i stopień zmechanizowania obróbki nacik jednostkowy środowisko i warunki obróbki



Przedmiot obrabiany	Narzędzie	Wydajność
<ul style="list-style-type: none"> struktura geometryczna powierzchni (chropowatość, falistość) płaskość powierzchni dokładność wymiarowa i kształtowa 	<ul style="list-style-type: none"> wielkość i równomierność zużycia płaskość powierzchni 	<ul style="list-style-type: none"> koszt obróbki szybkość i wielkość usuwania materiału

Rysunek 4. Czynniki wejściowe oraz wyjściowe docierania (Feld and Barylski, 1979; Deaconescu and Deaconescu, 2008, 2015; Klocke, 2009; Lapmaster, 2019b)

W przypadku obrabianych przedmiotów decydujący wpływ na jakość dotartej powierzchni oraz mechanizm procesu docierania odgrywa rodzaj oraz twardość jego materiału (Molenda and Charchalis, 2015). Wraz ze wzrostem twardości materiału znacznej poprawie ulega jakość obrabianej powierzchni, kosztem niższej wydajności procesu (Olszak, 2008).

Czynnik docierający w postaci ziaren ściernych oraz nośnika lub pasty ścierniej, która pełni rolę zawiesiny, stanowi kolejny kluczowy element procesu docierania (Neauport et al., 2010). Powszechnie wykorzystywane ścierniwa różnią się między sobą rodzajem, własnościami, a także wymiarami mikroziaren. W przypadku docierania jednostronnego stosowane są zazwyczaj ziarna ściernie o rozmiarach w zakresie 5-20 μm . Do najczęściej wykorzystywanych w przemyśle materiałów

ściernych należą natomiast: węgiel krzemu SiC, tlenek glinu Al₂O₃, węgiel boru B₄C, a także diament (Barylski and Bakoń, 2017; South Bay Technology, 2019a). W tabeli 1 zaprezentowano zestawienie powszechnie wykorzystywanych w docieraniu materiałów ściernych wraz z ich krótką charakterystyką.

Tabela 1. Materiały ścierne stosowane w docieraniu (Klocke, 2009; South Bay Technology, 2019a)

Rodzaj materiału ściernego	Właściwości
Materiały konwencjonalne	
węgiel krzemu (SiC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ igłowa lub blokowa struktura ziaren ściernych ▪ najczęściej wykorzystywany spośród wszystkich materiałów ściernych ▪ stosowany głównie do docierania wstępnego, umożliwia obróbkę szerokiego spektrum materiałów m.in. stal hartowana, żeliwo szare, szkło, porcelana
tlenek glinu (Al ₂ O ₃)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nieregularny kształt ziaren o ostrych krawędziach ▪ stosowany do obróbki stali lekkich oraz metali nieżelaznych, a także materiałów półprzewodnikowych ▪ relatywnie niska cena
granat	<ul style="list-style-type: none"> ▪ stosowany do obróbki wykończeniowej, szczególnie elementów optycznych
Materiały supertwarde	
węgiel boru (B ₄ C)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ krystaliczna struktura ziaren ściernych oraz wysoka twardość ▪ obróbka materiałów o różnej twardości m.in. żeliwo, stal narzędziowa, węgliki spiekane, ceramika ▪ wysoka wydajność usuwania materiału
diament	<ul style="list-style-type: none"> ▪ najtwardszy z materiałów ściernych o ostrej, kątowej strukturze ziaren ▪ obróbka materiałów o dużej twardości oraz z dużą wydajnością ▪ wysoka cena

Wyniki prac badawczych (Xie and Bhushan, 1996; Ardelt, 2001b; Belkhir, Bouzid and Herold, 2007) wskazują, iż wzrost wymiarów ziaren ściernych wpływa na zwiększenie szybkości usuwania materiału oraz jednocześnie pogorszenie jakości obrabianej powierzchni. Z tego względu w praktyce większe ziarna stosowane są do docierania wstępnego, natomiast mniejsze do wykończeniowego (Zaleski, Skoczylas and Bławucki, 2017).

Równie istotne znaczenie co wielkość ziarna stanowi rodzaj zastosowanego nośnika, a także koncentracja i struktura granulometryczna ziaren ścierniwa (Sankar, Jain and Ramkumar, 2009; Kumar and Hiremath, 2016). Jako nośniki stosowane są powszechnie nafta oraz oleje mineralne. Ich głównym zadaniem jest równomierne rozprowadzenie ziaren ściernych pomiędzy powierzchniami narzędzia i przedmiotu obrabianego, a także zapewnienie ich właściwej smarowności, zwilżalności oraz temperatury topnienia (Cichosz, 2002). Koncentracja ścierniwa powinna być dobrana w taki sposób, aby zapewnić utrzymanie ciągłej warstewki czynnika docierającego pomiędzy obrabianą powierzchnią a docierakiem (Zaleski, Skoczylas and Bławucki, 2017). Wyniki przedstawione w pracy (Pratheesh Kumar, Arun and Aravind Babu, 2013) wskazały, iż zmniejszanie koncentracji

ścierniwa, przy określonych pozostałych parametrach procesu docierania, wpłynęło na spadek wydajności usuwania materiału oraz pogorszenie jakości powierzchni docieranych próbek ze stali nierdzewnej. Wybór właściwego czynnika docierającego uzależniony jest zatem od zakładanej jakości docieranej powierzchni, szybkości usuwania materiału, a także twardości obrabianego przedmiotu. Kolejny kluczowy aspekt docierania, który jest jednocześnie tematem wielu aktualnych prac badawczych, stanowi analiza kinematyki oraz zastosowanych parametrów docierania jednostronnego oraz dwustronnego (Yuan et al., 2015; Yao et al., 2017). W przypadku docierania jednostronnego stosowany jest pierścieniowy, natomiast docierania dwustronnego obiegowy układ kinematyczny (Barylski, 2013a). Kinematyka standardowego docierania jednostronnego wykorzystywana jest również w innych metodach obróbki ścierniej m.in. szlifowaniu z kinematyką docierania oraz polerowaniu chemiczno-mechanicznym (Deja, 2013b; Zhang et al., 2018). Prace naukowe związane z kinematyką docierania skupiają się głównie na badaniu wpływu geometrii obrabianych przedmiotów (Heisel and Jakob, 2012), rozkładu i konfiguracji trajektorii ścierniwa na powierzchni narzędzi (Lu et al., 2014; Fang et al., 2017), a także analizie niekonwencjonalnych układów wykonawczych docierania jednostronnego powierzchni płaskich (Piotrowski, 2018; Barylski and Piotrowski, 2019). Istotne znaczenie dla przebiegu procesu i uzyskiwanych efektów obróbkowych, w tym również płaskości obrabianych przedmiotów oraz wartości zużycia tarczy docierającej, odgrywają warunki technologiczne procesu docierania. W przypadku docierania jednotarczowego podstawowymi parametrami są prędkości obrotowe tarczy docierającej oraz pierścieni prowadzących, a także siła i rozkład docisku wywieranego na przedmioty (Feld and Barylski, 1979; Cai et al., 1998; XU and YIN, 2016). W pracy (Molenda, 2013) badano wpływ wybranych parametrów obróbkowych na jakość docieranych powierzchni próbek z ceramiki tlenkowej Al_2O_3 oraz ich ubytek materiałowy. Wzrost prędkości obrotowej docieraka wpłynął na zwiększenie szybkości usuwania materiału bez pogorszenia jakości obrabianej powierzchni. W przypadku nacisku jednostkowego jego zwiększenie spowodowało również wzrost ubytku materiałowego oraz jednoczesne pogorszenie jakości obrabianej powierzchni. Autorzy pracy (Pratheesh Kumar, Arun and Aravind Babu, 2013) poszukiwali natomiast optymalnego zestawu parametrów umożliwiających uzyskanie największej wydajności procesu docierania oraz najmniejszej chropowatości dla próbek ze stali nierdzewnej. W pracy tej potwierdzono również, iż wzrost nacisku jednostkowego wpływa na pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy jednoczesnym zwiększeniu szybkości usuwania materiału, które następuje jednak tylko do pewnej granicy. Po jej przekroczeniu zbyt duży nacisk jednostkowy może spowodować łamanie oraz tępienie krawędzi mikroziaren ściernych lub ich intensywne wbijanie w powierzchnię narzędzia. Oprócz wymienionych parametrów kluczowym czynnikiem procesu docierania jest również czas obróbki. Jego wzrost wpływa zarówno na zmniejszenie chropowatości docieranych powierzchni, jak również wydajności procesu obróbki. Zmiany te następują dynamicznie szczególnie w początkowej fazie docierania, po czym przyjmują niemal stałe wartości (Olszak, 2008).

1.3. Docieraki

Tarcze docierające, powszechnie określane docierakami, stanowią narzędzia ściernie wykorzystywane w procesie docierania. Zadaniem docieraków jest równomierne rozmieszczenie oraz utrzymanie



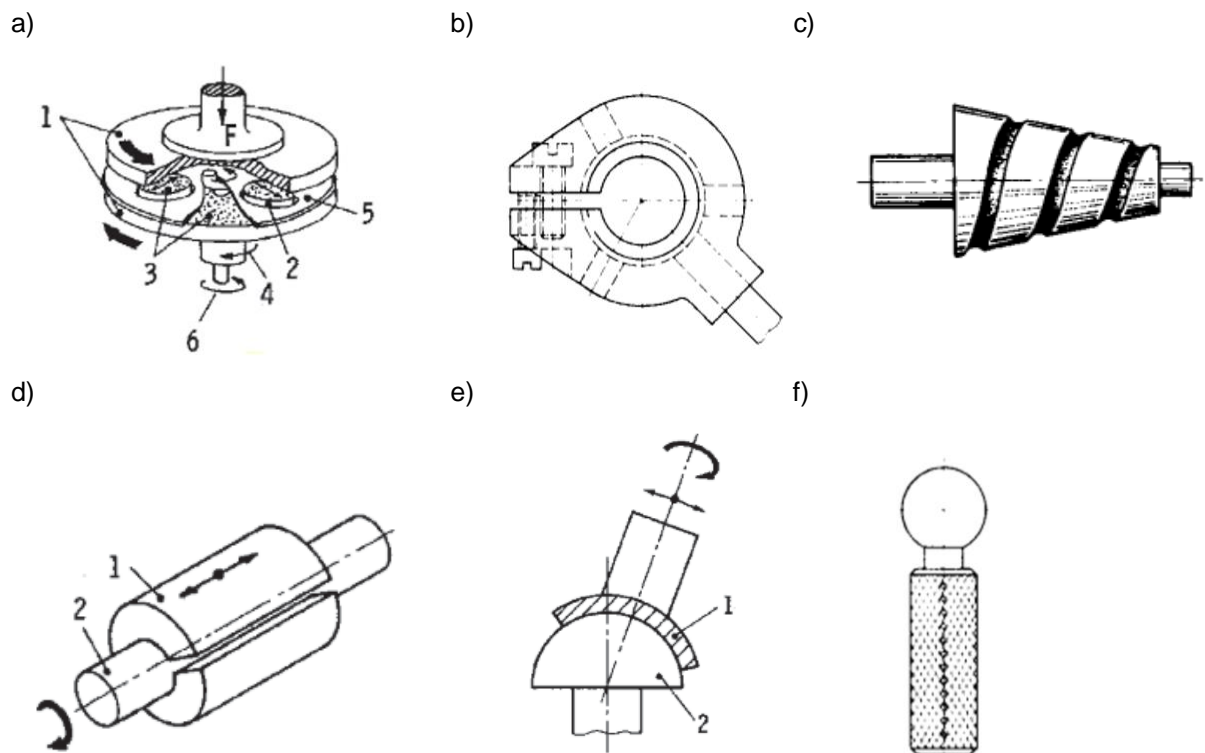
mikroziaren ściernych na swojej powierzchni. Mikroziarna w czasie procesu docierania znajdują na powierzchni docieraka punkt podparcia, wbijając się w jego powierzchnię. Z tego powodu standardowe docieraki wykonywane są ze stosunkowo miękkich materiałów, takich jak: żeliwo, stal, ołów, miedź, mosiądz, twarde drewno, fibra. Oprócz powszechnie wykorzystywanych docieraków z żeliwa sferoidalnego perlitycznego oraz ferrytycznego, dostępne są również konstrukcje multimateriałowe (**Feld, 2003; Stähli, 2013; Parate and Yarasu, 2014**). W tabeli 2 przedstawiono zestawienie najczęściej stosowanych materiałów na docieraki wraz z ich krótką charakterystyką.

Tabela 2. Materiały stosowane na docieraki (**Kemet, 2019b**)

Materiał docieraka	Właściwości
żeliwo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ najczęściej stosowany spośród wszystkich materiałów ▪ twardość docieraka: 120 - 200 HB ▪ docieraki stosowane zazwyczaj do docierania wstępnego
miedź	<ul style="list-style-type: none"> ▪ obróbka głównie materiałów miękkich ▪ docieraki stosowane do docierania wstępnego oraz wykończeniowego
cyna/ołów	<ul style="list-style-type: none"> ▪ jeden z najbardziej miękkich docieraków ▪ docieraki stosowane do precyzyjnego docierania materiałów o niskiej twardości
ceramika techniczna	<ul style="list-style-type: none"> ▪ jeden z najtwardszych docieraków ▪ docieraki wykorzystywane do specjalnych zastosowań oraz obróbki elementów ceramicznych oraz materiałów twardych
kompozyty	<ul style="list-style-type: none"> ▪ mieszanka żywic syntetycznych i cząstek metali wraz z materiałami utwardzającymi ▪ wysoka wydajność obróbki ▪ docieraki stosowane do zaawansowanej obróbki materiałów o różnych twardościach, możliwość uzyskania powierzchni lustrzanych

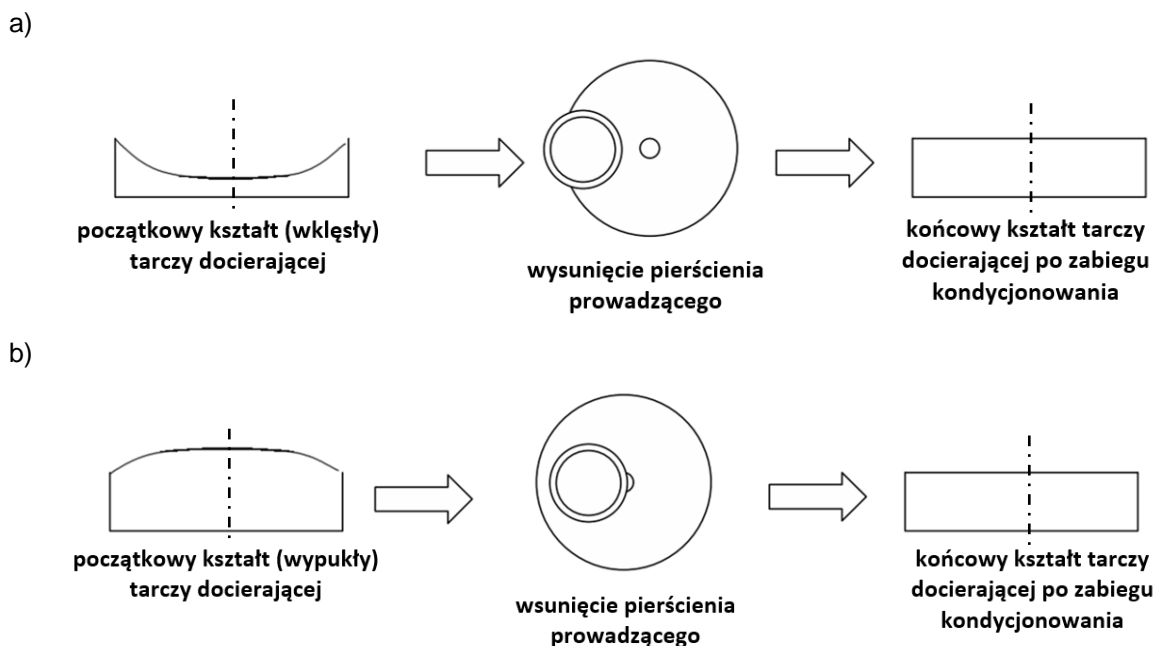
Wybór konstrukcji oraz rodzaju materiału, z którego zbudowany jest docierak uzależnione są od wielu czynników m.in. wymaganej chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu, jego geometrii, twardości oraz oczekiwanej płaskości powierzchni, a także zakładanej wydajności procesu docierania związanej z szybkością usuwania materiału. Najważniejsze czynniki docieraków dotyczą zatem rodzaju i twardości jego materiału, właściwości mechanicznych, makrogeometrii oraz stanu płaskości powierzchni roboczej, a także konstrukcji narzędzia (**Klocke, 2009**).

Stan powierzchni roboczej docieraka, tj. jego topografia i chropowatość, stanowią jedne z głównych aspektów wpływających na uzyskane efekty obróbkowe oraz wydajność procesu. Odchyłka płaskości czynnej powierzchni narzędzia oraz jego kształt wpływają na dokładność kształtową obrabianego elementu i stanowią kluczowy czynnik decydujący o jakości dotartej powierzchni. Obecnie najczęściej stosowane są docieraki płaskie, okrągłe oraz pierścieniowe – rysunek 5 (**Górecki, 2005**).



Rysunek 5. Przykłady wybranych docieraków stosowanych w różnych rodzajach docierania: a) docierak do powierzchni płaskich; b) docierak pierścieniowy do wałków; c) docierak stożkowy do otworów; d) docierak do docierania obwodowego powierzchni cylindrycznych; e) docierak do docierania kształtowego; f) docierak do kulistych wgłębień; 1 – docierak, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – płyn obróbkowy (nośnik ziaren), 4 – napęd docieraka, 5 – separator przedmiotowy, 6 – napęd pierścienia prowadzącego (Górecki, 2005; Klocke, 2009)

Podczas procesu docierania stosowane narzędzie ulega zużyciu, co może doprowadzić do wystąpienia niepożądanych z punktu widzenia jakości obrabianych powierzchni odchyłek płaskości. Możliwe jest zatem przyjęcie przez tarczę docierającą kształtu wklęsłego, wypukłego lub z osiowym biciem jej powierzchni roboczej (Stähli, 2013; Barylski and Piotrowski, 2017). W celu przywrócenia pierwotnej płaskości powierzchni narzędzia koniecznym jest zatem jego okresowe wyrównywanie, określane jako zabieg kondycjonowania. Wyrównywanie tarczy docierającej może być realizowane poprzez zmianę położenia pierścienia prowadzącego (jego wsunięcie bądź wysunięcie) – rysunek 6. Oprócz położenia pierścienia prowadzącego kluczową rolę odgrywa jego ciężar, a także wielkość wykorzystywanych w procesie docierania ziaren ściernych (Parate and Yarasu, 2014; South Bay Technology, 2019b, 2019c).



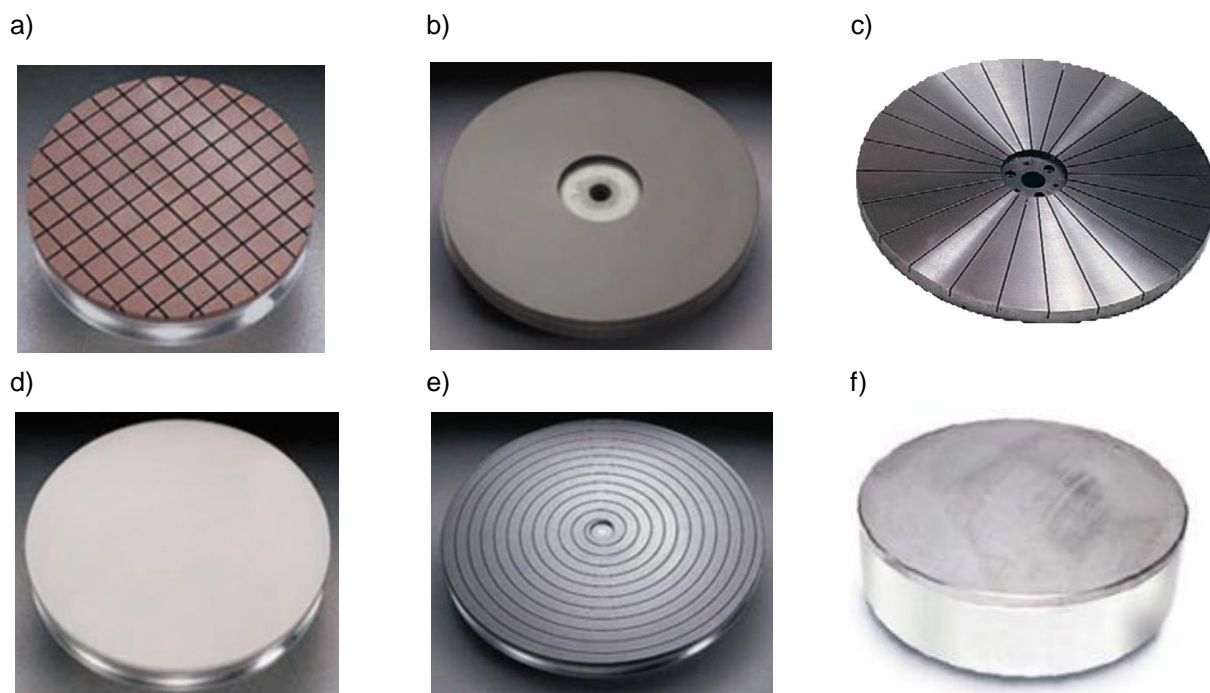
Rysunek 6. Schematy poglądowe przedstawiające sposoby kondycjonowania: a) tarczy docierającej o początkowym kształcie wklęsłym poprzez wysunięcie pierścienia prowadzącego; b) tarczy docierającej o początkowym kształcie wypukłym poprzez wsunięcie pierścienia prowadzącego (**South Bay Technology, 2019a**)

Właściwości mechaniczne oraz struktura materiału wpływają bezpośrednio na odporność ścierną narzędzia, co przekłada się również na uzyskaną jakość docieranej powierzchni. Kolejny czynnik stanowi makrogeometria powierzchni roboczej docieraka, która powinna zapewniać odpowiednie rozprowadzanie i utrzymanie mikroziaren ściernych. W zależności od założonej szybkości usuwania materiału stosowane są docieraki gładkie oraz posiadające specjalne rowki. Szczególnie w przypadku obróbki dużych powierzchni, rowkowania umożliwiają równomierne rozprowadzanie ziaren ściernych na powierzchni narzędzia. Dodatkowo wykorzystywane są również do odprowadzania cząstek zeskrabanego materiału bezpośrednio ze strefy obróbki (**Feld, 2003**).

Kolejnym istotnym czynnikiem jest twardość materiału docieraka, która wpływa bezpośrednio na proces wciskania mikroziaren ściernych i powinna być dobrana przy uwzględnieniu twardości obrabianego materiału. Zastosowanie docieraków o zbyt niskiej twardości, z uwagi na nadmierne wbijanie się ziaren ściernych w czynną powierzchnię narzędzia, powoduje trudności w przeprowadzeniu obróbki. Przy wykorzystaniu zbyt twardego materiału ziarna ścierna wciskane są w powierzchnię docieranego przedmiotu, co skutkuje ich szybkim zużyciem i małą wydajnością procesu docierania. W przypadku docierania precyzyjnego stosowane są powszechnie docieraki miedziane, które w porównaniu do twardszych docieraków żeliwnych ulegają jednak szybszemu zużyciu. Istotny wpływ na uzyskiwane efekty obróbkowe odgrywa również konstrukcja narzędzia. W praktyce przemysłowej stosowane są dwa podstawowe rodzaje docieraków: aktywizowane (zbrojone) w sposób swobodny oraz wymuszony. Inny podział dotyczy ilości materiałów tworzących narzędzie. Wyróżnić tu można docieraki jednolite, najczęściej żeliwne oraz składane (tabletkowe), które złożone są dwóch lub więcej metali np. docieraki żeliwno-miedziane (**Feld and Barylski, 1979; Feld, 2003**). Według autorów prac (**Stähli, 2013; Parate and Yarasu, 2014**) tarcze docierające można podzielić na cztery kategorie:

- miękkie docieraki, które wykonane są z miedzi, stopów aluminium, filcu lub tworzywa sztucznego;
- docieraki średniej twardości np. żeliwne lub z miękkiej ceramiki o twardości w zakresie 140-220 HB;
- docieraki twarde, wytwarzane z hartowanej stali, żelaza, a także twardej ceramiki o twardości powyżej 500 HB;
- docieraki multimateriałowe, które stanowią połączenie kilku różnych metali bądź są wynikiem spieku proszków metali.

Przykładowe tarcze docierające wykonane ze wskazanych materiałów zaprezentowano na rysunku 7.



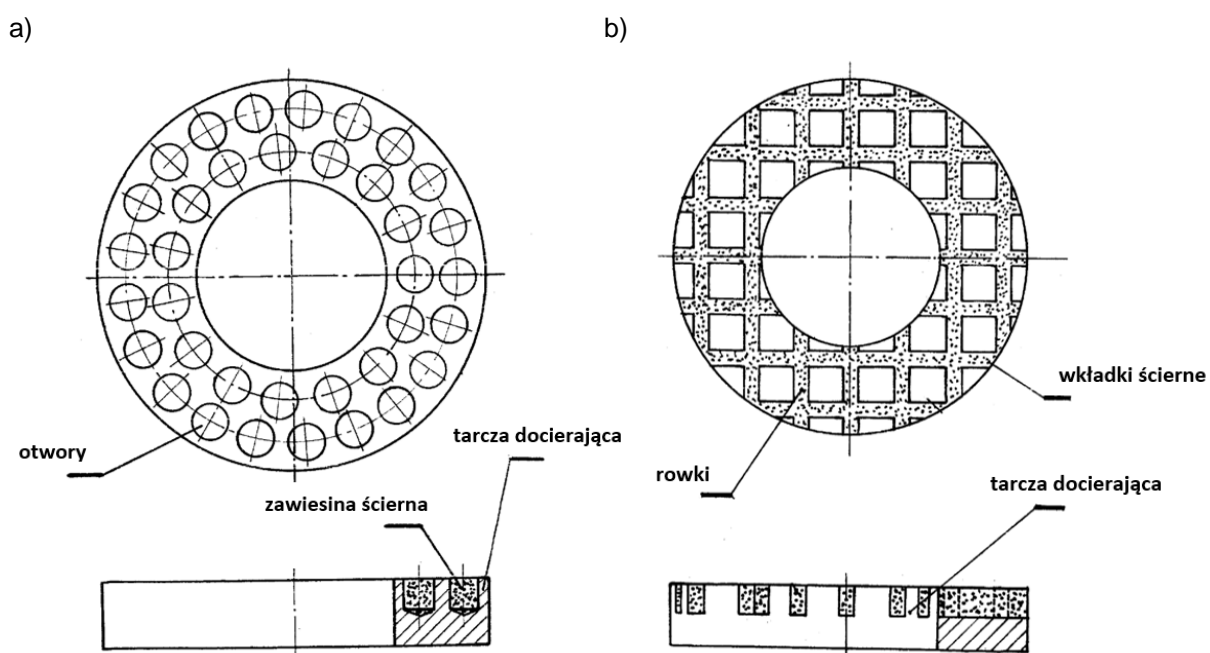
Rysunek 7. Wybrane rodzaje tarcz docierających: a) miedziana; b) żeliwna; c) żelazna; d) ceramiczna; e) na bazie cyny; f) z materiału kompozytowego na bazie stopu ołowiu, cyny i antymonu (**Kemet, 2019b, 2022; Engis, 2022**)

Kolejnym czynnikiem docierania, który oddziałuje bezpośrednio na narzędzie, jest temperatura procesu. Ciepło może być generowane zarówno wskutek ruchu ziaren ściernych poruszających się pomiędzy obrabianym przedmiotem a tarczą docierającą, jak również kontaktu pierścieni prowadzących z powierzchnią narzędzia (**Molenda, Charchalis and Barylski, 2010**). Docieranie stanowi jednak przykład procesu niskotemperaturowego, w którym niewielka ilość wydzielanego ciepła nie wpływa istotnie na uzyskiwane efekty obróbkowe. Ponadto nowoczesne maszyny wyposażone są w specjalne urządzenia, które służą do kontroli temperatury tarczy docierającej, a także odprowadzania ciepła bezpośrednio ze strefy obróbki m.in. poprzez wbudowane w narzędzia systemy chłodzenia wodą (**Marinecsu, Uhlmann and Doi, 2006; Molenda and Charchalis, 2014**).

1.4. Problematyka dokładnej obróbki ścierniej powierzchni płaskich w aspekcie wykorzystywanych narzędzi ściernych

Stosowanie nowoczesnych i wydajnych metod obróbki ścierniej, takich jak m.in. szlifowanie szybkościowe (*ang. high speed grinding*), szlifowanie z kinematyką docierania (*ang. grinding with lapping kinematics*), docieranie i polerowanie przy użyciu żywicznych narzędzi zawierających ziarna diamentowe oraz wykorzystujące różne mechanizmy ściernie (*ang. semi-fixed and fixed abrasive tools*), a także docieranie bez użycia zawiesiny ścierniej (*ang. slurry-free lapping*), związane jest z rozwojem wykorzystywanych narzędzi obróbkowych (Yao, Zhu and Peng, 2011; Luo, Lu and Xu, 2016). Z tego powodu jeden z kluczowych kierunków rozwoju obróbki ścierniej, w tym technologii docierania, stanowi opracowywanie nowoczesnych narzędzi ściernych, których celem jest poprawa uzyskiwanych efektów technologicznych oraz wydajności procesu obróbki (Oliveira et al., 2009). Przykład niekonwencjonalnych narzędzi mogą stanowić stosowane podczas szlifowania szybkościowego ściernice o spoiwach galwanicznych oraz żywicznych z ziarnami ścierniwa diamentowego, a także regularnego azotku boru (Naik, Mathew and Vijayaraghavan, 2019; Deja and Zieliński, 2020).

Prace nad modyfikacją kształtów i struktur standardowych docieraków znane są z polskich zgłoszeń wynalazków (Barylski, 1997a, 1997b). W pracy (Barylski, 1997b) przedstawiono koncepcję budowy tarczy docierającej zawierającej otwory, które służą jako nośniki zawiesiny mikroziaren ściernych – rysunek 8a.



Rysunek 8. Wybrane koncepcje budowy tarcz docierających: a) zawierającej otwory do gromadzenia zawiesiny mikroziaren ściernych; b) z umieszczonymi wkładkami ściernymi (Barylski, 1997a, 1997b)

Kolejne rozwiązanie, które przedstawiono w pracy (Barylski, 1997a), polega na umieszczeniu w standardowej tarczy docierającej wkładek ściernych, wykonanych na bazie węgla krzemowego – rysunek 8b. W kolejnej pracy (Barylski, 2013b) zaprezentowano przykłady konstrukcji tarczowych narzędzi jednolitych oraz składanych (tabletkowych), które przeznaczone są do obróbki powierzchni

płaskich zarówno na docierarkach jedno- , jak również dwutarczowych. Omówiono w niej również koncepcję prototypowych narzędzi ścierno-metalowych oraz sposoby rozmieszczenia wkładek ściernych. Efekty obróbkowe związane z zastosowaniem narzędzia ścierno-metalowego zawierającego na powierzchni czynnej kołowe wkładki ścierne, które wykonano na bazie węgla boru i miedzi elektrolitycznej, przedstawiono w pracach (**Barylski, 2013b, 2013c**). W wyniku przeprowadzonych eksperymentów wykazano, iż pomimo spadku wydajności procesu docierania, uzyskano niższe wartości parametrów chropowatości obróbki elementów z ceramiki technicznej w porównaniu do tradycyjnego procesu docierania z wykorzystaniem standardowego docieraka żeliwnego. Obróbka narzędziem ścierno-metalowym wpłynęła zatem na znaczną poprawę jakości uzyskanej powierzchni.

Oprócz rodzaju konstrukcji docieraków istotne znaczenie ma również materiał, z którego wykonano narzędzie. Przegląd literatury wskazuje, iż głównymi problemami powszechnie wykorzystywanych docieraków żeliwnych są niska wydajność procesu obróbki, mała odporność na korozję oraz słaba zdolność do gromadzenia i utrzymania ziaren ściernych na powierzchni narzędzia. Z tego powodu wielu autorów podjęło próbę opracowania nowego typu narzędzi ściernych. Autorzy pracy (**Moon et al., 2015**) zaproponowali narzędzie ścierne składające się z utwardzanej żywicy oraz diamentowego materiału ściernego w formie aglomeratu, które następnie wykorzystano do docierania szkła oraz szafiru, bez użycia standardowej zawiesiny ścierniej tzw. *slurry free lapping*. Wyniki przeprowadzonej obróbki wskazały na wzrost wydajności procesu docierania w porównaniu do zastosowania luźnych diamentowych ziaren ściernych. W pracy (**Zhang and Tani, 2017**) przedstawiono natomiast wyniki docierania szkła sodowo-wapiennego z zastosowaniem tarcz docierających wykonanych ze stali nierdzewnej o różnej twardości. Celem użycia tego typu materiału była poprawa wydajności procesu docierania oraz odporności na korozję narzędzia w stosunku do tradycyjnych żeliwnych docieraków. Przeprowadzone eksperymenty wskazały, iż docieraki wykonane ze stali nierdzewnej umożliwiły szybsze usuwanie materiału, przy jednoczesnym uzyskaniu nieznacznie wyższej chropowatości powierzchni w porównaniu do docierania narzędziem żeliwnym. Szybkość usuwania kruchego materiału, jakim jest szkło sodowo-wapienne, zwiększała się wraz ze wzrostem twardości docieraków wykonanych ze stali nierdzewnej. Ponadto udowodniono istotny wpływ przeprowadzonej obróbki cieplnej oraz sposobu kondycjonowania docieraka na wydajność procesu docierania. Zastosowanie obróbki cieplnej spowodowało zwiększenie twardości docieraków ze stali nierdzewnej, co wpłynęło tym samym na wzrost wydajności procesu docierania. Kondycjonowanie narzędzia poprzez zabieg chemicznego wytrawiania umożliwiło również zwiększenie tempa usuwania materiału z docieranego przedmiotu.

Autorzy prac (**Kawahata et al., 2015a, 2015b**) skupili się na opracowaniu docieraka zawierającego wypełniacze włókniste ze stali nierdzewnej, które zanurzono w żywicy epoksydowej. Wykazano w nich, iż zastosowanie wypełniaczy włóknistych tworzących na powierzchni narzędzia drobne nierówności pozwoliło na lepsze utrzymanie ziaren ściernych podczas procesu docierania. Udowodniono również, iż zwiększenie zawartości wypełniaczy włóknistych może wpłynąć na polepszenie właściwości ściernych narzędzia oraz jednoczesne powstanie niekorzystnych, z punktu widzenia uzyskiwanych efektów obróbkowych docierania oraz odporności na ścieranie narzędzia,

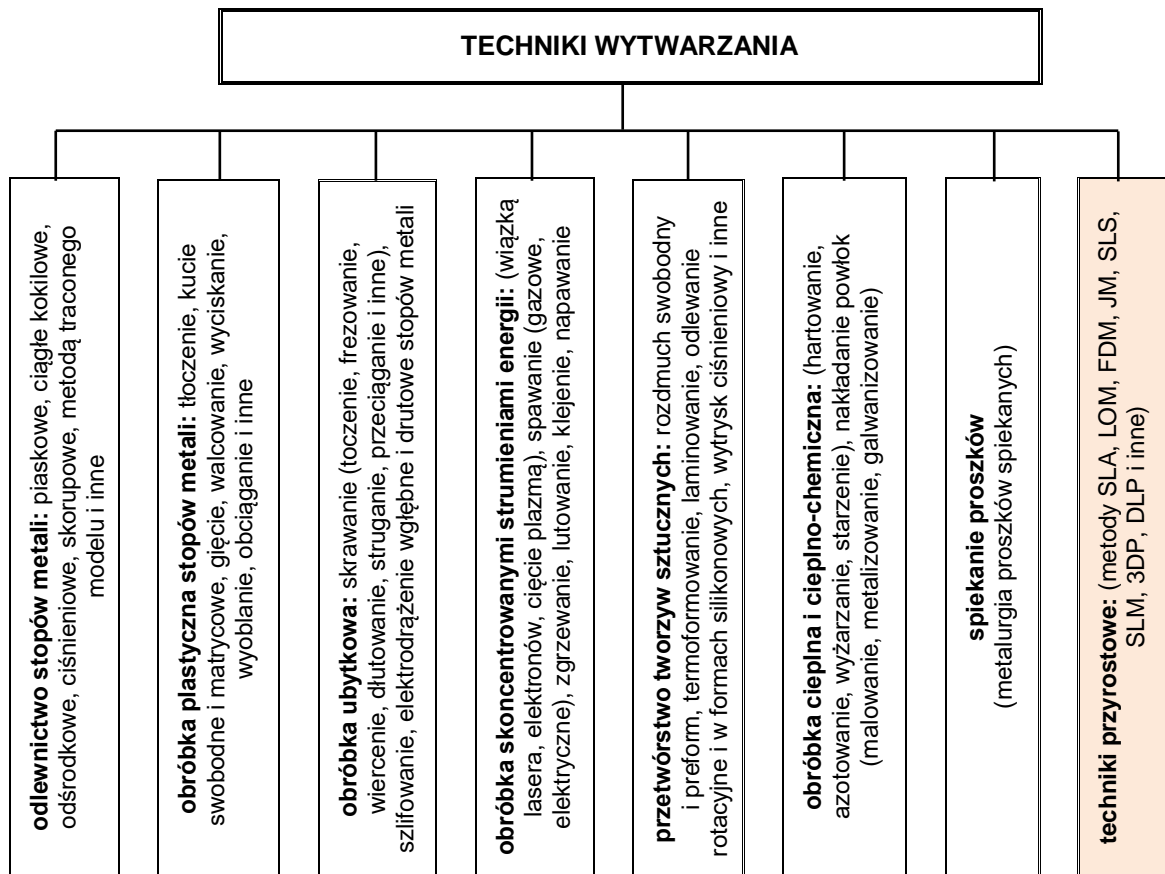


zanieczyszczeń w formie pęcherzyków powietrza. W pracy (**Kawahata et al., 2017**) przedstawiono z kolei wyniki docierania jednostronnego szafiru przy użyciu docieraków z różną zawartością włókien metalowych. Dodatkowo zbadano wpływ obróbki powierzchniowej wykorzystanych włókien na szybkość i wielkość usuwania materiału oraz chropowatość uzyskanej powierzchni. Celem przeprowadzonej obróbki była likwidacja powstałych pęcherzyków powietrza. Z uzyskanych rezultatów wynika, iż zastosowanie 40% zawartości wypełniacza poddanego wcześniejszej obróbce powierzchniowej umożliwiło poprawę jego własności ściernych. W porównaniu do docierania tradycyjnym docierakiem żeliwnym, wydajność obróbki zwiększyła się o około 28%, przy jednoczesnym uzyskaniu zbliżonej odporności na ścieranie narzędzia oraz chropowatości obrabianej powierzchni. Kolejny przykład, który zaprezentowano w pracach (**Kim et al., 2015; Pyun et al., 2018**), stanowi wytwarzanie tarcz docierających na bazie mieszaniny żywicy oraz cząstek metalu. Autorzy pracy (**Kim et al., 2015**) testowali żywiczne narzędzia zawierające ziarna ściernie z Cu, Sn oraz Al. Zastosowanie najtwardszych spośród wszystkich analizowanych ziaren Cu umożliwiło przeprowadzenie najbardziej efektywnej obróbki próbek szafirowych. Ponadto, jak zaprezentowano w pracy (**Pyun et al., 2018**), wbijające się w żywiczno-miedziane podłoże tarczy docierającej ziarna diamentowe umożliwiły przeprowadzenie tzw. docierania dwuczęściowego (*ang. 2-body abrasive*), które w porównaniu do standardowego docierania luźnym ścierniwem, tzw. docierania trzyczęściowego (*ang. 3-body abrasive*) jednolitymi metalowymi docierakami, pozwala na znacznie efektywniejsze usuwanie materiału (**Rabinowicz, Dunn and Russell, 1961**). Połączenie mechanizmu ścierania dwu- oraz trzyczęściowego może stanowić zatem efektywny proces obróbki materiałów ceramicznych. Autorzy wykazali również, iż wielkość stosowanych ziaren ściernych, proporcje ich łączenia z płynną żywicą, a także zawartość środka wiążącego oraz geometria rowków występujących na powierzchni narzędzia, wpływają istotnie na wydajność procesu obróbki oraz jakość docieranych powierzchni.

Przegląd wybranych prac naukowych potwierdza zatem tendencję dotyczącą modyfikacji istniejących i opracowywania nowych narzędzi ściernych, w tym również docieraków oraz sposobów ich wytwarzania. Wydajność procesu docierania oraz jakość obrabianej powierzchni uzależnione są od szeregu czynników związanych z zastosowanym narzędziem. Według autorów analizowanych prac do najważniejszych z nich należą: rodzaj materiału, z którego wykonany jest docierak, jego konstrukcja, sposób kondycjonowania narzędzia, mechanizm procesu ścierania, a także przeprowadzona obróbka cieplna.

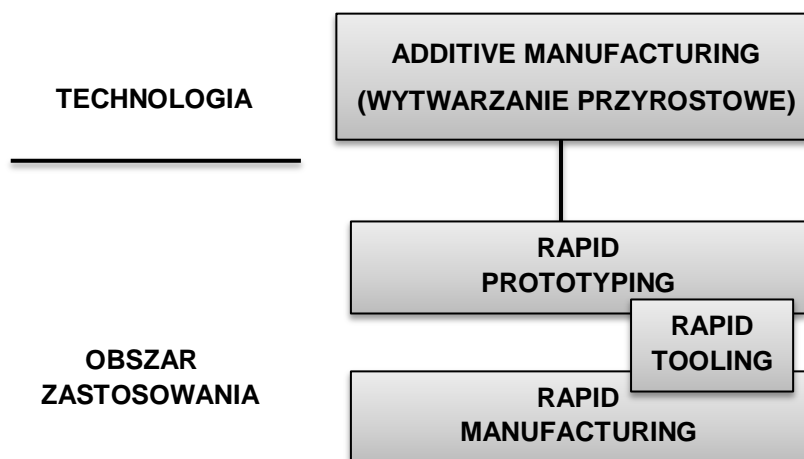
2. ADDYTYWNE METODY WYTWARZANIA

Addytywne metody wytwarzania (*ang. additive manufacturing - AM*), nazywane często technologiami przyrostowymi lub potocznie drukiem 3D (*ang. 3D printing – 3DP*), stanowią zbiór metod umożliwiających warstwowe budowanie obiektów na podstawie ich modeli komputerowych 3D bez użycia dodatkowych narzędzi produkcyjnych (**Gebhardt, 2012; Noorani, 2017**). Cechą charakterystyczną technologii przyrostowych, która odróżnia je od tradycyjnych technik wytwarzania takich jak odlewnictwo, obróbka plastyczna oraz obróbka ubytkowa, jest stopniowe budowanie modeli poprzez nanoszenie i łączenie ze sobą kolejnych warstw materiału aż do uzyskania pełnej geometrii wyrobu. Technologie przyrostowe (addytywne) stanowią zatem odwrotność tradycyjnych metod obróbki ubytkowej (subtraktywnej). Jak przedstawiono w pracach (**Lee et al., 2017; Hong et al., 2018**), wytwarzanie przyrostowe uznawane jest za przyjazną dla środowiska technologię produkcyjną, która umożliwia osiągnięcie wielu korzyści dotyczących m.in. oszczędności energii, mniejszego zużycia materiałowego oraz bardziej efektywnej produkcji. Nieustanny rozwój, szczególnie zauważalny w ostatnich latach i związany z wytwarzaniem elementów o coraz wyższej jakości oraz trwałości, spowodował silny wzrost zainteresowania tą technologią ze strony różnych sektorów przemysłu. Współcześnie wykorzystywane metody, w tym głównie technologie proszkowe, umożliwiają produkcję w pełni funkcjonalnych i spersonalizowanych części oraz narzędzi produkcyjnych (**Thompson et al., 2016; Tofail et al., 2018**). Z tego powodu technologie przyrostowe należy uznać za jedne z najnowocześniejszych technik wytwarzania oraz kształtowania wyrobów, której ogólną klasyfikację przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Podział współczesnych technik wytwarzania i kształtowania wyrobów stosowanych w przemyśle (Siemiński and Budzik, 2015)

Na rysunku 10 przedstawiono w sposób schematyczny podział technologii przyrostowych z uwagi na możliwe zastosowanie wytwarzanych elementów.



Rysunek 10. Klasyfikacja obszarów wykorzystania addytywnych metod wytwarzania (Gebhardt, 2013)

Pierwotny obszar zastosowania wytwarzania przyrostowego dotyczył szybkiego prototypowania (*ang. Rapid Prototyping - RP*), który, jak sama nazwa na to wskazuje, odnosi się ściśle do wytwarzania prototypów oraz modeli przyszłych wyrobów. Aktualnie, pomimo iż termin ten wykorzystywany jest bardzo często do całościowego opisu wszystkich metod przyrostowych, stanowi już przestarzałe określenie. Dynamiczny rozwój całej branży technologii przyrostowych związany m.in.

z przetwarzaniem nowoczesnych materiałów, w tym zawierających fazy wzmacniające (**Tekinalp et al., 2014; Attar et al., 2015; Bade et al., 2015; Zhao et al., 2016**), uzyskiwaniem coraz wyższych dokładności wymiarowo-kształtowych wytwarzanych elementów oraz stosowaniem nowoczesnych systemów i maszyn produkcyjnych (**Eyers and Potter, 2017; Zieliński, 2018a, 2020a**), wymaga zastosowania terminu *Rapid Manufacturing - RM*. Określenie to wskazuje jednoznacznie na możliwość wytwarzania elementów o cechach zbliżonych do części wytwarzanych przy użyciu tradycyjnych metod odlewniczych lub obróbki skrawaniem, które wytwarzane są zazwyczaj w produkcji jednostkowej lub małoseryjnej (**Ahuja, Karg and Schmidt, 2015**). Obecnie stosowane metody przyrostowe, zwłaszcza technologie proszkowe, wykorzystywane są do krótkoseryjnych produkcji technicznych w pełni funkcjonalnych części zamiennych urządzeń mechanicznych. Głównymi obszarami ich zastosowania są m.in. przemysł lotniczy oraz kosmonautyczny (**Nickels, 2015; Runze et al., 2016; Zieliński, 2018b, 2018c**), sektor morski i energetyczny, który związany jest np. z budowaniem modeli łopatek wysokoprężnych stopni turbin gazowych oraz wirników (**Vaezi, Safaeian and Chua, 2011; Iftikhar et al., 2013; Deja et al., 2018**), a także branża elektroniczna, motoryzacyjna i narzędziowa (**Dodziuk, 2019**). Prowadzone badania własne potwierdziły ponadto duży potencjał technologii proszkowych w budowaniu elementów zawierających kanały oraz otwory o niewielkich średnicach (**Zieliński, 2017; Deja et al., 2018; Deja and Zielinski, 2019**). Technologie addytywne wykorzystywane są powszechnie również do wytwarzania wyrobów medycznych m.in. dla branży stomatologicznej, implantologicznej oraz ortopedycznej (**Gu et al., 2015; Popescu, Laptiou, et al., 2018**).

Kolejny dynamicznie rozwijający się obszar wykorzystujący olbrzymi potencjał technologii przyrostowych stanowi branża narzędziowa (*ang. Rapid Tooling - RT*). Związana jest ona z szybkim wytwarzaniem narzędzi oraz elementów oprzyrządowania produkcyjnego, głównie za pośrednictwem metod addytywnych. Technologie przyrostowe, zwłaszcza metody proszkowe, służą m.in. do produkcji gniazd form wtryskowych, form odlewniczych, matryc oraz tłoczników, za pośrednictwem których wykonywane są modele oraz prototypy przedprodukcyjne. Coraz częściej znajdują również zastosowanie w wytwarzaniu innowacyjnych narzędzi o nietypowych kształtach, które z punktu widzenia złożoności geometrii są trudne do wykonania przy użyciu tradycyjnych metod odlewniczych (**Gebhardt, 2013; Afonso et al., 2019**). Przykłady współcześnie wykonywanego technologiami addytywnymi oprzyrządowania, w tym narzędzi przeznaczonych do obróbki ściernej, przedstawiono w dalszej części pracy.

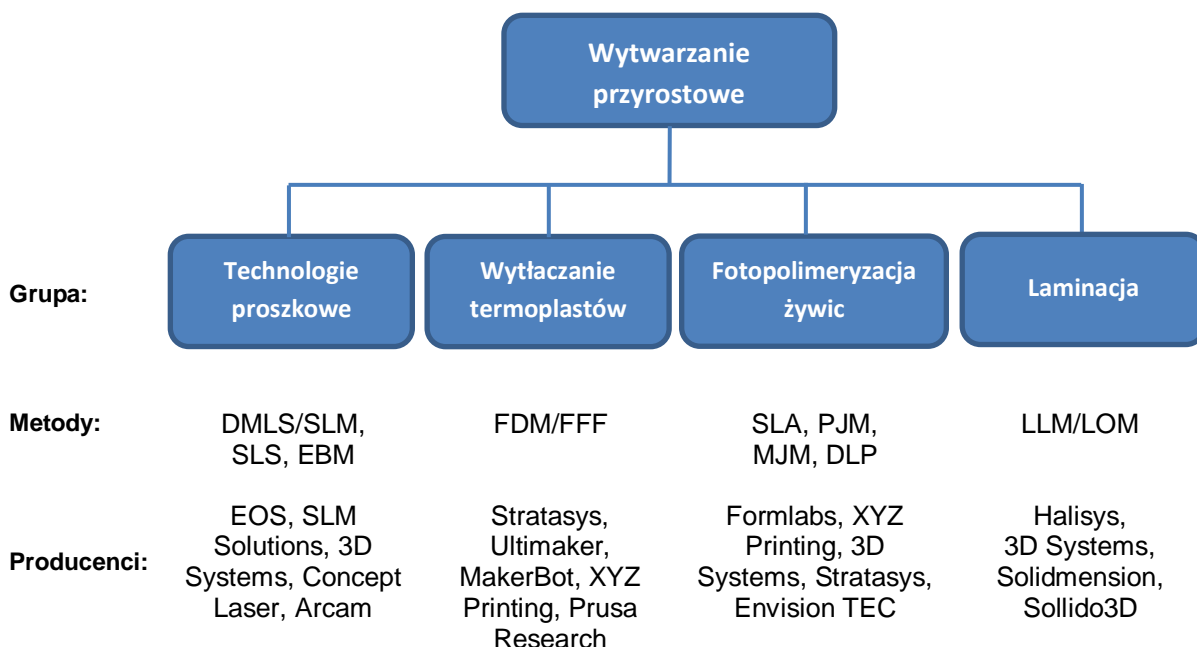
2.1. Klasyfikacja metod przyrostowych

Współcześnie wykorzystywane metody przyrostowe zróżnicowane są pod kątem wielu czynników. Do najważniejszych z nich należą (**VDI, 2014; Noorani, 2017**):

- sposób nanoszenia kolejnych warstw materiału oraz zasada budowy obiektu;
- forma i rodzaj przetwarzanego materiału;
- źródło wykorzystywanej w procesie budowy elementu energii;
- wielkość drukowanych elementów.



Każda z metod przyrostowych, w zależności od klasy zastosowanego systemu produkcyjnego (**Vayre, Vignat and Villeneuve, 2012**) oraz rodzaju przetwarzanego materiału, pozwala na uzyskiwanie odmiennych właściwości mechanicznych i użytkowych wytwarzanych obiektów. Dodatkowo elementy zróżnicowane są pod względem uzyskiwanej dokładności wymiarowo-kształtowej, a także jakości powierzchni i wymagań dotyczących dalszej obróbki wykończeniowej. Końcowa jakość i cechy produktu determinują tym samym obszar jego przyszłego zastosowania. Klasyfikacja metod przyrostowych może odbywać się zatem w oparciu o różne kryteria. Do najważniejszych z nich należy sposób budowy modelu fizycznego oraz rodzaj i forma przetwarzanego materiału. Aktualnie występuje siedem podstawowych grup tego typu metod. Na rysunku 11 przedstawiono najczęściej występujący w literaturze podział wytwarzania addytywnego z uwagi na rodzaj i formę wykorzystywanego w procesie materiału z uwzględnieniem wybranych głównych grup technologii przyrostowych. Dodatkowo wskazano najważniejsze z metod należących do poszczególnych grup oraz czołowych producentów systemów i maszyn produkcyjnych dla każdej z nich.



Rysunek 11. Podział metod przyrostowych z uwagi na rodzaj i formę przetwarzanego materiału (**Gebhardt, 2013; Tofail et al., 2018; Ślusarczyk, 2019**); rozwinięcie skrótów w tabeli 3

Biorąc pod uwagę rodzaj i formę przetwarzanych materiałów, wytwarzanie przyrostowe można podzielić zasadniczo na cztery główne grupy (**Noorani, 2017**):

- technologie proszkowe tzw. *Powder Bed* lub *Powder-based*, które w zależności od zastosowanej metody polegają na spiekaniu lub przetapianiu kolejnych warstw materiału w formie proszku;
- wytłaczanie roztopionego tworzywa sztucznego tzw. *Extrusion* lub *Solid-based*, którego cechą charakterystyczną jest wytłaczanie nawiniętego na szpulę materiału w formie żyłki przez głowice drukujące;
- fotopolimeryzacja tzw. *Light Polymerized* lub *Liquid-based*, która polega na drukowaniu elementów z żywicy utwardzanych światłem lasera lub ultrafioletowym (UV);

- laminacja tzw. *Laminated*, polegająca na łączeniu ze sobą kolejnych warstw materiału dostarczanego w postaci termozgrzewalnych arkuszy folii.

Bez względu na rodzaj zastosowanej metody sposób łączenia kolejnych warstw materiału może odbywać się w oparciu o tworzenie wiązań chemicznych pomiędzy nimi, ich spiekanie lub klejenie. Pierwszy rodzaj łączenia warstw nakładanego materiału wykorzystywany jest m.in. w technologii stereolitografii SLA (*ang. stereolithography*) oraz metod wytłaczania tworzyw termoplastycznych FDM/FFF (*ang. fused deposition modeling/fused filament fabrication*). W przypadku metod proszkowych druku 3D generowany obiekt powstaje wskutek spiekania lub przetapiania kolejnych warstw materiału w formie proszku. Innym sposobem, wykorzystywanym m.in. w metodzie LLM/LOM (*ang. layer laminated manufacturing/layer object manufacturing*), jest nanoszenie i łączenie ze sobą materiałów w formie termozgrzewalnych folii pokrytych jednostronnie u dołu klejem (**Siemiński and Budzik, 2015**). W tabeli 3 przedstawiono zestawienie komercyjnie wykorzystywanych obecnie metod przyrostowych wraz z ich krótką charakterystyką.

Tabela 3. Zestawienie komercyjnie wykorzystywanych metod przyrostowych z charakterystyką sposobu budowy modelu fizycznego oraz źródła generowanej do procesu przyrostowego energii (**Gebhardt, 2012; VDI, 2014; Zieliński, 2020b, 2021a, 2021b, 2022**)

Technologia druku 3D		Sposób wytwarzania elementu	Energia wykorzystywana w procesie wytwarzania
Skrótowa nazwa	Pełna nazwa		
SLS	Selective Laser Sintering	selektywne spiekanie laserowe proszków tworzyw sztucznych	skupiona wiązka promieni generowanych przez laser, najczęściej CO ₂
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	selektywne przetapianie proszków metali o różnych temperaturach topnienia (pojedyncze metale i ich stopy)	wiązka promieni lasera
SLM	Selective Laser Melting	selektywne przetapianie proszków metali o jednakowej temperaturze topnienia (pojedyncze metale)	wiązka promieni lasera
EBM	Electron Beam Melting	stapianie materiałów w formie proszków za pośrednictwem wiązki elektronów	chmura elektronów wytwarzana przez generator wiązki elektronów
FDM/FFF	Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication	wytłaczanie stopionego tworzywa termoplastycznego z głowic drukujących oraz jego rozprowadzanie na platformie roboczej	stapianie i wytłaczanie materiału w formie filamentu (żyłki nawiniętej na szpulę) przez rozgrzane dysze
SLA	Stereolithography (Stereolitografia)	fotopolimeryzacja ciekłej żywicy	wiązka promieni lasera
PJM/MJM	Poly-Jet Modeling/Multi-Jet Modeling	natryskiwanie przez piezoelektryczne głowice drukujące ciekłej żywicy oraz jej utwardzanie światłem ultrafioletowym (UV)	wiązka promieni światła UV wytwarzanego przez generator
DLP	Digital Light Processing	utwardzanie fotopolimerów	światło projektora UV

Jedną z najstarszych metod stanowi stereolitografia SLA, która została opatentowana w 1984 roku przez Charlesa Hulla, późniejszego założyciela firmy 3D Systems. Metoda ta bazuje na procesie fotopolimeryzacji. Budowany obiekt powstaje wskutek utwardzania kolejnych warstw żywicy fotopolimerowej światłem lasera. Od czasu pojawienia się metody stereolitografii opracowano wiele innych technologii przyrostowych, które są nieustannie rozwijane i udoskonalane. Aktualne trendy przemysłowe związane są z uprzemysłowieniem produkcji addytywnej. Obecnie możliwe jest bowiem realizowanie hybrydowego wytwarzania przyrostowego, które polega na łączeniu w obrębie jednej maszyny procesu addytywnego np. metodą metalowego osadzania laserowego (*ang. Direct Energy Deposition*) z technologią obróbki skrawaniem CNC. W przypadku budowania obiektów wielkogabarytowych zastosowanie znajdują natomiast technologie oparte na spajaniu, a także nowoczesne metody przyrostowe m.in. z piasku oraz proszków ceramicznych.

Technologie przyrostowe, zwłaszcza metody proszkowe, wykazują kilka ważnych cech, dzięki którym stanowią konkurencję dla tradycyjnych metod odlewniczych, formowania wtryskowego oraz obróbki skrawaniem. Do najważniejszych z nich należą **(Berman, 2012; Ford and Despeisse, 2016; Thompson et al., 2016; Ngo et al., 2018; Dodziuk, 2019; Kadir, Yusof and Wahab, 2020)**:

- duża swoboda w projektowaniu oraz wytwarzaniu elementów o złożonych i skomplikowanych geometriach, w tym elementów zawierających puste przestrzenie wewnątrz obiektów w formie np. otworów lub kanałów chłodzących, a także części ruchomych. Wykonanie tego typu obiektów z punktu widzenia złożoności geometrii bywa kłopotliwe, a w niektórych przypadkach niemożliwe do uzyskania przy użyciu tradycyjnych metod wytwórczych;
- optymalizacja topologiczna części mechanicznych, która pozwala na redukcję masy oraz jednocześnie zwiększenie wydajności ich pracy, szczególnie w przypadku elementów wykorzystywanych w branży lotniczej oraz motoryzacyjnej;
- krótki i mało skomplikowany proces wytwórczy. Budowa elementów w przypadku technologii przyrostowych bazuje na ich modelach 3D. Czas wykonania elementu na drukarce 3D uzależniony jest od klasy zastosowanego systemu, natomiast czas potrzebny na jego przygotowanie do produkcji jest relatywnie krótki. Zastosowanie wytwarzania przyrostowego z technologicznego punktu widzenia umożliwi szybsze i tańsze wykonywanie elementów, szczególnie o wysokim stopniu złożoności geometrii, w porównaniu z klasycznymi metodami obróbki ubytkowej;
- brak konieczności stosowania dodatkowych narzędzi produkcyjnych, co eliminuje potrzebę ich pozycjonowania i mocowania, a tym samym wpływa na ogólne zmniejszenie kosztów wytworzenia elementu;
- niewielka ilość odpadów poprodukcyjnych, co czyni wytwarzanie addytywne procesem dużo bardziej wydajnym materiałowo oraz przyjaznym dla środowiska w porównaniu z metodami obróbki skrawaniem. W przypadku metod proszkowych możliwe jest również ponowne użycie niewykorzystanego materiału budulcowego do kolejnego procesu.

Pomimo wielu zalet technologie przyrostowe są jednak bardzo wymagającymi procesami, które wymagają dużego doświadczenia oraz wiedzy użytkowników. Jakość i właściwości wytwarzanych

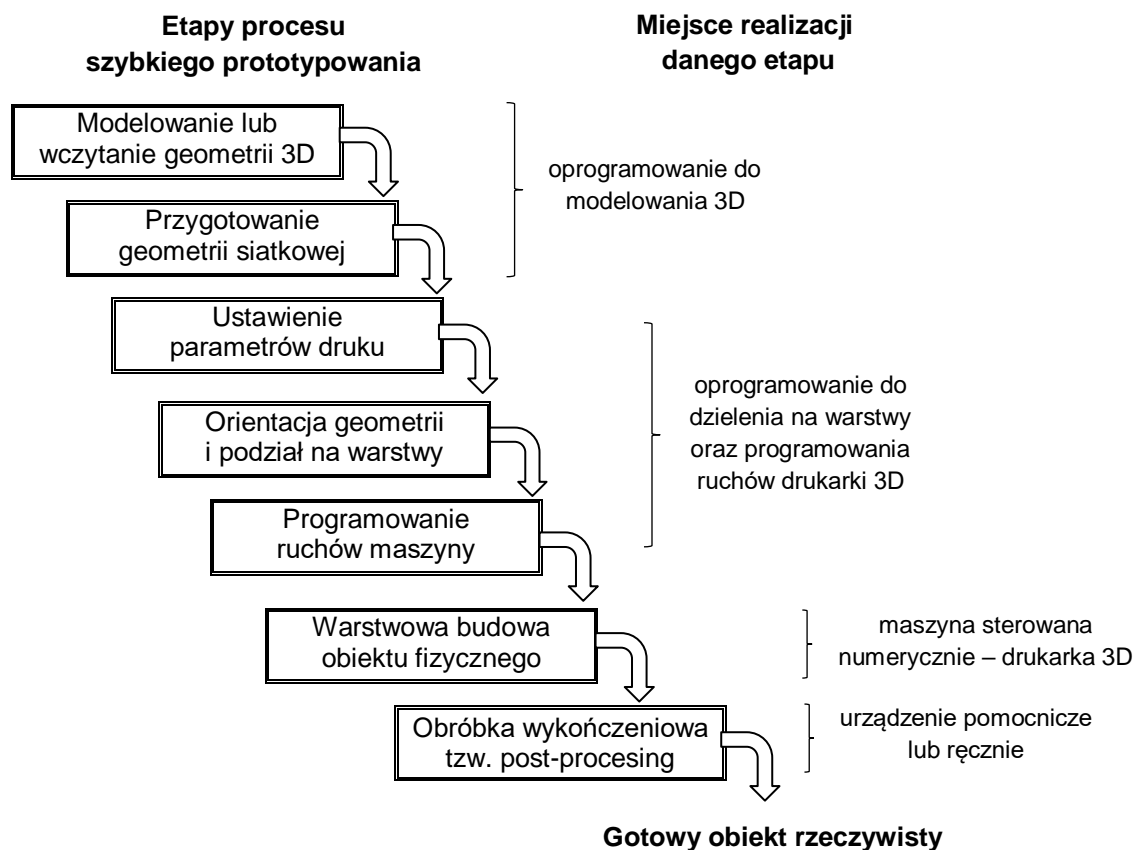
elementów uzależnione są od szeregu czynników związanych nie tylko z rodzajem przetwarzanego materiału, zastosowanej metody oraz klasy systemu produkcyjnego, ale również kwestii związanych z odpowiednim doбором parametrów procesu szybkiego prototypowania, orientacją detalu na platformie roboczej oraz wymaganą obróbką post-procesową (**Caulfield, McHugh and Lohfeld, 2007; Jain, Pandey and Rao, 2009; Bean et al., 2018; Popescu, Zapciu, et al., 2018**). Elementy wykonane przy użyciu technologii przyrostowych charakteryzują się mniejszą wytrzymałością oraz dokładnością wymiarowo-kształtową w porównaniu do detali uzyskanych tradycyjnymi metodami wytwórczymi. Dodatkowo w przypadku metod proszkowych koniecznym jest przeprowadzenie dodatkowych zabiegów, których celem jest poprawa jakości powierzchni oraz ogólnego wyglądu elementów. Aktualnie wytwarzanie przyrostowe wykorzystywane jest przede wszystkim do produkcji małoseryjnej lub jednostkowej spersonalizowanych obiektów. W przypadku potrzeby uruchomienia produkcji seryjnej stanowi wciąż nieopłacalne rozwiązanie. Kolejną kluczową kwestię stanowi opracowanie jasnego procesu certyfikacji oraz standaryzacji dla w pełni funkcjonalnych części wytwarzanych przy użyciu różnych metod przyrostowych (**Siemiński and Budzik, 2015; Thompson et al., 2016**).

2.2. Etapy procesu szybkiego prototypowania

Proces wytwarzania elementów, bez względu na rodzaj i wariant zastosowanej metody, wymaga realizacji podobnych etapów postępowania. Każdy z nich związany jest z zastosowaniem specjalnych programów oraz zapisu danych dotyczących modelu 3D obiektu w odpowiednich formatach. Rozwój technologii przyrostowych wpływa zatem znacząco również na rozwój wykorzystywanych programów klasy CAD/CAM (**Przybylski and Deja, 2007; Biehler and Fane, 2014**). Proces przyrostowego wytwarzania elementów, w zależności od miejsca i zastosowanego rodzaju oprogramowania, można podzielić na cztery główne etapy (**Gibson, Rosen and Stucker, 2010; Siemiński and Budzik, 2015; Noorani, 2017**):

- przygotowanie modelu 3D obiektu z wykorzystaniem oprogramowania CAD oraz tworzenie jego modelu powierzchniowego (geometrii siatkowej) – najczęściej zapis w formacie STL;
- tworzenie modelu warstwowego (ang. *slicing*), ustalenie parametrów procesu wydruku oraz orientacji detalu wewnątrz komory/platformy roboczej;
- przeprowadzenie procesu wydruku elementu na maszynie sterowanej numerycznie, zwanej potocznie drukarką 3D;
- przeprowadzenie obróbki wykończeniowej przy użyciu dedykowanych urządzeń i pomocy warsztatowych m.in. oczyszczenie modelu z resztek niewykorzystanego materiału, usunięcie struktur podporowych, przeprowadzenie zabiegów mających na celu poprawę ogólnego wyglądu elementu oraz jego właściwości mechanicznych.

Przedstawiony na rysunku 12 schemat prezentuje poszczególne etapy procesu szybkiego prototypowania wraz ze wskazaniem miejsc ich realizacji.

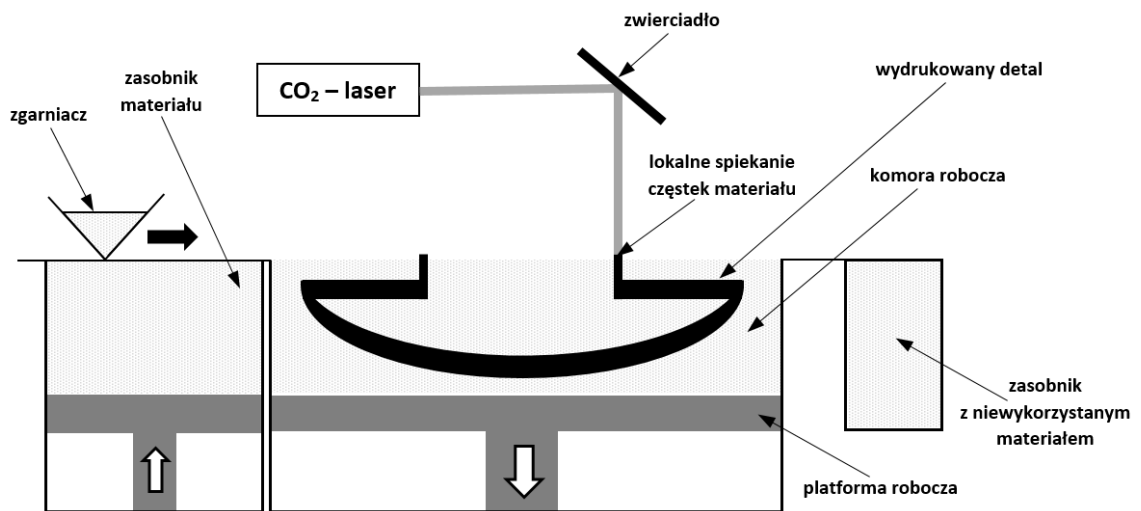


Rysunek 12. Etapy procesu szybkiego prototypowania (Siemiński and Budzik, 2015)

2.3. Metody proszkowe – technologia SLS

Metody proszkowe (*ang. Powder Bed* lub *Powder-based*), w tym wykorzystana w niniejszej pracy technologia selektywnego spiekania laserowego proszków polimerowych SLS (*ang. Selective Laser Sintering*), stanowią obecnie jedne z najbardziej popularnych i najczęściej wykorzystywanych spośród wszystkich dostępnych odmian oraz wariantów metod przyrostowych. Pozwalają bowiem na wytwarzanie elementów o złożonych geometriach przy jednoczesnym uzyskiwaniu powtarzalnych i wysokich właściwości wytrzymałościowych oraz zachowaniu jednorodnej struktury wewnętrznej materiału. Zarówno technologie proszkowe druku 3D z metalu, jak również tworzyw sztucznych (Deckard, Beaman and Darrah, 1992) odgrywają coraz większe znaczenie w różnych sektorach przemysłu. Obecnie oprócz standardowego wykonywania modeli i prototypów przyszłych obiektów, niejednokrotnie wykorzystywane są do produkcji funkcjonalnych elementów lub całych podzespołów urządzeń mechanicznych, a także prototypowych narzędzi i elementów oprzyrządowania produkcyjnego.

Ogólnie zasada budowy modelu w technologiach proszkowych jest do siebie podobna i zazwyczaj składa się z trzech następujących po sobie procesów/faz. Rysunek 13 przedstawia schemat budowy modelu fizycznego na przykładzie technologii SLS.



Rysunek 13. Zasada działania technologii SLS (VDI, 2014)

W pierwszej fazie budowy modelu zasobnik materiału oraz komora robocza, w której znajduje się platforma robocza, zostają wstępnie podgrzewane poniżej temperatury topnienia stosowanego w procesie szybkiego prototypowania rodzaju polimeru. Następnie zgarniacz, popularnie nazywany *recouterem*, rozprowadza warstwę proszku o określonej grubości (zazwyczaj 100-200 μm) na platformę roboczą drukarki 3D. W kolejnej fazie skupiona wiązka lasera pracującego w paśmie długiej podczerwieni (najczęściej CO_2) nakierowywana jest za pośrednictwem zwierciadła na rozprowadzony proszek, gdzie dochodzi do selektywnego i lokalnego spiekania (łączenia ze sobą) cząsteczek proszku tworzywa sztucznego. Po zakończeniu etapu drugiego platforma robocza obniża się o wartość odpowiadającą grubości pojedynczej warstwy nakładanego materiału. Zgarniacz rozprowadza nową warstwę materiału i cały proces selektywnego spiekania laserowego powtarza się aż do momentu uzyskania pełnej geometrii wyrobu. Jednocześnie nadmiar proszku, który nie został zatrzymany na platformie roboczej, trafia do zasobnika z niewykorzystanym materiałem. W miarę nakładania nowych warstw materiału laser powoduje ich spiekanie oraz jednocześnie topienie wcześniej spieczonej warstwy. W związku z tym cechą charakterystyczną technologii SLS jest to, iż przetwarzany materiał przechodzi kolejno ze stanu stałego w formie proszku, poprzez stan płynny i wracając ponownie do stanu stałego, uzyskując finalnie tzw. spiek. Dodatkowo proces przyrostowy odbywa się w atmosferze gazu ochronnego, najczęściej azotu, aby nie doprowadzić do spalania materiału. W przypadku technologii SLS nie jest koniecznym stosowanie jak podczas wytwarzania w technologiach DMLS/SLM dodatkowych struktur podpierających generowany model. Rolę tę pełni niespieczony proszek, który znajduje się w komorze roboczej drukarki 3D wraz z wydrukowanym modelem (Chlebus, 2000; Redwood, Schöffler and Garre, 2017; Maniruzzaman, 2019).

Po zakończeniu procesu przyrostowego wydrukowane elementy znajdujące się w komorze roboczej wraz z niespieczonym proszkiem zostają poddane kontrolowanemu chłodzeniu, które może trwać nawet do 12 h. Podstawowa obróbka post-procesowa, której celem jest usunięcie resztek niespieczonego proszku, realizowana jest poprzez zabieg piaskowania oraz końcowego oczyszczania modelu sprężonym powietrzem lub innym środkiem czyszczącym. Dodatkowo występująca porowatość wewnątrz elementów wpływa na uzyskanie ziarnistej struktury zewnętrznej. Zastosowanie dodatkowych zabiegów, takich jak m.in. bębnowanie, polerowanie, lakierowanie, barwienie oraz

malowanie natryskowe, ma więc na celu poprawę ogólnego wyglądu oraz zapewnienie ewentualnej wodoszczelności wytworzonego elementu (**Redwood, Schöffner and Garre, 2017; Zieliński, 2020b**).

2.4. Obszar Rapid Tooling

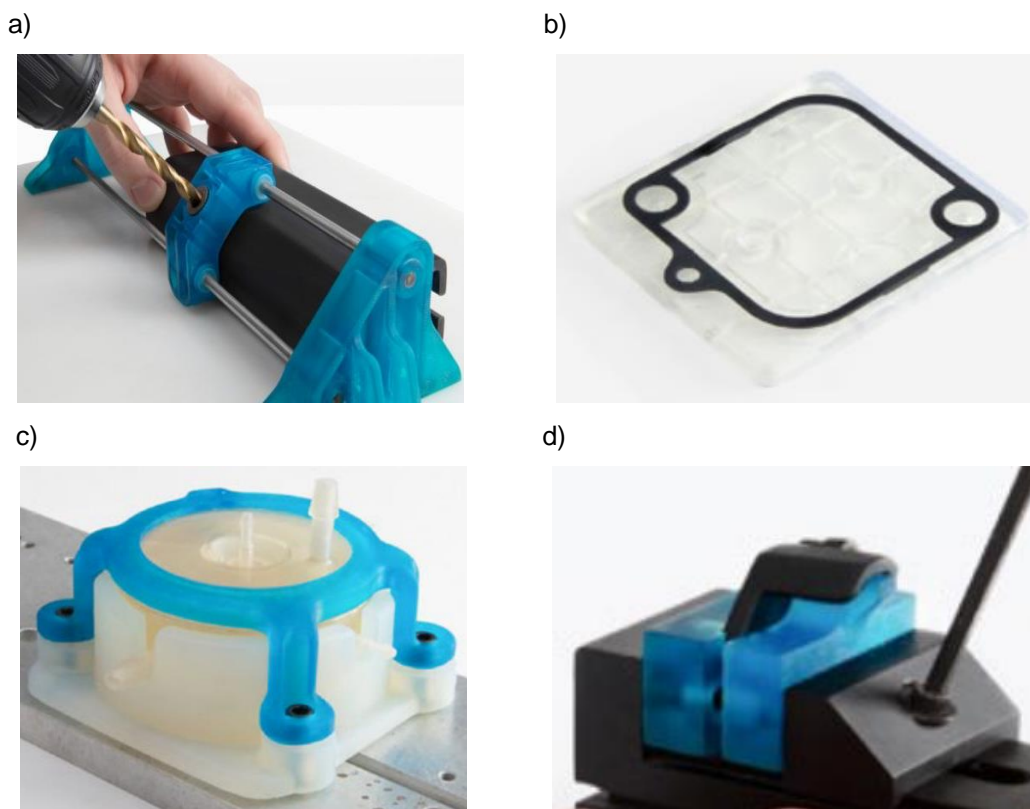
Pojęcie *Rapid Tooling* stanowi określenie metod umożliwiających wytworzenie narzędzi i ich poszczególnych elementów w krótszym niż w przypadku tradycyjnych technik wytwarzania czasie realizacji. Technologie addytywne, zwłaszcza metody proszkowe, odgrywają kluczową rolę w tym procesie, dzięki czemu są powszechnie wykorzystywane w branży narzędziowej. Metody Rapid Tooling, które związane są z szybkim wytwarzaniem narzędzi i oprzyrządowania produkcyjnego, pozwalają na wykonywanie coraz bardziej zaawansowanych i nietypowych często dedykowanych dla potrzeb indywidualnych klientów produktów (**Afonso et al., 2019**). Podstawowym założeniem technologii Rapid Tooling jest wytwarzanie oprzyrządowania m.in. form, matryc, narzędzi itd., wykorzystywanych w tradycyjnych metodach obróbki plastycznej oraz odlewaniu. Aktualnie metody przyrostowe są bowiem powszechnie stosowane do wykonywania wzorców przyszłych narzędzi oraz modeli, które stosowane są następnie jako narzędzia formujące odlewy i wypraski. Biorąc pod uwagę sposób wytwarzania narzędzi technologie Rapid Tooling można podzielić na dwa główne obszary (**Gebhardt, 2013; Equbal, Sood and Shamim, 2015**):

- bezpośrednie wytwarzanie (*ang. Direct Tooling/Prototype Tooling*) polegające na wytwarzaniu prototypowych narzędzi bezpośrednio na maszynie przeznaczonej do szybkiego prototypowania bez konieczności użycia dodatkowych modeli wzorcowych. W ten sposób budowane są nietypowe narzędzia oraz przyrządy montażowe o skomplikowanych kształtach, a także narzędzia formujące odlewy i wypraski m.in. matryce, stemple. W zależności od rodzaju zastosowanego materiału oraz wytrzymałości wydrukowanych narzędzi mogą one należeć do grupy tzw. miękkiego lub twardego oprzyrządowania, co wpływa jednocześnie na czas zużycia prototypowego narzędzia oraz koszty jego wykonania. W przypadku Direct Tooling wykorzystywana jest zatem tylko jedna metoda, która służy wytworzeniu określonego narzędzia (**Roczniak et al., 2016**);

- pośrednie wytwarzanie (*ang. Indirect Tooling*), które opiera się na budowaniu narzędzi na podstawie wcześniej wykonanych technologiami przyrostowymi modeli wzorcowych. W przypadku metod Indirect Tooling koniecznym jest zatem zastosowanie więcej niż jednej metody wytwórczej. Metody addytywne wykorzystywane są do wytwarzania modeli wzorcowych, za pośrednictwem których wykonywane są przyszłe narzędzia. Otrzymane wzorce umożliwiają na zasadzie tzw. negatywu odtworzenie geometrii kształtowanego wyrobu. Pośrednie metody RP służą przede wszystkim do wytwarzania gniazd form wtryskowych w produkcji małoseryjnej. Do najczęściej stosowanych metod tego typu należy odlewanie próżniowe tworzyw sztucznych w silikonowych formach (*ang. Vacuum Casting*) oraz natryskiwanie warstw metalu na model wzorcowy (*ang. Metal Spray Tooling*).

Niewątpliwą zaletą technologii przyrostowych jest możliwość szybkiego i taniego wytwarzania niestandardowych i specjalistycznych narzędzi produkcyjnych bezpośrednio na terenie zakładu produkcyjnego. Jako przykład drukowanych narzędzi specjalistycznych mogą posłużyć dedykowane do kształtu danej części uchwyty, wkładki do szczęk imadła, szablony lub innego rodzaju

oprzyrządowanie i narzędzia montażowe o wysokim stopniu złożoności geometrii. Innym przykładem wykorzystania technologii druku 3D w branży narzędziowej jest wykonywanie elementów szybko zużywających się oraz narzędzi służących do kontroli jakości wyrobów, takich jak np. sprawdziany. Zastosowanie technologii addytywnych stanowi zatem najbardziej optymalne rozwiązanie w przypadku wytwarzania nietypowych narzędzi i uchwytów obróbkowych zarówno w aspekcie możliwości wytwórczych, jak i uzyskiwanych korzyści ekonomicznych. Przykłady wytwarzanych przyrostowo narzędzi i elementów oprzyrządowania zaprezentowano na rysunku 14 (CD3D, 2019; Poradnik firmy CadXpert, 2019).



Rysunek 14. Przykłady elementów należących do obszaru Rapid Tooling: a) szablon do wiercenia; b) sprawdzian służący do kontroli uszczeltek; c) uchwyt montażowy; d) wkładki do szczęk imadła (Poradnik firmy CadXpert, 2019)

2.5. Zastosowanie technologii przyrostowych w wytwarzaniu narzędzi ściernych

Technologie przyrostowe znajdują coraz szersze zastosowanie również w obszarze obróbki ścierniej, głównie w wytwarzaniu prototypowych konstrukcji tarcz szlifierskich, jak również narzędzi stosowanych w docieraniu oraz polerowaniu. Obszerny przegląd literaturowy dotyczący narzędzi ściernych wytwarzanych na bazie metod przyrostowych przedstawiono w pracy (Deja et al., 2021). Autorzy wskazali w niej aktualnie trzy wiodące grupy tego typu narzędzi ściernych: o spoiwie metalowym bazujące na metodach proszkowych z metalu, o spoiwie żywicznym utwardzane światłem UV lub lasera oraz narzędzi wytwarzanych z proszków tworzyw sztucznych i kompozytów – rysunek 15.

a)



b)



c)



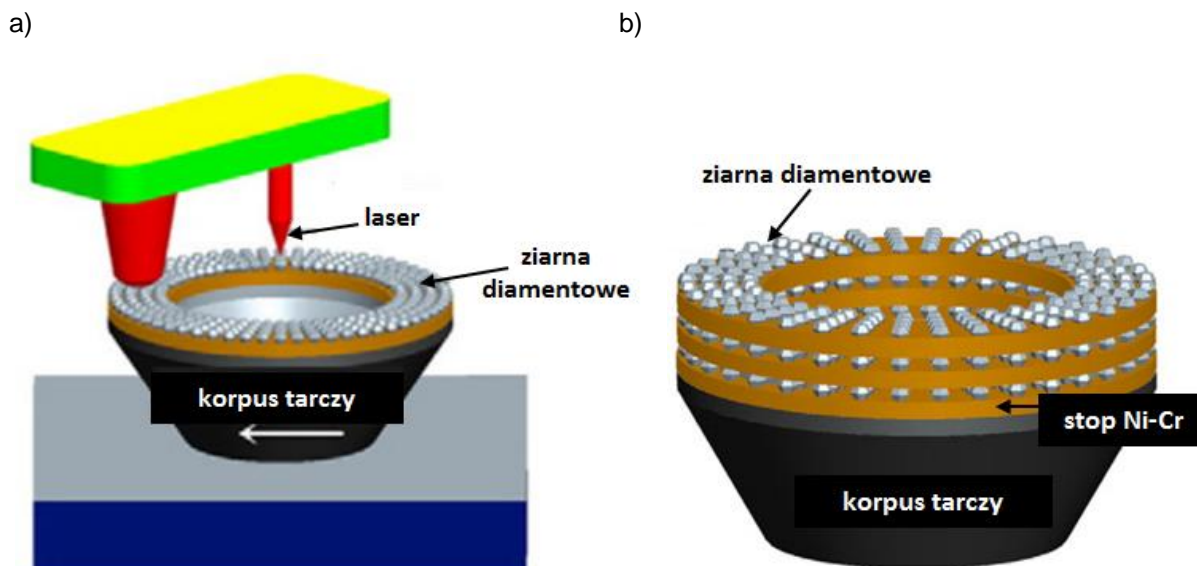
d)



Rysunek 15. Przykłady narzędzi ściernych wytwarzanych za pośrednictwem technologii addytywnych:

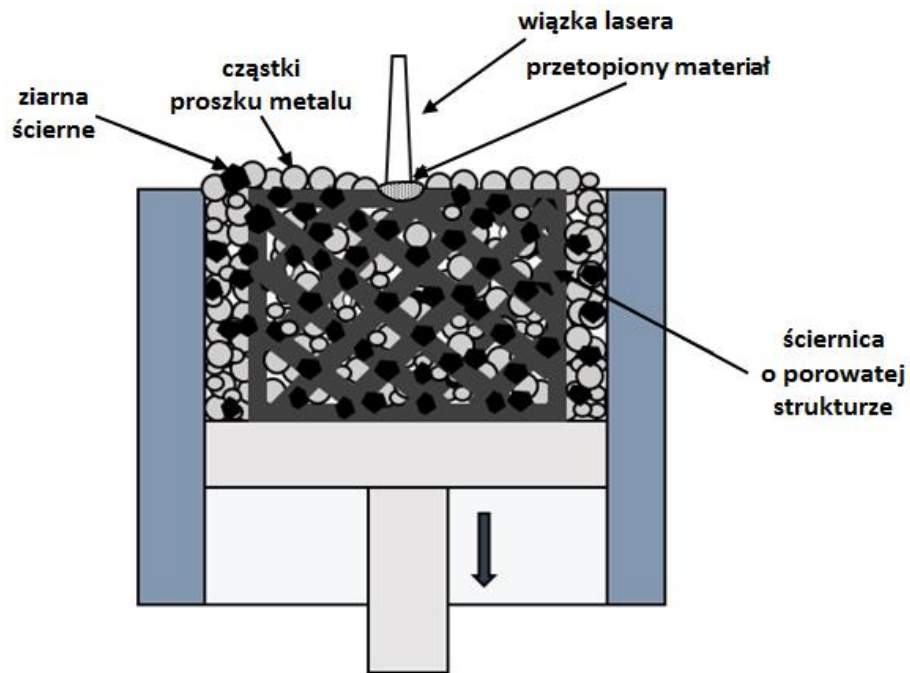
- a) prototypowe ściernice z metalu (od lewej) o strukturze ośmiościanu, plastra miodu oraz litej bryły (Tian, Li, Zhang, *et al.*, 2018); b) obręcz ściernicy o spoiwie żywicznym (Ai *et al.*, 2022); c) tarcza docierająca o spoiwie żywicznym (Huang, Guo and Marinescu, 2015; Guo, Zhang, Chen, *et al.*, 2019); d) tarcza docierająca z proszku tworzywa sztucznego (Du *et al.*, 2019)

Metody proszkowe z metalu są z powodzeniem wykorzystywane w budowaniu innowacyjnych ściernic o zwiększonej porowatości oraz ściśle określonej strukturze wewnętrznej. Równie ważny aspekt stanowi możliwość równomiernego rozmieszczenia ziaren ściernych na powierzchni narzędzia, która może wpłynąć na poprawę jakości obrabianych powierzchni, wydajność procesu szlifowania oraz trwałość narzędzia ściernego. W pracy (Yang *et al.*, 2016) zaprezentowano sposób budowy diamentowej tarczy szlifierskiej oparty na technologii addytywnej z wykorzystaniem laserowego urządzenia CNC. Na metalowy korpus narzędzia nakładano równomiernie mieszaninę proszku stopu Ni-Cr oraz ziaren diamentu, które następnie przetapiano wiązką lasera – rysunek 16a. Zastosowanie technologii przyrostowej umożliwiło regularne i przestrzenne rozmieszczenie ziaren diamentu w ściśle określonych miejscach metalowej osnowy narzędzia – rysunek 16b.



Rysunek 16. Wytwarzanie tarczy szlifierskiej z regularnie rozmieszczonymi ziarnami ściernymi: a) proces addytywnego nakładania ścierniwa; b) wykonane narzędzie z przestrzennie i regularnie rozmieszczonym ścierniwem (Yang *et al.*, 2016)

Jak zaprezentowano w kolejnych pracach (Tian, Li, Zhang, *et al.*, 2018, 2019; Tian, Li, Li, *et al.*, 2019b), metody proszkowe z metalu są szeroko stosowane do wytwarzania porowatych narzędzi. Charakterystyczne pory w ściernicy umożliwiają bowiem zwiększenie przestrzeni dla transportu cieczy chłodzącej oraz odprowadzania fragmentów zeskrwanego materiału, prowadząc jednocześnie do polepszenia wydajności procesu obróbki. Tym samym technologie addytywne z metalu mogą stanowić bardziej efektywny sposób wytwarzania narzędzi o kontrolowanej porowatości i mikrostrukturze wewnętrznej w porównaniu do konwencjonalnych metod z zastosowaniem np. induktora porów. Wykonywanie tego typu narzędzi polega na przetapianiu wiązką lasera kompozytu, który składa się z mieszaniny standardowego proszku metalu jako spoiwa np. stopu AlSi10Mg oraz diamentowych ziaren ściernych – rysunek 17.

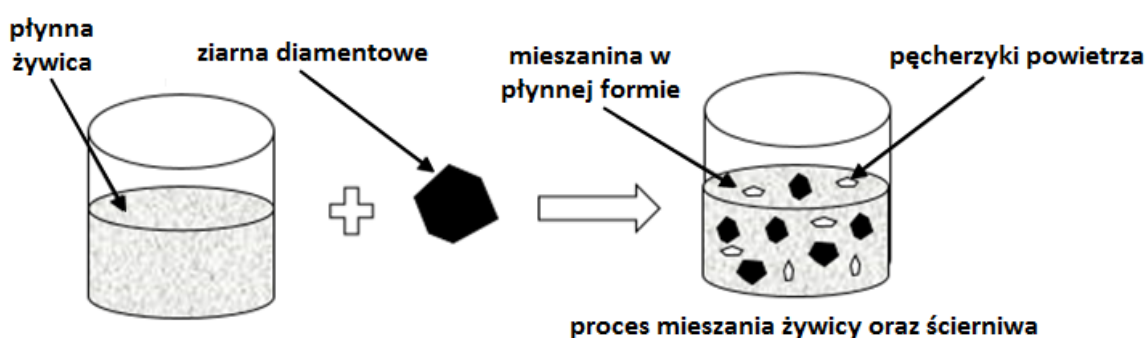


Rysunek 17. Sposób budowy ściernicy o porowatej strukturze za pomocą metody selektywnego przetapiania laserowego SLM (Tian, Li, Li, *et al.*, 2019a, 2019b; Deja *et al.*, 2021)

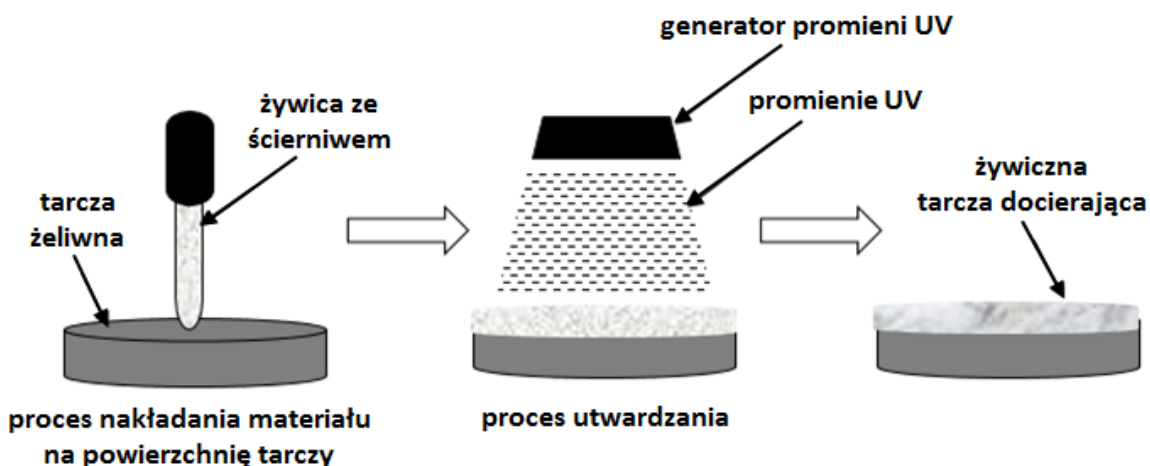
Autorzy kolejnej pracy (Tian, Li, Li, *et al.*, 2019a) uzyskali optymalne parametry procesu druku 3D kompozytu o osnowie metalowej z ziarnami ściernymi, takie jak: moc lasera 250 W, prędkość skanowania 2,5 m/s i grubość pojedynczej warstwy materiału 20 μm . Zastosowanie tych parametrów umożliwiło równomierne oraz trwałe osadzenie ziaren ściernych w metalicznym spoiwie, przy jednoczesnym wystąpieniu nielicznych defektów w formie pustych przestrzeni. W pracy (Tian, Li, Zhang, *et al.*, 2019) badano natomiast trzy rodzaje struktur komórkowych o tej samej porowatości wynoszącej 53% wytwarzanych z mieszaniny proszku AlSi10Mg oraz ziaren diamentowych w technologii SLM. Uzyskane rezultaty wskazały na uzyskanie największej wytrzymałości oraz przepuszczalności dla struktury ośmiościanu. Dodatkowo obserwacje mikroskopowe wykazały, iż na skutek dużej gęstości energii lasera niektóre ziarna ściernie zostały przepalone, co skutkowało powierzchnią grafityzującą diamentu. Jednocześnie koncentracja powierzchniowa oraz rozmieszczenie ziaren ściernych w osnowie metalu wpłynęły istotnie na właściwości mechaniczne narzędzia, które ulegają zmniejszeniu w przypadku nierównomiernego rozkładu ścierniwa (Denkena *et al.*, 2019). Rezultaty przeprowadzonych eksperymentów szlifierskich z zastosowaniem ściernic o spoiwie metalowym zostały zaprezentowane w pracach (Tian, Li, Zhang, *et al.*, 2018; Tian *et al.*, 2020). W pierwszym badaniu autorzy użyli ściernicy o porowatej strukturze plastra miodu do obróbki przedmiotu z Cr4W2MoV. Otrzymane wyniki wskazały na dobrą skrawalność narzędzia oraz trwałe osadzenie ziaren diamentowych w metalowej osnowie, czego skutkiem była niewielka wartość wskaźnika określającego ilość usuwanych z powierzchni narzędzia ziaren. W kolejnej pracy analizowano narzędzia o strukturze ośmiościanu, plastra miodu oraz litej bryły również przeznaczone do obróbki detalu z Cr4W2MoV. Struktura zastosowanego narzędzia nie wpłynęła istotnie na uzyskaną chropowatość obrabianej powierzchni, natomiast narzędzie o strukturze litej bryły charakteryzowało się największą wydajnością usuwanego materiału.

Znany jest ponadto sposób wytwarzania narzędzi ściernych w formie tarcz szlifierskich (Tanaka and Isono, 2001), docierających (Marinescu, Guo and Wei, 2013; Huang, Guo and Marinescu, 2015) oraz polerskich, polegający na utwardzaniu żywic światłem ultrafioletowym. Spoiwa żywiczne stanowią bowiem jeden z najczęściej stosowanych środków wiążących, powszechnie wykorzystywanych do produkcji narzędzi ściernych (Habrat, 2016). Autorzy pracy (Tanaka and Isono, 2001) przedstawili unikatową metodę wykonania ściernicy oraz tarczy polerskiej z wykorzystaniem mieszaniny żywicy światłoutwardzalnej jako środka wiążącego oraz ziaren ściernych. Jak zaprezentowano w pracach (Huang, Guo and Marinescu, 2015; Guo, Zhang, Chen, et al., 2019), proces budowy żywicznych tarcz docierających polega na wymieszaniu żywicy wraz z diamentowymi ziarnami oraz ich nałożeniu na górną powierzchnię płyty bazowej, po czym następuje proces utwardzania promieniami UV – rysunek 18.

a)



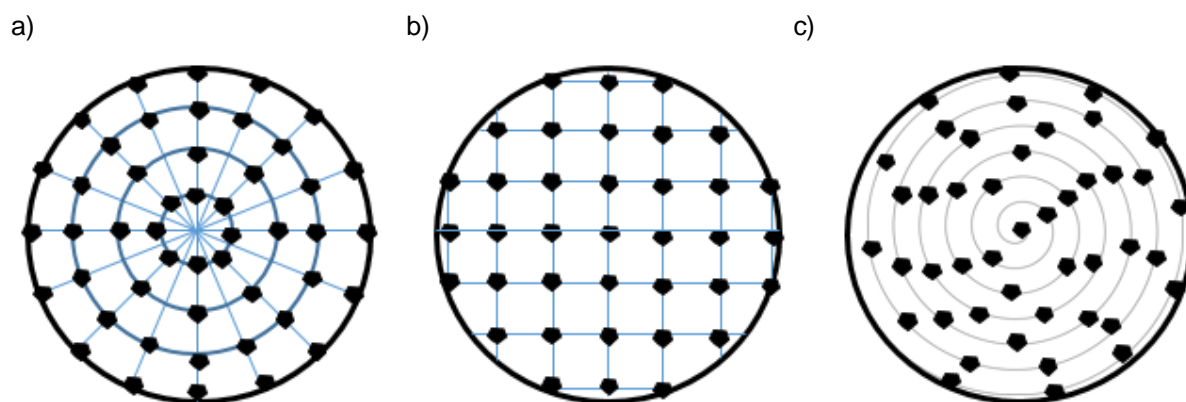
b)



Rysunek 18. Sposób wytwarzania tarczy docierającej o spoiwie żywicznym: a) przygotowanie materiału w postaci płynnej żywicy oraz ścierniwa; b) proces nakładania materiału i jego utwardzania (Huang, Guo and Marinescu, 2015; Guo, Zhang, Chen, et al., 2019; Deja et al., 2021)

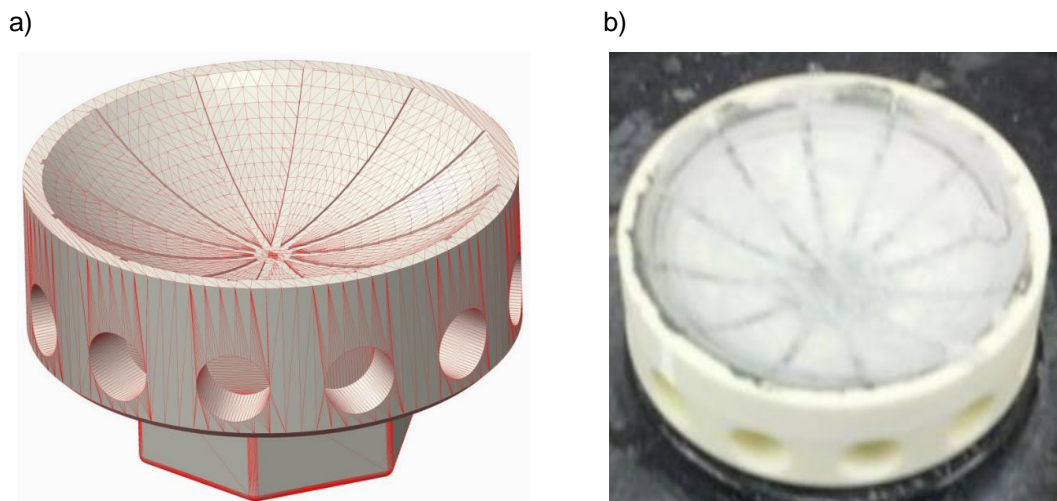
W porównaniu z konwencjonalnymi metodami opartymi na zjawisku spiekania, wskazany sposób budowy narzędzi pozwala na niższe zużycie energii oraz wymaga mniejszego nakładu pracy. Aktualnie narzędzia żywiczne przygotowane w ten sposób mogą być stosowane w precyzyjnym szlifowaniu oraz docieraniu. Przeprowadzone przez autorów pracy (Marinescu, Guo and Wei, 2013) eksperymenty docierania wskazały na realizację wydajnego procesu obróbki oraz poprawę jakości obrabianej powierzchni z wykorzystaniem żywicznych narzędzi ściernych. W kolejnej pracy (Huang,

Guo and Marinescu, 2015) przedstawiono obszerne wyniki badań utwardzanych światłem UV narzędzi w formie segmentów ściernych złożonych z żywicy epoksydowej oraz akrylowej wraz z ziarnami diamentu, które przeznaczono następnie do docierania płytek krzemowych. W porównaniu do docierania tradycyjną płytą żeliwną w krótszym czasie uzyskano dużo niższe wartości chropowatości obrabianej powierzchni, co potwierdziło użyteczność i potencjał opracowanego narzędzia ściernego. Analizowano również wpływ obciążenia przedmiotów na jakość ich obróbki oraz wydajność procesu docierania, a także efekty związane z wprowadzeniem do mieszaniny żywicznej dodatkowych nanocząstek Al_2O_3 . Ich zastosowanie wpłynęło na lepsze osadzenie się ziaren ściernych w żywicznym spoiwie, co przełożyło się także na poprawę mechanizmu obróbki. Żywiczne tarcze docierające zawierające ziarna diamentowe mogą być również stosowane w obróbce materiałów twardych i kruchych, takich jak ceramika techniczna, co potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w pracach (**Guo, Zhang, Chen, et al., 2019; Guo, Zhang, Lee, et al., 2019**). W porównaniu do procesu konwencjonalnego docierania płytą żeliwną na bazie zawiesiny ścierniej uzyskano mniejszą średnią wartość parametru chropowatości R_a powierzchni obrabianych elementów z ceramiki technicznej oraz w przypadku obróbki próbek szafirowych większą wydajność usuwania materiału. Rezultaty badań eksperymentalnych przedstawionych w pracy (**Guo, Zhang, Chen, et al., 2019**) wskazały natomiast na znaczącą poprawę jakości powierzchni próbek ceramicznych oraz jednocześnie zmniejszenie szybkości usuwanego materiału w porównaniu do konwencjonalnego docierania. Autorzy prac określają jednocześnie proces obróbki jako hybrydowy, z uwagi na możliwość wykorzystywania zarówno wbitych (stałych), jak również wyrwanych ze spoiwa (luźnych) ziaren ściernych biorących udział w procesie skrawania materiału. Pomimo iż autorzy wyżej wymienionych prac nie stosują terminu *wytwarzanie przyrostowe*, to zjawisko fotopolimeryzacji żywic wykorzystywane jest w kilku metodach przyrostowych m.in. stereolitografii SLA, technologiach Poly/Multi-Jet Modeling, Film Transfer Imaging FTI oraz Digital Light Processing DLP. Prototypowe ściernice oraz tarcze docierające i polerskie bazujące na procesie SLA były badane w pracach (**Tanaka and Isono, 2001; Huang, Guo and Marinescu, 2016**). W kolejnej pracy (**Qiu and Huang, 2019**) metoda SLA posłużyła do wykonania ściernicy z kontrolowanym rozmieszczeniem ziaren ściernych – rysunek 19.



Rysunek 19. Sposoby rozmieszczenia ziaren ściernych w narzędziu wykonanym za pomocą metody stereolitografii SLA: a) kołowe rozmieszczenie; b) prostokątne rozmieszczenie; c) spiralne rozmieszczenie (**Qiu and Huang, 2019; Deja et al., 2021**)

Podobnie jak w przypadku ściernic bazujących na proszkach metali, również w przypadku narzędzi żywicznych regularne rozmieszczenie ziaren wpłynęło na efektywniejsze usuwanie materiału w porównaniu do narzędzi o losowym rozmieszczeniu ścierniwa. Wykonane przy użyciu metody SLA narzędzia ścierne mogą być również stosowane do docierania powierzchni szklanych. W pracy **(Williams, 2015)** badano wpływ grubości warstwy nakładanego materiału na wydajność procesu docierania z zastosowaniem żywicznych tarcz docierających. Wykonane w tym celu przy użyciu metody stereolitografii narzędzia przeznaczone do obróbki szkła. Grubość warstwy materiału okazała się czynnikiem wpływającym w znacznym stopniu na wielkość ubytku materiałowego obrabianych elementów. Zastosowanie grubości pojedynczej warstwy 50 μm w porównaniu do 100 μm żywicy umożliwiło znacznie efektywniejsze usuwanie materiału ze szklanego przedmiotu obrabianego. Przedmiotem badań kolejnej pracy **(Williams, 2013)** było wykonane metodą Film Transfer Imaging FTI narzędzie ścierne o ściśle zdefiniowanym wklęsłym kształcie powierzchni roboczej oraz promieniowym wzorze rowków umiejscowionym na jego czynnej powierzchni – rysunek 20.

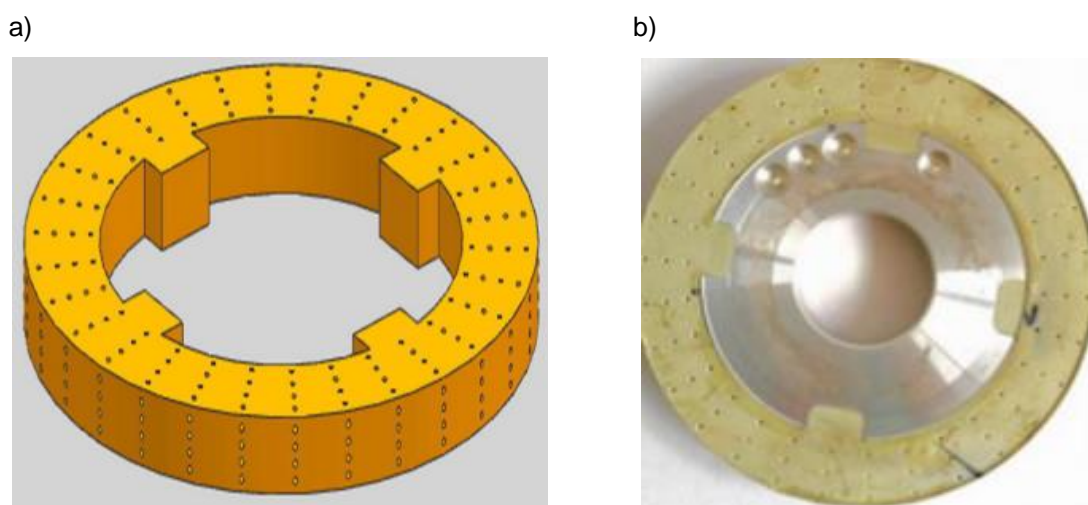


Rysunek 20. Przykład narzędzia o ściśle określonej geometrii zewnętrznej: a) model powierzchniowy (zapis w formacie STL); b) widok narzędzia wytworzonego za pomocą metody Film Transfer Imaging **(Williams, 2013)**

Tak przygotowane narzędzie przeznaczone do docierania próbek ze stopionej krzemionki, a następnie analizowano profile ich zużycia. Autorzy kolejnej pracy **(Ai et al., 2022)** badali natomiast prototypowe żywiczne ściernice wykonane metodą Digital Light Processing oraz z wykorzystaniem ziaren z węgla krzemu SiC. Zastosowanie technologii addytywnej opartej na utwardzaniu płynnej żywicy pozwoliło na wykonanie otworów chłodzących umieszczonych wewnątrz narzędzia. Uzyskane rezultaty szlifowania próbek ze stali hartowanej oraz aluminium wskazały na wyraźne zmniejszenie parametru chropowatości R_a obrabianych powierzchni. Ponadto prototypowe narzędzie zawierające otwory chłodzące charakteryzowało się mniejszym zużyciem w porównaniu do jednolitej ściernicy. Zaprezentowane przykłady żywicznych narzędzi ściernych wykazują jednak kilka ograniczeń, do których należy duże zużycie oraz relatywnie krótki okres ich trwałości w porównaniu do konwencjonalnych narzędzi. Jak zaobserwowano w pracy **(Williams, 2015)**, narzędzie żywiczne podczas obróbki szkła uległo znacznie większemu zużyciu niż objętość usuniętego materiału, rzędu 2-3-krotnej utraty masy docieranych detali. Innymi ważnymi aspektami są kontrola parametrów

procesu wytwarzania narzędzi, możliwość równomiernego rozmieszczenia ziaren ściernych w żywicznym spoiwie, a także wybór odpowiedniej metody kondycjonowania.

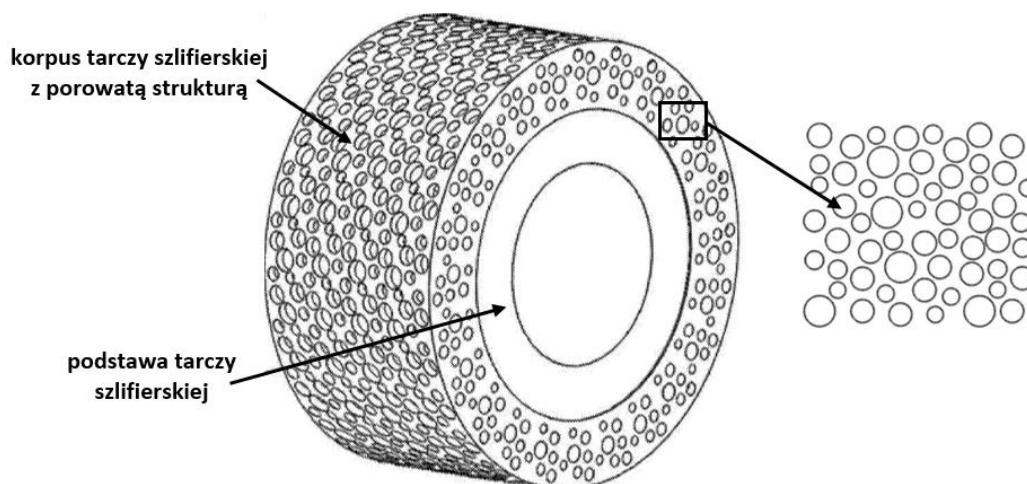
Narzędzia ścierne wytwarzane z proszków tworzyw sztucznych nie były do tej pory szeroko badane. Z uwagi na charakterystyczne właściwości spiekanych proszków poliamidowych, narzędzia tego typu mogłyby być szeroko wykorzystywane w różnych procesach obróbki ścierniej, ale przy znacznie mniejszych obciążeniach w porównaniu do narzędzi produkowanych z proszków metali i ich stopów. Z drugiej strony podejmowane są próby poprawy właściwości mechanicznych elementów spiekanych z proszków poliamidowych, które polegają na stosowaniu dodatkowych wypełniaczy (**Goodridge, Tuck and Hague, 2012**). Przykładowo, autorzy pracy (**Hon and Gill, 2003**) opracowali materiał kompozytowy na bazie proszku poliamidowego wzmocnianego węglikiem krzemu. Autorzy kolejnej pracy (**Du et al., 2019**) zastosowali natomiast metodę SLS do wykonania prototypowej tarczy szlifierskiej z umieszczonymi w jej wnętrzu otworami chłodzącymi – rysunek 21.



Rysunek 21. Przykład narzędzia ściernego z otworami chłodzącymi: a) model komputerowy CAD; b) widok po zakończeniu procesu jego budowy przy użyciu technologii SLS (**Du et al., 2019**)

Jako materiał wyjściowy zastosowano mieszaninę standardowego proszku poliamidowego PA2200 oraz ziaren diamentowych W40. Ponadto narzędzia wykonano w dwóch wersjach wprowadzając do wskazanego materiału dodatki w postaci szklanych baniek oraz ziaren elektrokorundu. Wyniki badań eksperymentalnych szlifowania szkła wskazały, iż zastosowanie wewnętrznego systemu chłodzenia wpłynęło na zmniejszenie sił szlifowania. Większe otwory umożliwiały intensywniejsze chłodzenie oraz zwiększony dopływ środka smarującego bezpośrednio w strefę obróbki, co w konsekwencji wpłynęło na zmniejszenie sił tarcia występującego pomiędzy narzędziem a szklanym przedmiotem.

Zagadnienie związane z wytwarzaniem przy użyciu technologii przyrostowych narzędzi ściernych stanowi również przedmiot wielu współczesnych wynalazków i wzorów użytkowych (**Volker, 2000; Bajaj, Chin and Lee, 2018**). Przykładowo, w pracach (**Tian, Li, Guo, et al., 2018, 2019**) przedstawiono koncepcję wytworzenia za pośrednictwem technologii przyrostowej korpusu (osłony) tarczy szlifierskiej o porowatej strukturze, która ma korzystny wpływ na przebieg procesu szlifowania oraz uzyskiwane efekty obróbkowe, takie jak poprawa jakości powierzchni przedmiotu po szlifowaniu – rysunek 22.



Rysunek 22. Koncepcja wytwarzanego przyrostowo korpusu tarczy szlifierskiej o porowatej strukturze
(Tian, Li, Guo, *et al.*, 2018)

W tym celu połączono ze sobą proszek metalowy o rozmiarach ziaren w zakresie 20-50 μm oraz ziarna ścierna diamentowe i z azotku boru o rozmiarach w zakresie 20-200 μm . Nowo opracowany materiał za pośrednictwem dyszy specjalnie zbudowanego do tego celu urządzenia posłużył do warstwowego wykonania korpusu tarczy szlifierskiej. Technologie addytywne mogą być również wykorzystywane do tworzenia zaawansowanych tarcz polerskich (Ganapathiappan *et al.*, 2018). W pracy (Bajaj, Chin and Lee, 2018) zaprezentowano koncepcję wytwarzania warstwy polerującej tarczy polerskiej dedykowanej do obróbki mechaniczno-chemicznego polerowania. Materiał w formie kropeł osadzany jest na powierzchni tarczy polerskiej za pomocą dyszy drukującej, a następnie w wyniku zjawiska polimeryzacji utwardzany, co umożliwia wytworzenie warstwy polerującej na powierzchni narzędzia. Znane z publikacji (Fioratti, 2018) rozwiązanie polega natomiast na zastosowaniu nowego materiału w formie filamentu (żyłki nawiniętej na szpulę stosowanej w technologii FDM/FFF), powstałego poprzez połączenie tworzyw termoplastycznych z materiałem ściernym w formie proszku. Uzyskany materiał, z uwagi na otrzymane właściwości skrawne, posłuży w dalszej kolejności do wytworzenia za pośrednictwem dysz urządzenia narzędzi ściernych o określonych kształtach i rozmiarach. Zastosowanie wykonanych w ten sposób narzędzi umożliwi obróbkę szerokiego spektrum materiałów, takich jak m.in. metale, szkła oraz powierzchnie laminowane.

Pomimo olbrzymiego potencjału technologii przyrostowych i optymistycznych rezultatów badań eksperymentalnych, narzędzia ścierna wytwarzane przy użyciu konwencjonalnych metod są wciąż najczęściej stosowane w praktyce przemysłowej. Jednym z głównych czynników determinujących wybór konkretnego narzędzia są możliwości pracy w warunkach dużych i zmiennych obciążeń, jak również przeprowadzenia efektywnej obróbki szerokiej gamy materiałów konstrukcyjnych. Narzędzia ścierna bazujące na wybranych technologiach addytywnych nie stanowią opłacalnego rozwiązania w przypadku produkcji masowej i wytwarzane są wciąż tylko jako prototypowe narzędzia. Jak dotąd liczba testowanych narzędzi oraz wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzanych w warunkach przemysłowych są również znacznie ograniczone. Z drugiej strony wytwarzanie przyrostowe stwarza nowe możliwości w budowaniu obiektów o ściśle określonych geometriach zewnętrznych

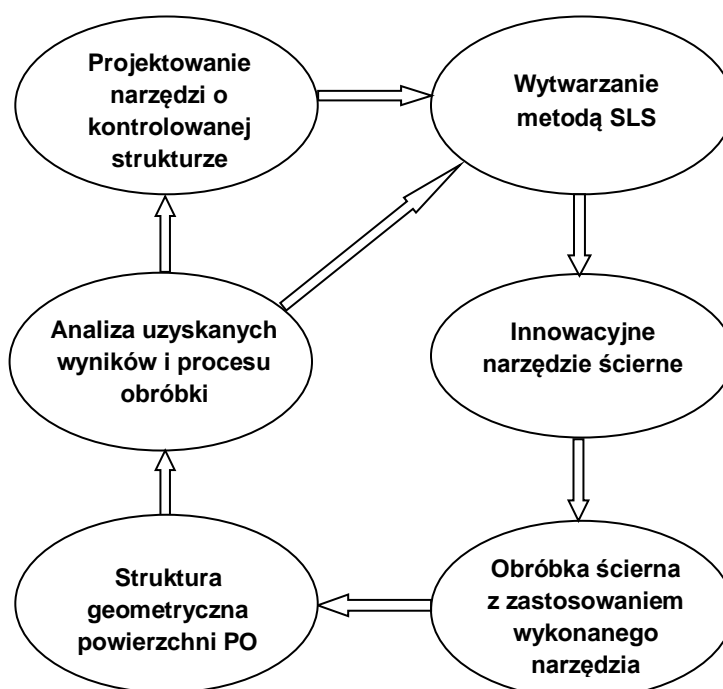
i wewnętrznych. Ponadto narzędzia wytwarzane metodą SLS nie są szeroko omawiane w literaturze, co może stanowić kierunek dalszych prac badawczych i przyczynić się do szerszego zastosowania tego typu narzędzi w różnych procesach obróbki ścierniej.

2.6. Zastosowanie technologii SLS w wytwarzaniu narzędzi ściernych

Uwzględniając olbrzymi potencjał wytwarzania przyrostowego z proszków poliamidowych oraz właściwości wykonanych przy jego użyciu elementów, mogą one być wykorzystywane jako narzędzia ściernie dedykowane do obróbki powierzchni płaskich. Zdaniem autora pracy zastosowanie w tym celu metody selektywnego spiekania laserowego proszków tworzyw sztucznych znajduje swoje uzasadnienie z uwagi na następujące aspekty:

- uzyskiwanie charakterystycznej dla technologii proszkowych ziarnistej struktury zewnętrznej narzędzia, która odznacza się wysoką chropowatością (**Redwood, Schöffler and Garre, 2017; Zieliński, 2020b**). Z punktu widzenia mechanizmu docierania nierówności występujące na powierzchni narzędzia mogą umożliwić łatwiejsze utrzymanie i rozprowadzanie mikroziaren ściernych podczas obróbki. Struktura powierzchni, która stanowi jedną z głównych wad technologii proszkowych, w przypadku obróbki ścierniej może być zaletą technologiczną;
- duża swoboda w projektowaniu oraz wytwarzaniu złożonych geometrii oraz elementów o skomplikowanych kształtach, w tym struktur wewnętrznych. W przypadku wspomnianych struktur wewnętrznych mogą one dotyczyć wykonanych wewnątrz narzędzi ściernych elementów o niewielkich wymiarach, takich jak rowki, otwory oraz kieszenie. Zastosowanie tego typu elementów geometrycznych może pełnić wiele funkcji, tj. magazynowanie ścierniwa dostarczanego bezpośrednio do strefy obróbki w miarę zużywania się narzędzia ściernego. Kolejną zaletą, szczególnie w przypadku projektowania otworów wewnątrz narzędzia ściernego, jest optymalne doprowadzanie płynu obróbkowego oraz materiału ściernego bezpośrednio w strefę obróbki. Zastosowanie systemu kanałów w formie otworów może pozwolić na jednoczesne odprowadzanie resztek zeskrwanego materiału, jak również wydzielającego się w strefie obróbki ciepła skrawania. Podsumowując, wykonanie narzędzi z dodatkowymi elementami geometrycznymi w formie rowków oraz otworów może wpłynąć korzystnie na przebieg całego procesu obróbki ścierniej, w tym wzrostu jej wydajności;
- uzyskiwanie typowych dla technologii SLS elementów porowatych oraz możliwość wytwarzania dodatkowych struktur porowatych, a tym samym narzędzi o kontrolowanej porowatości. Biorąc pod uwagę mechanizm procesu docierania, stosowanie narzędzi o kontrolowanej porowatości może wpłynąć na efektywniejsze wykorzystanie ścierniwa, które będzie gromadzone w pustych obszarach/przestrzeniach znajdujących się wewnątrz narzędzia;
- możliwość łatwego wbijania się (osadzania) ziaren ściernych w strukturę docieraka, co umożliwi intensywne zbrojenie czynnej powierzchni drukowanego narzędzia, które jest bardziej elastyczne w porównaniu do powszechnie stosowanych narzędzi metalowych;
- skrócenie czasu i kosztów wytwarzania narzędzi ściernych dedykowanych do obróbki określonych przedmiotów w porównaniu do konwencjonalnych metod odlewniczych oraz procesów nakładania galwanicznego.

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione aspekty, uzasadnionym jest podjęcie problematyki badawczej związanej z zastosowaniem spiekanych z proszków poliamidowych narzędzi ściernych przeznaczonych do docierania powierzchni płaskich. Narzędzia tego typu mogą bowiem korzystnie wpłynąć na uzyskiwane efekty technologiczne oraz wydajność procesu obróbki ścierniej. Analiza uzyskanych wyników pozwoli w dalszej kolejności na opracowanie praktycznych wskazówek dotyczących wytwarzania innowacyjnych narzędzi ściernych dedykowanych dla konkretnego kształtu i materiału obrabianego przedmiotu, a także materiału ściernego stosowanego do jego obróbki. Przykładową koncepcję zastosowania wytwarzanych metodą SLS narzędzi w procesach obróbki ścierniej zaprezentowano na rysunku 23.



Rysunek 23. Przykładowa koncepcja zastosowania technologii przyrostowej (metody SLS) w wytwarzaniu innowacyjnych narzędzi ściernych

3. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU I ANALIZY LITERATURY

Przegląd dostępnych publikacji i prac naukowych wskazuje na silną tendencję do modyfikowania istniejących i opracowywania nowego typu narzędzi ściernych wykorzystywanych w procesach obróbki ścierniej, w tym również docieraniu powierzchni płaskich. Głównymi wadami obróbki przez docieranie jest stosunkowo niska wydajność procesu oraz mało efektywne wykorzystanie ziaren ściernych. Jednym z aktualnych kierunków rozwoju technologii docierania jest zatem opracowywanie nowoczesnych narzędzi ściernych w kontekście poprawy wydajności procesu oraz uzyskiwanych końcowych efektów technologicznych obróbki.

Analizowane prace naukowe wskazują na olbrzymi potencjał, jak również rosnące znaczenie technologii przyrostowych w wytwarzaniu innowacyjnych narzędzi ściernych. Autorzy publikacji zaprezentowanych w podrozdziale 2.5. podkreślają korzyści wynikającej z zastosowania technologii addytywnych w wytwarzaniu narzędzi ściernych. Dotyczą one przede wszystkim redukcji czasu i kosztów wykonania dedykowanych narzędzi w porównaniu do tradycyjnych metod wytwórczych, a także możliwości uzyskiwania elementów o dowolnych geometriach, w tym struktur porowatych. Opisane w literaturze rozwiązania dotyczą głównie narzędzi bazujących na technologiach proszkowych z metalu oraz narzędzi żywicznych wykorzystywanych w procesach szlifowania oraz docierania. Metody proszkowe z metalu wykorzystywane są powszechnie do wytwarzania prototypowych konstrukcji tarcz szlifierskich z kontrolowaną porowatością. Kolejny przykład narzędzi ściernych bazujących na wytwarzaniu przyrostowym stanowią utwardzane światłem UV lub wykonywane bezpośrednio za pośrednictwem metody stereolitografii żywiczne tarcze docierające. Zastosowanie technologii przyrostowej pozwala na wprowadzanie ziaren ściernych bezpośrednio w strukturę narzędzia lub ich łatwe wnikanie podczas obróbki. Aktualne prace dotyczące żywicznych tarcz docierających potwierdzają uzyskiwanie wysokich jakości powierzchni obrabianych elementów oraz znaczącą poprawę wydajności obróbki w porównaniu do docierania konwencjonalnymi tarczami żeliwnymi. Z drugiej strony plastyczne narzędzia ulegają szybkiemu i znacznemu zużyciu, szczególnie w przypadku obróbki materiałów twardych, przez co są wykorzystywane tylko jako prototypowe narzędzia ściernie. Wysoka wartość zużycia narzędzi żywicznych wpływa na znaczne skrócenie czasu ich efektywnej pracy, co uniemożliwia ich szersze zastosowanie przemysłowe.

W dostępnej literaturze brak jest jednak danych dotyczących uzyskiwanych efektów obróbkowych w wyniku zastosowania wytwarzanych technologiami proszkowymi narzędzi ściernych. Ponadto nie są prowadzone systematyczne badania dotyczące wykorzystania spiekanych z proszków poliamidowych narzędzi ściernych, zwłaszcza w technologii docierania powierzchni płaskich materiałów ceramicznych. Brak jest tym samym podstawowych informacji związanych z wpływem ich użycia na jakość obrabianych elementów oraz wydajność przeprowadzonej obróbki ścierniej. Uwzględniając zaprezentowaną analizę literaturową, prowadzone prace własne autora w obszarze technologii addytywnych, a także z uwagi na charakterystyczną elastyczną strukturę spiekane go poliamidu PA2200, podjęto próbę wykonania prototypowych narzędzi ściernych. Dokonano oceny uzyskanych za ich pośrednictwem efektów technologicznych docierania powierzchni płaskich próbek z ceramiki technicznej realizowanej z wykorzystaniem niekonwencjonalnego układu kinematycznego obrabiarki oraz wybranych parametrów technologicznych.

4. HIPOTEZY, CELE I ZAKRES PRACY

W pracy przedstawiono obszerne wyniki badań eksperymentalnych docierania powierzchni płaskich próbek z ceramiki technicznej z wykorzystaniem wytwarzanych w technologii SLS z poliamidu PA2200 narzędzi ściernych. Główny problem badawczy podjęty w realizowanej dysertacji dotyczy oceny efektów technologicznych obróbki ceramiki technicznej nowo opracowanymi narzędziami ściernym w formie tarcz docierających, przy określonych parametrach procesu. Aktualny stan wiedzy dotyczący technologii docierania oraz procesów addytywnych, a także wytwarzanych przy użyciu metod przyrostowych narzędzi ściernych pozwolił na sformułowanie następujących hipotez pracy:

1. Zastosowanie narzędzi wykonanych metodą selektywnego spiekania laserowego proszku poliamidu PA2200 umożliwi przeprowadzenie wydajnego oraz ekonomicznego procesu docierania przedmiotów z ceramiki Al_2O_3 .

2. W wyniku docierania narzędziem wykonanym metodą selektywnego spiekania laserowego proszku poliamidu PA2200 nastąpi znaczące zmniejszenie chropowatości i falistości powierzchni obrabianej przedmiotów z ceramiki Al_2O_3 .

Głównym celem pracy wynikającym z postawionych hipotez jest określenie wpływu zastosowania nowo opracowanych i wykonanych metodą selektywnego spiekania laserowego (SLS) narzędzi ściernych na wybrane czynniki (efekty) technologiczne procesu docierania jednostronnego powierzchni płaskich ceramiki technicznej Al_2O_3 oraz na ich zużycie.

Aby zrealizować cel główny pracy zdefiniowano następujące cele naukowe:

- ocena uzyskiwanych efektów technologicznych docierania jednostronnego ceramiki technicznej dotyczących wartości liniowego oraz masowego ubytku materiałowego obrabianych przedmiotów oraz wybranych parametrów ich struktury geometrycznej;
- analiza struktury geometrycznej obrabianych przedmiotów w układach 2D oraz 3D;
- określenie wydajności procesu obróbki z zastosowaniem drukowanych narzędzi oraz porównanie uzyskanych rezultatów obróbkowych z innymi wybranymi metodami obróbki ścierniej;
- ocena istotności statystycznej różnic pomiędzy średnimi uzyskiwanymi w poszczególnych seriach obróbkowych oraz badaniach dla analizowanych efektów technologicznych;
- ocena kształtu oraz wielkości zużycia prototypowych narzędzi;
- wyznaczenie okresu efektywnej pracy narzędzia przy przyjętych warunkach procesu;
- określenie zakresu stosowalności prototypowych narzędzi w aspekcie rodzaju obrabianego materiału, użytego ścierniwa oraz zastosowanych parametrów technologicznych;
- analiza wpływu zmiennych parametrów (wielkości wejściowych) wraz z oceną statystyczną ich oddziaływania i interakcji na wybrane efekty technologiczne docierania (wielkości wyjściowe);

- wyznaczenie modeli matematycznych wybranych efektów technologicznych wraz z ich oceną oraz walidacją.

Realizacja założonych celów oraz weryfikacja postawionych hipotez badawczych wymagała przeprowadzenia następujących zadań stanowiących zakres niniejszej pracy:

- przegląd i analiza literatury z zakresu technologii docierania oraz wytwarzania przyrostowego z uwzględnieniem aktualnych tendencji rozwojowych związanych z opracowywaniem nowych narzędzi ściernych bazujących na technologiach przyrostowych;

- przygotowanie prototypowego stanowiska badawczego do docierania jednostronnego powierzchni płaskich wraz z zaprogramowaniem indeksów silników krokowych zespołów napędowych tarczy docierającej oraz pierścienia prowadzącego dla zadanych parametrów technologicznych procesu obróbki;

- opracowanie oraz wykonanie prototypowych narzędzi ściernych w formie tarcz docierających o konstrukcji segmentowej;

- analiza struktury geometrycznej płaskiej powierzchni drukowanych narzędzi ściernych w układach 2D i 3D oraz ich kształtu;

- przeprowadzenie serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z ceramiki technicznej dla zmiennych parametrów procesu;

- analiza efektów technologicznych po przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych docierania jednostronnego oraz opracowanie statystyczne wyników, w tym badanie istotności statystycznej różnic pomiędzy średnimi wartościami oraz efektów oddziaływania zmiennych wejściowych i ich interakcji;

- ocena struktury i parametrów powierzchni obrabianych próbek z wykorzystaniem profilometrów stykowego oraz optycznego;

- ocena zużycia oraz struktury powierzchni czynnej prototypowych narzędzi z wykorzystaniem cyfrowego czujnika zegarowego, mikroskopu metalograficznego, konfokalnego oraz optycznego profilometru;

- wyznaczenie, ocena i walidacja modeli matematycznych wybranych efektów technologicznych docierania.

Element nowości naukowej pracy stanowią w pełni wykonane przy użyciu metody SLS prototypowe narzędzia w formie tarcz docierających, które mogą być wykorzystane do przeprowadzenia efektywnej oraz taniej obróbki ścierniej. Zaprezentowane w rozprawie wyniki analiz teoretycznych oraz badań eksperymentalnych pogłębiają dotychczasową wiedzę dotyczącą wytwarzanych za pośrednictwem technologii addytywnych narzędzi ściernych, wskazując jednocześnie kierunki dalszych prac.

BADANIA WŁASNE

5. NARZĘDZIA DO DOCIERANIA POWIERZCHNI PŁASKICH WYKORZYSTANE W BADANIACH WŁASNYCH

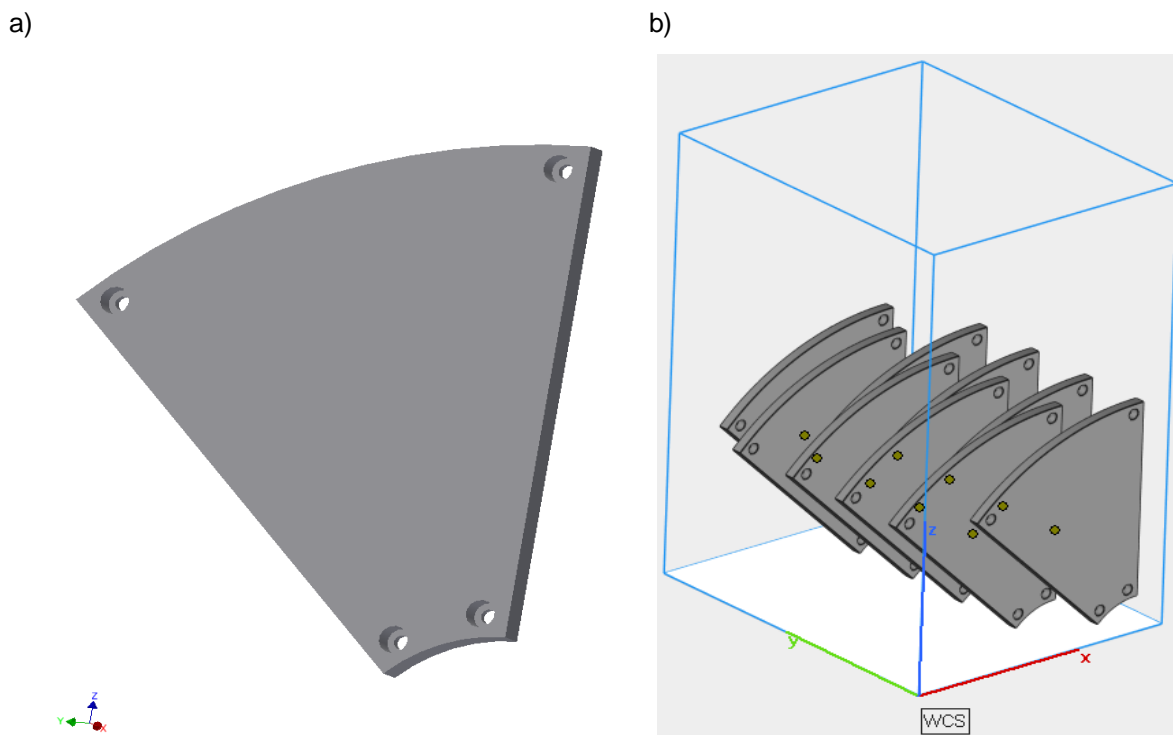
Prototypowe tarcze docierające o konstrukcji segmentowej zostały wykonane metodą selektywnego spiekania laserowego SLS z proszku poliamidowego PA2200 o właściwościach zgodnych z kartą jego charakterystyki (EOS GmbH, 2010) i przedstawionych w tabeli 4. Narzędzia zastosowano w docieraniu jednostronnym powierzchni płaskich próbek z ceramiki technicznej Al₂O₃.

Tabela 4. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne poliamidu PA2200 (EOS GmbH, 2010)

Współczynnik wytrzymałości (Moduł Younga)	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości przy zginaniu (23 °C)	Twardość wg Shore D (15 s)	Gęstość spieczonego proszku
1650 MPa (kierunek X, Y, Z)	48 MPa (kierunek X, Y) 42 MPa (kierunek Z)	1500 MPa (kierunek X)	75	930 kg/m ³

5.1. Proces szybkiego prototypowania segmentów ściernych

Podstawą do wytworzenia narzędzia o założonej geometrii oraz dokładności wymiarowo-kształtowej było opracowanie jego modelu komputerowego CAD – rysunek 24a oraz właściwe ułożenie segmentów w przestrzeni roboczej urządzenia – rysunek 24b. Proces wytwarzania zrealizowano na przemysłowej drukarce 3D pracującej w technologii SLS - EOS Formiga P100 (EOS GmbH, 2013) w firmie Bibus Menos Sp. z o.o., wykorzystując parametry procesu szybkiego prototypowania podane w tabeli 5. Zastosowane parametry procesu oraz sposób rozmieszczenia i orientacja elementów w komorze roboczej wynikały z dużego doświadczenia firmy w wytwarzaniu przyrostowym.



Rysunek 24. Prototypowa tarcza docierająca: a) model 3D CAD pojedynczego segmentu; b) sposób rozmieszczenia i orientacja segmentów w komorze roboczej drukarki 3D (źródło: BIBUS MENOS Sp. z o.o.)

Tabela 5. Zestawienie informacji oraz parametrów przyrostowego wytworzenia segmentów ściernych tarczy docierającej

drukarka 3D	EOS Formiga P100
forma i rodzaj materiału	proszek poliamidowy PA2200
grubość pojedynczej warstwy materiału	100 μm
typ i moc użytego lasera	laser CO ₂ o mocy znamionowej 30 W
długość wiązki lasera	10.2 – 10.8 μm
prędkość i rozdzielczość druku	10 mm/s, 0.005 mm
dokładność wykonania modelu	+/- 0.3
ilość warstw pojedynczego modelu	1582
przybliżony czas wydruku*	~12
koszt wydruku netto*	742.5 zł

* dotyczy wydruku 9 sztuk segmentów ściernych, koszt wydruku uwzględnia wyłącznie koszty materiałowe oraz związane z przeprowadzonym zabiegiem piaskowania oraz oczyszczania z resztek niespieczonego proszku przy użyciu sprężonego powietrza, podana wycena obowiązująca w roku 2019

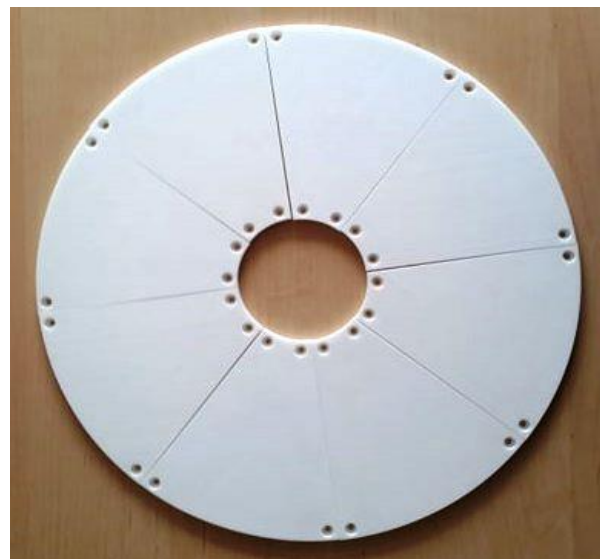
Wytworzone segmenty ściernie zostały poddane typowej i tylko podstawowej dla elementów wykonanych w technologii SLS obróbce wykończeniowej tzw. postprocessing, do której należały zabieg piaskowania, a następnie końcowego oczyszczania przy użyciu sprężonego powietrza. Celem przeprowadzonej obróbki była poprawa ogólnego wyglądu elementów oraz oczyszczenie z resztek niespieczonego proszku poliamidowego PA2200. Jednocześnie nie zastosowano żadnej dodatkowej obróbki wykończeniowej.

Tarcza docierająca została zbudowana z ośmiu identycznych segmentów ściernych tworzących jednolitą płaską powierzchnię narzędzia o średnicy zewnętrznej $d_o = 380$ mm oraz wewnętrznej $d_i = 90$ mm, a także wysokości $d_h = 7$ mm – rysunek 25. Zaprojektowana geometria uwzględniła ponadto otwory przeznaczone na śruby mocujące segmenty ściernie do metalowego korpusu. Wymiary pojedynczego segmentu ściernego tarczy docierającej przedstawiono w załączniku nr 1 umieszczonych na końcu pracy. Rysunek tarczy docierającej złożonej z ośmiu niezależnych segmentów stanowi natomiast zawartość załączniki nr 2. Zastosowanie koncepcji segmentowej konstrukcji narzędzia pozwoliło na szybki i łatwy montaż pojedynczych segmentów do metalowego korpusu. We wszystkich badaniach eksperymentalnych docierania stosowano narzędzia o tej samej konstrukcji, które wykonywano w identyczny sposób i przy użyciu tych samych parametrów oraz materiału.

a)



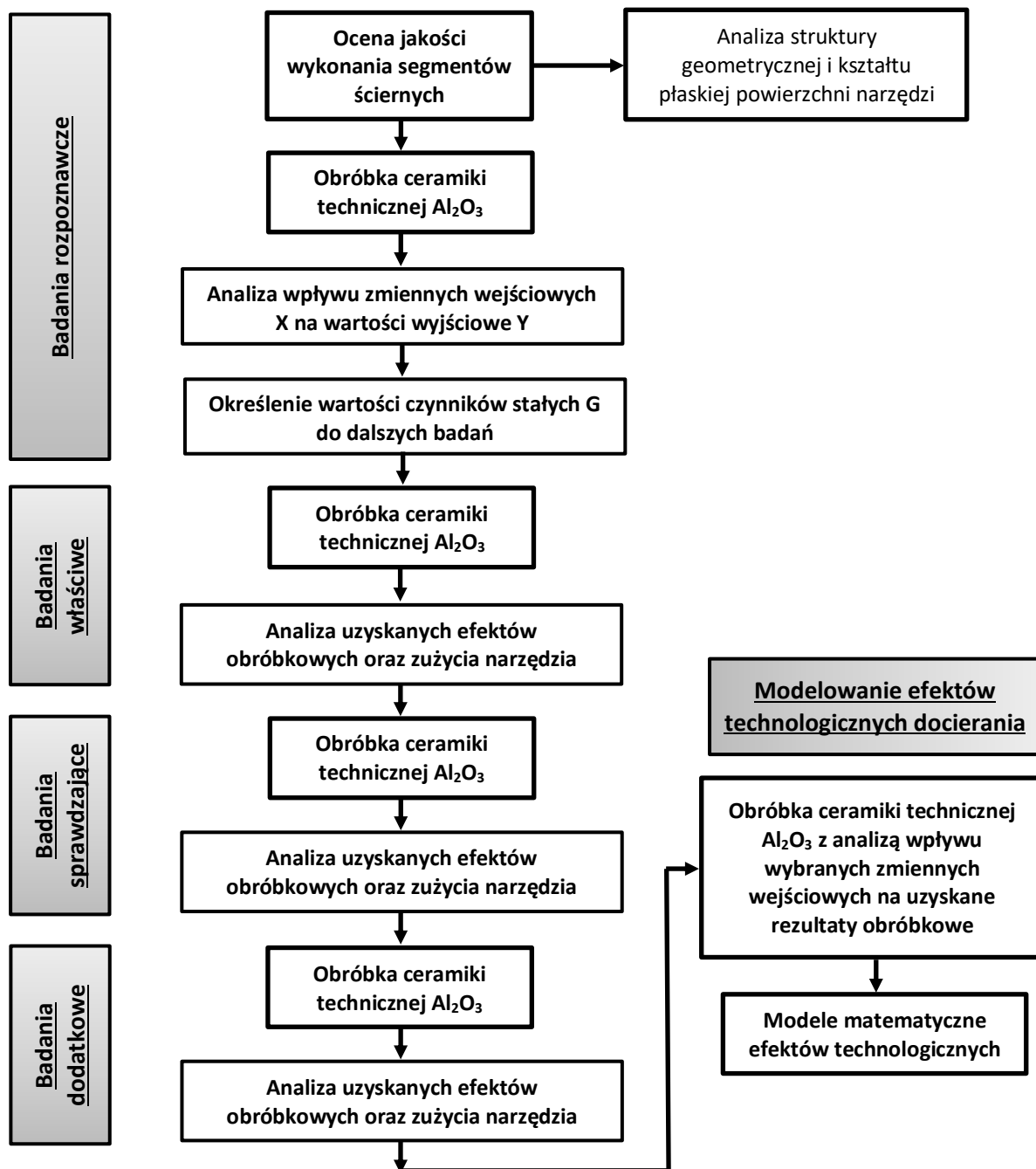
b)



Rysunek 25. Prototypowa tarcza docierająca wykonana metodą SLS: a) widok pojedynczego segmentu ściernego; b) tarcza docierająca złożona z ośmiu segmentów ściernych

6. SCHEMAT BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I ZASTOSOWANE METODY

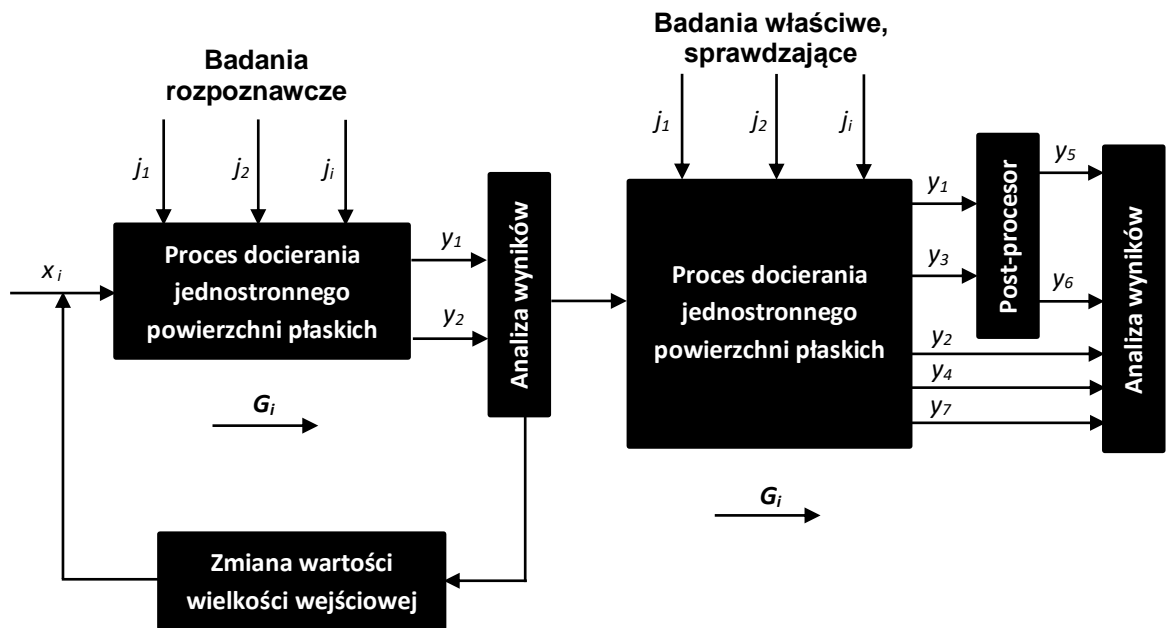
Metodyka prowadzonych badań eksperymentalnych docierania jednostronnego powierzchni płaskich próbek z tlenkowej ceramiki technicznej Al_2O_3 obejmowała przeprowadzenie badań rozpoznawczych, właściwych, sprawdzających oraz dodatkowych. Ogólny schemat realizowanych działań przedstawiono na rysunku 26.



Rysunek 26. Schemat badań eksperymentalnych docierania jednostronnego z zastosowaniem prototypowych tarcz docierających

Badania rozpoznawcze podzielono na dwa etapy. Pierwszy z nich dotyczył oceny jakości wykonania spiekanych z proszków poliamidowych segmentów ściernych prototypowych narzędzi przed obróbką

docieraniem. W tym celu zbadano wybrane i istotne, z punktu widzenia docieraków, właściwości segmentów ściernych, takie jak struktura geometryczna płaskiej powierzchni narzędzia oraz jej kształt. Drugi etap badań rozpoznawczych stanowiła obróbka ceramiki technicznej Al_2O_3 , w której analizowano wpływ poszczególnych wielkości wejściowych na wielkości wyjściowe procesu. Na rysunku 27 zaprezentowano charakterystykę obiektu badań z uwzględnieniem wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych (niezależnych), wielkości stałych oraz zakłócających na zmienne wyjściowe (zależne) procesu docierania jednostronnego próbek z Al_2O_3 .



Rysunek 27. Schemat badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

Charakterystyka czynników:

X – zmienne wejściowe:

- x_1 – zawiesina ścierna z_s [ml],
- x_2 – nacisk jednostkowy wywierany na przedmioty obrabiane (PO) p [kPa],
- x_3 – czas docierania t [s],
- x_4 – prędkość obrotowa narzędzia n_t [obr/min],
- x_5 – prędkość obrotowa pierścienia prowadzącego wraz z umieszczonymi w separatorze przedmiotami n_p [obr/min].

Y – zmienne wyjściowe:

- y_1 – liniowy ubytek materiałowy Δh [mm],
- y_2 – wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni obrabianych przedmiotów: R_a , W_a [μm],
- y_3 – masowy ubytek materiałowy Δm [g],
- y_4 – wartość parametrów przestrzennych powierzchni obrabianych przedmiotów: S_a , S_q [μm] oraz ocena topografii po przeprowadzonej obróbce [obrazy izometryczne],
- y_5 – liniowa wydajność docierania dh [$\mu m/min$],
- y_6 – masowa wydajność docierania dm [mg/min],

y_7 – wielkość zużycia tarczy docierającej [mm].

G – wielkości stałe:

g_1 – szlifierka do docierania powierzchni płaskich,

g_2 – współczynnik kinematyczny K ,

g_3 – tarcza złożona z niezależnych segmentów ściernych wykonanych metodą selektywnego spiekania laserowego proszków z tworzyw sztucznych przy niezmiennych parametrach procesu wytwarzania oraz drukarce 3D,

g_4 – metoda obróbki: docieranie jednostronne powierzchni płaskich,

g_5 – kształt i materiał obrabianych próbek: powierzchnia płaska kształtek cylindrycznych z Al_2O_3 ,

g_6 – metody pomiaru wielkości wyjściowych.

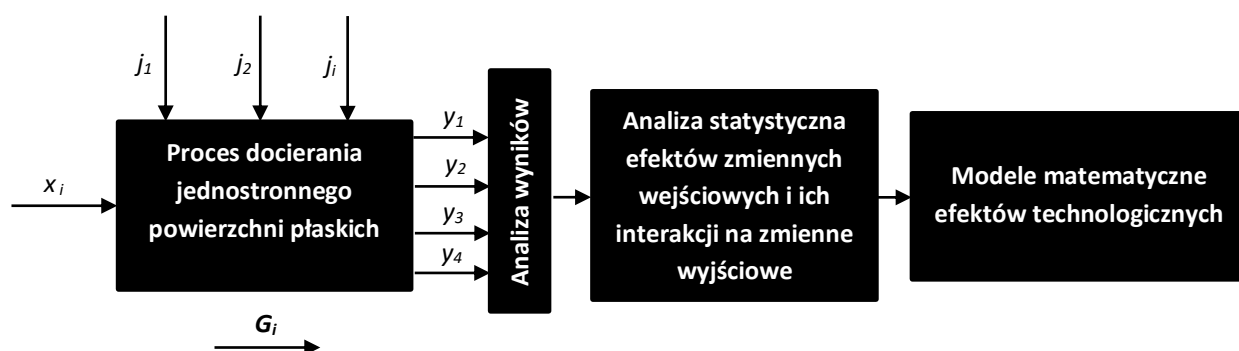
J – wielkości zakłócające:

j_1 – niedokładności w ustawieniu parametrów kinematycznych docierania, ilości oraz sposobu rozprowadzania pasty ścierniej na powierzchni tarczy docierającej itp.,

j_2 – rozrzut fizyko-mechanicznych właściwości narzędzia oraz PO.

Badania eksperymentalne rozpoznawcze realizowano według planu statycznego, zdeterminowanego, selekcyjnego PS/DS, natomiast właściwe i sprawdzające planu kompletnego PS/DK traktując proces obróbki jako obiekt elementarny. Badania właściwe i sprawdzające przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu czynników wejściowych, których wartości dobrano na podstawie rezultatów badań rozpoznawczych i zgodnie ze schematem zaprezentowanym na rysunku 27.

W części badań eksperymentalnych poświęconych modelowaniu efektów technologicznych docierania analizowano wpływ wybranych zmiennych wejściowych procesu na uzyskane rezultaty obróbkowe. Badania realizowano według planu statycznego, zdeterminowanego, kompletnego PS/DK traktując proces obróbki jako obiekt elementarny oraz zgodnie ze schematem zaprezentowanym na rysunku 28. Ilość i zakres zmienności analizowanych czynników dobierano na podstawie wyników wcześniej zrealizowanych badań. Uzyskane rezultaty posłużyły następnie do wyznaczenia modeli matematycznych wybranych efektów technologicznych.



Rysunek 28. Schemat badań eksperymentalnych dotyczących modelowania efektów technologicznych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

Charakterystyka czynników:

X – zmienne wejściowe: ilość i wartości czynników wytypowane na podstawie wyników wcześniejszych badań.

Y – zmienne wyjściowe:

y_1 – liniowy ubytek materiałowy Δh [mm],

y_2 – wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni PO: R_a ,
 W_a [μm],

y_3 – masowy ubytek materiałowy Δm [g],

y_4 – wartość parametrów przestrzennych powierzchni PO: S_a , S_q [μm] oraz
ocena topografii po przeprowadzonej obróbce [obrazy izometryczne].

G – wielkości stałe: jak we wcześniejszych badaniach.

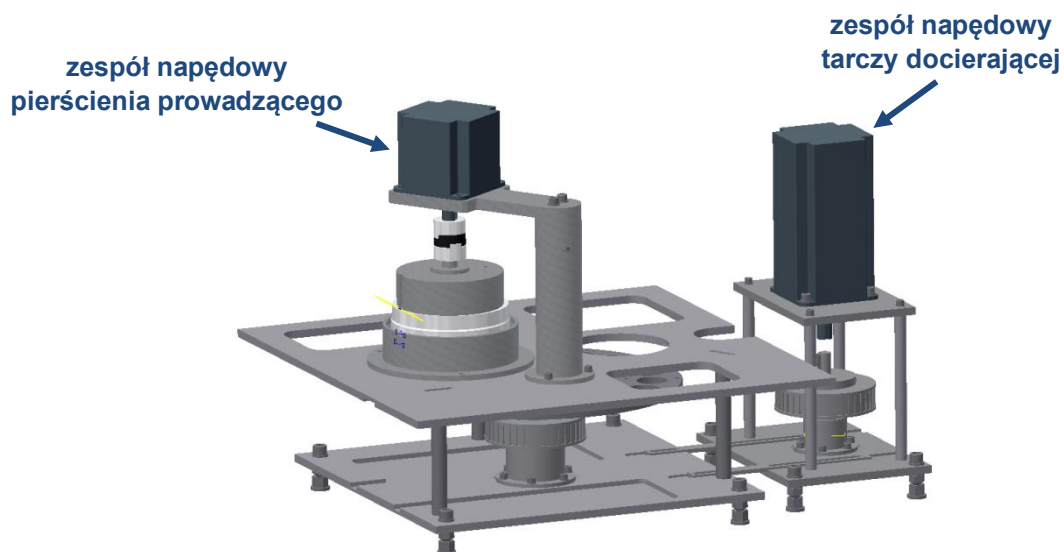
J – wielkości zakłócające: jak we wcześniejszych badaniach.

Opracowanie statystyczne wyników badań zakładało wyznaczenie wartości średnich mierzonych wielkości oraz słupków błędów uzyskanych na podstawie ich odchylenia standardowego. Dodatkowo oceniano istotność statystyczną różnic pomiędzy średnimi wartościami dla wybranych rezultatów obróbkowych.

Realizacja zaplanowanych badań eksperymentalnych wymagała przygotowania stanowiska badawczego wraz z zaprogramowaniem indeksów poszczególnych silników krokowych oraz zastosowania określonej aparatury badawczej, których charakterystykę przedstawiono w dalszej części pracy.

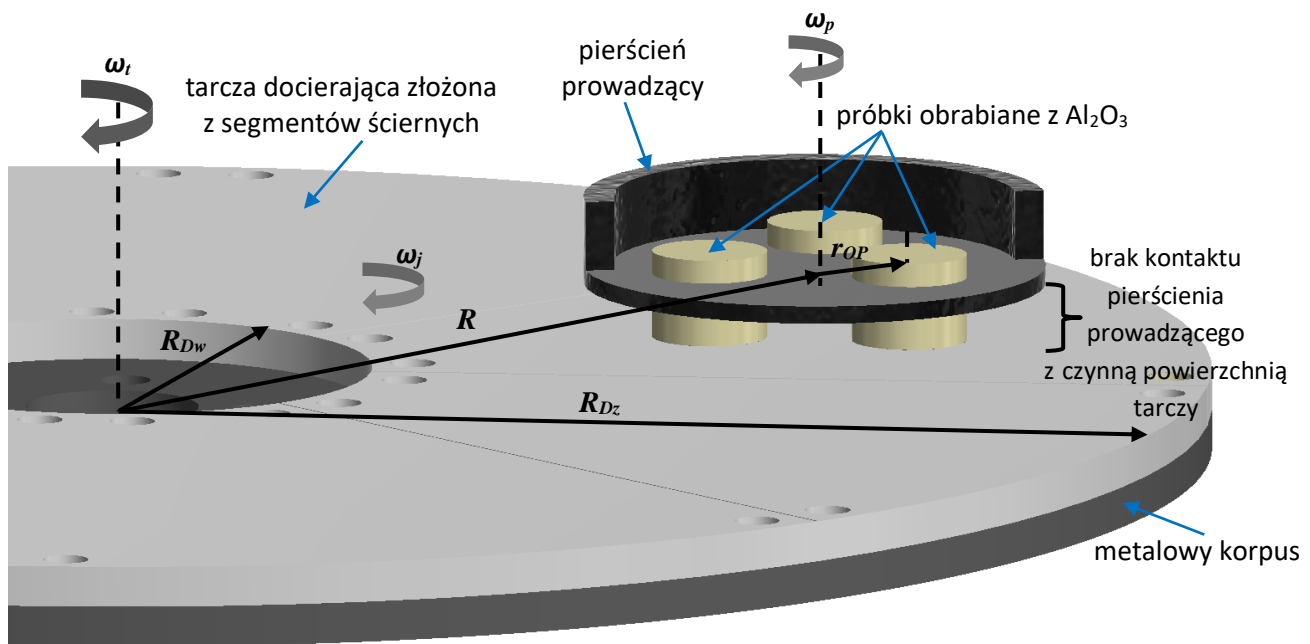
6.1. Stanowisko badawcze docierania jednotarczowego

Badania eksperymentalne docierania jednostronnego realizowano na prototypowej konstrukcji obrabiarki przeznaczonej do docierania oraz szlifowania z kinematyką docierania powierzchni płaskich (Deja, 2013b). Urządzenie składa się z dwóch niezależnych i programowalnych za pośrednictwem silników krokowych 2-fazowych zespołów napędowych pierścienia prowadzącego oraz tarczy docierającej o momentach obrotowych wynoszących kolejno 30 Nm i 11,5 Nm – rysunek 29.



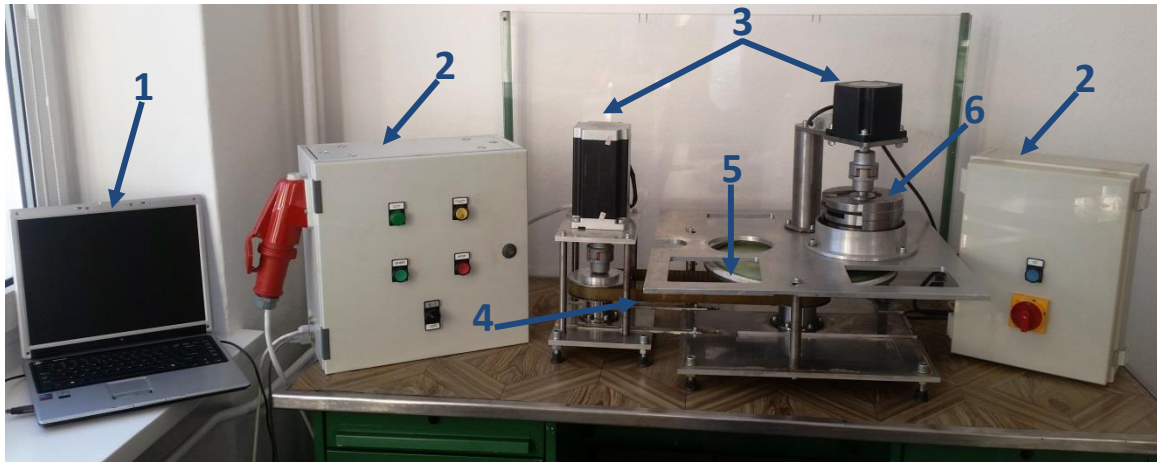
Rysunek 29. Model stanowiska badawczego do docierania jednostronnego z dwoma niezależnymi i programowalnymi napędami (Deja, 2013b)

Zastosowanie silników krokowych dla konstrukcji niezależnych zespołów napędowych pozwoliło na dwukierunkowe sterowanie prędkością obrotową tarczy docierającej oraz pierścienia prowadzącego. Poglądowy schemat układu kinematycznego stanowiska badawczego wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych docierania jednotarczowego próbek z Al_2O_3 zaprezentowano na rysunku 30. Wskazano na nim również istotne wielkości służące do opisu równań ruchu dowolnego punktu znajdującego się na powierzchni obrabianego przedmiotu, które w dalszej kolejności posłużyły do wyznaczenia średniej prędkości docierania v .



Rysunek 30. Układ kinematyczny stanowiska badawczego docierania jednotarczowego: R_{Dz} – promień zewnętrzny tarczy [mm], R_{Dw} – promień wewnętrzny tarczy [mm], R – odległość środka pierścienia prowadzącego od środka tarczy docierającej [mm], r_{OP} – odległość pomiędzy środkiem pierścienia prowadzącego, a środkiem przedmiotu obrabianego [mm], ω_t – prędkość kątowa tarczy [rad/s], ω_p – prędkość kątowa pierścienia prowadzącego [rad/s], ω_j – prędkość kątowa wyobraźnego jarzma [rad/s]

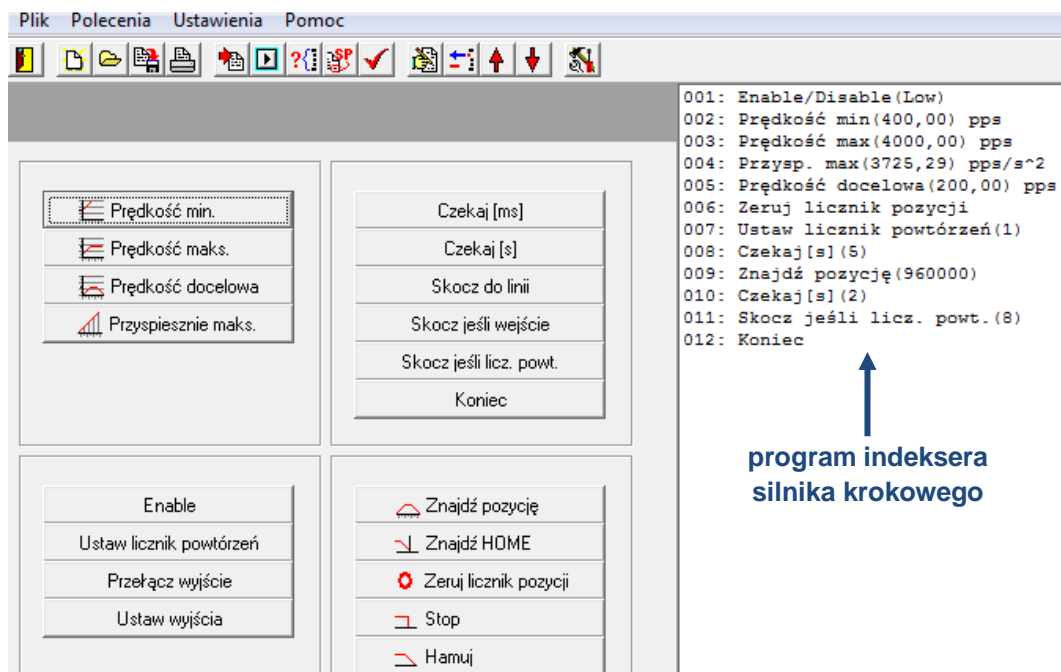
Kolejną istotną modyfikacją stanowiła możliwość przeprowadzenia obróbki bez kontaktu pierścienia prowadzącego z czynną powierzchnią docieraka – rysunek 30, co ma szczególne znaczenie w przypadku stosowania miękkich narzędzi ściernych. Wartości nacisków jednostkowych stosowanych w badaniach eksperymentalnych uzyskiwano za pośrednictwem metalowych obciążników umieszczonych wewnątrz pierścienia prowadzącego. Ponadto, w celu eliminacji drgań podczas obróbki, wykorzystano sprzęgła z wkładką elastyczną. Rysunek 31 przedstawia widok stanowiska badawczego do docierania jednostronnego wraz ze wskazaniem najważniejszych elementów jego budowy.



Rysunek 31. Stanowisko badawcze do docierania jednostronnego powierzchni płaskich: 1 – jednostka komputerowa, 2 – indeksery silników krokowych, 3 – silniki krokowe 2-fazowe, 4 – pasek zębaty, 5 – prototypowa tarcza docierająca, 6 – pierścień prowadzący

Stanowisko badawcze wyposażono w jednostkę komputerową, która umożliwiła programowanie indeksatorów sterujących pracą silników krokowych. Widok programu sterującego WINMI wraz z przykładowymi programami wykorzystywanymi w badaniach eksperymentalnych zaprezentowano na rysunku 32.

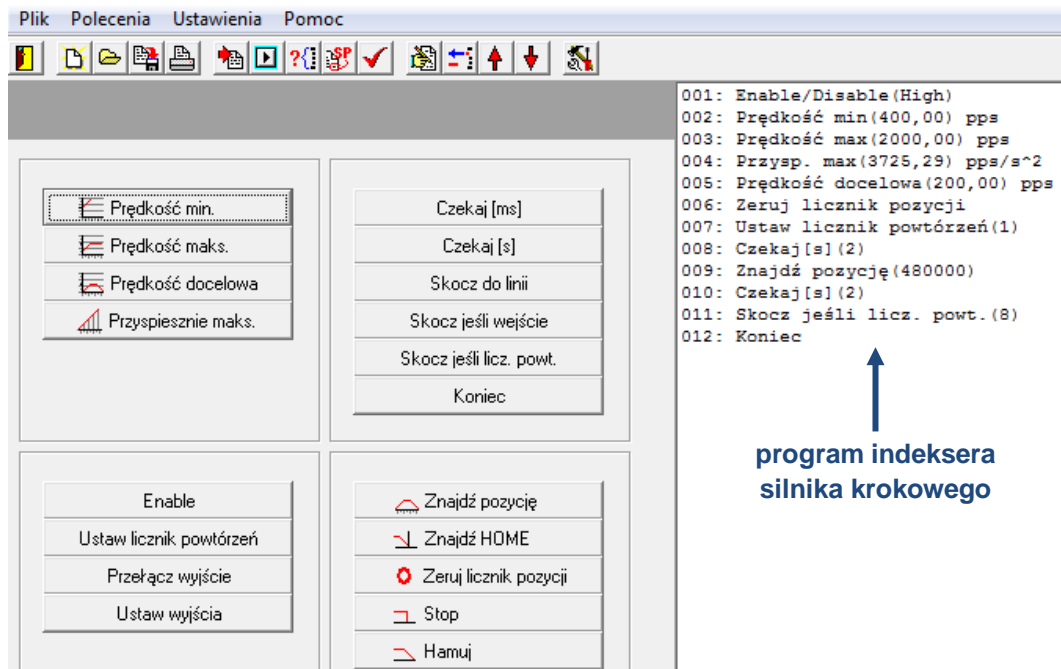
a)



↑
program indeksera silnika krokowego

Rysunek 32. Przykładowe programy indeksatorów silników krokowych

b)



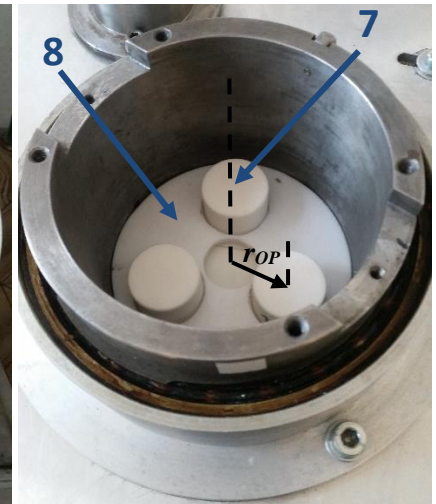
Rysunek 32. cd. Przykładowe programy indeksatorów silników krokowych: a) zespół napędowy tarczy docierającej ($n_t = 120 \text{ obr./min}$, $\Delta t = 4 \text{ min}$); b) zespół napędowy pierścienia prowadzącego ($n_p = 60 \text{ obr./min}$, $\Delta t = 4 \text{ min}$)

Zastosowanie paska zębatego posłużyło do przenoszenia napędu na metalowy korpus docieraka, do którego przy użyciu 32 śrub metrycznych M4x0.7x8 przymocowano 8 prototypowych segmentów ściernych tworzących jednolitą płaską powierzchnię czynną tarczy docierającej – rysunek 33a. Środek pierścienia prowadzącego znajdował się na promieniu $R = 115 \text{ mm}$ – rysunek 30, natomiast PO umieszczono w separatorze przedmiotowym znajdującym się wewnątrz pierścienia prowadzącego na promieniu $r_{OP} = 35 \text{ mm}$ – rysunek 33b.

a)



b)



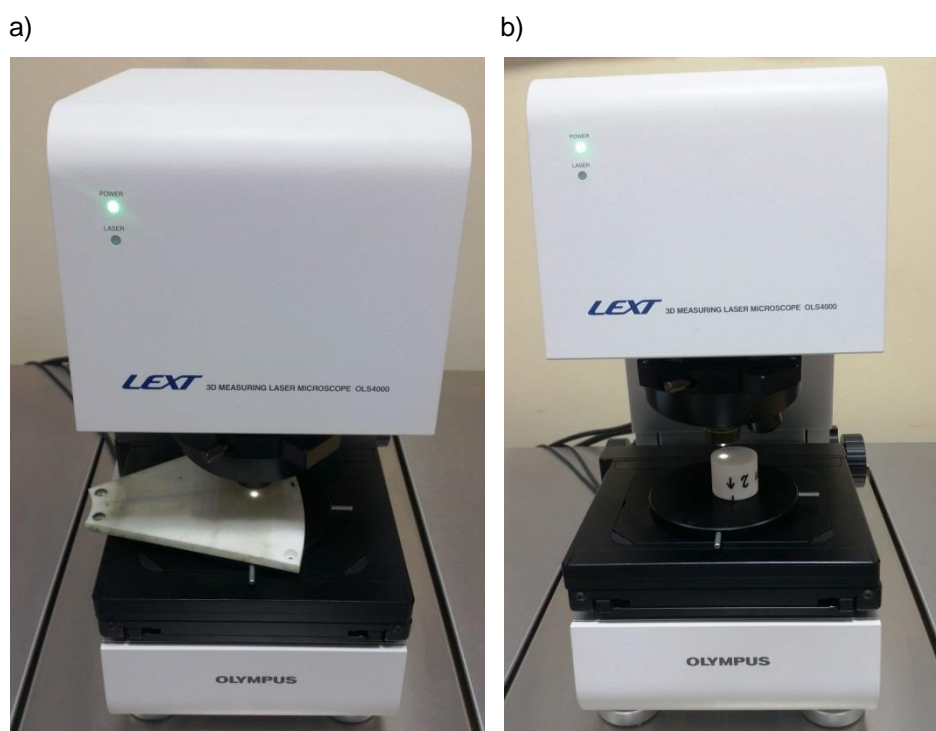
Rysunek 33. Stanowisko badawcze do docierania jednostronnego powierzchni płaskich: a) widok ogólny segmentów ściernych przykręconych do metalowego korpusu urządzenia; b) widok na górną powierzchnię PO umieszczonych w separatorze przedmiotowym wewnątrz pierścienia prowadzącego: 7 – próbki obrabiane z Al_2O_3 , 8 – separator przedmiotowy

Modyfikacja zespołów wykonawczych urządzenia umożliwiła uzyskiwanie większych wartości parametrów kinematycznych w porównaniu do standardowego rozwiązania konstrukcyjnego docierarki jednotarczowej. Zwiększono również możliwości sterowania oraz kontroli poszczególnych parametrów obróbkowych bez zmiany kinematyki standardowego docierania. Głównym założeniem wykorzystania prototypowego stanowiska badawczego była możliwość przeprowadzenia obróbki z większymi prędkościami skrawania w stosunku do tradycyjnego docierania na docierarkach jednotarczowych.

6.2. Aparatura pomiarowo-badawcza

Badania struktury geometrycznej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych przeprowadzono przy użyciu profilometru stykowego Hommel Etamic T8000 firmy Jenoptik z zastosowaniem końcówki pomiarowej o promieniu $2\ \mu\text{m}$ oraz oprogramowania EVOVIS 1.38.0.2. Urządzenie umożliwiło dokonanie pomiarów segmentów ściernych w układzie 2D oraz 3D. Do wyznaczenia parametrów struktury geometrycznej powierzchni PO wykorzystano przenośne profilometry stykowe HOMMEL TESTER T500 oraz T1000 wraz z dedykowanym oprogramowaniem Turbo Datawin-NT.

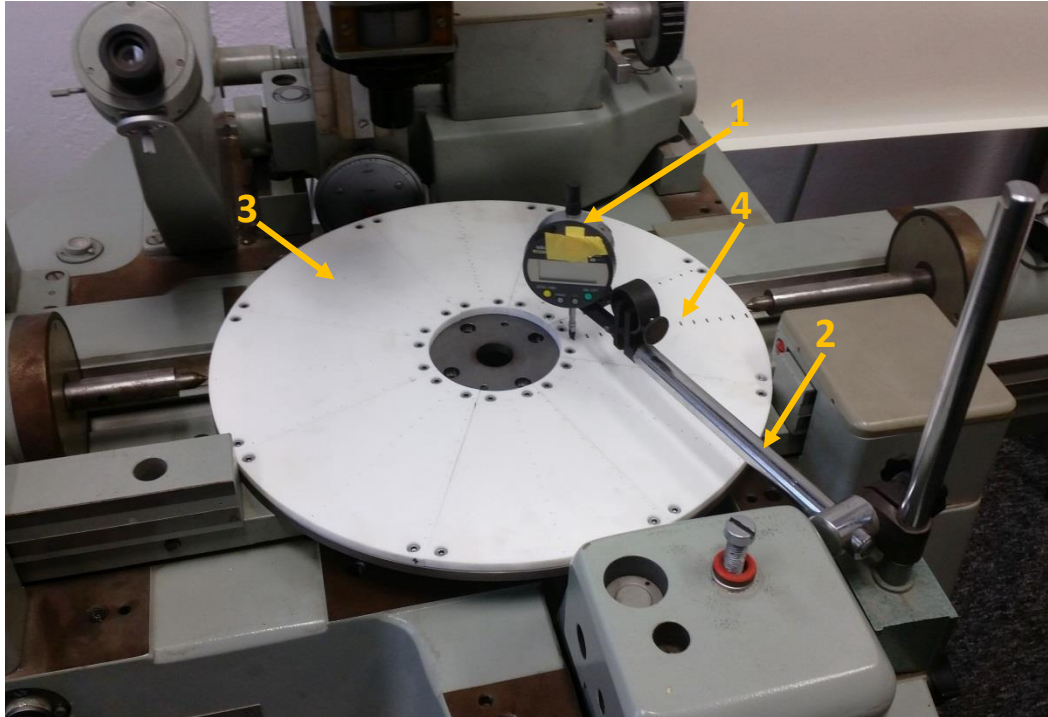
Obserwacji oraz analizy topografii płaskiej powierzchni pojedynczych segmentów ściernych oraz obrabianych przedmiotów dokonywano przy użyciu mikroskopu metalograficznego OLYMPUS BX51 wraz z dedykowanym oprogramowaniem OLYMPUS Stream Motion oraz mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000 i optycznego profilometru 3D – S neox Sensofar – rysunek 34.



Rysunek 34. Przykład obserwacji powierzchni za pomocą mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000:
a) prototypowy segment ścierny; b) próbka z ceramiki technicznej

W celu wyznaczenia rzeczywistego kształtu tarczy docierającej wykorzystano cyfrowy czujnik zegarowy firmy Mitutoyo o dokładności odczytu $\pm 0,001\ \text{mm}$, który przymocowano do uchwyty magnetycznego. Przykręcone do metalowego korpusu prototypowe segmenty ściernie zostały

następnie umieszczone w sztywnym korpusie mikroskopu uniwersalnego Carl Zeiss Jena. Widok stanowiska przeznaczonego do pomiaru błędów kształtu prototypowych tarcz docierających wraz ze wskazaniem jego kluczowych elementów oraz punktów pomiarowych wyznaczonych na powierzchni narzędzia zaprezentowano na rysunku 35.



Rysunek 35. Stanowisko do pomiaru błędu kształtu tarczy docierającej: 1 – cyfrowy czujnik zegarowy, 2 – uchwyt magnetyczny, 3 – docierak przykręcony do metalowego korpusu, 4 – punkty pomiarowe

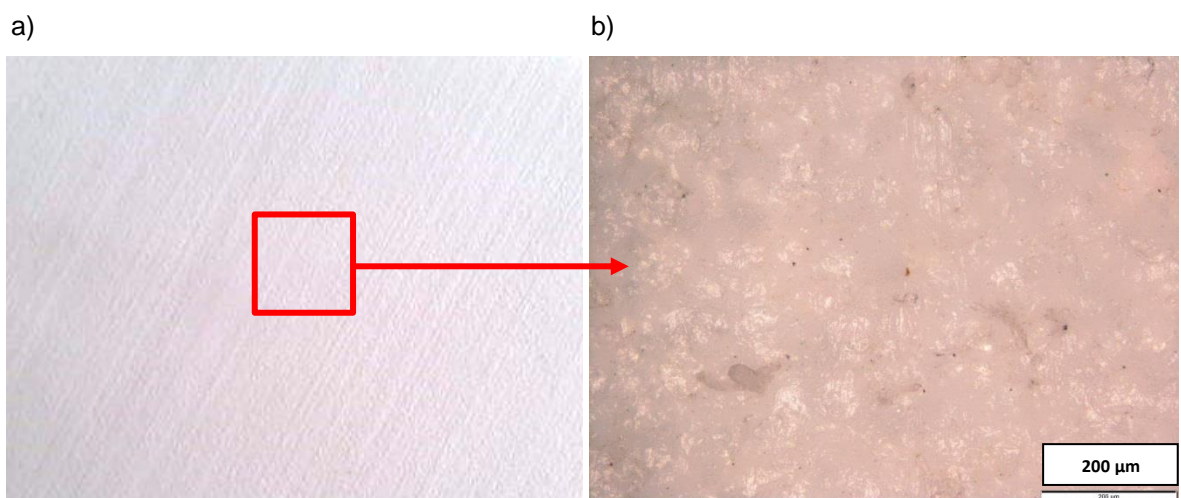
Wartości liniowego oraz masowego ubytku materiałowego przedmiotów obrabianych mierzono odpowiednio za pomocą mikrometru Mitutoyo z odczytem cyfrowym $\pm 1 \mu\text{m}$ oraz wagi laboratoryjnej o rozdzielczości 0,001 g.

7. OCENA JAKOŚCI WYKONANIA SEGMENTÓW ŚCIERNYCH

Pomiar struktury geometrycznej płaskiej powierzchni segmentów ściernych tarczy docierającej w układzie dwu- oraz trójwymiarowym oraz jej kształtu stanowiło jeden z etapów zaplanowanych badań rozpoznawczych. Ich celem było wyznaczenie wybranych parametrów chropowatości i falistości płaskiej powierzchni czynnej segmentów, a także uzyskanie informacji dotyczących topografii powierzchni oraz kształtu prototypowego narzędzia.

7.1. Analiza struktury geometrycznej płaskiej powierzchni czynnej segmentów

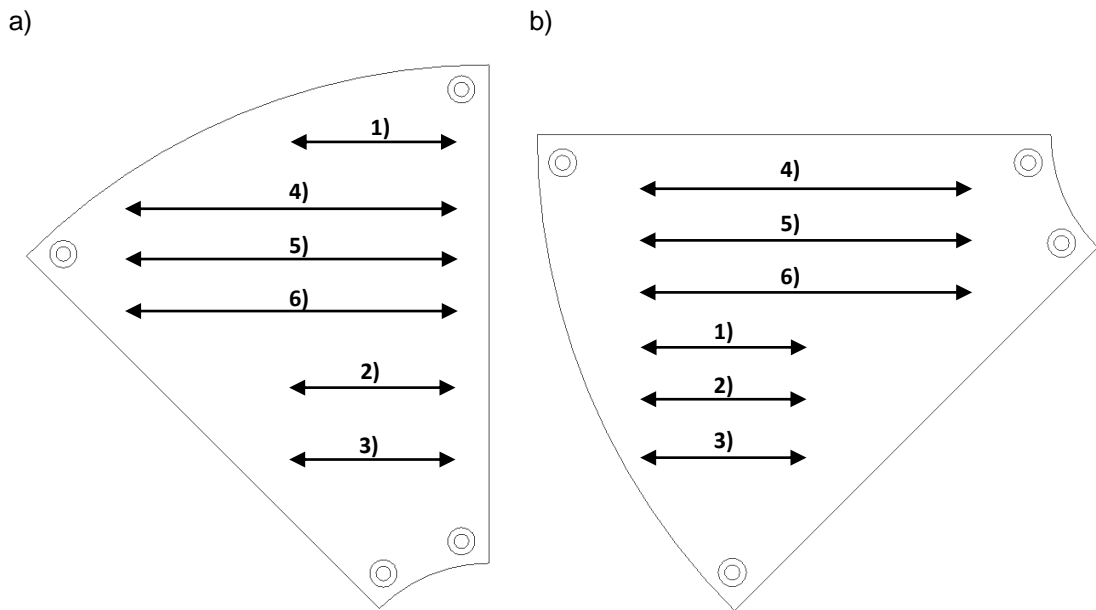
Badania rozpoczęto od obserwacji płaskiej powierzchni czynnej segmentów ściernych, które przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu OLYMPUS BX51 wraz z dedykowanym oprogramowaniem OLYMPUS Stream Motion – rysunek 36.



Rysunek 36. Widok płaskiej powierzchni przykładowego segmentu ściernego: a) zdjęcie makroskopowe z widocznymi śladami warstw materiału; b) zdjęcie mikroskopowe

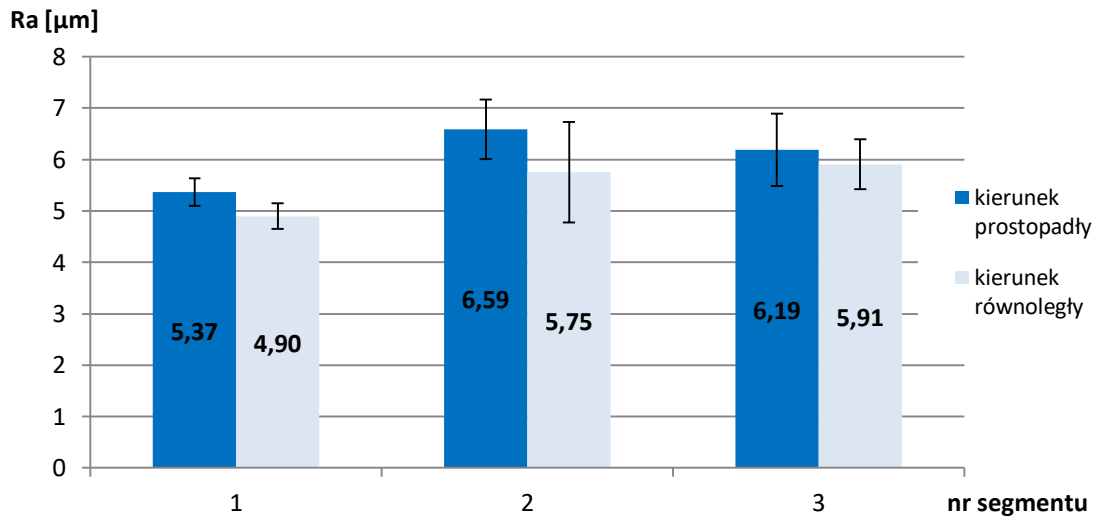
Analiza zdjęć wskazała na uzyskanie powierzchni zewnętrznej o wyraźnej kierunkowej strukturze, charakterystycznej dla płaskich powierzchni elementów wytworzonych w technologii SLS. Przyczyną powstania jednokierunkowej struktury w formie widocznych równoległych warstw – rysunek 36 był ściśle określony ruch wiązki lasera spiekającego kolejne warstwy proszku poliamidowego.

Uwzględniając charakter uzyskanej struktury, badania płaskiej powierzchni czynnej segmentów w układzie 2D przeprowadzono w kierunku prostopadłym oraz równoległym do wyznaczonych na jej powierzchni warstw. Pomiaru przy użyciu profilometru stykowego Hommel Etamic T8000 firmy Jenoptik wykonano dla trzech losowo wybranych segmentów ściernych wg normy ISO 4287 przy prędkości przesuwu igły pomiarowej 0,5 mm/s. W badaniach analizowano parametry chropowatości R_a oraz falistości W_a . Dla każdego z mierzonych kierunków wykonano 6 pomiarów, uwzględniając pomiary krótkie i długie kolejno o długościach odcinka pomiarowego wynoszących $l_t = 50,25$ mm oraz $l_t = 100,25$ mm. Miejsca wykonywanych pomiarów chropowatości i falistości powierzchni przedstawiono schematycznie na rysunku 37.

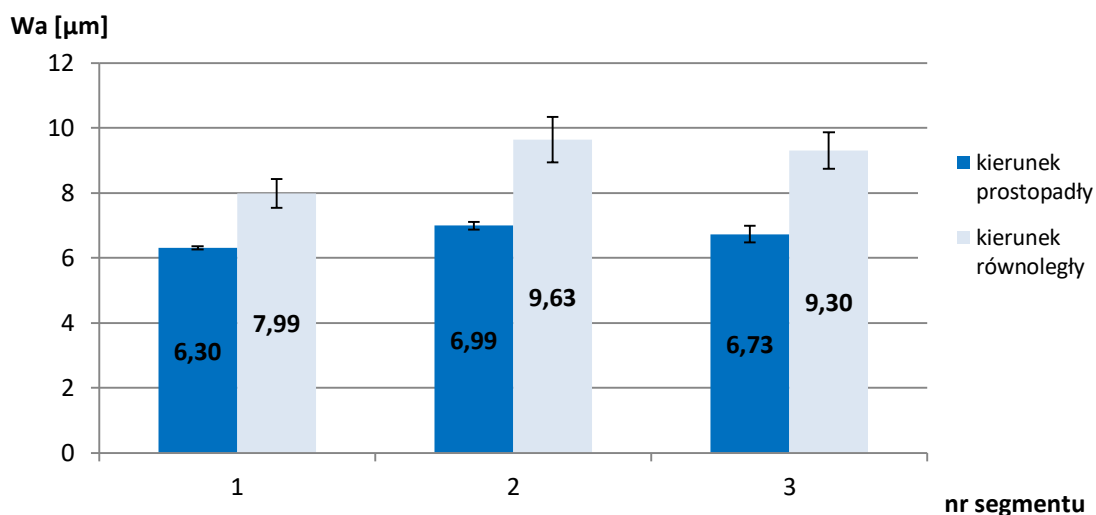


Rysunek 37. Miejsca wykonywanych pomiarów (1,2,3 – krótkie; 4,5,6 – długie) płaskiej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściennych w układzie 2D: a) prostopadłe do warstw; b) równoległe do warstw

Analiza dwuwymiarowa wskazała na uzyskanie dużych wartości parametrów chropowatości oraz falistości powierzchni płaskiej segmentów ściennych, które różniły się nieznacznie w zależności od kierunku wykonywanego pomiaru – rysunki 38 oraz 39. Jednocześnie wyniki pomiarów tych samych parametrów dla kolejnych segmentów ściennych były do siebie zbliżone.

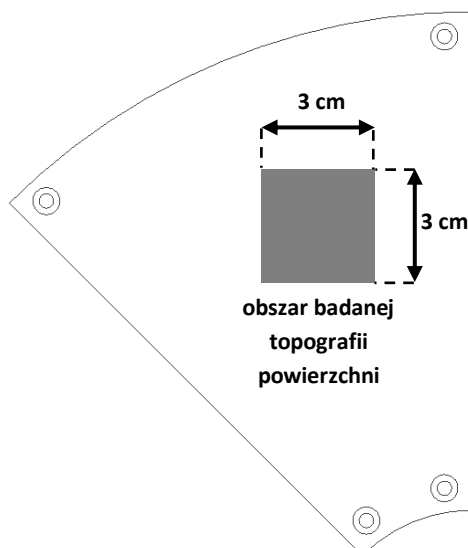


Rysunek 38. Wartości parametru chropowatości Ra powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściennych tarczy docierającej przed obróbką docieraniem



Rysunek 39. Wartości parametru falistości W_a powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych tarczy docierającej przed obróbką docieraniem

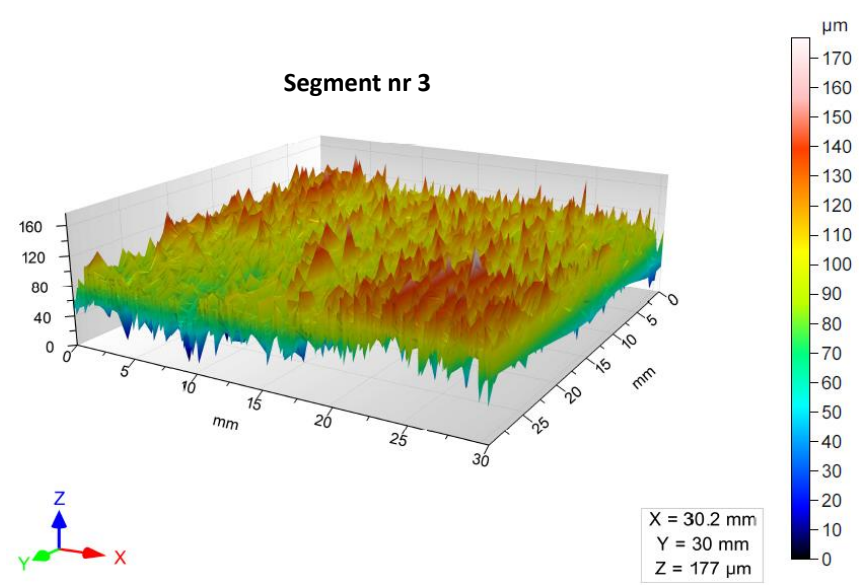
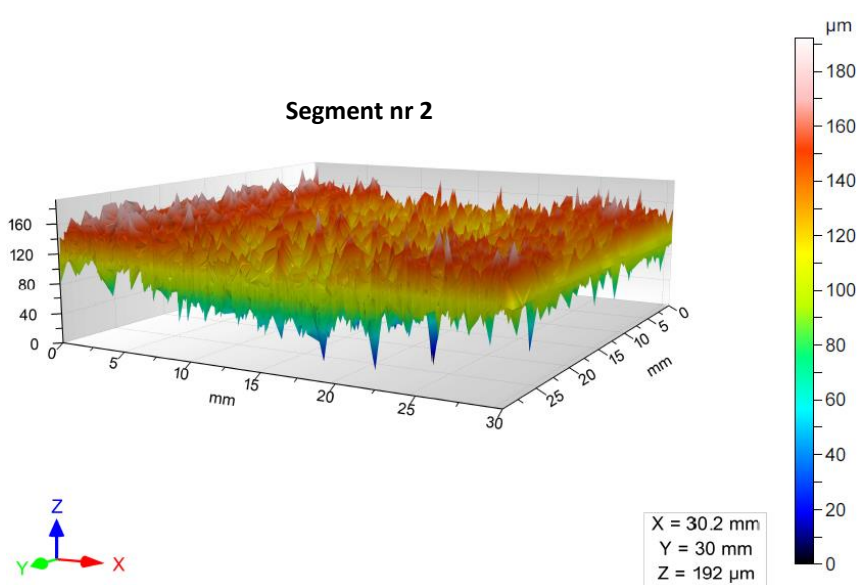
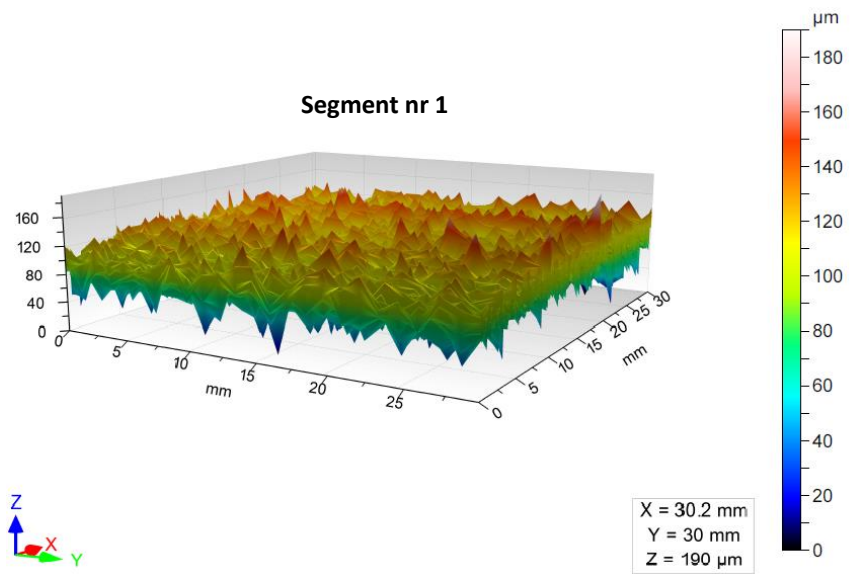
Wykorzystanie trójwymiarowej analizy powierzchni segmentów pozwoliło na pogłębienie informacji dotyczących jej topografii oraz przeprowadzenie wstępnej oceny kształtu powierzchni czynnej. W tym celu, podobnie jak podczas analizy powierzchni w układzie 2D, wykorzystano profilometr stykowy Hommel Etamic T8000 firmy Jenoptik do pomiaru tych samych segmentów. Badanie wykonano wg normy ISO 25178 w kierunku prostopadłym do powstałych warstw na obszarze o wymiarach 3 cm x 3 cm, który schematycznie przedstawiono na rysunku 40. Wybrany obszar związany był z przewidywanym miejscem najwyższego zużycia narzędzia spowodowanego stałym kontaktem obrabianych próbek podczas obróbki docieraniem. Ocenę ilościową topografii powierzchni przeprowadzono w oparciu o wyznaczone parametry S_a oraz S_q . Dodatkowo w badaniach topografii powierzchni uwzględniono również pomiary wykonane przy użyciu optycznego profilometru 3D – S neox Sensofar metodą mikroskopii konfokalnej. Analizowany w tym przypadku obszar wynosił 6,27 mm x 2,67 mm, natomiast pomiary wykonywano zgodnie z normą ISO 25178.



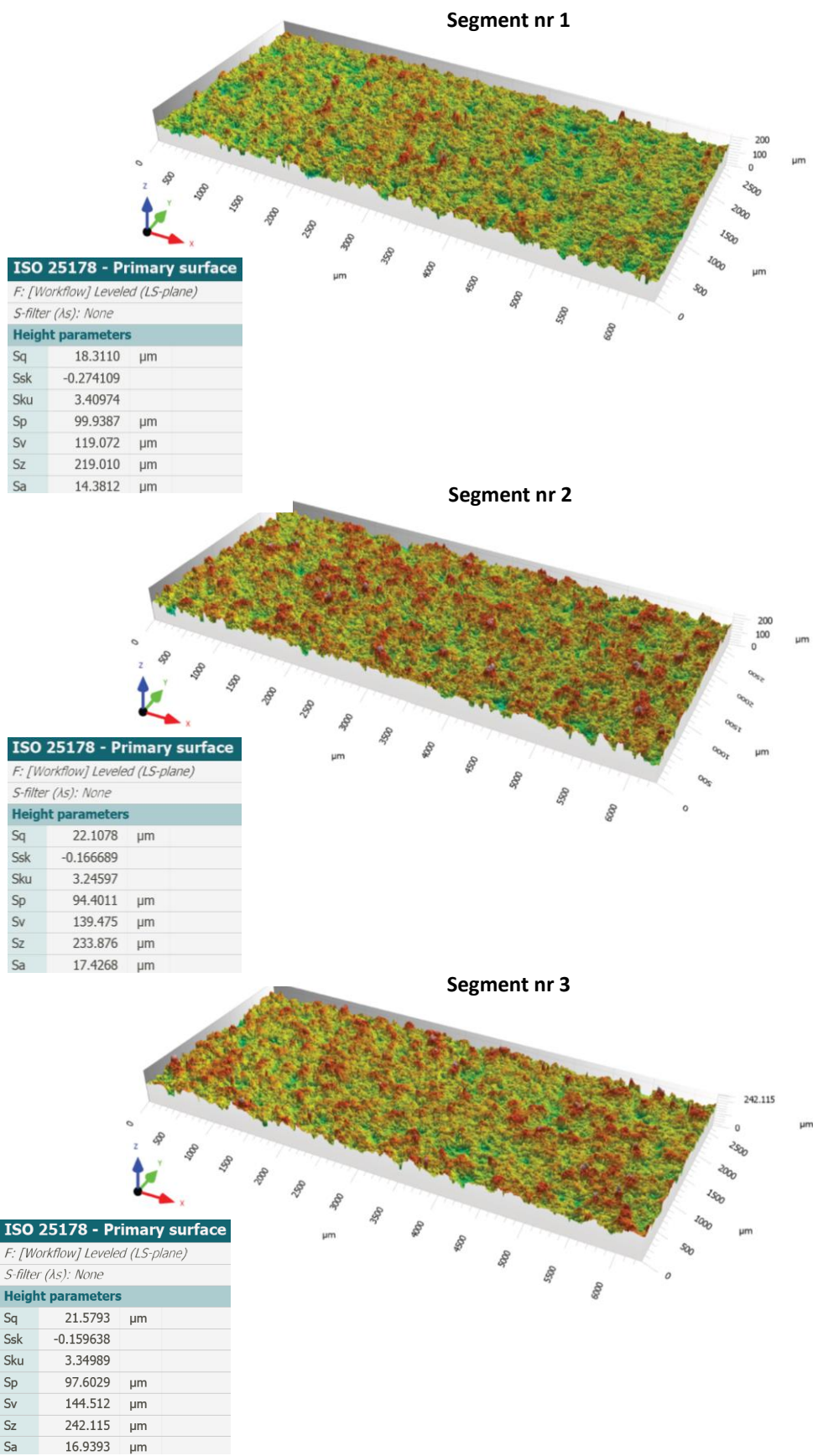
Rysunek 40. Obszar badania topografii powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych za pomocą profilometru stykowego Hommel Etamic T8000

Graficzną prezentację wyników przedstawiono w formie izometrycznych obrazów powierzchni zmierzonych segmentów ściernych – rysunki 41 oraz 42. Uzyskane struktury charakteryzują się dużą nieregularnością, o czym świadczą licznie występujące nierówności w formie wzniesień (szczytów) oraz wgłębień (zagłębień, dolin). Ocena jakościowa przeprowadzona w oparciu o wyznaczone parametry wysokościowe S_a oraz S_q – rysunek 43 potwierdziła otrzymanie struktury o dużej nieregularności. W wyniku przeprowadzonego procesu szybkiego prototypowania uzyskano średnie wartości parametrów wynoszące kolejno $S_a = 16 \mu\text{m}$ oraz $S_q = 20 \mu\text{m}$.

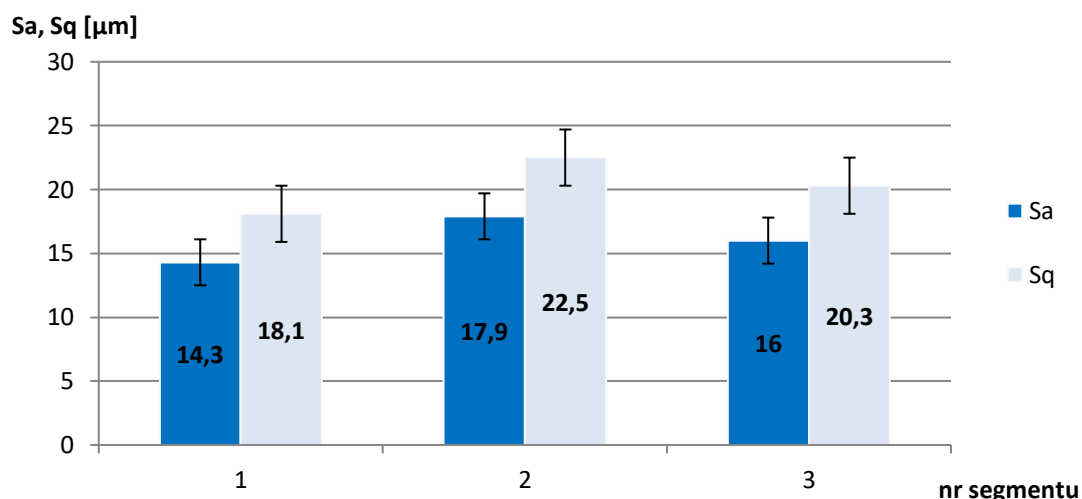
Analiza płaskiej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych w układach 2D oraz 3D wskazała na uzyskanie nieregularnej struktury o dużych wartościach parametrów chropowatości oraz falistości powierzchni. Przeprowadzona analiza z wykorzystaniem profilometru stykowego oraz optycznego, zgodnie z wcześniejszymi przewidywaniami, potwierdziła uzyskanie typowej dla elementów wytwarzanych metodą SLS struktury powierzchni. Z punktu widzenia przebiegu procesu docierania gromadzenie się ziaren ściernych w występujących dolinach oraz ich łatwe wbijanie w miękką strukturę narzędzia może korzystnie wpłynąć na otrzymane rezultaty obróbkowe. Wpływ struktury powierzchni segmentów na przebieg i uzyskiwane efekty technologiczne docierania powierzchni płaskich przedstawiono w dalszej części pracy.



Rysunek 41. Topografie powierzchni wybranych segmentów ściennych uzyskane za pomocą profilometru stykowego Hommel Etamic T8000



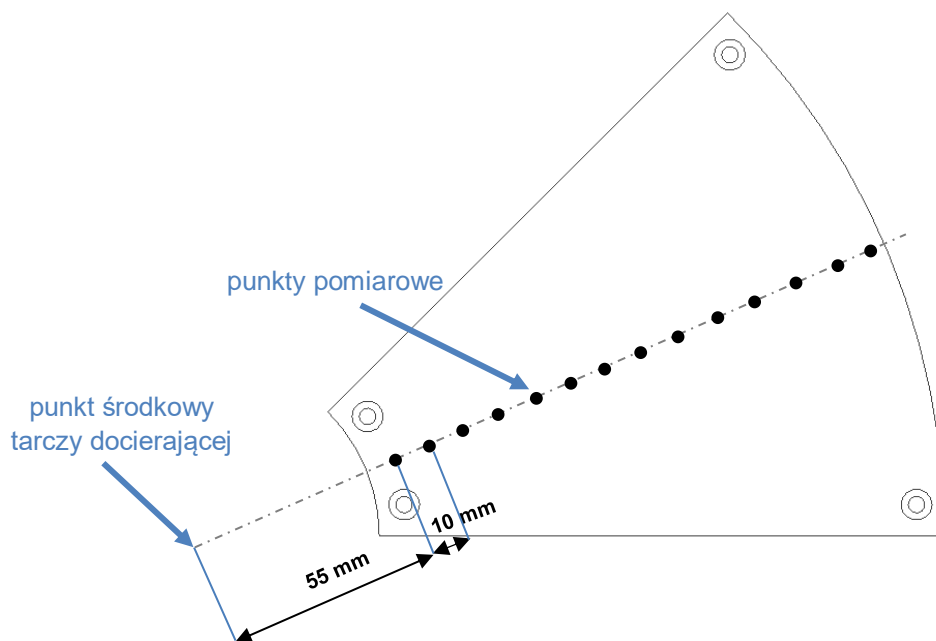
Rysunek 42. Topografie powierzchni segmentów ściennych z wybranymi parametrami wysokościowymi uzyskane za pomocą profilometru optycznego S neox Sensofar



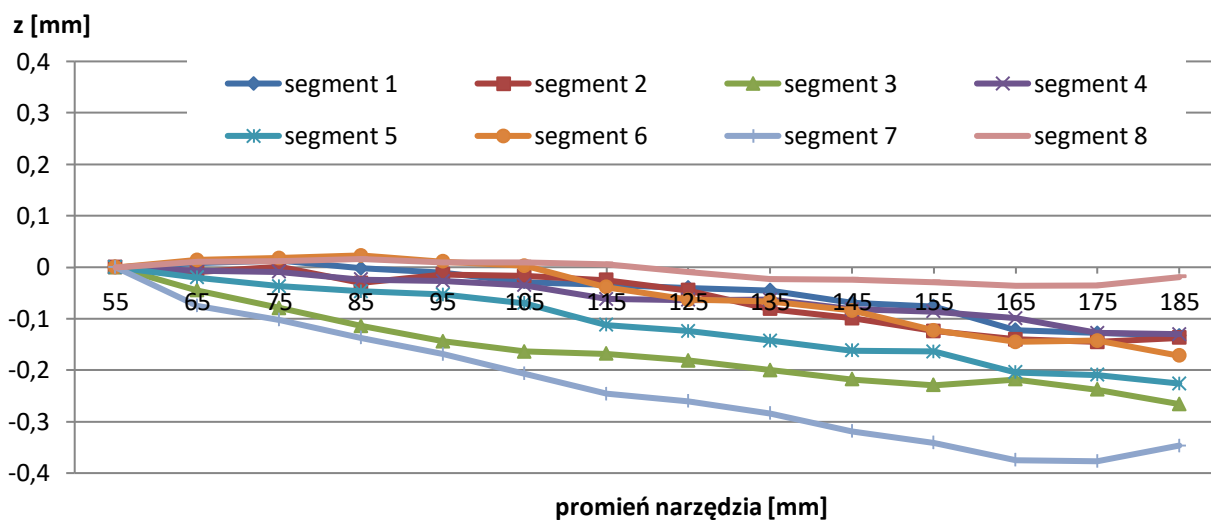
Rysunek 43. Wartości parametrów Sa oraz Sq płaskiej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych tarczy docierającej wyznaczone przy użyciu profilometru stykowego Hommel Etamic T8000

7.2. Analiza kształtu narzędzia

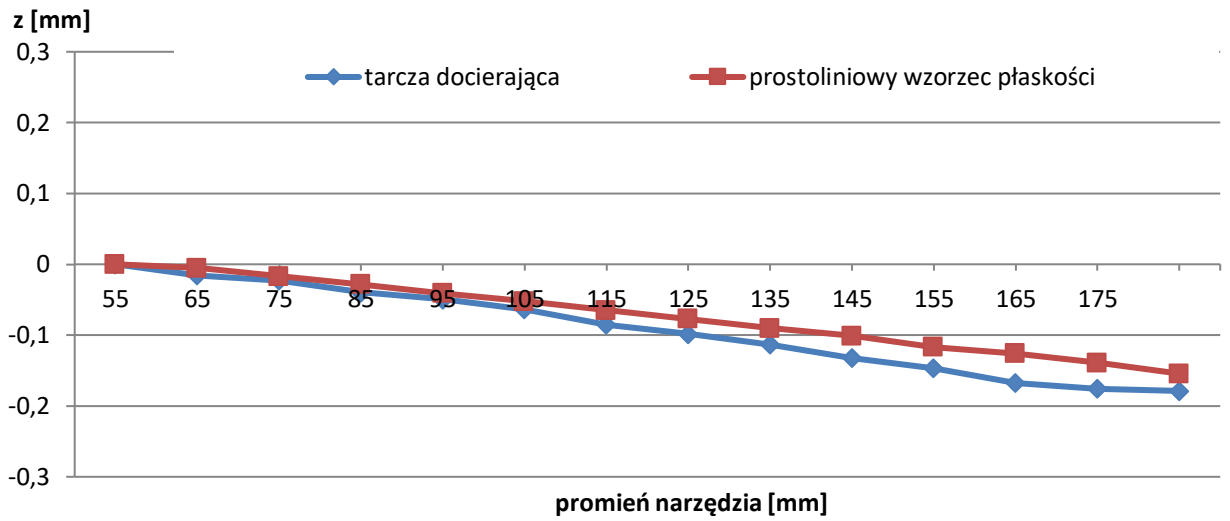
Pomiary wykonywano wzdłuż linii środkowej każdego segmentu ściernego w kierunku promieniowym w określonych punktach oraz zgodnie ze strategią siatki biegunowej. W rezultacie uzyskano 8 profili promieniowych, które wyznaczono z 14 punktów pomiarowych (łącznie 112 pomiarów) oraz przyjmując stałą odległość pomiędzy nimi wynoszącą $d = 10 \text{ mm}$ – rysunek 44. Po zakończeniu pomiaru poszczególnych segmentów ściernych cyfrowy czujnik zegarowy podnoszono, natomiast tarczę docierającą obracano o kąt 45° w celu dokonania pomiaru dla kolejnego segmentu ściernego. Jednocześnie dane pomiarowe każdego z segmentów transponowano do punktu zerowego (wartość 0 dla punktu pomiarowego znajdującego się w odległości 55 mm od punktu środkowego tarczy docierającej) – rysunek 45. Dane pomiarowe posłużyły do wyznaczenia profili poszczególnych segmentów. W analogiczny sposób wyznaczono profil prostoliniowego wzorca płaskości, który umieszczono na powierzchni tarczy docierającej. Na rysunku 46 zaprezentowano porównanie profili przykładowej tarczy docierającej przed rozpoczęciem badań eksperymentalnych docierania próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 oraz prostoliniowego wzorca płaskości.



Rysunek 44. Miejsca wykonywanych pomiarów dla pojedynczego segmentu



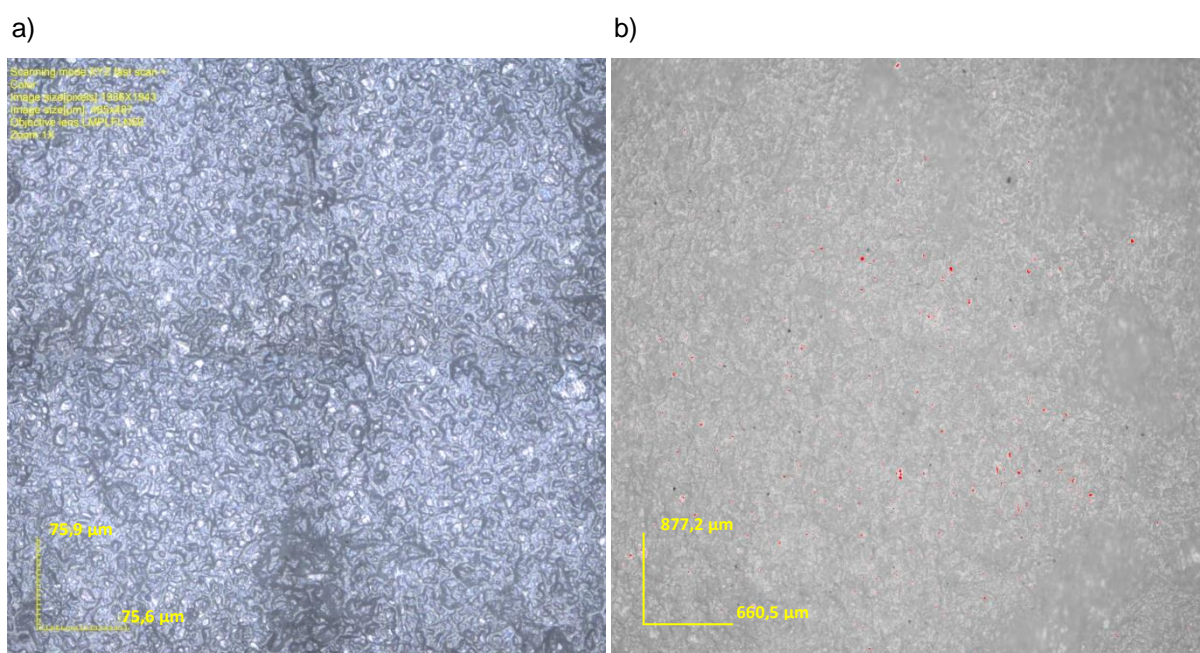
Rysunek 45. Profile poszczególnych segmentów przykładowej tarczy docierającej wykorzystanej w badaniach eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej



Rysunek 46. Profile przykładowej prototypowej tarczy docierającej przed rozpoczęciem obróbki PO z ceramiki technicznej Al_2O_3 oraz prostoliniowego wzorca płaskości

8. DOCIERANIE CERAMIKI TECHNICZNEJ Al_2O_3

W celu sprawdzenia możliwości obróbkowych prototypowego narzędzia ściernego w badaniach eksperymentalnych zdecydowano się na docieranie PO z ceramiki technicznej Al_2O_3 , stanowiącej przykład trudnoobrabialnego materiału o porowatej strukturze i dużej twardości ($HV_{10} = 1100$ MPa) – rysunek 47. Obróbkę realizowano z wykorzystaniem jednakowych cylindrycznych kształtek o średnicy zewnętrznej $d_w = 34$ mm i wysokości początkowej $h_{w0} = 30$ mm. Zastosowany gatunek ceramiki, oprócz wysokich właściwości wytrzymałościowych, twardości oraz odporności na zużycie ściernie, wykazuje bowiem dużą skłonność do pęknięcia i powstawania wad powierzchniowych w trakcie obróbki (Pawar, Ballav and Kumar, 2015).



Rysunek 47. Obrazy mikroskopowe wybranego fragmentu powierzchni próbki z ceramiki technicznej Al_2O_3 uzyskane przy użyciu: a) mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000; b) profilometru optycznego S neox Sensofar

Jako zawieszinę stosowano pasty diamentowe z ziarnami o rozmiarach $SD\ 28/20$ (średnioziarniste) oraz $SD\ 1/0$ (drobnoziarniste) i ziarnistości zgodnej z PN75/M59108 oraz luźne ziarna diamentowe $D107$ w zawieszynie w oleju maszynowym. W trakcie badań dokonywano pomiarów masy, a także wysokości oraz chropowatości i falistości powierzchni PO w trzech punktach pomiarowych. Wysokość próbek mierzono przy użyciu mikrometru Mitutoyo o rozdzielczości 0,001 mm, masę za pośrednictwem wagi laboratoryjnej o rozdzielczości 0,001 g, natomiast chropowatość i falistość powierzchni z wykorzystaniem profilometrów stykowych HOMMEL TESTER T500 zgodnie z normą DIN4777 oraz HOMMEL TESTER T1000 zgodnie z normą ISO 11562. Pomiarów wybranych parametrów chropowatości oraz falistości powierzchni dokonywano przy użyciu końcówki pomiarowej o promieniu $2\ \mu m$ i prędkości przesuwu igły $0,5\ mm/s$, przyjmując długości odcinka elementarnego i pomiarowego wynoszące kolejno $l_r = 0,8\ mm$ oraz $l_t = 4,8\ mm$. Łącznie po każdym teście wykonano 9 pomiarów każdego typu, w trzech punktach pomiarowych na trzech próbkach. Dodatkowo badania czynnej powierzchni narzędzia oraz topografii powierzchni obrabianych próbek realizowano

z wykorzystaniem optycznego profilometru 3D – S neox Sensofar oraz mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000. Analizę topografii powierzchni przeprowadzano w oprogramowaniu SensoMAP.

8.1. Badania rozpoznawcze docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

W trakcie badań eksperymentalnych rozpoznawczych analizowano wpływ poszczególnych zmiennych wejściowych (niezależnych), takich jak: rodzaj zawiesiny ścierniej z_s , prędkość względna docierania v związana z prędkością obrotową tarczy docierającej n_t oraz pierścienia prowadzącego n_p , czas obróbki t i nacisk jednostkowy p na liniowy ubytek materiałowy oraz wybrane parametry chropowatości i falistości obrabianych powierzchni. Celem tej części badań było sprawdzenie możliwości obróbkowych prototypowego narzędzia oraz określenie wartości czynników stałych wykorzystywanych w dalszych badaniach eksperymentalnych. Analizowane zmienne wejściowe (niezależne) przyjmowały następujące wartości:

- czas obróbki t : 60 s, 120 s, 240 s, 300 s, 480 s, 720 s, 940s;
- nacisk jednostkowy p : 6 kPa, 12 kPa;
- prędkość obrotowa narzędzia n_t : 60 obr./min, 120 obr./min;
- prędkość obrotowa pierścienia prowadzącego wraz z umieszczonymi w separatorze przedmiotami n_p : 31 obr./min, 60 obr./min;
- rodzaj zawiesiny ścierniej z_s : pasta diamentowa z ziarnami o rozmiarach $SD\ 28/20$, luźne ziarna diamentowe $D107$.

Zestaw parametrów obróbkowych (zmiennych niezależnych) przyjętych podczas docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 zaprezentowano w tabeli 6.

Tabela 6. Zestaw parametrów obróbkowych docierania jednostronnego PO z ceramiki technicznej Al_2O_3 podczas badań rozpoznawczych

Nr testu	X – zmienne niezależne						
	Nacisk jednostkowy p [kPa]	Prędkość obrotowa [obr./min]		Średnia prędkość docierania v [m/s]	Współczynnik kinematyczny K	Rodzaj zawiesiny ścierniej [ml]	Czas testu Δt [s]
		tarcza docierająca n_t	pierścień prowadzący n_p				
T1	6	60	31	0,72	0,5	4 ml pasty diamentowej $SD\ 28/20$	60; 120
T2	12	60	31	0,72	0,5	0,5 ml ziaren diamentowych $D107$	60; 240; 300; 480
T3	12	120	60	1,44	0,5	0,5 ml ziaren diamentowych $D107$	120; 240; 480; 720; 940

Ponieważ prototypowe narzędzie nie było wcześniej stosowane w obróbce ścierniej, wyboru wartości poszczególnych zmiennych wejściowych oraz wielkości stałych podanych w tabeli 6 dla kolejnych testów dokonywano analizując przebieg obróbki oraz rezultaty uzyskiwane we wcześniejszych testach. Zastosowanie w pierwszym teście T1 typowych dla standardowego docierania relatywnie niskich parametrów obróbkowych, tj. krótkiego czasu docierania oraz pasty ścierniej z drobnymi

ziarnami diamentowymi, nie spowodowało efektywnego skrawania materiału po 120 s ($\sim 1 \mu\text{m}$), przy jednoczesnym nieznacznym zmniejszeniu wartości parametru chropowatości Ra oraz wyraźnym zmniejszeniu wartości parametru falistości Wa powierzchni próbek – rysunek 48. Prawdopodobną przyczyną niewielkiego ubytku materiałowego podczas początkowego testu było zagłębienie się drobnych ziaren w materiale narzędzia o małej twardości.

Uzyskane rezultaty obróbkowe wskazały na konieczność zwiększenia nacisku jednostkowego p oraz parametrów kinematycznych n_t oraz n_p , które zgodnie z równaniem Prestona wpływają na wielkość usuwanego materiału według formuły (1):

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = k \cdot p \cdot v, \text{ gdzie:} \quad (1)$$

ΔH – wielkość ubytku materiału;

Δt – czas obróbki;

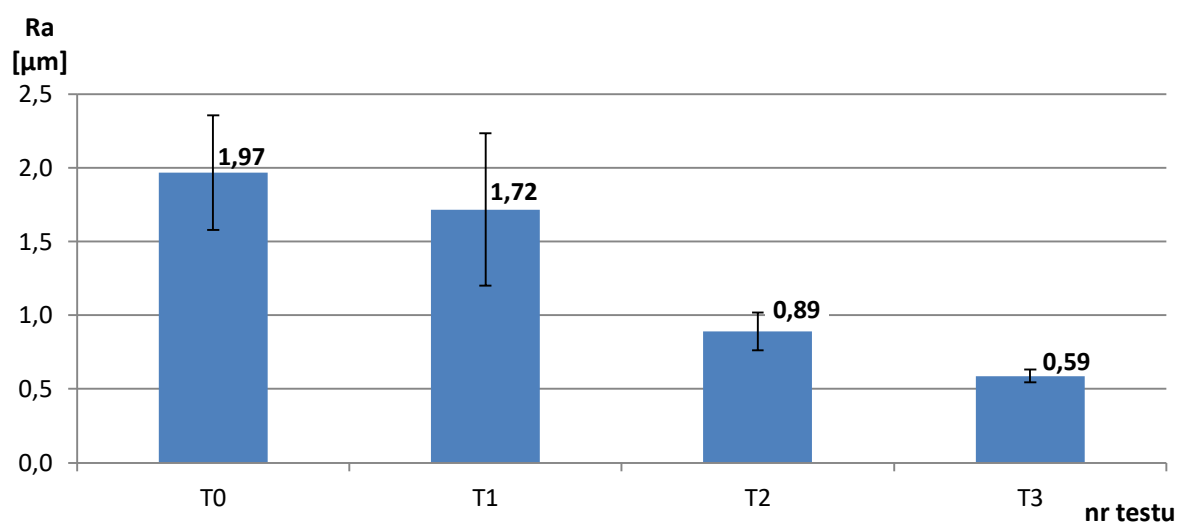
k – stała Prestona;

p – nacisk jednostkowy;

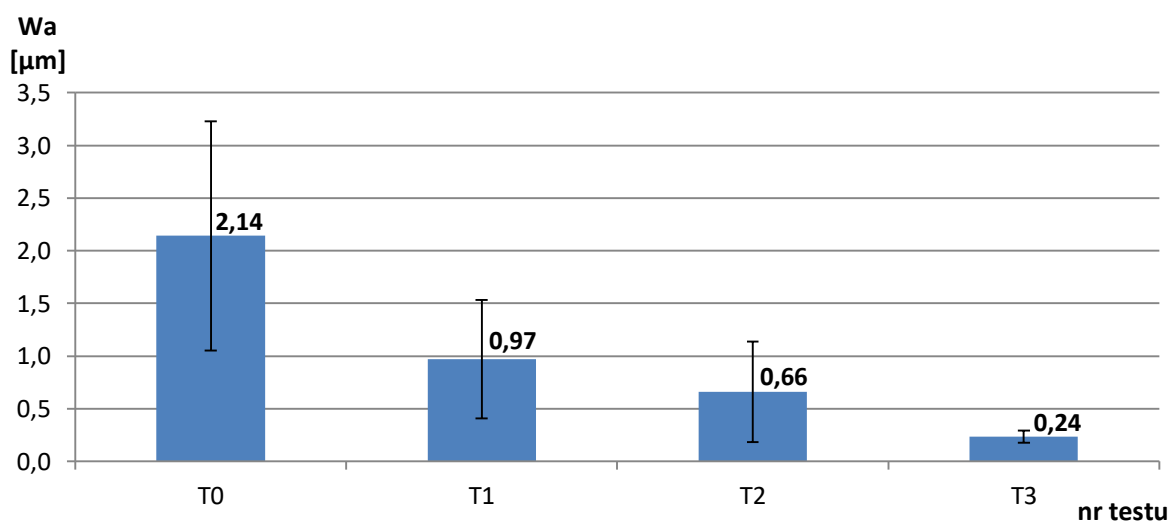
v – prędkość względna.

Ponadto do zawiesziny ścierniej dodano luźne ziarna diamentowe $D107$ w celu intensyfikacji procesu skrawania twardej ceramiki w kolejnych testach. Zwiększenie nacisku jednostkowego podczas testu T2 do wartości $p = 12 \text{ kPa}$ umożliwiło skrawanie materiału, przy wartości ubytku rosnącego liniowo w funkcji czasu – rysunek 49a, a także wpłynęło na wyraźne zmniejszenie chropowatości i falistości – rysunek 48. Podczas ostatniego testu T3 zwiększono dwukrotnie parametry kinematyczne, co spowodowało zauważalne zwiększenie ilości usuwanego materiału również wprost proporcjonalne do czasu trwania obróbki – rysunek 49b oraz zmniejszenie wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni próbek z ceramiki technicznej – rysunek 48. Wielkość usuniętego materiału podczas testu T3 po 480 s obróbki była ponad czterokrotnie większa aniżeli po teście T2. Potwierdzają to wartości współczynników kierunkowych wyznaczonych linii trendu zaprezentowanych na rysunkach 49a oraz b. Nachylenie linii trendu w przypadku testu T3 było czterokrotnie większe niż testu T2, przy jednoczesnym znacznie lepszym dopasowaniu danych doświadczalnych opisanym współczynnikiem determinacji wynoszącym $R^2 = 0,99$ oraz $R^2 = 0,89$ kolejno dla testów T3 oraz T2. Przyjęty zestaw parametrów obróbkowych oraz rodzaj zawiesziny ścierniej dla testu T3 pozwolił na uzyskanie największego liniowego ubytku materiałowego oraz znaczącej poprawy jakości powierzchni, co jest widoczne na wybranych profilach z pomiarów chropowatości powierzchni próbek – rysunek 50.

a)



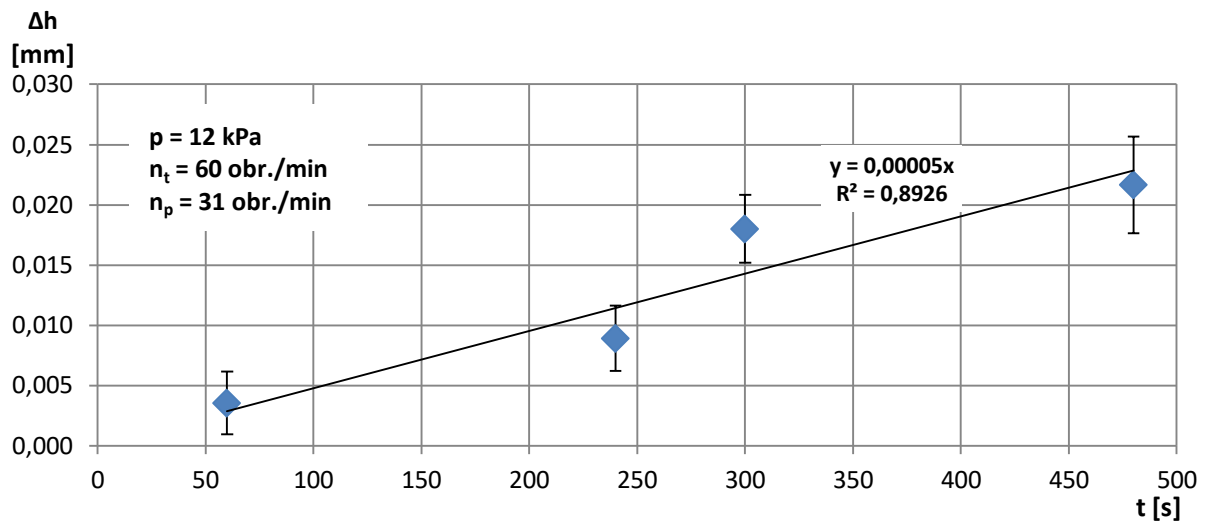
b)



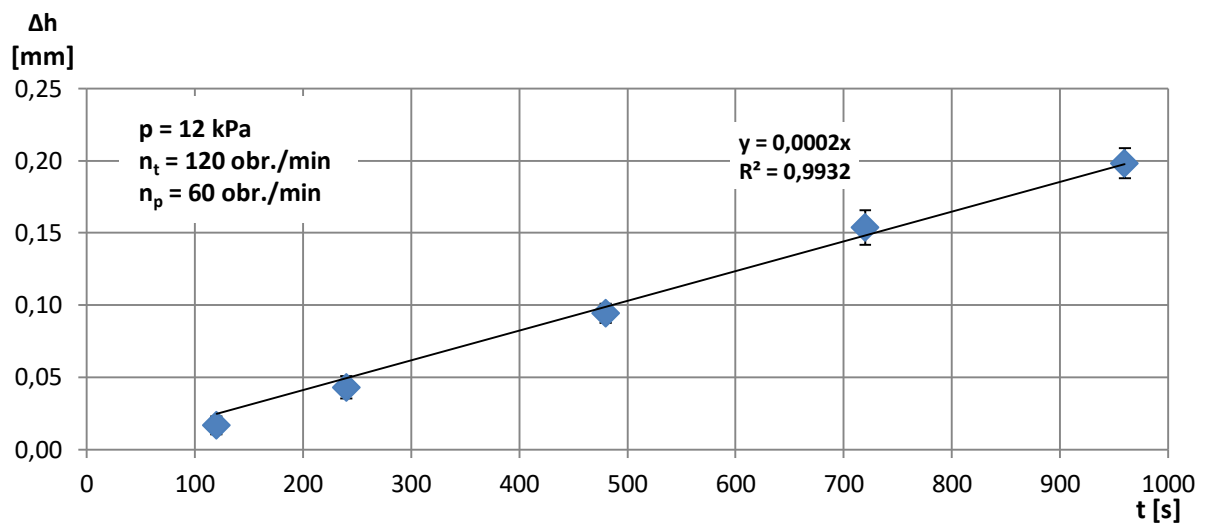
Rysunek 48. Wartości parametrów chropowatości oraz falistości po określonych testach docierania jednostronnego próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 (T0 – stan początkowy próbek przed rozpoczęciem obróbki):

a) Ra; b) Wa

a)

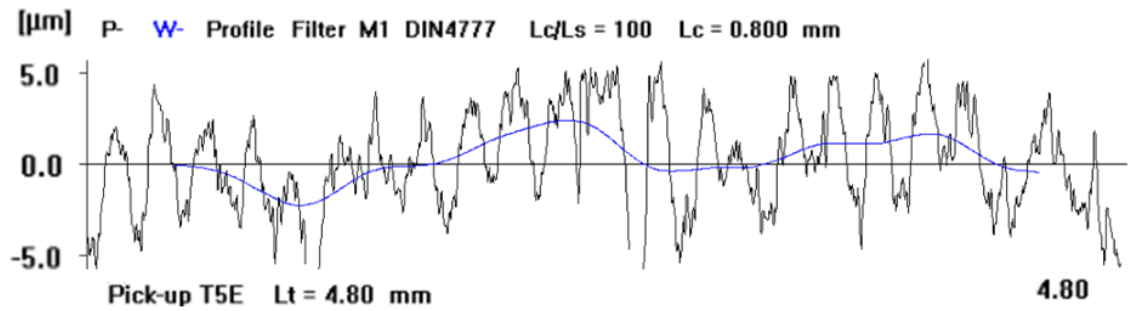


b)

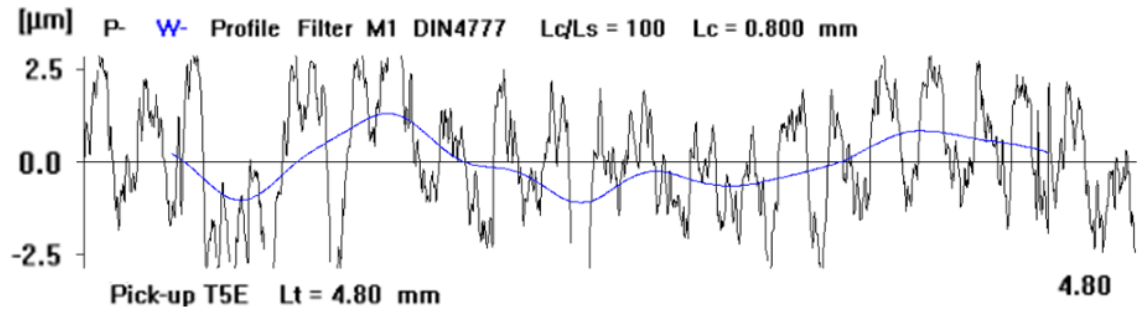


Rysunek 49. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego podczas docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 : a) test T2; b) test T3

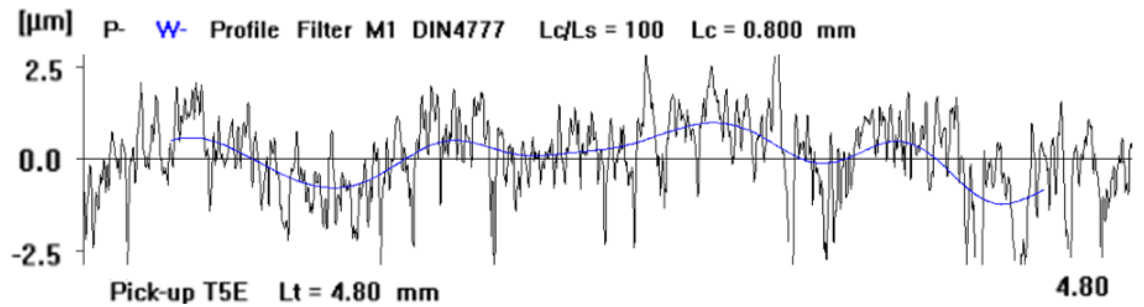
a)



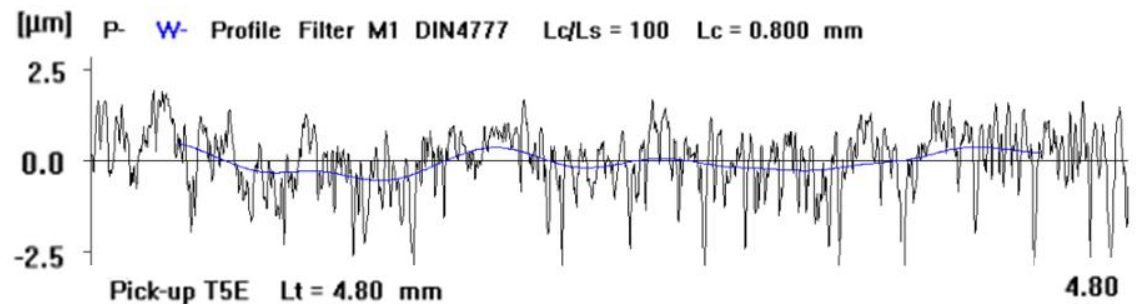
b)



c)



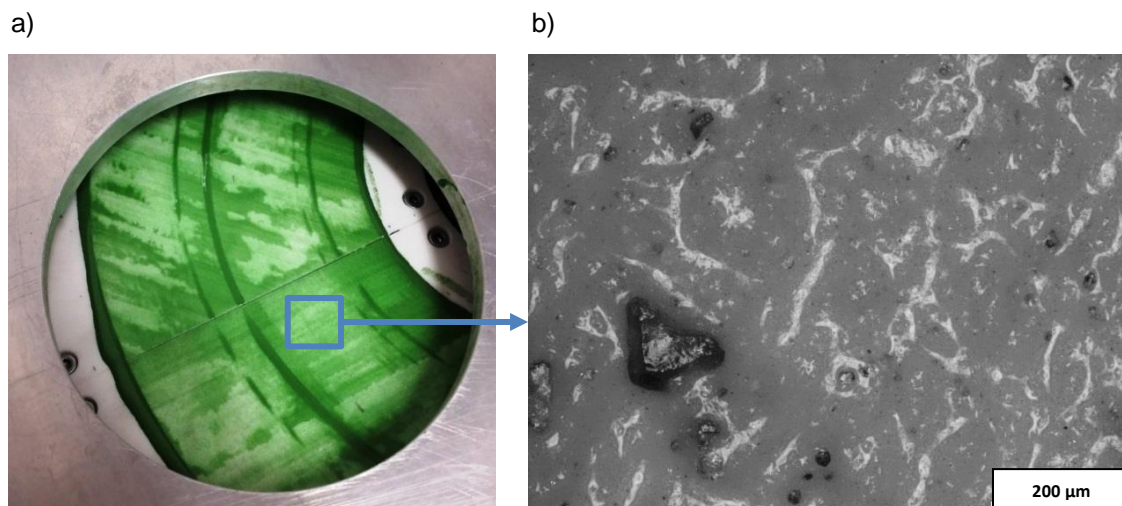
d)



Rysunek 50. Przykładowe profile pierwotne P i falistości W powierzchni wybranych próbek z Al_2O_3 : a) przed rozpoczęciem procesu obróbki – stan T0; b) po teście T1; c) po teście T2; d) po teście T3

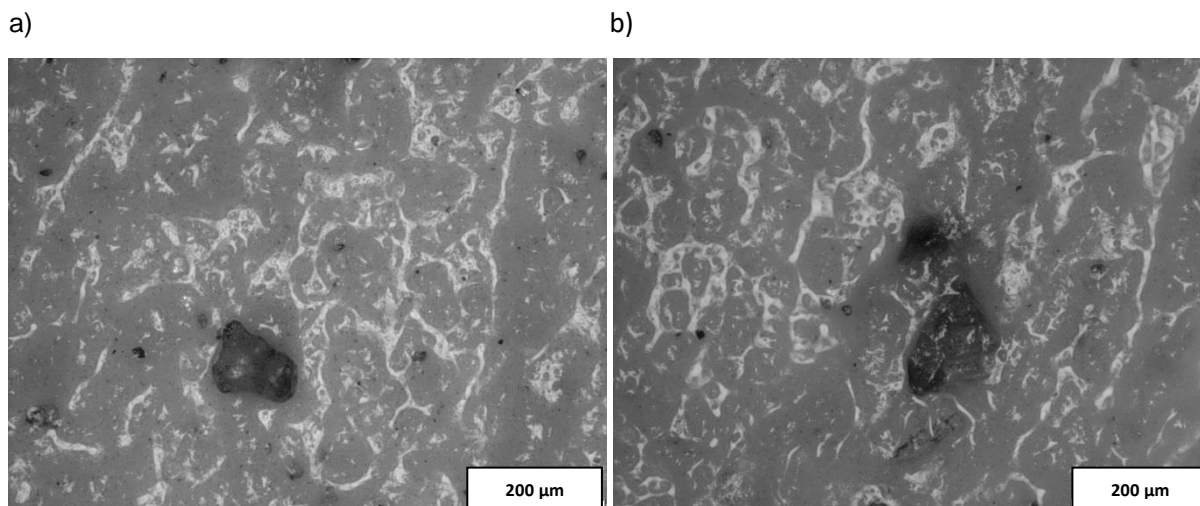
8.1.1. Badanie czynnej powierzchni narzędzia ściernego

W celu wyjaśnienia przyczyn zintensyfikowanego usuwania materiału obserwowanego podczas testu T3 dokonano obserwacji czynnej powierzchni prototypowego narzędzia ściernego przy użyciu mikroskopu metalograficznego OLYMPUS BX51. Analiza zdjęć mikroskopowych potwierdziła występowanie ziaren diamentowych na czynnej powierzchni docieraka po zakończeniu badań rozpoznawczych – rysunek 51.

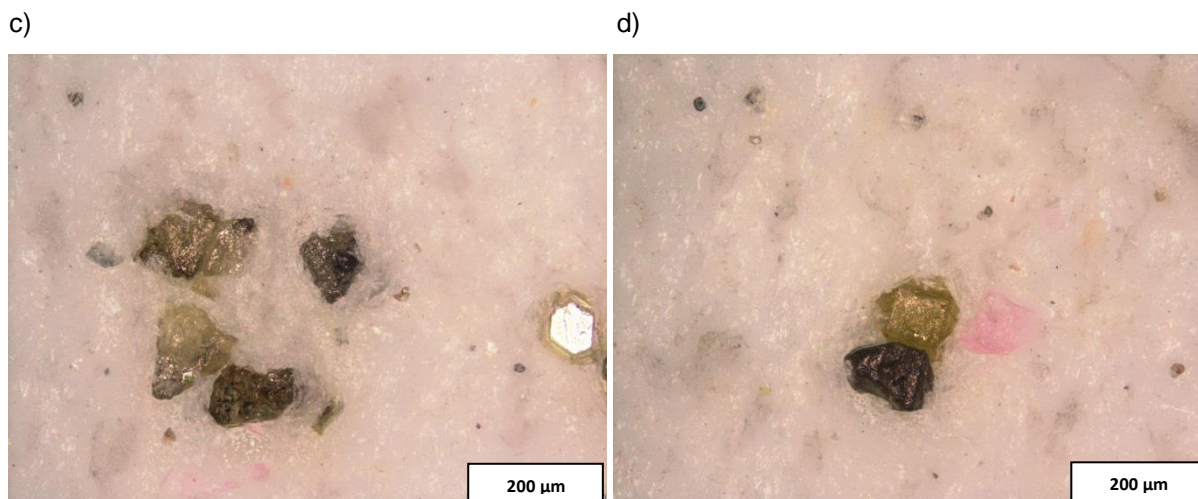


Rysunek 51. Fragment płaskiej czynnej powierzchni tarczy docierającej z zawiesiną ścierną: a) widok ogólny; b) utwardzone w narzędziu diamentowe ziarna ściernie po zakończeniu badań wstępnych

Zgodnie z oczekiwaniami, diamentowe ziarna utwardzone w czynnej powierzchni narzędzia obecne były również po jej oczyszczeniu z zawiesiny ścierniej. Ziarna widoczne na rysunku 52 są różnej wielkości, ponieważ zastosowana zawiesina ścierna zawierała mieszaninę diamentowych ziaren mniejszych *SD 28/20* oraz większych *D107*. Świadczy to o trwałym ich utwierdzeniu w czynnej powierzchni docieraka. Dodatkowo, wskutek przeprowadzonej obróbki, ziarna ściernie ulegały rozdrobnieniu. Ziarna lub ich fragmenty rozmieszczone zostały na czynnej powierzchni narzędzia pojedynczo lub w postaci charakterystycznych konglomeratów – rysunek 52.



Rysunek 52. Wybrane fragmenty czynnej powierzchni tarczy docierającej

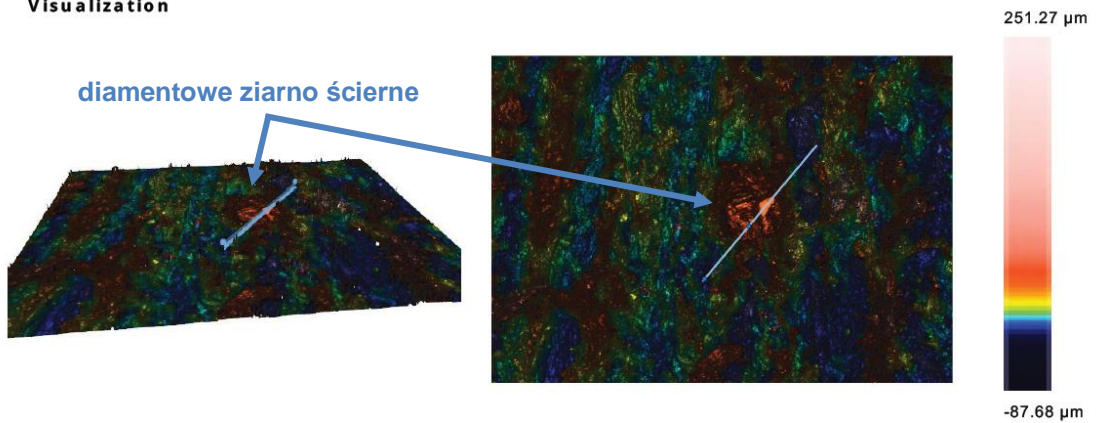


Rysunek 52. cd. Wybrane fragmenty czynnej powierzchni tarczy docierającej: a), b) przed oczyszczeniem; c), d) po oczyszczeniu z zawiesiny ścierniej

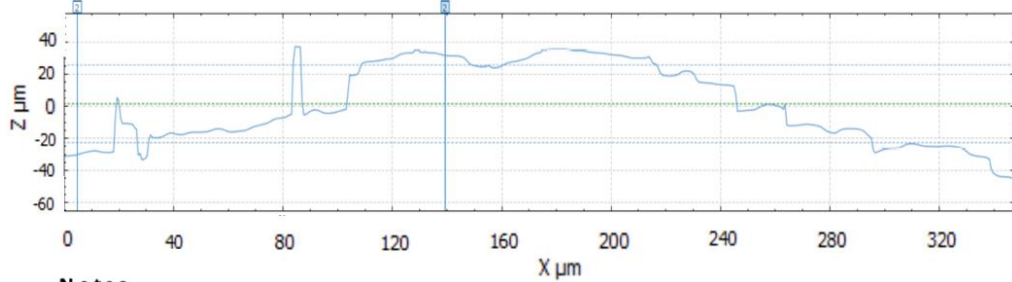
Dalsza obserwacja fragmentów czynnej powierzchni narzędzia z wykorzystaniem optycznego profilometru 3D – S neox Sensofar potwierdziła wystawanie utwardzonych ziaren diamentowych ponad czynną powierzchnię narzędzia – rysunek 53. Analiza obrazów przestrzennych i profili uzyskanych za pośrednictwem mikroskopii konfokalnej oraz interferometrycznej wskazała miejsca, w których diamentowe ziarna ściernie zostały utwardzone. Zastosowanie operacji wyodrębnienia profilu w tych miejscach pozwoliło na oszacowanie wysokości wystawania wybranych ziaren na poziomie ok. 50 μm . Miękki materiał narzędzia i jego porowata struktura będąca skutkiem spiekania proszku poliamidowego umożliwiły łatwe wbijanie się ziaren ściernych w czynną powierzchnię docieraka. Stosunkowo trwałe uzbrojenie narzędzia w ziarna ściernie, które znajdowały się w strefie kontaktu z obrabianymi przedmiotami, wpłynęło w konsekwencji na efektywne usuwanie materiału oraz zmniejszenie parametrów chropowatości i falistości powierzchni próbek z ceramiki technicznej.

a)

Visualization



Profile

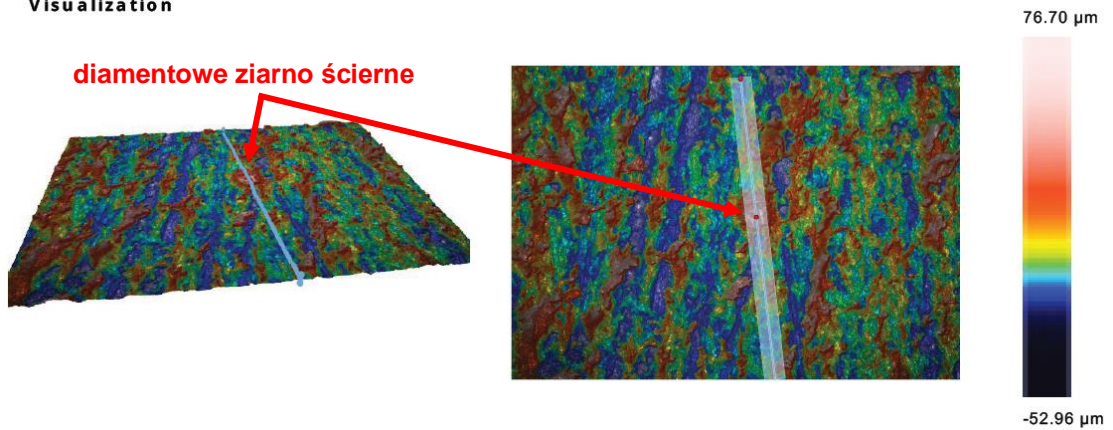


Notes

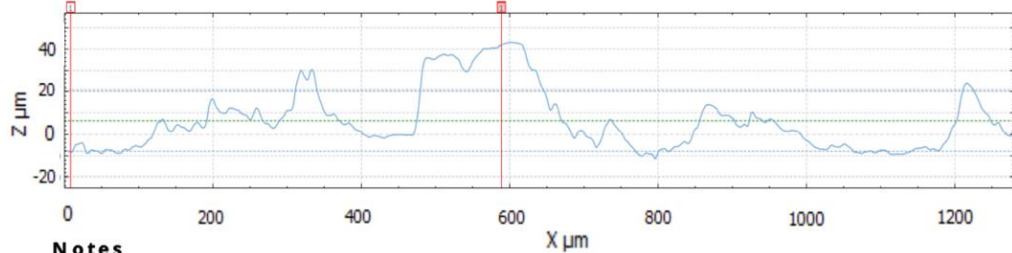
2 Distance $\Delta L = 134.75 \mu\text{m}$ $\Delta Z = 61.939 \mu\text{m}$ $\angle = 24.69^\circ$

b)

Visualization



Profile



Notes

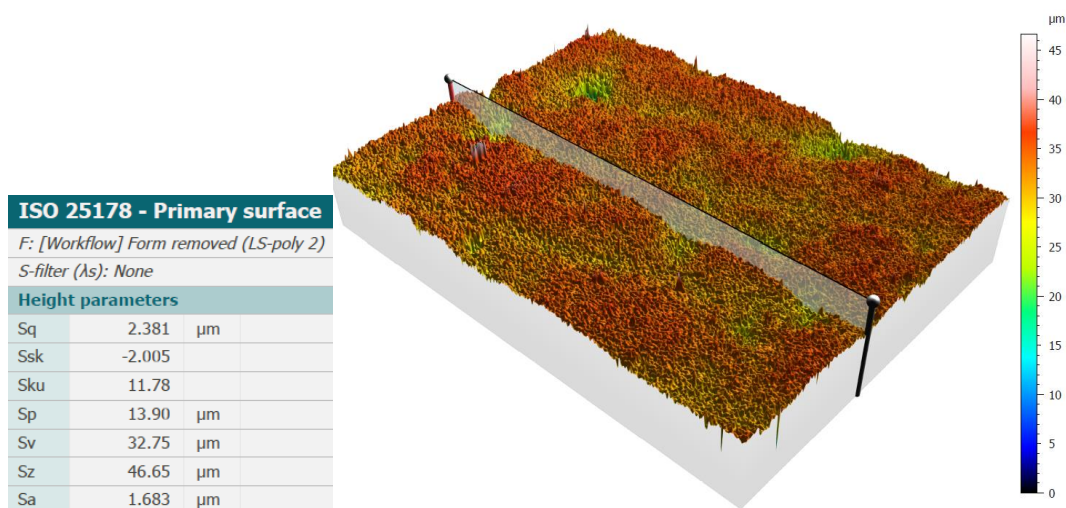
1 Distance $\Delta L = 581.61 \mu\text{m}$ $\Delta Z = 50.006 \mu\text{m}$ $\angle = 4.91^\circ$

Rysunek 53. Wyodrębnienie profili dla przekrojów zawierających ziarna ścierne: a) mikroskopia konfokalna; b) mikroskopia interferometryczna

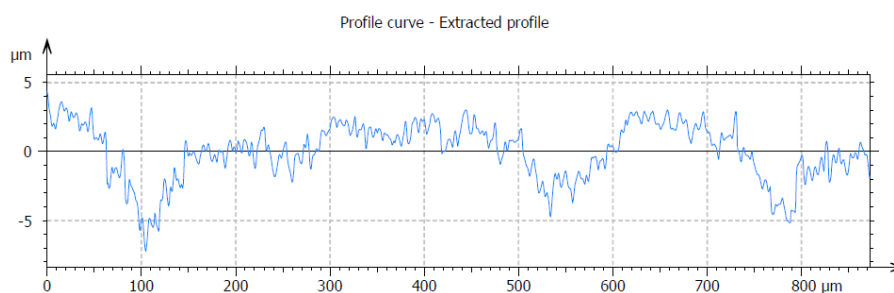
8.1.2. Badanie topografii powierzchni obrabianych próbek

Obrazowanie metodą mikroskopii konfokalnej z zastosowaniem optycznego profilometru 3D – S neox Sensofar umożliwiło dokonanie oceny topografii oraz wybranych parametrów wysokościowych powierzchni próbek z Al_2O_3 po badaniach rozpoznawczych. Badanie zrealizowano na obszarze $873.33 \mu m \times 656.61 \mu m$ oraz zgodnie z normą ISO 25178. Na rysunkach 54 oraz 55 zaprezentowano porównanie powierzchni przykładowych próbek przed i po zakończeniu badań eksperymentalnych.

a)

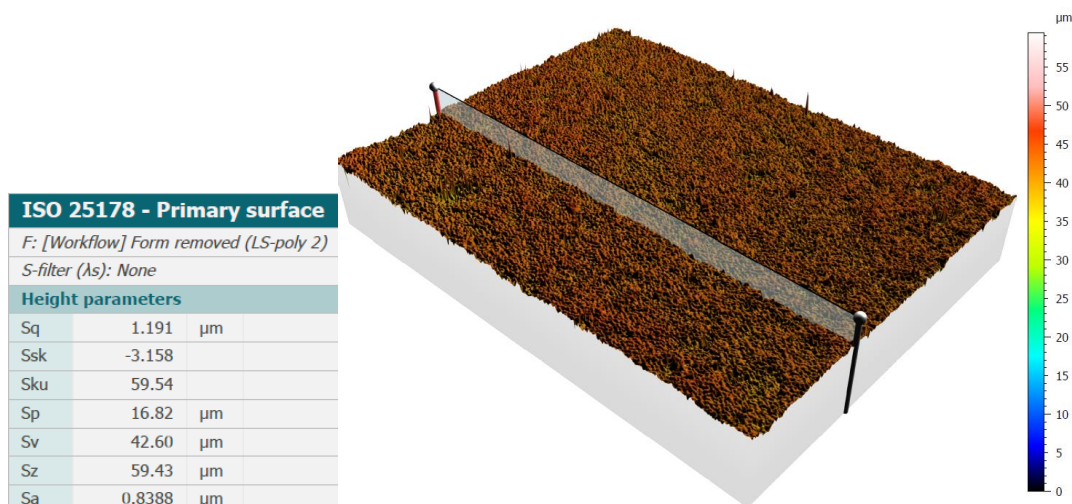


b)

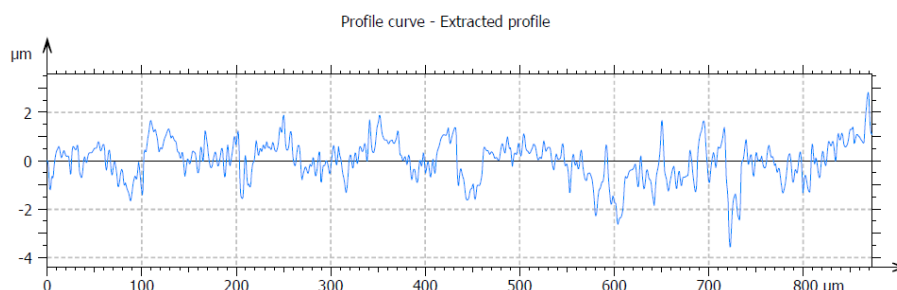


Rysunek 54. Trójwymiarowa analiza struktury powierzchni ceramiki technicznej przed procesem docierania: a) topografia powierzchni z wybranymi parametrami wysokościowymi; b) wyodrębniony profil powierzchni

a)



b)



Rysunek 55. Trójwymiarowa analiza struktury powierzchni ceramiki technicznej po procesie docierania (zakończeniu badań rozpoznawczych): a) topografia powierzchni z wybranymi parametrami wysokościowymi; b) wyodrębniony profil powierzchni

Analiza topografii oraz wyodrębnionych profili potwierdziła wyraźną poprawę jakości powierzchni PO. Wartość parametru Sa została zmniejszona z początkowej wynoszącej 1,68 µm do 0,84 µm po zakończeniu testu T3. Ponadto znaczne zmniejszenie wartości parametru Sq z początkowej 2,38 µm do wartości 1,19 µm również świadczy o wyraźnym wygładzeniu powierzchni, co zostało uwidocznione na przedstawionych topografiach powierzchni. Wartości parametru Ra wyznaczone na podstawie wyodrębnionych profili powierzchni (1,59 µm przed obróbką oraz 0,60 µm po zakończeniu testu T3) wykazywały zbliżone wartości do tych uzyskanych podczas pomiarów 2D – rysunek 48a.

8.1.3. Wnioski z badań rozpoznawczych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

Zastosowanie prototypowej tarczy docierającej wykonanej metodą SLS, przy zmianie poszczególnych zmiennych wejściowych (niezależnych), wpłynęło na efektywne usuwanie materiału z powierzchni obrabianych próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 – rysunek 49b oraz wyraźne zmniejszenie wartości parametrów chropowatości i falistości ich powierzchni – rysunek 48. Uzyskane wyniki pierwszych badań eksperymentalnych potwierdziły duży potencjał technologiczny badanego narzędzia w docieraniu oraz celowość prowadzenia dalszych badań. Analiza oddziaływania poszczególnych czynników wejściowych na uzyskiwane efekty obróbkowe pozwoliła na wysunięcie następujących wniosków:

- stosowanie relatywnie małych wartości parametrów kinematycznych, nacisku jednostkowego, a także krótkiego czasu obróbki oraz pasty ścierniej z drobnymi ziarnami *SD 28/20* nie umożliwiło efektywnego usuwania materiału oraz znaczącej poprawy jakości powierzchni próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 , z wyjątkiem zmniejszenia falistości;
- zastosowanie większych wartości parametrów kinematycznych, nacisku jednostkowego oraz czasu obróbki, a także wprowadzenie do strefy obróbki ziaren ściernych *D107* zwiększyło ubytek materiałowy oraz zmniejszyło chropowatość i falistość powierzchni;
- przyczyną zintensyfikowania usuwania materiału podczas ostatniego testu oraz zmniejszenia chropowatości i falistości powierzchni próbek z Al_2O_3 było utwierdzenie dużych ziaren diamentowych *D107* w miękkiej strukturze narzędzia, co potwierdziły obserwacje mikroskopowe. Utwardzone ziarna diamentowe wystające ponad płaską czynną powierzchnię narzędzia pozwoliły na skuteczne skrawanie twardej ceramiki technicznej. Obserwacje mikroskopowe oraz uzyskane efekty technologiczne mogą sugerować transformację procesu obróbki z konwencjonalnego trzyczęściowego docierania (*three-body abrasive wear*) na podobny do szlifowania lub szlifowania z kinematyką docierania dwuczęściowy proces obróbki ścierniej (*two-body abrasive wear*);
- po przeprowadzeniu wszystkich testów nie zaobserwowano śladów uszkodzenia oraz nadmiernego zużycia prototypowej tarczy docierającej. Po oczyszczeniu z resztek nałożonej pasty ścierniej tarcza została wykorzystana do realizacji badań właściwych docierania jednostronnego próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 .

8.2. Badania właściwe docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

Badania właściwe przeprowadzono przy wartościach analizowanych czynników, dla których podczas badań rozpoznawczych uzyskano największy liniowy ubytek materiałowy oraz najmniejsze wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni – tabela 7. Pomimo pierwotnych założeń, znajdujące się w paście ścierniej ziarna diamentowe *D28/20* nie umożliwiły efektywnego skrawania ceramiki. Zastosowanie jedynie pasty ścierniej *SD 28/20* z ziarnami diamentowymi *D28/20* pozwoliło na zmniejszenie chropowatości i falistości obrabianych powierzchni. Porowata struktura i podatność materiału, z którego było wykonane narzędzie, nie umożliwiły jednak wystarczającego wystawiania ziaren z czynnej powierzchni narzędzia, tak aby możliwe było skuteczne usuwanie materiału. Z uwagi na małą wartość ubytku materiałowego koniecznym było dostarczenie do strefy obróbki większych ziaren ściernych. Wykorzystywana w badaniach właściwych zawiesina ścierna zawierała zatem mieszaninę pasty ścierniej z ziarnami *D28/20* z dodatkowymi luźnymi większymi ziarnami diamentowymi *D107*. Zdaniem autorów prac (**Bhagavat et al., 2010; Zhu et al., 2013**) stosowanie mieszaniny różnych ziaren ściernych prowadzi do uzyskania pozytywnych efektów obróbkowych. Ponadto, jak zaprezentowano w pracy (**Huang et al., 2021**), opracowywane są również nowe rodzaje zawiesiny ścierniej, której celem jest poprawa wydajności procesu docierania materiałów ceramicznych oraz jakości ich powierzchni.

Tabela 7. Zestaw parametrów obróbkowych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 podczas badań właściwych

Nr serii	Nr testu	Nacisk jednostkowy p [kPa]	Prędkość obrotowa [obr./min]		Czas pojedynczego testu Δt [min]	Czas serii obróbkowej ΔT [min]
			tarcza docierająca n_t	pierścień prowadzący n_p		
1	Początkowy stan tarczy docierającej – po badaniach wstępnych					
	T1-T30	12	120	60	4	120
2	Początkowy stan tarczy docierającej – po serii 1					
	T1-T6	12	120	60	20	120
3	Początkowy stan tarczy docierającej – po serii 2					
	T1-T6	12	120	60	20	120

W badaniach eksperymentalnych właściwych przeprowadzono trzy serie obróbkowe, każdorazowo dla nowego zestawu PO, trwających 120 minut. Każda seria obróbkowa została podzielona na określonej długości testy, po których mierzono liniowy ubytek materiałowy oraz chropowatość i falistość obrabianych powierzchni. Pierwsza seria badań została podzielona na 30 testów, natomiast w przypadku pozostałych dwóch serii wydłużono czas trwania pojedynczych testów do 20 minut – tabela 7. Każda z serii była realizowana z wykorzystaniem jednakowych parametrów kinematycznych, w tym średniej prędkości docierania $v = 1,44$ m/s, nacisku jednostkowego oraz rodzaju zawiesziny ścierniej. Przed rozpoczęciem badań właściwych oraz pomiędzy jej poszczególnymi seriami tarcza docierająca była oczyszczana z zawiesziny ścierniej pozostałej po wcześniejszych badaniach – rysunek 56.

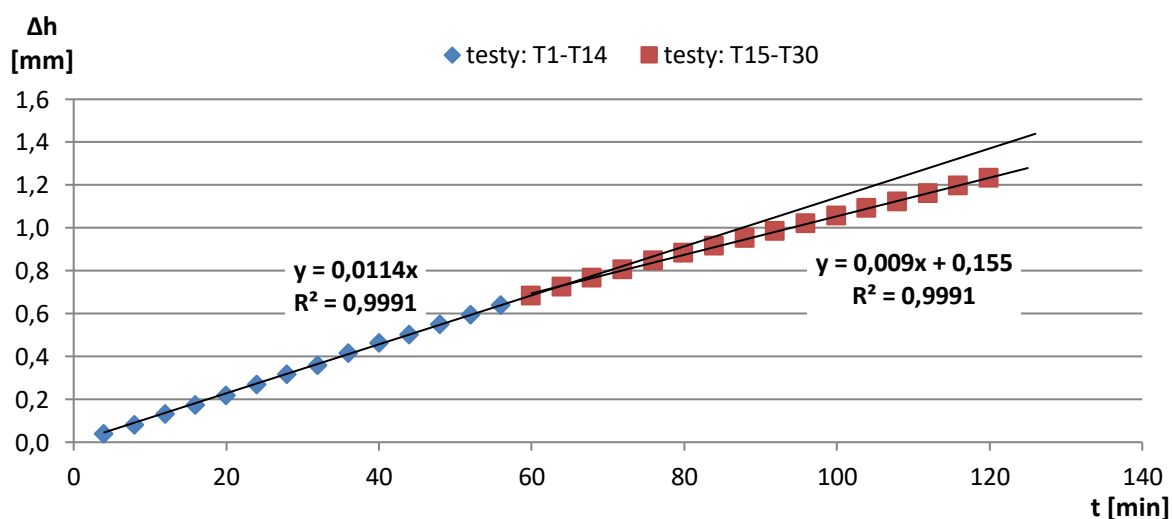


Rysunek 56. Tarcza docierająca stosowana w badaniach właściwych

Po oczyszczeniu wszystkich segmentów nowa dawka pasty ścierniej *SD 28/20* (4 ml) i luźne ziarna diamentowe *D107* (2,5 ml) były równomiernie rozprowadzane na czynnej powierzchni narzędzia tylko przed pierwszym testem w każdej serii. Dodatkowo w trakcie obróbki dawkowano olej maszynowy przez biuretę w ilości $\dot{Q}_{lub} \approx 0,1$ ml/min.

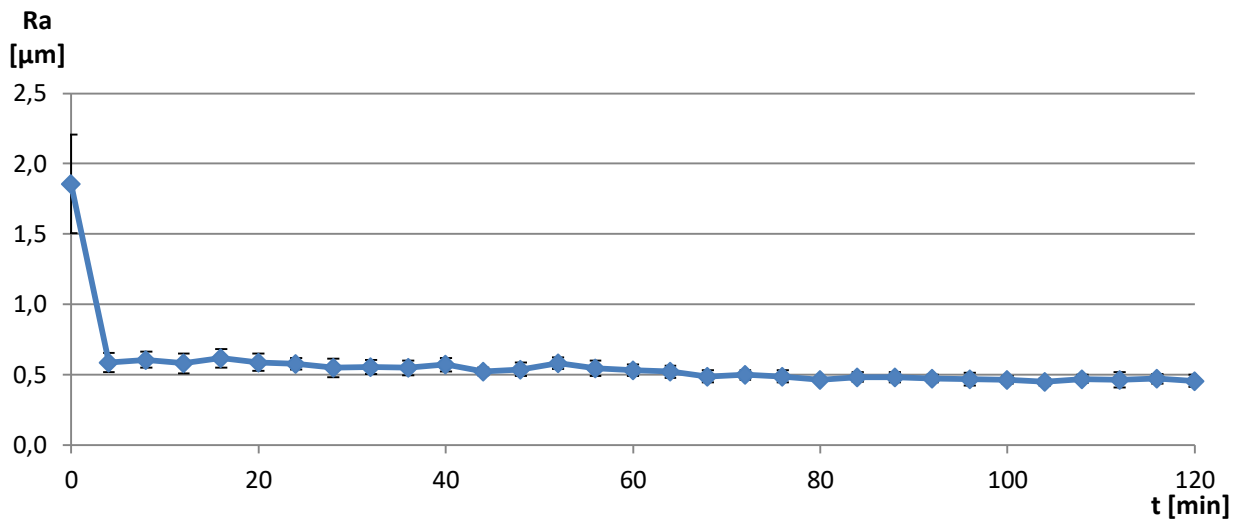
Efekty technologiczne uzyskane w wyniku docierania próbek z ceramiki technicznej przy użyciu prototypowej tarczy docierającej dla pierwszej serii badań właściwych przedstawiono na rysunkach 57 oraz 58. Podobnie jak w badaniach rozpoznawczych, zastosowanie wytworzonego w technologii SLS narzędzia ściernego i zestawu parametrów oraz rodzaju zawiesiny ścierniej przedstawionych w tabeli 7, pozwoliły na efektywne usuwanie materiału, jak i znaczące zmniejszenie chropowatości oraz falistości obrabianej powierzchni. Po pierwszych 4 minutach docierania zaobserwowano duży spadek wartości parametrów chropowatości i falistości, który w trakcie dalszej obróbki pozostawał na podobnym poziomie. Osadzone w miękkim materiale narzędzia ziarna ściernie umożliwiły najprawdopodobniej tzw. docieranie dwuczęściowe (*ang. two-body abrasion lapping*), które w przeciwieństwie do standardowego docierania luźnym ścierniwem (*ang. three-body abrasion lapping*) pozwala na znacznie efektywniejsze usuwanie materiału, podobnie jak szlifowanie (Rabinowicz, Dunn and Russell, 1961; Pyun et al., 2018).

Na rysunku 57 zaprezentowano wartość skumulowaną liniowego ubytku materiałowego podczas 30 testów pierwszej serii badań właściwych z zaznaczonymi liniami trendu. Jak widać wielkość ubytku materiałowego jest proporcjonalna do czasu obróbki, zwłaszcza gdy zaznaczone dwa okresy czasu są analizowane niezależnie. Po 60 minutach obróbki zaobserwowano niewielki spadek wielkości usuwanego materiału wynikający z obniżenia właściwości skrawnych narzędzia. Mogło to być spowodowane stępieniem oraz rozkruszeniem wbitych w czynną powierzchnię tarczy docierającej ziaren diamentowych. Jednocześnie stępienie krawędzi ziaren ściernych oraz ich rozkruszenie na mniejsze fragmenty wpłynęło na nieznaczne zmniejszenie chropowatości obrabianych elementów w dalszej części obróbki – rysunek 58a, przy minimalnym spadku wydajności procesu docierania. Widok próbek ceramicznych przed oraz po zakończonej pierwszej serii badań właściwych z widoczną różnicą w wysokości zaprezentowano na rysunku 59.

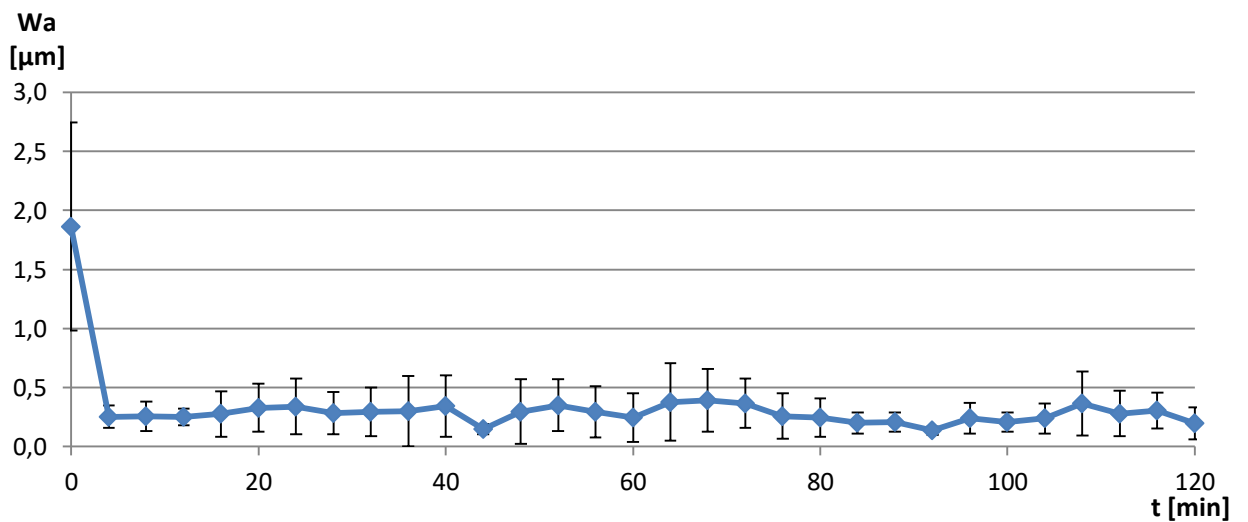


Rysunek 57. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas pierwszej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu

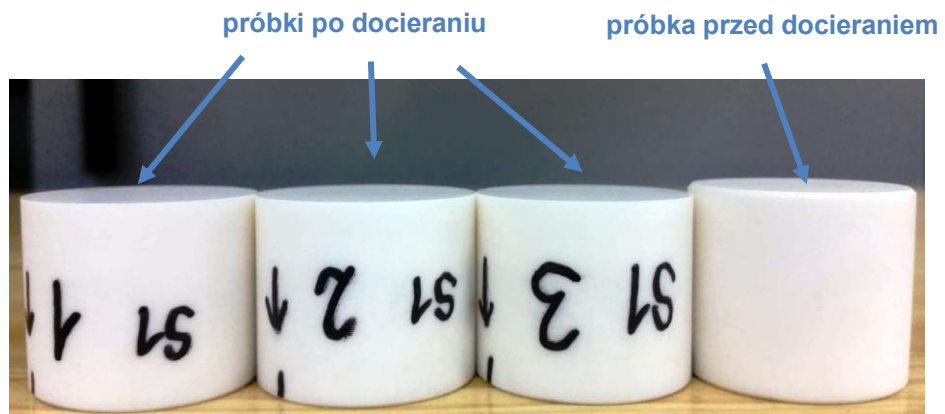
a)



b)



Rysunek 58. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) oraz falistości Wa (b) PO uzyskane podczas pierwszej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

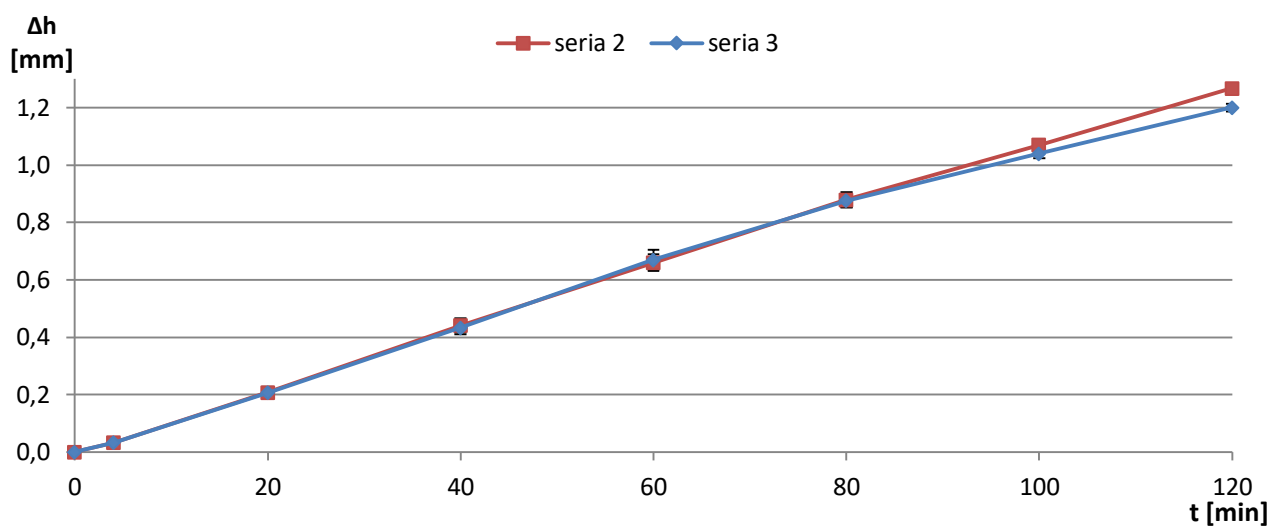


Rysunek 59. Różnica w wysokości próbek z ceramiki technicznej po zakończonym procesie docierania jednostronnego (pierwszej serii badań właściwych)

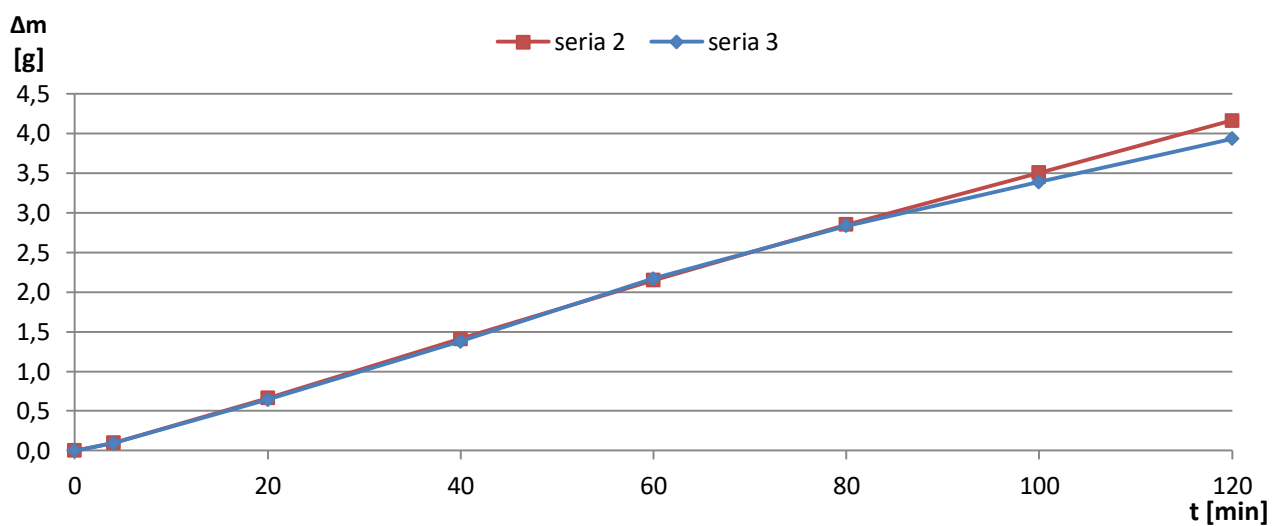
Przed realizacją badań spodziewano się, że czas efektywnego skrawania będzie wynosił ok. 15 minut. Możliwość przeprowadzenia 120 minut obróbki przy jednokrotnym dostarczeniu ziaren ściernych tylko przed pierwszym testem była bardzo dużym i pozytywnym zaskoczeniem. Ponadto w trakcie procesu obróbki, podobnie jak podczas badań rozpoznawczych, zaobserwowano charakterystyczne rozmieszczenie zawiesiny ścierniej gromadzącej się głównie w obszarach średnicy zewnętrznej oraz wewnętrznej narzędzia. W związku z tym po każdym z testów zgarniano ją w obszar kontaktu z obrabianymi próbkami. Co więcej, dalsze skrawanie było możliwe nawet po trzydziestym teście, jednak przerwanie badań pozwoliło na uzyskanie danych o stanie czynnej powierzchni narzędzia po 120 minutach obróbki.

W celu określenia powtarzalności uzyskanych rezultatów przeprowadzono kolejne dwie serie obróbki dla próbek z ceramiki technicznej przy niezmiennych parametrach procesu oraz rodzaju stosowanej zawiesiny. W wyniku przeprowadzonego procesu docierania uzyskano bardzo zbliżone efekty technologiczne w stosunku do tych z pierwszej serii. Wykresy przedstawiające wartości skumulowanego liniowego oraz masowego ubytku materiałowego, podobnie jak podczas pierwszej serii badań, są liniowe – rysunek 60a i b, czyli wielkość usuniętego materiału jest proporcjonalna do czasu obróbki. Ponownie zaobserwowano znaczny spadek wartości parametrów chropowatości i falistości po pierwszych 4 minutach obróbki, który w trakcie trwania procesu ulegał dalszemu niewielkiemu zmniejszeniu – rysunek 61a i b. Podsumowując, uzyskanie niewielkich różnic w efektach technologicznych dla poszczególnych serii badań eksperymentalnych potwierdziło dużą użyteczność opracowanego narzędzia ściernego, a także przyjętych warunków oraz rodzaju zawiesiny ścierniej w efektywnym docieraniu jednostronnym ceramiki technicznej Al_2O_3 .

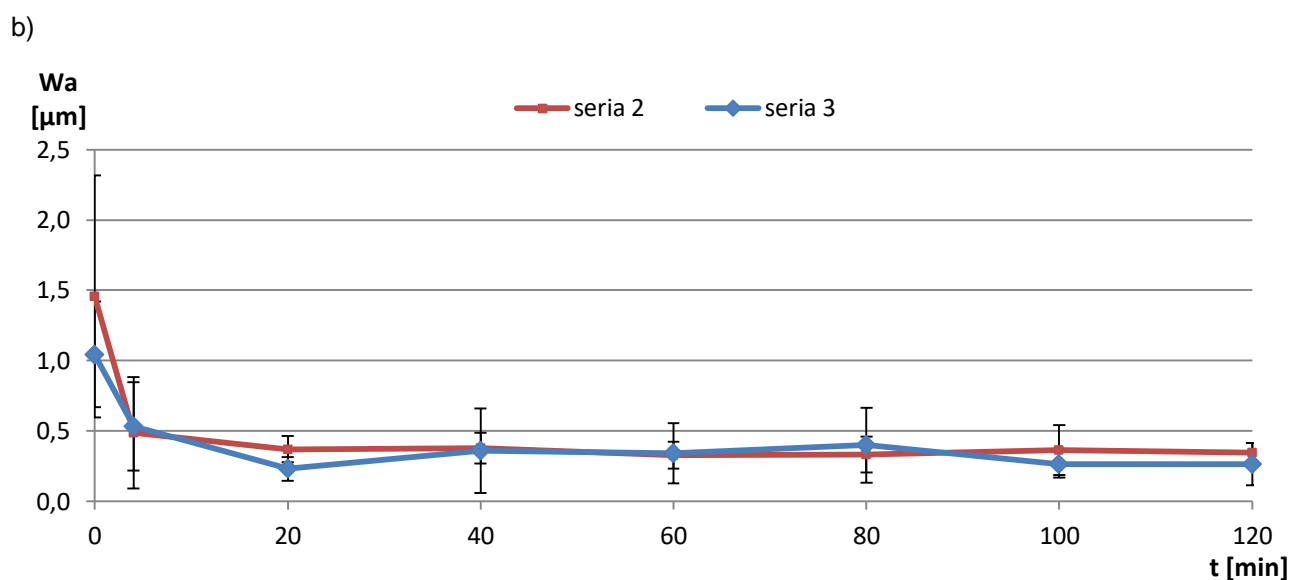
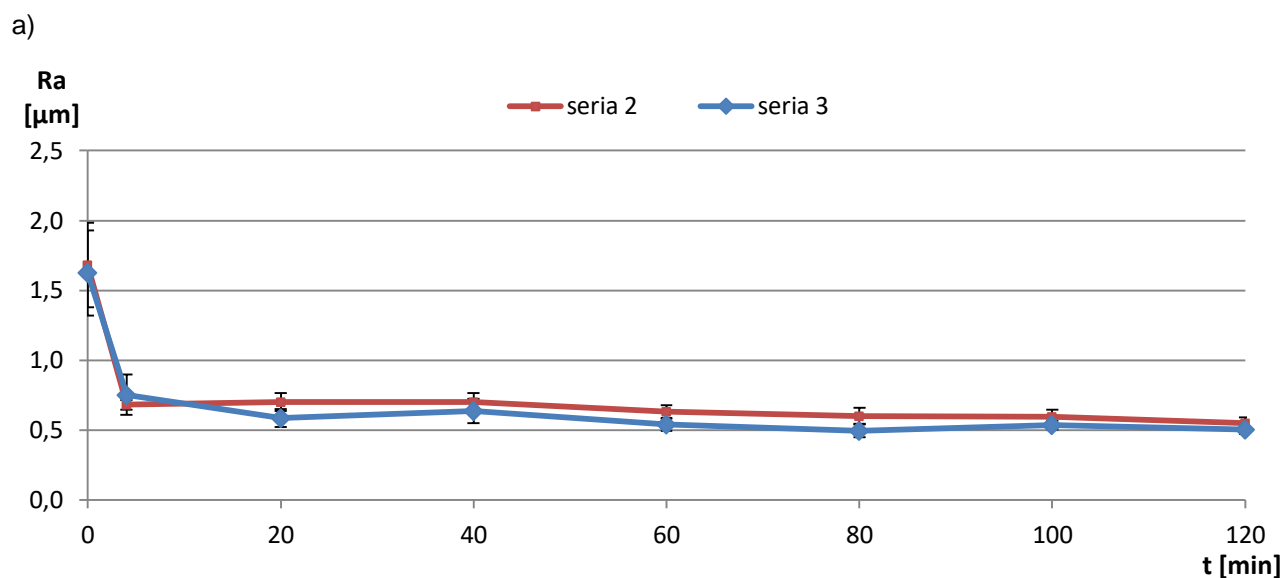
a)



b)



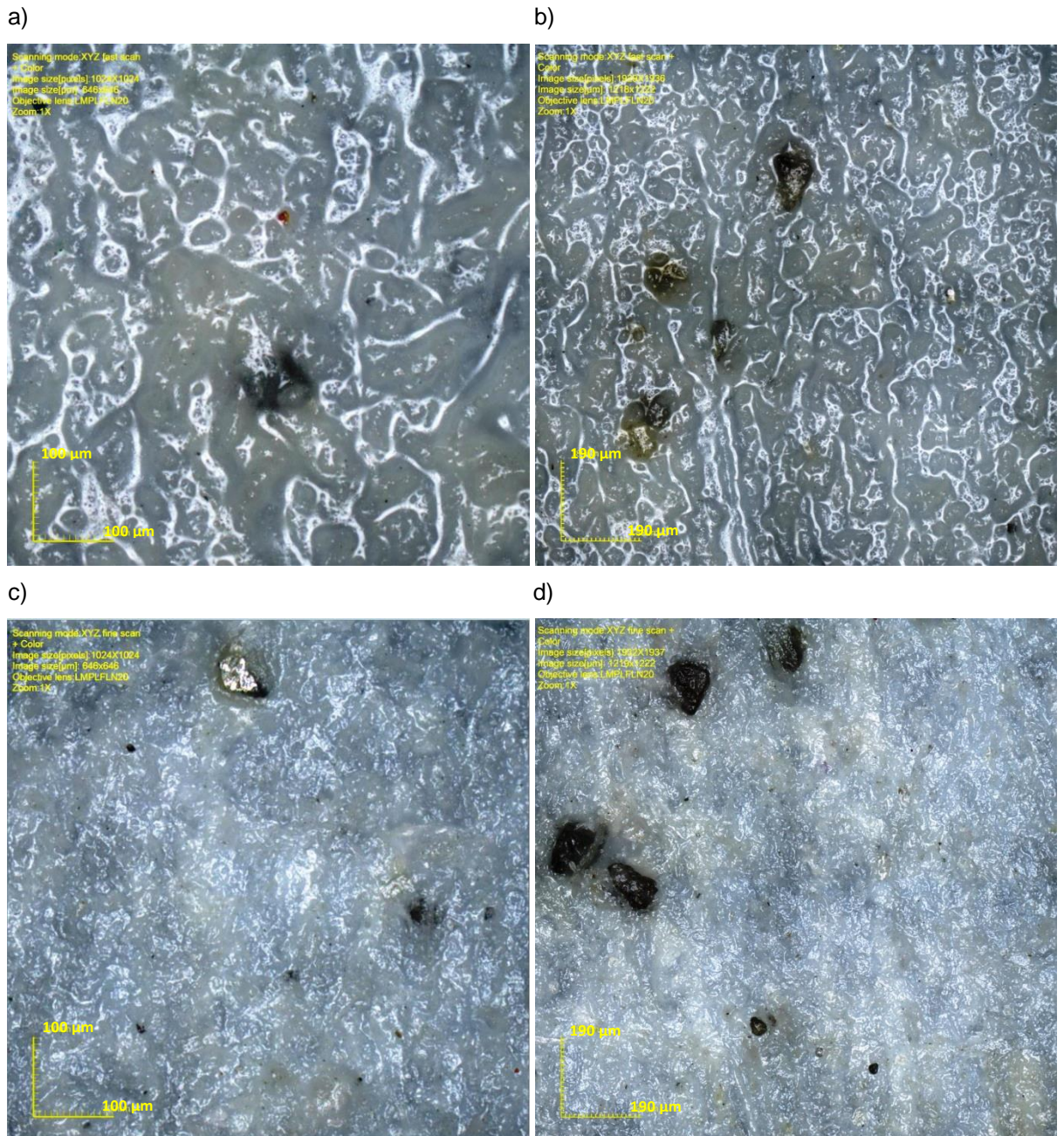
Rysunek 60. Wartości skumulowane liniowego ubytku materiałowego Δh (a) oraz masowego ubytku materiałowego Δm (b) uzyskane podczas drugiej oraz trzeciej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3



Rysunek 61. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) oraz falistości Wa (b) PO uzyskane podczas drugiej oraz trzeciej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

8.2.1. Badanie czynnej powierzchni narzędzia ściernego

Analiza zdjęć uzyskanych za pośrednictwem mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000 potwierdziła występowanie ziaren ściernych lub ich fragmentów, które zostały wbite w czynną powierzchnię docieraka – rysunek 62.



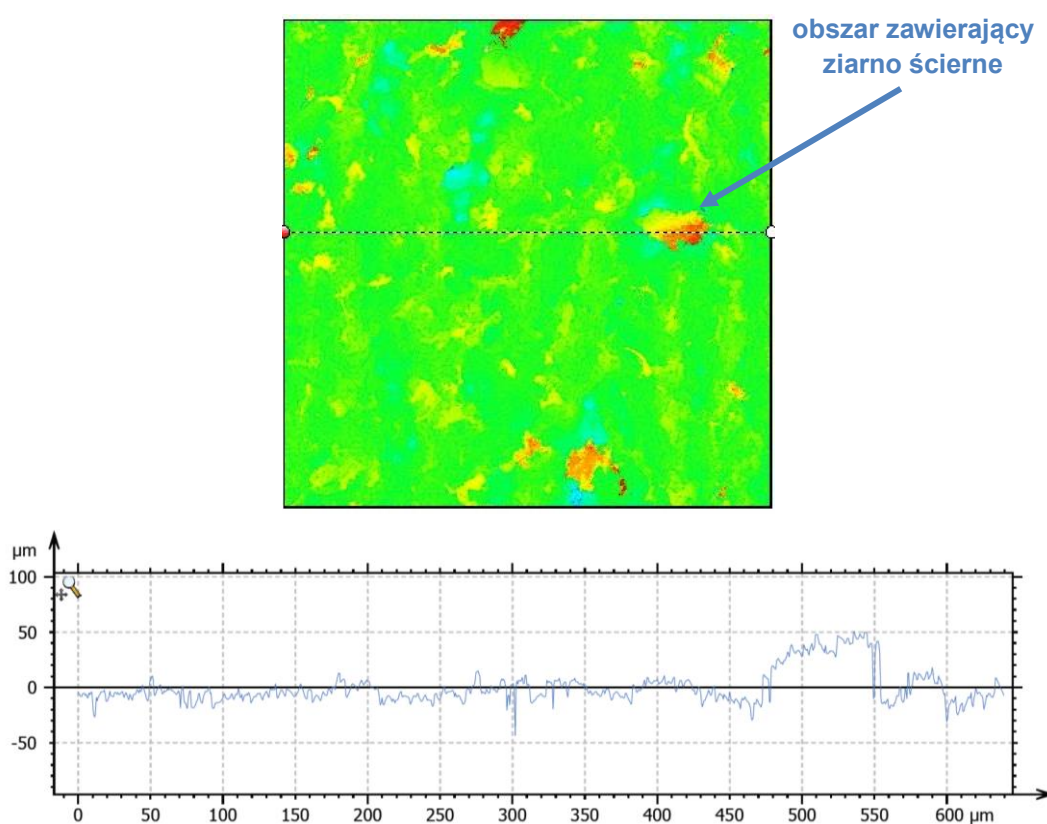
Rysunek 62. Wybrane fragmenty czynnej powierzchni docieraka po zakończeniu pierwszej serii badań właściwych (120 minutach docierania): a), b) przed oczyszczeniem; c), d) po oczyszczeniu z zawiesiny ścierniej

Uzyskane zdjęcia powierzchni narzędzia potwierdziły tym samym wcześniejsze obserwacje dokonane po badaniach rozpoznawczych. Usunięcie resztek zawiesiny ścierniej z docieraka ukazało trwale osadzone ziarna diamentowe. W trakcie obróbki ziarna zostały wbite w miękki materiał, co umożliwiło efektywne skrawanie PO podczas całego procesu. Duże ziarna diamentowe *D107* znajdujące się w strefie obróbki pomiędzy tarczą docierającą, a powierzchnią próbek z ceramiki technicznej przyczyniły się do wysokiej wydajności procesu skrawania. Jednocześnie ziarna diamentowe ulegały rozkruszaniu, co skutkowało zwiększoną koncentracją ich występowania w określonych miejscach narzędzia. Utwardzone ziarna oraz ciągły ubytek materiałowy wykazały tym samym korzyści zastosowanego narzędzia wykonanego metodą SLS w stosunku do przytoczonych w części literaturowej pracy żywiczych narzędzi ściernych (Yao, Peng and Liu, 2013; Williams, 2015; Guo,

Zhang, Chen, *et al.*, 2019; Guo, Zhang, Lee, *et al.*, 2019).

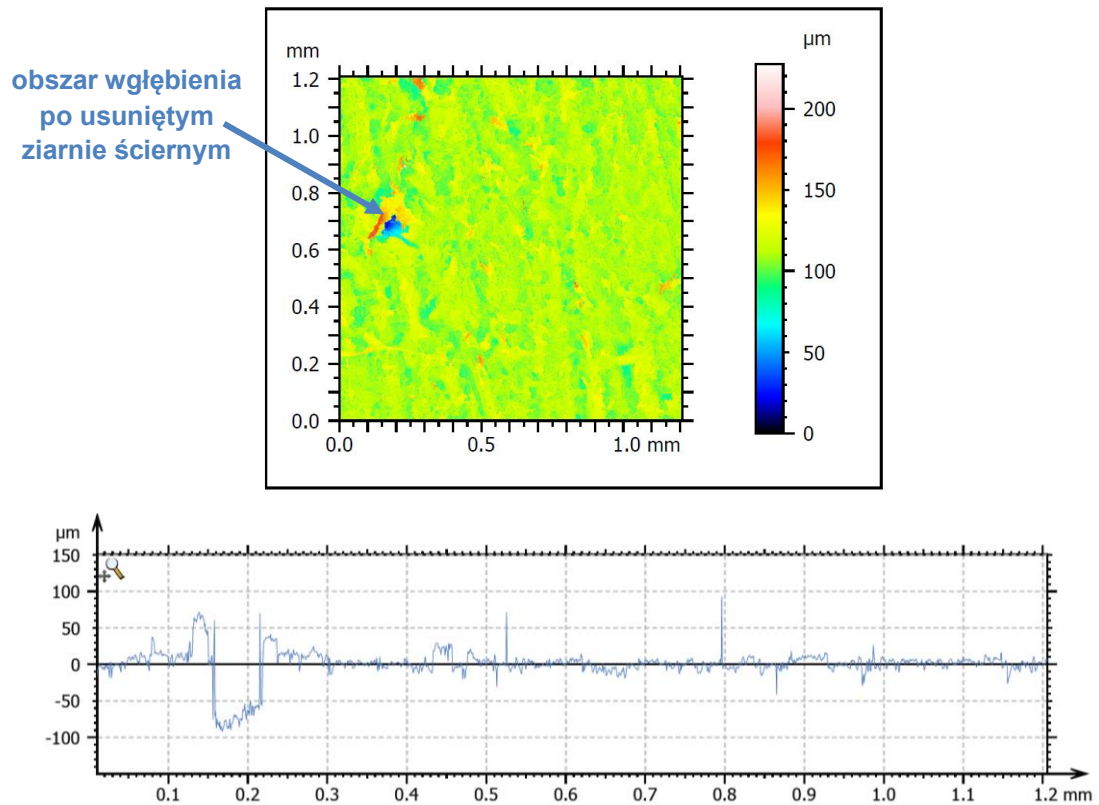
Analiza profili uzyskanych za pośrednictwem mikroskopii konfokalnej również potwierdziła trwałe wbicie diamentowych ziaren *D107* w docierak oraz umożliwiła oszacowanie głębokości ich wystawiania oraz osadzenia w narzędziu ściernym – rysunek 63a. W wyniku długotrwałej obróbki doszło również do usunięcia wcześniej osadzonych ziaren diamentowych, co potwierdza widok profilu przedstawiony na rysunku 63b. Mapa konturowa i kształt profilu świadczą o głębokim utwierdzeniu ziaren ściernych w strukturze materiału docieraka, co pozwoliło na stosunkowo trwałe uzbrojenie czynnej powierzchni narzędzia przez 120 minut obróbki. Wyrwanie ziaren z docieraka i ich rozkruszanie, poza stępieniem krawędzi ziaren, prawdopodobnie wpłynęło na zmniejszenie wydajności docierania po 60 minutach obróbki – rysunki 57 oraz 60.

a)



Rysunek 63. Mapy konturowe powierzchni prototypowej tarczy docierającej wraz z wybranymi przekrojami wzdłuż profili

b)



Rysunek 63. cd. Mapy konturowe powierzchni prototypowej tarczy docierającej wraz z wybranymi przekrojami wzdłuż profili: a) z obszaru z wystającym ziarnem ściernym; b) z obszaru z wgłębieniem po usunięciu ziarnie ściernym

8.2.2. Wnioski z badań właściwych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

Uzyskane w badaniach eksperymentalnych efekty technologiczne wskazały na duży potencjał i użyteczność spiekanych z proszków poliamidowych w technologii SLS narzędzi przeznaczonych do docierania twardej ceramiki technicznej. Nowe narzędzie charakteryzowało się nie tylko dużą efektywnością, ale również stosunkowo małym zużyciem ściernym. Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych właściwych, analiz mikroskopowych i pomiarów są następujące:

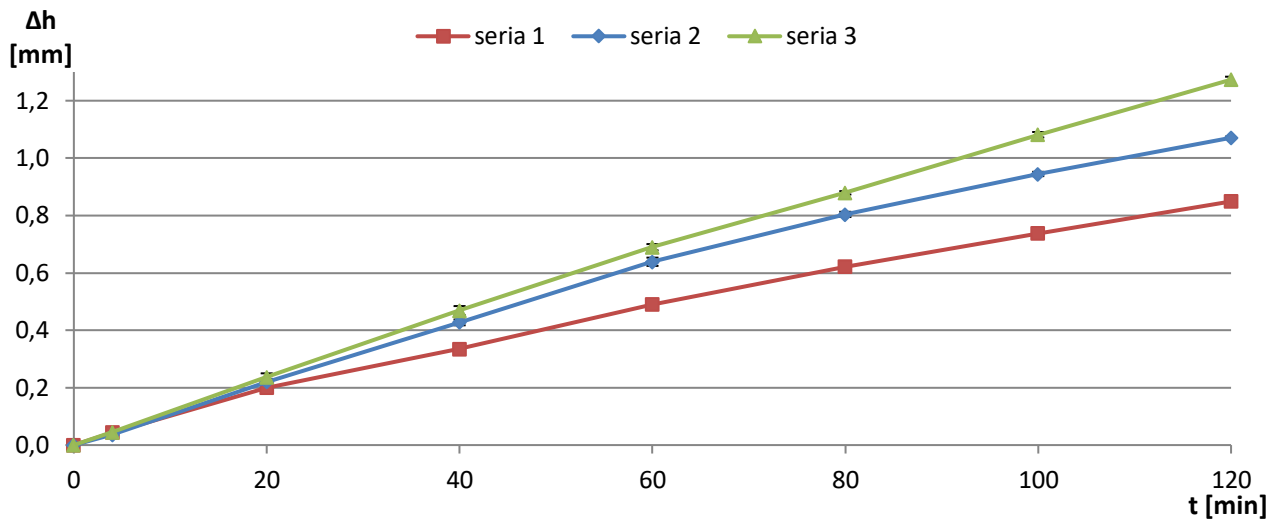
- metoda SLS pozwoliła na wykonanie wysokowydajnego oraz przyjaznego dla środowiska narzędzia ściernego stosowanego w technologii docierania;
- analizy mikroskopowe po zakończonych badaniach wstępnych i właściwych potwierdziły uzbrojenie czynnej powierzchni narzędzia w ziarna ścierna. Ich trwałe osadzenie w warstwie wierzchniej docieraka umożliwiło przeprowadzenie efektywnego skrawania ze średnią wartością ubytku materiałowego liniowego $\Delta h = 1,23$ mm oraz masowego $\Delta m = 4,04$ g wraz ze zmniejszeniem parametrów chropowatości oraz falistości obrabianych powierzchni do wartości $Ra = 0,51$ μm i $Wa = 0,27$ μm ;

- docierak zachowywał wysokie właściwości skrawne przy jednokrotnym dawkowaniu zawiesiny ścierniej, co umożliwiło efektywne usuwanie materiału przez 120 minut (średnia wartość ubytku na poziomie $\Delta h = 1,23$ mm oraz $\Delta m = 4,04$ g);
- metoda SLS pozwoliła na szybkie i tanie wykonanie docieraka segmentowego. Docieraki o mniejszej średnicy będą mogły być wykonane jako jednolite np. z wykorzystaniem desktopowych drukarek 3D.

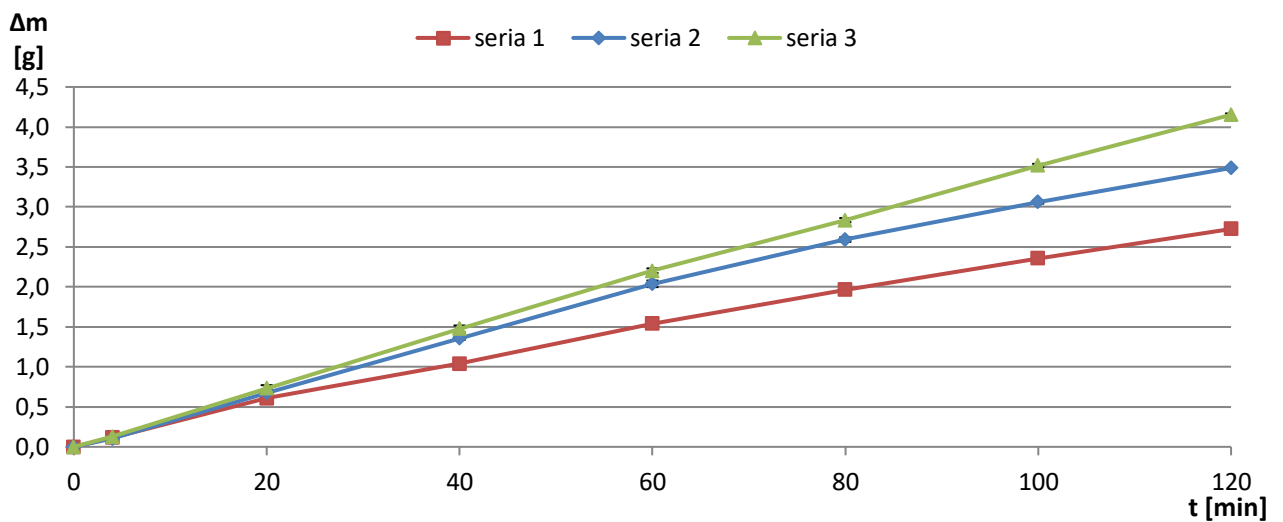
8.3. Badania sprawdzające docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

W badaniach sprawdzających wykorzystano nową tarczę docierającą, która została wykonana w identyczny sposób jak poprzednie narzędzie ściernie oraz zestaw nowych PO z Al_2O_3 . Analiza uzyskanych rezultatów podczas badań rozpoznawczych wskazała, iż zastosowanie jedynie pasty diamentowej *SD 28/20* zawierającej drobne ziarna nie umożliwiło skrawania twardej ceramiki technicznej. Ponadto obserwacje mikroskopowe powierzchni czynnej narzędzia po badaniach właściwych potwierdziły brak ich występowania w strukturze docieraka, co prawdopodobnie było spowodowane całościowym wbiciem drobnych ziaren ściernych w powierzchnię narzędzia. Z uwagi na zaprezentowany znikomy udział mniejszych ziaren ściernych w procesie skrawania zdecydowano się na zastosowanie w kolejnej serii badań jako zawiesiny ścierniej jedynie dużych ziaren diamentowych *D107*. Jednocześnie badania zrealizowano przy zachowaniu niezmiennych pozostałych parametrów oraz warunków procesu w stosunku do wcześniejszych badań oraz w trzech seriach obróbkowych o długości 120 minut każda. Uzyskane efekty obróbkowe w postaci liniowego Δh oraz masowego Δm ubytku materiałowego oraz wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni zaprezentowano na rysunkach 64 oraz 65.

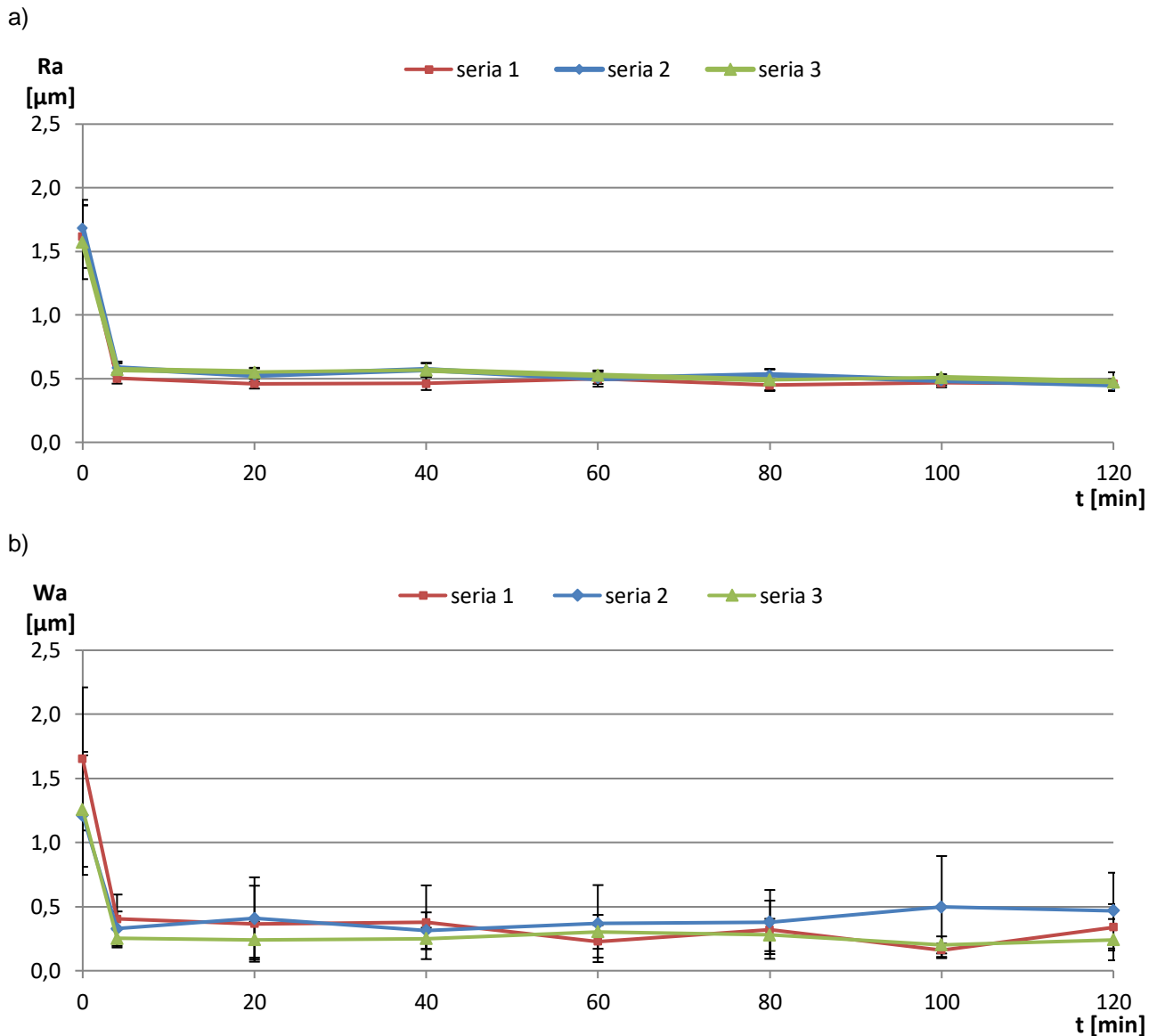
a)



b)



Rysunek 64. Wartości skumulowane liniowego ubytku materiałowego Δh (a) oraz masowego ubytku materiałowego Δm (b) uzyskane podczas badań sprawdzających docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3



Rysunek 65. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) oraz falistości Wa (b) PO uzyskane podczas badań sprawdzających docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

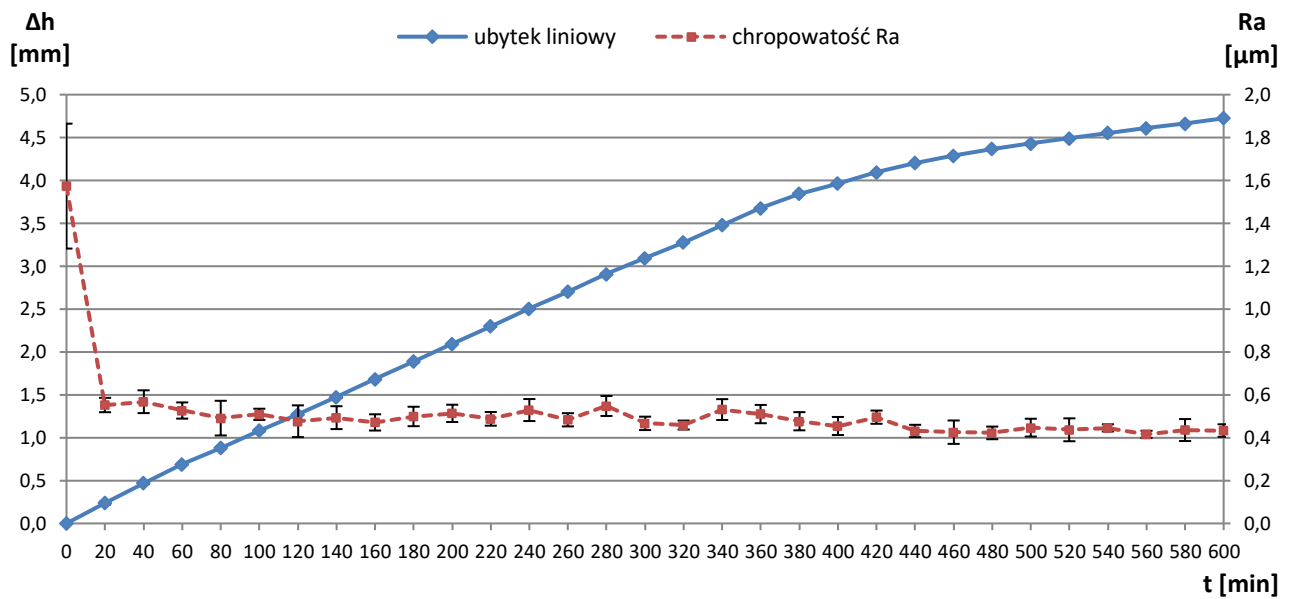
Podczas pierwszej serii badań sprawdzających zdecydowano się na zastosowanie jedynie oleju maszynowego jako nośnika ziaren ściernych, co spowodowało wystąpienie negatywnego zjawiska usunięcia części diamentowych ziaren ściernych $D107$ w początkowej fazie procesu. Z uwagi na brak występowania pasty ścierniej zwiększono dawkowanie oleju maszynowego z przyjętej we wcześniejszych seriach eksperymentalnych wartości $\dot{Q}_{lub} \approx 0,1$ ml/min do wartości $\dot{Q}_{lub} \approx 0,5$ ml/min. W rezultacie uzyskano zawiesinę ścierną złożoną z ziaren diamentowych $D107$ oraz oleju maszynowego. Zmniejszona ilość wykorzystanych w procesie ziaren ściernych wpłynęła tym samym na uzyskanie niższego ubytku materiałowego – rysunek 64 w porównaniu do wartości otrzymanych podczas badań właściwych, jak również pozostałych dwóch serii badań sprawdzających. Jednocześnie zastosowanie dużych ziaren ściernych $D107$ oraz wcześniej ustalonych parametrów procesu umożliwiło efektywne skrawanie materiału. Podobnie jak podczas wcześniejszych badań, wielkość ubytku materiałowego przyjmuje przebieg liniowy. Ponadto zaobserwowano znaczne

zmniejszenie wartości parametrów chropowatości oraz falistości powierzchni obrabianej – rysunek 65. Analizując proces obróbki podczas pierwszej serii badań sprawdzających w kolejnych seriach zdecydowano się na zastosowanie pasty ścierniej *SD 1/0* oraz ziaren diamentowych *D107* w ilościach jak podczas badań właściwych oraz jednoczesnym zmniejszeniu dawki oleju do wcześniejszej wartości $\dot{Q}_{lub} \approx 0,1$ ml/min. Wybór pasty diamentowej o najmniejszej możliwej wielkości ziarna podyktowany był wyeliminowaniem wpływu znajdujących się w niej ziaren diamentowych na proces skrawania. Celem zastosowania pasty diamentowej jako nośnika było bowiem utrzymanie dużych ziaren diamentowych *D107* na powierzchni narzędzia podczas trwania obróbki, a tym samym uniknięcie negatywnego efektu z pierwszej serii badań sprawdzających. W wyniku wprowadzonych zmian podczas drugiej oraz trzeciej serii badań uzyskano znacznie wyższy ubytek materiałowy, porównywalny do tego z wcześniejszych badań właściwych – rysunek 64. Większa ilość dużych ziaren diamentowych znajdujących się na powierzchni narzędzia umożliwiła efektywniejsze skrawanie ceramiki przy braku istotnych zmian w uzyskiwanych wartościach parametrów chropowatości i falistości – rysunek 65. Jednocześnie trzecia seria badań charakteryzowała się najwyższym ubytkiem materiałowym, czego prawdopodobną przyczynę stanowiły pozostałości wbitych ziaren diamentowych po wcześniejszych seriach badań eksperymentalnych. Trwale osadzone w miękkiej strukturze narzędzia ziarna dodatkowo intensyfikowały proces skrawania twardej ceramiki.

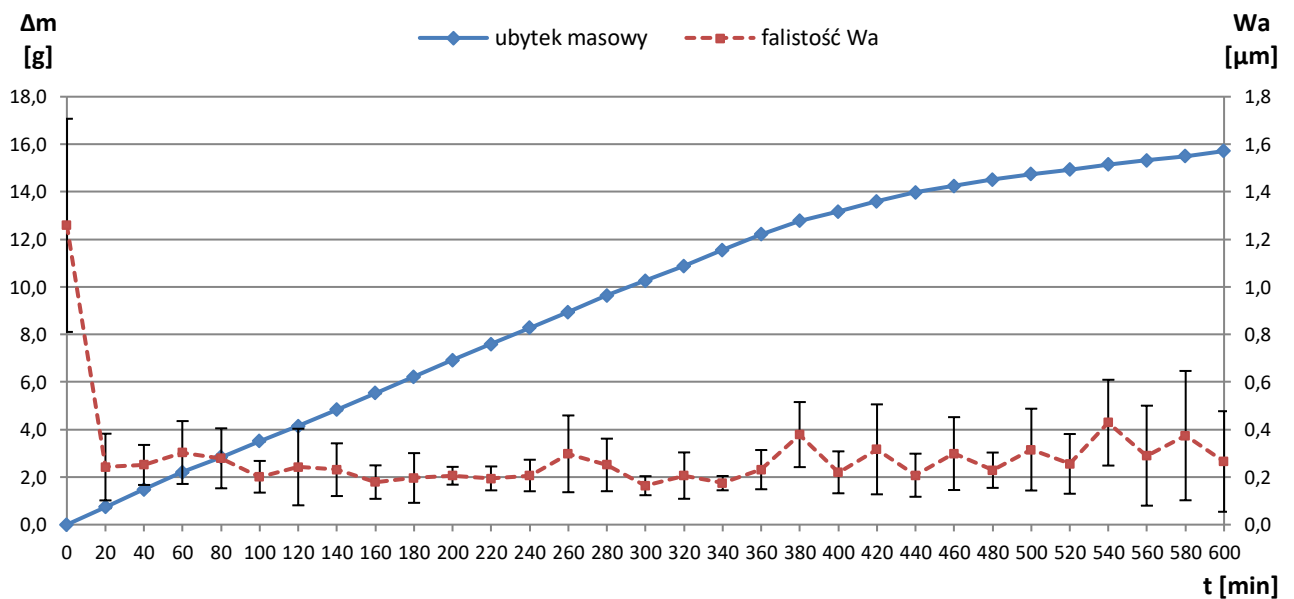
8.4. Badania dodatkowe docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

Po 120 minutach efektywnego procesu obróbki w przypadku każdej z serii badań właściwych oraz sprawdzających obserwowano ciągły ubytek materiałowy. Tym samym w celu wyznaczenia okresu efektywnej pracy narzędzia przy zastosowanych parametrach technologicznych, rodzaju zawiesiny ścierniej oraz materiału przedmiotów obrabianych zdecydowano się na wydłużenie ostatniej serii badań eksperymentalnych. Analizując przebieg oraz uzyskiwane rezultaty obróbkowe, które zaprezentowano na rysunkach 66 oraz 67, wydłużono czas pracy narzędzia łącznie aż do 10 h.

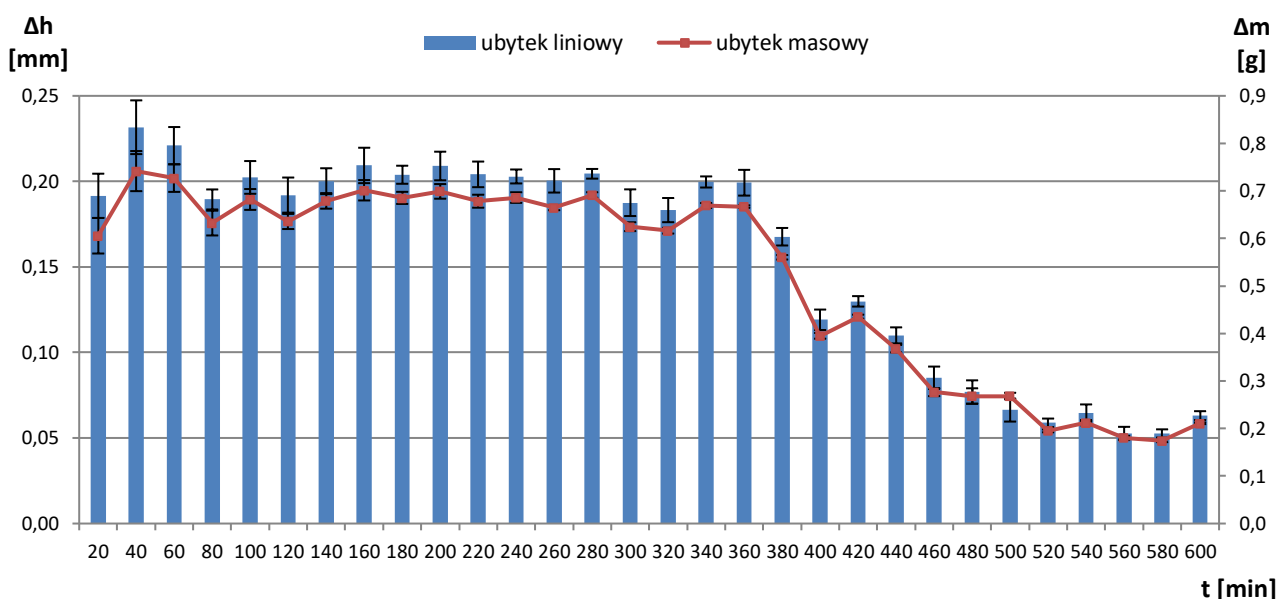
a)



b)



Rysunek 66. Efekty obróbkowe uzyskane podczas wydłużonej serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 : a) wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh oraz chropowość Ra; b) wartość skumulowana masowego ubytku materiałowego Δm oraz falistość Wa

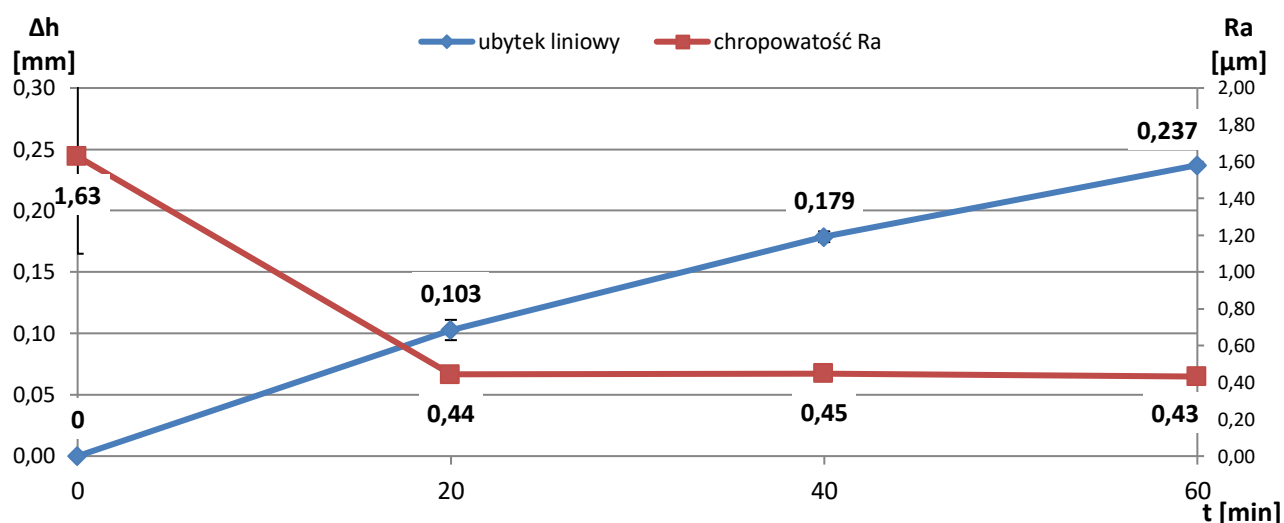


Rysunek 67. Wartości liniowego Δh oraz masowego Δm ubytku materiałowego w poszczególnych przedziałach czasowych uzyskane podczas wydłużonej serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

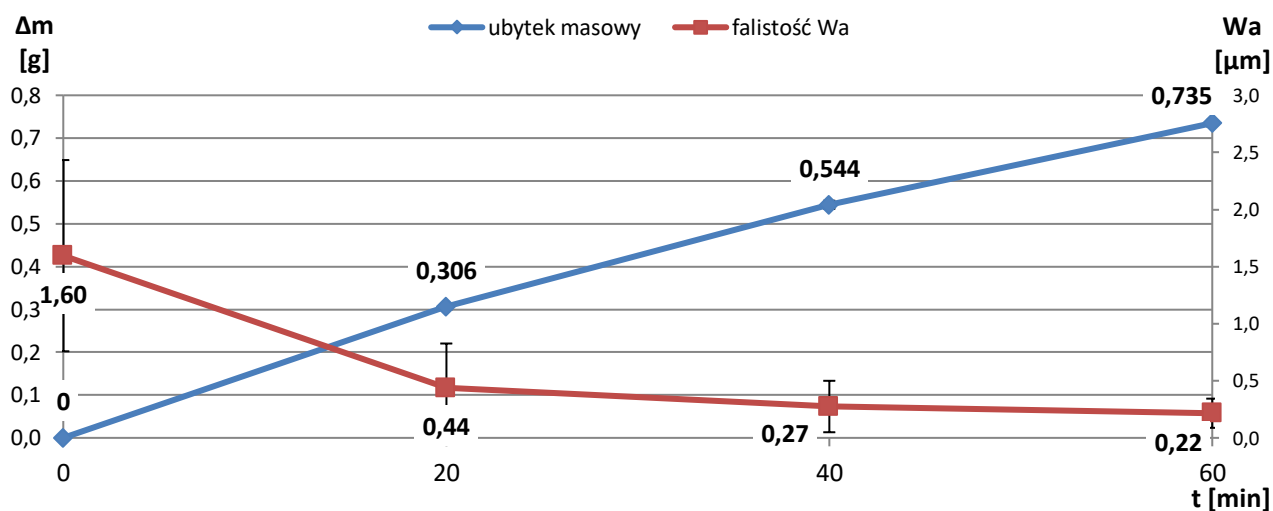
Przyjęty zestaw parametrów obróbkowych oraz rodzaj zawiesiny ścierniej dawkowanej tylko jednokrotnie przed rozpoczęciem procesu obróbki umożliwił efektywne skrawanie próbek z Al_2O_3 przez ponad 10 h. Po około 6 h obróbki zaobserwowano spadek wielkości ubytku materiałowego – rysunek 67, spowodowany mniejszą ilością ziaren ściernych biorących udział w procesie skrawania, które ulegały wrywaniu ze struktury narzędzia oraz rozdrabnianiu. Jednocześnie dalsza obróbka nie wpłynęła na zmianę parametrów chropowatości i falistości powierzchni próbek z Al_2O_3 , których wartość była niemal stała podczas całego procesu docierania. Związane było to z porowatą strukturą obrabianej ceramiki.

Analizując uzyskane rezultaty technologiczne, po ręcznym oczyszczeniu tarczy z zawiesiny ścierniej, zdecydowano się na dalszą kontynuację badań eksperymentalnych. W tym przypadku jednak nie wprowadzano świeżej porcji zawiesiny ścierniej, wykorzystując jednocześnie identyczny zestaw parametrów obróbkowych jak podczas wcześniejszych badań eksperymentalnych oraz nowe próbki ceramiczne. Pomimo braku dostarczenia świeżej porcji zawiesiny ścierniej obserwowano dalszy ubytek materiałowy oraz zmniejszenie parametrów chropowatości i falistości, co zaprezentowano na rysunku 68.

a)



b)



Rysunek 68. Efekty obróbkowe uzyskane podczas dodatkowej serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 bez wprowadzania świeżej porcji zawiesiny ścierniej:

a) wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh oraz chropowość Ra; b) wartość skumulowana masowego ubytku materiałowego Δm oraz falistość Wa

Trwale uzbrojona w ziarna diamentowe tarcza docierająca umożliwiła dalsze skrawanie PO z twardej ceramiki oraz zmniejszenie wartości parametrów chropowości i falistości ich powierzchni, szczególnie (podobnie jak w przypadku pozostałych badań eksperymentalnych) w początkowym etapie obróbki. Uzyskane rezultaty technologiczne potwierdziły olbrzymi potencjał oraz użyteczność spiekanych z proszków poliamidowych narzędzi umożliwiających efektywne i trwałe zbrojenie ich płaskiej struktury powierzchni w ziarna ściernie.

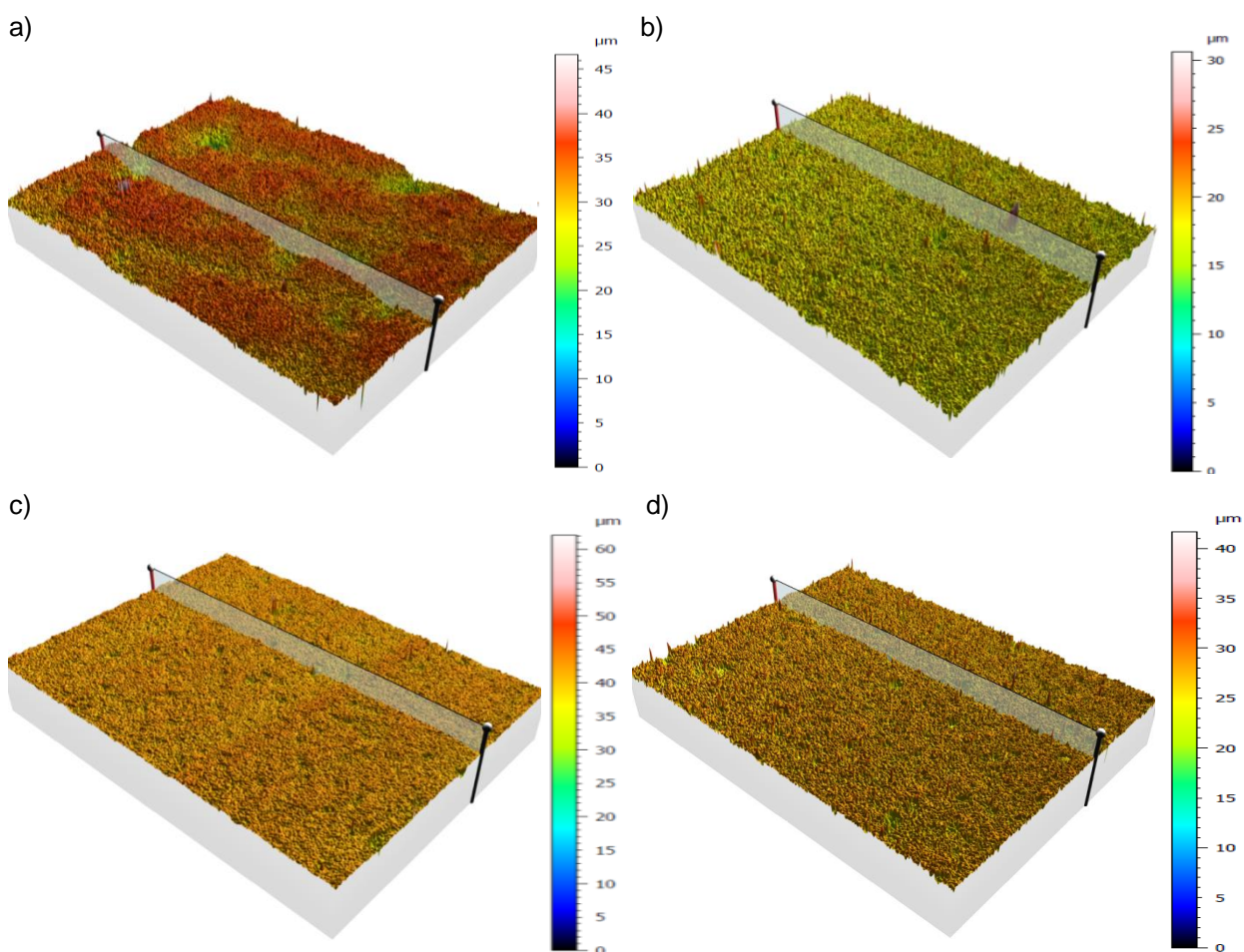
8.5. Wnioski z badań sprawdzających i dodatkowych docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

Do najważniejszych wniosków z przeprowadzonych badań eksperymentalnych sprawdzających i dodatkowych należą:

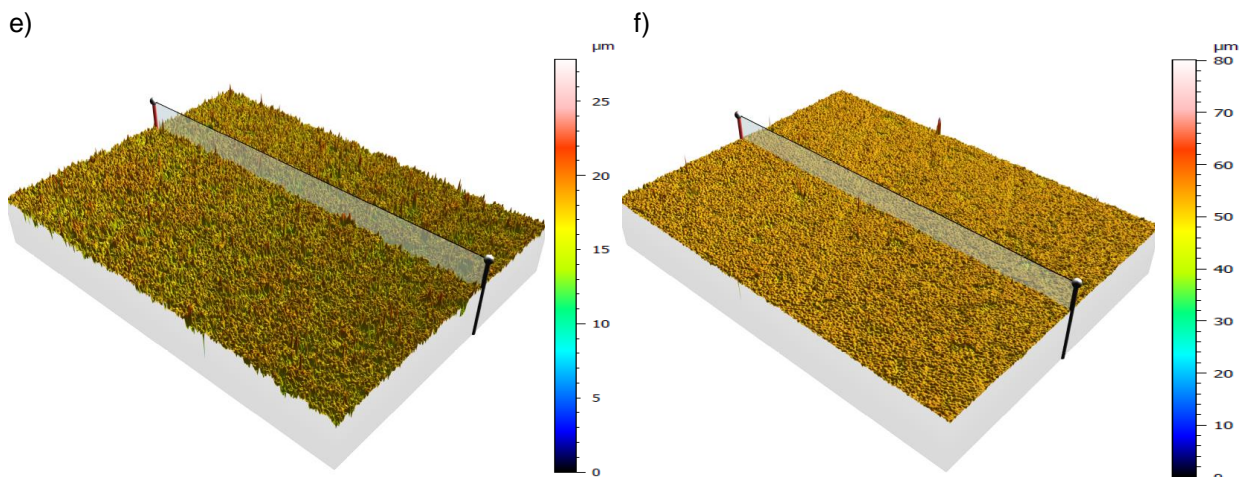
- brak zastosowania pasty ścierniej podczas pierwszej serii badań sprawdzających wpłynął na wystąpienie negatywnego zjawiska usunięcia części ziaren diamentowych $D107$ rozproszonych na płaskiej powierzchni docieraka i zaobserwowanego w początkowym etapie obróbki. Mniejsza liczba ziaren ściernych biorących udział w procesie skrawania wpłynęła na uzyskanie niższego ubytku materiałowego liniowego $\Delta h = 0,85$ mm oraz masowego $\Delta m = 2,72$ g w porównaniu do rezultatów badań właściwych;
- zastosowanie pasty diamentowej $SD1/0$ podczas drugiej oraz trzeciej serii badań sprawdzających pozwoliło na trwałe utrzymanie ziaren na powierzchni narzędzia oraz uzyskanie średniej wielkości ubytku materiałowego liniowego $\Delta h = 1,17$ mm oraz masowego $\Delta m = 3,82$ g zbliżonej do wartości z badań właściwych;
- wyniki wydłużonej serii badań eksperymentalnych (dodatkowych) wskazały na efektywny proces usuwania materiału z próbek ceramicznych przez ponad 10 h obróbki z minimalnym dawkowaniem zawiesiny ścierniej oraz tylko jednokrotnym wprowadzeniem do zawiesiny ziaren diamentowych przed rozpoczęciem docierania;
- oczyszczona powierzchnia narzędzia po 10 h obróbki oraz brak dostarczania dodatkowej dawki ziaren diamentowych umożliwiły dalsze skrawania ceramiki, co potwierdzają uzyskane wartości ubytku materiałowego liniowego $\Delta h = 0,24$ mm oraz masowego $\Delta m = 0,74$ g;
- każda z przeprowadzonych serii badań eksperymentalnych umożliwiła wyraźne zmniejszenie chropowatości i falistości powierzchni PO do średnich wartości $Ra = 0,46$ μm i $Wa = 0,35$ μm (w przypadku badań sprawdzających) oraz $Ra = 0,43$ μm i $Wa = 0,25$ μm (w przypadku badań dodatkowych);
- stan powierzchni tarczy docierającej po 10 h obróbki umożliwiał kontynuowanie docierania.

9. BADANIE I OCENA TOPOGRAFII OBRABIANYCH POWIERZCHNI

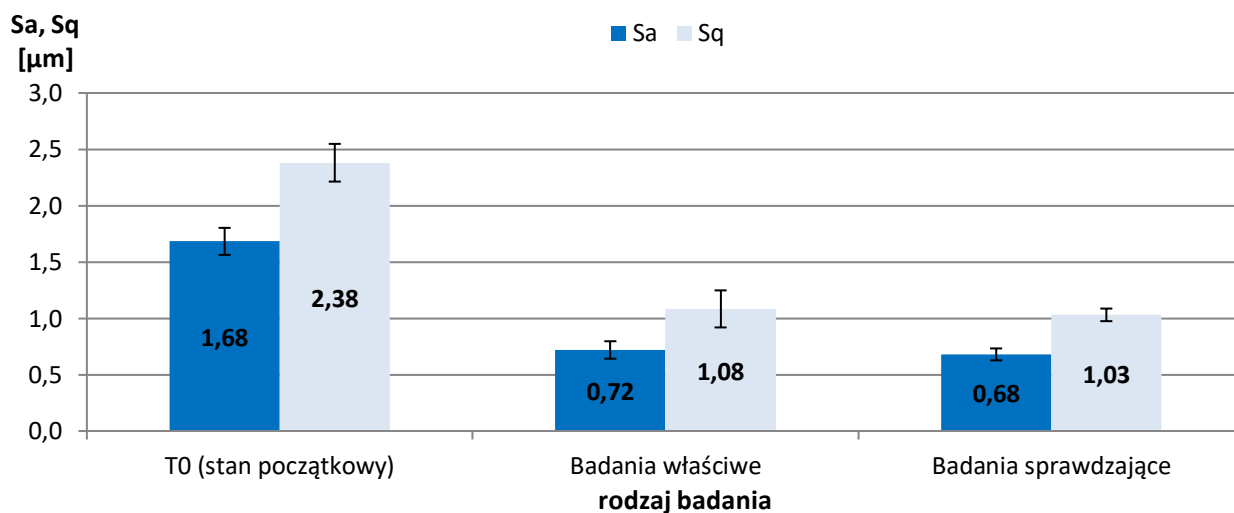
Podobnie jak po zakończeniu badań rozpoznawczych zastosowanie optycznego profilometru 3D – S neox Sensofar umożliwiło dokonanie trójwymiarowej analizy powierzchni PO po kolejnych seriach badań eksperymentalnych właściwych oraz sprawdzających. Jednocześnie badania przeprowadzono przy niezmiennych ustawieniach urządzenia w stosunku do wcześniej przeprowadzanych obserwacji i również na obszarze $873.33 \mu\text{m} \times 656.61 \mu\text{m}$ oraz zgodnie z normą ISO 25178. Dla wybranego PO po każdej serii badań właściwych oraz sprawdzających zrealizowano 3 pomiary w różnych miejscach na powierzchni. Przykładowe topografie zaprezentowano na rysunku 69, natomiast wartości średnie wybranych parametrów chropowatości po kolejnych etapach badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej na rysunku 70.



Rysunek 69. Topografie powierzchni próbek z Al_2O_3



Rysunek 69. cd. Topografie powierzchni próbek z Al_2O_3 : a) stan początkowy (przed obróbką); b) po drugiej serii badań właściwych; c) po trzeciej serii badań właściwych; d) po pierwszej serii badań sprawdzających; e) po drugiej serii badań sprawdzających; f) po trzeciej serii badań sprawdzających



Rysunek 70. Wartości średnie parametrów Sa oraz Sq po poszczególnych etapach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

W wyniku przeprowadzonego procesu docierania ceramiki technicznej uzyskano wyraźne zmniejszenie chropowatości powierzchni, co potwierdzają zarówno zaprezentowane topografie powierzchni, jak również znaczące obniżenie wartości parametrów wysokościowych Sa i Sq. Analizując topografie powierzchni po każdej z serii badań eksperymentalnych należy stwierdzić, iż zrealizowany proces obróbkowy charakteryzował się dużą powtarzalnością. Podobnie jak po zakończeniu badań rozpoznawczych, struktura powierzchni została wyraźnie wygładzona. Wyznaczone średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni próbek z ceramiki technicznej wynoszą kolejno $S_a = 0,7 \mu\text{m}$ oraz $S_q = 1,06 \mu\text{m}$.

10. OCENA EFEKTÓW OBRÓBKOWYCH

Efekty technologiczne uzyskiwane w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych porównywano ze sobą wraz z oceną istotności statystycznej występujących różnic pomiędzy średnimi. W analizie posługiwano się skrótowymi oznaczeniami badań właściwych – *bw* oraz sprawdzających – *bs* wraz z podaniem numeru kolejnych serii obróbkowych.

10.1. Analiza efektów technologicznych

Uzyskane rezultaty technologiczne w postaci średniej wydajności procesu docierania wyrażonej jako wielkość masowego i liniowego ubytku materiałowego PO w czasie oraz parametrów chropowatości i falistości ich powierzchni przed oraz po zakończonym procesie dla poszczególnych serii badań eksperymentalnych zaprezentowano na rysunku 71. Wydajność procesu docierania określano za pomocą wskaźnika *MRR* (*ang. material removal rate*) według wzorów (2) oraz (3):

$$MRR_{dm} = \frac{\Delta m}{\Delta T} = \frac{m_{\text{przed obróbką}} - m_{\text{po obróbce}}}{\Delta T} \text{ [mg/min]}, \text{ gdzie:} \quad (2)$$

m przed obróbką – masa próbek przed obróbką;

m po obróbce – masa próbek po obróbce;

Δm – wielkość ubytku masowego;

ΔT – czas trwania procesu obróbki (serii obróbkowej).

$$MRR_{dh} = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{h_{\text{przed obróbką}} - h_{\text{po obróbce}}}{\Delta T} \text{ [}\mu\text{m/min]}, \text{ gdzie:} \quad (3)$$

h przed obróbką – wysokość próbek przed obróbką;

h po obróbce – wysokość próbek po obróbce;

Δh – wielkość ubytku liniowego;

ΔT – czas trwania procesu obróbki (serii obróbkowej).

Dodatkowo zmiany chropowatości powierzchni po każdej z serii porównywano przy pomocy współczynnika *RIR* (*ang. roughness improvement rate*) zgodnie ze wzorem (4):

$$RIR = \frac{SR_{\text{przed obróbką}} - SR_{\text{po obróbce}}}{SR_{\text{przed obróbką}}} \text{ [%]}, \text{ gdzie:} \quad (4)$$

SR przed obróbką – chropowatość powierzchni *Ra* próbek przed obróbką;

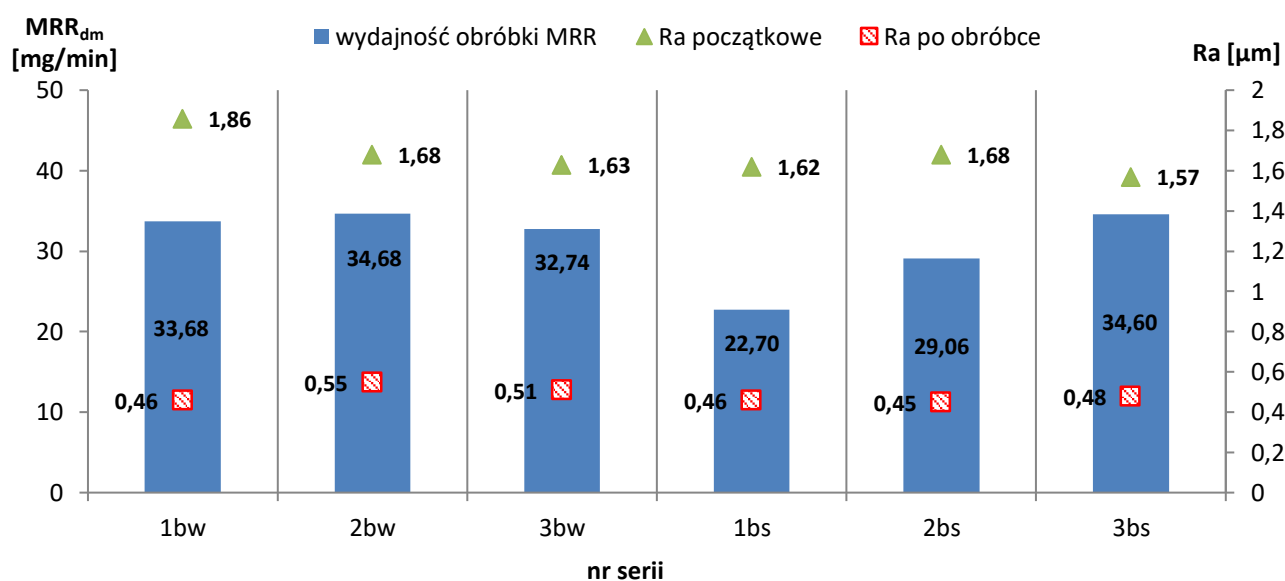
SR po obróbce – chropowatość powierzchni *Ra* próbek po obróbce.

Wyznaczone w ten sposób wartości wskaźników dla poszczególnych serii obróbkowych zaprezentowano w tabeli 8 oraz na rysunkach 71 i 72.

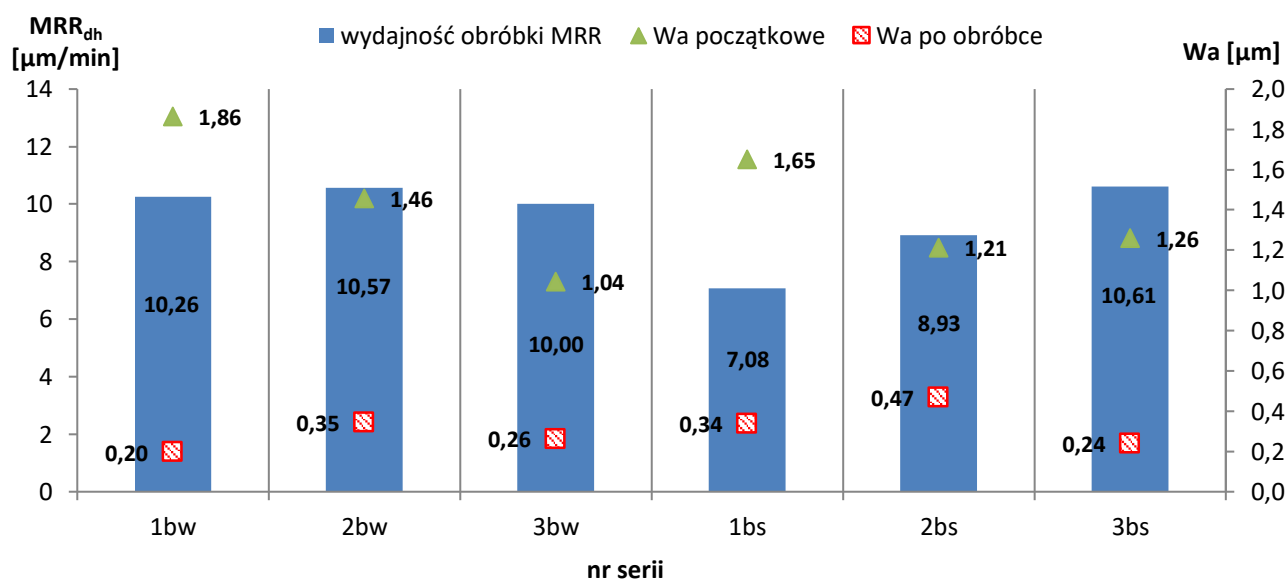
Tabela 8. Wartości wskaźników MRR oraz RIR dla poszczególnych serii badań eksperymentalnych

Nr serii	MRR_{dm} [mg/min]	MRR_{dh} [$\mu\text{m}/\text{min}$]	RIR [%]
1bw	33,68	10,26	75,46
2bw	34,68	10,57	67,17
3bw	32,74	10,00	68,90
1bs	22,70	7,08	71,46
2bs	29,06	8,93	73,15
3bs	34,60	10,61	69,70
\bar{X}	31,24	9,57	70,98

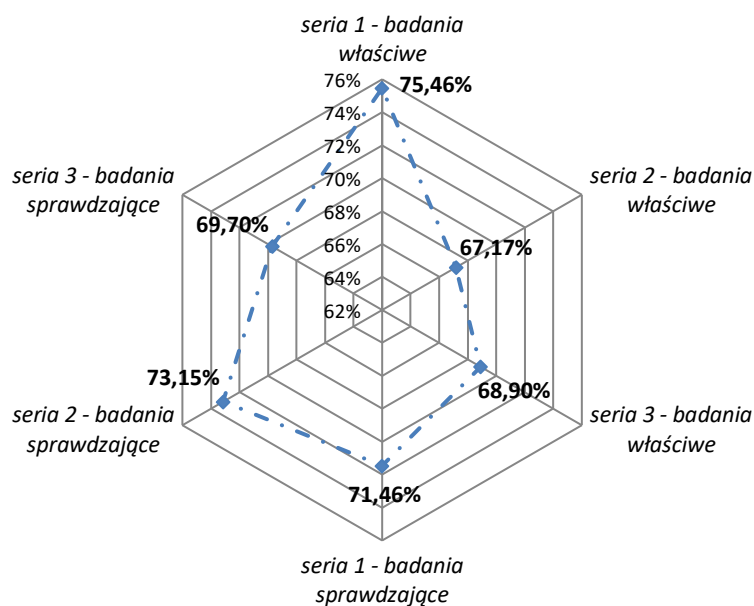
a)



b)



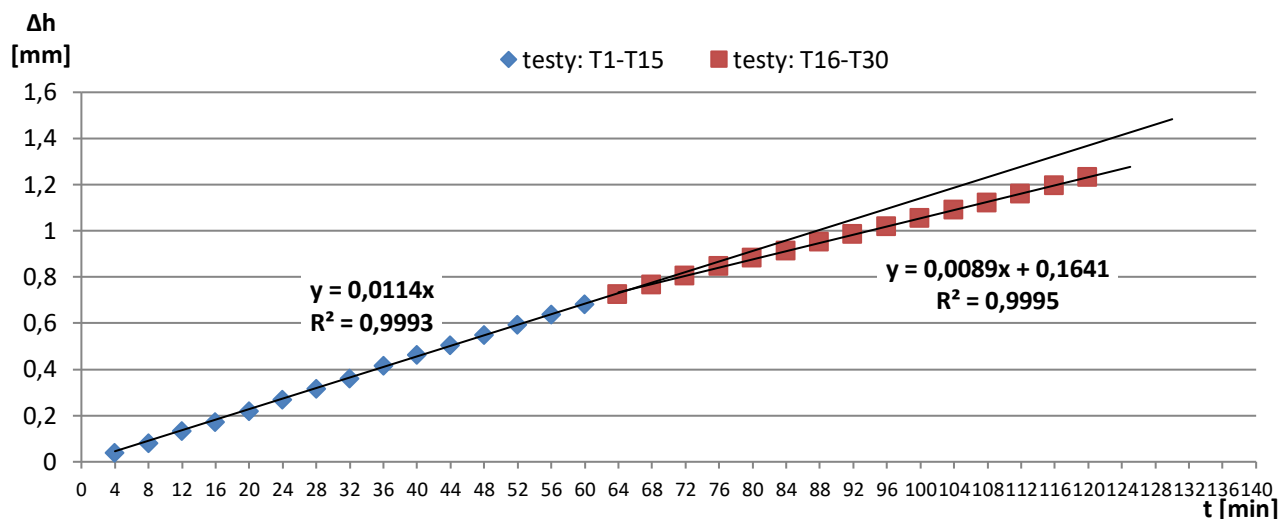
Rysunek 71. Porównanie efektów obróbkowych w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego tlenkowej ceramiki technicznej: a) wydajność procesu MRR wyrażona masowym ubytkiem materiałowym dm oraz chropowatość powierzchni Ra , b) wydajność procesu MRR wyrażona liniowym ubytkiem materiałowym dh oraz falistość powierzchni Wa



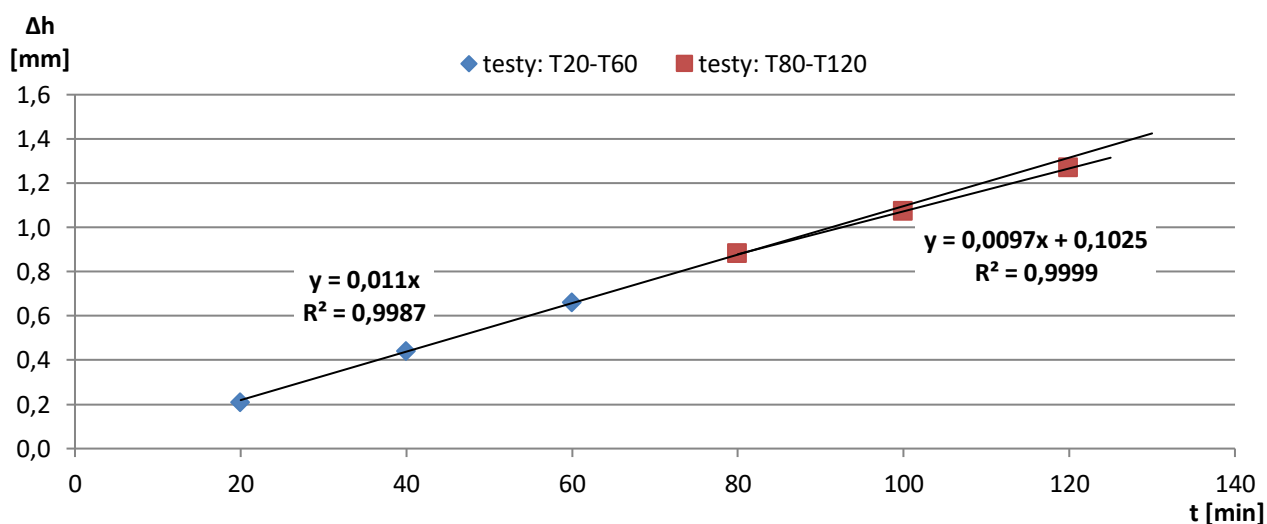
Rysunek 72. Zmiany parametru chropowatości R_a w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej wyrażone współczynnikiem poprawy chropowatości RIR

Uzyskanie zbliżonych i powtarzalnych rezultatów obróbkowych podczas kolejnych serii badań właściwych oraz sprawdzających wskazuje na duży potencjał opracowanego narzędzia oraz zastosowanych parametrów procesu docierania jednostronnego. Każda z analizowanych serii badań eksperymentalnych charakteryzowała się wysoką wydajnością obróbki oraz znaczącym zmniejszeniem wartości parametrów chropowatości R_a i falistości W_a . Duże wartości współczynników RIR świadczą o tym, iż po każdej z serii badań eksperymentalnych następowała znacząca poprawa chropowatości powierzchni wynosząca nawet ponad 75%, co potwierdziła również zaprezentowana w rozdziale 9 trójwymiarowa analiza struktury powierzchni próbek ceramicznych. Jedynie pierwsza seria badań sprawdzających charakteryzowała się znacznie niższą wydajnością procesu obróbki przy jednoczesnym uzyskaniu zbliżonych końcowych wartości parametrów R_a i W_a w porównaniu do pozostałych serii badań eksperymentalnych.

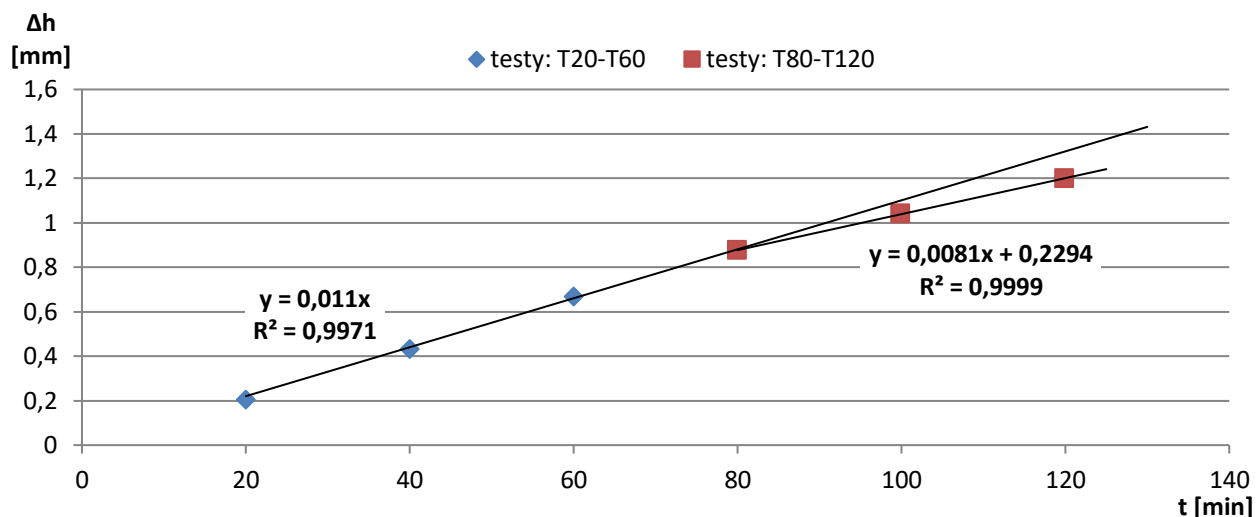
W każdej z przeprowadzonych serii badań eksperymentalnych docierania próbek z Al_2O_3 zaobserwowano ponadto dwa charakterystyczne przedziały czasowe wartości liniowego ubytku materiałowego. Początkowo przyjęty przedział czasowy dla pierwszej serii badań właściwych dotyczył testów T1-T14 oraz T15-T30 – rysunek 57. Wydłużenie czasu pojedynczych testów dla pozostałych badań do $\Delta t = 20$ min zdecydowało o przyjęciu przedziałów dla $t \leq 60$ min (testy T1-T15 w przypadku pierwszej serii badań właściwych lub T20-T60 w przypadku pozostałych serii badań właściwych oraz badań sprawdzających) oraz $t > 60$ min (testy T16-T30 w przypadku pierwszej serii badań właściwych lub T80-T120 w przypadku pozostałych serii badań właściwych oraz badań sprawdzających) – rysunki 73, 74, 75, 76, 77 oraz 78.



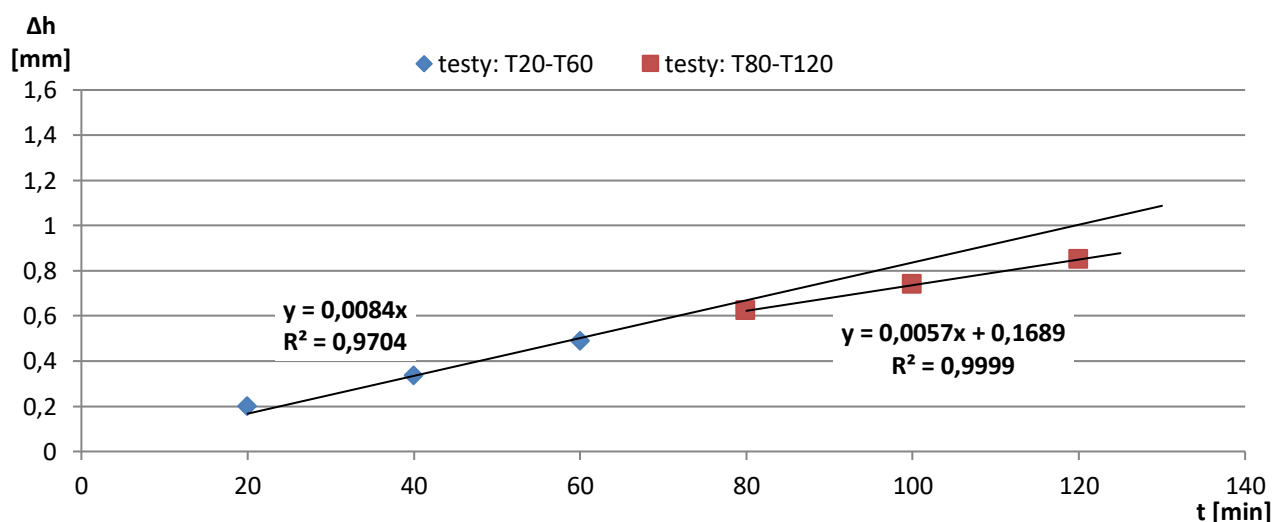
Rysunek 73. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas pierwszej serii badań właściwych (1bw) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe



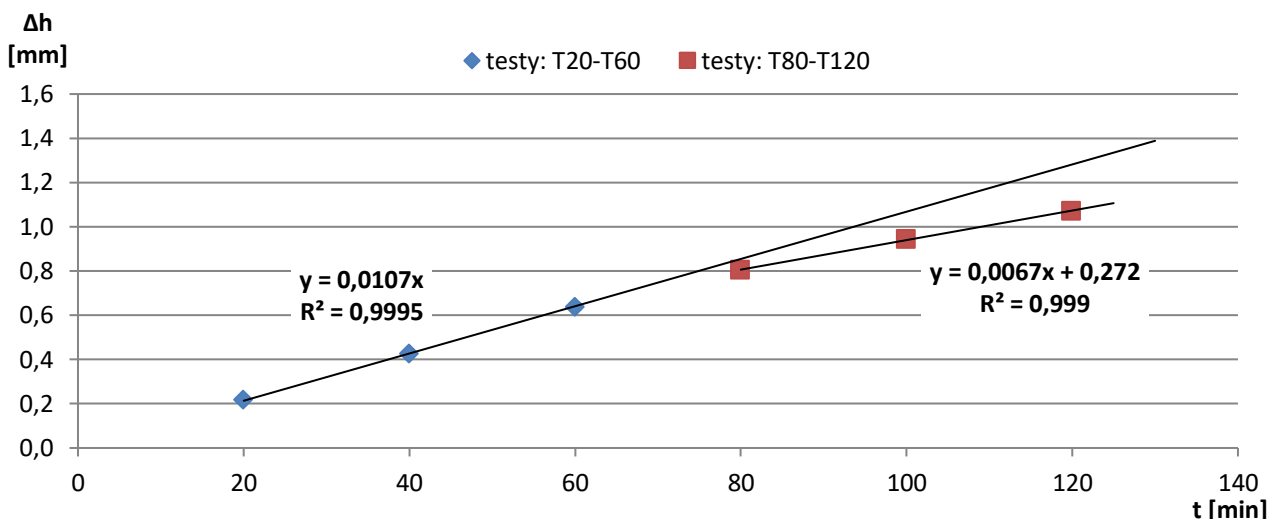
Rysunek 74. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas drugiej serii badań właściwych (2bw) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe



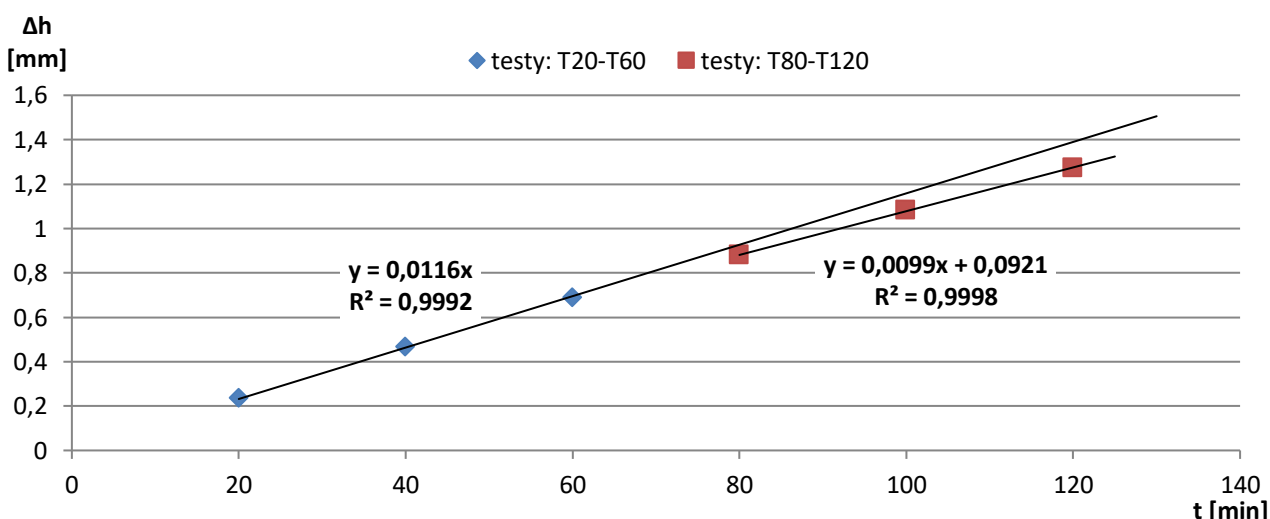
Rysunek 75. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas trzeciej serii badań właściwych (3bw) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe



Rysunek 76. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas pierwszej serii badań sprawdzających (1bs) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe



Rysunek 77. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas drugiej serii badań sprawdzających (2bs) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe



Rysunek 78. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas trzeciej serii badań sprawdzających (3bs) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe

W każdej z analizowanych serii obróbkowych zaobserwowano nieznaczny spadek wartości usuwanego materiału następujący po około 60 minutach. Średni ubytek materiałowy Δh aproksymowano linią trendu o postaci funkcji liniowej. Wyznaczenie linii trendu niezależnie dla każdego z przedziałów czasowych obróbki dla $t \leq 60$ min oraz $t > 60$ min pozwoliło na porównanie wartości ubytku materiałowego Δh uzyskiwanego w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych. W tabeli 9 oprócz wartości współczynników a i b poszczególnych linii trendów, zamieszczono maksymalne błędy bezwzględne Δy_{max} oraz względne δ_{max} pomiędzy wartościami zmierzonymi a wyznaczonymi z linii trendów, które obliczano kolejno według wzorów (5) i (6):

$$\Delta y_{max} = \max |y_i - \hat{y}_i|, \quad (5)$$

$$\delta_{max} = \max \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right) 100\%, \quad (6)$$

oraz pierwiastek błędu średniokwadratowego *RMSE* z zależności (7):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}, \text{ gdzie:} \quad (7)$$

y_i – wartość rzeczywista (zmierzona) czynnika wyjściowego (ubytku liniowego);

\hat{y}_i – wartość czynnika wyjściowego (ubytku liniowego) obliczona (prognozowana) z linii odniesienia (trendu);

n – ilość danych pomiarowych (liczność próby).

Dodatkowo jakość dopasowania danych pomiarowych do wyznaczonych linii trendów oceniano przy użyciu współczynnika determinacji R^2 zgodnie ze wzorem (8):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \text{ gdzie:} \quad (8)$$

\bar{y} – średnia arytmetyczna rzeczywistych wartości czynnika wyjściowego (ubytku liniowego).

Tabela 9. Wyznaczone wartości błędów oraz współczynników linii trendu dla niezależnych przedziałów czasowych poszczególnych serii badań eksperymentalnych

Rodzaj badania i nr narzędzia	Nr serii	Wartości współczynników z linii odniesienia (trendu)		R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
		a	b		Δy_{max} [μm]	δ_{max} [%]	RMSE [μm]
Okres obróbki dla $t \leq 60$ min							
Badania właściwe, narzędzie nr 1	1	0,0114	–	0,9993	0,009	16,3	0,01
	2	0,0110	–	0,9987	0,012	5,7	0,01
	3	0,0110	–	0,9971	0,013	6,4	0,01
Badania sprawdzające, narzędzie nr 2	1	0,0084	–	0,9704	0,033	16,2	0,02
	2	0,0107	–	0,9995	0,028	4,1	0,02
	3	0,0116	–	0,9992	0,006	2,1	0,01
Okres obróbki dla $t > 60$ min							
Badania właściwe, narzędzie nr 1	1	0,0089	0,1641	0,9995	0,009	1,2	0,004
	2	0,0097	0,1025	0,9999	0,002	0,2	0,002
	3	0,0081	0,2294	0,9999	0,001	0,1	0,001
Badania sprawdzające, narzędzie nr 2	1	0,0057	0,1689	0,9999	0,004	0,5	0,003
	2	0,0067	0,272	0,999	0,005	0,5	0,004
	3	0,0099	0,0921	0,9998	0,007	0,6	0,005

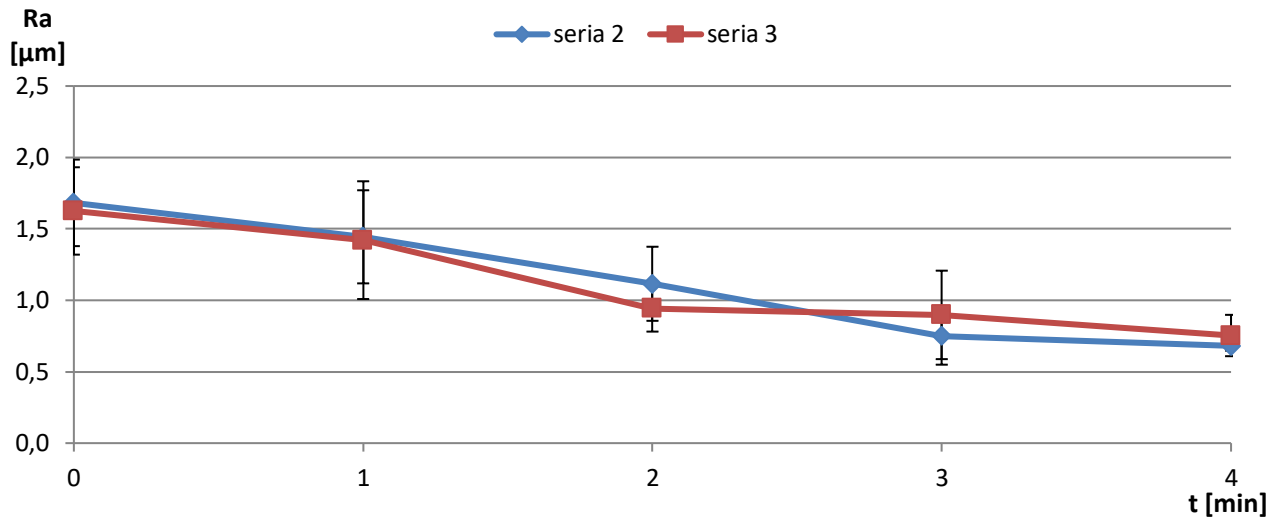
Wyznaczone wartości współczynników kierunkowych oraz błędów dla niezależnych przedziałów czasowych poszczególnych serii są do siebie zbliżone. Dodatkowo uzyskane wartości współczynnika determinacji R^2 dla każdej z wyznaczonych linii trendu wynoszą 0,99, co potwierdza bardzo dobre dopasowanie wyznaczonych linii trendu do danych eksperymentalnych. Świadczy to zatem o tym, iż przyrost wartości ubytku materiałowego był proporcjonalny do czasu trwania obróbki dla każdej z przeprowadzonych serii. Nieco większe różnice w błędach oraz słabsze dopasowanie linii trendu do danych eksperymentalnych uzyskano dla pierwszej serii badań sprawdzających. Przyczyną tego zjawiska był niższy w porównaniu do pozostałych serii eksperymentalnych ubytek materiałowy spowodowany mniejszą ilością wykorzystanych w procesie skrawania ziaren ściernych.

Przyjęte warunki procesu obróbki umożliwiły ponadto znaczną poprawę jakości powierzchni PO. Każda z analizowanych serii badań eksperymentalnych charakteryzowała się dużym spadkiem wartości parametrów chropowatości i falistości następującym już po 4 minutach obróbki, po czym ulegały już one tylko dalszemu niewielkiemu obniżeniu. Jednocześnie charakterystyczne właściwości ceramiki technicznej, w tym głównie jej porowatość, a także przyjęty zestaw parametrów technologicznych i rodzaj zawiesiny ścierniej, uniemożliwiły dalszy spadek wartości parametrów chropowatości i falistości w kolejnej części obróbki. Wyniki pierwszej serii badań właściwych skłoniły autora do dokładniejszej analizy początkowego etapu obróbki. W związku z tym na rysunkach 79 oraz

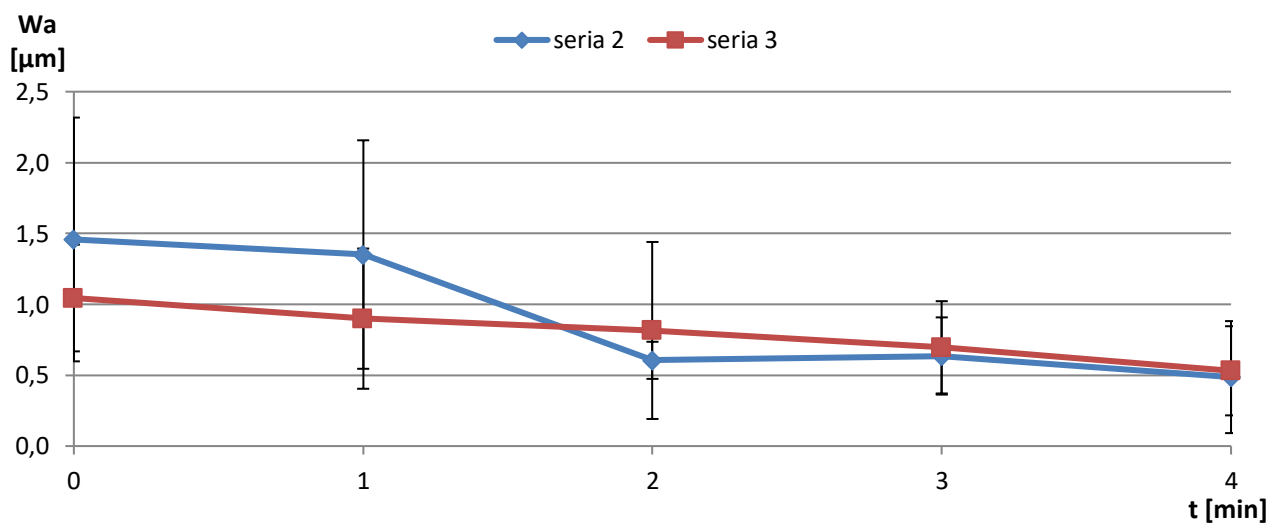


80 przedstawiono rezultaty pomiarów parametrów chropowatości Ra oraz falistości Wa uzyskane podczas pierwszych 4 min obróbki dla poszczególnych serii badań właściwych oraz sprawdzających docierania ceramiki technicznej.

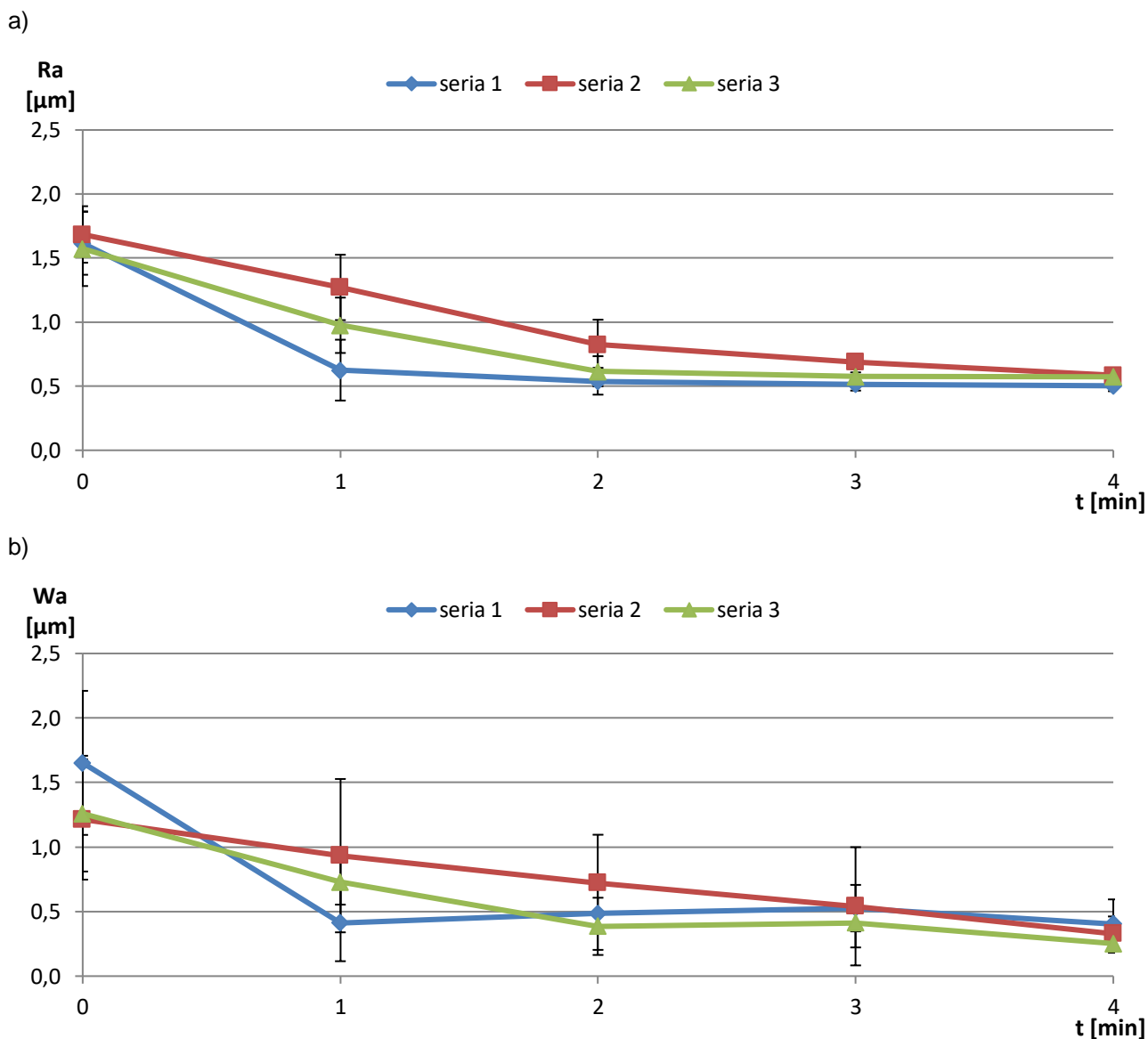
a)



b)



Rysunek 79. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) i falistości Wa (b) uzyskane podczas badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3



Rysunek 80. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) i falistości Wa (b) uzyskane podczas badań sprawdzających docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3

Uzyskane rezultaty wskazują jednoznacznie, iż zaledwie już po 1 minucie obróbki następowało wyraźne zmniejszenie wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni, co związane było z usuwaniem początkowych błędów kształtu PO. Znaczne zmniejszenie wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni próbek z ceramiki technicznej wynikało prawdopodobnie z charakteru pracy dużych ziaren diamentowych. Podczas początkowego etapu skrawania nieutwardzone w miękkiej strukturze narzędzia ziarna diamentowe toczyły się pomiędzy powierzchniami obrabianych próbek a narzędziem, co mogłoby wskazywać na dominację procesu ścierania trzyczęściowego. Po 4 minutach obróbki głębsze utwardzenie dużych ziaren w strukturze narzędzi wpłynęło z kolei na zwiększenie wydajności usuwanego materiału, co wskazuje na występowanie procesu skrawania podobnego jak podczas szlifowania. Podsumowując, intensywne oraz efektywne zbrojenie płaskiej powierzchni prototypowych narzędzi następujące podczas procesu skrawania umożliwiło uzyskanie wysokich wartości ubytku materiałowego oraz znaczącej poprawy jakości obrabianych powierzchni.

10.2. Ocena istotności statystycznej różnic efektów technologicznych

Kolejny etap badań stanowiła ocena istotności statystycznej różnic pomiędzy średnimi wartościami liniowego ubytku materiałowego Δh oraz parametrów chropowatości Ra i falistości Wa uzyskiwanymi w każdej z przeprowadzonych serii badań właściwych (bw) oraz sprawdzających (bs). Procedura obliczeniowa została przeprowadzona w oprogramowaniu Statistica przy użyciu analizy wariancji ANOVA dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Pomiarów poszczególnych wielkości dokonywano dziewięciokrotnie w odstępach czasowych co 20 minut. Łączna liczba danych pomiarowych przyjętych w analizie dla każdego z efektów technologicznych w każdej z serii wyniosła 54.

Zgodnie z procedurą testowania hipotez statystycznych sformułowano następujące hipotezy: zerową H_0 oraz postawioną do niej alternatywną H_1 :

H_0 : brak różnic w wartościach średnich analizowanych efektów technologicznych dotyczących liniowego ubytku materiałowego Δh , parametru chropowatości Ra oraz parametru falistości Wa pomiędzy seriami badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z Al_2O_3 ,

H_1 : wystąpienie różnic w wartościach średnich analizowanych efektów technologicznych dotyczących liniowego ubytku materiałowego Δh , parametru chropowatości Ra oraz parametru falistości Wa pomiędzy seriami badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z Al_2O_3 .

Z uwagi na brak spełnienia założeń dotyczących normalności rozkładu danych oraz jednorodności wariancji, których analizy dokonano kolejno przy użyciu testów Shapiro-Wilka oraz Levene'a, zastosowano test nieparametryczny ANOVA Kruskala-Wallisa i test mediany. Wyniki analizy statystycznej zaprezentowano w tabeli 10 oraz w formie graficznej na rysunkach 81 oraz 82. Dodatkowo kolorem czerwonym za pomocą * zaznaczono wartości prawdopodobieństwa testowego p wskazujące na wystąpienie istotnych statystycznie różnic.

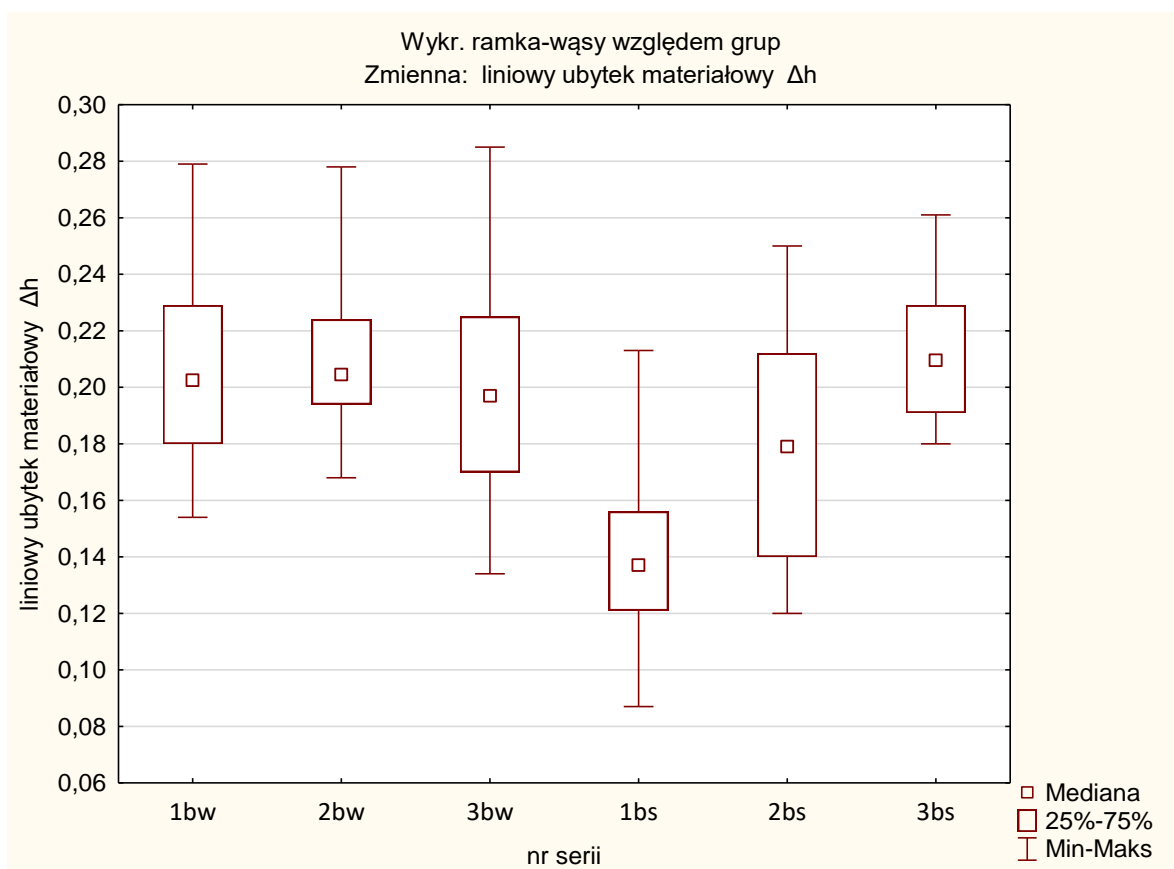
Tabela 10. Analiza testu ANOVA Kruskala-Wallisa i test mediany pomiędzy seriami badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z Al_2O_3

Zmienna zależna (analizowany efekt)	Porównywane grupy (serie badań)	Wartość p (prawdopodobieństwo testowe)	Istotność statystyczna	Serie z różnicami statystycznie istotnymi
liniowy ubytek materiałowy Δh	badania właściwe (bw): serie 1-3 oraz badania sprawdzające (bs): serie 1-3 (łącznie 6 serii)	$p \ll 0,05^*$	tak	1bw i 1bs, 2bw i 1bs, 3bw i 1bs, 2bs i 1bs, 3bs i 1bs, 2bw i 2bs, 2bs i 3bs
parametr chropowatości Ra		$p \ll 0,05^*$	tak	1bw i 2bw, 1bw i 1bs, 2bw i 3bw, 2bw i 1bs, 2bw i 2bs, 2bw i 3bs, 3bw i 1bs, 1bs i 2bs, 1bs i 3bs
parametr falistości Wa		$p \ll 0,05^*$	tak	1bw i 2bw, 1bw i 2bs, 2bw i 3bw, 2bw i 1bs, 2bw i 3bs

*wartość statystyki wskazująca na wystąpienie różnic istotnych statystycznie ($p < 0,05$)

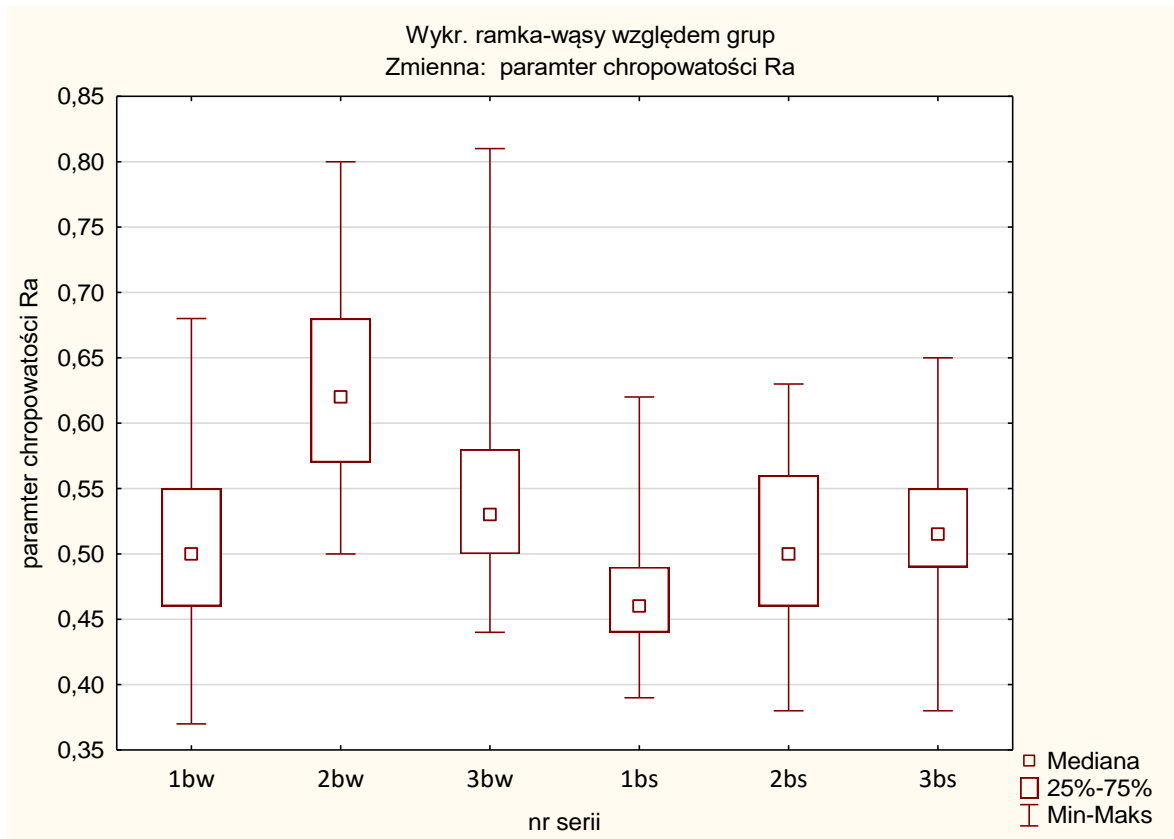
Wyznaczone wartości p dla każdej z rozpatrywanych zmiennych zależnych (efektów technologicznych) są znacznie niższe od przyjętego poziomu istotności, co stanowi podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej oraz przyjęcia hipotezy alternatywnej. Tym samym przeprowadzony test wykazał istotne statystycznie różnice pomiędzy średnimi dla wszystkich analizowanych efektów.

W celu wskazania serii z istotnymi różnicami pomiędzy średnimi przeprowadzono dodatkową analizę korzystając z wielokrotnych porównań średnich rang dla wszystkich prób. Największa liczba istotnych różnic wystąpiła dla ubytku materiałowego Δh oraz parametru chropowatości Ra i dotyczyła w każdym przypadku pięciokrotnie pierwszej serii badań sprawdzających (1bs). Uzyskane rezultaty analizy statystycznej potwierdziły tym samym, iż zmiana rodzaju stosowanej zawiesziny ścierniej wpłynęła na wystąpienie istotnych różnic (spadku) ubytku materiałowego oraz parametru chropowatości Ra, co odzwierciedlają również wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowane w rozdziale 8. Istotnie niższa wydajność oraz chropowatość charakteryzują pierwszą serię badań sprawdzających, czego przyczyną jest mniejsza w porównaniu do pozostałych serii ilość czynnych ziaren ściernych biorących udział w skrawaniu. Jednocześnie zdecydowanie mniejsza ilość istotnych różnic pomiędzy średnimi z pozostałych serii świadczy o stosunkowo stabilnym i powtarzalnym przebiegu procesu obróbki.

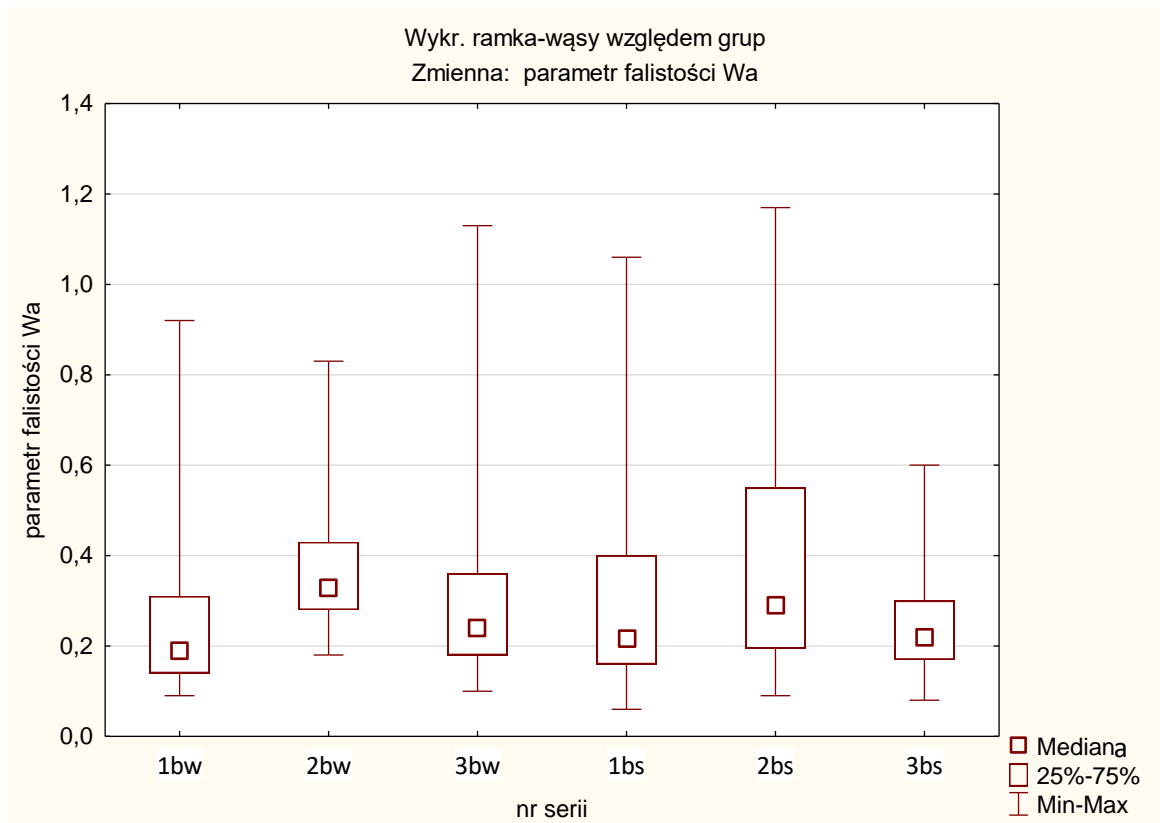


Rysunek 81. Graficzna interpretacja wyników testu ANOVA Kruskala-Wallisa i test mediany z wykorzystaniem wykresu ramka-wąsy dla liniowego ubytku materiałowego Δh

a)



b)



Rysunek 82. Graficzna interpretacja wyników testu ANOVA Kruskala-Wallis i test mediany z wykorzystaniem wykresu ramka-wąsy dla: a) parametru chropowości Ra; b) parametru falistości Wa

11. ANALIZA KSZTAŁTU I WIELKOŚCI ZUŻYCIA PROTOTYPOWYCH TARCZ DOCIERAJĄCYCH

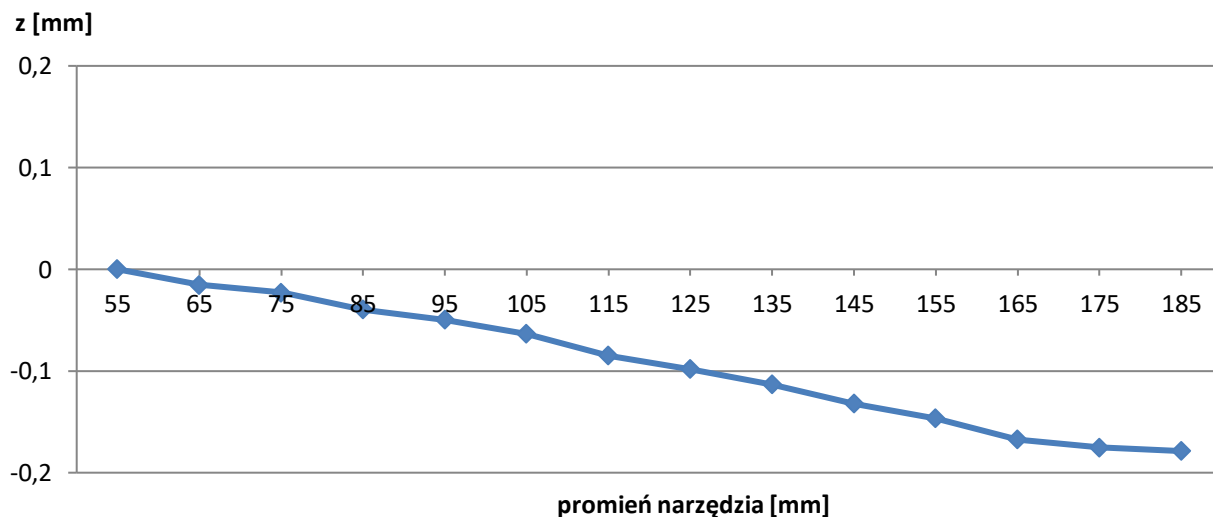
Okres trwałości oraz wartość zużycia stanowią jedne z głównych czynników wpływających na ocenę nowo opracowanych narzędzi ściernych. Obserwacje makroskopowe struktury tarcz docierających po zakończeniu badań właściwych oraz sprawdzających trwających 360 minut każda nie wykazały nadmiernego zużycia oraz śladów uszkodzenia narzędzi. Stan powierzchni docieraków umożliwił dalsze prowadzenie procesu obróbki, jednak z uwagi na przyjętą metodykę badań zdecydowano się na zakończenie procesu docierania. Nawet po zakończeniu wydłużonej ostatniej serii badań eksperymentalnych trwającej łącznie 10 h oraz dodatkowych badań bez wprowadzania nowej porcji zawiesiny ścierniej, nie zauważono nadmiernych śladów zużycia oraz uszkodzenia narzędzia, które uniemożliwiłyby jego dalsze zastosowanie w kolejnych badaniach.

Uzyskane profile narzędzi posłużyły do oceny ich kształtu po poszczególnych seriach obróbkowych. Ponadto w celu ilościowego oszacowania wartości zużycia tarcz docierających stosowanych w badaniach eksperymentalnych wyznaczono odchyłki ich prostoliniowości.

11.1. Analiza kształtu i profili płaskich powierzchni narzędzi

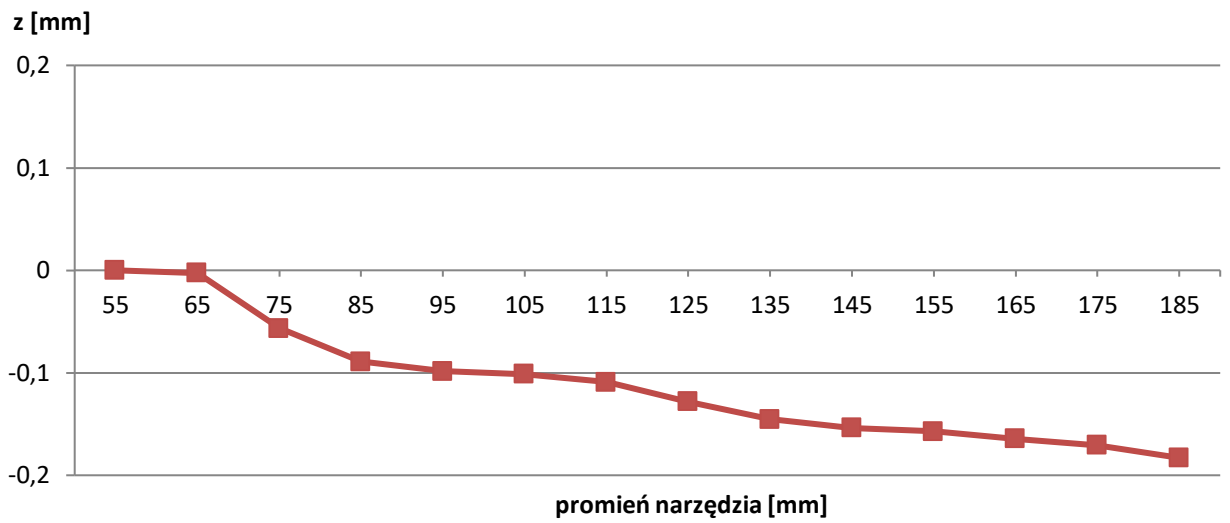
Pomiarów dokonywano z wykorzystaniem aparatury oraz zgodnie z procedurą zaprezentowaną we wcześniejszej części pracy (podrozdziały 6.2. i 7.2.). Uzyskane w ten sposób profile narzędzi po określonych seriach badań właściwych oraz sprawdzających przedstawiono na rysunkach 83 oraz 84.

a)

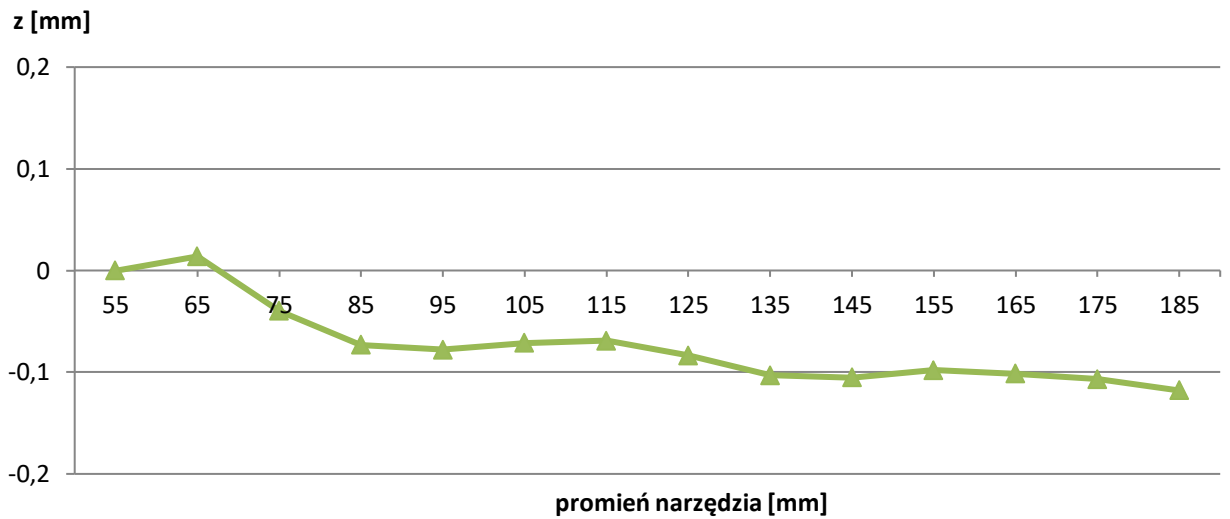


Rysunek 83. Profile narzędzia nr 1 stosowanego w badaniach właściwych

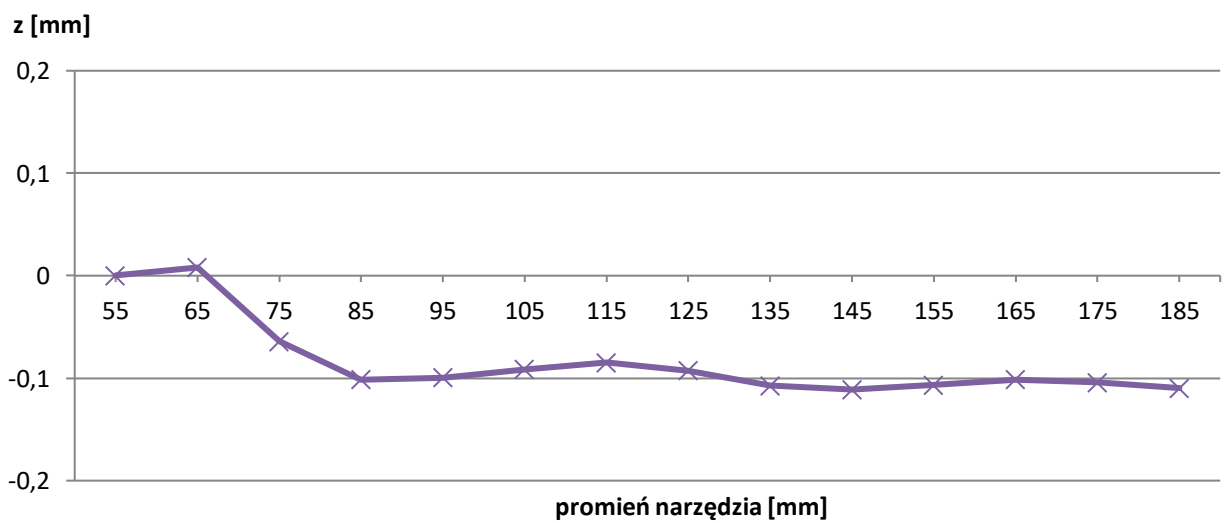
b)



c)

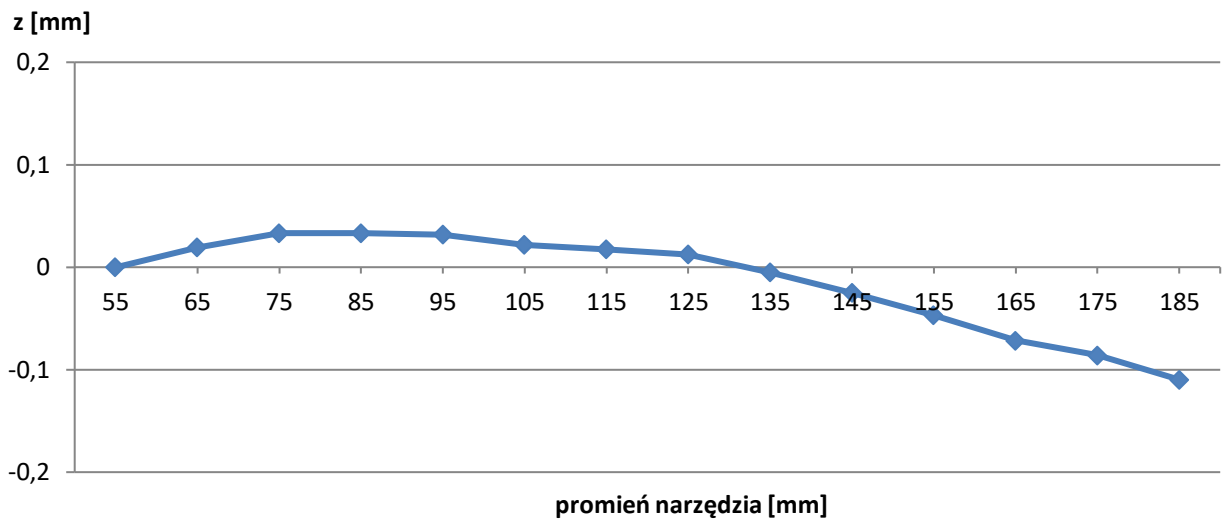


d)

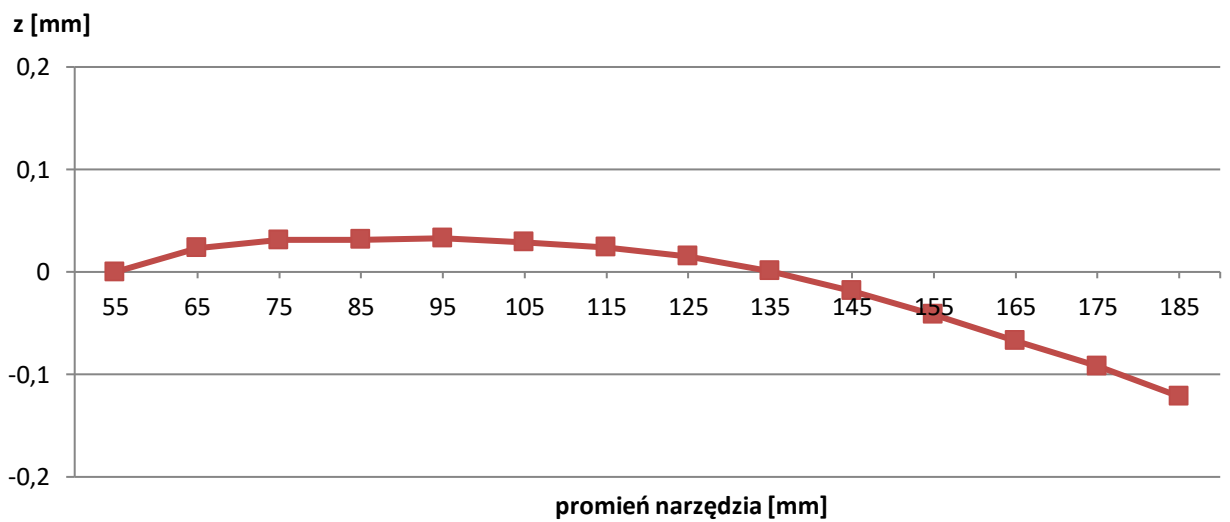


Rysunek 83. cd. Profile narzędzia nr 1 stosowanego w badaniach właściwych: a) przed obróbką; b) po serii 1 (120 minutach); c) po serii 2 (240 minutach); d) po serii 3 (360 minutach)

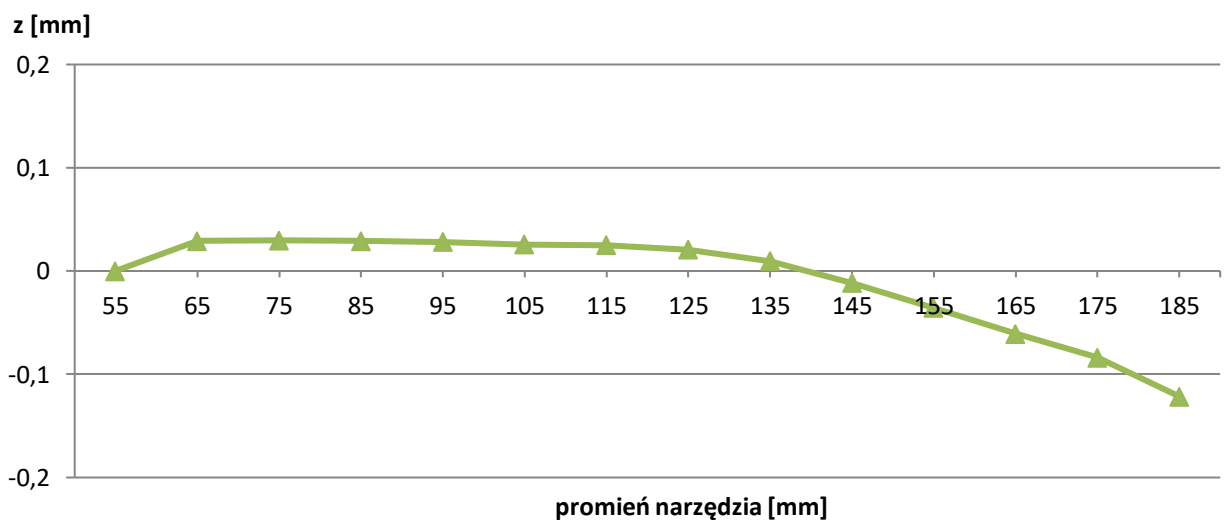
a)



b)

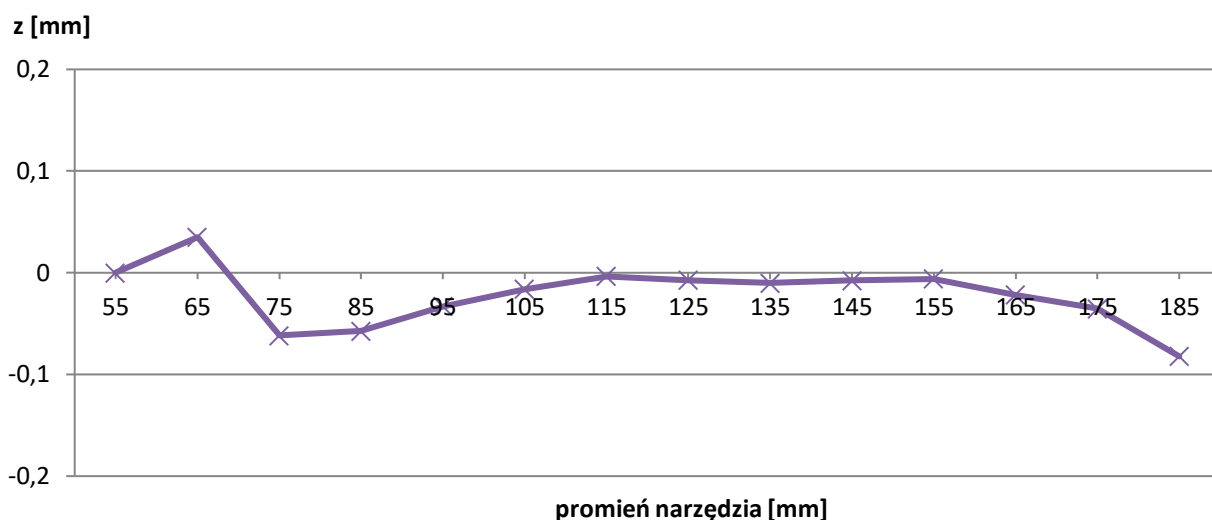


c)



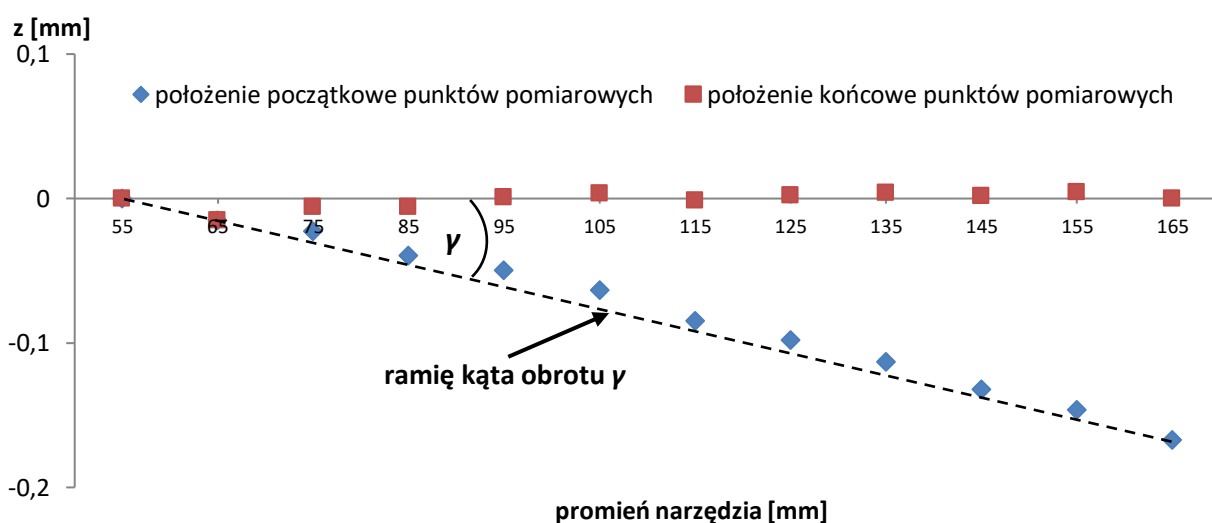
Rysunek 84. Profile narzędzia nr 2 stosowanego w badaniach sprawdzających i dodatkowych

d)



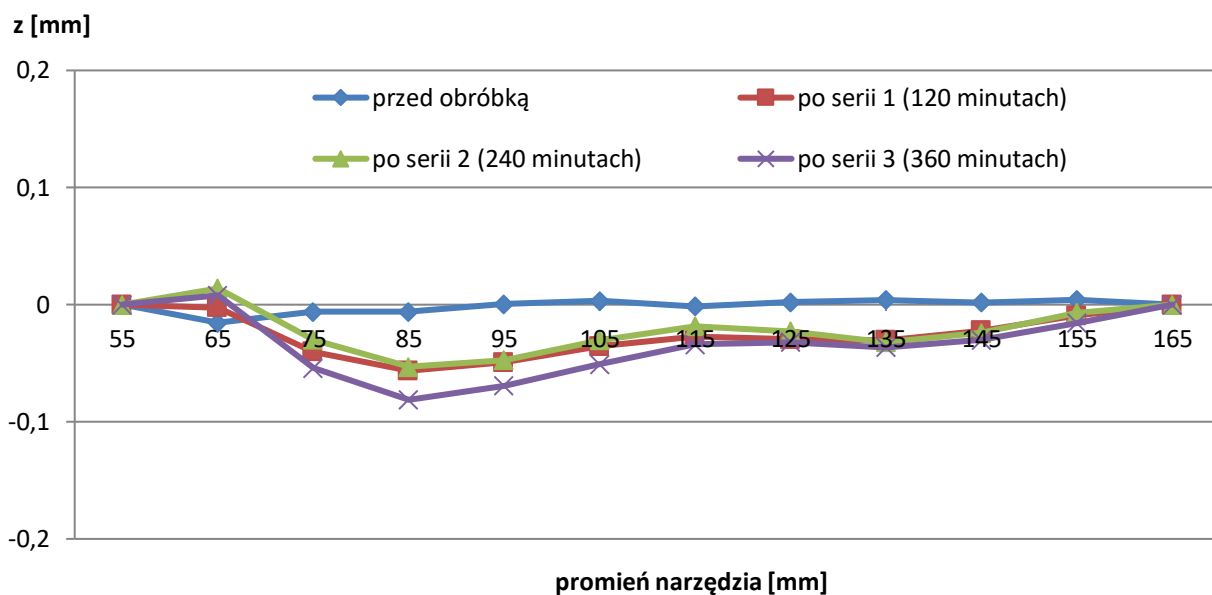
Rysunek 84. cd. Profile narzędzia nr 2 stosowanego w badaniach sprawdzających i dodatkowych: a) przed obróbką; b) po serii 1 (120 minutach); c) po serii 2 (240 minutach); d) po serii 3 – wydłużonej (840 minutach)

Analiza wyznaczonych profili tarcz docierających po określonych seriach i badaniach eksperymentalnych wskazała na nieznacznie zwiększającą się wartość ich zużycia wraz z wydłużaniem czasu obróbki. Uwzględniając wymiary geometryczne PO oraz ich rozmieszczenie w separatorze przedmiotowym umieszczonym wewnątrz pierścienia prowadzącego, obszar zużycia dotyczył odcinka zawierającego się w przedziale 65 – 165 mm, tj. strefy kontaktu PO z płaską powierzchnią narzędzia. Profile zaprezentowane na rysunkach 83 oraz 84 poddano dodatkowej transformacji kątowej, która polegała na przesunięciu każdego punktu pomiarowego z uwzględnieniem kąta obrotu γ – rysunek 85. W tym celu wyznaczono wartość kąta γ dla położenia ostatniego punktu pomiarowego, a następnie korzystając z funkcji tg położenia poszczególnych punktów pomiarowych leżących na ramieniu kąta γ . Różnica pomiędzy początkowym położeniem poszczególnych punktów pomiarowych tworzących profil narzędzia a odpowiadającym im położeniem na ramieniu kąta γ umożliwiła wyznaczenie końcowego położenia punktów – rysunki 85 oraz 86.

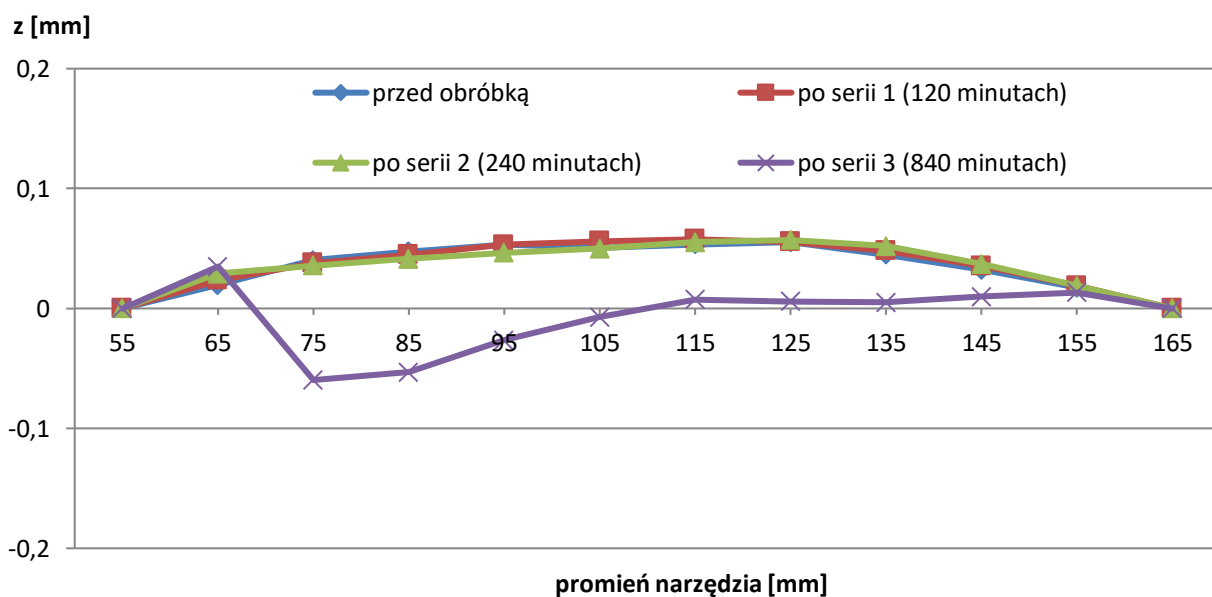


Rysunek 85. Transformacja kątowa punktów przykładowego profilu narzędzia z zaznaczonym kątem obrotu γ

a)



b)



Rysunek 86. Profile analizowanych narzędzi poddane transformacji kątowej: a) narzędzie nr 1; b) narzędzie nr 2

Przekształcone profile dla wskazanego obszaru kontaktu PO z powierzchnią tarczy docierającej umożliwiły dokładniejszą analizę kształtu narzędzi po poszczególnych seriach obróbkowych. Uzyskane rezultaty potwierdziły zwiększającą się wartość zużycia docieraków wraz z wydłużaniem czasu docierania. Ostatecznie profile tarcz docierających zaprezentowane na rysunkach 83 oraz 84 posłużyły do wyznaczenia odchyłek ich prostoliniowości.

11.2. Wyznaczanie odchyłek prostoliniowości narzędzi

Wyznaczanie odchyłek prostoliniowości narzędzi przeprowadzono metodami najmniejszych kwadratów *LSQ* (*least-squares method*) oraz *CLRS* (*control line rotation scheme*) przed oraz po określonych seriach badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej. Wykorzystanie

wskazanych metod wymagało przeprowadzenia kilku przekształceń matematycznych zgodnie z procedurą opisaną w pracy (Huang, Fan and Wu, 1993). Na przykładzie profilu tarczy docierającej uzyskanej po zakończeniu badań właściwych (po trzeciej serii – 360 minutach obróbki) zaprezentowano poszczególne etapy związane z budową modelu 1-1 na podstawie wyznaczonej linii odniesienia (trendu) oraz jego przekształceniu do modelu 2-1 – rysunek 87. Wyznaczona metodą LSQ odchyłka prostoliniowość stanowiła długość odcinka ΔD_{LSQ} łączącego górną i dolną linię kontrolną – rysunek 87a. Stworzenie modelu 2-1 wymagało obrotu górnej linii kontrolnej wokół dodatkowego punktu kontrolnego i o kąt θ_i zgodnie z regułą opisaną zależnościami (9) oraz (10):

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{E_{mu} - E_i}{L_i}\right), \quad (9)$$

$$\theta_i = \text{minimum} \{\delta_i\}, \text{ gdzie:} \quad (10)$$

θ_i – kąt obrotu górnej linii kontrolnej wokół punktu kontrolnego i ;

E_{mu} – odległość górnego punktu kontrolnego do linii odniesienia;

E_i – odległość punktu kontrolnego i do linii odniesienia;

L_i – odległość górnego punktu kontrolnego do punktu kontrolnego i ,

lub dolnej linii kontrolnej wokół dodatkowego punktu kontrolnego j o kąt θ_j zgodnie z regułą opisaną zależnościami (11) oraz (12):

$$\theta_j = \sin^{-1}\left(\frac{E_{ml} - E_j}{L_j}\right), \quad (11)$$

$$\theta_j = \text{minimum} \{\delta_j\}, \text{ gdzie:} \quad (12)$$

θ_j – kąt obrotu dolnej linii kontrolnej wokół punktu kontrolnego j ;

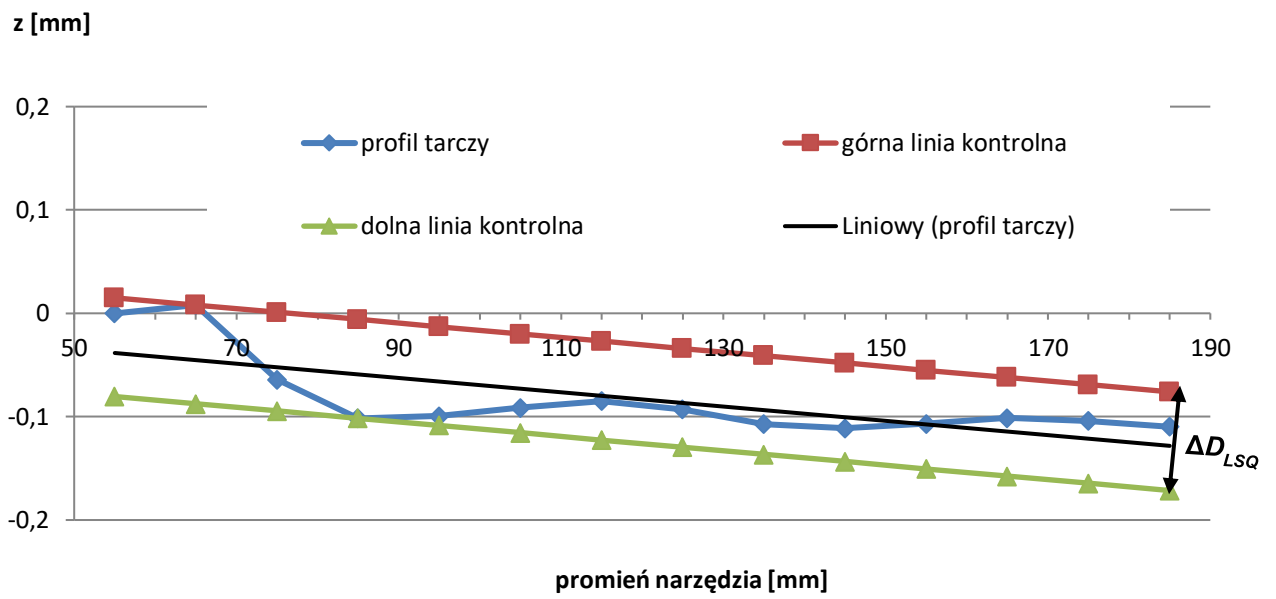
E_{ml} – odległość dolnego punktu kontrolnego do linii odniesienia;

E_j – odległość punktu kontrolnego j do linii odniesienia;

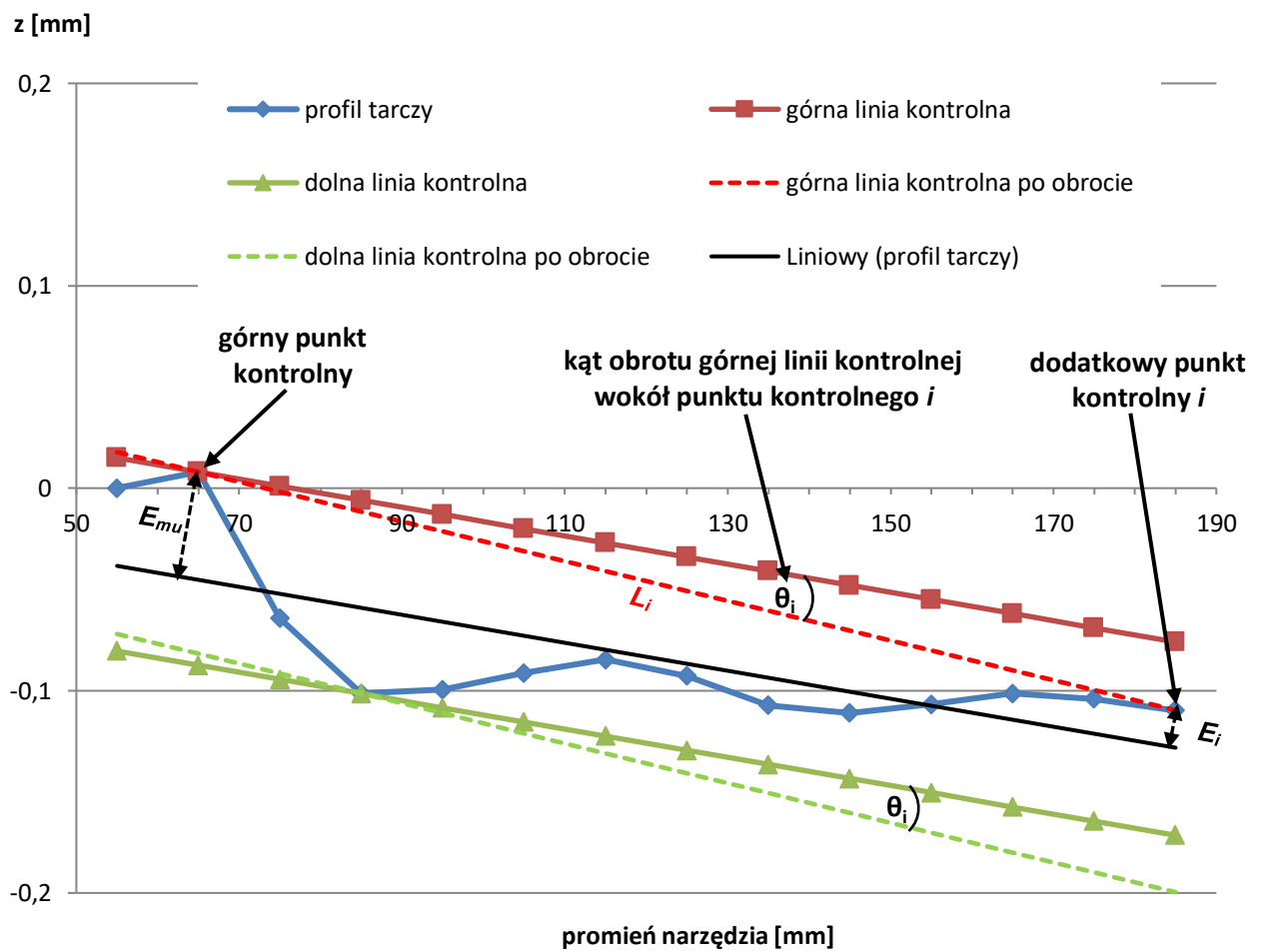
L_j – odległość dolnego punktu kontrolnego do punktu kontrolnego j .

Jednocześnie kryterium wyboru dodatkowego punktu kontrolnego i lub j stanowiła mniejsza wartość kąta θ_i lub θ_j . Na rysunku 87b zaprezentowano przekształcenie modelu 1-1 do modelu 2-1 związane z wyborem dodatkowego punktu kontrolnego i oraz obrotem linii kontrolnych o kąt θ_i . Ostatecznie wyznaczona odchyłka prostoliniowości metodą CLRS stanowi długość odcinka ΔD_{CLRS} .

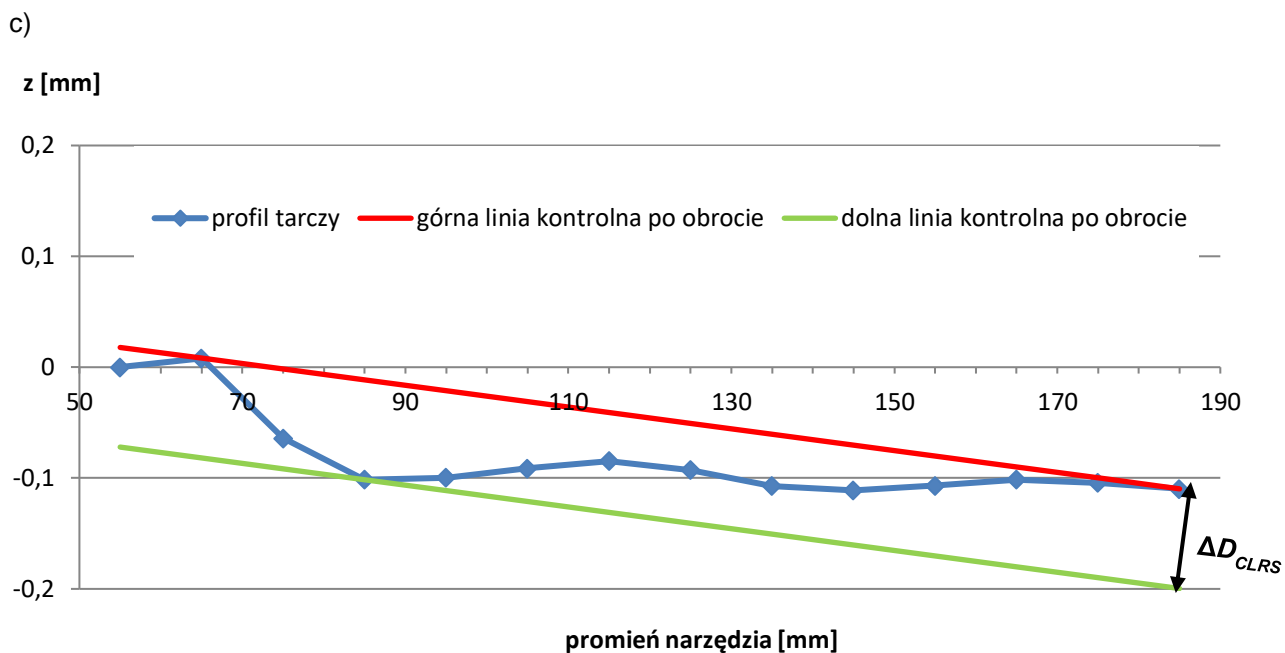
a)



b)



Rysunek 87. Procedura wyznaczania odchyłki prostoliniowości



Rysunek 87. cd. Procedura wyznaczania odchyłki prostoliniowości: a) budowa modelu 1-1 na podstawie wyznaczonej linii odniesienia (trendu); b) przekształcenie modelu 1-1 do modelu 2-1 (obrót linii kontrolnych wokół odpowiednich punktów kontrolnych zgodnie z regułą CLRS); c) wyniki końcowe

Wykaz wyznaczonych odchyłek prostoliniowości narzędzi po określonych rodzajach i seriach badań eksperymentalnych za pomocą zaprezentowanej procedury zamieszczono w tabeli 11.

Tabela 11. Odchyłki prostoliniowości płaskich powierzchni tarcz docierających wyznaczonych metodami najmniejszych kwadratów LSQ (*least-squares method*) oraz CLRS (*control line rotation scheme*)

Rodzaj badania i nr narzędzia	Stan płaskiej powierzchni narzędzia	Wartości współczynników z linii odniesienia (trendu)		R^2	Błąd prostoliniowości [mm]	
		a	b		ΔD_{LSQ}	ΔD_{CLRS}
właściwe, narzędzie nr 1	T0 – przed obróbką	-0,0015	0,0849	0,9939	0,013	0,011
	po serii 1 (120 minutach)	-0,0013	0,0494	0,9132	0,061	0,056
	po serii 2 (240 minutach)	-0,0008	0,0274	0,7829	0,071	0,064
	po serii 3 (360 minutach)	-0,0007	-0,0004	0,5504	0,095	0,090
sprawdzające /dodatkowe, narzędzie nr 2	T0 – przed obróbką	-0,001	0,1052	0,7342	0,062	0,016
	po serii 1 (120 minutach)	-0,001	0,1103	0,6954	0,077	0,051
	po serii 2 (240 minutach)	-0,001	0,1062	0,6661	0,082	0,076
	po serii wydłużonej (840 minutach)	-0,0002	0,004	0,0907	0,095	0,095

Na podstawie uzyskanych rezultatów należy stwierdzić, iż prototypowe tarcze docierające charakteryzowały się stosunkowo niewielkimi błędami prostoliniowości. W przypadku obu narzędzi wyznaczone wartości błędów w poszczególnych etapach obróbki są do siebie zbliżone, natomiast ich wartości ulegają zwiększaniu wraz z upływem czasu obróbki. Ponadto, zmniejszająca się wartość współczynnika determinacji R^2 po kolejnych seriach obróbkowych świadczy o coraz gorszym

dopasowaniu danych eksperymentalnych do wyznaczonej linii trendu, a co za tym idzie zmianie kształtu płaskiej powierzchni narzędzi. Największą odchyłkę prostoliniowości uzyskano dla wydłużonej serii badań dodatkowych wynoszącą jednak zaledwie 0,095 mm i wyznaczoną obiema metodami. Jednocześnie należy również zwrócić uwagę, iż współczynnik R^2 w przypadku wydłużonej serii pomiarowej (łączny czas obróbki wynoszący 14 h – 840 minut), charakteryzował się zdecydowanie najmniejszą wartością w porównaniu do pozostałych serii badań eksperymentalnych. Fakt ten wskazuje tym samym na najgorsze dopasowanie danych eksperymentalnych do wyznaczonej linii trendu, a co za tym idzie powstanie największych błędów kształtu narzędzia, co potwierdziły również profile tarczy zaprezentowane na rysunkach 84d oraz 86b.

12. MODELOWANIE EFEKTÓW TECHNOLOGICZNYCH DOCIERANIA

Drugą część badań eksperymentalnych stanowiła ocena wpływu wybranych i kluczowych parametrów docierania jednostronnego z zastosowaniem narzędzi wytwarzanych metodą SLS na wielkość zużycia materiałowego próbek z Al_2O_3 , a także na jakość ich powierzchni opisaną parametrami chropowatości i falistości. Badania zrealizowano stosując plan dwupoziomowy, statyczny, zdeterminowany, kompletny PS/DK 2^3 oraz wykorzystując moduł umożliwiający planowanie doświadczeń DOE (*ang. Design of Experiments*) w oprogramowaniu Statistica. Uzyskane rezultaty posłużyły w dalszym etapie do wyznaczenia modeli matematycznych wybranych efektów technologicznych.

Na podstawie wcześniej zrealizowanych badań eksperymentalnych, których rezultaty zaprezentowano w rozdziale 8, czynniki wejściowe przyjmowały wartości na poziomach górnym i dolnym:

- nacisk jednostkowy $p = x_1$: 6; 12 kPa;
- średnia prędkość docierania $v = x_2$: 0,72; 1,44 m/s;
- czas docierania $t = x_3$: 60; 120 min.

Każde z doświadczeń (łącznie $N = 2^3 = 8$) realizowano przy użyciu nowej tarczy docierającej wykonanej metodą SLS oraz nowego zestawu trzech próbek z Al_2O_3 . Z uwagi na uzyskanie zadowalających efektów obróbkowych podczas wcześniejszych badań eksperymentalnych, zdecydowano się na zastosowanie tego samego rodzaju zawiesiny ścierniej zawierającej 4 ml pasty ścierniej *SD1/0* oraz 2,5 ml luźnych ziaren diamentowych *D107*, która była nakładana również tylko jednokrotnie na powierzchnię tarczy przed rozpoczęciem danego doświadczenia, a także dawkowaniu oleju maszynowego w ilości $\dot{Q}_{lub} \approx 0,1$ ml/min. Badania zrealizowano przy zastosowaniu zmiennych parametrów docierania przyjmujących wartości graniczne na poziomach górnym „+” oraz dolnym „-” oraz zastosowaniu jednakowych i stałych wartości pozostałych czynników. Podobnie jak podczas wcześniejszych badań dokonywano pomiarów dla każdej z próbek w trzech wyznaczonych miejscach, łącznie uzyskując 9 punktów pomiarowych. Celem badań było otrzymanie adekwatnych modeli matematycznych dla poszczególnych wielkości wynikowych związanych z wartościami ubytku materiałowego masowego Δm oraz liniowego Δh , a także parametrów chropowatości R_a oraz falistości W_a , przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Ponadto dokonano oceny statystycznej efektów (oddziaływania) poszczególnych zmiennych wejściowych i ich interakcji na uzyskiwane rezultaty obróbkowe, a także oceniono i zweryfikowano wyznaczone modele matematyczne.

12.1. Efekty technologiczne docierania ceramiki technicznej Al_2O_3

Tabele 12 oraz 13 zawierają opracowaną matrycę planu PS/DK 2^3 wraz z uśrednionymi wynikami pomiarów analizowanych efektów technologicznych. Dodatkowo rezultaty uzyskane w poszczególnych eksperymentach (układach) zaprezentowano na rysunku 88.

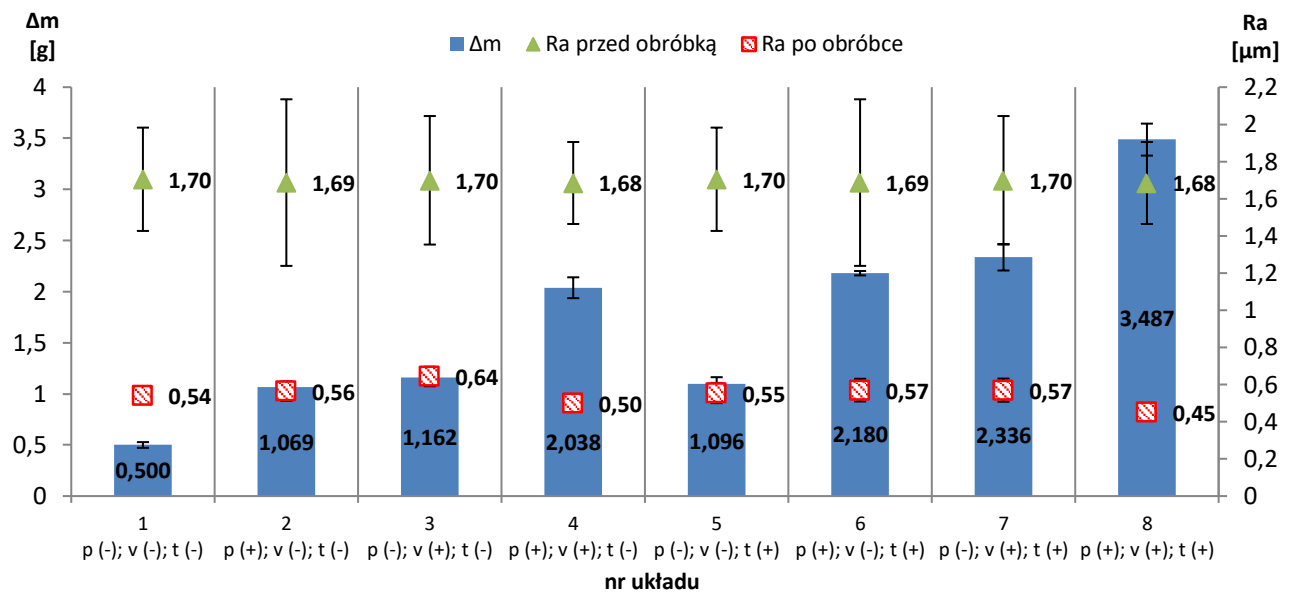
Tabela 12. Matryca planu PS/DK 2³ wraz z uśrednionymi wynikami pomiarów rezultatów technologicznych

Nr eksperymentu (układu)	Zmienna wejściowa			Wielkość wyjściowa			
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]	Δm [g]	Δh [mm]	Ra [μm]	Wa [μm]
1	6 poziom dolny (-)	0,72 poziom dolny (-)	60 poziom dolny (-)	0,5	0,165	0,54	0,31
2	12 poziom górny (+)	0,72 poziom dolny (-)	60 poziom dolny (-)	1,069	0,343	0,56	0,27
3	6 poziom dolny (-)	1,44 poziom górny (+)	60 poziom dolny (-)	1,162	0,375	0,64	0,33
4	12 poziom górny (+)	1,44 poziom górny (+)	60 poziom dolny (-)	2,038	0,639	0,5	0,37
5	6 poziom dolny (-)	0,72 poziom dolny (-)	120 poziom górny (+)	1,096	0,351	0,55	0,32
6	12 poziom górny (+)	0,72 poziom dolny (-)	120 poziom górny (+)	2,18	0,682	0,57	0,22
7	6 poziom dolny (-)	1,44 poziom górny (+)	120 poziom górny (+)	2,336	0,732	0,57	0,21
8	12 poziom górny (+)	1,44 poziom górny (+)	120 poziom górny (+)	3,487	1,071	0,45	0,47

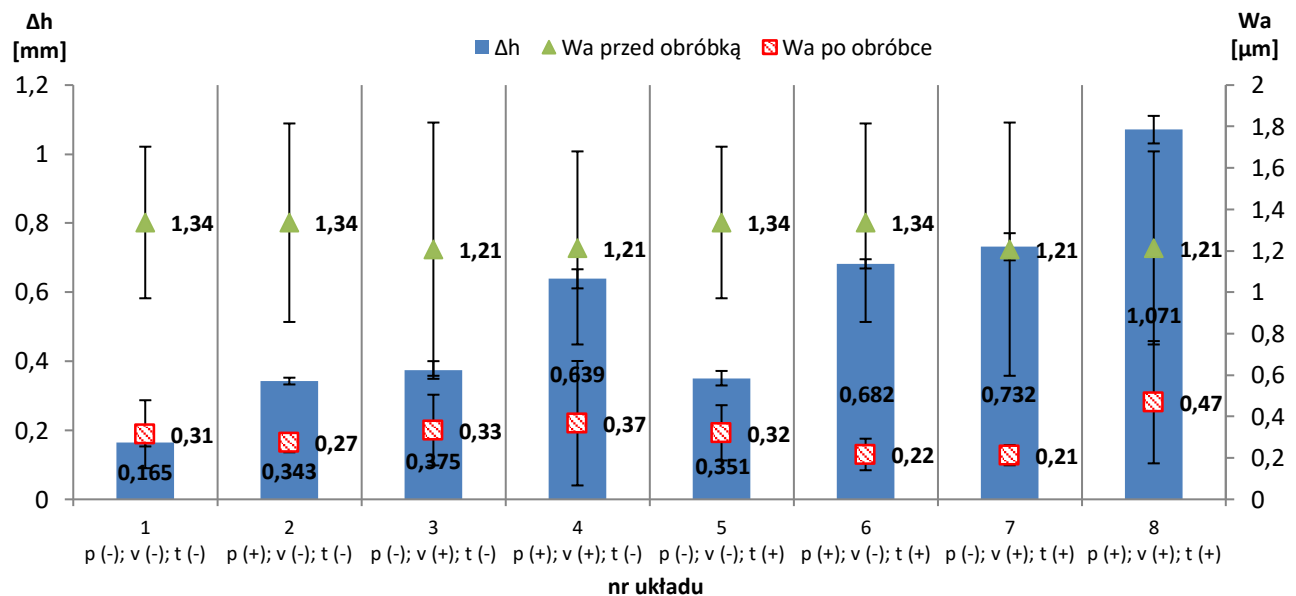
Tabela 13. Matryca planu PS/DK 2³ wygenerowana z wykorzystaniem modułu DOE w programie Statistica

Standard Układ	Plan: 2**(3-0) plan (Arkusz1)						
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]	Δm [g]	Δh [mm]	Ra [μm]	Wa [μm]
1	6	0,72	60	0,5	0,165	0,54	0,31
2	12	0,72	60	1,069	0,343	0,56	0,27
3	6	1,44	60	1,162	0,375	0,64	0,33
4	12	1,44	60	2,038	0,639	0,5	0,37
5	6	0,72	120	1,096	0,351	0,55	0,32
6	12	0,72	120	2,18	0,682	0,57	0,22
7	6	1,44	120	2,336	0,732	0,57	0,21
8	12	1,44	120	3,487	1,071	0,45	0,47

a)



b)

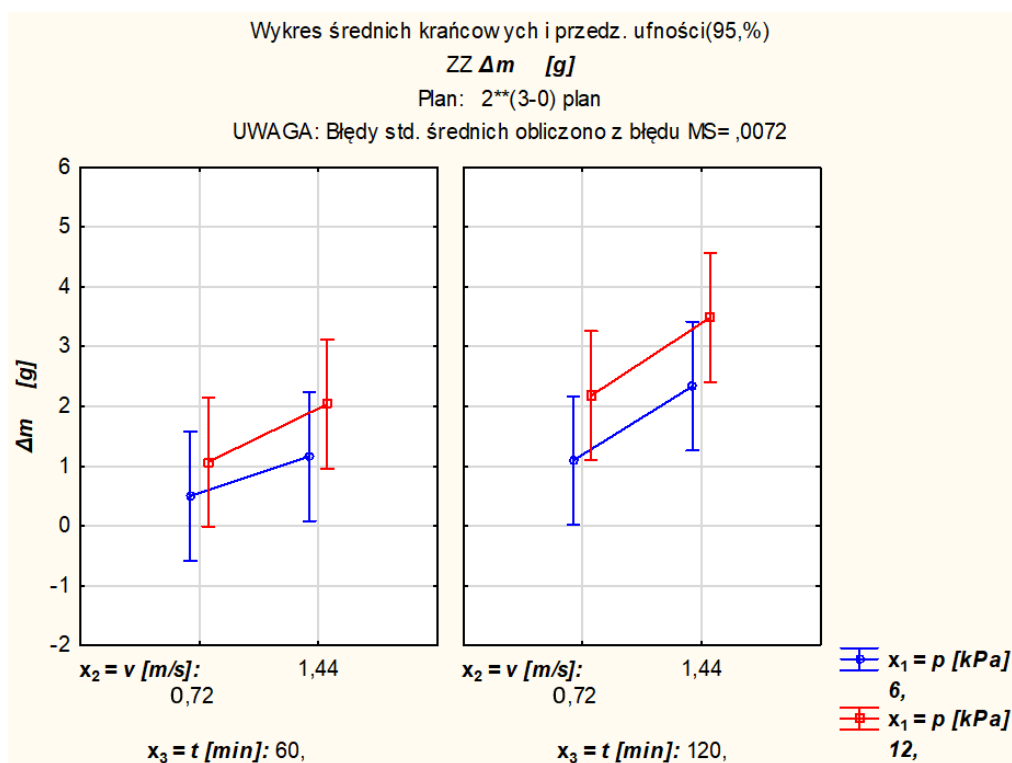


Rysunek 88. Efekty technologiczne uzyskane w poszczególnych układach badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej: a) masowy ubytek materiałowy Δm oraz chropowatość powierzchni Ra; b) liniowy ubytek materiałowy Δh oraz falistość powierzchni Wa

Każde z przeprowadzonych badań eksperymentalnych charakteryzowało się stabilnym przebiegiem procesu obróbki. Zgodnie z oczekiwaniami zdecydowanie największą wartość ubytku materiałowego uzyskano dla górnych poziomów (+) zmiennych wejściowych. Jednocześnie według równania Prestona (1), które zaprezentowano w podrozdziale 8.1., zwiększanie wartości nacisku jednostkowego, prędkości obróbki, a także wydłużanie czasu obróbki wpływało na wzrost ubytku materiałowego – rysunek 88. W wyniku przeprowadzonych procesów docierania uzyskano również wyraźne zmniejszenie wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni próbek z Al_2O_3 . W związku z uzyskaniem zbliżonych rezultatów pomiarów chropowatości i falistości powierzchni PO przed rozpoczęciem procesu obróbki dla poszczególnych układów, przyjęto stałą początkową wartość

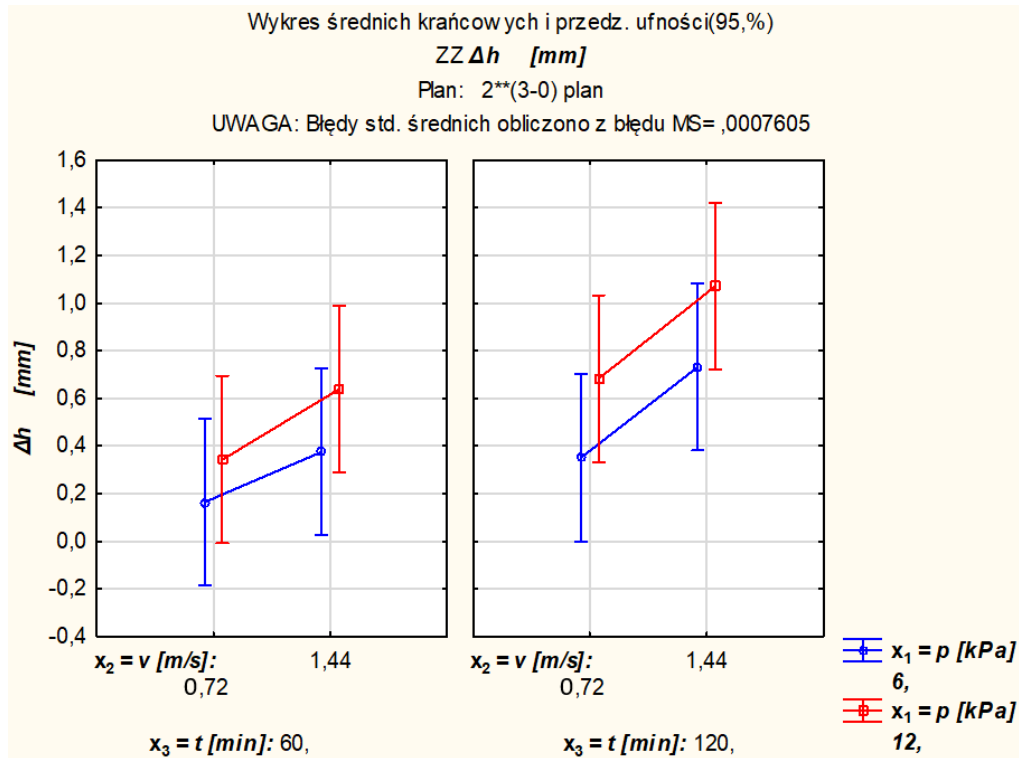
średnią wynoszącą kolejno $Ra = 1,69 \mu\text{m}$ oraz $Wa = 1,28 \mu\text{m}$. W przeciwieństwie do wartości ubytku materiałowego zmiana poszczególnych poziomów zmiennych wejściowych nie wpłynęła na powstanie wyraźnych różnic w wartościach końcowych parametrów chropowatości Ra i falistości Wa – rysunek 88. Przyjęty zestaw parametrów dla układu nr 8 umożliwił uzyskanie najniższej wartości parametru Ra oraz jednocześnie zwiększenie falistości powierzchni w stosunku do poprzednich układów. Wysokie wartości parametrów kinematycznych oraz nacisku jednostkowego wpłynęły na zwiększone zużycie tarczy docierającej co doprowadziło do powstania błędów kształtu narzędzia, a tym samym obrabianych próbek. Ostatecznie na rysunkach 89 oraz 90 zaprezentowano standardowe wykresy interakcji w postaci średnich krańcowych dla poszczególnych wielkości wyjściowych.

a)



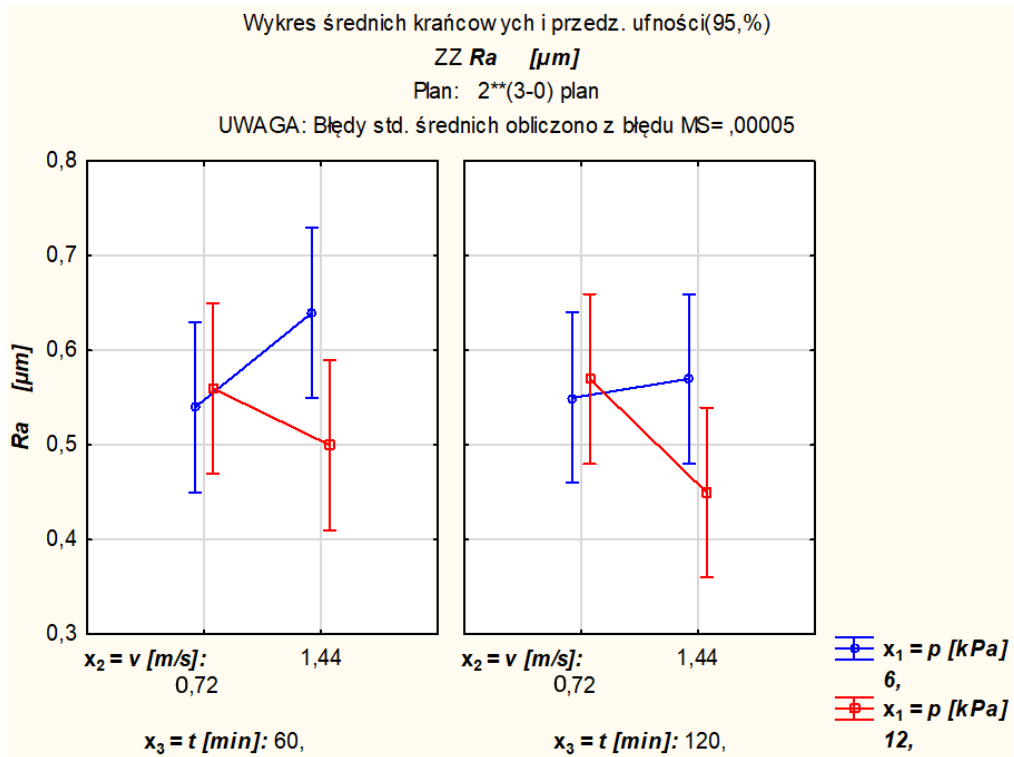
Rysunek 89. Wykresy interakcji dla ubytku materiałowego

b)



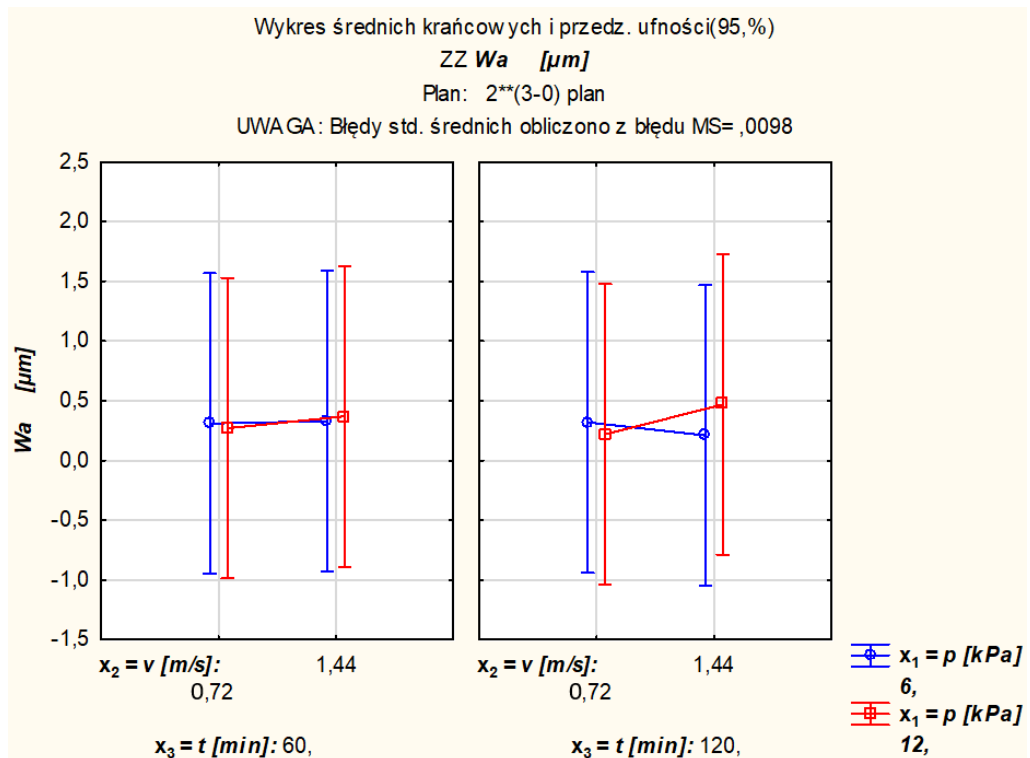
Rysunek 89. cd. Wykresy interakcji dla ubytku materiałowego: a) masowego Δm ; b) liniowego Δh

a)



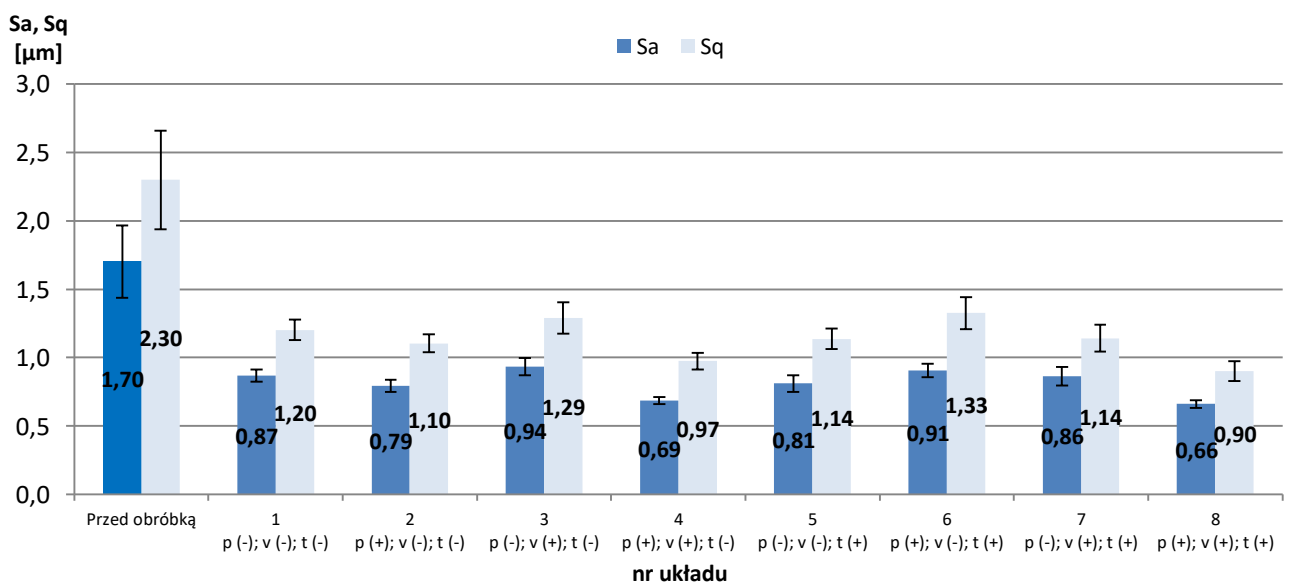
Rysunek 90. Wykresy interakcji dla parametrów chropowatości i falistości powierzchni

b)

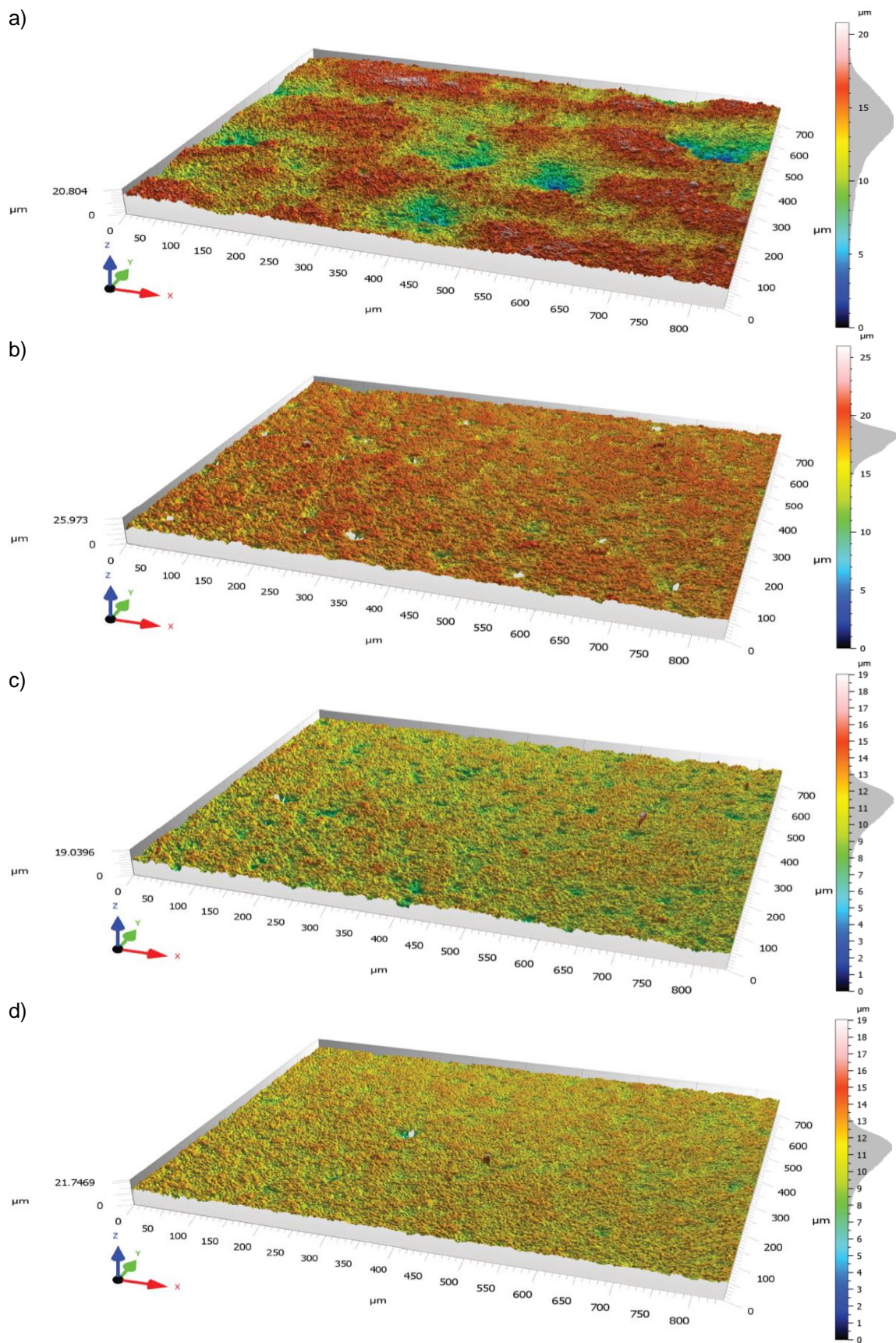


Rysunek 90. cd. Wykresy interakcji dla parametrów chropowatości i falistości powierzchni: a) Ra; b) Wa

Dodatkowo przeprowadzona analiza struktury geometrycznej powierzchni próbek w układzie 3D wskazała na wyraźne wygładzenie powierzchni, co potwierdzają wartości parametrów Sa i Sq oraz wybrane topografie powierzchni zaprezentowane kolejno na rysunkach 91 oraz 92. Podobnie jak podczas analizy 2D, zestaw parametrów przyjętych dla układu nr 8 umożliwił uzyskanie powierzchni o najmniejszych wartościach parametrów wynoszących Sa = 0,66 μm, Sq = 0,90 μm oraz największym wygładzeniu w stosunku do pozostałych eksperymentów.



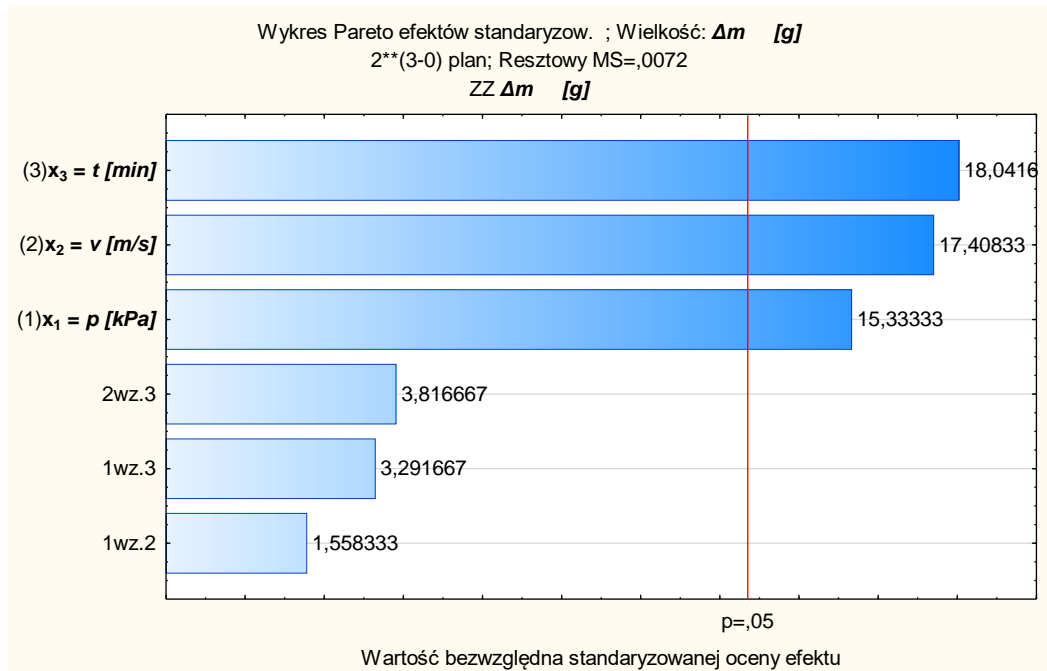
Rysunek 91. Wartości średnie parametrów wysokościowych Sa oraz Sq w poszczególnych układach badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej



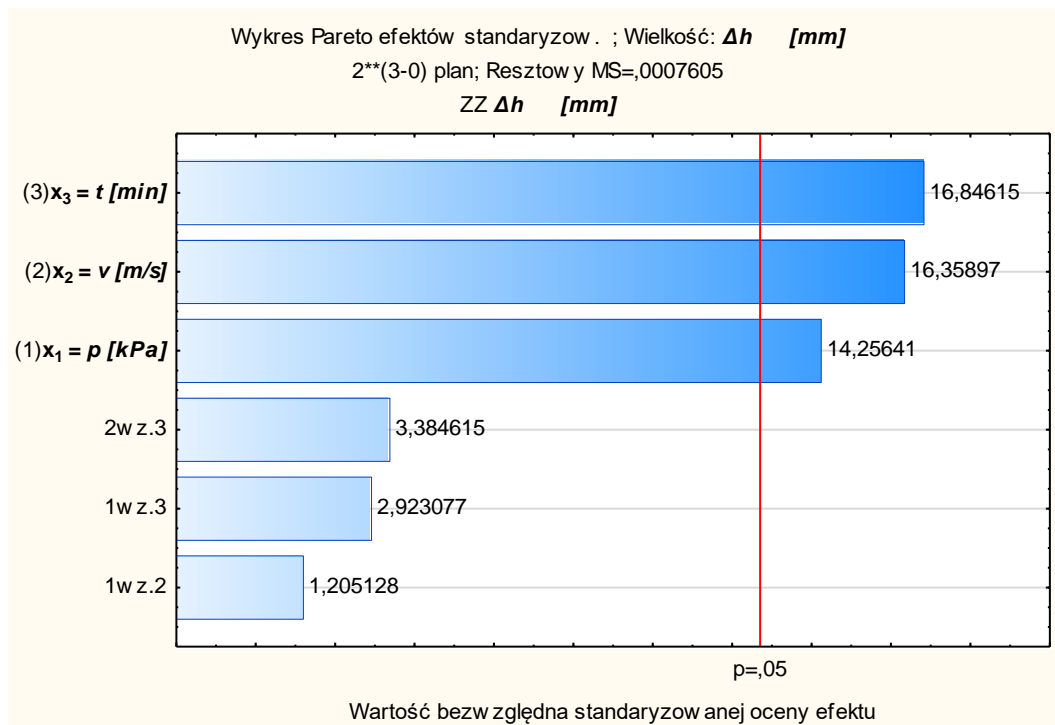
Rysunek 92. Wybrane topografie powierzchni próbek z Al_2O_3 : a) próbka surowa (przed obróbką); b) układ nr 6; c) układ nr 7; d) układ nr 8

Kolejny etap analizy stanowiła ocena istotności statystycznej oddziaływania zmiennych wejściowych (efektów głównych) oraz ich interakcji na badane wielkości wyjściowe. Uzyskane rezultaty zaprezentowano w formie graficznej za pośrednictwem wykresów Pareto – rysunki 93 oraz 94.

a)

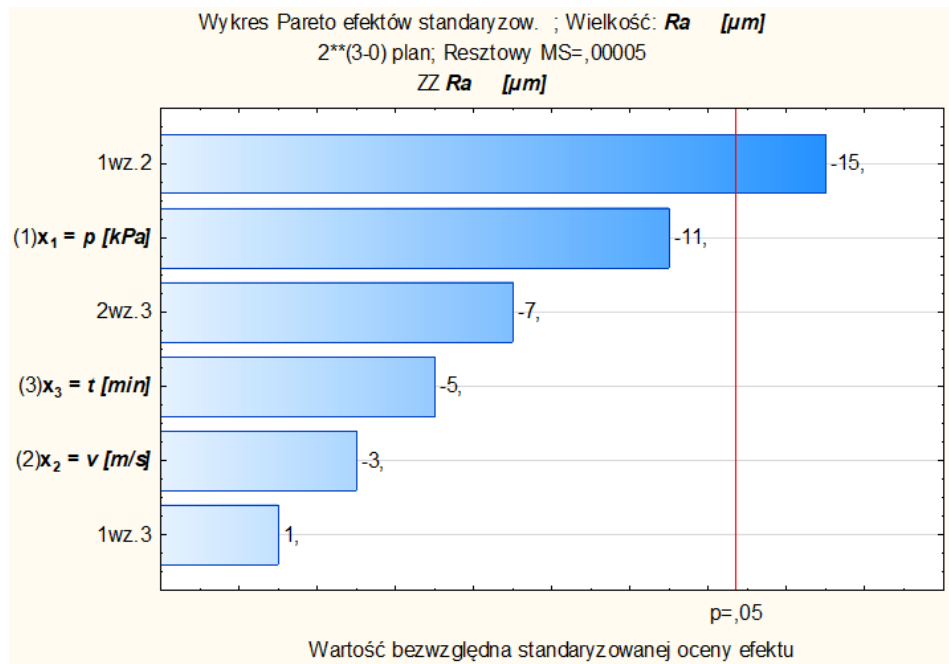


b)

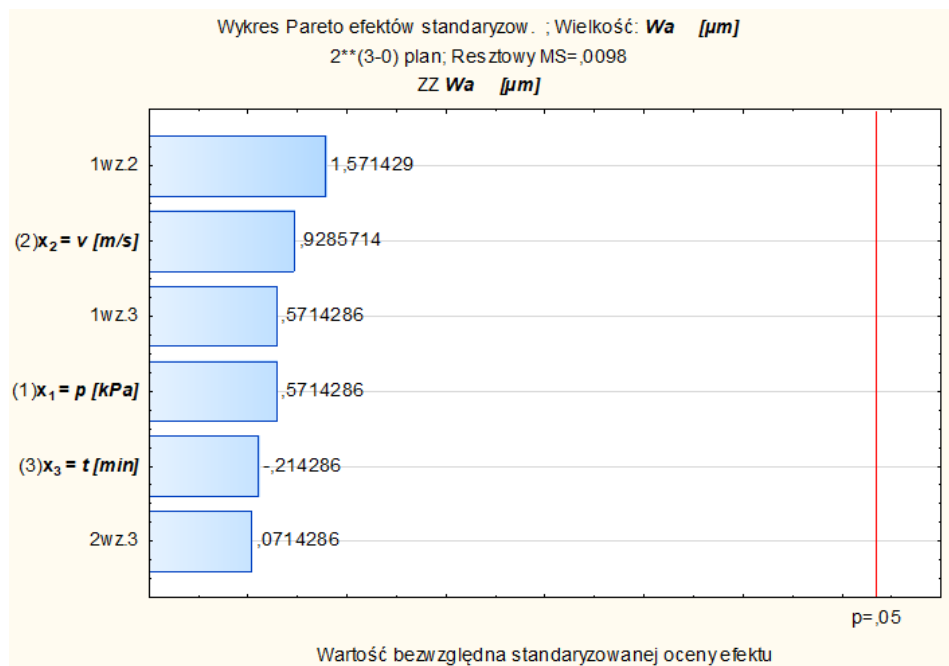


Rysunek 93. Wykresy Pareto efektów standaryzowanych wielkości wejściowych i ich interakcji dla ubytku materiałowego: a) masowego Δm ; b) liniowego Δh

a)



b)



Rysunek 94. Wykresy Pareto efektów standaryzowanych wielkości wejściowych i ich interakcji dla parametrów chropowatości i falistości powierzchni: a) Ra; b) Wa

Na każdym z wykresów pionową linią oznaczono wartość krytyczną testu t oceny istotności statystycznej efektów oddziaływania poszczególnych czynników na zmienne wyjściowe. Przekroczenie tej linii oznacza statystycznie istotny wpływ na przyjętym poziomie ufności wynoszącym 95%. W przypadku wielkości ubytków materiałowych masowego Δm oraz liniowego Δh tylko efekty główne wpływały istotnie na uzyskane rezultaty. Z kolei interakcja nacisku jednostkowego p oraz prędkości docierania v oddziaływała istotnie na wartość parametru chropowatości Ra przy

jednoczesnym stosunkowo wyraźnym wpływie samego nacisku jednostkowego p . Przeprowadzona analiza wskazała również na brak istotnie statystycznego wpływu poszczególnych czynników oraz ich interakcji na wartość parametru W_a . Tym samym na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż zmiana poszczególnych wielkości wejściowych (efektów głównych) wpływała istotnie na wartość ubytku materiałowego przy jednoczesnym braku istotności na wartości końcowe parametrów R_a oraz W_a .

12.2. Modele matematyczne analizowanych efektów technologicznych

Wykorzystanie modułu planowania doświadczeń DOE umożliwiło również wyznaczenie modeli matematycznych analizowanych wielkości wyjściowych. Wszystkie niezbędne obliczenia przeprowadzono w programie Statistica. Z uwagi na zastosowanie planu dwuwartościowego założono liniowy charakter wpływu wielkości wejściowych na uzyskane rezultaty obróbkowe. W związku z tym modele matematyczne stanowią funkcje trzech zmiennych w postaci: $y = f(p, v, t)$. Wcześniejsza analiza statystyczna wskazała na istotny wpływ efektów głównych oraz pomijalny wpływ ich interakcji dla ubytków materiałowych oraz wyłącznie statystycznie istotny wpływ interakcji nacisku jednostkowego oraz prędkości skrawania dla parametru R_a . W związku z tym w modelach matematycznych dla ubytków materiałowych pominięto człony interakcyjne, natomiast w przypadku parametru R_a uwzględniono wyłącznie interakcję dwóch czynników. Wyznaczone współczynniki regresji dla modeli matematycznych poszczególnych wielkości wyjściowych zaprezentowano w tabelach 14, 15 oraz 16.

Tabela 14. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu matematycznego (regresyjnego) masowego ubytku materiałowego Δm

Współcz. regresji ; Zmn. Δm [g]; $R^2=,9677$; Popr.,94347 (Plan: 2**(3-0) plan (Arkuszy1) w plan PS,DK.stw) 2**(3-0) plan; Resztowy MS=,0518947 ZZ Δm [g]						
Wejśc.	Regresji Wsp.	Błąd std	t(4)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	-2,83700	0,426183	-6,65677	0,002645	-4,02027	-1,65373
(1) $x_1 = p$ [kPa]	0,15333	0,026847	5,71138	0,004648	0,07879	0,22787
(2) $x_2 = v$ [m/s]	1,45069	0,223725	6,48428	0,002916	0,82953	2,07185
(3) $x_3 = t$ [min]	0,01804	0,002685	6,72018	0,002553	0,01059	0,02550

Tabela 15. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu matematycznego (regresyjnego) liniowego ubytku materiałowego Δh

Współcz. regresji ; Zmn. Δh [mm]; $R^2=,97111$; Popr.,94944 (Plan: 2**(3-0) plan (Arkuszy1) w plan PS,DK.stw) 2**(3-0) plan; Resztowy MS=,0042687 ZZ Δh [mm]						
Wejśc.	Regresji Wsp.	Błąd std	t(4)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	-0,843500	0,122232	-6,90082	0,002312	-1,18287	-0,504130
(1) $x_1 = p$ [kPa]	0,046333	0,007700	6,01741	0,003842	0,02496	0,067712
(2) $x_2 = v$ [m/s]	0,443056	0,064166	6,90487	0,002307	0,26490	0,621208
(3) $x_3 = t$ [min]	0,005475	0,000770	7,11050	0,002067	0,00334	0,007613

Tabela 16. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu matematycznego (regresyjnego) parametru chropowatości R_a

Współcz. regresji ; Zmn.: R_a [μm]; $R^2=,39675$; Popr.,29621 (Plan: 2**(3-0) plan (Arkuszy1) w plan PS,DK.stw) 2**(3-0) plan; Resztowy MS=,0021667 ZZ R_a [μm]						
Wejśc.	Regresji Wsp.	Błąd std	t(6)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	0,615000	0,037755	16,28924	0,000003	0,522617	0,707383
1 wz.2	-0,006944	0,003496	-1,98649	0,094173	-0,015498	0,001610

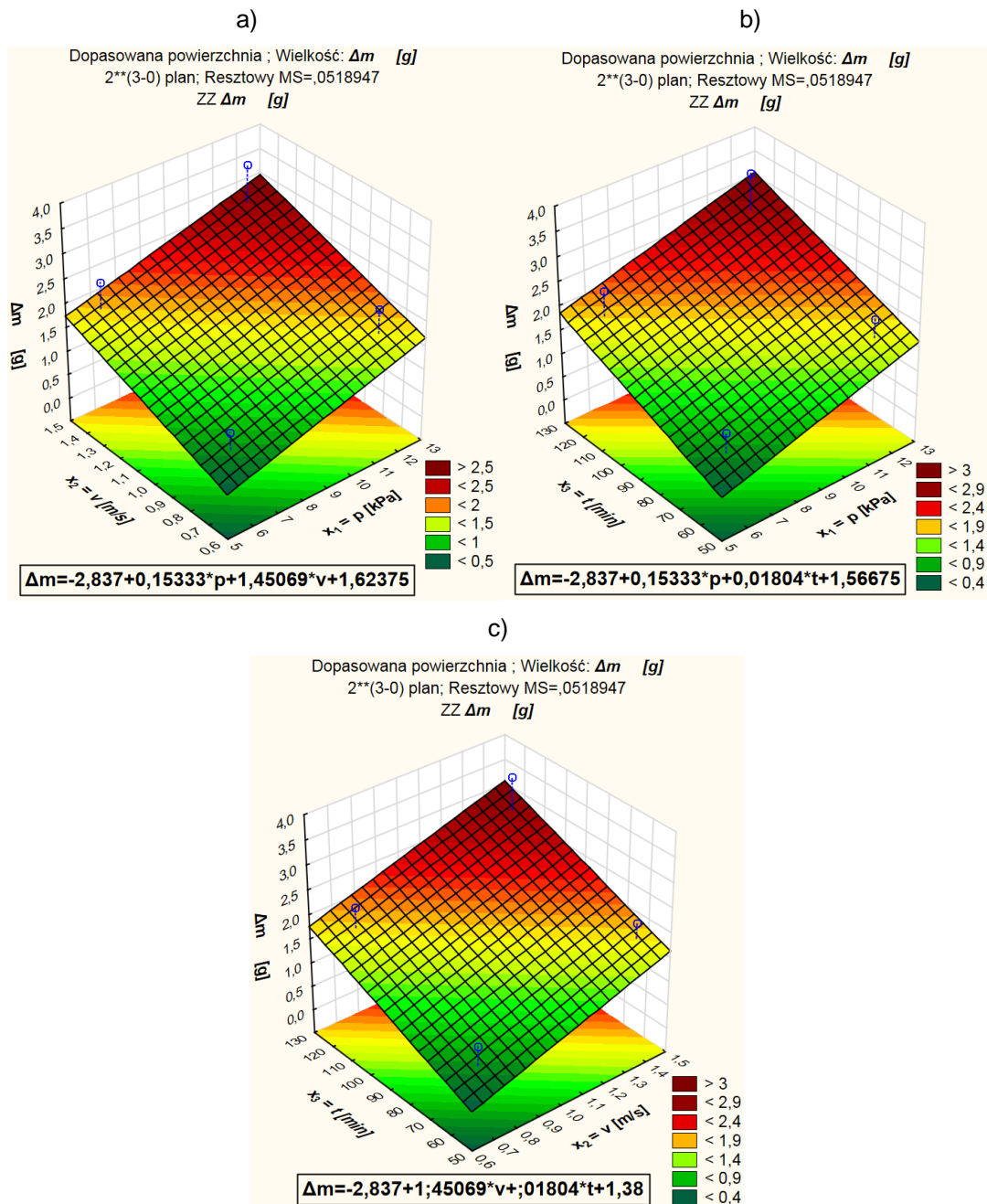
Wszystkie współczynniki modelu, zarówno dla masowego Δm jak również liniowego Δh ubytku materiałowego, są istotne. Ostatecznie wyznaczone modele matematyczne (funkcje regresji) przyjmują postać:

$$\Delta m = -2,837 + 0,15333*p + 1,45069*v + 0,01804*t \quad (13)$$

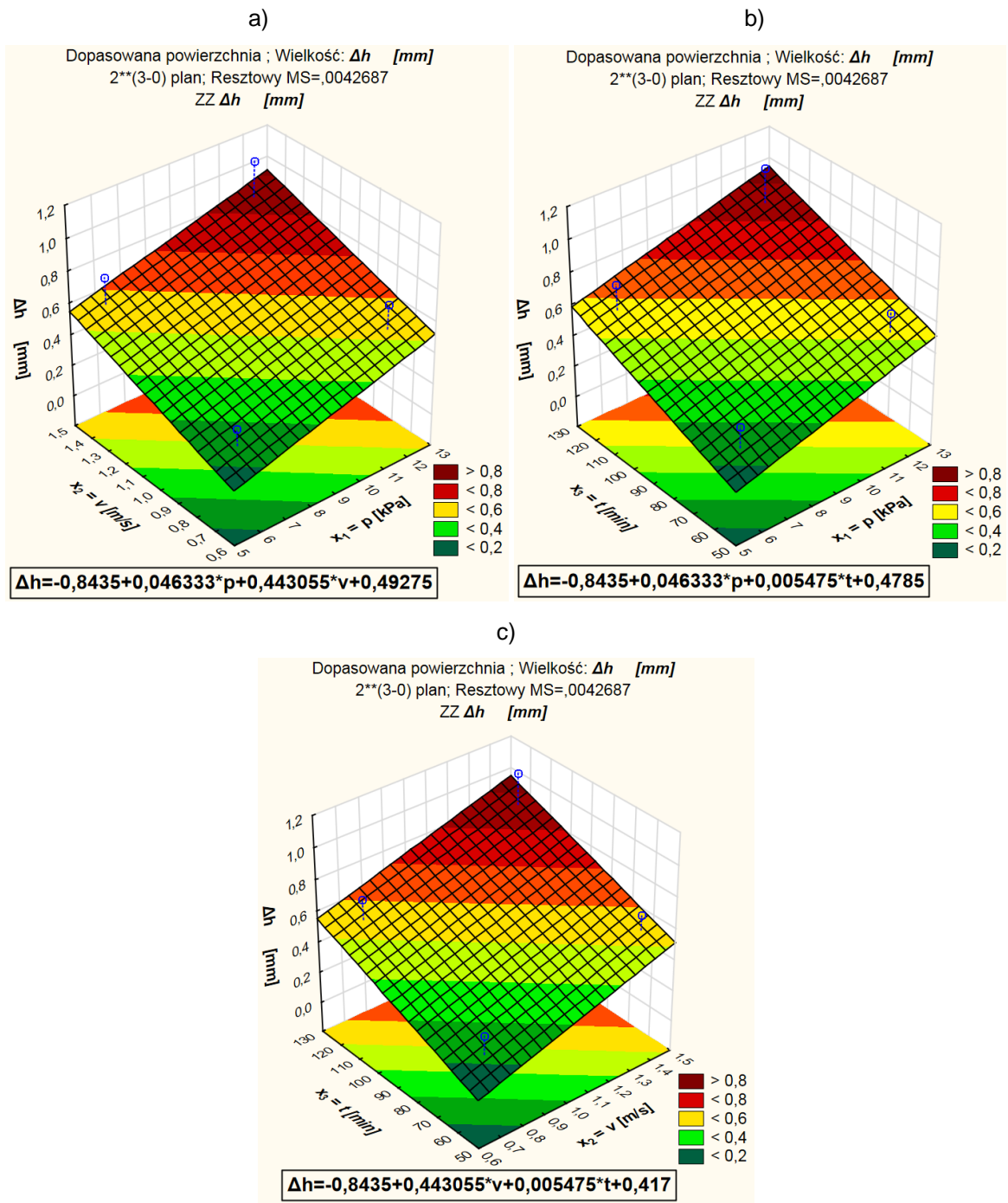
$$\Delta h = -0,8435 + 0,046333*p + 0,443056*v + 0,005475*t \quad (14)$$

$$Ra = 0,615 - 0,006944*p*v \quad (15)$$

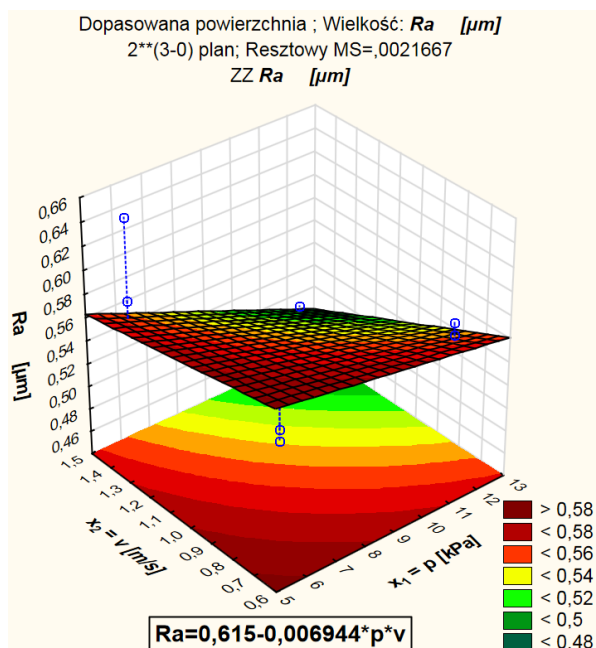
Każdy z modeli przedstawiono również na wykresie jako powierzchnię odpowiedzi przy stałej wartości określonej zmiennej oraz wzorem dopasowanej funkcji – rysunki 95, 96 oraz 97.



Rysunek 95. Powierzchnie odpowiedzi dla masowego ubytku materiałowego Δm : a) stała wartość zmiennej $x_3 = t = 90$ min; b) stała wartość zmiennej $x_2 = v = 1,08$ m/s; c) stała wartość zmiennej $x_1 = p = 9$ kPa



Rysunek 96. Powierzchnie odpowiedzi dla liniowego ubytku materiałowego Δh : a) stała wartość zmiennej $x_3 = t = 90 \text{ min}$; b) stała wartość zmiennej $x_2 = v = 1,08 \text{ m/s}$; c) stała wartość zmiennej $x_1 = p = 9 \text{ kPa}$



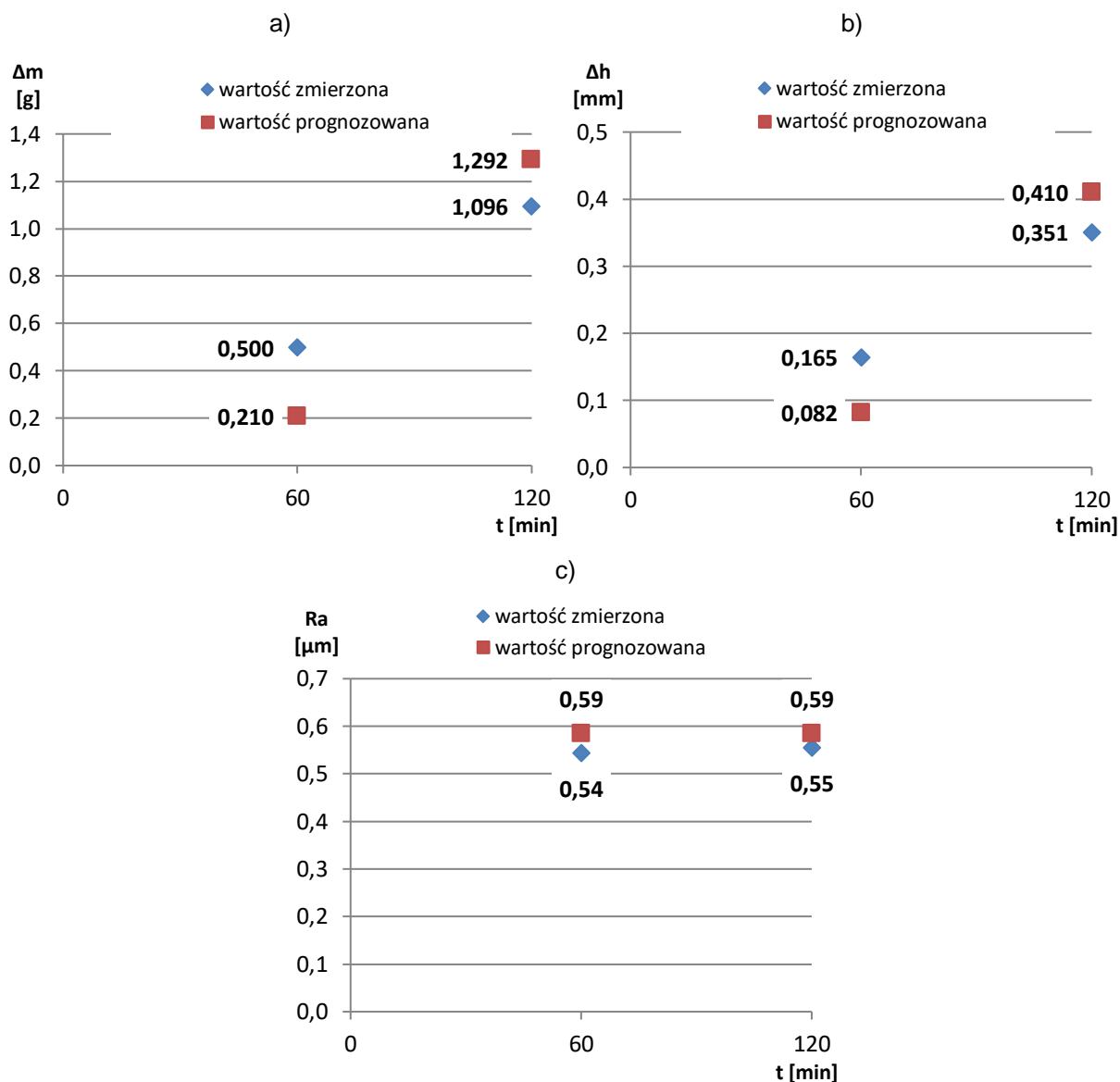
Rysunek 97. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru chropowatości powierzchni Ra

12.3. Ocena i walidacja modeli matematycznych

Ostatni etap badań stanowiły ocena i walidacja wyznaczonych modeli matematycznych analizowanych efektów technologicznych. W tym celu wyniki pomiarów z kolejnych układów badań eksperymentalnych porównywano z wartościami prognozowanymi obliczonymi przy użyciu modeli matematycznych. Jakość dopasowania poszczególnych funkcji liniowych do danych eksperymentalnych oceniano przy użyciu współczynnika determinacji R^2 . Ostatecznie wyznaczono błędy bezwzględne Δy oraz względne δ , a także pierwiastki błędów średniokwadratowych $RMSE$ pomiędzy wartościami zmierzonymi a prognozowanymi wyznaczonymi z modeli matematycznych i zgodnie ze wzorami podanymi w podrozdziale 10.1. Porównanie wyników dla poszczególnych wielkości wyjściowych zaprezentowano w tabelach 17, 18, 19 i 20 oraz na rysunkach 98, 99, 100 oraz 101.

Tabela 17. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)

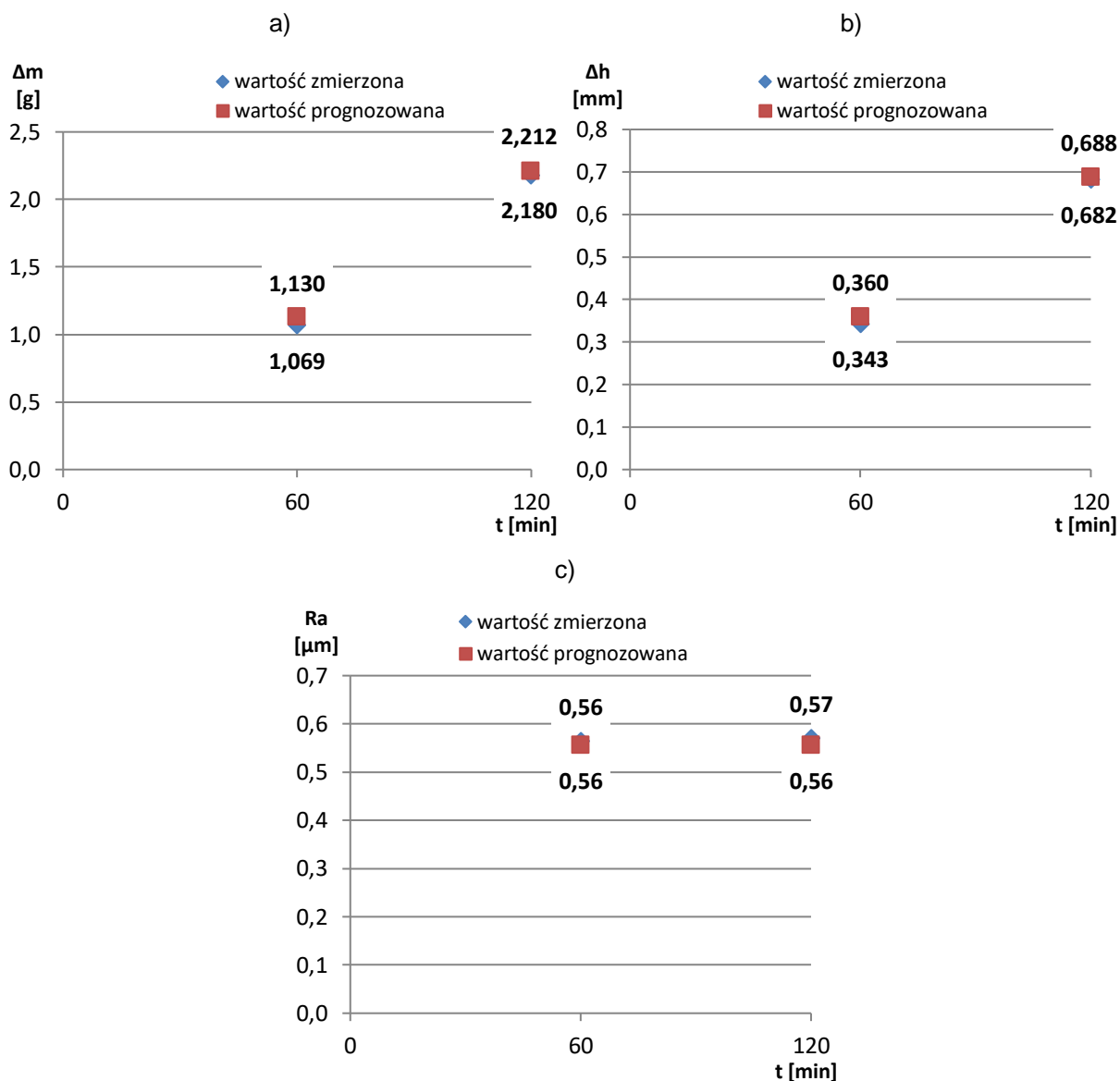
Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/ mm/ μm]	δ [%]	$RMSE$ [g/ mm/ μm]
Δm	6	0,72	60	0,500	0,210	0,97	0,290	58,025	0,097
			120	1,096	1,292		0,197	17,944	0,066
Δh	6	0,72	60	0,165	0,082	0,97	0,083	50,203	0,028
			120	0,351	0,410		0,060	16,988	0,020
Ra	6	0,72	60	0,54	0,59	0,40	0,042	7,669	0,014
			120	0,55	0,59		0,031	5,511	0,010



Rysunek 98. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Tabela 18. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)

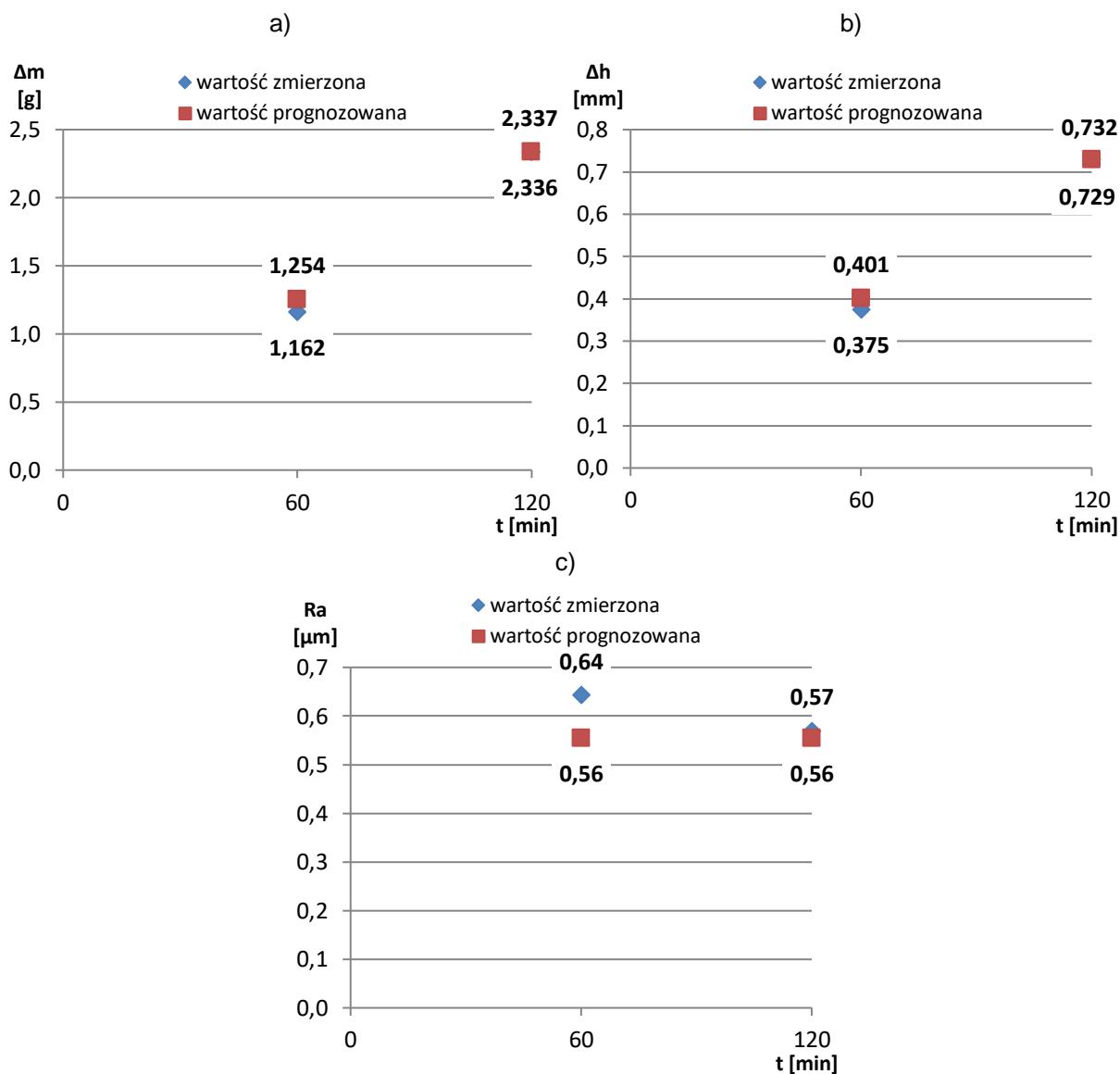
Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/ μ m]	δ [%]	RMSE [g/mm/ μ m]
Δm	12	0,72	60	1,069	1,130	0,97	0,061	5,726	0,020
			120	2,180	2,212		0,032	1,464	0,011
Δh	12	0,72	60	0,343	0,360	0,97	0,017	5,091	0,006
			120	0,682	0,688		0,006	0,936	0,002
Ra	12	0,72	60	0,56	0,56	0,40	0,009	1,673	0,003
			120	0,57	0,56		0,015	2,631	0,005



Rysunek 99. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Tabela 19. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny)

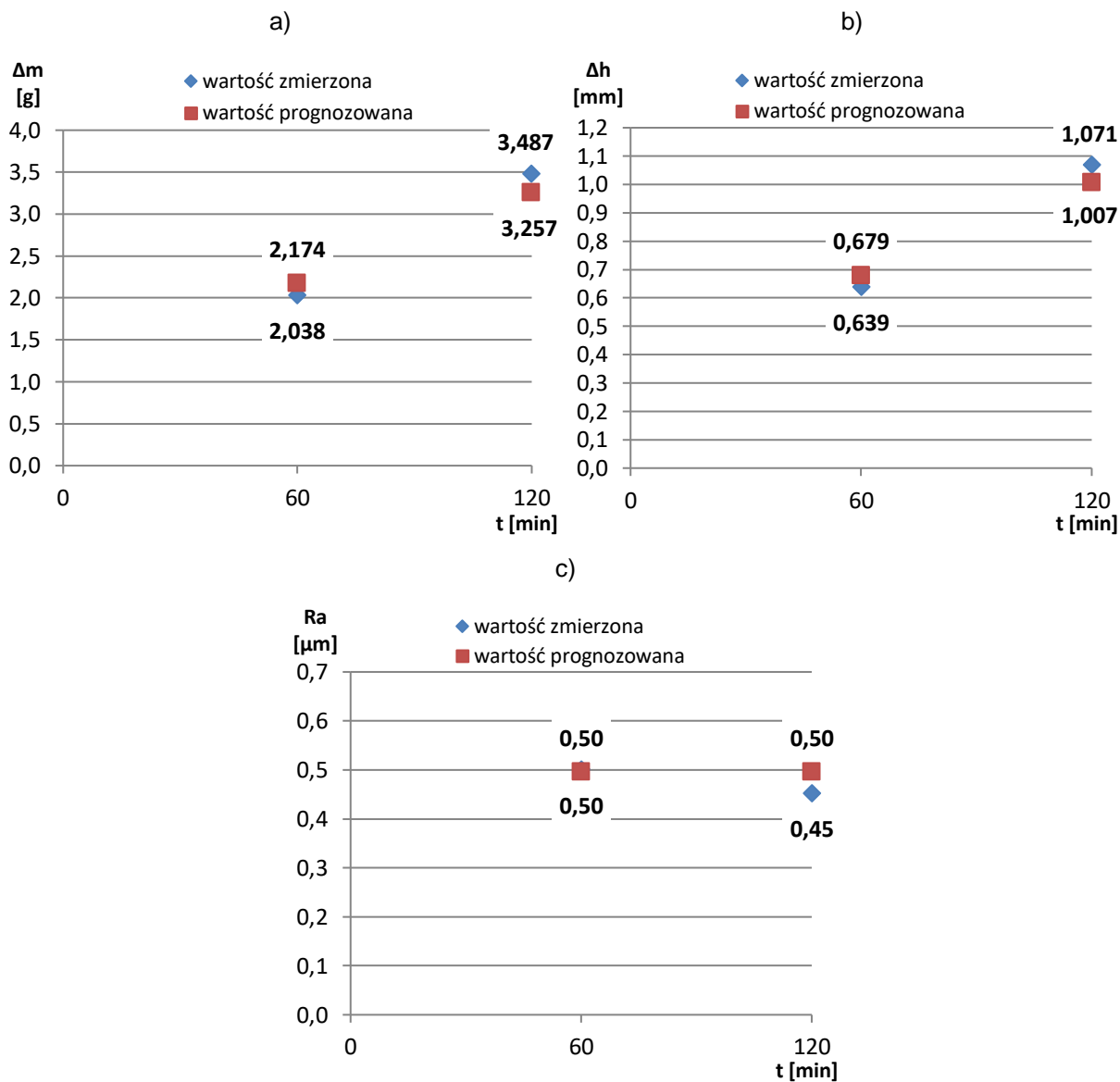
Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$X_1 = p$ [kPa]	$X_2 = v$ [m/s]	$X_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/ μm]	δ [%]	RMSE [g/mm/ μm]
Δm	6	1,44	60	1,162	1,254	0,97	0,093	7,981	0,031
			120	2,336	2,337		0,0004	0,019	0,0001
Δh	6	1,44	60	0,375	0,401	0,97	0,026	7,028	0,009
			120	0,732	0,729		0,002	0,296	0,001
Ra	6	1,44	60	0,64	0,56	0,40	0,088	13,730	0,029
			120	0,57	0,56		0,015	2,631	0,005



Rysunek 100. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Tabela 20. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny)

Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/ μ m]	δ [%]	RMSE [g/mm/ μ m]
Δm	12	1,44	60	2,038	2,174	0,97	0,136	6,691	0,045
			120	3,487	3,257		0,230	6,603	0,077
Δh	12	1,44	60	0,639	0,679	0,97	0,040	6,296	0,013
			120	1,071	1,007		0,063	5,920	0,021
Ra	12	1,44	60	0,50	0,50	0,40	0,005	0,998	0,002
			120	0,45	0,50		0,043	9,461	0,014



Rysunek 101. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

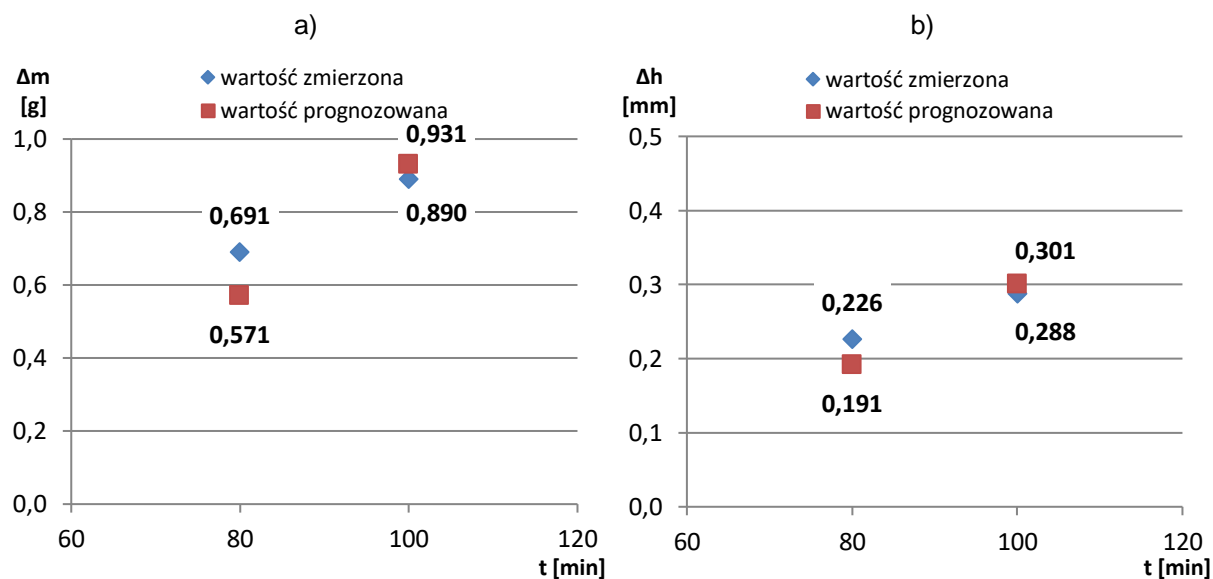
Przeprowadzona ocena modeli matematycznych przy użyciu wybranych wskaźników wskazała na wystąpienie stosunkowo niewielkich różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi a prognozowanymi. W przypadku ubytków materiałowych wartość współczynnika determinacji $R^2 = 0,97$ świadczy o tym, iż wyznaczone modele matematyczne wyjaśniają 97% zmienności wyników. Największe różnice wystąpiły dla dolnych poziomów wielkości wejściowych – rysunek 98, co związane było z mechanizmem zbrojenia narzędzia. Stosunkowo niskie parametry procesu oraz czas obróbki nie powodowały efektywnego zbrojenia narzędzia w ziarna diamentowe, wskazując tym samym na dominujący wpływ docierania 3-częściowego. Jednocześnie wartości analizowanych błędów ulegały znacznemu zmniejszeniu dla kolejnych układów – rysunki 99, 100 oraz 101, co świadczy o dobrym dopasowaniu modelu do danych eksperymentalnych. Zwiększanie wartości nacisku i prędkości skrawania wpływało na intensywniejsze wbijanie ziaren diamentowych w strukturę narzędzia, co w konsekwencji umożliwiało efektywne skrawanie, podobnie jak podczas szlifowania. Dla porównania

wartość współczynnika R^2 w przypadku modelu parametru chropowatości Ra jest znacznie niższa, czego przyczyną jest uwzględnienie w funkcji regresji tylko jednej statystycznie istotnej interakcji oraz odrzucenie pozostałych efektów głównych i ich interakcji. Pomimo tego wartości zmierzone są mocno zbliżone do tych obliczonych przy użyciu wyznaczonego modelu.

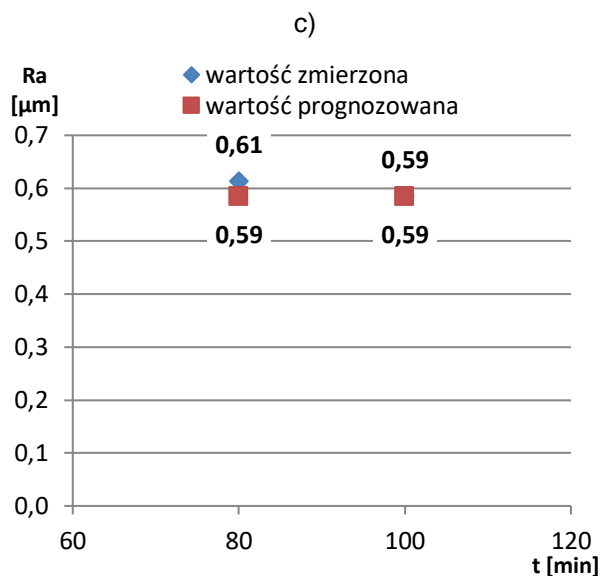
Do walidacji modeli matematycznych wykorzystano dodatkowe dane uzyskane w wyniku pomiarów realizowanych po 80 oraz 100 minutach obróbki. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabelach 21, 22, 23 i 24 oraz na rysunkach 102, 103, 104 oraz 105.

Tabela 21. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)

Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/ μ m]	δ [%]	RMSE [g/mm/ μ m]
Δm	6	0,72	80	0,691	0,571	0,97	0,120	17,413	0,040
			100	0,890	0,931		0,042	4,700	0,014
Δh	6	0,72	80	0,226	0,191	0,97	0,035	15,391	0,012
			100	0,288	0,301		0,013	4,513	0,004
Ra	6	0,72	80	0,61	0,59	0,40	0,028	4,619	0,009
			100	0,59	0,59		0,001	0,095	0,0002



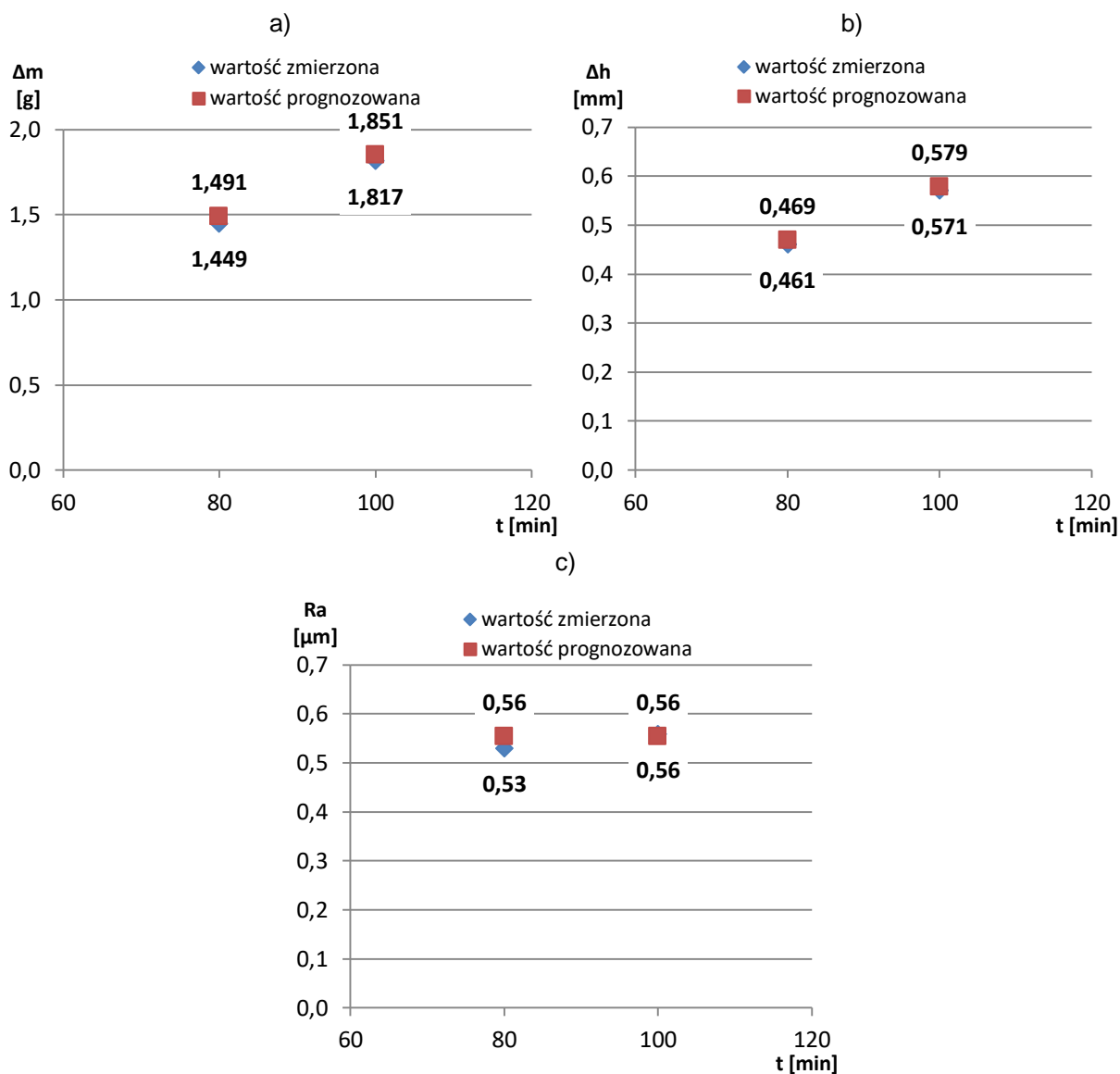
Rysunek 102. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)



Rysunek 102. cd. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Tabela 22. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)

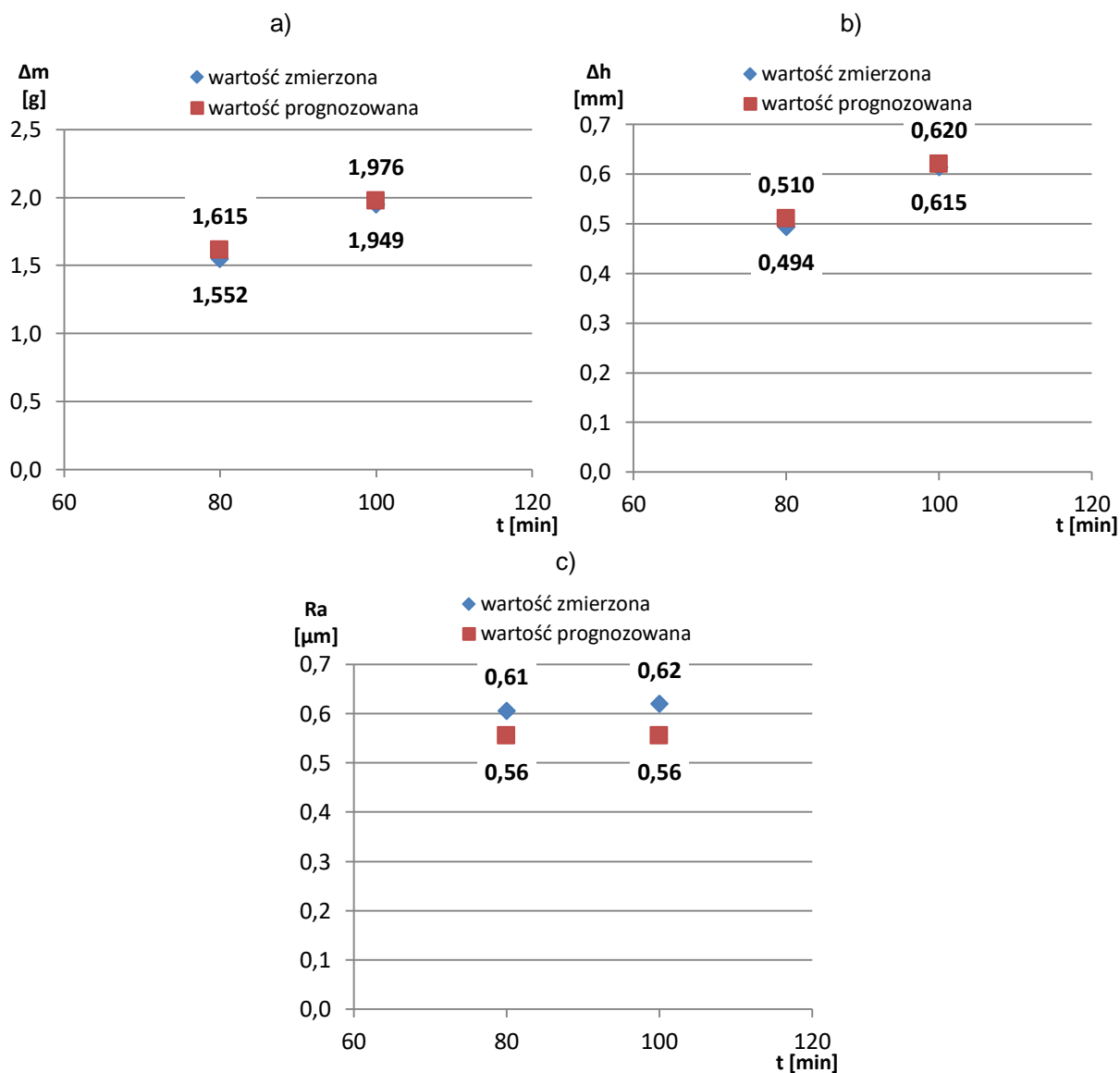
Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/ μ m]	δ [%]	RMSE [g/mm/ μ m]
Δm	12	0,72	80	1,449	1,491	0,97	0,041	2,851	0,014
			100	1,817	1,851		0,034	1,878	0,011
Δh	12	0,72	80	0,461	0,469	0,97	0,009	1,868	0,003
			100	0,571	0,579		0,008	1,440	0,003
Ra	12	0,72	80	0,53	0,56	0,40	0,025	4,718	0,008
			100	0,56	0,56		0,004	0,695	0,001



Rysunek 103. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Tabela 23. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny)

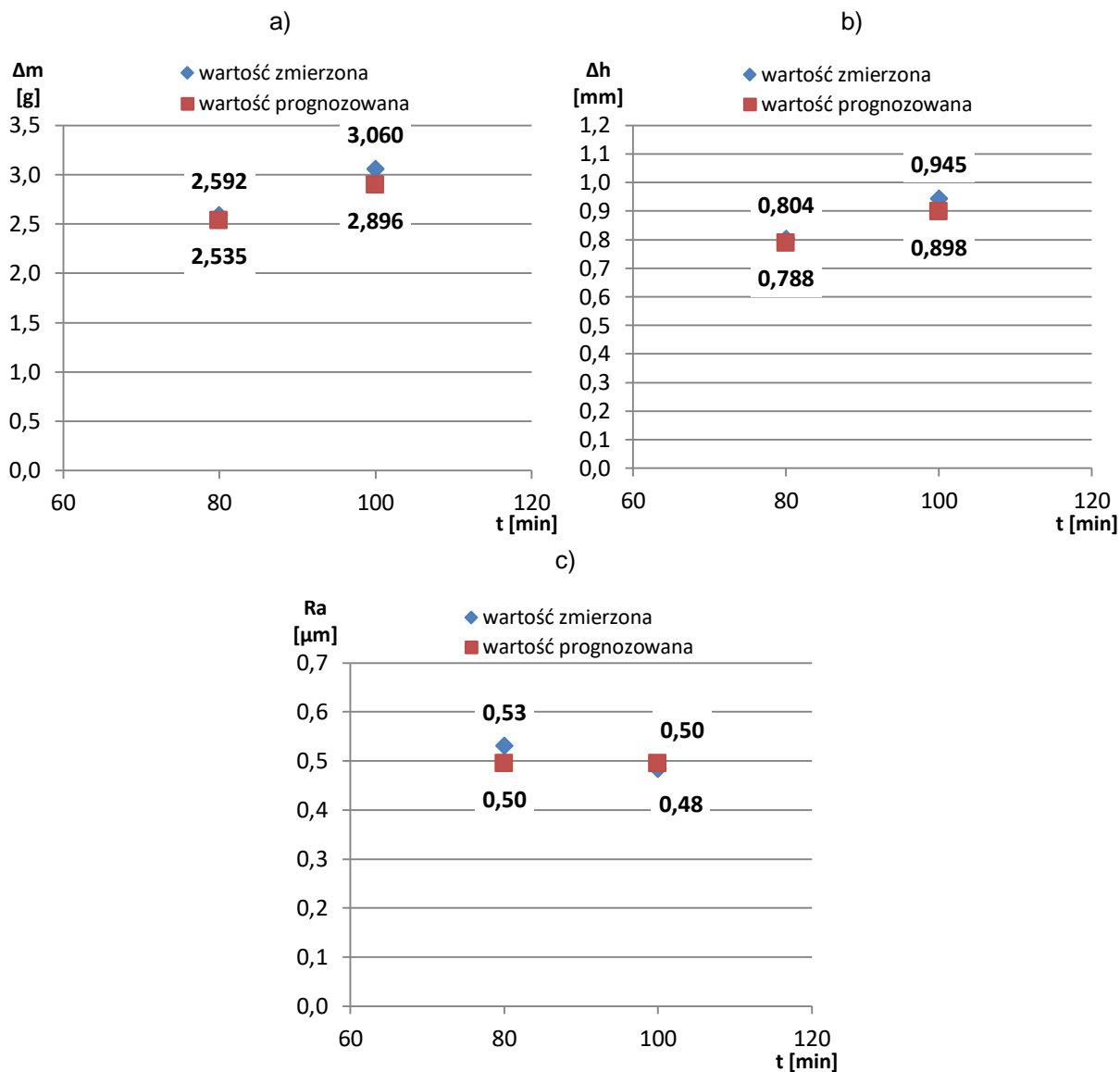
Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/μm]	δ [%]	RMSE [g/mm/μm]
Δm	6	1,44	80	1,552	1,615	0,97	0,063	4,070	0,021
			100	1,949	1,976		0,027	1,367	0,009
Δh	6	1,44	80	0,494	0,510	0,97	0,016	3,293	0,005
			100	0,615	0,620		0,005	0,795	0,002
Ra	6	1,44	80	0,61	0,56	0,40	0,051	8,348	0,017
			100	0,62	0,56		0,065	10,483	0,022



Rysunek 104. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Tabela 24. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny)

Badana wielkość	Zmienna wejściowa			Y	\hat{Y}	R^2	Wartości wyznaczonych błędów		
	$x_1 = p$ [kPa]	$x_2 = v$ [m/s]	$x_3 = t$ [min]				Δy [g/mm/μm]	δ [%]	RMSE [g/mm/μm]
Δm	12	1,44	80	2,592	2,535	0,97	0,057	2,206	0,019
			100	3,060	2,896		0,164	5,351	0,055
Δh	12	1,44	80	0,804	0,788	0,97	0,015	1,901	0,005
			100	0,945	0,898		0,047	4,940	0,016
Ra	12	1,44	80	0,53	0,50	0,40	0,036	6,798	0,012
			100	0,48	0,50		0,011	2,180	0,004



Rysunek 105. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny): a) masowy ubytek materiałow Δm ; b) liniowy ubytek materiałow Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra

Podobnie jak podczas wcześniejszej analizy uzyskano niewielkie różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi przy użyciu modeli matematycznych. Tym samym przeprowadzona walidacja potwierdziła wysokie dopasowanie modeli matematycznych do danych eksperymentalnych, wskazując na ich praktyczne zastosowanie w dalszych badaniach oraz pracach wdrożeniowych.

13. PORÓWNANIE UZYSKANYCH EFEKTÓW OBRÓBKOWYCH Z WYBRANYMI PROCESAMI OBRÓBKİ ŚCIERNEJ Z KINEMATYKĄ DOCIERANIA

Jedną z głównych wad obróbki przez docieranie, jak wskazano w początkowej części pracy, stanowi relatywnie mała wydajność procesu, która związana jest ze stosowaniem niskich prędkości skrawania (zazwyczaj < 5 m/s) oraz ziaren ściernych dawkowanych najczęściej w nadmiarze. Prototypowe narzędzie wykonane metodą SLS umożliwiło przeprowadzenie efektywnego procesu obróbki twardej ceramiki technicznej Al_2O_3 z wykorzystaniem większych niż podczas standardowego docierania parametrów technologicznych oraz dużo mniejszej ilości ziaren diamentowych $D107$. Uzyskane rezultaty porównano z wynikami obróbki z zastosowaniem wybranych narzędzi ściernych stosowanych również w technologii docierania oraz szlifowania z kinematyką docierania. Analizowane efekty technologiczne w przypadku każdego ze wskazanych narzędzi odnoszą się ściśle do określonych warunków procesu i służą do ogólnego porównania z prototypową tarczą docierającą wykonaną metodą SLS – tabela 25. W przypadku badanego narzędzia ściernego uwzględniono ubytek materiałowy oraz parametry chropowatości uzyskane podczas pierwszej serii badań właściwych.

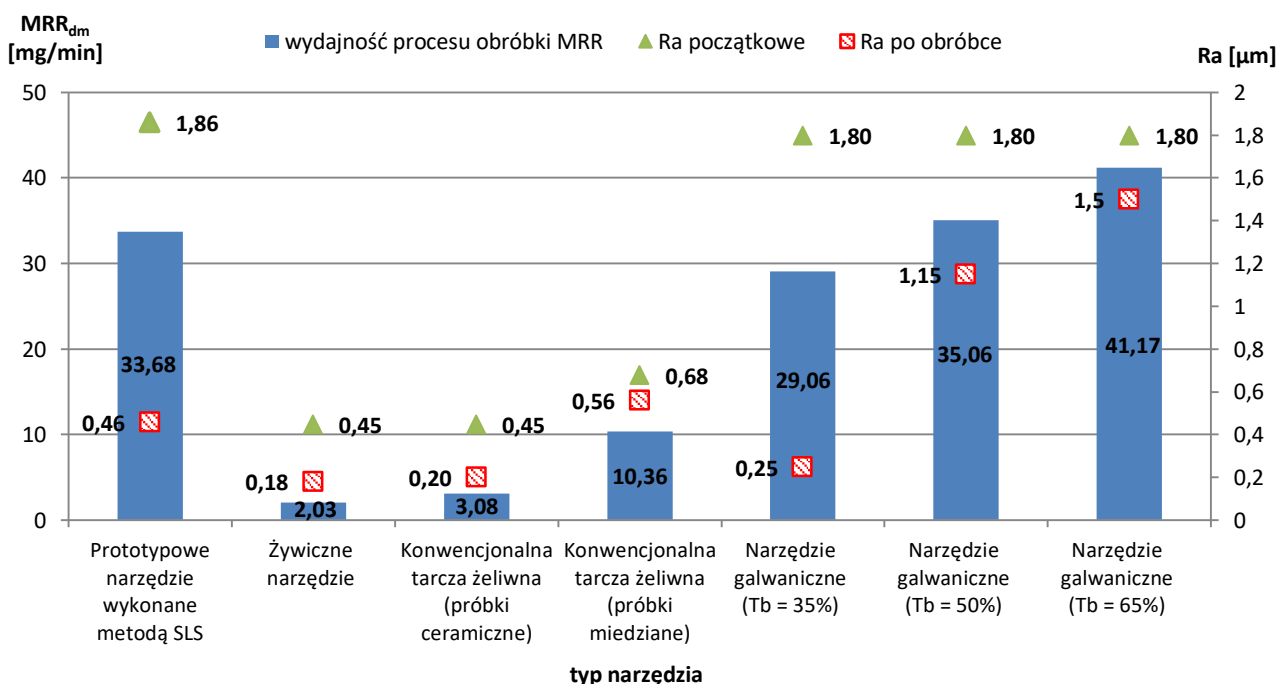
Tabela 25. Charakterystyka wybranych procesów obróbki ścierniej z wykorzystaniem różnych typów narzędzi

Typ narzędzia	Materiał obrabiany	Rodzaj ziaren ściernych	Parametry obróbki		Czas obróbki t [min]	Ubytek masowy po czasie obróbki t Δm [mg]
			Maksymalna prędkość obrotowa narzędzia n_r [min^{-1}]	Maksymalny nacisk jednostkowy p [kPa]		
Prototypowe narzędzie wykonane metodą SLS	Al_2O_3	Zawiesina zawierająca pastę diamentową $SD\ 28/20$ oraz ziarna diamentowe $D107$	120	12	120	4041
Żywiczne narzędzie (Guo, Zhang, Chen, et al., 2019)	Al_2O_3	Ziarna diamentowe o średniej wielkości $15\ \mu m$ osadzone w spoiwie żywicznym	50	1,77	60	122
Konwencjonalna tarcza żeliwna (Guo, Zhang, Chen, et al., 2019)	Al_2O_3	Zawiesina zawierająca ziarna diamentowe o średniej wielkości $15\ \mu m$	50	1,77	60	185
Konwencjonalna tarcza żeliwna (Piotrowski, 2018; Barylski and Piotrowski, 2019)	Cu	Zawiesina na bazie parafiny i oleju z czarnymi ziarnami węgla krzemu (98C F500)	64	3,79	90	932
Narzędzie galwaniczne o współczynniku wysokości spoiwa $T_b = 35\%$ (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020)	Al_2O_3	Ziarna diamentowe $D107$ osadzone w najcieńszym spoiwie niklowym	60	14	18	523
Narzędzie galwaniczne o współczynniku wysokości spoiwa $T_b = 50\%$ (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020)	Al_2O_3	Ziarna diamentowe $D107$ osadzone w spoiwie niklowym o średniej grubości	60	14	18	631
Narzędzie galwaniczne o współczynniku wysokości spoiwa $T_b = 65\%$ (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020)	Al_2O_3	Ziarna diamentowe $D107$ osadzone w najgrubszym spoiwie niklowym	60	14	18	741

Dane zaprezentowane w tabeli 25 posłużyły do wyznaczenia średniej wydajności procesu obróbki wyrażonej wskaźnikiem MRR_{dm} – rysunek 106 oraz tabela 26 oraz zmian chropowatości powierzchni określanej za pomocą wskaźnika RIR – tabela 26 dla wszystkich analizowanych narzędzi ściernych za pośrednictwem wcześniej opisanych wzorów 2 oraz 4. Dodatkowo na rysunku 106 zaznaczono wartości początkowej oraz końcowej chropowatości powierzchni R_a dla każdego z analizowanych procesów i narzędzi ściernych.

Tabela 26. Wartości wskaźników MRR_{dm} oraz RIR dla analizowanych typów narzędzi ściernych

Typ narzędzia	MRR_{dm} [mg/min]	RIR [%]
Prototypowe narzędzie wykonane metodą SLS	33,68	75%
Żywiczne narzędzie (Guo, Zhang, Chen, et al., 2019)	2,03	60%
Konwencjonalna tarcza żeliwna (Guo, Zhang, Chen, et al., 2019)	3,08	55%
Konwencjonalna tarcza żeliwna (Piotrowski, 2018; Barylski and Piotrowski, 2019)	10,36	18%
Narzędzie galwaniczne o współczynniku wysokości spoiwa $T_b = 35\%$ (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020)	29,06	86%
Narzędzie galwaniczne o współczynniku wysokości spoiwa $T_b = 50\%$ (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020)	35,06	36%
Narzędzie galwaniczne o współczynniku wysokości spoiwa $T_b = 65\%$ (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020)	41,17	17%



Rysunek 106. Porównanie wydajności procesu obróbki MRR_{dm} oraz parametru chropowatości R_a dla różnych typów narzędzi ściernych; kolejność zgodna z danymi w tabelach 25 oraz 26

Jak zaprezentowano na rysunku 106 wykonane metodą SLS narzędzie ściernie umożliwiło bardzo efektywną obróbkę w porównaniu do innych analizowanych narzędzi stosowanych w technologii docierania. Zgodnie z danymi zawartymi w tabelach 25 oraz 26 wartość uzyskanego ubytku materiałowego, a także wydajność procesu obróbki są kilkukrotnie większe w stosunku do obróbki konwencjonalnymi tarczami żeliwnymi oraz prototypowymi narzędziami żywicznymi. Uzyskane rezultaty wynikały z zastosowania wyższych prędkości skrawania i nacisku jednostkowego, wydłużonego czasu obróbki oraz stosowania dużych ziaren diamentowych *D107*, które wbijając się w miękką płaską powierzchnię narzędzia umożliwiły efektywną obróbkę twardej ceramiki technicznej. Kolejną zaletą obróbki z wykorzystaniem badanego narzędzia było znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni obrabianych detali, pomimo najwyższej wartości początkowej – tabela 26 oraz rysunek 106. Niewątpliwą przewagą proponowanego rozwiązania w stosunku do standardowej obróbki docieraniem z wykorzystaniem zawiesiny ścierniej podawanej w sposób ciągły w trakcie procesu stanowi jednokrotne dawkowanie ziaren ściernych tylko przed rozpoczęciem procesu. Realizowana w ten sposób obróbka jest bardziej ekonomiczna oraz przyjazna dla środowiska.

Zaprezentowane we wcześniejszej części pracy obserwacje płaskiej powierzchni czynnej narzędzia sugerują, iż zastosowanie wytwarzanej w technologii SLS tarczy oraz dużych ziaren ściernych *D107* umożliwiło przeprowadzenie procesu docierania dwuczęściowego, podobnie jak ma to miejsce podczas szlifowania oraz docierania z wykorzystaniem wskazanego w tabeli 25 narzędzia z ziarnami diamentowymi osadzonymi w żywicznym spoiwie. Z uwagi na wielkość oraz charakter pracy stosowanych ziaren diamentowych uzyskane efekty technologiczne z przeprowadzonych eksperymentów zestawiono dodatkowo z rezultatami otrzymanymi w wyniku zastosowania ściernic z identycznymi ziarnami diamentowymi *D107* oraz trzema różnymi wysokościami spoiwa galwanicznego wyrażonymi za pośrednictwem współczynnika T_b (Deja, 2013b; Deja and Zieliński, 2020). W przypadku analizowanej tarczy wykonanej metodą SLS oraz narzędzi galwanicznych obróbkę realizowano na tym samym stanowisku badawczym oraz z użyciem tego samego materiału obrabianego i identycznych ziaren diamentowych *D107*. Prototypowa tarcza docierająca umożliwiła osiągnięcie zbliżonej wydajności obróbki, szczególnie do narzędzia galwanicznego o wysokości spoiwa $T_b = 50\%$ oraz wyższej niż $T_b = 35\%$. Pomimo wysokiej wydajności obróbki z wykorzystaniem narzędzi galwanicznych, czas ich efektywnej pracy był kilkukrotnie krótszy i wynosił zaledwie 18 minut. W przypadku zaproponowanych prototypowych narzędzi wytwarzanych metodą SLS nawet po 120 minutach obróbki obserwowano dalsze efektywne skrawanie materiału.

Innym ważnym aspektem procesów obróbki z kinematyką docierania, jak zaprezentowano m.in. w pracach (Barylski and Deja, 2009; Deja, 2013a), jest zmniejszanie wartości zużycia narzędzi ściernych. Jedną z podstawowych wad narzędzi żywicznych stanowi duża wartość zużycia podczas obróbki, co uniemożliwia stosowanie wysokich parametrów procesu oraz dużych ziaren ściernych, a tym samym ogranicza uzyskiwane efekty obróbkowe i ich szersze zastosowanie przemysłowe. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracy (Williams, 2015), wartość zużycia żywicznej tarczy docierającej wykonanej metodą stereolitografii SLA podczas obróbki szkła była ponad dwukrotnie większa od wielkości zeskrwanego materiału, co uniemożliwiło wykorzystanie narzędzia do dalszej obróbki. W przypadku porównywanych narzędzi galwanicznych stosowanych w procesie szlifowania



z kinematyką docierania czas ich efektywnej pracy był również relatywnie krótki. Opracowane prototypowe tarcze docierające wykonane metodą SLS charakteryzowały się znacznie niższym zużyciem w stosunku do narzędzi żywicznych (**Williams, 2015; Guo, Zhang, Chen, et al., 2019**) i na podobnym poziomie jak konwencjonalne tarcze żeliwne (**Barylski and Piotrowski, 2019**). Na podstawie wyznaczonych odchyłek prostoliniowości narzędzi zaprezentowanych w podrozdziale 11.2., zużycie to wynosiło ~ 0,1 mm. Stan ich płaskiej powierzchni, w przeciwieństwie do żywicznych narzędzi ściernych oraz analizowanych ściernic galwanicznych, pozwolił na dalsze kontynuowanie obróbki nawet po 120 minutach ciągłego ubytku obrabianej twardej ceramiki technicznej. Podsumowując, przeprowadzona analiza uzyskanych efektów obróbkowych oraz wartości zużycia narzędzi wskazała na olbrzymi potencjał wytwarzanych w technologii SLS prototypowych tarcz docierających stosowanych w procesie docierania jednostronnego.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Podjęta tematyka rozprawy doktorskiej oraz poczynione analizy teoretyczne i doświadczalne wpisują się w aktualne trendy badawcze dotyczące obróbki ścierniej oraz technologii przyrostowych. Badania eksperymentalne docierania realizowano z wykorzystaniem wytwarzanych metodą SLS z proszku poliamidowego narzędzi ściernych o konstrukcji segmentowej. Analizowane efekty technologiczne po obróbce ceramiki technicznej Al_2O_3 dotyczyły wyznaczenia ubytku materiałowego próbek oraz wydajności procesu docierania, oceny jakości ich powierzchni wyrażonej wybranymi parametrami chropowatości i falistości, a także zużycia i kształtu prototypowych narzędzi ściernych. Praca jako całość wnosi wiele istotnych i nowych elementów dotyczących wykorzystania potencjału technologii proszkowych druku 3D w obszarze obróbki ścierniej. Zaprezentowany materiał badawczy, który został zgromadzony w wyniku serii przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz analiz, stanowi podstawę do realizacji dalszych prac naukowych i wdrożeń. Analiza uzyskanych rezultatów pozwoliła na sformułowanie wniosków poznawczych, wskazówek do praktycznego zastosowania oraz kierunków dalszych badań. Jednocześnie wysunięte wnioski związane są ściśle z przyjętymi warunkami badań oraz zastosowanymi parametrami technologicznymi, natomiast postawione hipotezy pracy zostały udowodnione.

Wnioski poznawcze

Na podstawie przeprowadzonych serii badań eksperymentalnych oraz analiz sformułowano następujące wnioski poznawcze:

- prototypowe narzędzia umożliwiły przeprowadzenie taniej, efektywnej oraz przyjaznej dla środowiska obróbki przedmiotów z trudnoobrabialnej ceramiki z uwagi na minimalne dawkowanie zawiesiny ścierniej z ziarnami diamentowymi. Jednokrotnie podawana dawka luźnych ziaren diamentowych $D107$ wynosiła 2,5 ml oraz pasty ścierniej z mniejszymi ziarnami 4 ml, również przy bardzo małym dawkowaniu oleju maszynowego w ilości $\dot{Q}_{lub} \approx 0,1$ ml/min;
- każda z przeprowadzonych serii badań eksperymentalnych z wykorzystaniem prototypowych narzędzi oraz zestawu przyjętych wielkości wejściowych charakteryzowała się stabilnym przebiegiem procesu obróbki. Potwierdziła to ocena istotności statystycznej różnic pomiędzy średnimi wartościami wybranych efektów technologicznych uzyskiwanych w poszczególnych seriach badań właściwych oraz sprawdzających. Dla większości serii wystąpił brak istotnych różnic dla analizowanych zmiennych zależnych procesu docierania;
- docieraki zachowywały wysokie właściwości ściernie przez okres 120 minut tylko przy jednorazowym dawkowaniu zawiesiny oraz ziaren diamentowych przed rozpoczęciem procesu, o czym świadczą duże wartości średniego ubytku materiałowego liniowego $\Delta h = 1,15$ mm oraz masowego $\Delta m = 3,75$ g. Efekty technologiczne uzyskane podczas wydłużonej serii badań eksperymentalnych oraz badań dodatkowych również potwierdziły efektywną obróbkę PO z Al_2O_3 nawet przez ponad 10 h;
- w wyniku przeprowadzonej obróbki nastąpiła znacząca poprawa jakości powierzchni obrabianych próbek ceramicznych potwierdzona pomiarami wykonywanymi w układach 2D oraz 3D i związana ze

znacznym zmniejszeniem wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni PO. Początkowe średnie wartości przed rozpoczęciem procesu docierania wynosiły $R_a = 1,67 \mu\text{m}$, $W_a = 1,41 \mu\text{m}$, $S_a = 1,68 \mu\text{m}$, $S_q = 2,38 \mu\text{m}$, natomiast po zakończeniu eksperymentów uzyskano wartości parametrów $R_a = 0,49 \mu\text{m}$, $W_a = 0,31 \mu\text{m}$, $S_a = 0,7 \mu\text{m}$, $S_q = 1,06 \mu\text{m}$. Szczegółowa analiza początkowego etapu obróbki potwierdziła, iż po 4 min docierania następowało wyraźne zmniejszenie wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni, które ulegały już tylko niewielkiemu zmniejszeniu podczas dalszego docierania;

- obserwacje mikroskopowe wskazały na efektywne i trwałe zbrojenie płaskiej powierzchni narzędzia w ziarna ściernie. Proces usuwania materiału z próbek ceramicznych przebiegał w podobny sposób jak podczas obróbki ścierniwem wiązonym występującym m.in. podczas szlifowania oraz szlifowania z kinematyką docierania. Może to sugerować transformację mechanizmu obróbki ścierniej z konwencjonalnego trzyczęściowego (*three-body abrasive wear*) na dwuczęściowy (*two-body abrasive wear*) proces usuwania materiału;

- proces docierania z wykorzystaniem badanych narzędzi oraz przyjętych parametrów technologicznych charakteryzował się wyższą wydajnością w porównaniu do obróbki z zastosowaniem konwencjonalnych tarcz żeliwnych oraz prototypowych docieraków żywicznych, a także zbliżoną wydajnością do obróbki narzędziami galwanicznymi stosowanymi w technologii szlifowania z kinematyką docierania. Potwierdzają to wysokie wartości średniej wydajności procesu docierania wyrażone wielkością ubytku masowego $MRR_{dm} = 31,24 \text{ mg/min}$ oraz liniowego $MRR_{dh} = 9,58 \mu\text{m/min}$ podczas badań eksperymentalnych właściwych i sprawdzających;

- badane docieraki charakteryzowały się znacznie niższą wartością zużycia ściernego w porównaniu do narzędzi żywicznych i galwanicznych oraz na podobnym poziomie jak konwencjonalne żeliwne tarcze docierające. Wartość zużycia wyznaczona na podstawie odchyłek prostoliniowości wynosiła $\sim 0,1 \text{ mm}$. Po zakończeniu poszczególnych serii badań eksperymentalnych, w tym wydłużonej serii trwającej łącznie 10 h, nie zaobserwowano śladów uszkodzenia narzędzi. Stan ich powierzchni umożliwiał realizację dalszej obróbki;

- przeprowadzenie badań eksperymentalnych docierania PO z Al_2O_3 przy zmiennych wartościach czynników wejściowych wskazało na uzyskanie największych wartości ubytku materiałowego masowego $\Delta m = 3,49 \text{ g}$ oraz liniowego $\Delta h = 1,07 \text{ mm}$, a także najniższej wartości parametru chropowatości $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ dla układu z górnymi poziomami (+) parametrów procesu ($p = 12 \text{ kPa}$, $v = 1,44 \text{ m/s}$, $t = 120 \text{ min}$);

- modele matematyczne wielkości wyjściowych procesu docierania wyznaczono w oparciu o przeprowadzoną ocenę istotności statystycznej efektów oddziaływania zmiennych wejściowych i ich interakcji na zmienne wyjściowe procesu docierania. Modele matematyczne dla ubytków materiałowych masowego Δm oraz liniowego Δh zawierają efekty główne p , v , t , natomiast model matematyczny dla parametru chropowatości R_a uwzględnia interakcję p i v . Wyznaczone modele matematyczne mogą być wykorzystywane do dokładnego prognozowania wartości wielkości wyjściowych w określonym przedziale zmienności parametrów obróbkowych. Potwierdzają to

niewielkie różnice wyznaczonych błędów pomiędzy wartościami zmierzonymi i prognozowanymi za pomocą opracowanych modeli matematycznych.

Wnioski do praktycznego zastosowania

Do najważniejszych wniosków służących do praktycznego zastosowania należą:

- metoda SLS pozwoliła na szybkie i tanie wykonanie docieraków o konstrukcji segmentowej. Koszt wytworzenia jednego narzędzia wynosił ~ 800 zł netto;
- badane docieraki wymagają stosowania większych ziaren ściernych np. *D107*, które wbijając się w trakcie procesu obróbki w miękką strukturę spiekane go proszku poliamidowego powodują trwałe i efektywne zbrojenie narzędzi;
- stosowanie typowych dla konwencjonalnego docierania tarczami żeliwnymi stosunkowo małych parametrów kinematycznych $v = 0,72$ m/s oraz nacisku jednostkowego $p = 6$ kPa, krótkiego czasu obróbki $t = 120$ s, a także pasty ścierniej zawierającej małe ziarna *SD 28/20* nie umożliwia efektywnej obróbki ceramiki technicznej, co potwierdziły rezultaty uzyskane podczas testu T1 badań rozpoznawczych;
- przyjęty zestaw parametrów obróbkowych podczas badań eksperymentalnych: $p = 12$ kPa, $v = 1,44$ m/s, $t = 120$ min oraz rodzaj zawiesziny zawierającej pastę diamentową, a także luźne ziarna diamentowe *D107* w zawieszynie w oleju maszynowym umożliwiły uzyskanie chropowatości powierzchni PO na poziomie $R_a = 0,5$ μm . Z uwagi na porowatą strukturę ceramiki technicznej dalsze skrawanie nie wpłynęło na zmniejszenie wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni obrabianych próbek. Zmniejszenie wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni wymagałoby prawdopodobnie zmiany czynników wejściowych docierania, w tym wykorzystania mniejszych ziaren ściernych, które jednocześnie mogłyby wpłynąć na obniżenie wydajności procesu obróbki;
- stosowanie większych wartości prędkości skrawania jak $v = 1,44$ m/s wymaga użycia pasty ścierniej, która pełni rolę nośnika dla luźnych ziaren ściernych. Brak zastosowania pasty ścierniej wpłynął na zmniejszenie ilości czynnych ziaren biorących udział w procesie skrawania, co skutkowało statystycznie istotnym spadkiem wielkości ubytku materiałowego oraz chropowatości powierzchni w porównaniu do pozostałych serii badań eksperymentalnych;
- przeprowadzanie docierania przy wartościach parametrów obróbki: $p = 12$ kPa, $v = 1,44$ m/s, $t = 120$ min umożliwia wydajny i stabilny przebieg procesu, co potwierdzają również wyniki dotyczące dopasowania danych eksperymentalnych do wartości wyznaczonych za pomocą opracowanych modeli matematycznych.

Proponowane kierunki dalszych badań

Uzyskane efekty obróbkowe docierania jednostronnego próbek ceramicznych z wykorzystaniem prototypowych narzędzi ściernych potwierdzają celowość prowadzenia dalszych prac badawczych. Proponowane kierunki przyszłych badań obejmują:

- określenie szerszego zakresu wykorzystania wytwarzanych w technologii SLS narzędzi w aspekcie rodzaju obrabianego materiału, głównie w obróbce materiałów trudnoskrawalnych m.in. ceramiki, węglików spiekanych, stali hartowanej oraz wpływu zastosowanych parametrów technologicznych na uzyskane rezultaty obróbkowe;
- określenie wytycznych dotyczących doboru odpowiedniego materiału ściernego oraz parametrów technologicznych dla obróbki wybranych materiałów;
- opracowanie nowych prototypowych konstrukcji narzędzi ściernych wykonanych metodą SLS ze ściśle określoną strukturą wewnętrzną i kontrolowaną porowatością wraz z oceną skuteczności ich stosowania w aspekcie rodzaju obrabianego materiału oraz zastosowanych parametrów technologicznych. Narzędzia o mniejszej średnicy będą mogły być wytwarzane jako jednolite;
- zdefiniowanie szczegółowej charakterystyki mechanizmu skrawania oraz wbijania ziaren ściernych w strukturę narzędzia (zbrojenia narzędzia);
- analizę wpływu struktury oraz stanu powierzchni początkowej wydrukowanego narzędzia na jego zużycie oraz uzyskiwane efekty obróbkowe;
- analizę szczegółową kształtu i wielkości zużycia narzędzi ściernych w oparciu o pomiary wykonywane z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury pomiarowo-badawczej, m.in. współrzędnościowej maszyny pomiarowej, skanerów 3D, konturografów itd.;
- badanie zjawisk cieplnych poprzez pomiary temperatury narzędzia oraz obrabianych przedmiotów podczas obróbki;
- szersze modelowanie wybranych efektów technologicznych oraz zużycia narzędzia na podstawie zgromadzonych danych eksperymentalnych oraz opracowanych modeli matematycznych;
- implementację opracowanego narzędzia do innych procesów obróbki ścierniej powierzchni płaskich, m.in. docierania dwutarczowego;
- zastosowanie innych metod przyrostowych bazujących na elastycznych materiałach do wytwarzania prototypowych narzędzi ściernych wraz z oceną efektów obróbkowych.

BIBLIOGRAFIA

Afonso, D. *et al.* (2019) *Incremental Forming as a Rapid Tooling Process*. Switzerland: Springer International Publishing.

Ahuja, B., Karg, M. and Schmidt, M. (2015) 'Additive manufacturing in production: challenges and opportunities', *Laser 3D Manufacturing II*, 9353, pp. 11–20. doi: 10.1117/12.2082521.

Ai, Q. *et al.* (2022) 'Digital light processing-based additive manufacturing of resin bonded SiC grinding wheels and their grinding performance', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(5), pp. 1641–1657. doi: 10.1007/s00170-021-08016-z.

Ardelt, T. (2001a) *Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik*. TU Berlin.

Ardelt, T. (2001b) 'Verfahrensvergleich Planschleifen mit Planetenkinematik-Planparallelläppen', *IDR*, 3, pp. 214–224.

Attar, H. *et al.* (2015) 'Effect of powder particle shape on the properties of in situ Ti-TiB composite materials produced by selective laser melting', *Journal of Materials Science & Technology*, 31(10), pp. 1001–1005. doi: 10.1016/j.jmst.2015.08.007.

Bade, L. *et al.* (2015) 'Investigation into the Development of an Additive Manufacturing Technique for the Production of Fibre Composite Products', *Procedia Engineering*, 132, pp. 86–93. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.483.

Bajaj, R., Chin, B. L. and Lee, T. Y. (2018) 'Opis patentowy: US2018304534A1'.

Barylski, A. (1997a) 'Opis patentowy: PL172327B1'.

Barylski, A. (1997b) 'Opis patentowy: PL172330B1'.

Barylski, A. (2013a) 'Analiza kinematyki docierarek tarczowych', *Inżynieria Maszyn*, 18(2), pp. 97–104.

Barylski, A. (2013b) 'Nowe narzędzia tarczowe do obróbki powierzchni płaskich na docierarkach', *Inżynieria Maszyn*, 18(2), pp. 84–96.

Barylski, A. (2013c) *Obróbka powierzchni płaskich na docierarkach*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

Barylski, A. (2017) 'Problemy oceny technologii docierania elementów ceramicznych', *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 6(5), pp. 33–43.

Barylski, A. and Bakoń, A. (2017) *Ziarna i mikroziarna diamentowe. Rodzaje ścierniw i przykłady zastosowania*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

Barylski, A. and Deja, M. (2009) 'Microgrinding of flat surfaces on single-disc lapping machine',

International Journal of Machining and Machinability of Materials, 5(2/3), pp. 245–267.

Barylski, A. and Deja, M. (2010) 'Finishing of ceramics in a single-disk lapping machine configuration', *Solid State Phenomena*, 165(237–243).

Barylski, A. and Deja, M. (2011) 'Wear of a tool in double-disk lapping of silicon wafers', *In: ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 49460, pp. 301–307.

Barylski, A. and Piotrowski, N. (2017) 'Modeling of lapping plate wear and conditioning in single-sided lapping', *XXIII International Symposium, Research-Education-Technology, Stralsund, 12th - 13th October 2017*, pp. 1–5.

Barylski, A. and Piotrowski, N. (2019) 'Non-conventional approach in single-sided lapping process: kinematic analysis and parameters optimization', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1), pp. 589–598. doi: 10.1007/s00170-018-2644-z.

Bean, G. E. *et al.* (2018) 'The effect of laser focus and process parameters on microstructure and mechanical properties of SLM Inconel 718', *Laser 3D Manufacturing V. International Society for Optics and Photonics*, 10523, pp. 140–151.

Belkhir, N., Bouzid, D. and Herold, V. (2007) 'Correlation between the surface quality and the abrasive grains wear in optical glass lapping', *Tribology International*, 40(3), pp. 498–502. doi: 10.1016/j.triboint.2006.05.001.

Berman, B. (2012) '3-D printing: The new industrial revolution', *Business Horizons*, 55(2), pp. 155–162. doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.

Biehler, J. and Fane, B. (2014) *3D Printing with Autodesk: Create and Print 3D Objects with 123D, AutoCAD and Inventor*. Que Publishing.

Cader, M. (2018) 'Druk 3D w przemyśle', *Automatyka*, 11, pp. 26–33.

Cai, G. Q. *et al.* (1998) 'Analysis on lapping and polishing pressure distribution', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(1), pp. 235–238. doi: 10.1016/s0007-8506(07)62825-x.

Caulfield, B., McHugh, P. E. and Lohfeld, S. (2007) 'Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process', *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3), pp. 477–488. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007.

CD3D (2019) *Jak narzędzia i uchwyty z drukarki 3D wspierają produkcję?* Dostępny w Internecie: <http://centrumdruku3d.pl/jak-narzedzia-i-uchwyty-z-drukarki-3d-wspieraja-produkcje/> (data dostępu: 17 lipca 2019 r.).

Chlebus, E. (2000) *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*. Warszawa: WNT.

Cichosz, P. (2002) *Techniki wytwarzania, obróbka ubytkowa: laboratorium*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

ClubTechnical, M. E. B. (2018) *Lapping Process | Advantages, Disadvantages, Applications, Types*. Dostępny w Internecie: <https://clubtechnical.com/lapping#comments> (data dostępu: 26 sierpnia 2019 r.).

Deaconescu, A. and Deaconescu, T. (2008) 'Robust design of lapping processes', *Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers*.

Deaconescu, A. and Deaconescu, T. (2015) 'Experimental and statistical parametric optimisation of surface roughness and machining productivity by lapping', *Transactions of Famena*, 39(4), pp. 65–78.

Deckard, C. R., Beaman, J. J. and Darrah, J. F. (1992) 'Opis patentowy: 5,155,324'.

Deja, M. (2013a) 'Wear of Electroplated Tools Used for Flat Grinding of Ceramics', *Solid State Phenomena*, 199, pp. 633–638.

Deja, M. (2013b) *Wybrane problemy szlifowania powierzchni płaskich z kinematyką docierania*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

Deja, M. et al. (2018) 'Application of Rapid Prototyping Technology in the Manufacturing of Turbine Blade With Small Diameter Holes', *Polish Maritime Research*, 25(s1), pp. 119–123. doi: 10.2478/pomr-2018-0032.

Deja, M. et al. (2021) 'Applications of Additively Manufactured Tools in Abrasive Machining — A Literature Review', *Materials*, 14(5).

Deja, M. and Zieliński, D. (2019) 'A pilot study to assess an in-process inspection method for small diameter holes produced by direct metal laser sintering', *Rapid Prototyping Journal*, 26(2), pp. 418–436. doi: 10.1108/RPJ-05-2019-0132.

Deja, M. and Zieliński, D. (2020) 'Wear of electroplated diamond tools in lap-grinding of Al₂O₃ ceramic materials', *Wear*, 460–461. doi: 10.1016/j.wear.2020.203461.

Deja, M. and Zieliński, D. (2021) 'A pilot study on machining difficult-to-cut materials with the use of tools fabricated by SLS technology', *Materials*, 14(18). doi: 10.3390/ma14185306.

Denkena, B. et al. (2019) 'Model-based manufacturing and application of metal-bonded grinding wheels', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 68(1), pp. 321–324. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.088.

Dodziuk, H. (2019) *DRUK 3D/AM: Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Du, Z. jun et al. (2019) 'Selective laser sintering and grinding performance of resin bond diamond

grinding wheels with arrayed internal cooling holes', *Ceramics International*. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 45(16), pp. 20873–20881. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.07.076.

Engis (2022) *Płyty docierające*. Dostępny w Internecie: <https://www.engis.co.jp/en/wp/wp-content/uploads/2018/02/HYPREZ-Series-Lapping-Plates-Engis-Japan-Corporation.png> (data dostępu: 29 października 2022 r.).

EOS GmbH (2010) *PA 200 Balance 1.0*. Dostępny w Internecie: <https://drukarki3d.pl/wp-content/uploads/2015/09/karta-materialowa-PA-2200-ENG.pdf> (data dostępu: 20 marca 2019 r.).

EOS GmbH (2013) *Plastic laser sintering system FORMIGA P 110 for the direct manufacture of series, spare parts and functional prototypes*. Dostępny w Internecie: <https://drukarki3d.pl/wp-content/uploads/2014/07/Formiga-P110.pdf> (data dostępu: 19 marca 2019 r.).

Eqbal, A., Sood, A. K. and Shamim, M. (2015) 'Rapid tooling: A major shift in tooling practice', *Manufacturing and Industrial Engineering*, 14(3–4), pp. 1–9. doi: 10.12776/mie.v14i3-4.325.

Evans, C. J. et al. (2003) 'Material removal mechanisms in lapping and polishing', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), pp. 611–633. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60207-8.

Eyers, D. R. and Potter, A. T. (2017) 'Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective', *Computers in Industry*, 92–93, pp. 208–218. doi: 10.1016/j.compind.2017.08.002.

Fang, C. et al. (2017) 'Influence of fixed abrasive configuration on the polishing process of silicon wafers', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1), pp. 575–584. doi: 10.1007/s00170-016-8808-9.

Feld, M. (2003) *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

Feld, M. and Barylski, A. (1979) *Docieranie, wytyczne doboru warunków obróbki*. Warszawa: Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”.

Fioratti, S. (2018) 'Opis patentowy: WO2018185580A1'.

Ford, S. and Despeisse, M. (2016) 'Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges', *Journal of Cleaner Production*, 137, pp. 1573–1587. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.

Ganapathiappan, S. et al. (2018) 'Opis patentowy: CN108136568A'.

Gebhardt, A. (2012) *Understanding additive manufacturing*. Munich: Carl Hanser Verlag.

Gebhardt, A. (2013) *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping-Tooling-Produktion*. München: Carl Hanser Verlag.

Gibson, I., Rosen, D. . and Stucker, B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies - Rapid*

Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer Science + Business Media, LLC. New York. doi: 10.1007/978-3-662-53120-4_16866.

Goodridge, R. D., Tuck, C. J. and Hague, R. J. M. (2012) 'Laser sintering of polyamides and other polymers', *Progress in Materials Science*. Elsevier Ltd, 57(2), pp. 229–267. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.04.001.

Górecki, A. (2005) *Technologia ogólna. Podstawy technologii mechanicznych*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.

Gu, Q. *et al.* (2015) 'Three-dimensional bio-printing', *Science China Life Sciences*, 58(5), pp. 411–419. doi: 10.1007/s11427-015-4850-3.

Guo, L., Zhang, X., Lee, C.-H., *et al.* (2019) 'An experimental study on the abrasive machining process of electronic substrate material with a novel ultraviolet-curable resin bond diamond lapping plate', *IEEE Access*, 7, pp. 64375–64385. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917304.

Guo, L., Zhang, X., Chen, S., *et al.* (2019) 'An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools', *Materials*, 12(1). doi: 10.3390/ma12010125.

Gutzeit, N. *et al.* (2015) 'Lapping and polishing of different LTCC substrates for thin film applications', *2015 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC)*, pp. 1–4.

Habrat, W. F. (2016) 'Effect of bond type and process parameters on grinding force components in grinding of cemented carbide', *Procedia Engineering*, 149, pp. 122–129. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.646.

Heisel, U. and Jakob, P. (2012) 'Research on the workpiece kinematics in face lapping with friction drive', *Advanced Materials Research*, 565, pp. 318–323.

Hon, K. K. B. and Gill, T. J. (2003) 'Selective laser sintering of SiC/polyamide composites', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1), pp. 173–176. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60558-7.

Hong, M.-P. *et al.* (2018) 'High-performance eco-friendly trimming die manufacturing using heterogeneous material additive manufacturing technologies', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 5(1), pp. 133–142. doi: 10.1007/s40684-018-0014-9.

Huang, Q., Guo, L. and Marinescu, I. D. (2015) 'Grind/Lap of Ceramics with UV-Bonded Diamond Wheels', in *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*. Second Edi. Elsevier Inc., pp. 360–393. doi: 10.1016/b978-1-4557-7858-4.00010-8.

Huang, Q., Guo, L. and Marinescu, I. D. (2016) 'Research on the Properties of Resin Bond Wheel Cured by Ultraviolet Light', *Procedia Manufacturing*, 5, pp. 259–269. doi:

10.1016/j.promfg.2016.08.023.

Huang, S. *et al.* (2021) 'A novel lapping process for single-crystal sapphire using hybrid nanoparticle suspensions', *International Journal of Mechanical Sciences*, 191. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106099.

Huang, S. T., Fan, K. C. and Wu, J. H. (1993) 'A new minimum zone method for evaluating straightness errors', *Precision Engineering*, 15(3), pp. 158–165. doi: 10.1016/0141-6359(93)90003-S.

Iftikhar, A. *et al.* (2013) 'Turbine blade manufacturing through rapid tooling (RT) process and its quality inspection', *Proceedings of the 37th International MATADOR 2012 Conference*, 6914(May), pp. 295–298. doi: 10.1080/10426914.2012.746698.

Jain, P. K., Pandey, P. M. and Rao, P. V. M. (2009) 'Effect of delay time on part strength in selective laser sintering', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1), pp. 117–126. doi: 10.1007/s00170-008-1682-3.

Kaczmarek, J. (1971) *Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

Kadir, A. Z. A., Yusof, Y. and Wahab, M. S. (2020) 'Additive manufacturing cost estimation models—a classification review', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(9), pp. 4033–4053. doi: 10.1007/s00170-020-05262-5.

Kawahata, Y. *et al.* (2015a) 'Characteristics of a new lapping tool using short stainless steel fillers correspond to sapphire substrates', *Preprint of Autumn Meeting of JSPE*, pp. 995–996.

Kawahata, Y. *et al.* (2015b) 'Lapping tool containing short metallic fibers to improve of lapping characteristics and abrasion resistance', *Preprint of Autumn Meeting of JSPE*, pp. 477–478.

Kawahata, Y. *et al.* (2017) 'Development of a lapping tool by the application of compressed short-metal fibers', *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 83(7), pp. 672–678. doi: 10.2493/jjspe.83.672.

Kemet (2019a) *Lapping and Polishing Mechanical Seal Faces*. Dostępny w Internecie: <https://www.kemet.co.uk/blog/lapping/lapping-and-polishing-mechanical-seal-faces> (data dostępu: 26 sierpnia 2019 r.).

Kemet (2019b) *Systemy docierania mechanicznego i polerowania*. Dostępny w Internecie: <http://www.techcontrol.eu/images/sklep/198/pliki/katalog-docieranie-i-polerowanie-2016.pdf> (data dostępu: 27 września 2019 r.).

Kemet (2022) *Płyty docierające*. Dostępny w Internecie: <https://kemet-international.com/pl/produkty/docierania/kompozytowe-plyty-docierajace> (data dostępu: 27 października 2022 r.).

Kim, H. M. *et al.* (2015) 'Comparison between sapphire lapping processes using 2-body and 3-body

modes as a function of diamond abrasive size', *Wear*, 332–333, pp. 794–799. doi: 10.1016/j.wear.2015.02.029.

Klocke, F. (2009) *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*, Springer. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Kumar, S. S. and Hiremath, S. S. (2016) 'A Review on Abrasive Flow Machining (AFM)', *Procedia Technology*, 25, pp. 1297–1304. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.224.

Lai, Z. *et al.* (2019) 'Study on the wear characteristics of a lapping wheel in double-sided lapping based on the trajectory distribution', *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 32(3), pp. 352–358. doi: 10.1109/TSM.2019.2912454.

Lapmaster (2019a) *Fundamental Lapping Theory*. Dostępny w Internecie: <https://www.lapmaster-wolters.com/lapping-machines.html> (data dostępu: 6 sierpnia 2019 r.).

Lapmaster (2019b) *What is Lapping?* Dostępny w Internecie: <https://www.lapmaster-wolters.com/what-is-lapping.html> (Accessed: 28 sierpnia 2019 r.).

Lee, H. *et al.* (2017) 'Lasers in additive manufacturing: A review', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 4(3), pp. 307–322. doi: 10.1007/s40684-017-0037-7.

Li, S., Wang, Z. and Wu, Y. (2008) 'Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes', *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1–3), pp. 34–41. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.118.

Li, Y. *et al.* (2017) 'Precision Grinding, Lapping, Polishing, and Post-Processing of Optical Glass', in *Comprehensive Materials Finishing*, pp. 154–170.

Li, Z. *et al.* (2016) 'Spectral analysis of surface roughness and form profile of a machined surface after low pressure lapping', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(8), pp. 1399–1405.

Lu, L. *et al.* (2014) 'Analysis of path distribution in lapping and polishing with single fixed abrasive', *Key Engineering Materials*, 589–590, pp. 475–479.

Luo, Q., Lu, J. and Xu, X. (2016) 'Study on the processing characteristics of SiC and sapphire substrates polished by semi-fixed and fixed abrasive tools', *Tribology International*, 104, pp. 191–203. doi: 10.1016/j.triboint.2016.09.003.

Maniruzzaman, M. (2019) *3D and 4D printing in biomedical applications: process engineering and additive manufacturing*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Marinecsu, I. D., Uhlmann, E. and Doi, T. (2006) *Handbook of lapping and polishing*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group,.

- Marinescu, I., Guo, L. and Wei, P. (2013) 'Basic Research for the UV Fixed Abrasive Lapping Plate', *Applied Mechanics and Materials*, 371, pp. 95–100.
- Molenda, J. (2013) 'Influence of Lapping Velocity , Pressure and Time', *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 81, pp. 85–92.
- Molenda, J. and Charchalis, A. (2014) 'Measurements of Lapping Plate Temperature', *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21(3), pp. 245–250. doi: 10.5604/12314005.1133224.
- Molenda, J. and Charchalis, A. (2015) 'Wpływ twardości materiału obrabianego na jakość powierzchni po docieraniu', *Logistyka*, 3, pp. 3363–3370.
- Molenda, J., Charchalis, A. and Barylski, A. (2010) 'The influence of abrasive machine on temperature during one side lapping', *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 17(2), pp. 357–362. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.199.194.
- Moon, D.-J. *et al.* (2015) 'Removal mechanisms of glass and sapphire materials by slurry free lapping', *International Conference on Planarization/CMP Technology, ICPT 2015*, pp. 1–4.
- Naik, D. N., Mathew, N. T. and Vijayaraghavan, L. (2019) 'Wear of Electroplated Super Abrasive CBN Wheel during Grinding of Inconel 718 Super Alloy', *Journal of Manufacturing Processes*, 43, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.033.
- Neauport, J. *et al.* (2010) 'Loose abrasive slurries for optical glass lapping', *Applied optics*, 49(30), pp. 5736–5745.
- Ngo, T. D. *et al.* (2018) 'Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges', *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- Nickels, L. (2015) 'AM and aerospace: An ideal combination', *Metal Powder Report*, 70(6), pp. 300–303. doi: 10.1016/j.mprp.2015.06.005.
- Noorani, R. (2017) *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*. Boca Raton: CRC Press.
- Oliveira, J. F. G. *et al.* (2009) 'Industrial challenges in grinding', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), pp. 663–680. doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.006.
- Olszak, W. (2008) *Obróbka skrawaniem*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Parate, P. R. and Yarasu, R. B. (2014) 'Conditioning Parameters for Maintaining Plate Flatness Prior To Lapping', *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(1), pp. 12–19.
- Pawar, P., Ballav, R. and Kumar, A. (2015) 'An overview of machining process of alumina and alumina ceramic composites', *Manufacturing Science and Technology*, 3(1), pp. 10–15.
- Piotrowski, N. (2018) *Analiza układów kinematycznych docierania powierzchni płaskich w aspekcie*

równomierności zużycia tarczy docierającej. Politechnika Gdańska.

Popescu, D., Laptoiu, D., *et al.* (2018) 'Design and 3D printing customized guides for orthopaedic surgery – lessons learned', *Rapid Prototyping Journal*, 24(5), pp. 901–913. doi: 10.1108/RPJ-05-2017-0099.

Popescu, D., Zapciu, A., *et al.* (2018) 'FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review', *Polymer Testing*, 69, pp. 157–166. doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.

Poradnik firmy CadXpert (2019) *Oprządkowanie produkcyjne wykonane w technologii druku 3D*.

Pratheesh Kumar, M. R., Arun, B. S. and Aravind Babu, R. (2013) 'Optimization of Process Parameters In Lapping of Stainless Steel', *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(9), pp. 1865–1872.

Praveena, B. A. *et al.* (2022) 'A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential', *Materials Today: Proceedings*, 52, pp. 1309–1313. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.059.

Production Lapping Company, I. (2019) *Lapping 101*. Dostępny w Internecie: <http://productionlapping.com/tech-info/> (data dostępu: 26 sierpnia 2019 r.).

Przybylski, W. and Deja, M. (2007) *Komputerowo wspomagane wytwarzanie maszyn: podstawy i zastosowanie*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

Pyun, H.-J. *et al.* (2018) 'Fabrication of high performance copper-resin lapping plate for sapphire: A combined 2-body and 3-body diamond abrasive wear on sapphire', *Tribology International*, 120, pp. 203–209. doi: 10.1016/j.triboint.2017.12.037.

Qiu, Y. and Huang, H. (2019) 'Research on the fabrication and grinding performance of 3-dimensional controllable abrasive arrangement wheels', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5), pp. 1839–1853. doi: 10.1007/s00170-019-03900-1.

Rabinowicz, E., Dunn, L. A. and Russell, P. G. (1961) 'A study of abrasive wear under three-body conditions', *Wear*, 4(5), pp. 345–355.

Redwood, B., Schöffner, F. and Garre, B. (2017) *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs.

Rocznik, P. *et al.* (2016) 'Rapid Tooling – techniques of rapid production tools and prototype series', *Mechanik*, (12), pp. 1898–1899. doi: 10.17814/mechanik.2016.12.542.

Runze, H. *et al.* (2016) 'Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components', *Journal of Cleaner Production*, 135, pp. 1559–1570.

Sankar, M. R., Jain, V. K. and Ramkumar, J. (2009) 'Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing', *Wear*, 267(1–4), pp. 43–51. doi: 10.1016/j.wear.2008.11.007.

Siemiński, P. and Budzik, G. (2015) *Techniki przyrostowe: druk drukarki 3D*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Ślusarczyk, P. (2019) *Technologie przyrostowe*. Dostępny w Internecie: <https://3dwpraktyce.pl/wp-content/uploads/2017/12/Druk-3D-diagram.pdf> (data dostępu: 19 lipca 2019 r.).

South Bay Technology, I. (2019a) *Lapping and Polishing Basics*. Dostępny w Internecie: https://www.academia.edu/35880761/Lapping_and_Polishing_Basics_Lapping_and_Polishing_Applications_Laboratory_Report_54?email_work_card=interaction_paper (data dostępu: 21 października 2019 r.).

South Bay Technology, I. (2019b) *Maintaining Plate Flatness Prior to Lapping and Polishing*. Dostępny w Internecie: http://www.southbaytech.com/appnotes/74_Maintaining_Plate_Flatness.pdf (data dostępu: 21 sierpnia 2019 r.).

South Bay Technology, I. (2019c) *Monitoring and Measuring Plate Flatness During Lapping*. Dostępny w Internecie: http://www.southbaytech.com/appnotes/65_Monitoring_and_Measuring_Plate_Flatness_During_Lapping.pdf (data dostępu: 21 sierpnia 2019 r.).

Stähli, A. W. (2013) *The Technique of Lapping*. Switzerland: Pieterlen/Biel.

Stähli, A. W. and Stähli, B. (2005) 'Microfinishing Micro finishing – yesterday – today and tomorrow from Micron to Nano and Å ngström', pp. 1–9.

Tanaka, T. and Isono, Y. (2001) 'New development of a grinding wheel with resin cured by ultraviolet light', *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1–3), pp. 385–391. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00636-7.

Tekinalp, H. L. *et al.* (2014) 'Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing', *Composites Science and Technology*, 105, pp. 144–150. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009.

Thompson, M. K. *et al.* (2016) 'Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), pp. 737–760. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.

Tian, C., Li, X., Guo, G., *et al.* (2018) 'Opis patentowy: CN208132743U'.

Tian, C., Li, X., Zhang, S., *et al.* (2018) 'Study on design and performance of metal-bonded diamond grinding wheels fabricated by selective laser melting (SLM)', *Materials and Design*, 156, pp. 52–61. doi: 10.1016/j.matdes.2018.06.029.

Tian, C., Li, X., Zhang, S., *et al.* (2019) 'Porous structure design and fabrication of metal-bonded

diamond grinding wheel based on selective laser melting (SLM)', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5), pp. 1451–1462. doi: 10.1007/s00170-018-2734-y.

Tian, C., Li, X., Li, H., *et al.* (2019a) 'Study on process and manufacturability of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM)', *Journal of Physics: Conference Series*, 1303(1). doi: 10.1088/1742-6596/1303/1/012144.

Tian, C., Li, X., Li, H., *et al.* (2019b) 'The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM)', *Materials Science & Engineering A*, 743, pp. 697–706. doi: 10.1016/j.msea.2018.11.138.

Tian, C., Li, X., Guo, G., *et al.* (2019) *Tłumaczenie opisu patentowego: CN208132743*.

Tian, C. *et al.* (2020) 'Study on formability, mechanical property and finite element modeling of 3D-printed composite for metal-bonded diamond grinding wheel application', *Journal of Manufacturing Processes*, 54, pp. 38–47. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.02.028.

Tofail, S. A. M. *et al.* (2018) 'Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities', *Materials Today*, 21(1), pp. 22–37. doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001.

Tymowski, J. (1970) *Technologia budowy maszyn*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

Vaezi, M., Safaeian, D. and Chua, C. K. (2011) 'Gas turbine blade manufacturing by use of epoxy resin tooling and silicone rubber molding techniques', *Rapid Prototyping Journal*, 17(2), pp. 107–115. doi: 10.1108/13552541111113853.

Vayre, B., Vignat, F. and Villeneuve, F. (2012) 'Designing for additive manufacturing', *Procedia CIRP*, 3, pp. 632–637. doi: 10.1016/j.procir.2012.07.108.

VDI, 3405 (2014) 'Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Basics, definitions, processes'.

Volker, H. (2000) 'Opis patentowy: DE19834559A1'.

Wang, J. *et al.* (2016) 'Process Optimization of Lapping Sapphire Substrate with Fixed Diamond Abrasive Pad', *Key Engineering Materials*, 693, pp. 1090–1097.

Williams, W. B. (2013) 'Additive manufacturing of tools for lapping glass', *Optifab 2013*, 8884 (October 2013), pp. 101–107. doi: 10.1117/12.2028699.

Williams, W. B. (2015) 'The impact of layer thickness on the performance of additively manufactured lapping tools', *Optifab 2015*, 9633 (October 2015), pp. 11–18. doi: 10.1117/12.2195995.

Xie, Y. and Bhushan, B. (1996) 'Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing', *Wear*, 200, pp. 281–295.

XU, Y. and YIN, Y. (2016) 'The effect of varied lapping pressure on the material removal rate of optics

lapping', *Chinese Science Bulletin*, 61(8), pp. 862–871. doi: 10.1360/n972015-00830.

Yang, Z. *et al.* (2016) 'A study on diamond grinding wheels with regular grain distribution using additive manufacturing (AM) technology', *Materials and Design*, 104, pp. 292–297. doi: 10.1016/j.matdes.2016.04.104.

Yao, C., Peng, W. and Liu, F. (2013) 'Formulation and implementation of energy efficient ultraviolet curing for photosensitive resin-bound diamond wire saws', *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.

Yao, C., Zhu, X. and Peng, W. (2011) 'Fixed Abrasive Lapping Plate for Lapping Copper Substrates', *International Information Institute (Tokyo). Information*, 14(12).

Yao, W. *et al.* (2017) 'Trajectory analysis and experiments of both-sides cylindrical lapping in eccentric rotation', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9–12), pp. 2849–2859. doi: 10.1007/s00170-016-8980-y.

Yuan, J. *et al.* (2015) 'Kinematics and trajectory of both-sides cylindrical lapping process in planetary motion type', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 92, pp. 60–71. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2015.02.004.

Zaleski, K., Skoczylas, A. and Bławucki, S. (2017) *Obróbka gładkościowa i umacniająca: ćwiczenia laboratoryjne*. Lublin: Politechnika Lubelska.

Zhang, Y. and Tani, Y. (2017) 'Application to a High-performance Lapping Plate of Stainless Steel', *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 6(5), pp. 343–347. doi: 10.18178/ijmerr.6.5.343-347.

Zhang, Z. *et al.* (2018) 'A novel approach of chemical mechanical polishing for a titanium alloy using an environment-friendly slurry', *Applied Surface Science*, 427, pp. 409–415. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.08.064.

Zhao, X. *et al.* (2016) 'Selective laser melting of carbon/AlSi10Mg composites: Microstructure, mechanical and electrical properties', *Journal of Alloys and Compounds*, 665, pp. 271–281. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.12.126.

Zieliński, D. (2017) *Zastosowanie technik Rapid Prototyping w wytwarzaniu mikrostruktur*. Politechnika Gdańska.

Zieliński, D. (2018a) *Druk 3D części z tworzyw sztucznych na skalę przemysłową*. Dostępny w Internecie: <https://drukarki3d.pl/aktualnosci/druk-3d-czesci-z-tworzyw-sztucznych-na-skale-przemyslowa/> (data dostępu: 4 lipca 2019 r.).

Zieliński, D. (2018b) *Liebherr – pierwszy, wydrukowany w technologii druku 3D, metalowy główny element hydrauliczny układu kontroli lotu zastosowany w samolocie Airbus A380*. Dostępny

w Internecie: <https://drukarki3d.pl/wdrozenia/liebherr/> (data dostępu: 7 stycznia 2019 r.).

Zieliński, D. (2018c) *Optymalizacja topologiczna części lotniczych*. Dostępny w Internecie: <https://staleo.pl/z-kraju-i-ze-swiata/technologie/3353/optimalizacja-topologiczna-czesci-lotniczych> (data dostępu: 7 stycznia 2019 r.).

Zieliński, D. (2020a) 'Druk 3D części z tworzyw sztucznych na skalę przemysłową w technologii SLS', *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 1, pp. 71–72.

Zieliński, D. (2020b) 'Podstawy technologii selektywnego spiekania laserowego proszków polimerowych – SLS', *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 5, pp. 81–83.

Zieliński, D. (2021a) 'Drukowanie trwałych elementów z tworzyw termoplastycznych w technologii FDM / FFF', *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 4, pp. 103–106.

Zieliński, D. (2021b) 'Multimateriałowe oraz wielokolorowe drukowanie wysokiej jakości części z żywic utwardzanych światłem UV w technologii PolyJet', *Materiały & Maszyny Technologiczne*, 3, pp. 12–14.

Zieliński, D. (2022) 'Drukowanie trwałych elementów z żywic utwardzanych światłem lasera w technologii SLA', *Materiały & Maszyny Technologiczne*, 1, pp. 42–44.

WYKAZ RYSUNKÓW

Rysunek 1. Mechanizm obróbki ścierniej: a) obróbka ścierniwem wiązonym (<i>2-body abrasive wear</i>) podczas szlifowania; b) obróbka ścierniwem luźnym (<i>3-body abrasive wear</i>) podczas docierania	13
Rysunek 2. Podział docierania ze względu na wybrane kryteria	15
Rysunek 3. Schemat docierania jednotarczowego (a) z luźnymi i utwardzonymi ziarnami ściernymi podczas obróbki (b).....	17
Rysunek 4. Czynniki wejściowe oraz wyjściowe docierania	19
Rysunek 5. Przykłady wybranych docieraków stosowanych w różnych rodzajach docierania: a) docierak do powierzchni płaskich; b) docierak pierścieniowy do wałków; c) docierak stożkowy do otworów; d) docierak do docierania obwodowego powierzchni cylindrycznych; e) docierak do docierania kształtowego; f) docierak do kulistych wgłębień; 1 – docierak, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – płyn obróbkowy (nośnik ziaren), 4 – napęd docieraka, 5 – separator przedmiotowy, 6 – napęd pierścienia prowadzącego.....	23
Rysunek 6. Schematy poglądowe przedstawiające sposoby kondycjonowania: a) tarczy docierającej o początkowym kształcie wklęsłym poprzez wysunięcie pierścienia prowadzącego; b) tarczy docierającej o początkowym kształcie wypukłym poprzez wsunięcie pierścienia prowadzącego	24
Rysunek 7. Wybrane rodzaje tarcz docierających: a) miedziana; b) żeliwna; c) żelazna; d) ceramiczna; e) na bazie cyny; f) z materiału kompozytowego na bazie stopu ołowiu, cyny i antymonu.....	25
Rysunek 8. Wybrane koncepcje budowy tarcz docierających: a) zawierającej otwory do gromadzenia zawiesiny mikroziaren ściernych; b) z umieszczonymi wkładkami ściernymi	26
Rysunek 9. Podział współczesnych technik wytwarzania i kształtowania wyrobów stosowanych w przemyśle	30
Rysunek 10. Klasyfikacja obszarów wykorzystania addytywnych metod wytwarzania	30
Rysunek 11. Podział metod przyrostowych z uwagi na rodzaj i formę przetwarzanego materiału	32
Rysunek 12. Etapy procesu szybkiego prototypowania	36
Rysunek 13. Zasada działania technologii SLS.....	37
Rysunek 14. Przykłady elementów należących do obszaru Rapid Tooling: a) szablon do wiercenia; b) sprawdzian służący do kontroli uszczelki; c) uchwyt montażowy; d) wkładki do szczęk imadła ..	39
Rysunek 15. Przykłady narzędzi ściernych wytwarzanych za pośrednictwem technologii addytywnych: a) prototypowe ściernice z metalu (od lewej) o strukturze ośmiościanu, plastra miodu oraz litej bryły; b) obręcz ściernicy o spoiwie żywicznym; c) tarcza docierająca o spoiwie żywicznym; d) tarcza docierająca z proszku tworzywa sztucznego.....	40
Rysunek 16. Wytwarzanie tarczy szlifierskiej z regularnie rozmieszczonymi ziarnami ściernymi: a) proces addytywnego nakładania ścierniwa; b) wykonane narzędzie z przestrzennie i regularnie rozmieszczonym ścierniwem.....	41
Rysunek 17. Sposób budowy ściernicy o porowatej strukturze za pomocą metody selektywnego przetapiania laserowego SLM.....	42
Rysunek 18. Sposób wytwarzania tarczy docierającej o spoiwie żywicznym: a) przygotowanie materiału w postaci płynnej żywicy oraz ścierniwa; b) proces nakładania materiału i jego utwardzania.....	43
Rysunek 19. Sposoby rozmieszczenia ziaren ściernych w narzędziu wykonanym za pomocą metody stereolitografii SLA: a) kołowe rozmieszczenie; b) prostokątne rozmieszczenie; c) spiralne rozmieszczenie.....	44
Rysunek 20. Przykład narzędzia o ściśle określonej geometrii zewnętrznej: a) model powierzchniowy (zapis w formacie STL); b) widok narzędzia wytworzonego za pomocą metody Film Transfer Imaging	45
Rysunek 21. Przykład narzędzia ściernego z otworami chłodzącymi: a) model komputerowy CAD; b) widok po zakończeniu procesu jego budowy przy użyciu technologii SLS	46
Rysunek 22. Koncepcja wytwarzanego przyrostowo korpusu tarczy szlifierskiej o porowatej strukturze	47
Rysunek 23. Przykładowa koncepcja zastosowania technologii przyrostowej (metody SLS) w wytwarzaniu innowacyjnych narzędzi ściernych.....	49
Rysunek 24. Prototypowa tarcza docierająca: a) model 3D CAD pojedynczego segmentu; b) sposób rozmieszczenia i orientacja segmentów w komorze roboczej drukarki 3D (źródło: BIBUS MENOS Sp. z o.o.)	54

Rysunek 25. Prototypowa tarcza docierająca wykonana metodą SLS: a) widok pojedynczego segmentu ściernego; b) tarcza docierająca złożona z ośmiu segmentów ściernych.....	55
Rysunek 26. Schemat badań eksperymentalnych docierania jednostronnego z zastosowaniem prototypowych tarcz docierających.....	56
Rysunek 27. Schemat badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	57
Rysunek 28. Schemat badań eksperymentalnych dotyczących modelowania efektów technologicznych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	58
Rysunek 29. Model stanowiska badawczego do docierania jednostronnego z dwoma niezależnymi i programowalnymi napędami.....	59
Rysunek 30. Układ kinematyczny stanowiska badawczego docierania jednotarczowego: R_{Dz} – promień zewnętrzny tarczy [mm], R_{Dw} – promień wewnętrzny tarczy [mm], R – odległość środka pierścienia prowadzącego od środka tarczy docierającej [mm], r_{OP} – odległość pomiędzy środkiem pierścienia prowadzącego, a środkiem przedmiotu obrabianego [mm], ω_t – prędkość kątowna tarczy [rad/s], ω_p – prędkość kątowna pierścienia prowadzącego [rad/s], ω_j – prędkość kątowna wyobraźnianego jarzma [rad/s]	60
Rysunek 31. Stanowisko badawcze do docierania jednostronnego powierzchni płaskich: 1 – jednostka komputerowa, 2 – indeksery silników krokowych, 3 – silniki krokowe 2-fazowe, 4 – pasek zębaty, 5 – prototypowa tarcza docierająca, 6 – pierścień prowadzący.....	61
Rysunek 32. Przykładowe programy indeksatorów silników krokowych: a) zespół napędowy tarczy docierającej ($n_t = 120$ obr/min, $\Delta t = 4$ min); b) zespół napędowy pierścienia prowadzącego ($n_p = 60$ obr/min, $\Delta t = 4$ min)	61, 62
Rysunek 33. Stanowisko badawcze do docierania jednostronnego powierzchni płaskich: a) widok ogólny segmentów ściernych przykręconych do metalowego korpusu urządzenia; b) widok na górną powierzchnię PO umieszczonych w separatorze przedmiotowym wewnątrz pierścienia prowadzącego: 7 – próbki obrabiane z Al_2O_3 , 8 – separator przedmiotowy	62
Rysunek 34. Przykład obserwacji powierzchni za pomocą mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000: a) prototypowy segment ścierny; b) próbka z ceramiki technicznej	63
Rysunek 35. Stanowisko do pomiaru błędu kształtu tarczy docierającej: 1 – cyfrowy czujnik zegarowy, 2 – uchwyt magnetyczny, 3 – docierak przykręcony do metalowego korpusu, 4 – punkty pomiarowe.....	64
Rysunek 36. Widok płaskiej powierzchni przykładowego segmentu ściernego: a) zdjęcie makroskopowe z widocznymi śladami warstw materiału; b) zdjęcie mikroskopowe	65
Rysunek 37. Miejsca wykonywanych pomiarów (1,2,3 – krótkie; 4,5,6 – długie) płaskiej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych w układzie 2D: a) prostopadłe do warstw; b) równoległe do warstw	66
Rysunek 38. Wartości parametru chropowatości R_a powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych tarczy docierającej przed obróbką docieraniem.....	66
Rysunek 39. Wartości parametru falistości W_a płaskiej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych tarczy docierającej przed obróbką docieraniem.....	67
Rysunek 40. Obszar badania topografii powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych za pomocą profilometru stykowego Hommel Etamic T8000.....	68
Rysunek 41. Topografie powierzchni wybranych segmentów ściernych uzyskane za pomocą profilometru stykowego Hommel Etamic T8000	69
Rysunek 42. Topografie powierzchni segmentów ściernych z wybranymi parametrami wysokościowymi uzyskane za pomocą profilometru optycznego S neox Sensofar	70
Rysunek 43. Wartości parametrów S_a oraz S_q płaskiej powierzchni czynnej prototypowych segmentów ściernych tarczy docierającej wyznaczone przy użyciu profilometru stykowego Hommel Etamic T8000	71
Rysunek 44. Miejsca wykonywanych pomiarów dla pojedynczego segmentu	72
Rysunek 45. Profile poszczególnych segmentów przykładowej tarczy docierającej wykorzystanej w badaniach eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej.....	72
Rysunek 46. Profile przykładowej prototypowej tarczy docierającej przed rozpoczęciem obróbki PO z ceramiki technicznej Al_2O_3 oraz prostoliniowego wzorca płaskości	73
Rysunek 47. Obrazy mikroskopowe wybranego fragmentu powierzchni próbki z ceramiki technicznej Al_2O_3 uzyskane przy użyciu: a) mikroskopu konfokalnego OLYMPUS Lext Ols4000; b) profilometru optycznego S neox Sensofar	74

Rysunek 48. Wartości parametrów chropowatości oraz falistości po określonych testach docierania jednostronnego próbek z ceramiki technicznej Al_2O_3 (T0 – stan początkowy próbek przed rozpoczęciem obróbki): a) Ra; b) Wa.....	77
Rysunek 49. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego podczas docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 : a) test T2; b) test T3.....	78
Rysunek 50. Przykładowe profile pierwotne P i falistości W powierzchni wybranych próbek z Al_2O_3 : a) przed rozpoczęciem procesu obróbki – stan T0; b) po teście T1; c) po teście T2; d) po teście T3.....	79
Rysunek 51. Fragment płaskiej czynnej powierzchni tarczy docierającej z zawieszoną ścierną: a) widok ogólny; b) utwardzone w narzędziu diamentowe ziarna ściernie po zakończeniu badań wstępnych.....	80
Rysunek 52. Wybrane fragmenty czynnej powierzchni tarczy docierającej: a), b) przed oczyszczeniem; c), d) po oczyszczeniu z zawiesziny ścierniej	80, 81
Rysunek 53. Wyodrębnienie profili dla przekrojów zawierających ziarna ściernie: a) mikroskopia konfokalna; b) mikroskopia interferometryczna.....	82
Rysunek 54. Trójwymiarowa analiza struktury powierzchni ceramiki technicznej przed procesem docierania: a) topografia powierzchni z wybranymi parametrami wysokościowymi; b) wyodrębniony profil powierzchni	83
Rysunek 55. Trójwymiarowa analiza struktury powierzchni ceramiki technicznej po procesie docierania (zakończeniu badań rozpoznawczych): a) topografia powierzchni z wybranymi parametrami wysokościowymi; b) wyodrębniony profil powierzchni.....	84
Rysunek 56. Tarcza docierająca stosowana w badaniach właściwych.....	86
Rysunek 57. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas pierwszej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu..	87
Rysunek 58. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) oraz falistości Wa (b) PO uzyskane podczas pierwszej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	88
Rysunek 59. Różnica w wysokości próbek z ceramiki technicznej po zakończonym procesie docierania jednostronnego (pierwszej serii badań właściwych)	88
Rysunek 60. Wartości skumulowane liniowego ubytku materiałowego Δh (a) oraz masowego ubytku materiałowego Δm (b) uzyskane podczas drugiej oraz trzeciej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	90
Rysunek 61. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) oraz falistości Wa (b) PO uzyskane podczas drugiej oraz trzeciej serii badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	91
Rysunek 62. Wybrane fragmenty czynnej powierzchni docieraka po zakończeniu pierwszej serii badań właściwych (120 minutach docierania): a), b) przed oczyszczeniem; c), d) po oczyszczeniu z zawiesziny ścierniej.....	92
Rysunek 63. Mapy konturowe powierzchni prototypowej tarczy docierającej wraz z wybranymi przekrojami wzdłuż profili: a) z obszaru z wystającym ziarnem ściernym; b) z obszaru z wgłębieniem po usuniętym ziarnie ściernym	93, 94
Rysunek 64. Wartości skumulowane liniowego ubytku materiałowego Δh (a) oraz masowego ubytku materiałowego Δm (b) uzyskane podczas badań sprawdzających docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	96
Rysunek 65. Wartości parametrów chropowatości Ra (a) oraz falistości Wa (b) PO uzyskane podczas badań sprawdzających docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	97
Rysunek 66. Efekty obróbkowe uzyskane podczas wydłużonej serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 : a) wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh oraz chropowatość Ra; b) wartość skumulowana masowego ubytku materiałowego Δm oraz falistość Wa.....	99
Rysunek 67. Wartości liniowego Δh oraz masowego Δm ubytku materiałowego w poszczególnych przedziałach czasowych uzyskane podczas wydłużonej serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	100
Rysunek 68. Efekty obróbkowe uzyskane podczas dodatkowej serii badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 bez wprowadzania świeżej porcji zawiesziny ścierniej: a) wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh oraz chropowatość Ra; b) wartość skumulowana masowego ubytku materiałowego Δm oraz falistość Wa.....	101

Rysunek 69. Topografie powierzchni próbek z Al_2O_3 : a) stan początkowy (przed obróbką); b) po drugiej serii badań właściwych; c) po trzeciej serii badań właściwych; d) po pierwszej serii badań sprawdzających; e) po drugiej serii badań sprawdzających; f) po trzeciej serii badań sprawdzających.....	103, 104
Rysunek 70. Wartości średnie parametrów S_a oraz S_q po poszczególnych etapach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	104
Rysunek 71. Porównanie efektów obróbkowych w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego tlenkowej ceramiki technicznej: a) wydajność procesu MRR wyrażona masowym ubytkiem materiałowym dm oraz chropowatość powierzchni R_a , b) wydajność procesu MRR wyrażona liniowym ubytkiem materiałowym dh oraz falistość powierzchni W_a	106
Rysunek 72. Zmiany parametru chropowatości R_a w poszczególnych seriach badań eksperymentalnych docierania jednostronnego ceramiki technicznej wyrażone współczynnikiem poprawy chropowatości RIR	107
Rysunek 73. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas pierwszej serii badań właściwych (1bw) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe.....	108
Rysunek 74. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas drugiej serii badań właściwych (2bw) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe.....	108
Rysunek 75. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas trzeciej serii badań właściwych (3bw) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe.....	109
Rysunek 76. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas pierwszej serii badań sprawdzających (1bs) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe.....	109
Rysunek 77. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas drugiej serii badań sprawdzających (2bs) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe.....	110
Rysunek 78. Wartość skumulowana liniowego ubytku materiałowego Δh uzyskana podczas trzeciej serii badań sprawdzających (3bs) docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 z zaznaczonymi liniami trendu oraz podziałem na charakterystyczne przedziały czasowe.....	110
Rysunek 79. Wartości parametrów chropowatości R_a (a) i falistości W_a (b) uzyskane podczas badań właściwych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	113
Rysunek 80. Wartości parametrów chropowatości R_a (a) i falistości W_a (b) uzyskane podczas badań sprawdzających docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3	114
Rysunek 81. Graficzna interpretacja wyników testu ANOVA Kruskala-Wallisa i test mediany z wykorzystaniem wykresu ramka-wąsy dla liniowego ubytku materiałowego Δh	116
Rysunek 82. Graficzna interpretacja wyników testu ANOVA Kruskala-Wallisa i test mediany z wykorzystaniem wykresu ramka-wąsy dla: a) parametru chropowatości R_a ; b) parametru falistości W_a	117
Rysunek 83. Profile narzędzia nr 1 stosowanego w badaniach właściwych: a) przed obróbką; b) po serii 1 (120 minutach); c) po serii 2 (240 minutach); d) po serii 3 (360 minutach).....	118, 119
Rysunek 84. Profile narzędzia nr 2 stosowanego w badaniach sprawdzających i dodatkowych: a) przed obróbką; b) po serii 1 (120 minutach); c) po serii 2 (240 minutach); d) po serii 3 – wydłużonej (840 minutach)	120, 121
Rysunek 85. Transformacja kątowna punktów przykładowego profilu narzędzia z zaznaczonym kątem obrotu γ	121
Rysunek 86. Profile analizowanych narzędzi poddane transformacji kątownej: a) narzędzie nr 1; b) narzędzie nr 2	122
Rysunek 87. Procedura wyznaczania odchyłki prostoliniowości: a) budowa modelu 1-1 na podstawie wyznaczonej linii odniesienia (trendu); b) przekształcenie modelu 1-1 do modelu 2-1 (obrót linii kontrolnych wokół odpowiednich punktów kontrolnych zgodnie z regułą $CLRS$); c) wyniki końcowe.....	124, 125
Rysunek 88. Efekty technologiczne uzyskane w poszczególnych układach badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej: a) masowy ubytek materiałowy Δm oraz chropowatość powierzchni R_a ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh oraz falistość powierzchni W_a	129
Rysunek 89. Wykresy interakcji dla ubytku materiałowego: a) masowego Δm ; b) liniowego Δh	130, 131

Rysunek 90. Wykresy interakcji dla parametrów chropowatości i falistości powierzchni: a) Ra; b) Wa	131, 132
Rysunek 91. Wartości średnie parametrów wysokościowych Sa oraz Sq w poszczególnych układach badań eksperymentalnych docierania ceramiki technicznej	132
Rysunek 92. Wybrane topografie powierzchni próbek z Al ₂ O ₃ : a) próbka surowa (przed obróbką); b) układ nr 6; c) układ nr 7; d) układ nr 8	133
Rysunek 93. Wykresy Pareto efektów standaryzowanych wielkości wejściowych i ich interakcji dla ubytku materiałowego: a) masowego Δm ; b) liniowego Δh	134
Rysunek 94. Wykresy Pareto efektów standaryzowanych wielkości wejściowych i ich interakcji dla parametrów chropowatości i falistości powierzchni: a) Ra; b) Wa	135
Rysunek 95. Powierzchnie odpowiedzi dla masowego ubytku materiałowego Δm : a) stała wartość zmiennej $x_3 = t = 90 \text{ min}$; b) stała wartość zmiennej $x_2 = v = 1,08 \text{ m/s}$; c) stała wartość zmiennej $x_1 = p = 9 \text{ kPa}$	137
Rysunek 96. Powierzchnie odpowiedzi dla liniowego ubytku materiałowego Δh : a) stała wartość zmiennej $x_3 = t = 90 \text{ min}$; b) stała wartość zmiennej $x_2 = v = 1,08 \text{ m/s}$; c) stała wartość zmiennej $x_1 = p = 9 \text{ kPa}$	138
Rysunek 97. Powierzchnia odpowiedzi dla parametru chropowatości powierzchni Ra	139
Rysunek 98. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6 \text{ kPa}$ (poziom dolny) oraz $v = 0,72 \text{ m/s}$ (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	140
Rysunek 99. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12 \text{ kPa}$ (poziom górny) oraz $v = 0,72 \text{ m/s}$ (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	141
Rysunek 100. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6 \text{ kPa}$ (poziom dolny) oraz $v = 1,44 \text{ m/s}$ (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	142
Rysunek 101. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12 \text{ kPa}$ (poziom górny) oraz $v = 1,44 \text{ m/s}$ (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	143
Rysunek 102. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6 \text{ kPa}$ (poziom dolny) oraz $v = 0,72 \text{ m/s}$ (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	144, 145
Rysunek 103. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12 \text{ kPa}$ (poziom górny) oraz $v = 0,72 \text{ m/s}$ (poziom dolny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	146
Rysunek 104. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 6 \text{ kPa}$ (poziom dolny) oraz $v = 1,44 \text{ m/s}$ (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	147
Rysunek 105. Porównanie wartości zmierzonych i prognozowanych dla $p = 12 \text{ kPa}$ (poziom górny) oraz $v = 1,44 \text{ m/s}$ (poziom górny): a) masowy ubytek materiałowy Δm ; b) liniowy ubytek materiałowy Δh ; c) chropowatość powierzchni Ra	148
Rysunek 106. Porównanie wydajności procesu obróbki MRR oraz parametru chropowatości Ra dla różnych typów narzędzi ściernych; kolejność zgodna z danymi w tabelach 25 oraz 26	150

WYKAZ TABEL

Tabela 1. Materiały ściernie stosowane w docieraniu	20
Tabela 2. Materiały stosowane na docieraki	22
Tabela 3. Zestawienie komercyjnie wykorzystywanych metod przyrostowych z charakterystyką sposobu budowy modelu fizycznego oraz źródła generowanej do procesu przyrostowego energii	33
Tabela 4. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne poliamidu PA 2200.....	53
Tabela 5. Zestawienie informacji oraz parametrów przyrostowego wytworzenia segmentów ściernych tarczy docierającej.....	54
Tabela 6. Zestaw parametrów obróbkowych docierania jednostronnego PO z ceramiki technicznej Al_2O_3 podczas badań rozpoznawczych	75
Tabela 7. Zestaw parametrów obróbkowych docierania jednostronnego ceramiki technicznej Al_2O_3 podczas badań właściwych	86
Tabela 8. Wartości wskaźników <i>MRR</i> oraz <i>RIR</i> dla poszczególnych serii badań eksperymentalnych.....	106
Tabela 9. Wyznaczone wartości błędów oraz współczynników linii trendu dla niezależnych przedziałów czasowych poszczególnych serii badań eksperymentalnych.....	112
Tabela 10. Analiza testu ANOVA Kruskala-Wallisa i test mediany pomiędzy seriami badań eksperymentalnych docierania jednostronnego próbek z Al_2O_3	115
Tabela 11. Odchyłki prostoliniowości płaskich powierzchni tarcz docierających wyznaczonych metodami najmniejszych kwadratów <i>LSQ</i> (<i>least-squares method</i>) oraz <i>CLRS</i> (<i>control line rotation scheme</i>).....	125
Tabela 12. Matryca planu PS/DK 2^3 wraz z uśrednionymi wynikami pomiarów rezultatów technologicznych.....	128
Tabela 13. Matryca planu PS/DK 2^3 wygenerowana z wykorzystaniem modułu DOE w programie Statistica.....	128
Tabela 14. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu matematycznego (regresyjnego) masowego ubytku materiałowego Δm	136
Tabela 15. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu matematycznego (regresyjnego) liniowego ubytku materiałowego Δh	136
Tabela 16. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu matematycznego (regresyjnego) parametru chropowatości R_a	136
Tabela 17. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)	139
Tabela 18. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny).....	140
Tabela 19. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny).....	141
Tabela 20. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny)	142
Tabela 21. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny)	144
Tabela 22. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 0,72$ m/s (poziom dolny).....	145
Tabela 23. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 6$ kPa (poziom dolny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny).....	146
Tabela 24. Porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz prognozowanych wartości dla $p = 12$ kPa (poziom górny) oraz $v = 1,44$ m/s (poziom górny)	147
Tabela 25. Charakterystyka wybranych procesów obróbki ścierniej z wykorzystaniem różnych typów narzędzi	149
Tabela 26. Wartości wskaźników <i>MRR</i> oraz <i>RIR</i> dla analizowanych typów narzędzi ściernych.....	150

