



**Politechnika Poznańska**

**Wydział Inżynierii Mechanicznej**

**Zakład Obróbki Skrawaniem**



mgr inż. Natalia ZNOJKIEWICZ

**MODELOWANIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI  
PO FREZOWANIU KOMPOZYTU  
ALUMIONIOWO-CERAMICZNEGO**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

Promotor: dr hab. inż. Paweł TWARDOWSKI, prof. PP

Poznań, listopad 2021

## **SPIS TREŚCI**

STRESZCZENIE .....	4
ABSTRACT .....	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	7
1. WPROWADZENIE .....	10
2. AKTUALNY STAN ZAGADNIENIA .....	12
2.1 Charakterystyka i zastosowanie kompozytów metalowo- ceramicznych....	12
2.2 Skrawalność materiałów kompozytowych .....	19
2.3 Modelowanie chropowatości powierzchni obrabianej podczas skrawania materiałów kompozytowych .....	32
2.3.1 Chropowatość powierzchni obrabianej.....	32
2.3.2 Modele analityczne.....	34
2.3.3 Modele statystyczne .....	42
2.3.4 Analiza pozostałych czynników .....	45
3. CEL, ZAKRES I METODYKA PRACY .....	49
3.1 Cel i zakres badań .....	49
3.2 Metodyka badań.....	54
4. BADANIA WSTĘPNE.....	57
4.1 Porównanie chropowatości powierzchni obrabianej dla różnych rodzajów frezów .....	57

4.2	Porównanie chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych materiałów narzędziowych przy stałej prędkości obrotowej .....	62
4.3	Porównanie chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych materiałów narzędziowych przy stałym posuwie na obrót .....	70
4.4	Analiza i podsumowanie badań wstępnych .....	79
5.	BADANIA ZASADNICZE .....	80
5.1	Analiza parametrów chropowatości powierzchni obrobionej przy zmiennych parametrach frezowania .....	80
5.1.1	Wpływ wartości posuwu na chropowatość powierzchni .....	80
5.1.2	Wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni.....	88
5.2	Pomiary i analiza parametrów chropowatości powierzchni obrobionej przy zmiennych posuwach i prędkości skrawania .....	98
5.3	Modelowanie i weryfikacja opracowanego modelu .....	107
6.	PODSUMOWANIE.....	117
7.	WNIOSKI .....	118
7.1	Wnioski poznawcze .....	118
7.2	Wnioski utylitarne.....	119
7.3	Wnioski do dalszych badań .....	119
8.	BIBLIOGRAFIA .....	120
8.1	Spis tabel.....	131
8.2	Spis rysunków .....	134

## **STRESZCZENIE**

Zaprezentowana praca dotyczy modelowania chropowatości powierzchni po frezowaniu kompozytu aluminiowo-ceramicznego. Całość została podzielona na dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich dotyczy wiedzy teoretycznej związanej z jej tematyką, natomiast druga odnosi się do badań eksperymentalnych oraz omówienia ich wyników.

W części teoretycznej dysertacji dokonano przeglądu współczesnej literatury, na podstawie której przedstawiono definicje podstawowych terminów stosowanych w pracy. Sklasyfikowano materiały kompozytowe oraz przedstawiono budowę i właściwości poszczególnych ich komponentów. W jej dalszej części opisane zostały metody wytwarzania wyrobów kompozytowych, oraz przedstawiono dotychczas stosowane modele stosowane do przewidywania chropowatości powierzchni.

Druga z zasadniczych, eksperymentalna część dysertacji, opisuje stanowiska pomiarowe oraz zastosowane materiały. Część eksperymentalną podzielono na dwa rodzaje badań: badania wstępne oraz zasadnicze.

W pierwszej części badań przeprowadzono trzy główne serie eksperymentów. W pierwszej serii porównano chropowatość powierzchni dla różnych rodzajów frezów. Następnie na podstawie pierwszej serii badań przeprowadzono dwie kolejne bardziej szczegółowe, w których porównano chropowatości powierzchni dla różnych materiałów narzędziowych przy stałej prędkości obrotowej oraz przy stałym posuwie na obrót. Tę część pracy podsumowano wnioskami.

Druga część badań eksperymentalnych dotyczyła pomiarów i analizy parametrów chropowatości powierzchni przy zmiennych posuwach i prędkościach skrawania, co pozwoliło na dokonanie oceny wpływu wartości posuwu na chropowatość powierzchni oraz wpływ wartości prędkości skrawania na chropowatość powierzchni.

Druga z części eksperymentalnych została zakończona opracowaniem modelu w oparciu o znany już w literaturze model Brammertza oraz weryfikacją opracowanego modelu.

Całość pracy podsumowano wnioskami oraz przedstawiono wnioski do dalszych badań.

## **MODELING SURFACE ROUGHNESS AFTER MILLING AN ALUMINUM-CERAMIC COMPOSITE**

### **ABSTRACT**

The presented work concerns the modeling of the surface roughness after milling of the aluminum-ceramic composite. The whole thing has been divided into two main parts. The first one concerns theoretical knowledge related to its subject, while the second one relates to experimental research and the discussion of its results.

In the theoretical part of the dissertation, a review of contemporary literature was made, on the basis of which the definitions of the basic terms used in the work were presented. Composite materials have been classified and the structure and properties of their individual components have been presented. In its further part, methods of producing composite products are described, and the models used to date for predicting surface roughness are presented.

The second of the main, experimental part of the dissertation describes the measurement stations and the materials used. The experimental part was divided into two types of research: preliminary research and basic research.

In the first part of the study, three main series of experiments were carried out. The first series compared the surface roughness for different types of cutters. Then, on the basis of the first series of tests, two more detailed tests were carried out, in which the surface roughness for different tool materials was compared at a constant rotational speed and at a constant feed per revolution. This part of the work was summarized with conclusions.

The second part of the experimental research concerned the measurement and analysis of surface roughness parameters at variable feeds and cutting speeds, which allowed to assess the impact of the feed value on the surface roughness and the impact of the cutting speed value on the surface roughness.

The second experimental part was completed with the development of the model based on the Brammertz model already known in the literature and with the verification of the developed model.

The whole work was summarized with conclusions and conclusions for further research.

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$a_e$ [mm]	– promieniowa głębokość skrawania;
$a_{emax}$ [m/min]	– maksymalna promieniowa głębokość skrawania;
$a_{emin}$ [m/min]	– minimalna promieniowa głębokość skrawania;
$a_p$ [mm]	– szerokość frezowania;
$A_y$ [m/s <sup>2</sup> ]	– amplituda drgań;
$b_r$ [mm]	– szerokość wierszowania;
CBN	– polikrystaliczny regularny azotek boru;
CVD	– węgiel spiekany z powłoką diamentową;
$d$ [mm]	– średnica narzędzia;
$D_y$ [mm]	– przemieszczenie frezu;
$e_{dop} \left[ \frac{g \cdot mm}{kg} \right]$	– dopuszczalne niewyważenie właściwe;
$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	– moduł Younga;
$f$ [mm/obr]	– posuw na obrót;
$f_{max}$ [mm/obr]	– maksymalny posuw na obrót;
$f_{min}$ [mm/obr]	– minimalny posuw na obrót;
$f_z$ [mm/ostrze]	– posuw na ostrze;
$F_f$ [N]	– siła posuwowa;
$F_{fN}$ [N]	– siła posuwowa normalna;
$F_{od}$ [N]	– siła odśrodkowa;
$F_x, F_y$ [N]	– składowe siły całkowitej
$h_{min}$ [mm]	– minimalna grubość warstwy skrawanej;
H [HV]	– twardość Vickersa;
HSM	– obróbka z dużymi prędkościami skrawania;

HSS	– stal szybko tnąca;
$j$ [N/ $\mu\text{m}$ ]	– sztywność styczna;
$k$	– sztywność układu;
$k_1, k_2, k_3$	– współczynniki związane z powrotem sprężystym warstwy skrawanej;
$l_n$ [mm]	– odcinek pomiarowy;
$l_r$ [mm]	– odcinek elementarny;
$L$ [mm]	– długość frezu
$L_f$ [mm]	– droga frezowania;
$m$ [kg]	– masa
MMC	– kompozyty z metalową osnową, (ang. <i>Metal Matrix Composites</i> )
$n$ [obr/min]	– prędkość obrotowa wrzeciona;
OUPN	– układ obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie;
$r_\epsilon$ [mm]	– promień naroża;
$R_a, R_t, R_q, R_z$ , [ $\mu\text{m}$ ]	– parametry chropowatości powierzchni 2D;
$R_{zt}$ , [ $\mu\text{m}$ ]	– wartość teoretyczna parametru chropowatości powierzchni;
$S_a, S_t, S_q, S_v, S_z$ , [ $\mu\text{m}$ ]	– parametry chropowatości powierzchni 3D;
$S_{zt}$ , [ $\mu\text{m}$ ]	– wartość teoretyczna parametru chropowatości powierzchni;
$t$ [ $^\circ\text{C}$ ]	– temperatura;
$U_{dop}$ [g mm]	– dopuszczalne niewyważenie resztkowe;
$VB_B$ [mm]	– zużycie na powierzchni przyłożenia ostrza;
$v_c$ [m/min]	– prędkość skrawania;
$v_{cmax}$ [m/min]	– maksymalna prędkość skrawania;
$v_{cmin}$ [m/min]	– minimalna prędkość skrawania;



## Wykaz ważniejszych oznaczeń

---

$v_f$ [mm/min]	– prędkość ruchu posuwowego;
WC	– węgiel spiekany;
$y$ [ $\mu\text{m}$ ]	– ugięcie frezu;
$z$	– liczba ostrzy narzędzia;
$\Delta e_i$ [mm]	– składnik ujmujący wpływ bicia promieniowego;
$\lambda_s$ [rad]	– kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej;
$\xi$	– współczynnik tłumienia;
$\omega$ [rad/s]	– prędkość kątowna;
$\omega_c$	– częstość drgań samowzbudnych;
$\omega_o$	– częstość własna;

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach wykorzystanie kompozytów z osnową metaliczną (MMC) wzrosło w różnych dziedzinach nauki i technologii ze względu na ich szczególne właściwości mechaniczne i fizyczne.

Materiały MMC, w szczególności kompozyty na bazie aluminium, charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości do masy, wysoką sztywnością, niższym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej, wysoką przewodnością cieplną oraz odpornością na korozję i zużycie. Dlatego materiały te mają potencjał, aby zastąpić konwencjonalne materiały w różnych dziedzinach zastosowań, takich jak motoryzacja, lotnictwo i kosmonautyka, a także w innych zaawansowanych gałęziach przemysłu. W wyniku tych potencjalnych zastosowań istnieje potrzeba zrozumienia problemów związanych z obróbką tych kompozytów.

Obróbka MMC jest dość złożonym zadaniem ze względu na jej niejednorodność oraz fakt, że wzmocnienia są wyjątkowo twarde i odpowiedzialne za złożone odkształcenia, wysokie zużycie narzędzia i gorsze wykończenie powierzchni.

W analizie stanu zagadnienia rozprawy dokonano przeglądu literaturowego dotyczącego charakterystyki i zastosowania kompozytów metalowo ceramicznych, a także skrawalności tych materiałów skupiając się głównie na procesie frezowania.

Dokonano również przeglądu literatury pod kątem modelowania chropowatości powierzchni. Dla przedstawienia istoty omawianego problemu, niektóre zacytowane przykłady dotyczą również innych materiałów a także innych odmian kinematycznych frezowania oraz wiercenia i toczenia. Na podstawie analizy literatury zaobserwowano brak modeli, które uwzględniałyby prędkość skrawania, której wzrost powoduje zmniejszenie parametrów chropowatości powierzchni obrobionej. Dodatkowo przedstawiane w literaturze modele są niedokładne i generują duże błędy dla małych wartości posuwu, co jest nieprzydatne dla obróbki dokładnej.

W ramach badań własnych dokonano porównania chropowatości powierzchni obrobionej kompozytu metalowo-ceramicznego dla różnych materiałów narzędziowych przy stałej prędkości obrotowej oraz przy stałej prędkości posuwowej. Następnie sprawdzono wpływ wartości posuwu oraz prędkości skrawania na chropowatość powierzchni kompozytu aluminiowo-ceramicznego.

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych oraz analizy literatury sformułowano model hybrydowy. Model ten składa się z członu analitycznego, który uwzględnia posuw oraz członu doświadczalnego uwzględniającego prędkość skrawania, dla którego współczynniki wyznaczone są doświadczalnie. Model ten następnie zweryfikowano doświadczalnie w zakresie zmiennych parametrów frezowania.

## **2. AKTUALNY STAN ZAGADNIENIA**

### **2.1 Charakterystyka i zastosowanie kompozytów metalowo-ceramicznych**

W ostatnich dziesięcioleciach XX wieku, można było zaobserwować niezwykle dynamiczny rozwój materiałów konstrukcyjnych. Istnieje powszechnie akceptowany podział materiałów na cztery podstawowe rodzaje:

- metale,
- ceramikę,
- polimery,
- kompozyty [6, 7].

Rozwój techniki uwarunkowany jest, w dużej mierze, zaawansowaniem inżynierii materiałowej. Ponadto, wiele dziedzin przemysłu wywiera nacisk na inżynierię materiałową, domagając się coraz to nowszych materiałów konstrukcyjnych. Najintensywniej rozwijaną grupą wśród nich, są kompozyty [7, 8, 17].

Historia kompozytów wytwarzanych przez człowieka sięga nawet 10000 lat przed naszą erą. Jednak początkowo ludzie wytwarzali kompozyty w sposób jedynie intuicyjny, np. w starożytnej Mezopotamii mieszano glinę ze słomą, aby otrzymać materiał o większej wytrzymałości i trwałości. Również sama przyroda, drogą ewolucji wytworzyła kompozyty. Łodygi roślin, pnie drzew czy gałęzie mają budowę kompozytową: zbudowane są włókien krystalicznej celulozy otoczonych przez ligninę i hemicelulozę [7].

Kompozyty są liczną i różnorodną grupą materiałów konstrukcyjnych. W literaturze trudno jest znaleźć jednoznaczną definicję materiału kompozytowego. Jednym z powodów jest fakt, że terminologia związana z kompozytami pochodzi z różnych obszarów nauki i techniki, takich jak: polimery, metaloznawstwo, ceramika, inżynieria materiałowa i inne [9, 91].

Według jednej z obowiązujących w literaturze definicji materiałem kompozytowym jest materiał, który powstał przez ścisłe zespolenie, co najmniej dwóch chemicznie różnych materiałów (tzw. faz – zbrojącej i osnowy) w taki sposób, aby mimo wyraźnej granicy rozdziału między nimi nastąpiło dobre i ciągłe połączenie składników oraz moż-

liwie równomierne rozłożenie fazy zbrojącej w osnowie [9]. Definicja ta często uzupełniana jest zapisem dotyczącym połączenia elementów kompozytu, które powinno zachodzić na poziomie makroskopowym. Jednak, stwierdzenie to wyłącza z grupy materiałów kompozytowych np. stopy metali, które w skali mikroskopowej tworzą kompozycje wielu składników, a na poziomie makroskopowym zachowują się jak typowe materiały jednorodne [6, 7, 8, 9].

Występuje także inna często stosowana zwłaszcza w literaturze anglojęzycznej definicja kompozytów, zaproponowana w 1967 roku przez Krocka i Broutmana [10]. Definicja ta mówi, że kompozyt charakteryzuje się następującymi cechami:

- jest wytworzony przez człowieka
- musi składać się, z co najmniej dwóch różnych chemicznie materiałów z wyraźnie zaznaczonymi granicami między fazami
- komponenty materiału kompozytowego tworzą go przez udział w całej jego objętości
- a także materiał taki powinien mieć właściwości różne od jego poszczególnych komponentów.

Klasyfikacja materiałów kompozytowych (MK) obejmuje głównie podział ze względu na osnowę i rodzaj fazy zbrojącej.

W zależności od rodzaju fazy zbrojącej wyróżniamy kompozyty:

- zbrojone włóknami: ciągłymi, krótkimi,
- zbrojone cząsteczkami,
- zbrojone dyspersyjnie [6, 7, 9].

Materiały kompozytowe można podzielić także stosując kryterium ich przeznaczenia. Wśród nich wyróżniamy kompozyty:

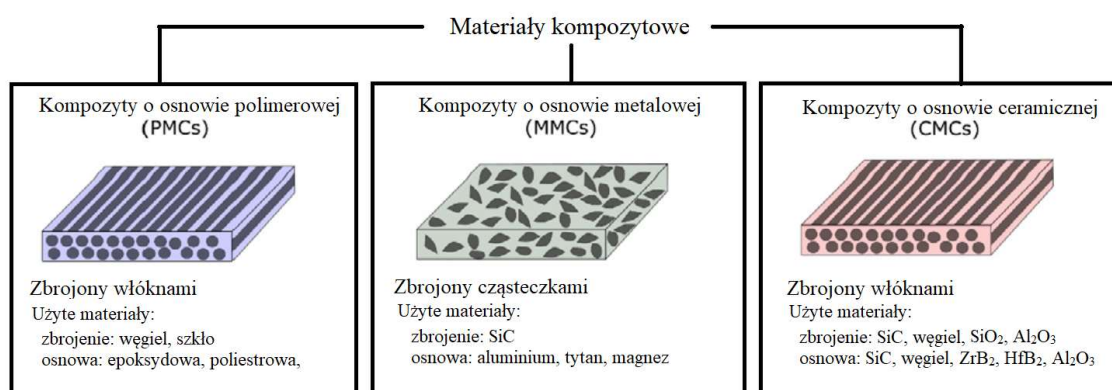
- konstrukcyjne,
- funkcjonalne [7, 30].

Najczęściej jednak spotykanym jest podział w zależności od zastosowanej osnowy (Rys. 2.1):

- osnowy polimerowej (PMC – ang. *Polymer Matrix Composites*),
- osnowy ceramicznej (CMC – ang. *Ceramic Matrix Composites*),

- osnowy metalicznej (MMC - ang. *Metal Matrix Composites*) [6, 7, 9, 30].

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie metalowymi materiałami kompozytowymi. Kompozyty z metalową osnową (MMC) to nowa klasa materiałów, które szybko zastępują konwencjonalne materiały w różnych zastosowaniach inżynierskich, takich jak przemysł lotniczy i samochodowy. Kompozyty są odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na materiały o lepszych wskaźnikach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, a ponadto pozwalają na świadome kształtowanie pożądanych własności w stopniu niedostępnym w przypadku pozostałych typów materiałów [25, 28, 29, 102].



Rys. 2.1 Podział materiałów kompozytowych [25]

Metalowe materiały kompozytowe (MMCs) są to materiały wytworzone w sposób sztuczny i świadomy, złożone z co najmniej z dwóch faz oddzielonych wyraźnymi granicami międzyfazowymi, gdzie jedna z faz jest fazą umacniającą. Najpopularniejszymi wzmocnieniami są węgiel krzemu (SiC) oraz tlenek glinu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Najbardziej rozpowszechnionym tworzywem na osnowę metalową są stopy metali lekkich, takich jak aluminium, tytan czy magnez. Materiały te mają wiele zalet; w porównaniu do metali i ich stopów, wykazują większą oszczędność masy, większą stabilność wymiarów większą odporność na zmęczenie cykliczne czy większą odporność na pełzanie w podwyższonych temperaturach. Ponadto, posiadają wyższy moduł Younga, lepszą charakterystykę zmęczeniową i wysoką odporność na korozję [30, 34, 43, 84].

Możemy wyróżnić różne rodzaje metalowych materiałów kompozytowych MMC (Metal Matrix Composites) [79, 88]:

- metale komórkowe (pianki metalowe): są podobne do MMC, ponieważ często powstają z połączenia dwóch oddzielnych składników, w wyniku

których powstaje metalowa osnowa, a drugim składnikiem jest gaz w zamkniętych lub otwartych porach: nie ma jednak wyraźnej granicy rozdziału między fazą gazową a matrycą.

- cermetale (cermety): kompozyty z metalową osnową z trójwymiarowo przesiąkającym wzmocnieniem ceramicznym, zwykle z dużo większą ilością ceramiki niż metalu (na ogół zawiera mniej niż 20% metalu objętościowo). Ze względu na strukturę składników, cermetale można uważać zarówno za kompozyt ceramiczny, jak i kompozyt z osnową metaliczną.
- kompozyty metalowe zbrojone włóknami ciągłymi: kompozyt z metalową osnową ze wzmocnieniem z włókien ciągłych.
- kompozyty metalowe zbrojone dyspersyjnie: kompozyt z metalową osnową ze wzmocnieniem dyspersyjnym zajmujący w materiale ułamek objętościowy większy niż 5% (w innym przypadku za materiał uważa się metal wzmocniony dyspersyjnie).
- kompozyty metalowe zbrojone pojedynczymi włóknami): kompozyt z metalową osnową ze wzmocnieniem z żyłki:
  - kompozyty metalowe zbrojone cząstkami: kompozyt z metalową osnową ze wzmocnieniem w postaci cząstek stałych o udziale objętościowym większym niż 5% w materiale (w przeciwnym razie cząstki stałe są uważane za wtrącenia).
  - kompozyty metalowe zbrojone włóknami krótkimi: kompozyt z metalową osnową z krótkim wzmocnieniem włóknem.
  - kompozyty metalowe zbrojone wiskerami.

Metalowe materiały kompozytowe klasyfikujemy według sposobu ich wytwarzania. Można podzielić je na kompozyty *ex situ* i *in situ*. W przypadku kompozytów *ex situ* fazę wzmacniającą przygotowuje się w odrębnym procesie, a następnie wprowadza do materiału osnowy. Są to kompozyty metalowe (pod nazwą Duralcan) na bazie odlewniczych stopów aluminium, zbrojone cząstkami SiC. Kompozyty te znalazły zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. W kompozytach *in situ* natomiast, faza wzmacniająca powstaje w ciekłej osnowie kompozytu podczas procesu metalurgicznego w wyniku reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy składnikami kompozytu [34, 71, 84].

Wytwarzać kompozyty o osnowie metalicznej, można różnymi metodami, zależnie od stanu materiału wyjściowego (Rys. 2.2). Można je wytwarzać ze stanu stałego, ciekłego lub gazowego [6, 29, 71].

Do metod wytwarzania ze stanu stałego zaliczamy:

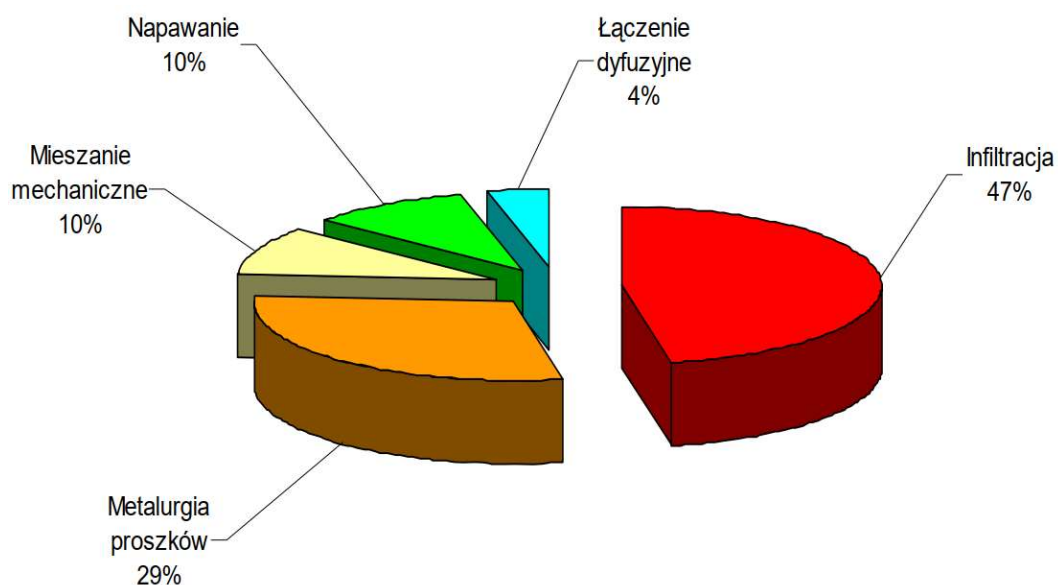
- metalurgię proszków,
- prasowanie i zgrzewanie dyfuzyjne,
- metody przeróbki plastycznej (walcowanie, wyciskanie, ciągnięcie).

Do metod wytwarzania ze stanu ciekłego zaliczamy:\

- odlewanie swobodne,
- nasycanie swobodne,
- nasycanie wymuszone (ciśnieniowe) – infiltracja lub prasowanie.

Do metod wytwarzania z fazy gazowej zaliczamy:

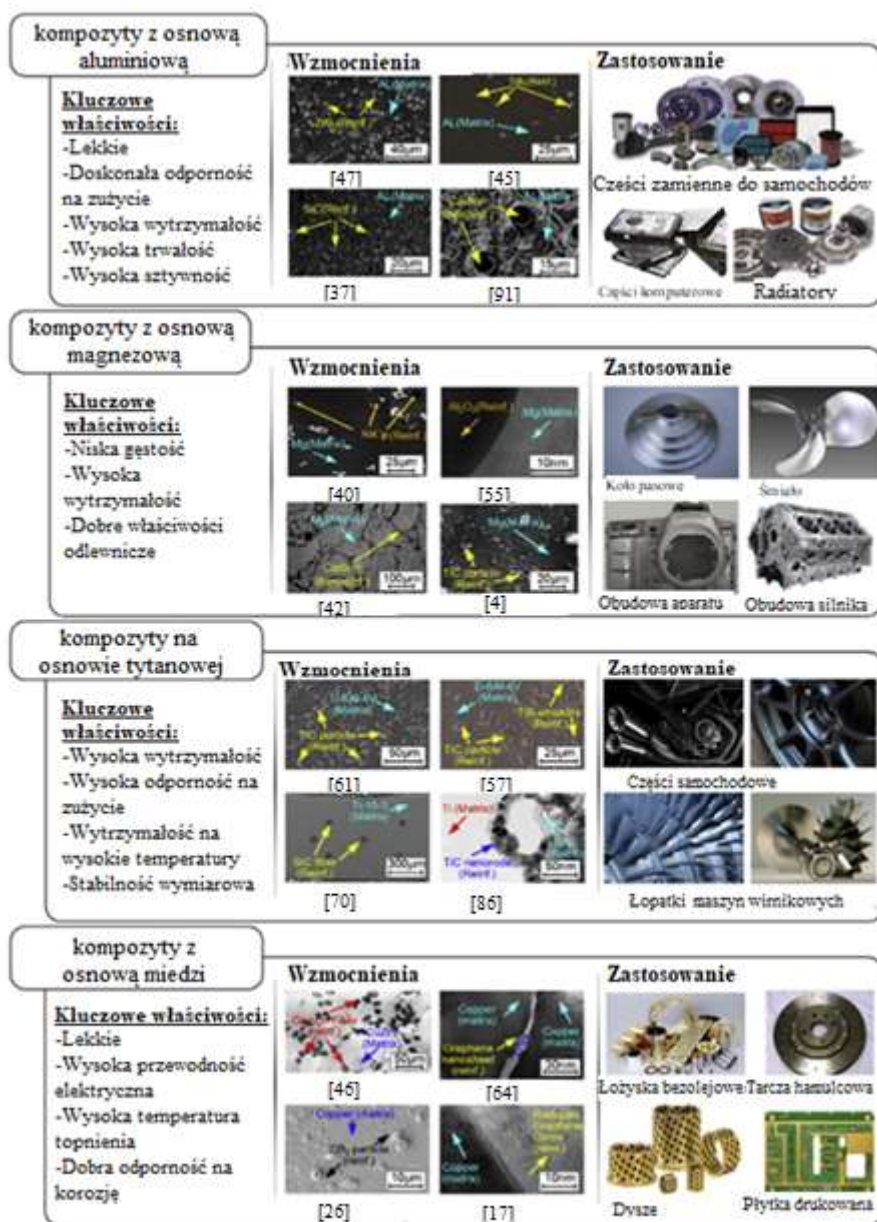
- napyłanie plazmowe,
- implantacje jonów.



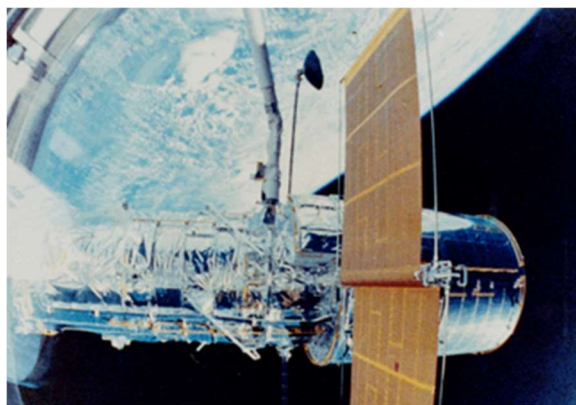
Rys. 2.2. Udział procentowy procesów wytwórczych stosowanych przez producentów kompozytów metalowych [93]



Metalowe materiały kompozytowe mają zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (Rys. 2.3), przede wszystkim w przemyśle kosmicznym, lotniczym (jako materiały na części do samolotów wojskowych i cywilnych, takie jak: elementy nośne, obudowy skrzyń biegów, łopatki wentylatora i sprężarki), motoryzacyjnym (jako materiały: na tłoki, tarcze i bębny hamulcowe) czy elektrotechnicznym (jako materiały stosowane na radiatory i obudowy urządzeń elektrycznych). Istnieją też bardziej spektakularne zastosowania kompozytów jak np. wysięgnik anteny teleskopu Hubble'a wykonany z kompozytu o osnowie stopu Al6061 zbrojonego włóknami grafitu (Rys. 2.4). [43, 58, 94]



Rys. 2.3. Typowe typy osnów, kategorie zbrojenia i kluczowe właściwości, a także powszechne zastosowania MMC na bazie Al, Mg, Ti i Co [58]



*Rys. 2.4. Wysięgnik anteny teleskopu Hubble'a wykonany z kompozytu o osnowie stopu Al6061 zbrojonego włóknami grafitu*

Kompozyty o osnowie metali lekkich, a zwłaszcza o osnowie aluminium wzmocniane cząstkami ceramicznymi, można stosować w wielu gałęziach przemysłu przede wszystkim motoryzacyjnego, lotniczego, energetycznego, elektronicznego, maszynowego, a także, jako zamienniki stosowanych dotychczas stopów aluminium-krzemowych i aluminium-miedziowych [7, 19, 35].

Stopy aluminium charakteryzują się doskonałą przewodnością cieplną i niższą wagą, dzięki czemu mają liczne zastosowania w dziedzinie przemysłu samochodowego, lotniczego i mineralnego [10, 11, 12].

Ponad 50% produkcji MMC ma zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. MMC są stosowane w nowoczesnych samochodach ze względu na ich kosztowne techniki obróbki. Nowoczesne samochody wyposażone są w duże ekrany, urządzenia elektroniczne, gadżety multimedialne itp.. To powoduje dodatkowy ciężar pojazdu, co skutkuje zwiększonym zużyciem paliwa i zanieczyszczeniem środowiska. Dlatego użycie lekkiego materiału z odpowiednią wytrzymałością stało się priorytetem dla badaczy [94, 100]

Wczesne i udane zastosowanie silnika zostało wybiórczo wzmocnione aluminiumowymi tłokami w silniku Toyota Diesel 4. W tym zastosowaniu preforma z włókna ciętego z tlenku glinu i krzemionki została włączona do obszaru rowka pierścieniowego tłoka podczas odlewania aluminium pod ciśnieniem. Tradycyjny tłok silnika wysokoprężnego jest wykonany ze stopu odlewniczego Al-Si z koroną wykonaną z żeliwa niklowego. Główna nieruchomość wymaganiem była zwiększona odporność na zużycie w tym ob-

szarze. W poprzednim podejściu zastosowano pierścień odporny na nikiel, który zwiększał wagę i różnił się współczynnikiem rozszerzalności cieplnej od materiału tłoka ze stopu aluminium. Materiały z osnową aluminiową wzmocnione cząsteczkami SiC były również używane w zastosowaniach tłokowych, głównie w samochodach wyścigowych drag. W tym przypadku niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej MMC w porównaniu do tradycyjnego aluminium pozwolił na zmniejszenie luzów między tłokiem a ścianą cylindra, prowadząc do poprawy wydajności. [29]

Według [29] już w 1985 r. rozpoczęły się wstępne badania dotyczące obróbki wiórowej oraz ścierniej MMC, a następnie opublikowano wiele prac badawczych dotyczących obróbki materiałów kompozytowych na osnowie aluminium. Prawie wszystkie badania dotyczące skrawania kompozytów na osnowie aluminium można podzielić na trzy kategorie [89]:

- Badania eksperymentalne, które porównują różne materiały narzędziowe oraz zastosowane powłoki przeciwzużyciowe podczas obróbki MMC.
- Badania eksperymentalne dotyczące wykorzystania narzędzi z PCD, powierzchni obrobionej, optymalizacji parametrów skrawania, a także geometrii narzędzia.
- Badania empiryczne i numeryczne dotyczące trwałości narzędzi.
- Optymalizacji mechanizmu zużycia ściernego

## **2.2 Skrawalność materiałów kompozytowych**

Od wszystkich materiałów konstrukcyjnych wymaga się przede wszystkim cech, które umożliwiają właściwe działanie konstrukcji (np. odpowiedniej wytrzymałości czy twardości). Jednak równie ważnym aspektem są też technologiczne cechy materiału, jak podatność na obróbkę, czyli skrawalność [26, 37].

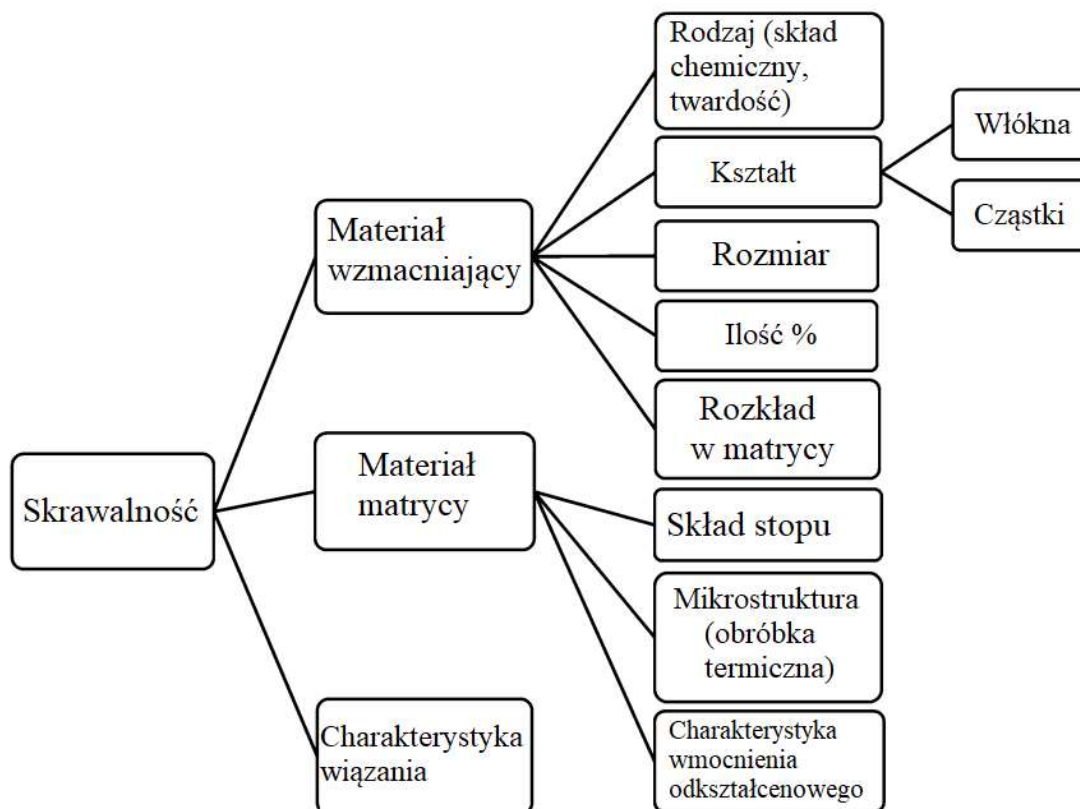
Skrawalność to zespół cech materiału, który ściśle zależy od warunków obróbki oraz od kryterium przyjętego do oceny obróbki. Skrawalność nie jest swoistą cechą materiału jednoznacznie definiowalną i wymierną. Ogólnie uważa się, że jest to poziom trudności napotkanej przy kształtowaniu przedmiotu przy użyciu narzędzia. Na przykład stal średniowęglowa jest uznawana za łatwiejszą w obróbce w odniesieniu do stopu żaroodpornego, żeliwo szare wykazuje mniejszą trudność niż ten sam materiał wlany do

osnowy, podczas gdy stal niskowęglowa może wykazywać więcej problemów w obróbce skrawaniem w odniesieniu do niektórych stali stopowych. Dlatego ze względu na różne metody i warunki pracy, a także charakterystykę narzędzia, pojęcie obrabialności jest często niejednoznaczne i niełatwe do zmierzenia i porównania. [24, 51]

Właściwości chemiczne i mechaniczne materiałów, właściwości strukturalne, na które z kolei duży wpływ ma obróbka termiczna, cząstki wzmacniające i inne wtrącenia, zmiany powierzchni, takie jak utlenianie lub utwardzone warstwy wynikające z poprzedniego procesu produkcyjnego, wszystko to wpływa na skrawalność. Jednak również narost, który dla danego materiału zależy od warunków obróbki, geometrii narzędzia, rodzaju obrabiarki, a także ogólnych warunków obróbki, decyduje o skrawalności materiału. [24]

Ponieważ materiały kompozytowe są stosunkowo nową grupą materiałów, a ich cechą jest niejednorodność oraz obecność dwóch lub więcej odrębnych faz, z których jedna zawiera twarde cząstki we wzmocnieniu coraz więcej badaczy postanawia podjąć się tematyki skrawalności tych materiałów.

Na Rys. 2.5 przedstawiono charakterystyki materiałów składowych, które mogą wpływać na skrawalność MMC. Jak można wywnioskować ze schematu blokowego, znajomość właściwości poszczególnych elementów nie jest wystarczająca do prognozowania zachowania materiału w procesie skrawania. Ważne jest, aby wziąć pod uwagę interakcje między materiałami składowymi kompozytu, w szczególności wytrzymałość wiązania na powierzchni styku, która może wpływać zarówno, na jakość obrabianej powierzchni, jak i zużycie narzędzia, a także wszystkie te cechy, które wywodzą się z poprzednich procesów produkcyjnych zastosowanych do wytworzenia kompozytu, np. jednorodność rozkładu zbrojenia, jego wyrównanie w jednym kierunku, krystaliczna struktura osnowy i tak dalej.[24]



Rys. 2.5. Charakterystyka materiałów składowych związana ze skrawalnością MMC [24]

Głównym mechanizmem zużycia podczas obróbki MMC jest zużycie ściernie. Dominujące zużycie rozwija się głównie na powierzchni przyłożenia narzędzia, ale ślady zużycia występują również na powierzchni natarcia.

Zużycie ściernie, zwane również zużyciem adhezyjnym, które może być związane z powstawaniem narostu, było często obserwowane przez badaczy. Występować może również zużycie kraterowe, zwłaszcza przy największych prędkościach skrawania, chociaż nie stanowi ono decydującej przyczyny zużycia narzędzia [44].

Szczegółowe badania krawędzi skrawających pod skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM), wykazały, że podczas obróbki kompozytu Al-SiCp przy użyciu niepowlekanych narzędzi z węgla spiekanego, szczególnie przy dużych prędkościach skrawania, mogą wystąpić wykruszenia krawędzi, jak opisano w [17]. Ci sami autorzy zauważyli, że przy dużych prędkościach skrawania, narzędzia z niepowlekanych węglików, w których pojawiły się wykruszenia, mogą dawać gorsze wykończenie powierzchni niż w przypadku narzędzi powlekanych, co jest zachowaniem odwrotnym do tego, co

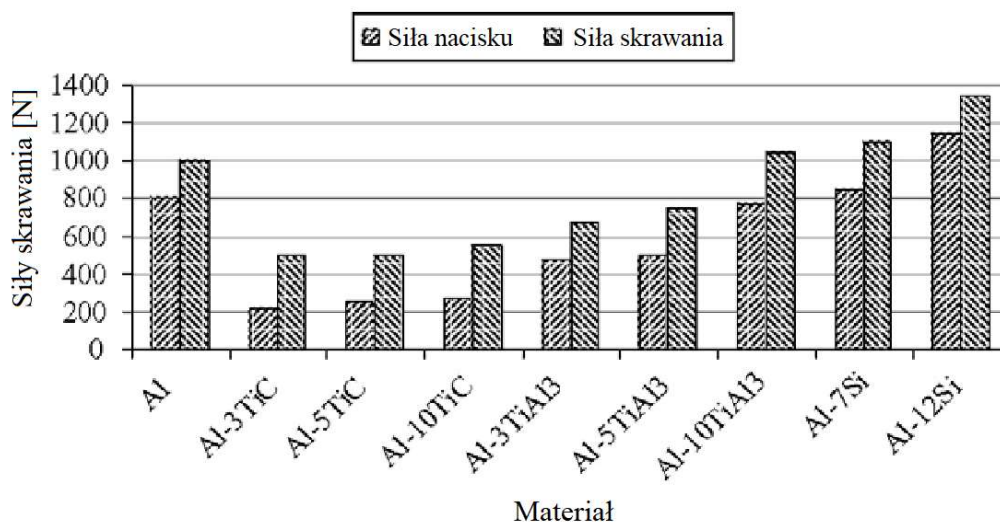
zwykle ma miejsce podczas obróbki jednorodnych materiałów, takich jak stopy aluminium.

Ze względu na wyjątkowo ścierną naturę MMC, tylko narzędzia z polikrystalicznego diamentu (PCD) osiągają akceptowalną trwałość [20, 21, 53, 59, 76], ponieważ diament jest twardszy niż węgiel krzemu (SiC) i tlenek glinu ( $Al_2O_3$ ) i nie wykazuje żadnych właściwości chemicznych ze skłonnością do reagowania z obrabianym przedmiotem. Dlatego wielu badaczy zaleca stosowanie takiego materiału w obróbce MMC. Zasadniczo należy wykluczyć narzędzia ze stali szybko tnącej (HSS), natomiast narzędzia z węglików spiekanych, zarówno powlekane, jak i niepowlekane, a nawet stale szybko tnące powlekane TiN mogą być ekonomicznym wyborem w przypadku produkcji krótkoseryjnej [17, 72]. Niektóre wyniki wskazują, że powłoka nie jest korzystna ekonomicznie ze względu na niewielki wzrost trwałości narzędzia w porównaniu ze stosunkowo wysokim kosztem [44,77].

Najpopularniejszymi materiałami zbrojeniowymi są SiC i  $Al_2O_3$ , chociaż w niektórych przypadkach stosuje się również  $B_4C$  i TiC. Wszystkie te materiały są niezwykle twarde i wyjątkowo ściernie dla narzędzi. Niestety badania porównawcze dotyczące skrawalności MMC zawierających różne materiały wzmacniające nie są liczne. Większość artykułów dotyczących obróbki MMC dotyczy kompozytów wzmacnianych SiC, zarówno w postaci wiskerów jak i cząstek. [24, 46, 57, 86]

Analiza porównawcza różnych materiałów wzmacniających została wykonana przez Raya i in. [83]. Przeanalizowali oni skrawalność wytworzonych in situ MMC na osnowie aluminiowej wzmocnionych TiC,  $TiAl_3$  i Si; zachowanie kompozytów porównano z zachowaniem niezbrojonego aluminium. Odkryli, że najlepszą skrawalność pod względem chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego i sił skrawania wykazano podczas obróbki MMC Al-TiC. Dla wszystkich kompozytów siła skrawania wzrastała wraz z zawartością zbrojenia (Rys. 2.6). Kompozyt Al-TiC wykazał najniższą wartość i zmniejszoną chropowatość. Fakt ten przypisywano brakowi narostu dla Al-TiC, co zapewnia mniejsze zużycie ściernie narzędzia i w konsekwencji lepszą chropowatość powierzchni.

Porównując SiC z  $Al_2O_3$  należy wziąć pod uwagę, że ten pierwszy jest twardszy od drugiego, dlatego należy spodziewać się szybszego zużycia narzędzia podczas obróbki MMC z cząstkami SiC.

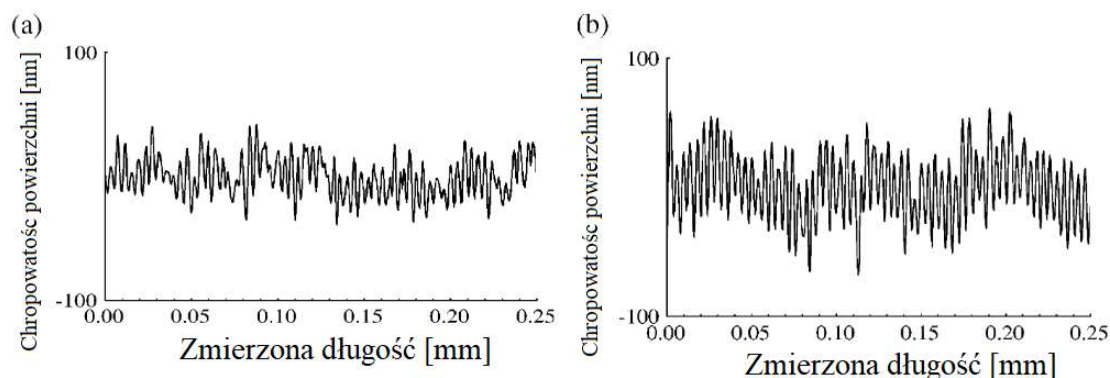


Rys. 2.6. Siły skrawania i nacisku dla różnych materiałów kompozytowych i stopów [83]

Niewiele badań dotyczy skrawalności kompozytów na osnowie aluminium wzmocnionych  $B_4C$ . Karacas i in. [49] przeprowadzili badania eksperymentalne mające na celu porównanie wydajności powlekanych i niepowlekanych węglików wolframu w obróbce takiego kompozytu. Autorzy opisują zużycie powierzchni przyłożenia i doszli do wniosku, że najlepsze osiągi wykazały narzędzia z potrójnie powlekanych węglików. Odkryli, że oprócz zużycia ściernego istotne było również zużycie adhezyjne związane z powstawaniem narostu, które występowało przy wszystkich prędkościach skrawania.

Skrawalność MMC zależy również od wiązania międzyfazowego, które może znacząco wpłynąć na jakość obróbki pod względem chropowatości powierzchni i uszkodzenia materiału. Siła wiązania międzyfazowego zależy zarówno od charakteru zbrojenia, jak i składu osnowy. [24, 40]

Przyjmuje się, że skrawalność zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału objętościowego ilości zbrojenia. Cheung i in. [15] stwierdzili, że chropowatość powierzchni wzrasta wraz ze wzrostem udziału objętościowego wiskerów (Rys. 2.7). Wraz ze wzrostem udziału objętościowego na obrabianej powierzchni powstają większe ślady obróbkowe i wzrasta falistość powierzchni. Wynik ten można wytłumaczyć następującym mechanizmem: po przejściu narzędzia relaksacja naprężeń krawędzi skrawającej narzędzia związana ze skrawaniem twardych wiskerów SiC wywołuje drgania powodujące wzrost falistości powierzchni.



Rys. 2.7. Wpływ różnej ilości udziału objętościowego wiskerów SiC na profile chropowatości:  
(a) 15% i (b) 20%. [15]

Chandrasekaran i Johansson [12] zbadali wpływ wielkości cząstek SiC i doszli do wniosku, że istnieje optymalna wartość zawartości zbrojenia, której odpowiada optymalna wartość prędkości posuwu.

Xiaoping i Seah [96] stwierdzili, że zarówno ilość zbrojenia, jak i wielkość cząstek są ważne dla skrawalności pod względem trwałości narzędzia. W szczególności stwierdzili, że istnieje krytyczna wartość SiC % wag., powyżej której szybkość zużycia powierzchni przyłożenia znacząco wzrasta. Podobnie, szybkość zużycia powierzchni natarcia wykazuje przyspieszony wzrost powyżej krytycznej wartości wielkości cząstek; ponadto krytyczna zawartość zbrojenia zmniejsza się wraz ze wzrostem wielkości cząstek. Ciftci i in. [17] badali również wpływ wielkości cząstek zbrojenia na wydajność narzędzi z sześciennego azotku boru (CBN) podczas toczenia. Odkryli, że MMC zawierające duże cząstki SiC ( $110\ \mu\text{m}$ ) nie nadawały się do obróbki narzędziami z CBN ze względu na duże pęknięcia krawędzi skrawającej.

Najpopularniejszym materiałem osnowy stosowanym w MMC jest aluminium, podczas gdy inne osnowy, takie jak magnez i tytan, są stosowane sporadycznie. Tylko nieliczne badania dotyczą obróbki MMC na osnowie magnezowej [13, 42, 55, 77]. Choć większość wyzwań związanych z obróbką Mg MMC jest taka sama jak w przypadku MMC na bazie aluminium, należy wziąć pod uwagę specyficzne problemy z osnową metalową. Magnez zapewnia lepsze wiązanie cząstek zbrojenia, co znacznie zmniejsza usuwanie materiału pod wpływem działania narzędzia. Fakt ten daje wyższą wytrzymałość powierzchni, co jest ważne w zastosowaniach, w których problemem może być wytrzy-



małość zmęczeniowa elementu. Czasami do kompozytów z osnową aluminiową dodawany jest magnez w celu wspomaganie zwilżania cząstek podczas wytwarzania kompozytu w celu zwiększenia siły wiązania [56].

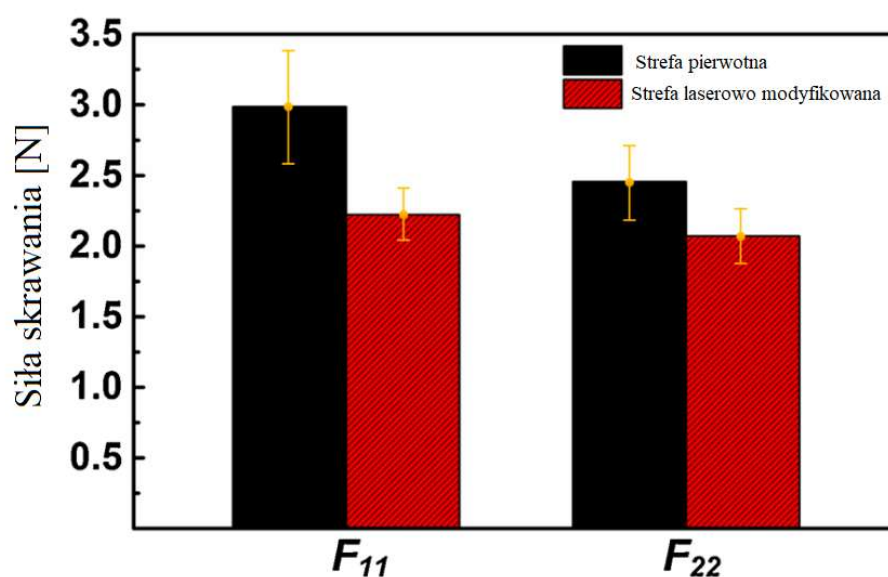
Interesujące wyniki można znaleźć w pracach doświadczalnych przeprowadzonych przez Pedersona i Ramulu [77], w których przeprowadzono obróbkę wykańczającą magnezu zbrojonego cząstkami węgla krzemu. Stwierdzili, że chropowatość powierzchni obrabianej części była doskonała ( $Ra = 0,2-0,3 \mu\text{m}$ ) i bardzo zbliżona do teoretycznej, a ponadto prawie niezależna od głębokości skrawania i prędkości skrawania. Siły skrawania były raczej stałe w szerokim zakresie prędkości skrawania, co wskazuje na niską tendencję do tworzenia narostu.

Chambers [13] podkreślił, że rola osnowy może być istotna w określaniu skrawalności bardziej niż można by się spodziewać. Na podstawie swoich eksperymentów odkrył, że bardziej miękka osnowa może powodować większe zużycie narzędzi. W rzeczywistości miękka osnowa jest szybko skrawana, przez co materiał wzmacniający jest odsłonięty i może znacząco zużywać narzędzie skrawające.

Obróbka cieplna osnowy również wykazuje istotny wpływ na skrawalność: wyższa twardość osnowy w wyniku obróbki cieplnej generalnie skraca trwałość narzędzia [41]. Barnes i in. [4] sugerują, że najlepszą skrawalnością materiału pod względem trwałości narzędzia jest miękki stan osnowy; w praktyce sugerują oni obrabianie materiału przed jakąkolwiek obróbką termiczną polegającą na solubilizacji lub starzeniu. Zwiększenie trwałości narzędzia nie eliminuje jednak zużycia, z drugiej strony przy twardszej osnowie nabierają znaczenia kolejne problemy. W rzeczywistości, chociaż materiał w bardziej miękkim stanie powoduje mniejsze zużycie narzędzia, mniejsze siły i mniejsze uszkodzenia podpowierzchniowe, należy zauważyć, że wytwarza on największą chropowatość powierzchni. Fakt ten może stanowić istotny problem związany z koniecznością usunięcia, przy dodatkowym czasie pracy, utwardzonego materiału znajdującego się niekiedy w trudno dostępnych strefach.

W artykule [58] przedstawiono metodę obróbki kompozytu aluminiowo ceramicznego łączącą modyfikację laserowego topienia powierzchni i precyzyjne frezowanie w celu poprawy skrawalności i poprawy chropowatości powierzchni materiału. Eksperymenty z laserową modyfikacją warstwy wierzchniej przeprowadzono, kontrolując parametry obróbki laserowej oraz udziały objętościowe wzmocnienia. Badacze zauważyli, że:

a) część wzmocnionych cząstek SiC będzie reagować ze stopioną ciekłą osnową Al, tworząc trójskładnikowy węgiel  $Al_4SiC_4$  oraz b) pozostałe cząstki SiC opadają na dno stopionej osnowy Al, tworząc strefę akumulacji cząstek. Następnie przeprowadzono eksperymenty frezowania precyzyjnego, aby zbadać różnice w sile skrawania (Rys. 2.8), zużyciu narzędzi i integralności powierzchni między strefą zmodyfikowaną a strefą pierwotną. Gdy całkowita głębokość skrawania nie przekracza zmodyfikowanej głębokości strefy, chropowatość powierzchni i zużycie narzędzia można poprawić odpowiednio o 90,36% i 61,03%.



Rys. 2.8. Różnice w amplitudach sił skrawania między strefą zmodyfikowaną laserowo i pierwotną strefą w kierunkach 11- i 22-. Kierunek 11 jest zgodny z kierunkiem posuwu obrabiarki, a kierunek 22 jest prostopadły do kierunku posuwu. [58]

Usuwanie materiału za pomocą narzędzia niezmiennie wiąże się z pewnymi uszkodzeniami obrabianego przedmiotu, które można określić, jako integralność powierzchni i podpowierzchni. Jednym z ważnych parametrów jakościowych jest chropowatość powierzchni, która, jak wiadomo, zależy od promienia naroża narzędzia i prędkości posuwu, a ponadto od tego, w jaki sposób następuje oddzielenie wióra od obrabianej powierzchni. Drugi aspekt, zbieżny z kształtowaniem się powierzchni obrobionej, jest szczególnie ważny i złożony dla MMC, ze względu na dużą niejednorodność i anizotropię na poziomie mikrogeometrii takich materiałów. [24, 45, 47]

Innym aspektem związanym z jakością powierzchni po obróbce są zmiany mikrostrukturalne, jakim ulega materiał pod wpływem odkształceń plastycznych i wzrostu temperatury w warstwie, która sięga na pewną głębokość od powierzchni zewnętrznej. [24]

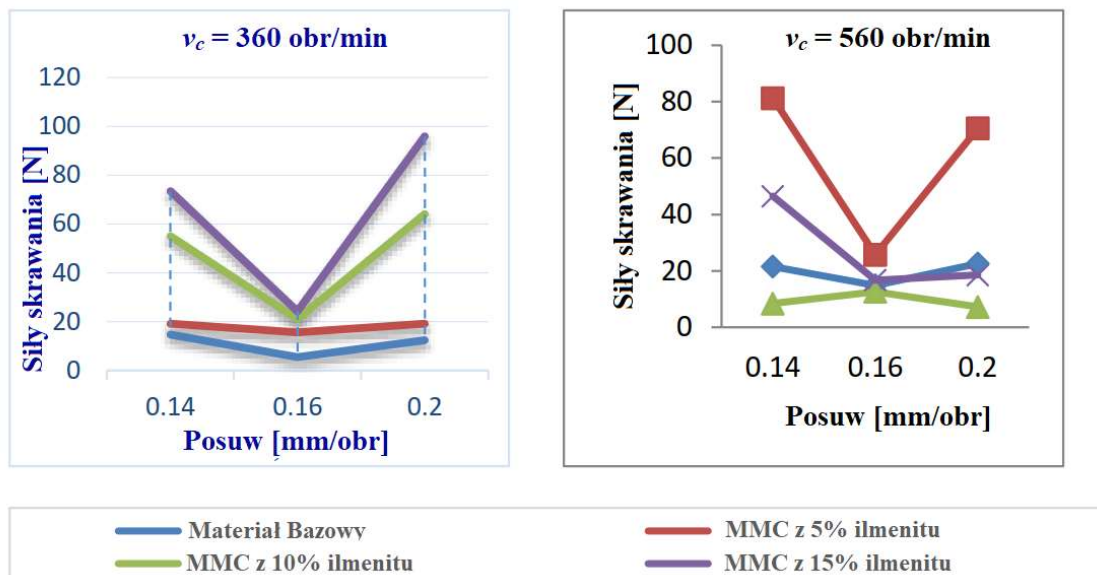
Ze względu na wysoką przewodność cieplną MMC, ponieważ są one najczęściej oparte na osnowie aluminiowej, ziarna ulegają silnemu odkształceniu pod wpływem działania narzędzia, co w konsekwencji prowadzi do utwardzenia i wzrostu naprężeń szczątkowych. Proces ten jest szczególnie złożony w przypadku MMC w porównaniu ze stopami niewzmocnionymi ze względu na obecność cząstek lub wiskerów we wzmocnieniu. [22, 24]

Cheung i in. [15] przeprowadzili analizę mechanizmów worzenia chropowatości powierzchni podczas toczenia kompozytów Al-SiC narzędziami diamentowymi, gdzie jedyną zmienną był kształt zbrojenia tj. proszkowy lub wiskery. Autorzy stwierdzili, że istnieją dwa rodzaje mechanizmów usuwania materiału: mechanizm przecinania i mechanizm wysuwania, pierwszy zapewnia lepsze wykończenie powierzchni, drugi pozostawia pęknięcia i wżery na obrabianej powierzchni, powodując słabe wykończenie powierzchni. Stwierdzili, że podczas obróbki kompozytów wzmocnionych wiskerami niezmiennie występuje mechanizm przecinania, niezależnie od kierunku skrawania względem ułożenia włókien. To zachowanie można, zdaniem autorów, wyjaśnić wyższą efektywną powierzchnią styku włókien i matrycy w stosunku do wzmocnienia proszkowego.

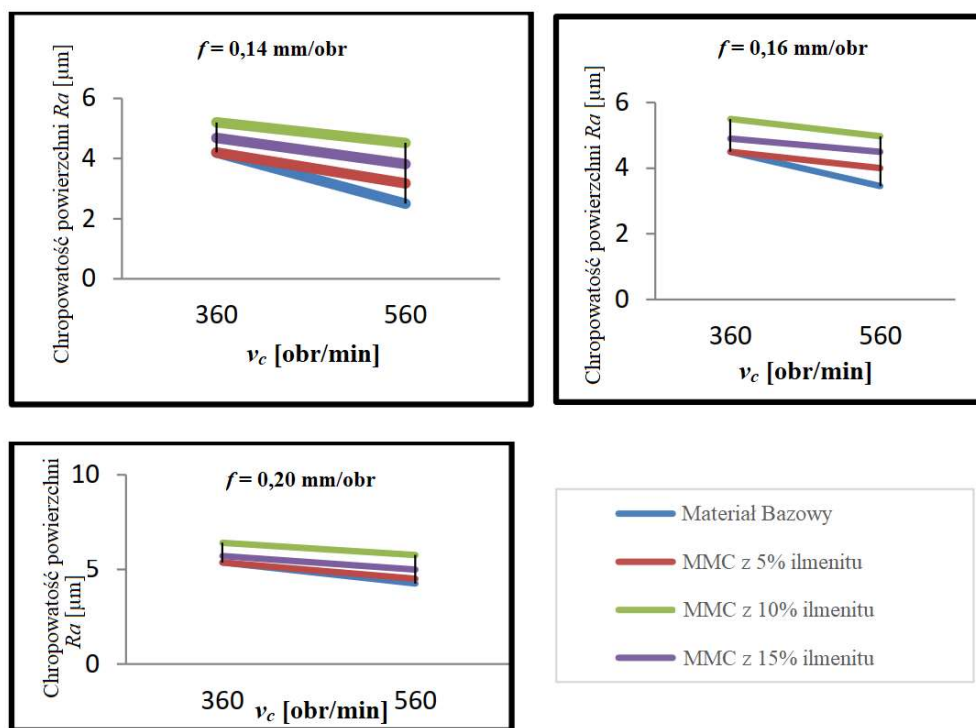
Hung i in. [41] stwierdzili, że narzędzia z CBN i PCD powodują minimalne uszkodzenia podpowierzchni materiału, a oraz że materiały te są najlepsze do operacji wykończeniowych. Wynik ten można przypisać wysokiej przewodności cieplnej takich materiałów i bardzo małemu promieniowi naroża, który jest w stanie wytrzymać ścierne działanie twardych cząstek.

Priyadarsini i in. [67] w swoim badaniu, jako osnowę zastosowali stop Al AA6061, natomiast cząstki ilmenitu ( $\text{FeTiO}_3$ ) zastosowali jako wzmocnienie w różnych procentach wagowych do przygotowania kompozytów z osnową metaliczną. Zastosowaną metodą przygotowania kompozytów była metoda odlewania stir casting. Zbadano skrawalność wytworzonych kompozytów i chropowatość powierzchni po obróbce, aby zrozumieć wpływ prędkości i posuwu podczas obróbki (Rys. 2.9). Wyniki pokazały, że

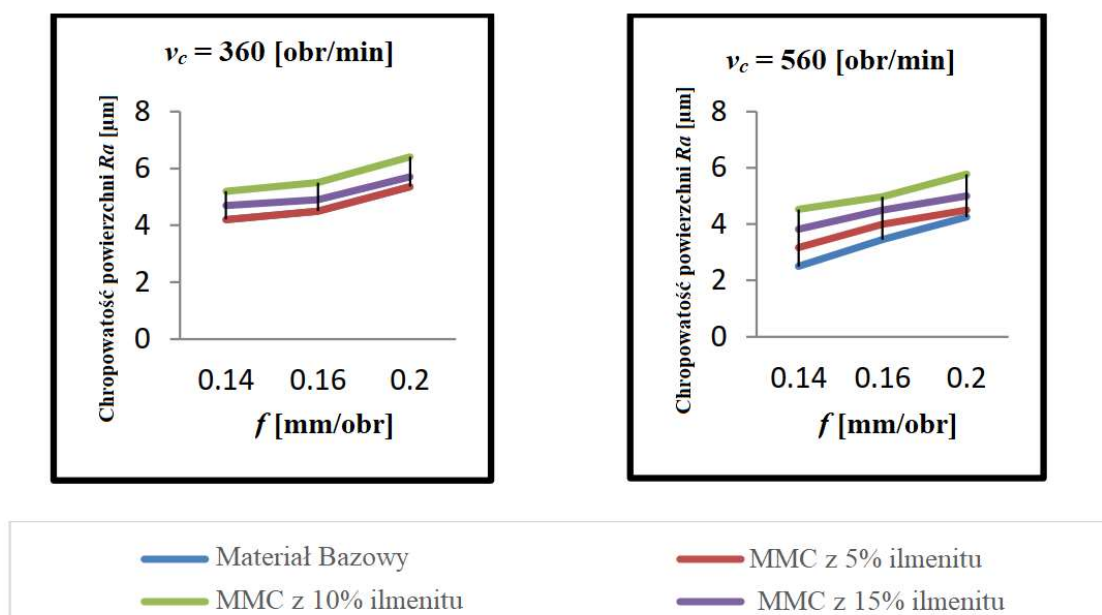
wzrost prędkości zmniejszał siły skrawania i chropowatość powierzchni (Rys. 2.10). Jednocześnie zaobserwowano wzrost chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem posuwu (Rys. 2.11).



Rys. 2.9. Wpływ posuwu na siłę skrawania przy różnych prędkościach [67]



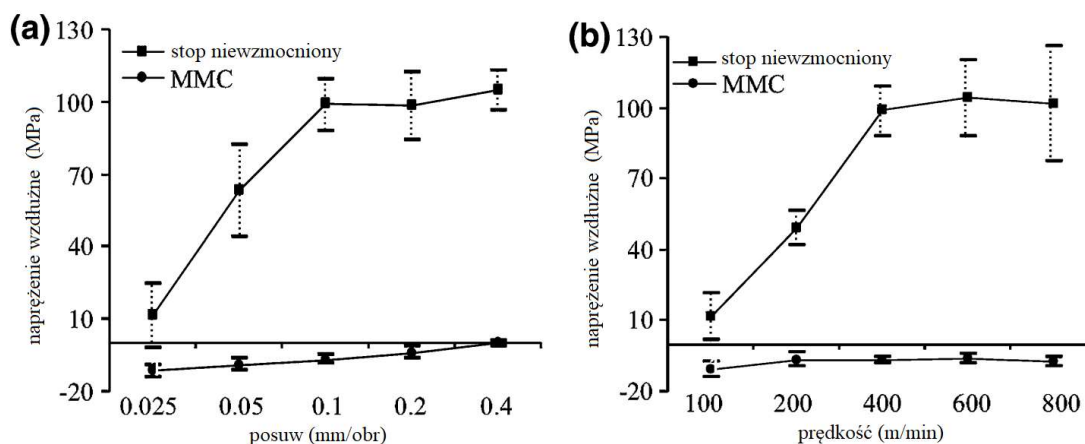
Rys. 2.10. Wykresy chropowatości powierzchni dla  $a_p = 25$  mm przy różnych prędkościach skrawania [67]



Rys. 2.11. Wpływ prędkości posuwu na chropowatość powierzchni przy  $a_p = 0,25$  mm. [67]

W pracy [69] przeprowadzono modelowanie właściwości powierzchni procesu frezowania CNC w aluminiowym kompozycie hybrydowym. Parametry procesu, takie jak prędkość posuwowa, głębokość skrawania i prędkość skrawania były parametrami zmiennymi. Zauważono, że prędkość skrawania jest ważniejszym parametrem niż prędkość posuwu i głębokość skrawania, zapewniającym dobrą chropowatość powierzchni. Głębokość skrawania była najmniej istotnym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni obrobionej. Najmniejszą przewidywaną chropowatość powierzchni ( $R_a = 1,43$  mm) uzyskano przy posuwie wynoszącym 75 mm/min przy prędkości wrzeciona 4000 obr/min i głębokości skrawania 0,25 mm.

Ze względu na niejednorodną strukturę MMC wpływ parametrów obróbki na naprężenia szczątkowe powierzchni jest zupełnie inny w porównaniu z konwencjonalnymi materiałami jednorodnymi, jak wykazali Pramanik i in. [81] podczas toczenia kompozytu aluminiowo-ceramicznego o 20% objętości SiCp. Ich wyniki dowodzą, że wzdłużne naprężenia powierzchniowo-szcątkowe równoległe do powierzchni obrabianej, dla stopu niewzmocnionego, rosną zarówno wraz z prędkością posuwu, jak i prędkością skrawania (Rys. 2.12). Zupełnie inaczej jest w przypadku MMC gdzie wykazano niewielkie naprężenia ściskające, które dodatkowo wydają się być prawie niezależne od parametrów skrawania; podobne wyniki podano dla poprzecznych naprężeń szczątkowych.



Rys. 2.12. Wpływ a) posuwu (przy prędkości 400 m/min) i b) prędkości (przy posuwie 0,1 mm/obr) na naprężenia szcztątkowe w kierunku wzdłużnym [81]

Siły skrawania stanowią ważny czynnik oceny skrawalności: wyższe siły skrawania oznaczają wyższe naprężenia na narzędziu skrawającym, powodujące szybsze zużycie, a wyższe naprężenia w materiale powodują większe uszkodzenia na większej głębokości w obrabianej powierzchni. Co więcej, wyższe siły oznaczają, że większa energia jest zamieniana na ciepło, co powoduje wzrost temperatury zarówno narzędzia, jak i powierzchni przedmiotu obrabianego. W obróbce wykańczającej siły skrawania powinny być utrzymywane na niskim poziomie, aby uzyskać lepszą chropowatość powierzchni i tolerancje. [24, 61]

Według Morina i in. [68] siły skrawania są kontrolowane głównie przez osnowę, a nie przez wzmocnienie, jednakże skoki ciśnienia na krawędzi skrawającej zależą w szczególności od rodzaju i zawartości wzmocnienia oraz od siły wiązania na granicy faz.

Siły skrawania zależą również od współczynnika tarcia pomiędzy narzędziem, a materiałem obrabianym, dlatego warunki sprzyjające wzrostowi narostu prowadzą do wzrostu sił skrawania. Niestety, tendencja ta jest szczególnie wysoka w przypadku MMC, a rozwiązaniem jest stosowanie wysokich prędkości skrawania, chociaż zauważono, że również przy najwyższych prędkościach narostu nie można całkowicie wyeliminować. Stosowanie płynów obróbkowych nie zawsze jest zalecane, ponieważ mogą one powodować większe zużycie narzędzia, pomagając w utrzymaniu kontaktu cząstek ściernych z narzędziem skrawającym [18]

Dla dobrej skrawalności pożądanym jest tworzenie krótkich wiórów bez użycia łamaczy wiórów; Znaczenie tego faktu dostrzegli Armarego i Brown [1] już dawno temu. Nawet niewielkie zmiany w procesie formowania wiórów mogą powodować pogorszenie wykończenia powierzchni, słabą dokładność wymiarową oraz skrócenie trwałości narzędzia.

Cheung i in. [15] badali wpływ SiC na proces formowania wióra dla stopu aluminium wzmocnionego cząstkami SiC podczas toczenia. Doszli do wniosku, że zmniejszenie ciągliwości materiału, osiągnięte przez dodanie cząstek SiC, sprzyja wytwarzaniu wiórów półciągłych. Pęknięcia, które prowadzą do rozdrobnienia wióra, inicjują się na zewnętrznej powierzchni wióra z powodu naprężenia ścinającego wywołanego przez powierzchnię natarcia narzędzia; inne małe puste przestrzenie tworzą się po odklejeniu cząstek od osnowy, spowodowane koncentracją naprężeń na krawędzi cząstek.

Podsumowując, ocena skrawalności MMC jest bardzo skomplikowaną kwestią ze względu na dużą liczbę cech charakterystycznych materiału. We wszystkich powyższych badaniach słaby wskaźnik skrawalności przypisywano ścierej naturze zbrojenia i powszechnie uważano, że właściwości -zwłaszcza twardość, wielkość i udział objętościowy cząstek zbrojących są głównymi czynnikami, które wpływają na skrawalność wszelkiego rodzaju MMC. Uzasadniono, że skrawalność maleje wraz ze wzrostem twardości i ułamka objętościowego cząstek. [51,70]

Głównym problemem, który jest kluczowy dla wzrostu zastosowań przemysłowych MMC, jest zużycie narzędzi spowodowane twardymi cząstkami lub wiskerami w zbrojeniu. Z tego powodu materiałami narzędziowymi, które mogą zapewnić akceptowalną trwałość narzędzia, są PCD lub CBN. Chropowatość powierzchni jest generalnie dobra, i lepsza w porównaniu z obróbką samego stopu osnowy, ale wyniki mogą ulec pogorszeniu w szczególnych warunkach związanych z rodzajem kompozytu, stanem narzędzia skrawającego i parametrami obróbki. Wióry uzyskane w procesie obróbki są na ogół krótkie i łatwo usuwalne ze strefy skrawania. [24, 51, 64]

## 2.3 Modelowanie chropowatości powierzchni obrobionej podczas skrawania materiałów kompozytowych

### 2.3.1 Chropowatość powierzchni obrobionej

Chropowatość powierzchni jest podstawowym wskaźnikiem skrawalności i jedną z podstawowych wielkości geometrycznych stosowanych w przemyśle do oceny wyrobów gotowych. Parametry chropowatości mają szczególne znaczenie w warunkach obróbki dokładnej, gdzie na podstawie ich wartości określa się efekty tej obróbki. Z punktu widzenia doboru parametrów skrawania pod kątem dokładności obróbki, istotna jest znajomość związków przyczynowo skutkowych, dzięki którym można minimalizować mikronierówności na powierzchni obrobionej. Do tego celu służą m.in. modele matematyczne łączące parametry chropowatości (głównie  $Rz$  i  $Rt$ ) z parametrami i warunkami skrawania.

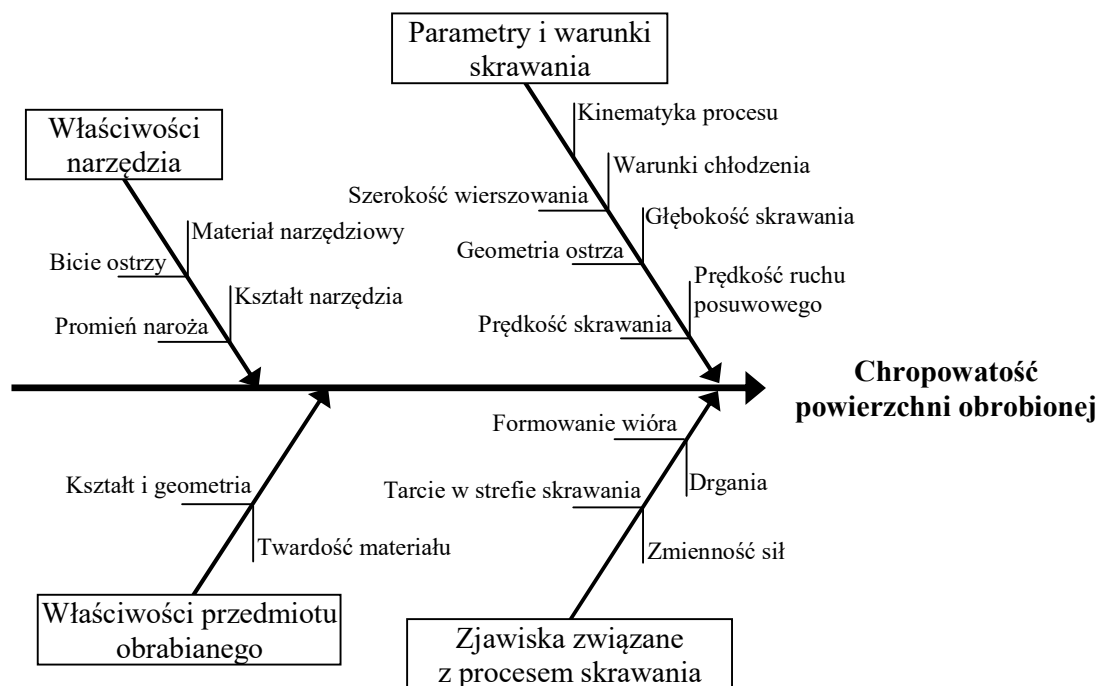
Różne są podejścia do modelowania mikronierówności. Autorzy pracy [5] podzielili je na cztery grupy:

- podejście oparte na teorii skrawania – bierze się w nim pod uwagę zagadnienia związane z istotą skrawania, takie jak kinematyka procesu, właściwości narzędzia, mechanizm formowania wióra i inne, a model matematyczny formułuje się z uwzględnieniem w sposób fizyczny wpływu danych zjawisk na chropowatość powierzchni,
- podejście oparte na badaniach doświadczalnych – bada się wpływ parametrów na daną wielkość wyjściową (np. na parametry chropowatości) i na podstawie pomiarów formułuje się równania regresji,
- podejście oparte na metodach planowania eksperymentów – podobne do poprzedniego, jednak z tą różnicą, że stosuje się metody pozwalające minimalizować liczbę doświadczeń,
- podejście oparte na zastosowaniu sztucznej inteligencji, głównie sieci neuronowych, algorytmów genetycznych, logiki rozmytej i systemów eksperckich.

W każdym z tych podejść są uwzględnione różne czynniki wpływające na chropowatość powierzchni obrobionej, a ich różnorodność przedstawiono na diagramie Ishikawy na Rys. 2.13. Ten przyczynowo skutkowy diagram jest graficzną analizą wpływu



na chropowatość powierzchni obrobionej różnych czynników oraz ich wzajemnych powiązań dających określony skutek jakościowy. Analizując ten diagram, można dojść do wniosku, że trudne jest (lub wręcz niemożliwe) zbudowanie modelu teoretycznego z uwzględnieniem większości czynników. Dlatego wielu autorów koncentruje się na analizie najważniejszych z nich, do których z pewnością należą parametry i warunki skrawania. [95]



Rys. 2.13. Czynniki wpływające na chropowatość powierzchni obrobionej (opracowano na podstawie [95])

Różnorodność czynników wpływających na chropowatość powierzchni obrobionej analizowana jest przez wielu autorów [38, 54, 62] i podobnie jak w pracy [5] wymieniane są prawie wszystkie, które mają wpływ nie tylko na chropowatość, ale także na sam proces skrawania (Tab. 2.1).

W większości przypadków mamy do czynienia z dwoma rodzajami modeli: modele analityczne i modele statystyczne. Modele analityczne w większości przypadków dotyczą czynników kinematyczno-geometrycznych (posuw, średnica frezu, promień naroża, promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, itp.) a także zjawisk związanych z odkształceniami sprężysto-plastycznymi (minimalna grubość warstwy skrawanej). Z kolei modele statystyczne oparte są na danych doświadczalnych, które następnie są opisywane za pomocą funkcji regresji [52, 73, 74].

Tab. 2.1. Wpływ różnych czynników na chropowatość powierzchni obrabianej

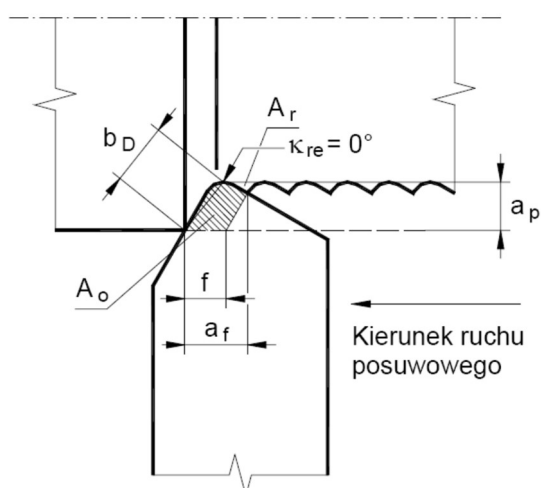
Wg. [101]		Wg. [39]		
Factors	Details	Main objects	Parameters classification	Specific parameters
Machine tools	Spindle Slides Positioning Structure	Machine tool	Kinematic property	Cutting depth $a_p$
				Feed rate $f$
Cutting conditions	Cutting speed Feed rate Depth of cut	Machine tool	Dynamic property	Spindle Speed $n/v$
				Vibration amplitude/acceleration $A/a$
Tool geometry	Tool nose radius Tool edge radius Tool rake angle Tool clearance angle	Cutting tool	Material kind	Cutting tool material (diamond, carbide, etc.)
				Geometrical parameters
Environmental conditions	Extra environment Cutting heat	Cutting tool	Geometrical parameters	Tool angles ( $\gamma_o, \kappa_r, \lambda_s$ , etc.)
				Material property
Material property	Different materials Non-uniformity Anisotropy Difficult-to-cut Materials	Workpiece material	Mechanical property	Tool corner nose radius $r_e$
				Material property
Chip formation	Chip segmentation Crater wear Flank wear Fracture wear	Workpiece material	Material property	Tool edge waviness $w_1$
				Material property
Tool wear	Material induced vibration Tool-tip vibration Spindle vibration Chatter vibration Machine-tool vibration	Environment	Process factors Other factors	Workpiece Hardness $H$
				Material property
Vibration	Material induced vibration Tool-tip vibration Spindle vibration Chatter vibration Machine-tool vibration	Environment	Process factors Other factors	Young's modulus $E$
				Material property
				Grain size, orientation, inclusion, etc.
				Coolant
				Temperature, dampness

### 2.3.2 Modele analityczne

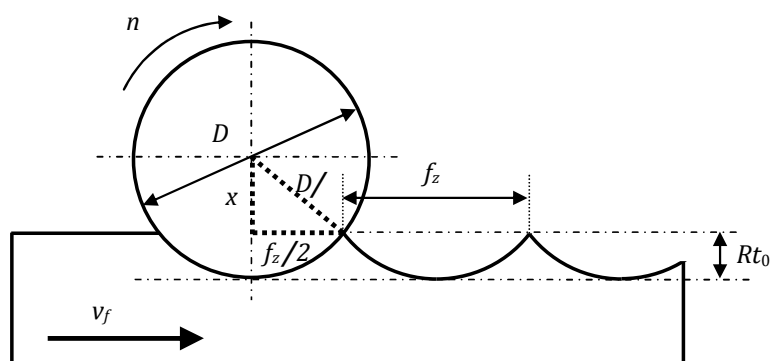
Jak wiadomo, jednym z najważniejszych czynników wpływających na chropowatość powierzchni obrabianej jest posuw na obrót  $f$  lub posuw na ostrze  $f_z$  (geometryczno-kinematyczne odwzorowanie ostrzy w materiale obrabianym –Rys. 2.14). Teoretyczną chropowatość powierzchni obrabianej dla toczenia i dla frezowania można wyznaczyć ze wzoru 1 i 2.

Jak widać podstawowe modele chropowatości powierzchni obrabianej opierają się w głównie na posuwie na obrót  $f$  i posuwie na ostrze  $f_z$ . Modele te jednak mają zasadniczą wadę, która polega na tym, że nie sprawdzają się dla małych wartości posuwu. Jedną z drugiej strony chropowatość powierzchni jest bardzo istotnym wskaźnikiem w warunkach obróbki dokładnej, w których to stosuje się właśnie małe wartości posuwu.

a)



b)



Rys. 2.14. Odwzorowanie kinematyczno-geometryczne ostrza w materiale obrabianym dla toczenia a) i dla frezowania b)

$$Rt_0 = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (1)$$

$$Rt_0 = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2 - f_z^2}{4}} \quad (2)$$

gdzie:  $f$  [mm/obr] – posuw na obrót

$f_z$  [mm/ostrze] – posuw na ostrze

$r_\varepsilon$  [mm] – promień zaokrąglenia naroża

$D$  [mm] – średnica frezu

Dla dużych wartości posuwu model ten sprawdza się z dość dobrą skutecznością. Jednak w takich warunkach realizuje się najczęściej obróbkę zgrubną lub wstępną, dla której parametry chropowatości nie zawsze są istotne.

Zdecydowanie dokładniejszym modelem chropowatości dla małych wartości posuwu jest tzw. model Brammertz'a, który uwzględnia dodatkowo minimalną grubość warstwy skrawanej –  $h_{min}$  (3).

$$R_{zt} = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( \frac{r_\varepsilon h_{min}}{f^2} + 1 \right) \quad (3)$$

Powstało wiele artykułów udowadniających słuszność stosowania tego modelu, a także pokazujące, że pomimo założeń teoretycznych, w praktyce uzyskiwane wartości chropowatości są bardzo zbliżone do obliczeń. Większość modeli opiera się na podstawie pierwotnie powstałego modelu Brammertz'a (3), tak jak w przypadku modelu opisanego przez Grzesika (4). Model ten zakłada, że wymagane jest dokładne określenie grubości wióra w momencie, gdy nie uległ jeszcze deformacji, w stosunku do promienia krawędzi skrawającej [36]. Dodatkowo Grzesik w swoim rozważaniu na temat chropowatości określa dwie modyfikacje modeli Brammertz'a:

$$R_t = \begin{cases} \frac{5f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( \frac{r_\varepsilon h_{min}}{f^2} - 1 \right) & \text{dla } f > \sqrt{r_\varepsilon h_{min}} \\ \frac{4f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( \frac{r_\varepsilon h_{min}}{4f^2} + 1 \right) & \text{dla } f \leq \sqrt{r_\varepsilon h_{min}} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

$f$  – posuw [mm/obr],

$h_{min}$  – minimalna grubość warstwy skrawanej [mm],

$r_\varepsilon$  – promień naroża [mm].

W oparciu o model Brammertz'a powstało wiele modyfikacji. W pracy [103] autorzy zaproponowali rozszerzoną wersję uwzględniając powrót sprężysty warstwy skrawanej (5), lub model uwzględniający plastyczny przepływ materiału (6).

$$R_{zth} = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon \cdot h_{min}}{2} \right) + k_1 \cdot r_n \cdot \frac{H}{E} \cdot k_2 \quad (5)$$

gdzie:

$k_1, k_2$  – współczynniki związane w powrotem sprężystym warstwy skrawanej

$H$  - twardość Vickersa

$E$  - moduł Younga

$$R_{zth} = k_3 \left[ \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon \cdot h_{min}}{2} \right) + k_1 \cdot r_n \cdot \frac{H}{E} \cdot k_2 \right] \quad (6)$$

gdzie:

$k_3$ , – współczynnik związane z plastycznym przepływem materiału

$k_3$  należy skonfigurować pod względem szybkości posuwu i promienia naroża  $r_\varepsilon$ , który jest zapisany jako:

$$k_3 = 1 \text{ gdzie } f \ll r_\varepsilon \text{ i } r_\varepsilon \geq 0,05 \text{ mm}$$

$$k_3 = 0,35 + e^{(1,856 - r_\varepsilon)^{1,856}} \text{ gdzie } f \ll r_\varepsilon \text{ i } r_\varepsilon \geq 0,05 \text{ mm}$$

Inną zależność pomiędzy wysokością profilu powierzchni a warunkami skrawania opisano w pracy [97], jednak dotyczy to toczenia w warunkach obróbki super dokładnej:

$$Rt = \frac{f^2}{8V^2R} \quad (7)$$

gdzie:

$V$  - prędkość obrotowa wrzeciona

$R$  - to promień naroża

Na uwagę zasługują modele pokazane w pracy, [66] w której autor przedstawia modele dla frezowania czołowego (8). Wzory te, choć są pokazane w postaci uproszczonej to i tak są kłopotliwe do praktycznego zastosowania.

Lp.	Przedział posuwu $f_z$	Przybliżone zależności do obliczenia parametru Ra
1.	$f_z \leq \sqrt{2r_\epsilon h_{\min}}$	$Ra = \sqrt{\frac{f_z^4}{972r_\epsilon^2} \cdot \frac{5}{81} h_{\min}^2 + \frac{50}{81} \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right] + \frac{40r_\epsilon^2 h_{\min}^2}{27f_z^4} \cdot \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]}$
2.	$\frac{100}{z} \frac{e}{z} < f_z \leq \sqrt{2r_\epsilon h_{\min}}$	$Ra = \sqrt{\frac{16}{243} h_{\min}^2 + \frac{60}{81} D^2(\xi)}$
3.	$f_z \leq 100 \frac{e}{z}$	$Ra = \sqrt{\frac{16}{243} h_{\min}^2 + \frac{60}{81} D^2(\xi) \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]}$

(8)

W Tab. 2.2 pokazano zestawienie modeli analitycznych opracowanych w oparciu o kinematyczno-geometryczne odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym.

Oprócz podstawowych czynników modele te uwzględniają dodatkowo promień zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej  $r_n$ , falistość krawędzi  $w$ , twardość przedmiotu obrabianego, ponieważ czynniki te odgrywają istotną rolę podczas skrawania z małymi wartościami posuwów. Aby dobrze poznać mechanizmy deformacji usuwania materiału, do modelowania chropowatości powierzchni wprowadzono metody symulacji numerycznych, takie jak np. metoda elementów skończonych [14] czy symulacje dynamiki molekularnej [97]. Metody symulacji numerycznych mogą uwzględniać więcej czynników wpływających na chropowatość niż eksperymenty, niekiedy trudne do przeprowadzenia.

Czynniki wpływające na chropowatość powierzchni można podzielić na dwie grupy: podstawowe i dodatkowe takie jak falistość i szczyrbałość krawędzi skrawającej, czy drgania naroża. Czynniki te bardzo często obarczone są pewną losowością z powodu której są bardzo trudne do jednoznacznego opisu.

W pracy [81] autorzy potwierdzili znaczący wpływ posuwu na kształtowanie mikronierówności podczas obróbki kompozytu aluminiowo ceramicznego – MMC, porównując wyniki ze stopem aluminium nieumocnionym (Rys. 2.15). Zgodnie z modelami teoretycznymi chropowatość powierzchni jest niska przy niskim posuwie i wzrasta wraz ze wzrostem posuwu zarówno dla MMC, jak i dla stopu niewzmocnionego. Przy niskich posuwach chropowatość dla MMC jest wyższa niż dla stopu niewzmocnionego, ale powyżej posuwu  $f = 0,3$  mm/obr obserwuje się odwrotną tendencję.

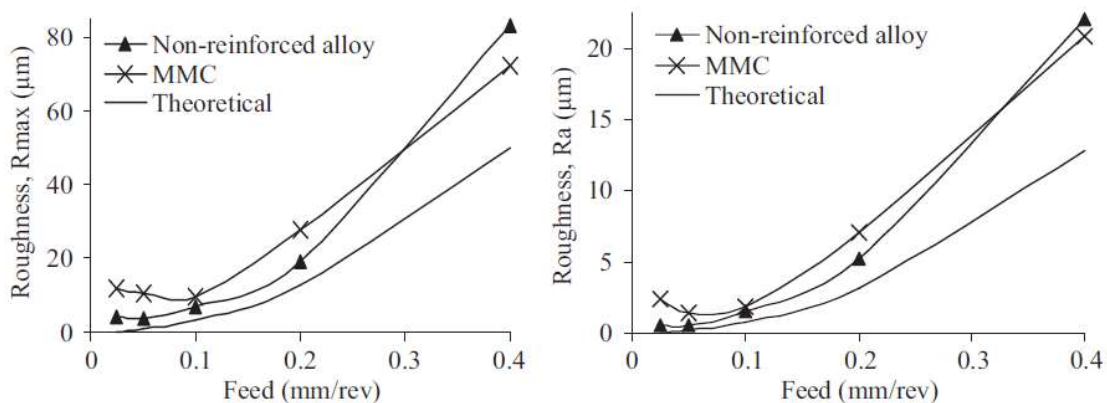
Tab. 2.2. Zestawienie najczęściej stosowanych modeli chropowatości [39]

Author	Model
Tomov <i>et al.</i>	$R_{t\ k-g} = r_\varepsilon \sqrt{t} - \sqrt{r_\varepsilon^2 t - \frac{f^2}{4 \cos^2 \omega} t^2}$
He <i>et al.</i>	$R_t = R_{t\ k-g} \exp(3SE) \quad R_a = R_{a\ k-g} \exp(SE)$ $R_t = R_{tew} - s + w + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim N(\mu, \sigma^2)$
Liu <i>et al.</i>	$R_t = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + k_1 \ln\left(\frac{E \cot \theta}{\sigma_y e}\right) + k_2 + [R_{edge}]$
Chen <i>et al.</i>	$R_t = \frac{1}{2} f \sin 2k'_r + r_\varepsilon \sin^2 k'_r - \sin^2 k'_r \sqrt{r_\varepsilon^2 + 2fr_\varepsilon \cot k'_r - f^2} + w$
Grzesik	$R_t = r_\varepsilon \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{h_{min}^2 + f^2 + 2r_\varepsilon h_{min}}{2f(r_\varepsilon + h_{min})} \right)^2} \right) \approx \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon h_{min}}{f^2} \right)$
Grzesik	$R_t = \begin{cases} \frac{5f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( \frac{r_\varepsilon h_{min}}{f^2} - 1 \right) & \text{for } f > \sqrt{r_\varepsilon h_{min}} \\ \frac{4f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( \frac{r_\varepsilon h_{min}}{4f^2} + 1 \right) & \text{for } f \leq \sqrt{r_\varepsilon h_{min}} \end{cases}$
Knuefermann	$R_t = \begin{cases} \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon h_{min}}{f^2} \right) & \text{for } f > \sqrt{2r_\varepsilon h_{min}} \\ h_{min} & \text{for } f \leq \sqrt{2r_\varepsilon h_{min}} \end{cases}$
Zong <i>et al.</i>	$R_t = k_s \left[ \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon h_{min}}{2} \right) + k_r \frac{H}{E} J_n k_e \right]$
Kurniawan <i>et al.</i>	$R_a = 0.2566R_t$ $R_{total} = Re-th + Rw - Rs + Rre$
He <i>et al.</i>	$R_t = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon h_{min}}{f^2} \right) + \text{RBF neural network}$

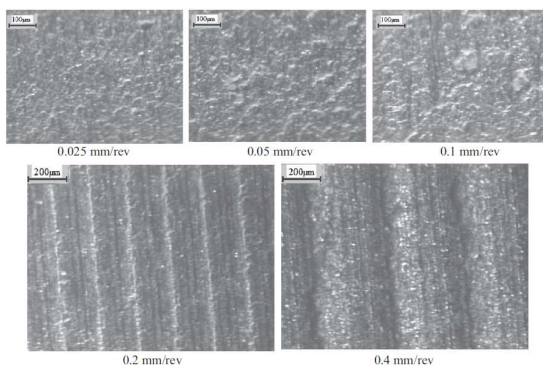
Obrobione powierzchnie MMC pokazano na Rys. 2.16, z których wynika, że dla niskich wartości posuwu ślady jakie pozostawia ostrze w materiale są niewidoczne. Brak kinematyczno-geometrycznego odwzorowania ostrza w materiale obrabianym, a tekstura powierzchni jest prawdopodobnie bardzo nieregularna z powodu obecności cząstek SiC. Z drugiej strony, dla stopu niewzmocnionego ślady posuwu są bardzo wyraźne dla każdej wartości  $f$  (Rys. 2.17).

Na Rys. 2.18 przedstawiono wpływ cząstek zbrojenia na chropowatość powierzchni przy różnych prędkościach. Zauważono, że niewzmocniony stop wykazuje lepszą chropowatość w porównaniu z MMC przy wszystkich badanych prędkościach skrawania. Generalnie chropowatość powierzchni nieznacznie maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania dla obu materiałów. Może to być spowodowane mniejszym przepływem

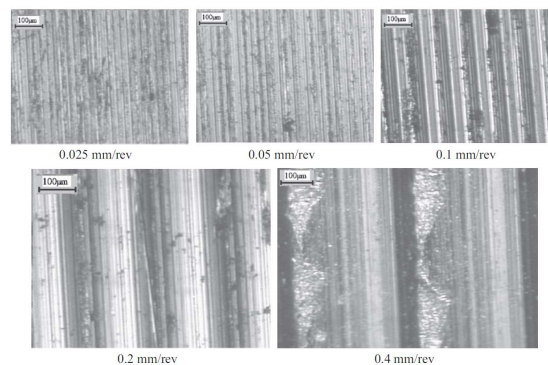
bocznym materiału przy większej prędkości skrawania. Podobnie jak w przypadku omówionego wcześniej wpływu posuwu, teoretyczne wartości chropowatości są znacznie niższe niż wartości doświadczalne.



Rys. 2.15. Wpływ posuwu na chropowatość dla stopu MMC i dla stopu niewzmocnionego przy stałej prędkości skrawania  $v_c = 400 \text{ m/min}$  i  $a_p = 1 \text{ mm}$



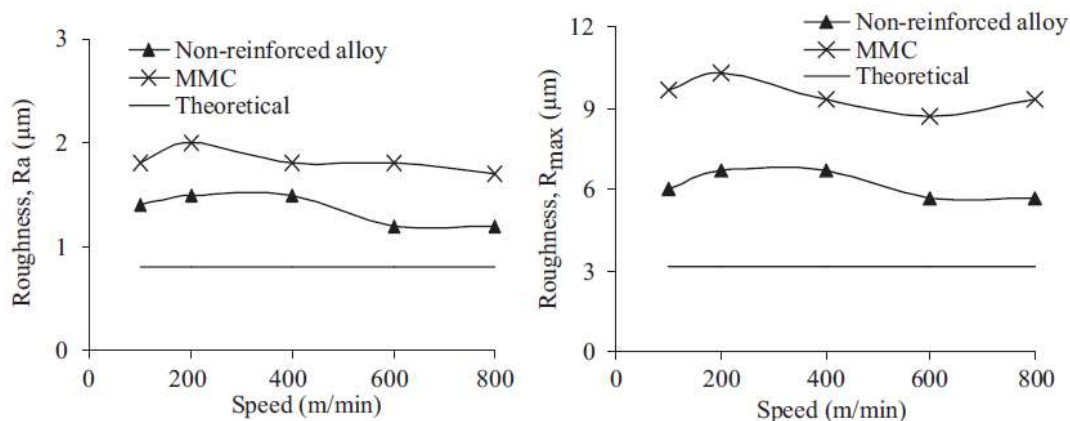
Rys. 2.16. Obrobiona powierzchni MMC przy różnych posuwach



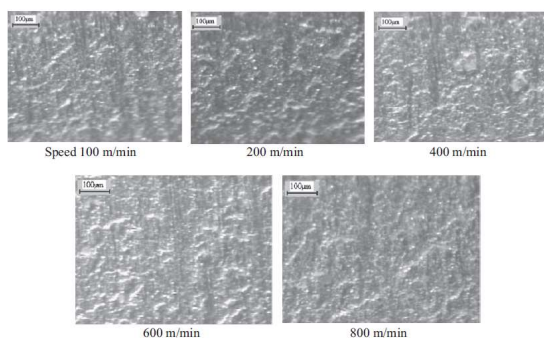
Rys. 2.17. Obrobiona powierzchni stopu niewzmocnionego przy różnych posuwach

Na powierzchni obrobionej kompozytu MMC nie ma widocznych śladów posuwu w przeciwieństwie do obrabianej powierzchni niewzmocnionego stopu (Rys. 2.19 i Rys. 2.20). Ponadto dla rozpatrywanego zakresu prędkości nie obserwuje się zauważalnego wpływu prędkości skrawania na obrabiane powierzchnie MMC i niewzmocnione stopy.

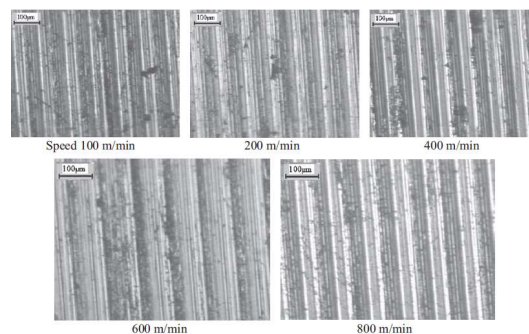




Rys. 2.18. Wpływ prędkości skrawania  $v_c$  na chropowatość dla stopu MMC i dla stopu niewzmocnionego przy stałym posuwie  $f = 0,1$  mm/obr i  $a_p = 1$  mm



Rys. 2.19. Obrobiona powierzchnia MMC przy różnych prędkościach skrawania



Rys. 2.20. Obrobiona powierzchnia stopu niewzmocnionego przy różnych prędkościach skrawania

W przypadku MMC brak śladów posuwu przy niskim posuwie może być spowodowany wyciąganiem i pękaniem cząstek z obrabianej powierzchni oraz wgnieceniem przez cząstki. Uważa się, że są to dominujące czynniki wpływające na teksturę nowo powstałej powierzchni [27, 50, 60, 80]. Przy niskim posuwie, odległość pomiędzy dwoma kolejnymi ścieżkami narzędzia jest mniejsza, a zatem wystąpi większa liczba interakcji narzędzie-cząstka niż przy wyższym posuwie. Względnie wysoka siła pękania/odklejania cząstek przy niższym posuwie również wskazuje na wyższe interakcje między narzędziem a cząstkami. Spowodują one większe uszkodzenia powierzchni przy niskim posuwie. W przypadku stopu niezbrojonego nie przewiduje się takich uszkodzeń, co przekłada się na lepsze wykończenie powierzchni.

### 2.3.3 Modele statystyczne

Modele te opracowywane są w oparciu o dane doświadczalne w oparciu o metodę regresji polegającą na dopasowaniu modelu do danych. Dopasowana linia lub krzywa regresji reprezentuje oszacowaną wartość oczekiwaną zmiennej przy konkretnych wartościach innej zmiennej lub zmiennych. W najprostszym przypadku dopasowana jest stała lub funkcja liniowa.

Modele regresji przyjmują najczęściej postać iloczynową [32, 33]:

$$R_a = c_0 V^{c_1} f^{c_2} d^{c_3} \quad (9)$$

$$R_a = c_0 H^{c_1} A^{c_2} V^{c_3} f^{c_4} d^{c_5} T^{c_6} \quad (10)$$

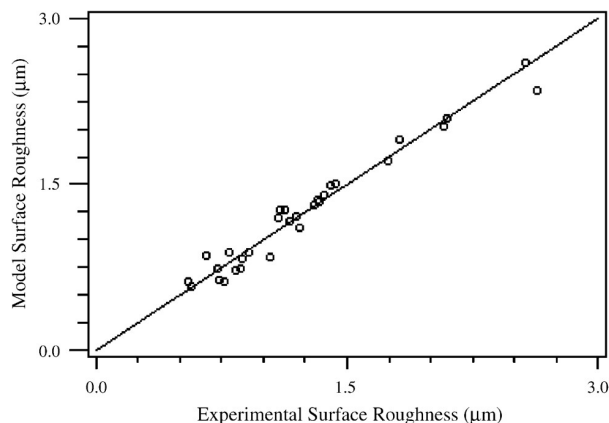
lub sumy z odpowiednimi współczynnikami [3, 98].

$$\begin{aligned} R_a = & -1.80 + 2.19e - 04X_1 + 4.13X_3 + 0.58X_4 \\ & + 8.67e - 03X_5 - 1.23X_8 - 0.0965X_9 - 6.00e \\ & - 08X_{10} - 5.21e - 04X_{11} + 1.05e - 03X_{13} \\ & + 5.20e - 05X_{14}. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E[Ra_{f_z}] = & 0.9450 + 0.0483f_z - 0.0027a_p + 0.0258a_e + 0.0113Vc + 0.0201f_z^2 \\ & + 0.0441a_p^2 + 0.0021a_e^2 + 0.0276Vc^2 + 0.1059f_z a_p - 0.0486f_z a_e \\ & + 0.0437f_z Vc - 0.0225a_p a_e + 0.0457a_p Vc + 0.0339a_e Vc \end{aligned} \quad (12)$$

Jak widać na Rys. 2.21, dopasowania pomiędzy doświadczalnymi wartościami chropowości powierzchni a modelowymi są bardzo dobre. Wartości modelowe zostały obliczone z równania 11 i dotyczyły frezowania frezem palcowym stali konstrukcyjnej.

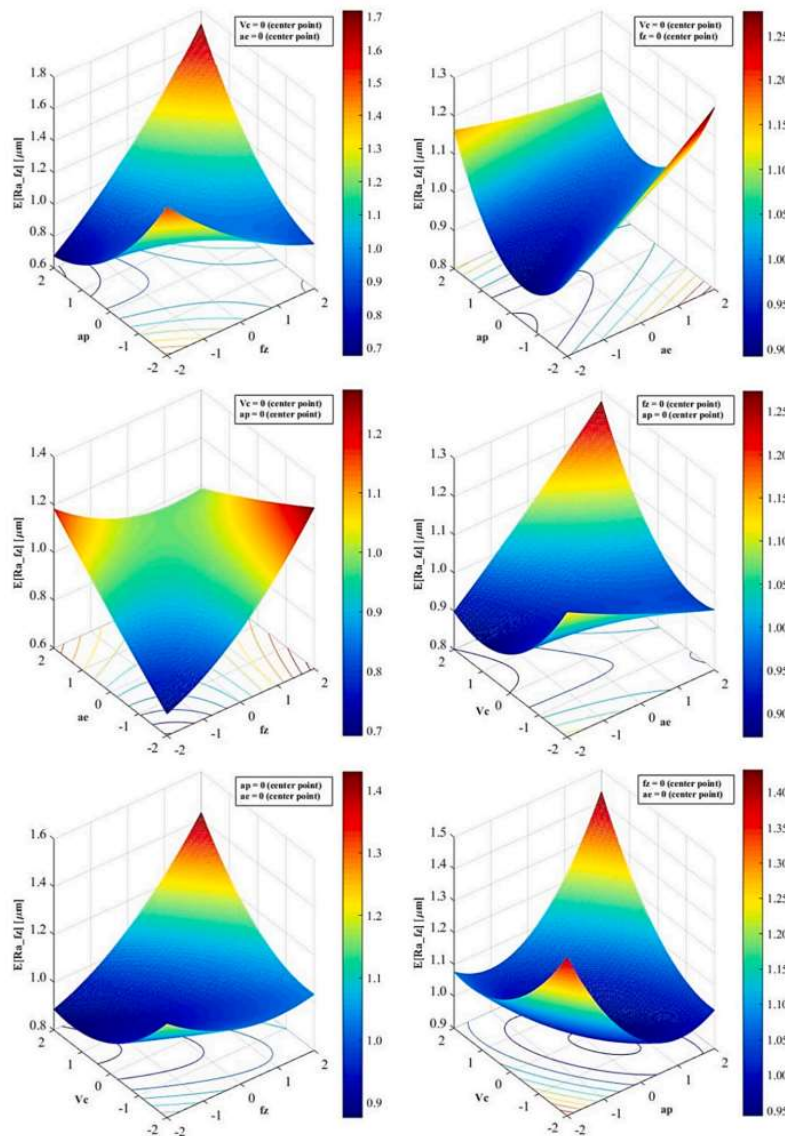
Na Rys. 2.22 pokazano wyniki badań otrzymane na podstawie równania 12, które otrzymano metodą najmniejszych kwadratów ważonych (zmienna  $E$  oznacza strategię frezowania frezem kulistym stali stopowej do pracy na gorąco o twardości 50 HRC). Na podstawie otrzymanych wyników autorzy stwierdzili statystycznie istotną interakcję chropowości z posuwem na ostrze.



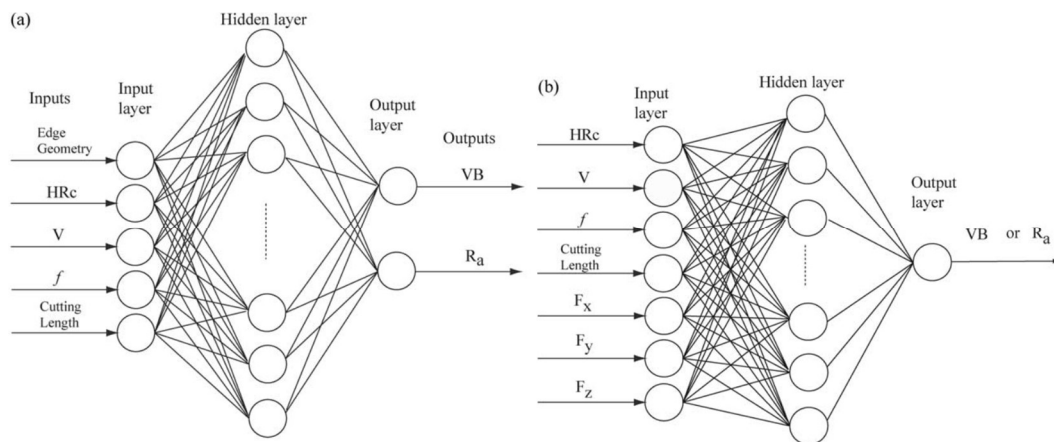
Rys. 2.21. Wartości modelowe i doświadczalne dla modelu opisanego równaniem 11

W porównaniu do modeli analitycznych ich skuteczność prognozowania wartości parametrów chropowatości sprawdza się zdecydowanie lepiej jednak tylko w zakresie prowadzonych badań. W sytuacji, gdy chcemy oszacować parametr chropowatości z zakresu który nie był badany, błędy oszacowania potrafią być na poziomie kilkunastu i kilkudziesięciu procent. Chcąc rozszerzyć zakres modelu lub zmniejszyć jego błąd prognozowania należy przeprowadzić dodatkowe badania. W modelach statystycznych im więcej jest wyników doświadczalnych tym są dokładniejsze.

Coraz częściej do prognozowania parametrów chropowatości powierzchni stosuje się elementy sztucznej inteligencji jak np. sieci neuronowe. Takie podejście wymaga jednak dużej liczby danych doświadczalnych w celu skutecznej nauki sieci neuronowych. W pracy [75] autorzy przedstawili sieci neuronowe zdolne przewidywać nie tylko wartości parametrów chropowatości, ale także zużycie ostrza (Rys. 2.23). Nauczona sieć neuronowa jest niczym innym jak macierzą wag, które są dobierane właśnie w procesie uczenia. Choć samej sieci neuronowej nie możemy zapisać za pomocą matematycznych reguł, to macierz wag jest formalnym zapisem matematycznym.



Rys. 2.22. Powierzchnie odpowiedzi dla modelu z równania 12

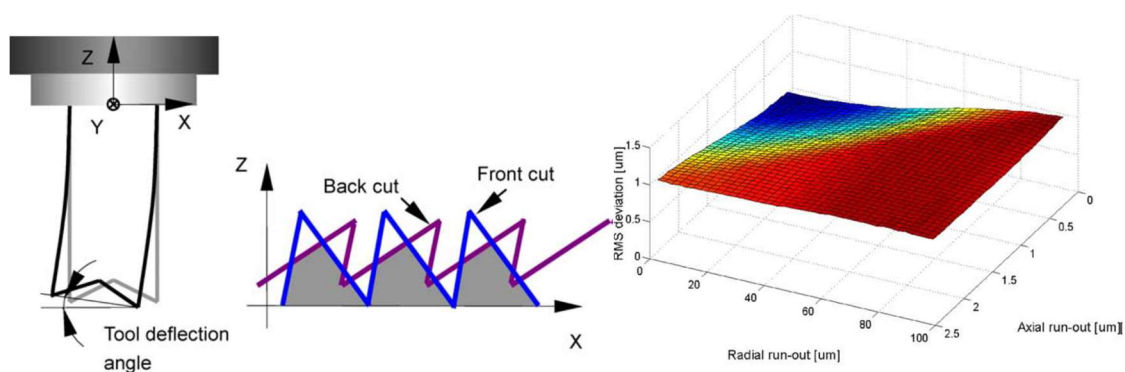


Rys. 2.23. Sieci neuronowe wykorzystywane do uczenia i przewidywania chropowości powierzchni i zużycia narzędzi [75]

Podobnie jak w przypadku funkcji regresji tak i dla sieci neuronowej wymagana jest jak największa liczba danych doświadczalnych. Im jest ich więcej tym w konsekwencji mniejszy błąd prognozowania popełnia sieć. Reasumując, sieci neuronowe i modele regresji bazują na danych doświadczalnych, jednak sieci potrafią uogólniać wyniki i przewidywać odpowiedzi z zakresu, z którego nie były uczone, co jest ich wielką zaletą.

### 2.3.4 Analiza pozostałych czynników

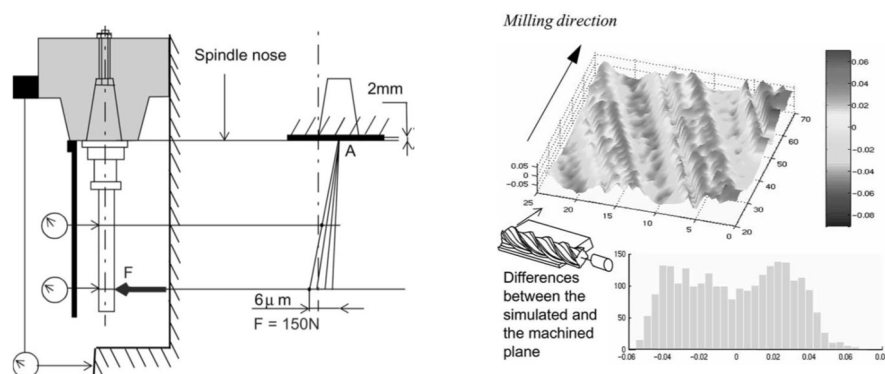
Poza parametrami technologicznymi istotną rolę w kształtowaniu chropowatości powierzchni obrobionej odgrywają zjawiska fizyczne towarzyszące procesowi skrawania jak np. drgania i siły. Są one w mniejszym stopniu odpowiedzialne za kształtowanie chropowatości w porównaniu do parametrów technologicznych (jak np. posuw), jednak w pewnych warunkach mogą mieć wpływ dominujący. Jako przykład może posłużyć praca [85], w której pokazano wpływ ugięcia frezu palcowego na generowanie powierzchni obrobionej (Rys. 2.24). Ugięcie frezu następuje pod wpływem działania siły promieniowej (posuwowej) i jest tym większe im większa jest siła posuwowa.



Rys. 2.24. Wpływ ugięcia narzędzia na generowanie powierzchni obrobionej [85]

W przypadku narzędzi składanych (np. frezów) ważnym czynnikiem są błędy związane z biciem osiowym poszczególnych płytek [2]. Wynika to z niedokładnego wykonania samej płytki jak też gniazda mocującego. W takim przypadku do modelu chropowatości włączono człony odpowiedzialne za bicie osiowe (wpływające na głębokość skrawania) i promieniowe (wpływające na chropowatość powierzchni). Uwzględniono również prędkość posuwu, aby sformułować model geometryczny. Po walidacji modelu z doświadczalnymi danymi skrawania, wydajność została zmaksymalizowana poprzez

optymalizację szybkości posuwu za pomocą algorytmu optymalizacji bisekcji (Rys. 2.25).



Rys. 2.25. Wpływ ugięcia frezu na chropowatość powierzchni obrabianej

Ugięciu ulega nie tylko narzędzie, ale także przedmiot obrabiany, szczególnie, gdy mamy do czynienia z obróbką elementów cienkościennych. Wtedy oprócz odkształceń istnieje też ryzyko utraty stabilności procesu, co objawia się występowaniem drgań samowzbudnych bezpośrednio wpływającymi na jakość powierzchni obrabianej [90].

Drgania mechaniczne odgrywają istotną rolę w kształtowaniu chropowatości i dlatego dużo prac koncentruje się właśnie na analizie drgań. W pracy [34] położono nacisk na chropowatość i profil powierzchni podczas szybkiego frezowania czołowego. Przedstawiono metodę symulacji powierzchni obrabianej z wykorzystaniem sygnału przyspieszenia zamiast sił skrawania. Jako argument podano, że drgania spowodowane dużą prędkością wrzeciona pogarszają dokładność geometryczną obrabianej powierzchni. Opracowano algorytm komputerowy w zakresie warunków skrawania, geometrii frezu i przedmiotu obrabianego oraz parametrów bicia do określenia położenia kątownego frezu palcowego. Współrzędne położenia końcowych ostrzy obliczono z wykorzystaniem modelu geometrycznego procesu frezowania walcowo-czołowego oraz składowych częstotliwości szczytowej sygnału przyspieszenia. Z wygenerowanych danych powierzchni można było obliczyć chropowatość powierzchni i wykreślić profil.

W pracy [60] opracowano model symulacyjny topografii powierzchni generowanej po operacji toczenia przy znanych charakterystykach drgań. W modelu uwzględniono wpływ geometrii ostrza, parametrów skrawania oraz ruchu względnego narzędzia i przedmiotu obrabianego. Uważano, że na okres falistości powierzchni w kierunku osiowym

wpływa stosunek częstotliwości drgań (FR), który zdefiniowano, jako stosunek częstotliwości drgań (w Hz) do prędkości obrotowej wrzeciona (w obr/s). Stwierdzono również, że wpływ drgań w kierunku promieniowym na miary chropowatości powierzchni był znacznie bardziej znaczący niż w przypadku drgań w kierunku stycznym lub w kierunku osiowym.

Można wyciągnąć wniosek, że te, w większości teoretyczne, badania symulują proces skrawania pod względem kinematyki i właściwości narzędzia skrawającego. W celu dokładniejszego zobrazowania zjawiska uwzględniono dodatkowe parametry, takie jak drgania, a uzyskane wyniki można scharakteryzować jako dość dobre. Wadą tego podejścia jest to, że nie bierze się pod uwagę wielu innych czynników, które przyczyniają się do mechanizmu powstawania chropowatości, na przykład zużycia i ugięcia narzędzia skrawającego lub pewnych zjawisk termicznych. Szacuje się, że integracja tych czynników z już istniejącymi modelami zwiększa ich dokładność, szczególnie w przypadku zabiegów wykończeniowych, gdzie ich wpływ jest większy.

## **Podsumowanie**

Z przedstawionej analizy wynika, że modelowanie mikronierówności powierzchni obrobionej jest procesem złożonym, a w modelu muszą być uwzględnione różne czynniki. Ogólnie można stwierdzić, że chropowatość powierzchni obrobionej zależy od kinematyczno-geometrycznych parametrów procesu i intensywności zjawisk fizycznych zachodzących podczas skrawania (np. sił i drgań). Wszystkie te czynniki należałoby uwzględnić w modelowaniu chropowatości powierzchni obrobionej [50]. Jednak z analizy literatury i badań własnych wynika, że dominują głównie przemieszczenia względne narzędzia i przedmiotu obrabianego [34] oraz ugięcia frezu wywołane siłą skrawania [22], choć w tym przypadku ma to większy wpływ na błędy kształtu. Ponadto tworzone są także modele, w których uwzględnia się chropowatość w warunkach stabilnych i niestabilnych [63, 67, 76, 78], możliwość kompensacji np. bicia promieniowego [87] i ugięcia frezu [82], by zminimalizować wpływ niekorzystnych zjawisk.

Większość modeli analitycznych bazuje na kilku podstawowych czynnikach:

- posuw na obrót  $f$ , posuw na ostrze  $f_z$ ,
- promień zaokrąglenia naroża  $r_\varepsilon$ , promień frezu  $R$ ,
- minimalna grubość warstwy skrawanej  $h_{min}$ .

Bardzo rzadko można spotkać modele analityczne uwzględniające prędkość skrawania  $v_c$ .



### **3. CEL, ZAKRES I METODYKA PRACY**

#### **3.1 Cel i zakres badań**

Celem pracy było opracowanie modeli chropowatości powierzchni obrobionej po frezowaniu w różnych warunkach kompozytu aluminiowo-ceramicznego, a także ich weryfikacji w warunkach doświadczalnych.

Celem badań wstępnych było określenie wpływu różnych parametrów frezowania (prędkości skrawania  $v_c$  oraz posuwu na ostrze  $f_z$ ), a także materiału ostrza (CVD, CBN oraz węglika spiekanego), na parametry chropowatości powierzchni. Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych określono, który materiał ostrza jest najlepszy do przeprowadzenia procesu obróbki kompozytu aluminiowo-ceramicznego firmy Duralcan.

Uzyskane wyniki badań i wybrane materiały narzędziowe, stały się punktem wyjścia dla badań zasadniczych, których celem było sformułowanie modelu chropowatości. Opracowany model został zweryfikowany w serii doświadczeń obejmujących pomiar parametrów chropowatości powierzchni.

Badania przeprowadzono na trzyosiowym centrum frezarskim firmy DECKEL MAHO model DMC 70V hi-dyn (Rys. 3.1) o maksymalnej prędkości obrotowej elektrowniczej wynoszącej  $n = 30\ 000$  obr/min.

W badaniach wstępnych i zasadniczych zastosowano cztery monolityczne frezy walcowo-czołowe (Tab. 3.1) o średnicy  $d = 16$  mm i różnej liczbie ostrzy  $z$  (Rys. 3.2) wykonane z polikrystalicznego diamentu PCD firmy FRAISA, węglika spiekanego z powłoką diamentową (CVD) firmy Kennametal, polikrystalicznego regularnego azotku boru (CBN) firmy DIXI, oraz węglika spiekanego (WC) firmy Fraisa z powłoką ceramiczną TiCN.

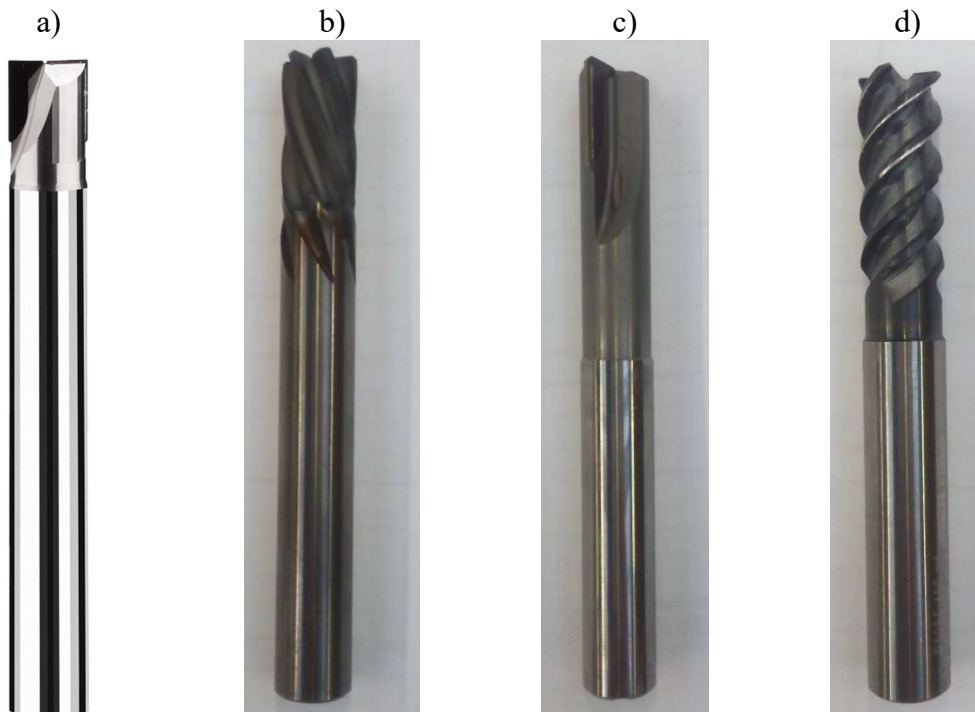
*Tab. 3.1. Parametry zastosowanych w badaniach frezów*

<b>Firma</b>	<b>Materiał ostrza</b>	<b>Liczba ostrzy <math>z</math></b>
Fraisa	PCD	2
Kennametal	CVD	6
DIXI	CBN	2
Fraisa	WC	4

W różnych seriach badawczych stosowano różne zestawy frezów a informację na ten temat podano przed omówieniem wyników każdej serii.



*Rys. 3.1. Centrum obróbkowe firmy DECKEL MAHO model DMC 70V hi-dyn*

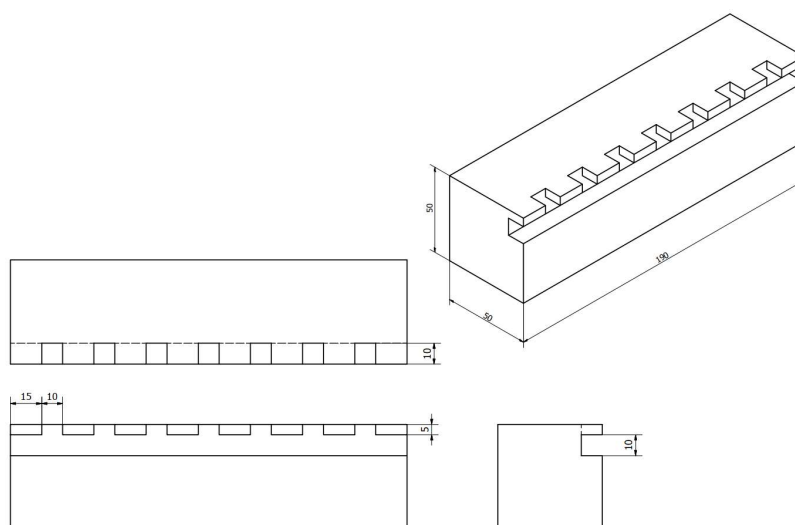


*Rys. 3.2. Frezy walcowo-czołowe zastosowane w badaniach a) PCD, b) CVD, c) CBN, d) WC*

W badaniach zastosowano kompozyt aluminiowo-ceramiczny MMC typu DURALCAN F3S.10S osnowie stopu aluminium, zbrojonego cząsteczkami SiC zawierający odpowiednio do 10% objętości cząsteczek SiC. Producentem kompozytu jest Chemin de la Réserve. Wymiary próbki przedstawia Rys. 3.3.

Skład chemiczny próbki przedstawiono w Tab. 3.2.

Tab. 3.3 przedstawia podstawowe właściwości fizyczne kompozytu. Badania zrealizowano z i bez zastosowania cieczy chłodząco smarujących.



Rys. 3.3. Wymiary próbki kompozytu aluminiowo-ceramicznego firmy DURALCAN

Tab. 3.2. Skład chemiczny kompozytu aluminiowo-ceramicznego F3S.10S firmy Duralcan

<b>Skład chemiczny, % wag.</b>							
<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>
8,88	0,07	0,001	0,002	0,62	0,002	0,10	reszta

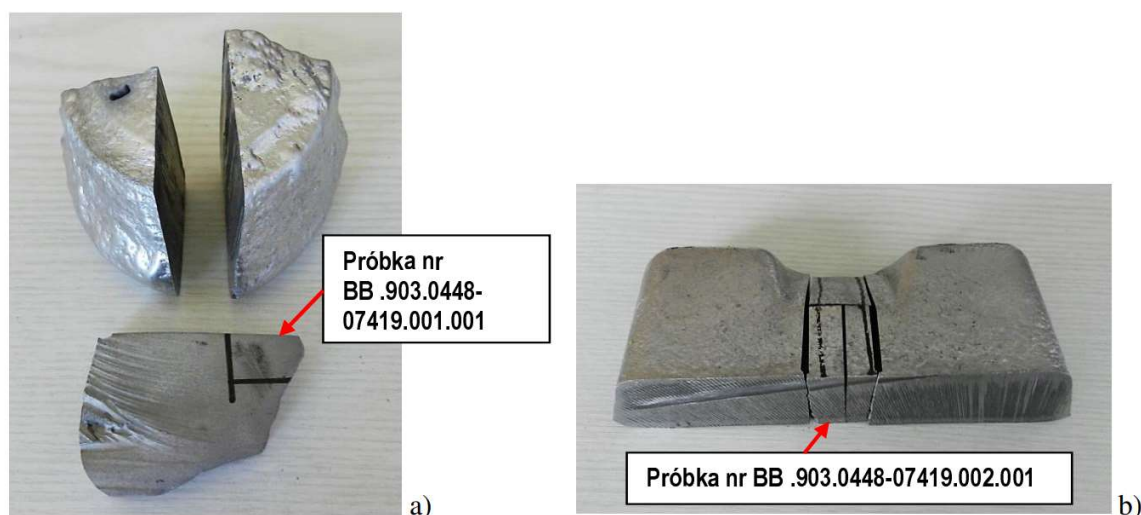
Tab. 3.3. Wytrzymałość na rozciąganie i twardość podane przez producenta

Najwyższa wytrzymałość na rozciąganie	[MPa]	338 (310)
Optymalna wytrzymałość na rozciąganie	[MPa]	303 (283)
Wydłużenie	[%]	1.2
Moduł sprężystości	[GPa]	86.2
Twardość Rockwella	[HRB]	73

W ramach badań zlecono także wykonanie zglądów metalograficznych z dwóch fragmentów odlewów, z których jeden był materiałem wyjściowym a drugi odlewem w postaci „gąski”. Odlewy wykonano z kompozytu metalowego na bazie odlewniczego stopu aluminium z 10 %-ową zawartością SiC o handlowej nazwie Duralcan. Z ww. fragmentów odlewów pobrano próbki do badania mikrostruktury, które oznaczono następującymi numerami:

- BB .903.0448-07419.001.001 - próbka pobrana wzdłużnie z fragmentu materiału wyjściowego nr BB .903.0448-07419.001,
- BB .903.0448-07419.002.001 - próbka pobrana wzdłużnie z fragmentu odlewu nr BB .903.0448-07919.002.

Miejsca pobrania próbek z obu fragmentów odlewów pokazano na Rys. 3.4.



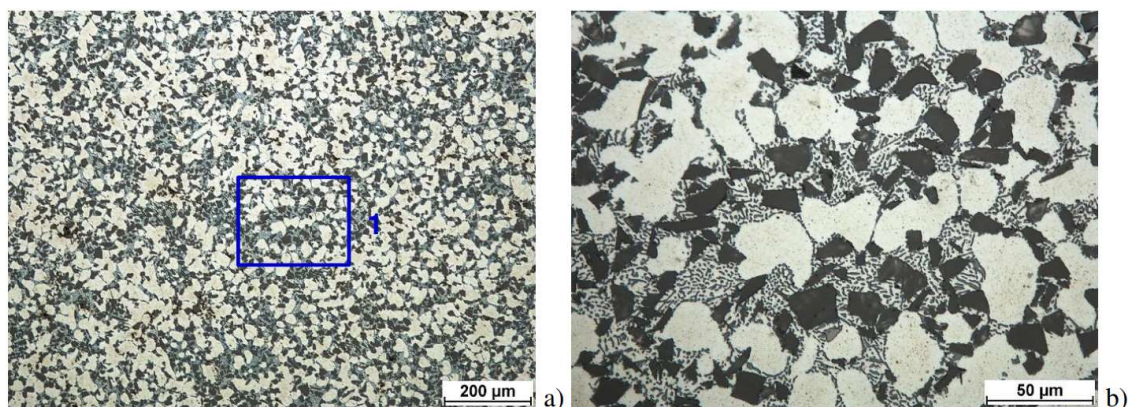
*Rys. 3.4. Miejsca pobrania próbek nr z dostarczonych fragmentów odlewów nr BB .903.0448-07419.001 (a) i BB .903.0448-07419.002 (b)*

Plaster nr BB .903.0448-07419.001.001 wycięto strumieniem wody. Z powodu uszkodzenia powierzchni podczas cięcia pobrano próbkę do bada mikrostruktury z obszaru o najlepszej jakości powierzchni (Rys. 3.4a). Próbkę nr BB .903.0448-07419.002.001 wycięto za pomocą piły mechanicznej i przecinarki metalograficznej.

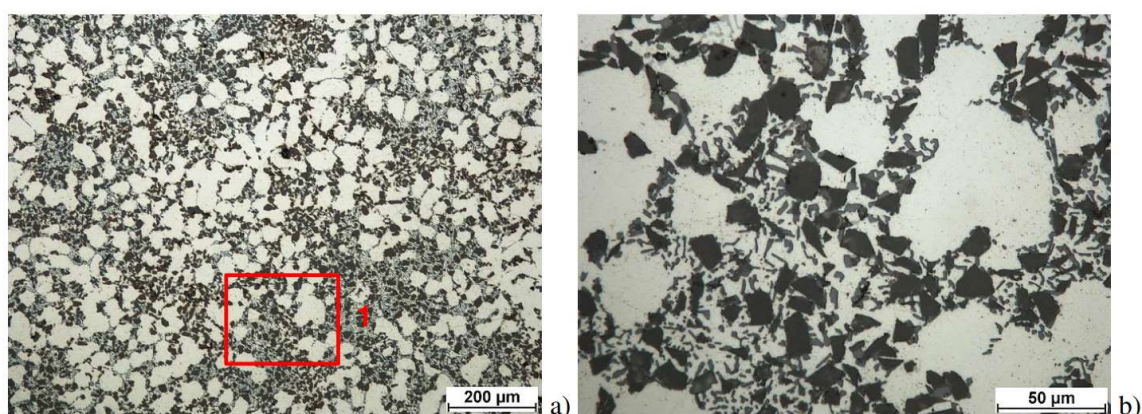
### **Obserwacje mikrostruktury - LM**

Próbki nr BB .903.0448-07419.001.001 i BB .903.0448-07419.002.001 przygotowano jak zglądy metalograficzne zgodnie z instrukcją badawczą nr Z-IB/3-05 – *Obserwacje struktury metali i stopów*, wydanie VI, data wydania 4.05.2015. Mikrostruktury próbek ujawniono po ich trawieniu w odczynniku Mi2Al wg normy PN-75/H-04512 –

*Metale nieżelazne -- Odczynniki do ujawniania mikrostruktury.* Obserwacje mikrostruktury ww. próbek wykonano przy powiększeniach obrazu wynoszących 100x i 500x. Wyniki tych badań podano na Rys. 3.5 i Rys. 3.6. Fotografie mikrostruktury zapisano przy powiększeniach obrazu wynoszących odpowiednio: 63x i 310x.



*Rys. 3.5 Mikrostruktura próbki nr BB .903.0448-07419.001.001 pobranej z fragmentu odlewu nr BB .903.0448-07419.001. LM: a – obszar 1 z okolicy środka próbki, b – powiększony fragment obszaru 1*



*Rys. 3.6 Mikrostruktura próbki nr BB .903.0448-07419.002.001 pobranej z fragmentu odlewu nr BB .903.0448-07419.002. LM: a – obszar 1 z okolicy środka próbki, b – powiększony fragment obszaru 1*

W mikrostrukturze próbek nr BB .903.0448-07419.001.001 i BB .903.0448-07419.002.001 występują jasne dendryty roztworu stałego  $\alpha$ , ciemnoszara faza wzmacniająca SiC oraz jasnoszare wydzielienia najprawdopodobniej fazy bogatej w krzem. Węglik SiC oraz faza bogata w krzem rozmieszczone są w przestrzeniach międzydendrytycznych. W badaniach mikrostruktury zastosowano mikroskop świetlny Eclipse L150 (Nikon) wyposażony w oprogramowanie do archiwizowania i analizy obrazu NIS Elements.

### **3.2 Metodyka badań**

Badania wstępne jak i zasadnicze obejmowały pomiary parametrów chropowatości powierzchni oraz topografii powierzchni po procesie frezowania kompozytu aluminiowo-ceramicznego przy zmiennych parametrach frezowania.

Parametry zmienne:

- prędkość skrawania  $v_c$
- prędkość ruchu posuwowego  $v_f$

Parametry stałe:

- głębokość skrawania osiowa  $a_p$
- głębokość skrawania promieniowa  $a_e$

Do analizy chropowatości powierzchni obrobionej zastosowano następujące parametry chropowatości 2D i 3D:

- $Ra, Sa$  - średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia,
- $Rz, Sz$  – maksymalna wysokość profilu 3D
- $Rt, St$  - odchylenie głównego kierunku tekstury powierzchni od osi  $90^\circ$ , prostopadłej do kierunku zbierania danych,
- $Rq, Sq$  - średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia [99].

Po każdym przejściu na powierzchni obrobionej wykonywano po 5 pomiarów parametrów chropowatości w różnych miejscach w celu uśrednienia wyników. Parametry chropowatości 2D przeprowadzono za pomocą profilografometru W5 (Rys. 3.7), lub T500 wraz z oprogramowaniem Turbo DataWin-NT 1.34 (Rys. 3.8) firmy Hommelwerke (w zależności od serii badawczej). W badaniach przyjęto długość odcinka pomiarowego  $l_r = 4.8$  mm.

Pomiary 3D chropowatości powierzchni obrobionej wykonano za pomocą profilografometru T8000 firmy Hommelwerke (Rys. 3.9). Obrazy 3D wykonywano najczęściej na powierzchni o wymiarach 3x3mm i na 100 przekrojach.

Profilografometr Hommelwerke T8000, dzięki zastosowaniu zmechanizowanego opuszczania i podnoszenia sondy badawczej, wyposażony jest w automatyczne przebiegi

pomiarowe, które znacznie wpływają na płynność prowadzenia pomiaru. Urządzenie wyposażone jest w specjalne oprogramowanie pozwalające wyznaczyć parametry opisujące warstwę wierzchnią materiału takie jak chropowatość czy falistość. Oprogramowanie pozwala także wyznaczyć topografię 3D powierzchni oraz wygenerować krzywą Abotta-Firestona.

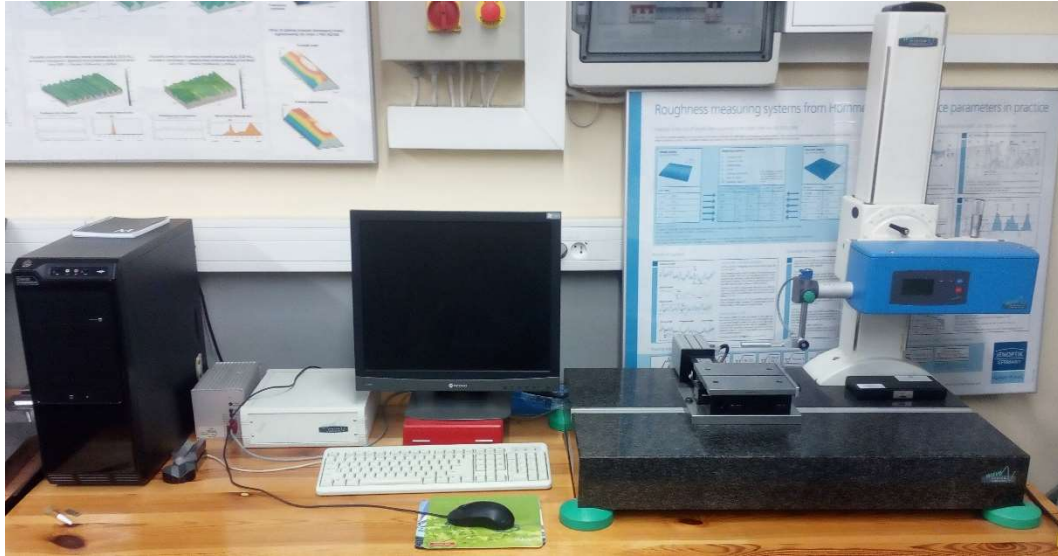


*Rys. 3.7. Profilografometr W5 firmy Hommelwerke*



*Rys. 3.8. Profilografometr firmy Hommelwerke T500 wraz z oprogramowaniem Turbo DataWin-NT 1.34*

Zastosowane parametry frezowania były różne w zależności od zastosowanych narzędzi i serii pomiarowej. Szczegółowy wykaz parametrów i warunków frezowania podany jest na początku odpowiednich rozdziałów. Zastosowano frezowanie współbieżne.



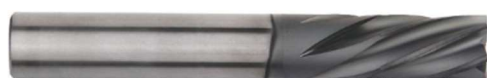
*Rys. 3.9. Stanowisko do pomiarów chropowatości powierzchni*



## 4. BADANIA WSTĘPNE

### 4.1 Porównanie chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych rodzajów frezów

W tym cyklu badań zastosowano dwa rodzaje frezów: jeden wykonany z węglika spiekanego z powłoką diamentową (Rys. 4.1), drugi z węglika spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN (Rys. 4.2).



Rys. 4.1. Frez pełnowęglkowy z powłokiem diamentowym  $d=10$  mm,  $z=6$ , firmy KENNAMETAL



Rys. 4.2. Frez pełnowęglkowy WC  $d=16$  mm,  $z=4$ , firmy FRAISA

Do oceny zużycia ostrza zastosowano mikroskop warsztatowy i mierzono wskaźnik  $VB_B$  – szerokość starcia na powierzchni przyłożenia.

Do pomiarów 2D chropowatości powierzchni obrobionej zastosowano profilografometr firmy Hommelwerke T500 wraz z oprogramowaniem Turbo DataWin-NT 1.34. W oparciu o uzyskane profilogramy wyznaczono następujące parametry:  $Ra$ ,  $Rz$  i  $Rt$ .

Badania przeprowadzono wg. planu dwupoziomowego całkowitego przyjmując wartości max i min dla  $v_c$ ,  $f$ ,  $a_e$  zgodnie z Tab. 4.1 i Tab. 4.2.

Tab. 4.1. Parametry dla frezu z powłoką diamentową, KENNAMETAL

$S$	$L$	Wartości	Unormowane zmienne WE
$v_c$ [m/min]	$v_{c \max}$	700	1
	$v_{c \min}$	350	-1
$f$ [mm/ostrze]	$f_{\max}$	0.05	1
	$f_{\min}$	0.01	-1
$a_e$ [mm]	$a_{e \max}$	0.5	1
	$a_{e \min}$	0.1	-1

Tab. 4.2. Parametry dla frezu z węglika, FRAISA

$S$	$L$	Wartości	Unormowane zmienne WE
$v_c$ [m/min]	$v_{c \max}$	90.43	1
	$v_{c \min}$	28.13	-1
$f$ [mm/ostrze]	$f_{\max}$	0.08	1
	$f_{\min}$	0.02	-1
$a_e$ [mm]	$a_{e \max}$	1.0	1
	$a_{e \min}$	0.2	-1

W tym przypadku będzie miała zastosowanie funkcja dwuczynnikowa typu:

$$n = L^S \quad (13)$$

gdzie:

$n$  - liczba eksperymentów bez powtórzeń.

$L$  - liczba zmiennych wejściowych  $x_{k \min}$  i  $x_{k \max}$ . w naszym przypadku 2.

$S$  - liczba zmiennych wartości. w naszym przypadku 3.

Stosując się do powyższego wzoru otrzymano:  $n = 2^3 = 8$ , razy 3 powtórzenia, co daje 24 eksperymenty.

Badania przeprowadzono dla frezowania współbieżnego, dla którego  $a_p = 5$  mm i była stała. Droga frezowania wynosiła zaledwie  $L_f = 10$  mm, aby zniwelować efekt wpływu zużycia ostrza na chropowatość powierzchni obrobionej.

Po każdym przejściu wykonano po 5 pomiarów parametrów  $Rz$ ,  $Ra$  i  $Rt$  w różnych miejscach obrobionej powierzchni. Każde z 8 przejść różniło się od siebie parametrami obróbki:  $v_c$ ,  $fz$ ,  $a_e$ . Po każdym przejściu mierzono też wskaźnik zużycia ostrza  $VB_B$ , aby sprawdzić czy nie przekroczył wartości  $VB_B < 0.05$  mm. Wartość ta wynika z doświadczeń autorów pracy i sugeruje, że poniżej tej wartości zużycie ostrza nie wywiera istotnego wpływu na chropowatość powierzchni obrobionej. Maksymalna zmierzona wartość zużycia wynosiła  $VB_B = 0.04$  mm, więc nie brano jej pod uwagę jako czynnik zmienny

Otrzymane wyniki badań dla 24 przejęć przedstawiono w Tab. 4.3 dla frezu z powłoką diamentową i w Tab. 4.4 dla frezu z węgliku spiekanego. Wartości parametrów chropowatości dla 3 powtórzeń uśredniono. Mając na uwadze fakt, że wykonano po 5 pomiarów chropowatości na każdej frezowanej powierzchni i próby te powtórzono 3 razy, Tab. 4.3 i Tab. 4.4 pokazują wartość średnią z 15 pomiarów. Interpretację graficzną parametru  $Rz$  pokazano na Rys. 4.3 i Rys. 4.4.

*Tab. 4.3. Otrzymane wyniki dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką diamentową*

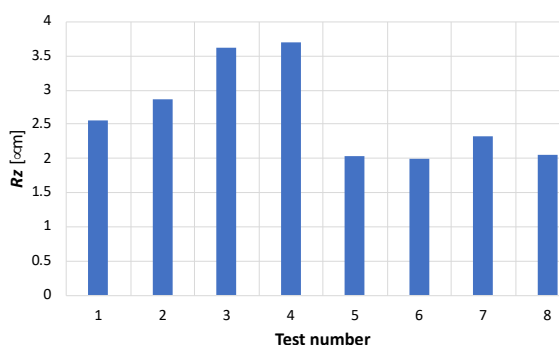
Lp	$v_c$ (m/min)	$fz$ (mm/ostrze)	$a_e$ (mm)	$a_p$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )
1	350	0.01	0.1	5.00	0.40	2.56	3.53
2	350	0.01	0.5	5.00	0.46	2.86	3.84
3	350	0.05	0.1	5.00	0.58	3.62	4.70
4	350	0.05	0.5	5.00	0.59	3.69	5.07
5	700	0.01	0.1	5.00	0.32	2.03	2.79
6	700	0.01	0.5	5.00	0.32	2.00	2.73
7	700	0.05	0.1	5.00	0.35	2.33	3.76
8	700	0.05	0.5	5.00	0.33	2.06	2.75

Z wykresów przedstawionych na Rys. 4.3 i Rys. 4.4 wynika, że dla frezu z powłoką diamentową uzyskano zdecydowanie niższe wartości parametru  $Rz$  (największa wartość  $Rz = 3.69 \mu\text{m}$ ) niż dla frezu węglkowego z powłoką ceramiczną (największa wartość  $Rz = 9.96 \mu\text{m}$ ).

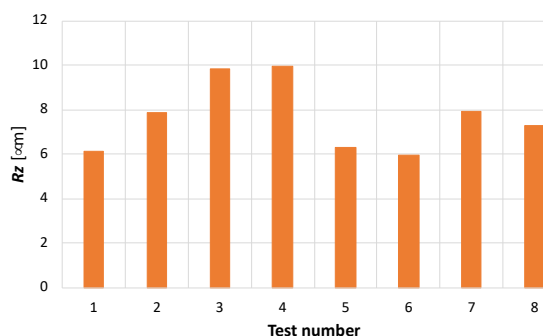
W celu analizy wpływu parametrów skrawania na chropowatość powierzchni wykonano wykresy Pareto dla dwóch badanych frezów (Rys. 4.5). Wykres Pareto przedstawia wszystkie istotne interakcje mające wpływ na chropowatość  $Rz$ . Wyniki wyraźnie wskazują, że posuw i prędkość skrawania mają największy wpływ na chropowatość, podczas gdy wpływ głębokości skrawania można pominąć.

Tab. 4.4. Otrzymane wyniki dla frezu z węglika spiekanego z powłoką ceramiczną

Lp	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/ostrze)	$a_e$ (mm)	$a_p$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )
1	28.13	0.02	0.2	5.0	1.21	6.15	8.35
2	28.13	0.02	1.0	5.0	1.52	7.88	10.96
3	28.13	0.08	0.2	5.0	2.35	9.82	12.90
4	28.13	0.08	1.0	5.0	2.18	9.96	12.47
5	90.43	0.02	0.2	5.0	1.17	6.29	8.63
6	90.43	0.02	1.0	5.0	1.04	5.94	9.08
7	90.43	0.08	0.2	5.0	1.38	7.90	11.34
8	90.43	0.08	1.0	5.0	1.37	7.30	10.09



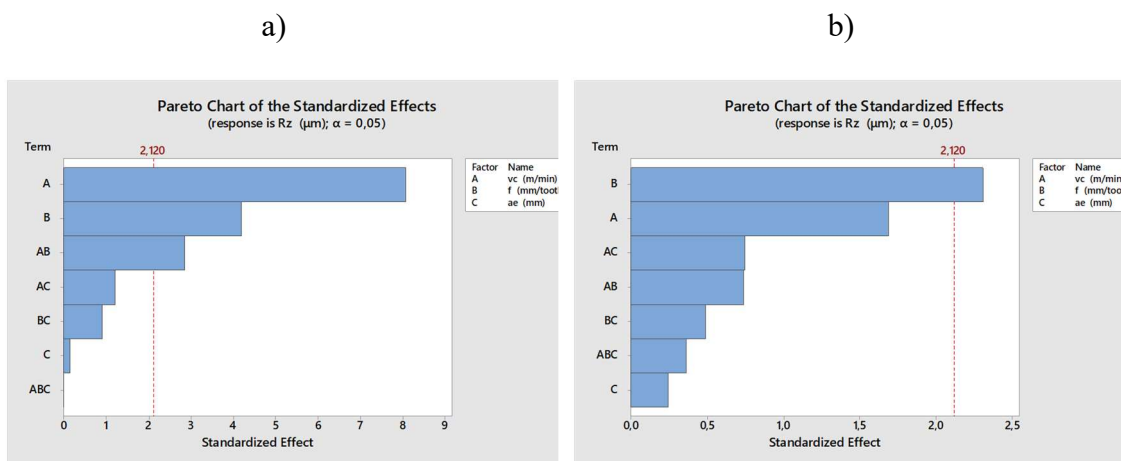
Rys. 4.3. Parametr  $Rz$  dla frezu z węglikowego z powłoką diamentową



Rys. 4.4. Parametr  $Rz$  dla frezu węglikowego z powłoką ceramiczną

Posuw  $f$  i prędkość skrawania  $v_c$  odgrywają istotną rolę w kształtowaniu chropowatości powierzchni obrobionej. Nie mniej istotne okazują się interakcje pomiędzy tymi dwoma parametrami. Wzrost posuwu powoduje wzrost chropowatości powierzchni dla konkretnej prędkości skrawania. Jednak wzrost prędkości skrawania powoduje nie tylko spadek parametrów chropowatości, ale zmienia się też intensywność wpływu posuwu na chropowatość. Dla dużych prędkości skrawania intensywność wpływu posuwu jest mniejsza, przez co przy dużej prędkości skrawania i większym posuwie można osiągnąć taką samą a nawet mniejszą chropowatość (Rys. 4.6). Nasuwa się ważny praktyczny wniosek. Chcąc uzyskać zakładany parametr chropowatości powierzchni korzystnie jest

skrawać z większą prędkością  $v_c$  i podwyższonym posuwem na obrót  $f$ . Dzięki temu uzyskujemy porównywalne parametry chropowatości i jednocześnie zwiększamy ponad trzykrotnie wydajność obróbki, co pokazuje Tab. 4.5.



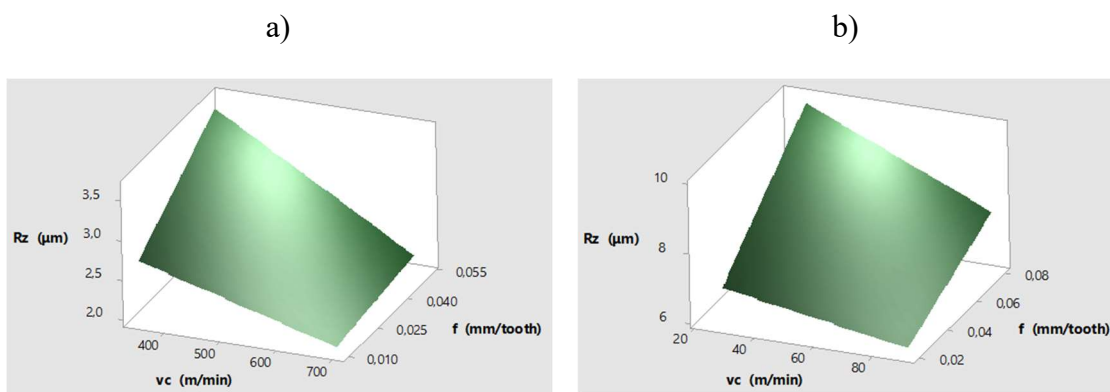
Rys. 4.5. Wykres Pareto efektów standaryzowanych dla Rz:

a) frez węglkowy z powłoką diamentową.

$$R_z = 2.64 - 0.54 \cdot v_c + 0.28 \cdot f + 0.01 \cdot a_p - 0.19 \cdot v_c \cdot f - 0.08 \cdot v_c \cdot a_p - 0.059 \cdot f \cdot a_p + 0.001 \cdot v_c \cdot f \cdot a_p$$

b) frez węglkowy z powłoką ceramiczną

$$R_z = 7.7 - 0.797 \cdot v_c + 1.1 \cdot f + 0.12 \cdot a_p - 0.35 \cdot v_c \cdot f - 0.35 \cdot v_c \cdot a_p - 0.23 \cdot f \cdot a_p + 0.17 \cdot v_c \cdot f \cdot a_p$$



Rys. 4.6. Wykres powierzchniowy  $R_z = f(v_c, f)$ : a) frez węglkowy z powłoką diamentową,

b) frez węglkowy z powłoką ceramiczną

Tab. 4.5. Porównanie wydajności frezowania przy zachowaniu porównywalnej wartości parametru  $R_z$

$v_c$ (m/min)	$f_z$ (mm/tooth)	$a_e$ (mm)	$a_p$ (mm)	$Ra_{avg}$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz_{avg}$ ( $\mu\text{m}$ )	$Q_v$ [cm <sup>3</sup> /min]
350	0.01	0.1	5.0	0.40	2.56	<b>0.33</b>
700	0.05	0.1	5.0	0.35	2.33	<b>3.34</b>
28.13	0.02	0.2	5.0	1.21	6.15	<b>0.054</b>
90.43	0.08	0.2	5.0	1.38	7.90	<b>0.691</b>

## 4.2 Porównanie chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych materiałów narzędziowych przy stałej prędkości obrotowej

Pierwsza seria badań wykazała, że posuw i prędkość skrawania mają istotny wpływ na chropowatość. Ponadto frez z powłoką diamentową daje mniejsze parametry chropowatości niż frez z powłoką ceramiczną.

Celem tej serii badań było potwierdzenie wpływu wartości posuwu na chropowatość powierzchni obrobionej. Wpływ posuwu na chropowatość wydaje się być oczywisty, jednak dla kompozytów metalowo ceramicznych zależność ta nie zawsze jest zgodna z modelem kinematyczno-geometrycznym.

Dla tej serii wytypowano trzy rodzaje frezów:

1. węgiel spiekany z powłoką ceramiczną TiCN,
2. frez z azotku boru CBN,
3. frez węglkowy z powłoką diamentową CVD (Rys. 4.7).

Parametry i warunki frezowania dla badanych narzędzi przedstawiono w Tab. 4.6 i Tab. 4.7.

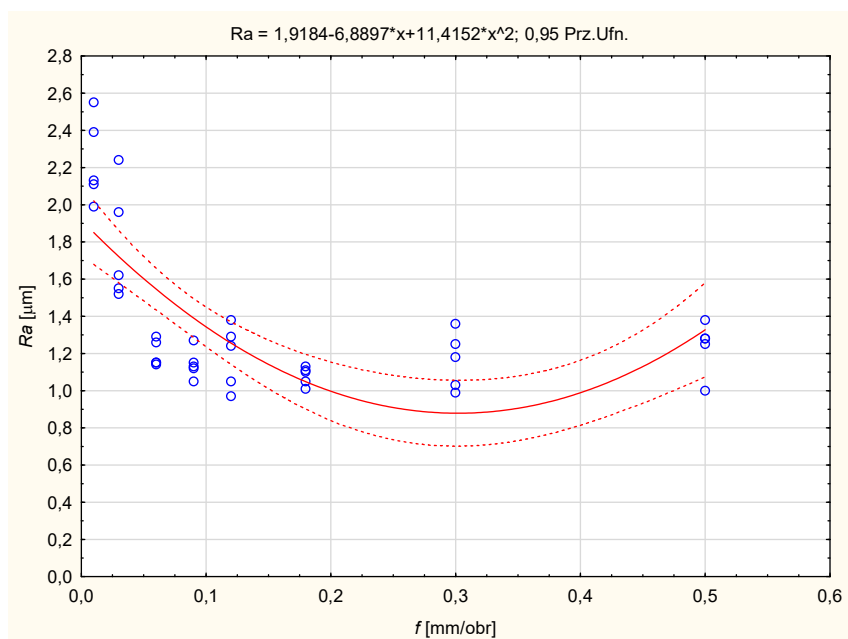
Dla frezu z azotku boru i frezu z powłoką diamentową zastosowano taką samą prędkość skrawania  $v_c = 500$  m/min, natomiast dla frezu z powłoką ceramiczną  $v_c = 250$  m/min. Pozostałe parametry, takie jak: posuw na obrót  $f$ , głębokości skrawania  $a_p$  i  $a_e$  pozostały stałe. Droga skrawania  $L=10$  mm w celu wyeliminowania dodatkowej zmiennej jak zużycie ostrza. Wszystkie frezy po zakończeniu badań posiadały zużycie na poziomie  $VB_B < 0,02$  mm, dlatego czynnik zużycia pominięto.



Tab. 4.7 Parametry frezowania na mokro dla dwóch serii CVD i CBN

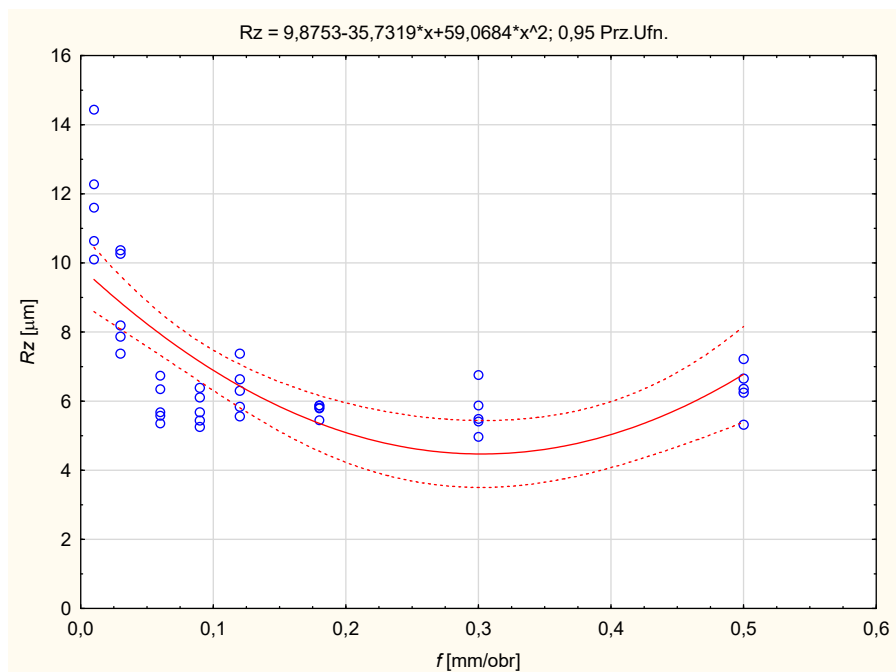
CVD	CBN $d = 10\text{mm}$ , $v_c = 500\text{ m/min}$ , $a_e = 0.2\text{mm}$ , $a_p = 10\text{ mm}$ , $z = 6\text{ (CVD)}$ , $z = 2\text{ (CBN)}$		
	$f[\text{mm/obr}]$	$f_z[\text{mm/ostrze}]$	$v_f[\text{mm/min}]$
1.	0.01	0.0017	159
2.	0.03	0.005	477
3.	0.06	0.01	955
4.	0.09	0.015	1432
5.	0.12	0.02	1910
6.	0.18	0.03	2865
7.	0.3	0.05	4775
8.	0.5	0.083	7958

Na kolejnych wykresach przedstawiono uzyskane wyniki. Na Rys. 4.8 – Rys. 4.10 pokazano wykres rozrzutu parametrów  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_t$  w funkcji posuwu na obrót  $f$  dla frezu z węgla spiekanego z powłoką ceramiczną.

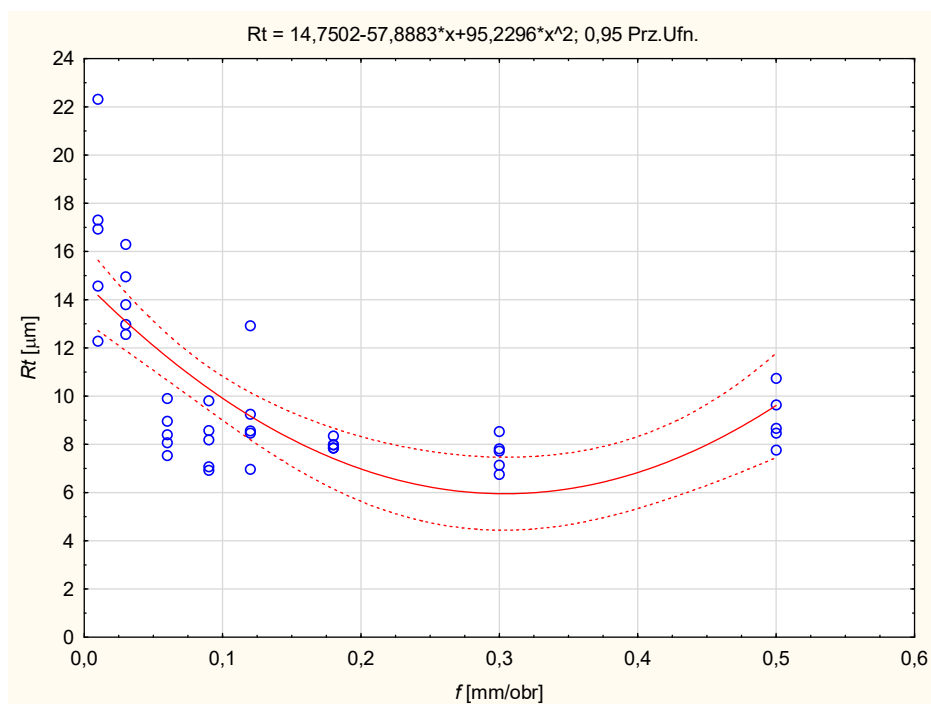


Rys. 4.8. Wykres rozrzutu parametru  $R_a$  dla WC przy stałej prędkości obrotowej  $n$



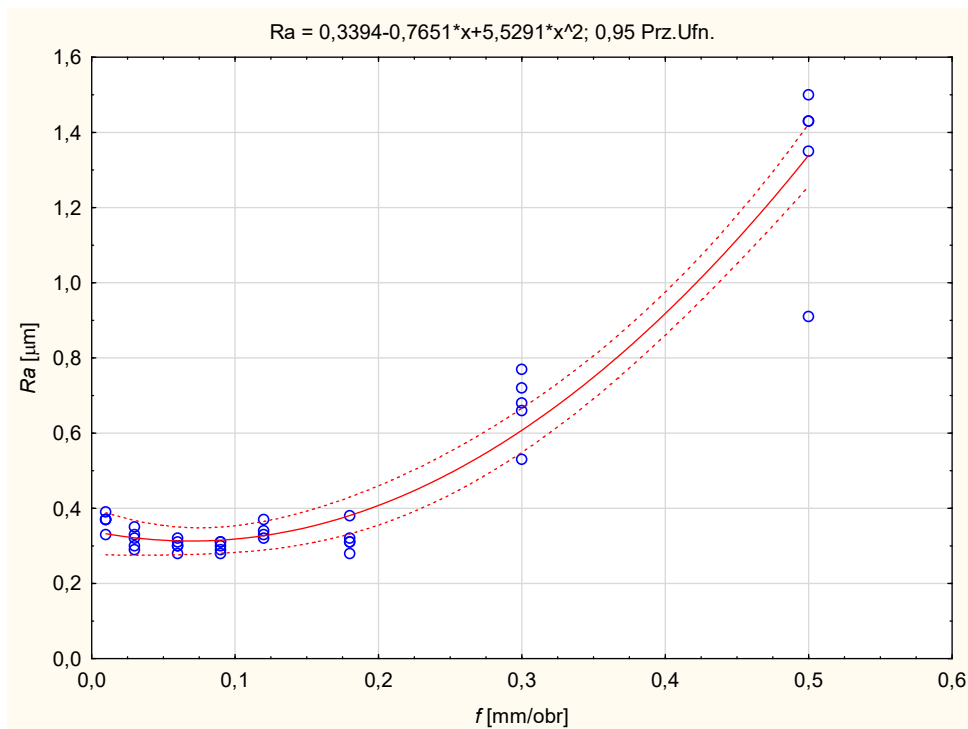


Rys. 4.9. Wykres rozrzutu parametru Rz dla WC przy stałej prędkości obrotowej  $n$

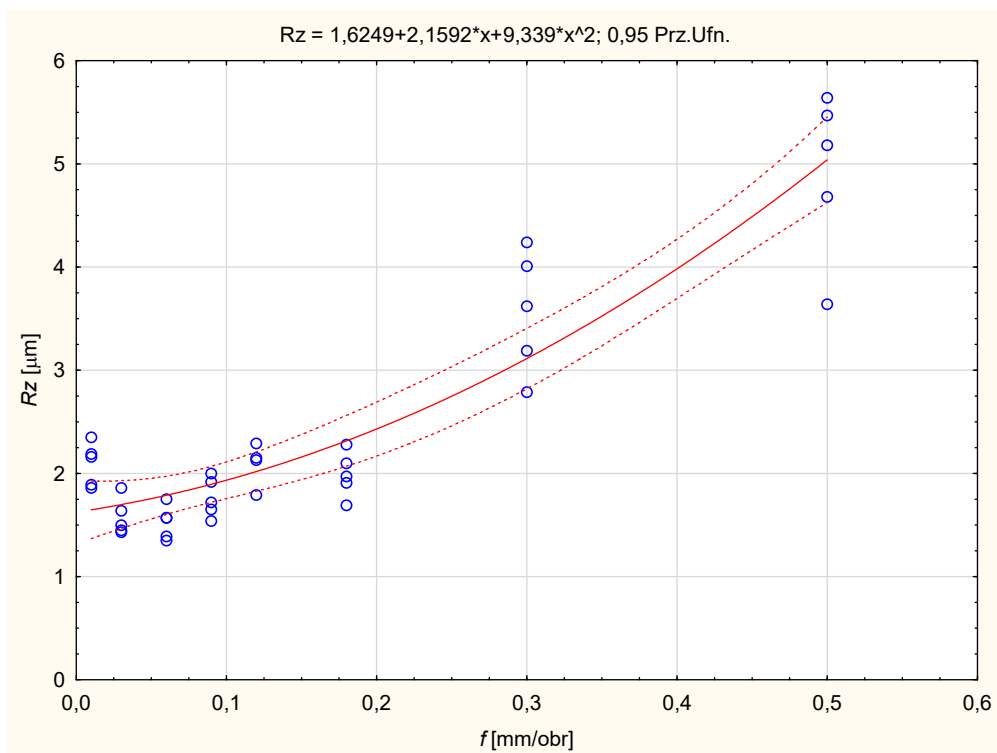


Rys. 4.10. Wykres rozrzutu parametru Rt dla WC przy stałej prędkości obrotowej  $n$

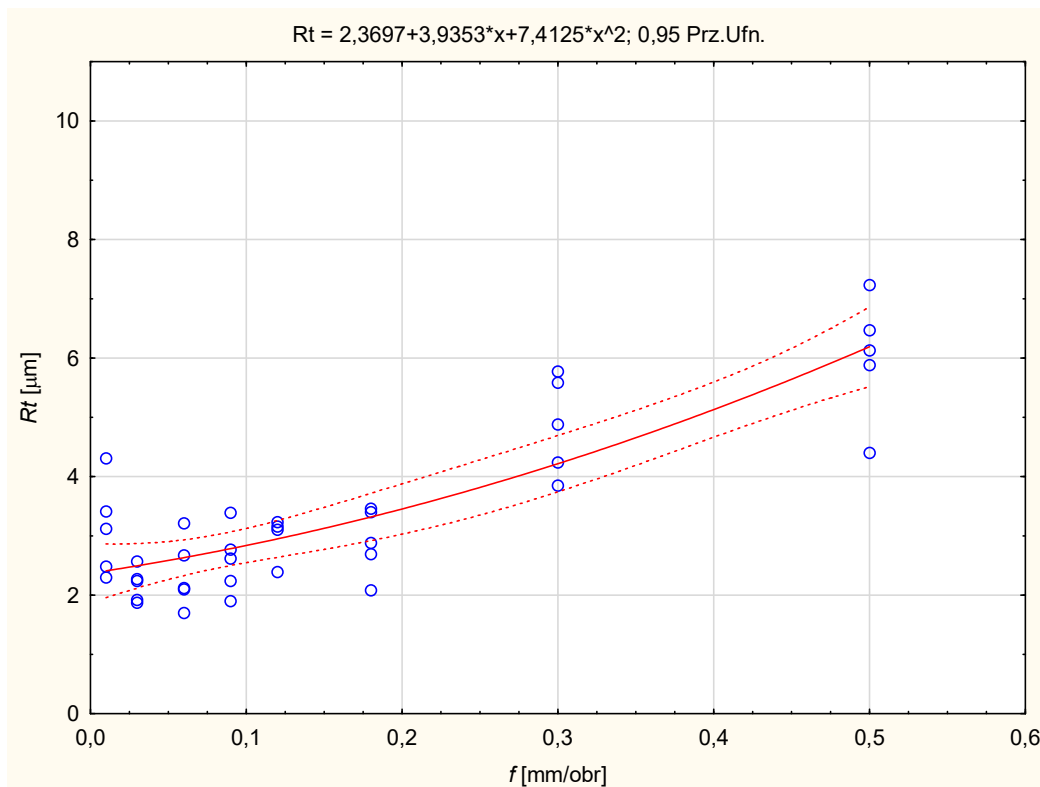
W ten sam sposób przedstawiono wyniki dotyczące frezu z azotku bory CBN (Rys. 4.11 – Rys. 4.13) i frezu z powłoką diamentową CVD (Rys. 4.14 – Rys. 4.16).



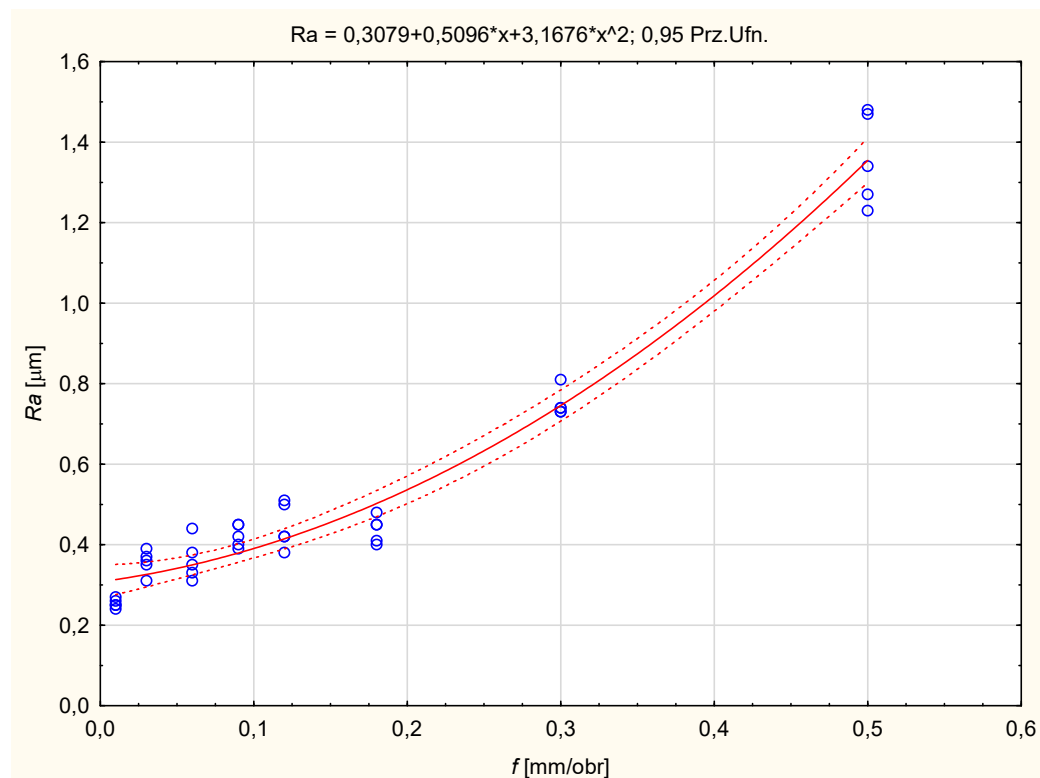
Rys. 4.11. Wykres rozrzutu parametru  $R_a$  dla CBN przy stałej prędkości obrotowej  $n$



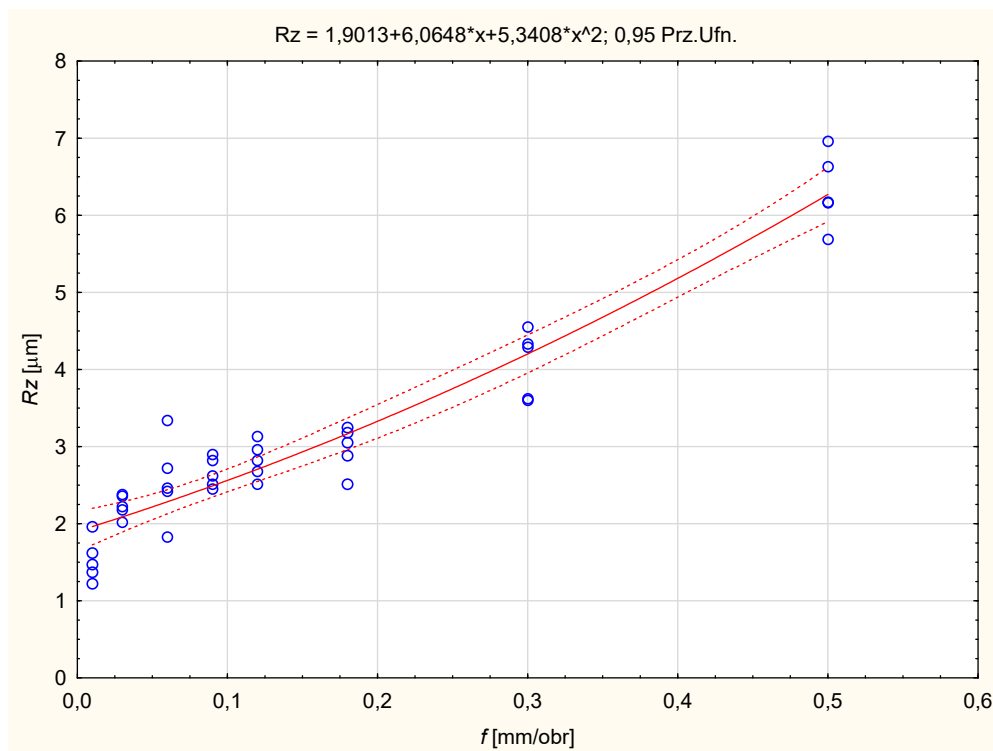
Rys. 4.12. Wykres rozrzutu parametru  $R_z$  dla CBN przy stałej prędkości obrotowej  $n$



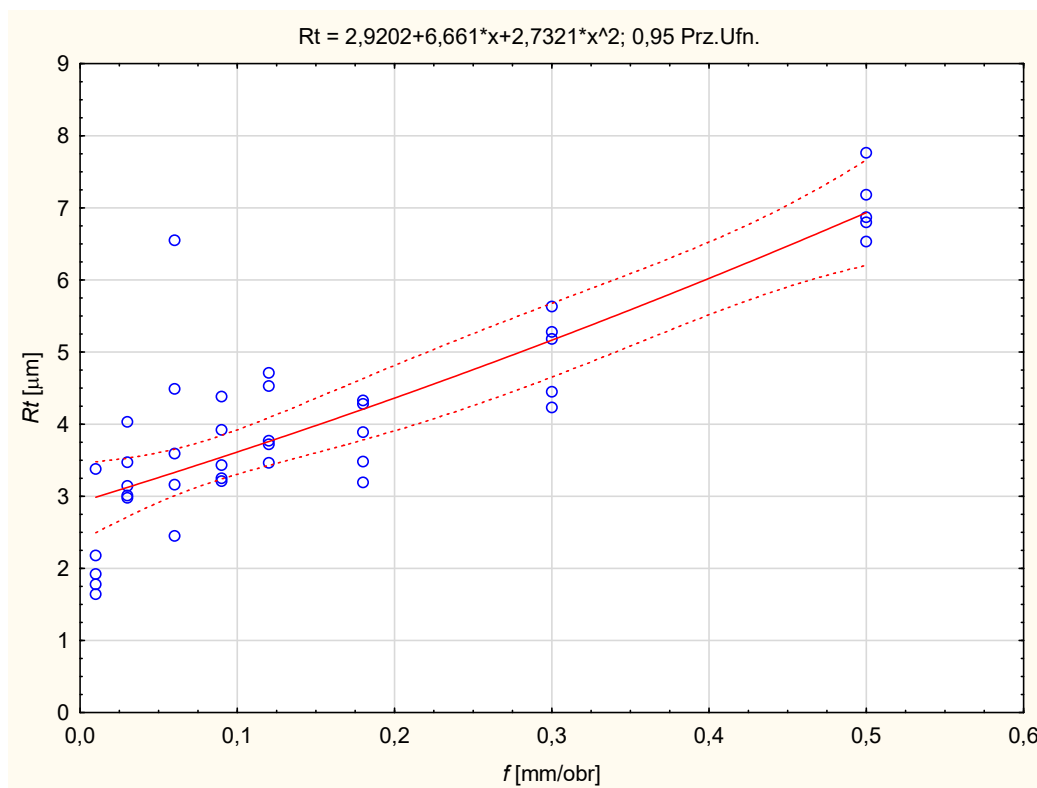
Rys. 4.13. Wykres rozrzutu parametru  $R_t$  dla CBN przy stałej prędkości obrotowej  $n$



Rys. 4.14. Wykres rozrzutu parametru  $R_a$  dla CVD przy stałej prędkości obrotowej  $n$



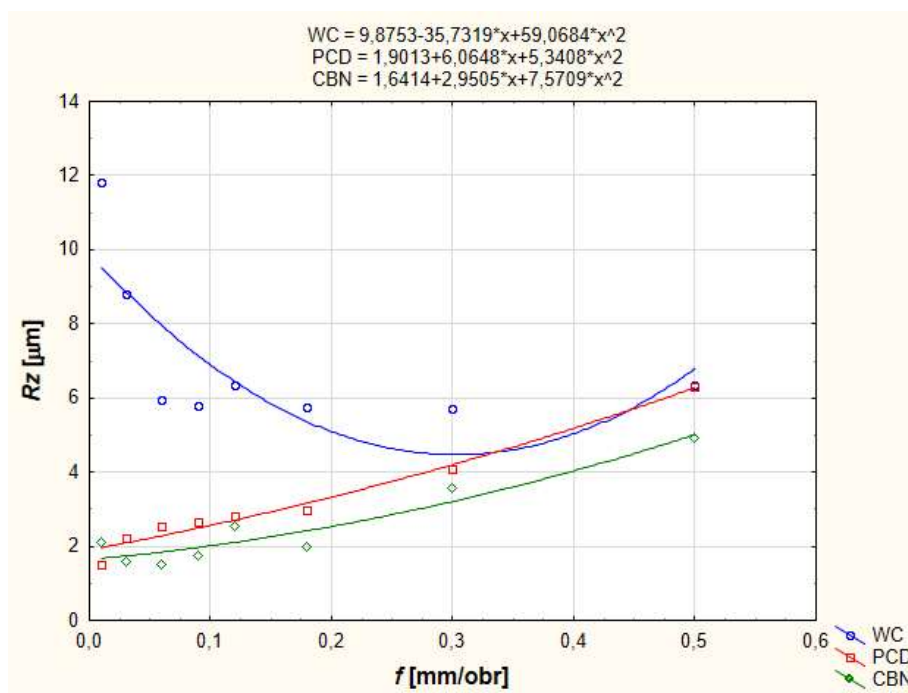
Rys. 4.15. Wykres rozrzutu parametru Rz dla CVD przy stałej prędkości obrotowej n



Rys. 4.16. Wykres rozrzutu parametru Rt dla CVD przy stałej prędkości obrotowej n

Z przedstawionej analizy wynika podstawowy wniosek, że wartość posuwu odgrywa istotną rolę w kształtowaniu chropowatości powierzchni obrabianej, o czym powszechnie jest wiadomo. Jednak dla różnych materiałów narzędziowych wpływ posuwu na parametry chropowatości jest inny. Dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką ceramiczną wpływ posuwu jest niemonotoniczny (Rys. 4.8 – Rys. 4.10). Wraz ze wzrostem posuwu parametry chropowatości maleją (do  $f < 0,3$  mm/obr) lub są na stałym poziomie (dla  $f = 0,3 - 0,5$  mm/obr). Jest to niezgodne z typową zależnością  $f=f(Ri)$ , dla której wzrost posuwu powoduje wzrost parametrów chropowatości. Typowe przebiegi zaobserwowano dla ostrzy z azotku boru (Rys. 4.11 – Rys. 4.13) i dla powłoki diamentowej (Rys. 4.14 – Rys. 4.16). Szczególnie jest to widoczne dla parametru  $Ra$  i  $Rz$  uzyskanych po frezowaniu frezem węglkowym z powłoką diamentową (Rys. 4.14 i Rys. 4.15). Przebiegi te są zgodne jakościowo z podstawowym modelem kinematyczno-geometrycznym. Nieco inaczej prezentują się wyniki dla parametru  $Rt$ , co wynika z większego rozrzutu wyników w porównaniu do parametrów  $Ra$  i  $Rz$ . Ponadto dla ostrzy z powłoką diamentową otrzymano węższe zakresy rozrzutów w porównaniu do ostrzy CBN.

Na Rys. 4.17 pokazano porównanie jakościowe i ilościowe parametru  $Rz$  w funkcji posuwu  $f$  dla badanych frezów przy stałej prędkości obrotowej  $n$ . Przedstawione wartości parametru  $Rz$  są uśrednione z 5 pomiarów.



Rys. 4.17. Porównanie parametru  $Rz$  dla badanych frezów przy stałej prędkości obrotowej  $n$

Anomalie, jakie otrzymano dla frezu węglkowego z powłoką ceramiczną wynikają w dużej mierze z wartości promienia zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej  $r_n$ . Dla tego frezu wartość ta wynosiła  $r_n=12\ \mu\text{m}$ , dla frezu CBN  $r_n=5\ \mu\text{m}$ , a dla frezy CVD  $r_n=6\ \mu\text{m}$ . Jak się okazuje wartość  $r_n$ =odgrywa (podobnie jak posuw  $f$ ) istotną rolę w kształtowaniu parametrów chropowatości. Parametr ten został więc uwzględniony w modelu Brammertz'a, który jest dokładniejszy dla małych wartości posuwu w porównaniu z modelem kinematyczno-geometrycznym.

### 4.3 Porównanie chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych materiałów narzędziowych przy stałym posuwie na obrót

Celem tej serii badań była analiza wpływu wartości prędkości skrawania  $v_c$  na chropowatość powierzchni obrobionej. Wpływ prędkości skrawania na chropowatość nie jest tak oczywisty jak posuwu, tym bardziej przeprowadzenie tej serii badań wydaje się konieczne. Dla tej serii wytypowano te same frezy, co w poprzednim rozdziale, czyli: frez z węgla spiekany z powłoką ceramiczną TiCN, frez z azotku boru CBN i frez węglkowy z powłoką diamentową CVD.

Parametry i warunki frezowania dla badanych narzędzi przedstawiono w Tab. 4.8. i Tab. 4.9

Dla frezu z azotku boru i frezu z powłoką diamentową zastosowano ten sam zakres prędkości skrawania, natomiast dla frezu z powłoką ceramiczną zakres ten zawężono do prędkości  $v_c = 400\ \text{m/min}$ . Pozostałe parametry, takie jak: posuw na obrót  $f$ , głębokości skrawania  $a_p$  i  $a_e$  pozostały stałe. Podobnie jak poprzednio droga skrawania  $L=10\ \text{mm}$  w celu wyeliminowania dodatkowej zmiennej jak zużycie ostrza. Wszystkie frezy po zakończeniu badań posiadały zużycie na poziomie  $VB_B < 0,02\ \text{mm}$ , dlatego czynnik zużycia pominięto. Na każdym frezowanym odcinku wykonano po 5 pomiarów parametrów  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_t$ .

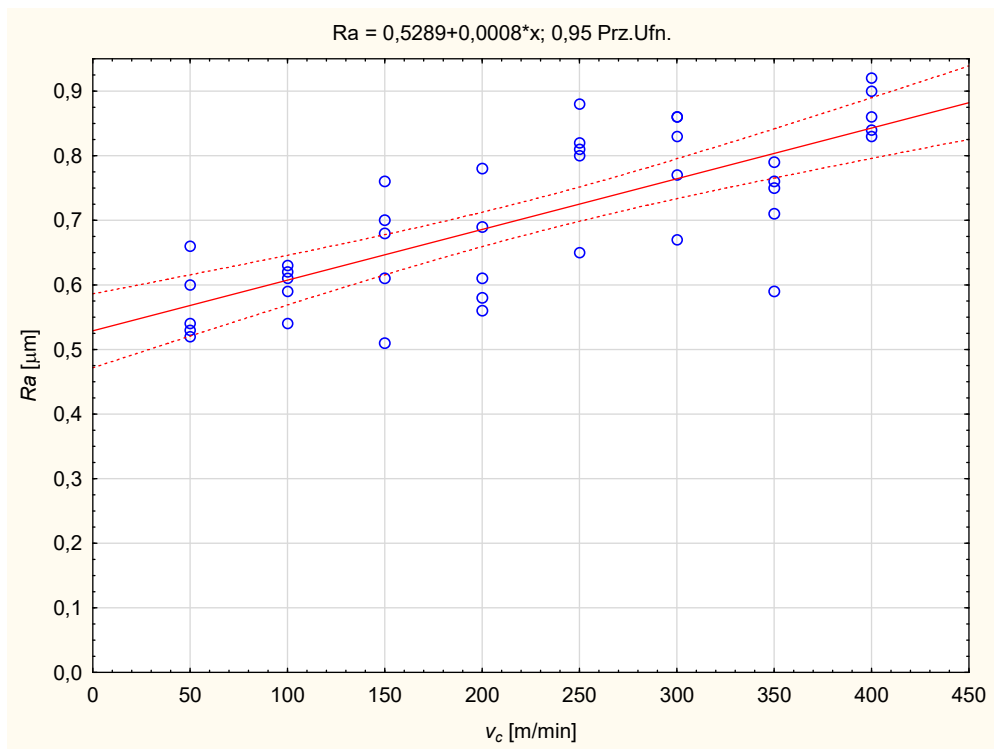
*Tab. 4.8. Parametry frezowania dla frezu węglkowego z powłoką TiCN (na mokro)*

<b>WC</b>	$d = 10\text{mm}, f = 0.1 \text{ mm/rev}, a_e = 0.2\text{mm},$ $a_p = 10 \text{ mm}, z = 6,$		
	$v_c$ [m/min]	$n$ [obr/min]	$v_f$ [mm/min]
1.	50	1591	159
2.	100	3182	318
3.	150	4773	477
4.	200	6364	636
5.	250	7955	796
6.	300	9564	955
7.	350	11137	1114
8.	400	12728	1273

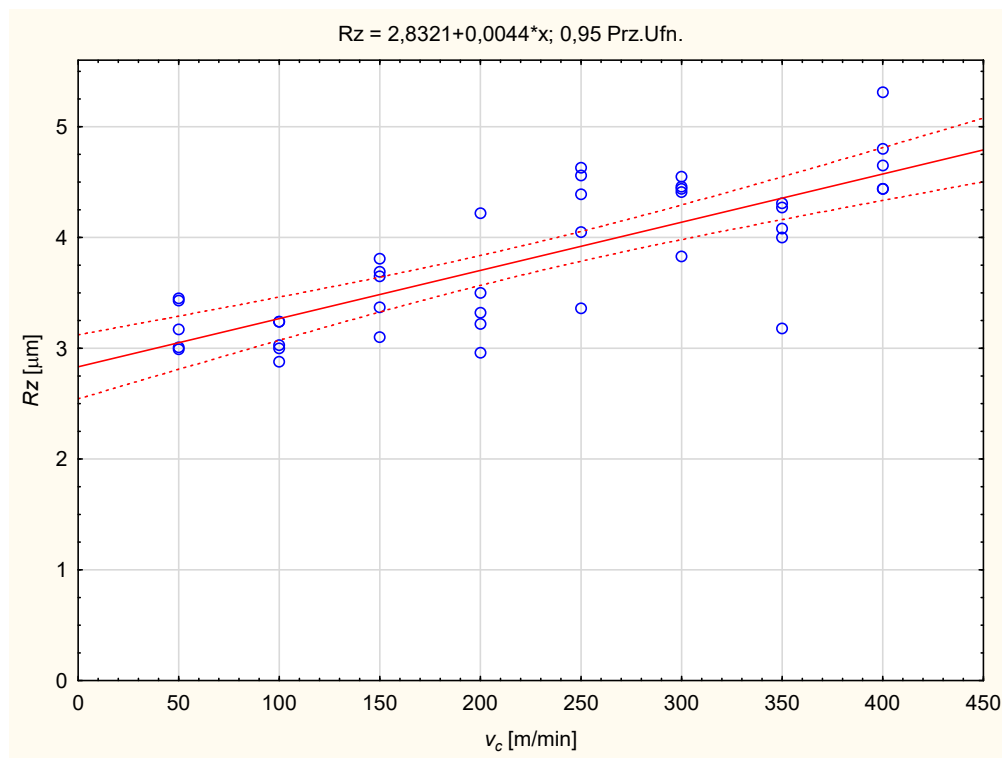
*Tab. 4.9. Parametry frezowania dla frezów z powłoką diamentową CVD i CBN (na mokro)*

<b>CVD</b> <b>CBN</b>	$d = 10\text{mm}, f = 0.1 \text{ mm/rev}, a_e = 0.2\text{mm},$ $a_p = 10 \text{ mm}, z = 6,$		
	$v_c$ [m/min]	$n$ [obr/min]	$v_f$ [mm/min]
1.	50	1591	159
2.	100	3182	318
3.	200	6364	636
4.	300	9546	955
5.	400	12728	1273
6.	500	15910	1591
7.	600	19093	1909
8.	700	22275	2227

Na Rys. 4.18 – Rys. 4.26 pokazano zmiany parametrów chropowatości przy stałym posuwie na obrót i zmiennej prędkości skrawania  $v_c$ .

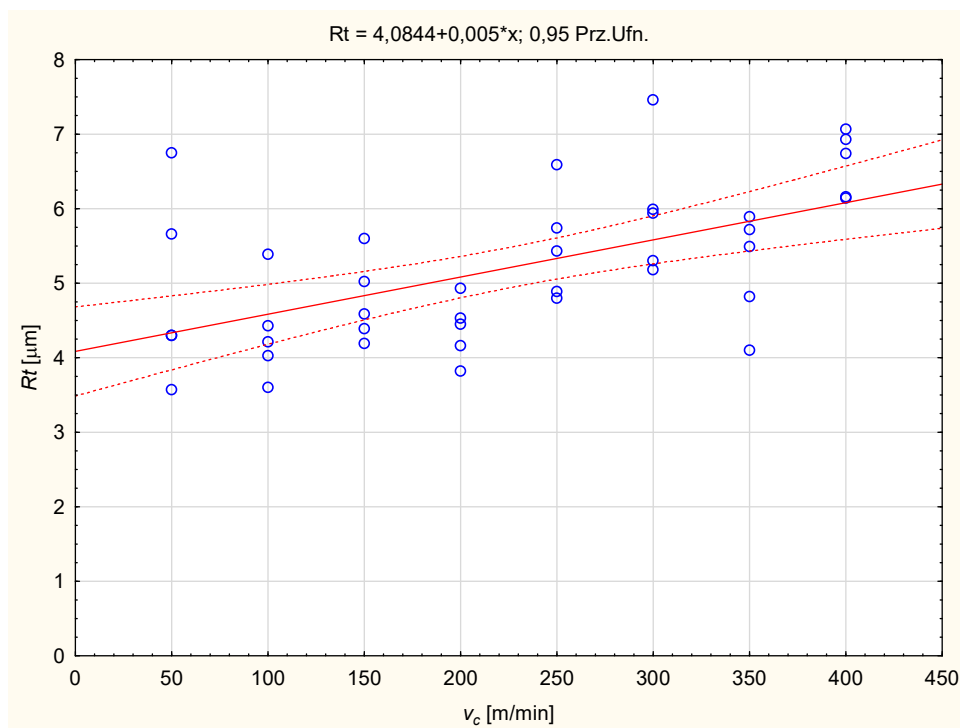


Rys. 4.18. Wykres rozrzutu parametru  $R_a$  dla frezu z węgliku spiekanego przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$



Rys. 4.19. Wykres rozrzutu parametru  $R_z$  dla frezu z węgliku spiekanego przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$



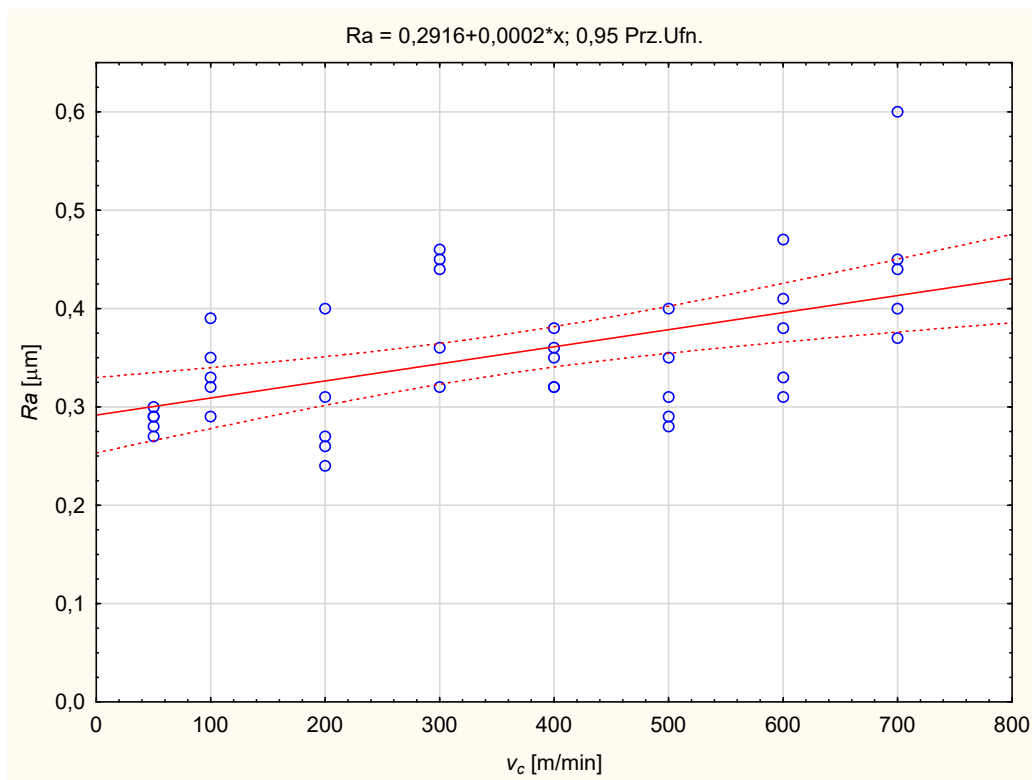


Rys. 4.20. Wykres rozrzutu parametru  $R_t$  dla frezu z węgliku spiekanego przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$

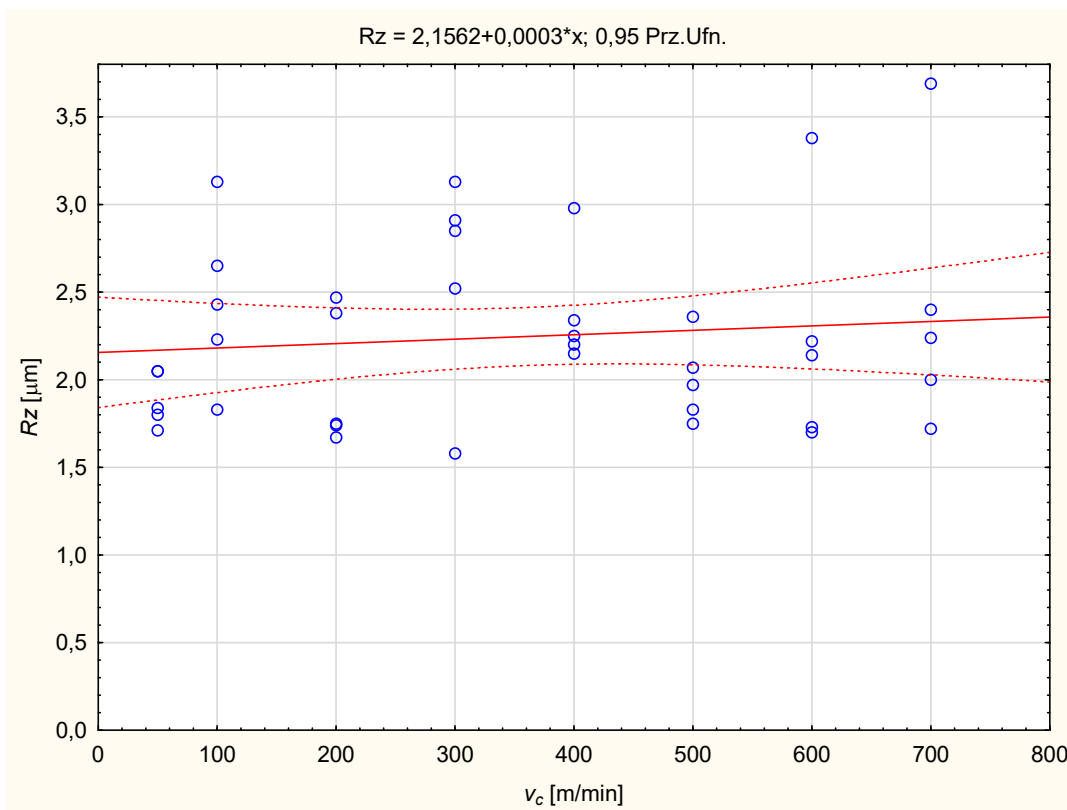
Uzyskane wyniki dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN cechują się znacznymi rozrzutami wartości dla poszczególnych parametrów chropowatości. W całym analizowanym zakresie prędkości skrawania widać tendencję wzrostową, co sugeruje, że wzrost prędkości  $v_c$  powoduje wzrost parametrów  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_t$ . Dlatego też z punktu widzenia chropowatości wskazane jest frezować z niskimi prędkościami skrawania.

Dla frezu z azotku boru (Rys. 4.21 – Rys. 4.23), podobnie jak w poprzednim przypadku, można zaobserwować znaczne rozrzuty wyników parametrów chropowatości.

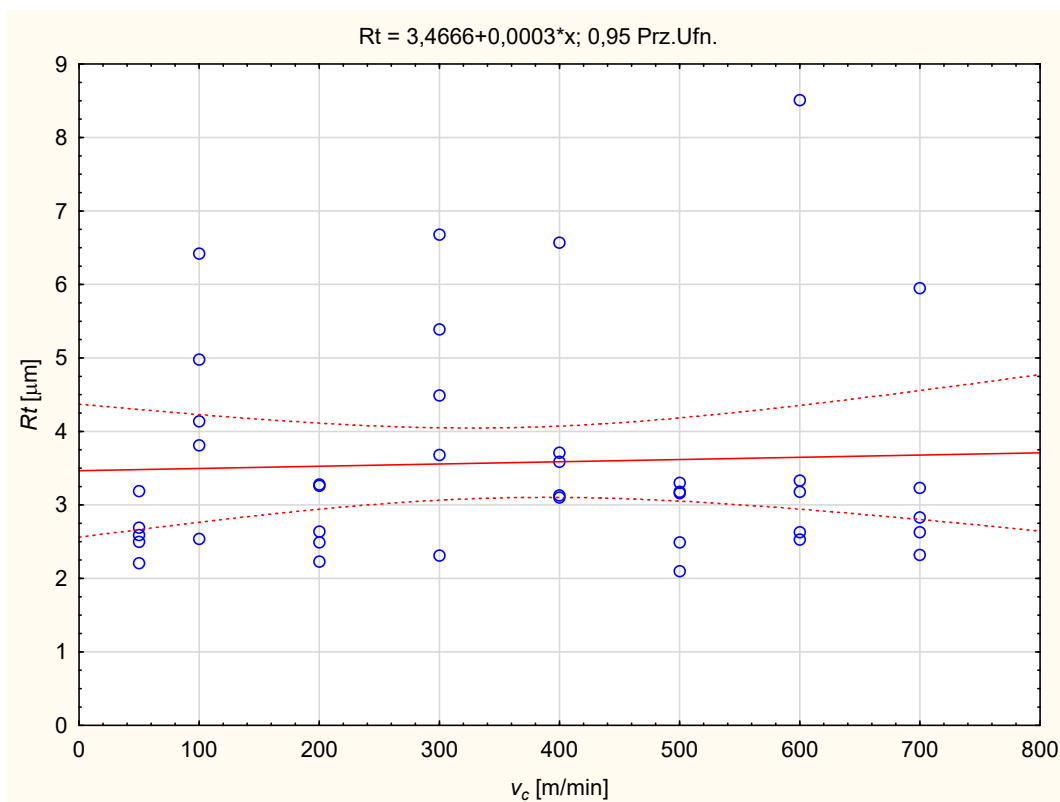
Linia trendu, szczególnie dla parametrów  $R_z$  i  $R_t$ , jest praktycznie pozioma, co sugeruje brak jakiegokolwiek korelacji pomiędzy prędkością skrawania a parametrami chropowatości. Można więc stwierdzić, że prędkość skrawania nie wpływa na chropowatość powierzchni obrobionej po frezowaniu frezem z azotku boru.



Rys. 4.21. Wykres rozrzutu parametru  $R_a$  dla frezu z CBN przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$



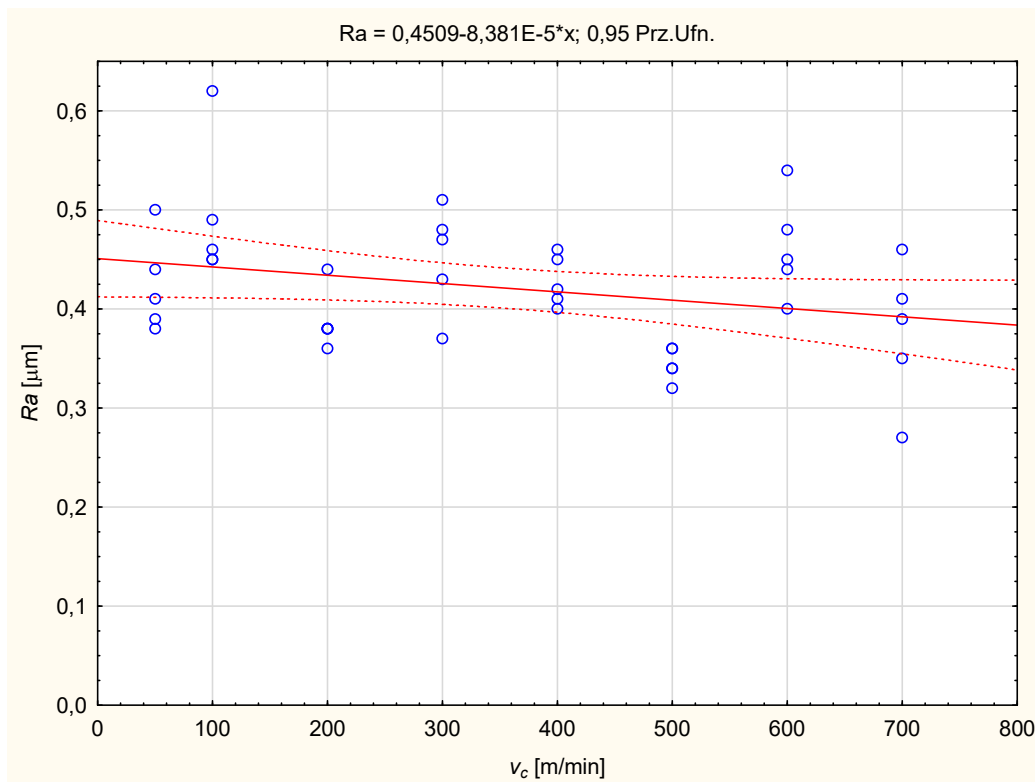
Rys. 4.22. Wykres rozrzutu parametru  $R_z$  dla frezu z CBN przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$



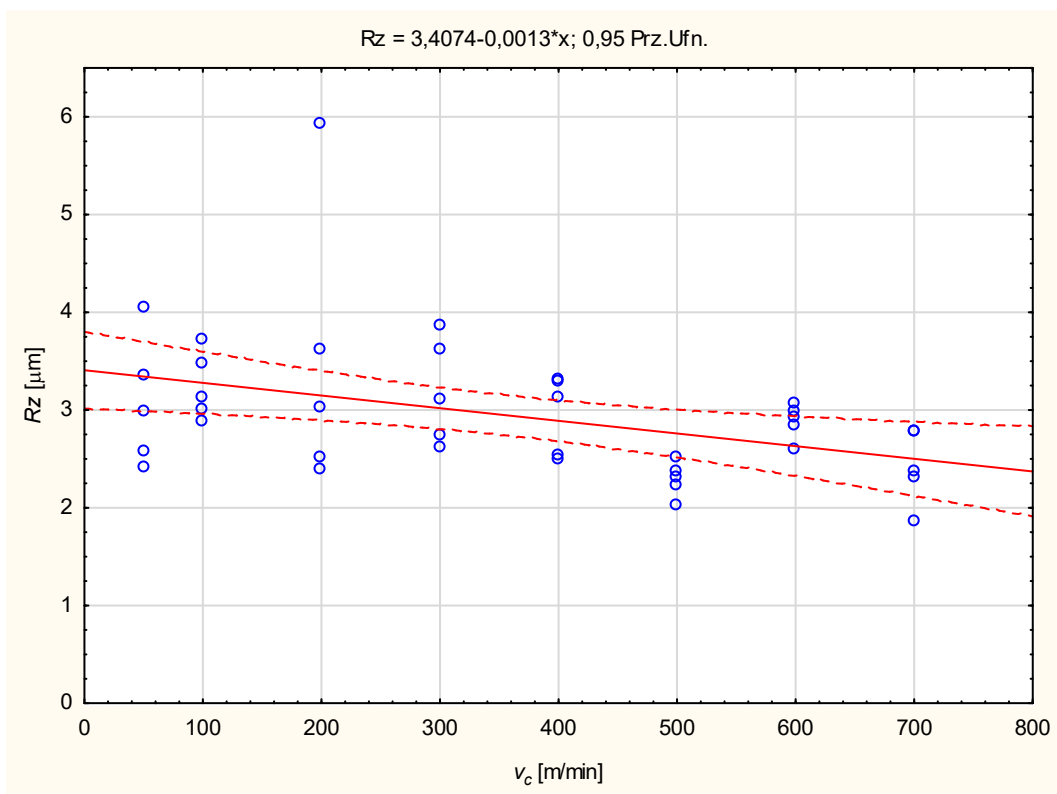
Rys. 4.23. Wykres rozrzutu parametru  $R_t$  dla frezu z CBN przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$

Wyraźny trend można zaobserwować dla ostrzy węglkowych z powłoką diamentową (Rys. 4.24 – Rys. 4.26). Choć rozrzuty wyników są znaczne to ogólny trend jest malejący, co oznacza, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania  $v_c$  maleje chropowatość. W przeciwieństwie do frezu węglkowego z powłoką ceramiczną TiCN, dla frezu węglkowego z powłoką diamentową uzasadnione jest frezowanie z wyższymi prędkościami skrawania. Uzasadnienie to jest akceptowalne w sytuacji, gdy chropowatość powierzchni obrabianej jest priorytetowa i ważniejsza niż zużycie ostrza. Skrawanie z większymi prędkościami skrawania prawie zawsze okupione jest spadkiem trwałości ostrza (Rys. 4.27). Jednak w warunkach obróbki dokładnej lub bardzo dokładnej priorytetem jest chropowatość a nie trwałość ostrza.

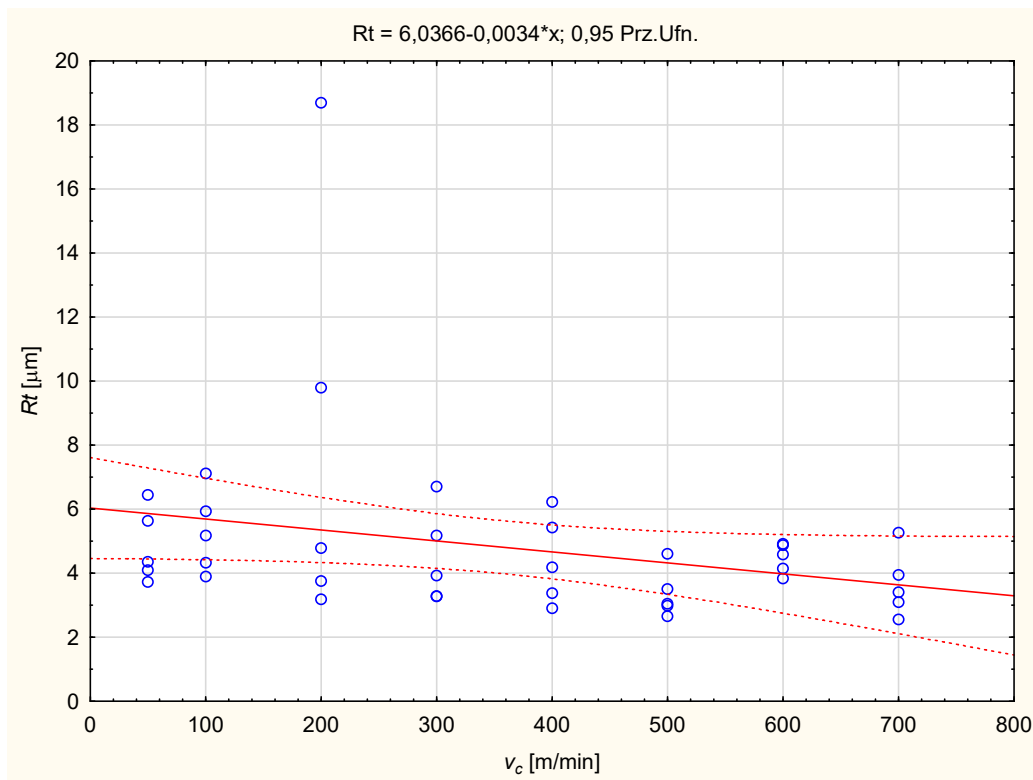
Na Rys. 4.28 pokazano porównanie jakościowe i ilościowe parametru  $R_z$  w funkcji prędkości skrawania  $v_c$  dla badanych frezów przy stałym posuwie  $f$ . Przedstawione wartości parametru  $R_z$  są uśrednione z 5 pomiarów.



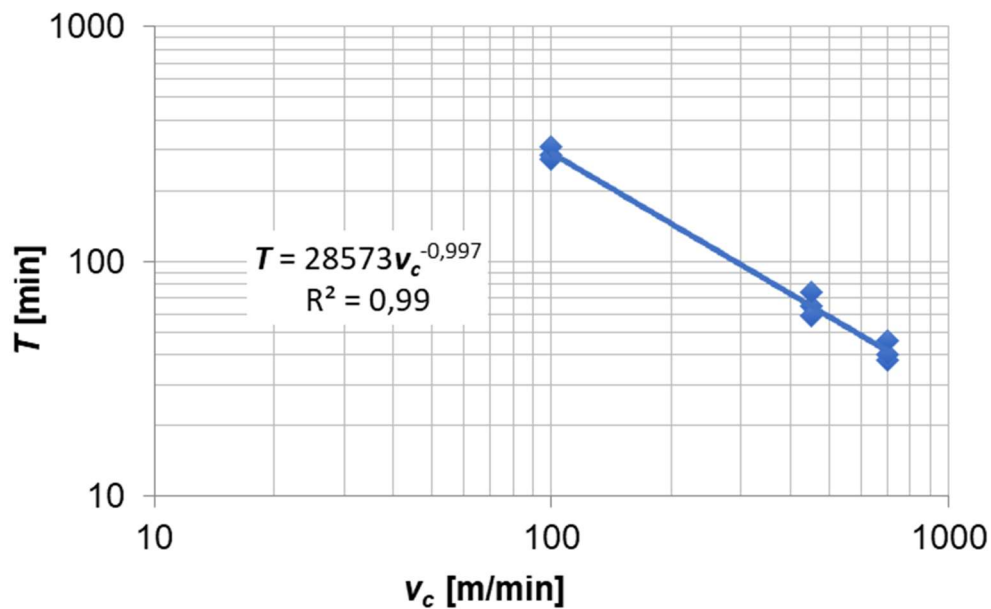
Rys. 4.24. Wykres rozrzutu parametru  $R_a$  dla frezu z CVD przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$



Rys. 4.25. Wykres rozrzutu parametru  $R_z$  dla frezu z CVD przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$

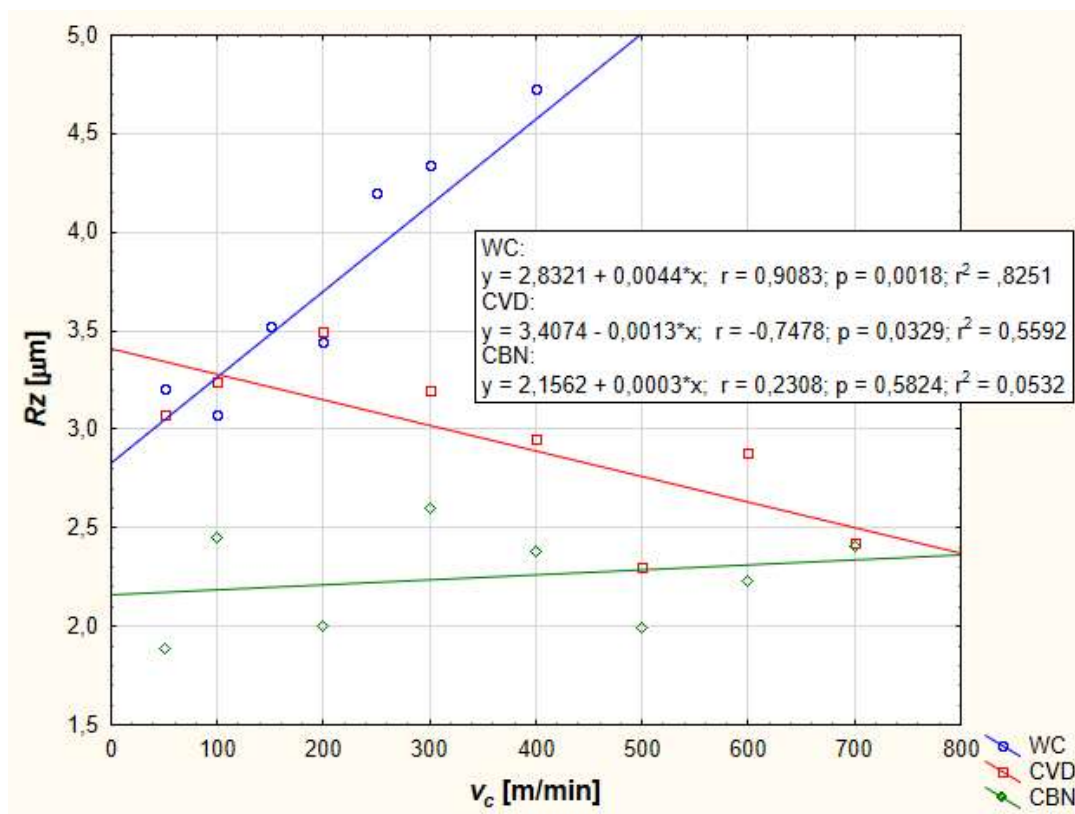


Rys. 4.26. Wykres rozrzutu parametru  $R_t$  dla frezu z CVD przy stałej wartości posuwu na obrót  $f$



Rys. 4.27. Wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrz podczas frezowania kompozytu MMC ostrzami węglkowymi z powłoką diamentową

Z przedstawionych wyników jednoznacznie wynika, że tylko dla frezu węglowego z powłoką diamentową wzrost prędkości skrawania  $v_c$  powoduje spadek parametru  $Rz$ . Podobne zależności zaobserwowano dla pozostałych parametrów chropowatości ( $Ra$  i  $Rt$ ) powierzchni obrabianej. Nasuwa się więc praktyczny wniosek, że chcąc uzyskać jak najmniejsze parametry chropowatości, zalecane jest frezowanie ostrzami z powłoką diamentową lub ostrzami diamentowymi w zakresie podwyższonych prędkości skrawania  $v_c$ . Zwiększenie prędkości skrawania powoduje uzyskanie dokładniejszej powierzchni oraz zwiększenie wydajności obróbki. Przekłada się to bezpośrednio na obniżenie kosztów i spełnienie wymogów współczesnego przemysłu: „szybciej znaczy taniej”.



Rys. 4.28. Porównanie parametru  $Rz$  dla badanych frezów przy stałym posuwie  $f$

#### 4.4 Analiza i podsumowanie badań wstępnych

W badanym zakresie zmienności parametrów, wykazano że:

- Zarówno posuw jak i prędkość skrawania odgrywają istotną rolę w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrabianej po frezowaniu kompozytu aluminiowo ceramicznego.
- W zależności od zastosowanego materiału narzędziowego, wpływ prędkości skrawania nie jest jednoznaczny.
- Dla węglików spiekanych wzrost prędkości skrawania powoduje wzrost parametrów chropowatości powierzchni obrabianej. Dla materiałów super twardych, szczególnie dla ostrzy diamentowych, wraz ze wzrostem prędkości skrawania maleją parametry chropowatości powierzchni.
- Uzasadnione jest więc frezowanie z większymi prędkościami skrawania, w przypadku ostrzy diamentowych, uzyskując tą samą wartość chropowatości w porównaniu z frezowaniem z mniejszymi posuwami i mniejszymi prędkościami skrawania jak dla węgla spiekane.
- Efektem końcowym jest wzrost wydajności frezowania (zmniejszenie kosztów produkcji) przy zachowaniu tej samej wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej.
- Skoro wzrost prędkości skrawania  $v_c$  (dla ostrzy diamentowych) wpływa na zmniejszenie wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej, celowe wydaje się opracowanie modelu uwzględniającego prędkość  $v_c$ .

## 5. BADANIA ZASADNICZE

### 5.1 Analiza parametrów chropowatości powierzchni obrobionej przy zmiennych parametrach frezowania

Badania wstępne wykazały zdecydowaną przewagę narzędzi z powłoką diamentową w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrobionej w porównaniu z narzędziami z powłoką ceramiczną i azotkiem boru. Jednak, aby upewnić się, co do przewagi ostrzy z powłoką diamentową w porównaniu do ostrzy z węglika spiekanego i azotku boru powtórzono badania w celu potwierdzenia przyjętych założeń. Ponieważ kształtowanie chropowatości powierzchni jest obarczone pewnym czynnikiem losowym, zasadne jest powtórzenie badań w celu potwierdzenia zaobserwowanych zależności. Między innymi z tego powodu w tej serii badań wyznaczono parametry chropowatości 3D, które w pewnym sensie niwelują chwilowe zjawiska losowe.

Przeprowadzono dwie serie badawcze (podobnie jak wcześniej): pierwsza ze stałą prędkością skrawania  $v_c$  i zmiennym posuwem na obrót  $f$  i druga ze stałym posuwem na obrót  $f$  i zmienną prędkością skrawania  $v_c$

#### 5.1.1 Wpływ wartości posuwu na chropowatość powierzchni

Parametry frezowania dla węglika spiekanego z powłoką ceramiczną pokazano w Tab. 5.1, dla frezów z azotku boru w Tab. 5.2 a dla frezu z węglika spiekanego z powłoką diamentową w Tab. 5.3.

W bloku materiału przygotowano osiem ścianek równoległych do siebie, przeprowadzono frezowanie obwodowe (Rys. 5.1). Wysokość ścianki wynosiła 10 mm a jej długość 15 mm, kolorem czerwonym przedstawiono frez.



Tab. 5.1. Parametry frezowania dla frezu z węgla spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN

	$d = 10\text{mm}, v_c = 250 \text{ m/min},$ $a_e = 0.2\text{mm}, a_p = 10 \text{ mm}, z = 4$		
	$f$ [mm/obr]	$f_z$ [mm/ostrze]	$v_f$ [mm/min]
1.	0,01	0,0025	80
2.	0,03	0,0075	239
3.	0,06	0,015	478
4.	0,09	0,0225	717
5.	0,12	0,03	955
6.	0,18	0,045	1433
7.	0,3	0,075	2389
8.	0,5	0,125	3981

Tab. 5.2. Parametry frezowania dla frezu z azotku boru CBN

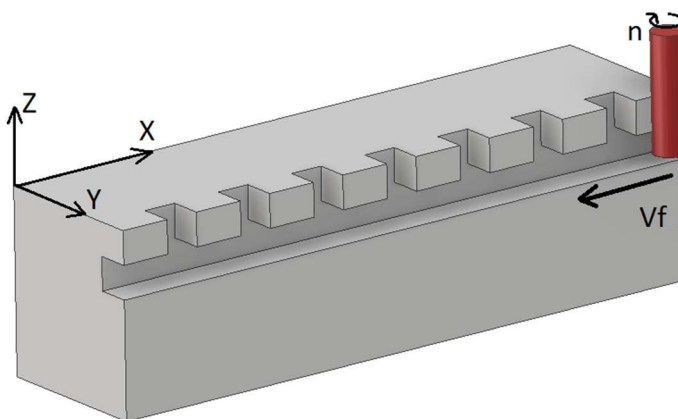
	$d = 10\text{mm}, v_c = 500 \text{ m/min},$ $a_e = 0.2\text{mm}, a_p = 10 \text{ mm}, z = 2$		
	$f$ [mm/obr]	$f_z$ [mm/ostrze]	$v_f$ [mm/min]
1.	0,01	0,0049	159
2.	0,03	0,015	477
3.	0,06	0,03	955
4.	0,09	0,045	1432
5.	0,12	0,06	1910
6.	0,18	0,09	2865
7.	0,3	0,15	4775
8.	0,5	0,25	7958

Na Rys. 5.2 pokazano przykładowe wykresy 3D mikronierówności powierzchni obrabianej dla dwóch różnych wartości posuwu  $f_z$ . Dla posuwu  $f_z = 0.005 \text{ mm/ostrze}$  mikronierówności na powierzchni tworzą nieregularne kształty, co jest charakterystyczne dla małych wartości posuwu. Z kolei dla posuwu  $f_z = 0.083 \text{ mm/ostrze}$  widoczne jest

kinematyczno-geometryczne odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym, co jest typowe dla dużych wartości posuwu. Zgodnie z teorią parametry chropowatości  $S_a$  i  $S_z$  dla posuwu  $f_z = 0.005$  mm/ostrze są mniejsze niż dla posuwu  $f_z = 0.083$  mm/ostrze.

Tab. 5.3. Parametry frezowania dla frezu z węglika spiekanego z powłoką diamentową CVD

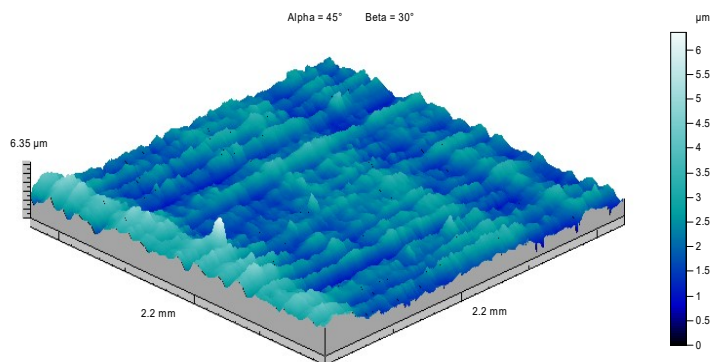
$d = 10\text{mm}, v_c = 500 \text{ m/min},$ $a_e = 0.2\text{mm}, a_p = 10 \text{ mm}, z = 6$			
	$f$	$f_z$	$v_f$
	[mm/obr]	[mm/ostrze]	[mm/min]
1.	0,01	0,0017	159
2.	0,03	0,005	477
3.	0,06	0,01	955
4.	0,09	0,015	1432
5.	0,12	0,02	1910
6.	0,18	0,03	2865
7.	0,3	0,05	4775
8.	0,5	0,083	7958



Rys. 5.1. Schemat frezowania obwodowego

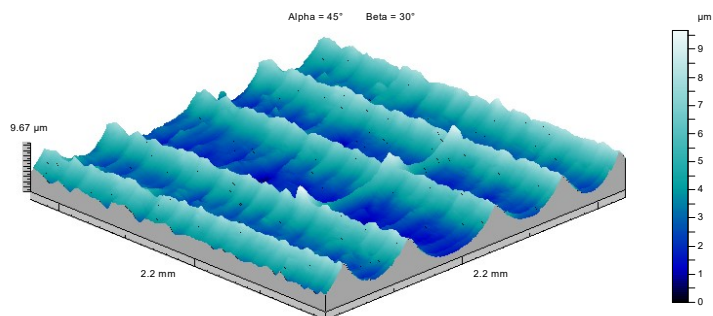
$f_z = 0.005$  mm/ostrze  
 $v_c = 500$  m/min

$Sa = 0.518$   $\mu\text{m}$   
 $Sz = 6.26$   $\mu\text{m}$



$f_z = 0.083$  mm/ostrze  
 $v_c = 500$  m/min

$Sa = 1.41$   $\mu\text{m}$   
 $Sz = 9.59$   $\mu\text{m}$



Rys. 5.2. Wykres 3D chropowości powierzchni po frezowaniu z różnym posuwem dla frezu CBN

Komplet uzyskanych parametrów chropowości przedstawiają Tab. 5.4 dla frezu z węgla spiekane go z powłoką ceramiczną TiCN, Tab. 5.5 dla frezu z azotku boru i Tab. 5.6 dla frezu z powłoką diamentową CVD.

Tab. 5.4. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z węgla spiekane go z powłoką TiCN

		$Sa$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Sq$ [ $\mu\text{m}$ ]	$St$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Sv$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Sz$ [ $\mu\text{m}$ ]	
WC	$v_c = 250$ m/min	$f_z = 0,0025$ mm/ostrze	0.73	0.943	8.1	3.44	7.88
		$f_z = 0,0075$ mm/ostrze	0.744	0.957	8.33	4.12	8.22
		$f_z = 0,015$ mm/ostrze	0.748	0.946	7.13	3.51	7.01
		$f_z = 0,0225$ mm/ostrze	0.764	0.971	8.15	3.99	7.7
		$f_z = 0,03$ mm/ostrze	0.819	1.08	11	4.79	10.9
		$f_z = 0,045$ mm/ostrze	0.894	1.17	10.4	5.25	10.4
		$f_z = 0,075$ mm/ostrze	0.889	1.15	10.4	6.21	10.3
		$f_z = 0,125$ mm/ostrze	1.08	1.36	13.2	4.98	12.7

Tab. 5.5. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z regularnego azotku boru CBN

			<b>Sa</b> [μm]	<b>Sq</b> [μm]	<b>St</b> [μm]	<b>Sv</b> [μm]	<b>Sz</b> [μm]
<b>CBN</b>	$v_c = 500$ m/min	$f_z = 0,005$ mm/ostrze	0.644	0.822	7.87	3.35	6.84
		$f_z = 0,015$ mm/ostrze	0.565	0.715	7.29	2.44	7.17
		$f_z = 0,03$ mm/ostrze	0.517	0.666	5.68	2.87	5.66
		$f_z = 0,045$ mm/ostrze	0.593	0.746	5.98	3.01	5.84
		$f_z = 0,06$ mm/ostrze	0.629	0.811	9.23	3.5	8.64
		$f_z = 0,09$ mm/ostrze	0.598	0.747	5.96	2.73	5.93
		$f_z = 0,15$ mm/ostrze	0.686	0.88	11	3.03	10.9
		$f_z = 0,25$ mm/ostrze	0.888	1.11	8.31	3.39	8.2

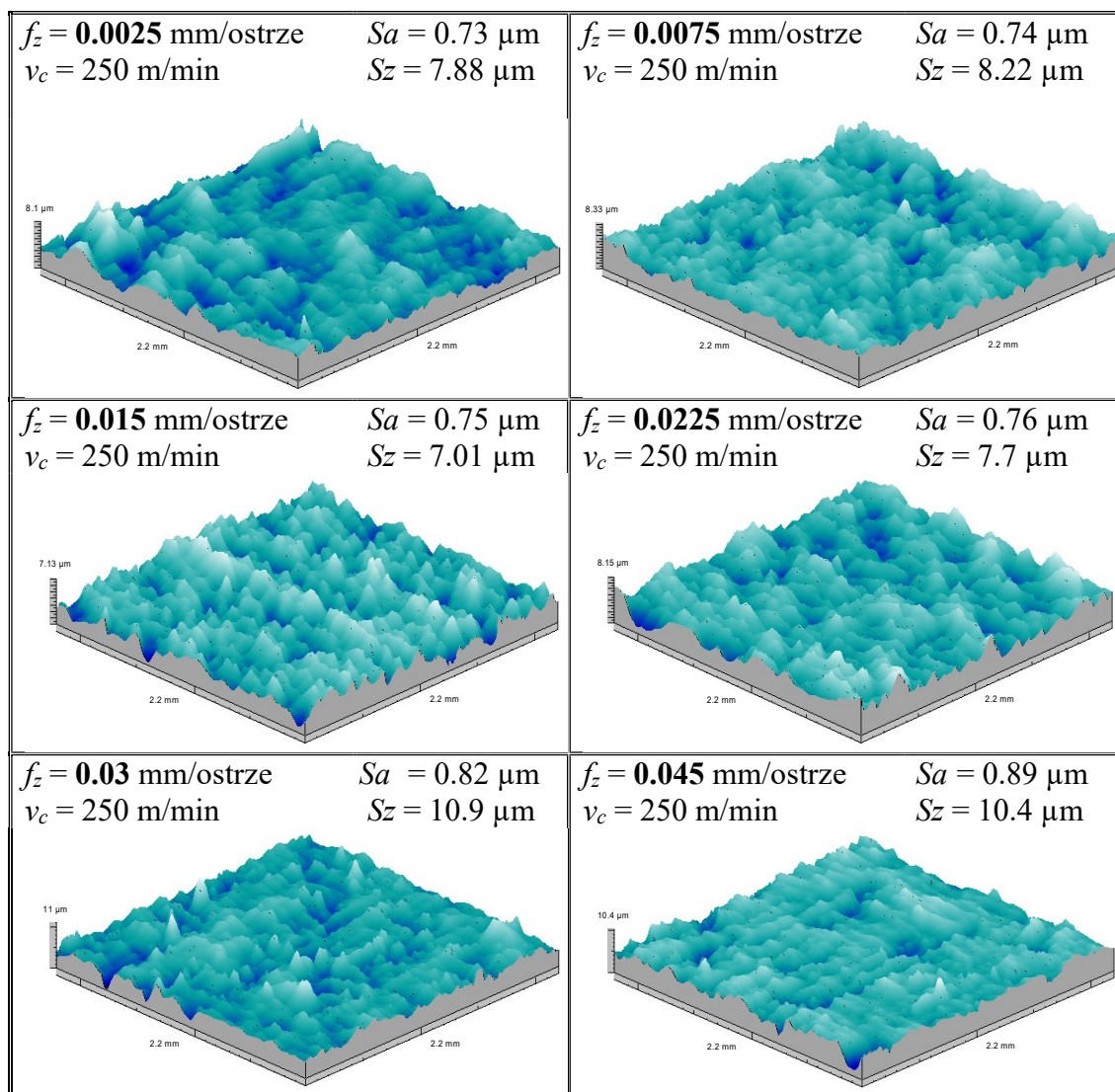
Tab. 5.6. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z powłoką diamentową CVD

			<b>Sa</b> [μm]	<b>Sq</b> [μm]	<b>St</b> [μm]	<b>Sv</b> [μm]	<b>Sz</b> [μm]
<b>PCD</b>	$v_c = 500$ m/min	$f_z = 0,0017$ mm/ostrze	0.478	0.604	12.5	2.38	9.17
		$f_z = 0,005$ mm/ostrze	0.518	0.672	6.35	2.14	6.26
		$f_z = 0,01$ mm/ostrze	0.453	0.594	5.15	2.3	4.83
		$f_z = 0,015$ mm/ostrze	0.614	0.77	5.55	2.65	5.39
		$f_z = 0,02$ mm/ostrze	0.512	0.649	6.38	2.36	6.26
		$f_z = 0,03$ mm/ostrze	0.606	0.777	7.29	2.47	6.96
		$f_z = 0,05$ mm/ostrze	0.824	1.01	12.8	2.87	12.8
		$f_z = 0,083$ mm/ostrze	1.41	1.68	9.67	4	9.59

W Tab. 5.7 przedstawiono uzyskane wykresy 3D mikronierówności powierzchni obrobionej dla różnych wartości posuwu dla frezu z węglika spiekane powłoką CVD.

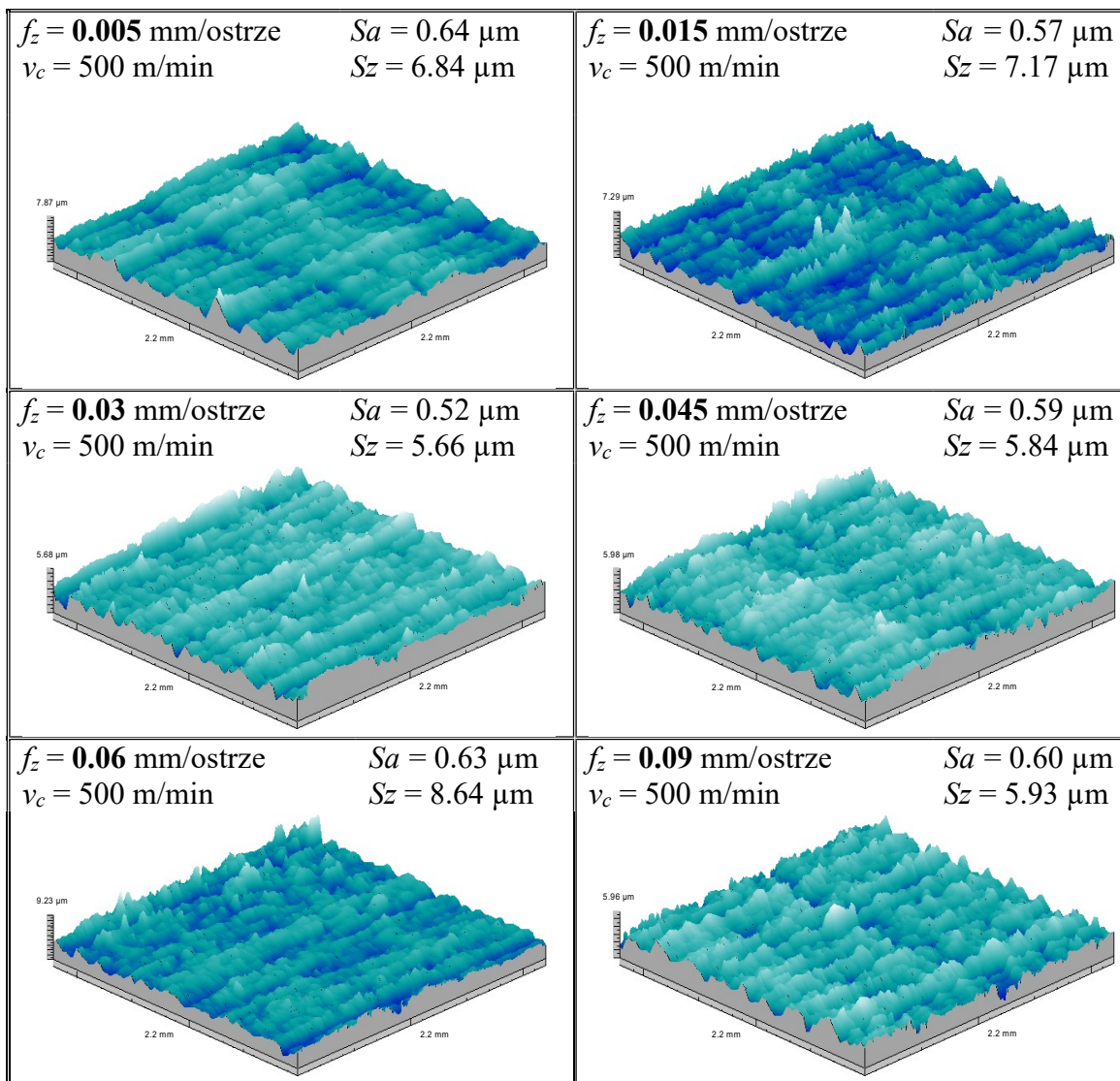
Następnie w Tab. 5.8 przedstawiono wszystkie uzyskane wykresy 3D mikronierówności powierzchni obrobionej dla różnych wartości posuwu dla frezu wykonanego z azotku boru CBN, a w Tab. 5.9 dla frezu z powłoką diamentową CVD.

Tab. 5.7. Wykresy 3D dla różnych wartości posuwu przy stałym  $v_c=250\text{m/min}$  dla frezu z węgla spiekanego



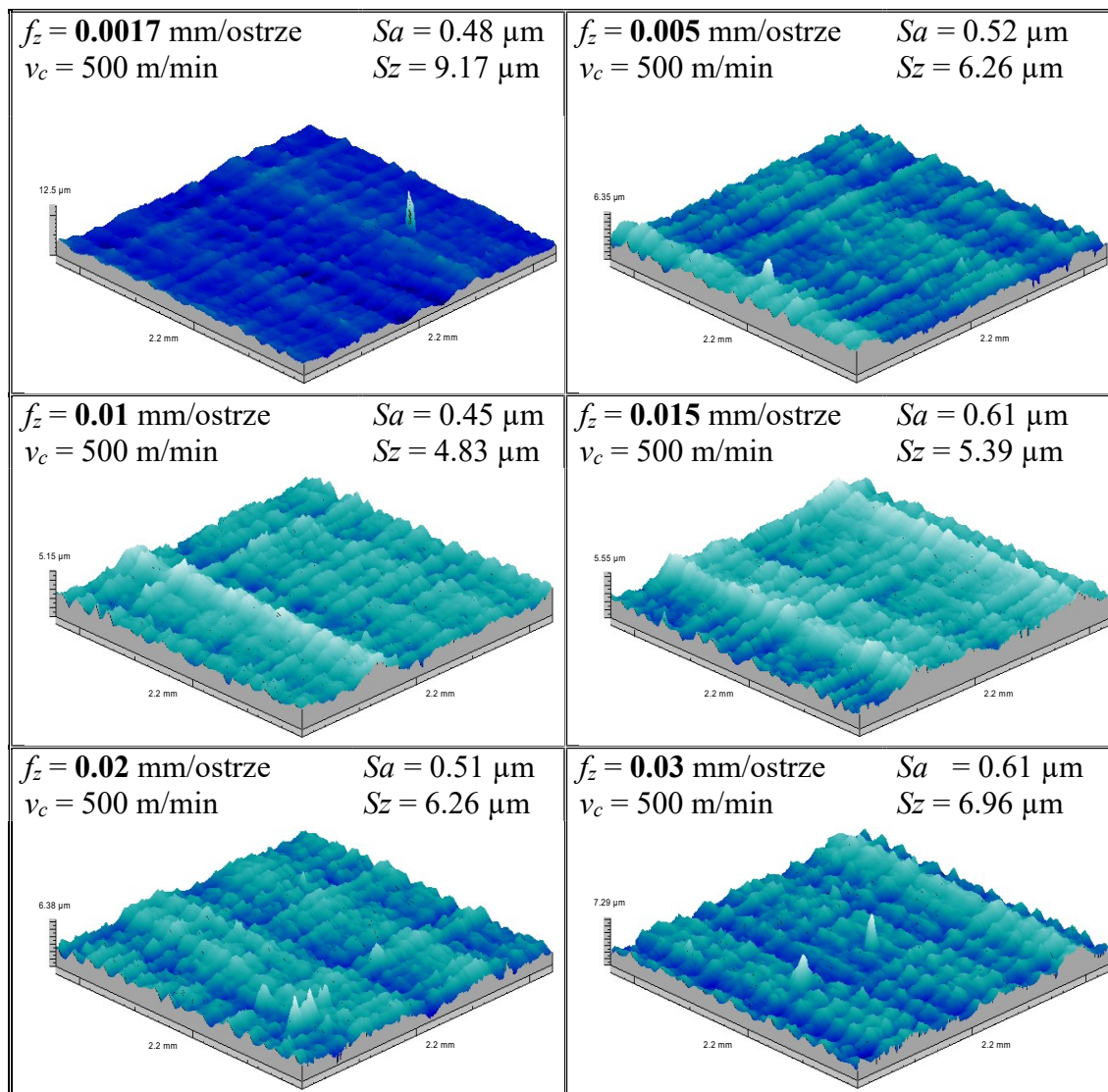
Przestrzenne obrazy chropowatości powierzchni dokładnie pokazują charakter mikronierówności na badanej powierzchni. Trudno w nich dopatrzeć się jednoznacznego odwzorowania kinematyczno-geometrycznego ostrza w materiale obrabianym. Wynika to częściowo z faktu, że w strukturze stopu duralkan występują cząstki SiC, które mogą „zakłócać” otrzymany obraz 3D mikronierówności.

Tab. 5.8. Wykresy 3D dla różnych wartości posuwu na obrót przy stałym  $v_c=500\text{m/min}$  dla frezu z regularnego azotku boru

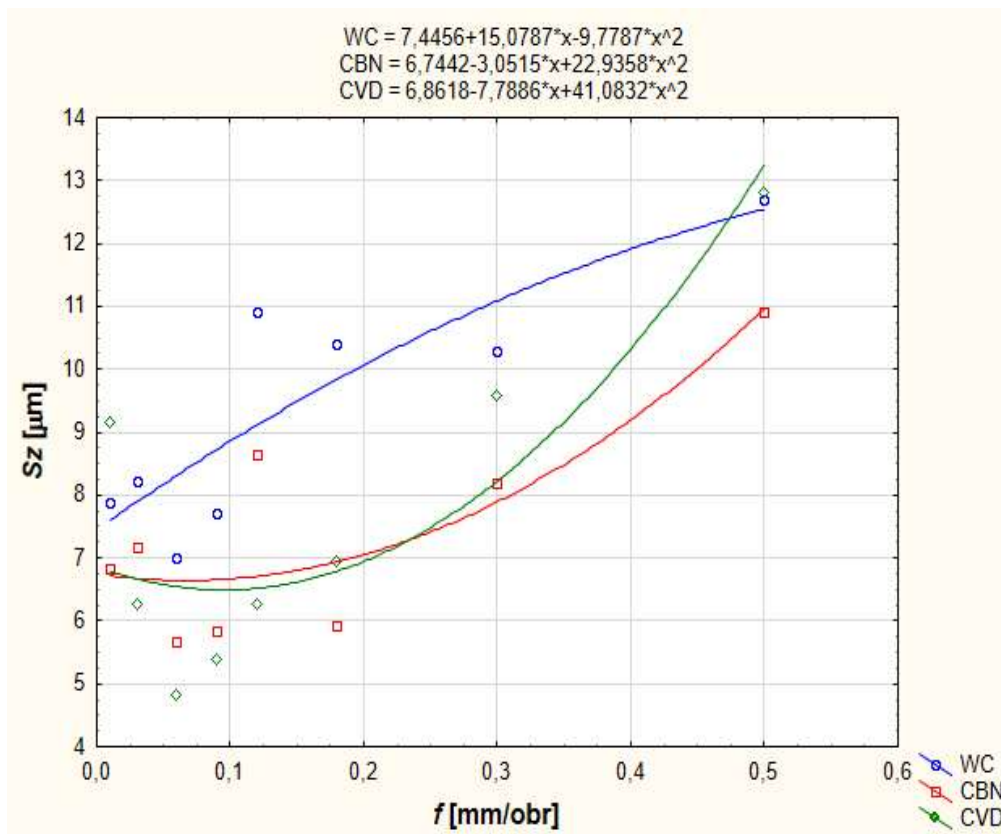


Korzystając z otrzymanych wyników sporządzono porównanie parametru  $Sz$  w funkcji posuwu  $f$  dla badanych frezów przy stałej prędkości obrotowej  $n$  (Rys. 5.3).

Tab. 5.9. Wykresy 3D dla różnych wartości posuwu na obrót przy stałym  $v_c=500\text{m/min}$  dla frezu z powłoką diamentową CVD



Podobnie jak w poprzedniej serii badań największe wartości chropowatości uzyskano dla frezu z węgliku spiekaneego z powłoką ceramiczną TiCN. Główną przyczyną jest dwukrotnie większa wartość promienia zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej  $r_n$  w porównaniu do dwóch pozostałych frezów. Dla frezów z azotku boru i z powłoką diamentową obserwuje się typowe przebiegi parametru  $Sz$  w funkcji posuwu, co potwierdza jego wpływ na mikronierówności. Co prawda w zakresie małych wartości posuwu ( $f < 0,1$  mm/obr) wyniki nie są zgodne z modelem kinematyczno-geometrycznym, ale jak już wspomniano, jest to główna wada tego modelu, który niepoprawnie prognozuje parametry chropowatości w zakresie małych posuwów.



Rys. 5.3. Porównanie parametru Sz w funkcji posuwu f dla badanych frezów przy stałej prędkości obrotowej n

### 5.1.2 Wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni

Parametry frezowania dla węgliku spiekanego z powłoką ceramiczną pokazano w Tab. 5.10, dla frezów z azotku boru i węgliku spiekanego z powłoką diamentową, w Tab. 5.11.

Na Rys. 5.4 pokazano przykładowe wykresy 3D mikronierówności powierzchni obrobionej dla dwóch różnych wartości prędkości skrawania  $v_c$ . W obydwu przypadkach charakter mikronierówności jest podobny. Różnice występują natomiast w wartościach parametrów chropowatości Sa i Sz. Z wykresów 3D widać, że dla prędkości  $v_c=200\text{m/min}$  częściej występują maksymalne wzniesienia mikronierówności, co wiąże się z większymi wartościami parametru Sz. W przypadku parametru Sa wartości te są porównywalne, co wynika z definicji tego parametru, czyli wartością średnią.



Tab. 5.10. Parametry frezowania dla frezu z węglika spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN dla stałej wartości posuwu  $f$

WC	$d = 10\text{mm}, f = 0,1 \text{ m/min},$ $a_e = 0.2\text{mm}, a_p = 10 \text{ mm}, z = 4$		
	$v_c$ [m/min]	$n$ [obr/min]	$v_f$ [mm/min]
1.	50	1591	159
2.	100	3182	318
3.	150	4773	477
4.	200	6364	636
5.	250	7955	796
6.	300	9564	955
7.	350	11137	1114
8.	400	12728	1273

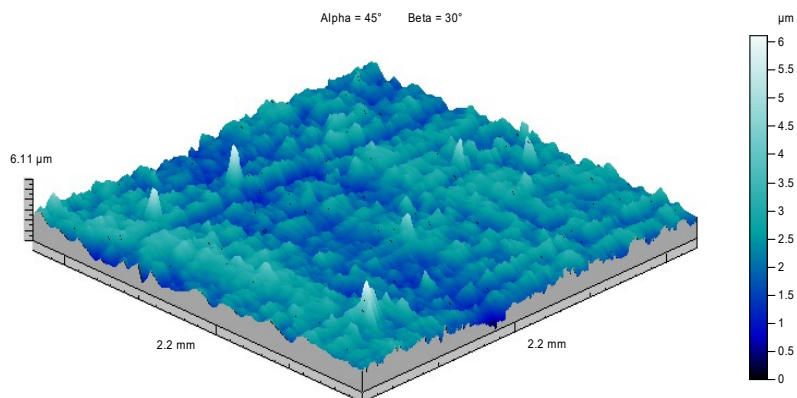
Tab. 5.11. Parametry frezowania dla frezu z azotku boru CBN oraz frezu z węglika spiekanego z powłoką diamentową CVD dla stałej wartości posuwu  $f$

CBN CVD	$d = 10\text{mm}, f = 0,1 \text{ m/min},$ $a_e = 0.2\text{mm}, a_p = 10 \text{ mm}, z = 4$		
	$v_c$ [m/min]	$n$ [obr/min]	$v_f$ [mm/min]
1.	50	1591	159
2.	100	3182	318
3.	200	6364	636
4.	300	9546	955
5.	400	12728	1273
6.	500	15910	1591
7.	600	19093	1909
8.	700	22275	2227

Komplet uzyskanych parametrów chropowatości przedstawiają Tab. 5.12 dla frezy z węglika spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN, Tab. 5.13 dla frezu z azotku boru CBN i Tab. 5.14 dla frezu z powłoką diamentową CVD.

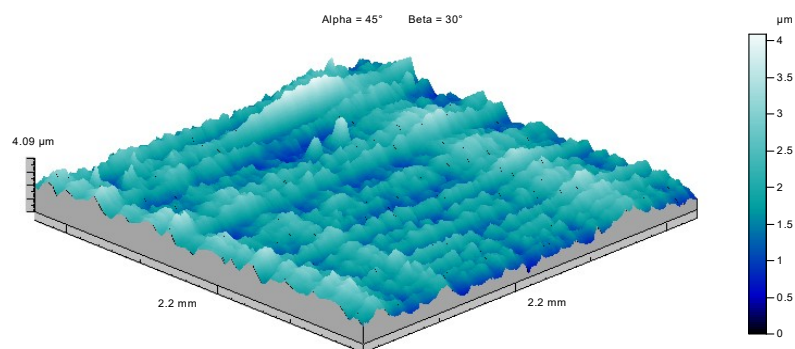
$v_c = 200$  m/min  
 $f_z = 0,02$  mm/ostrze

$Sa = 0,41$   $\mu\text{m}$   
 $Sz = 6,06$   $\mu\text{m}$



$v_c = 700$  m/min  
 $f_z = 0,02$  mm/ostrze

$Sa = 0,411$   $\mu\text{m}$   
 $Sz = 4,04$   $\mu\text{m}$



Rys. 5.4. Wykres 3D chropowości powierzchni po frezowaniu z różnymi prędkościami skrawania  $v_c$

Tab. 5.12. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką TiCN

		$Sa$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Sq$ [ $\mu\text{m}$ ]	$St$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Sv$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Sz$ [ $\mu\text{m}$ ]	
WC	$f = 0,1$ mm/obr	$v_c = 50$ m/min	0.748	0.957	7.99	4.31	7.86
		$v_c = 100$ m/min	0.852	1.07	8.3	4.26	8.23
		$v_c = 150$ m/min	0.983	1.23	10.7	3.96	10.6
		$v_c = 200$ m/min	0.974	1.23	9.75	3.46	9.58
		$v_c = 250$ m/min	1.02	1.29	9.66	3.87	9.61
		$v_c = 300$ m/min	1.42	1.77	12.6	4.9	12.6
		$v_c = 350$ m/min	1.35	1.7	13.7	6.32	13.6
		$v_c = 400$ m/min	2.16	2.87	27.7	9.3	27

Tab. 5.13. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z regularnego azotku boru

			<b>Sa</b> [μm]	<b>Sq</b> [μm]	<b>St</b> [μm]	<b>Sv</b> [μm]	<b>Sz</b> [μm]
<b>CBN</b>	<i>f</i> =0,1 mm/obr	<i>v<sub>c</sub></i> =50 m/min	0.645	0.804	5.92	2.92	5.88
		<i>v<sub>c</sub></i> =100 m/min	0.577	0.731	6.44	2.65	6.22
		<i>v<sub>c</sub></i> =200 m/min	0.626	0.777	7.74	3.18	7.06
		<i>v<sub>c</sub></i> =300 m/min	0.713	0.897	8.92	2.84	8.89
		<i>v<sub>c</sub></i> =400 m/min	0.622	0.786	9.48	3.3	9.37
		<i>v<sub>c</sub></i> =500 m/min	0.641	0.805	7.65	3.3	7.44
		<i>v<sub>c</sub></i> =600 m/min	0.802	1.01	8.06	3.22	7.92
		<i>v<sub>c</sub></i> =700 m/min	0.791	0.988	6.63	2.84	6.44

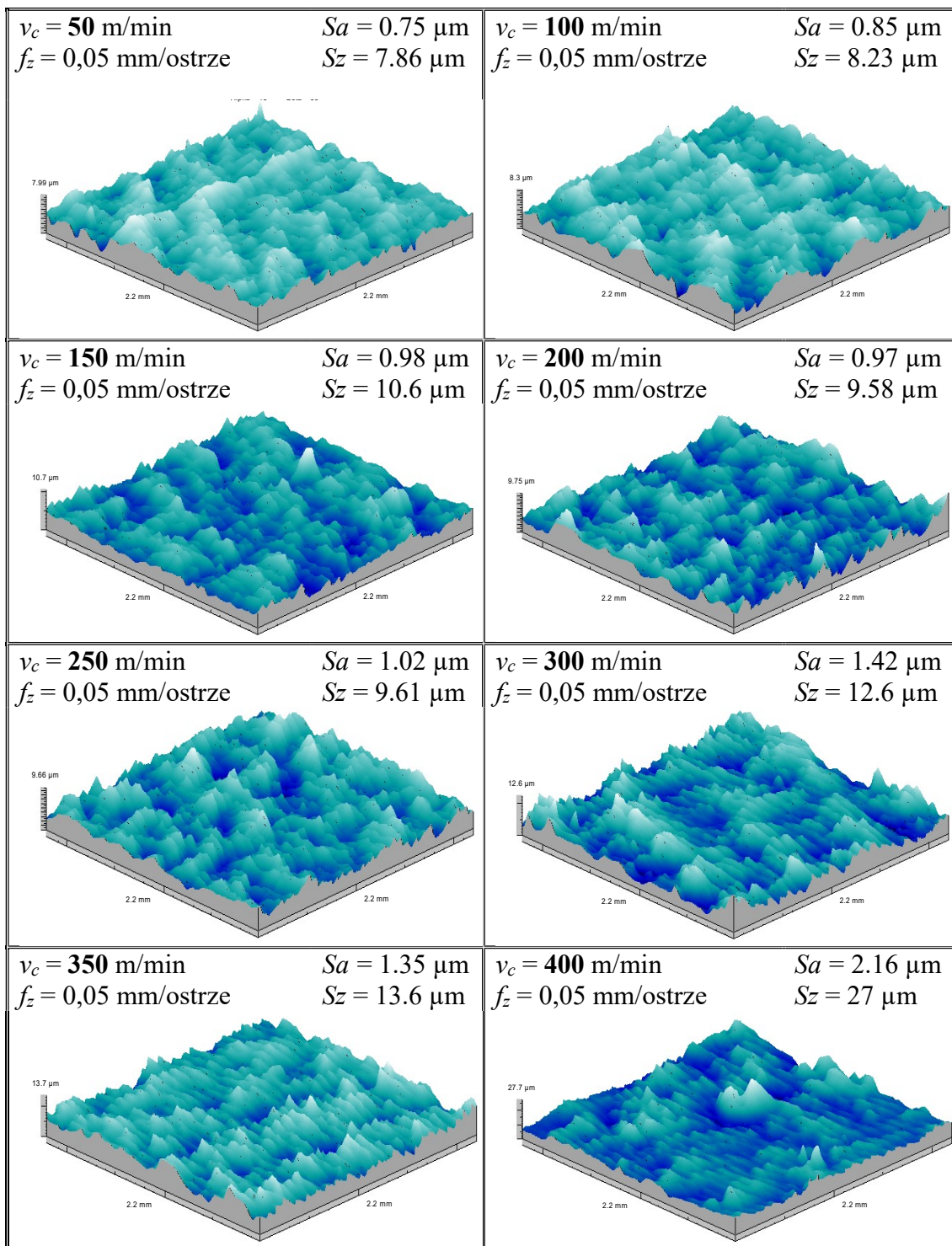
Tab. 5.14. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z powłoką diamentową

			<b>Sa</b> [μm]	<b>Sq</b> [μm]	<b>St</b> [μm]	<b>Sv</b> [μm]	<b>Sz</b> [μm]
<b>CVD</b>	<i>f</i> =0,1 mm/obr	<i>v<sub>c</sub></i> =50 m/min	0.444	0.554	4.79	2.18	4.71
		<i>v<sub>c</sub></i> =100 m/min	0.462	0.589	6.42	2.29	6.11
		<i>v<sub>c</sub></i> =200 m/min	0.409	0.521	6.11	2.15	6.06
		<i>v<sub>c</sub></i> =300 m/min	1.36	1.91	20.8	5.25	20.2
		<i>v<sub>c</sub></i> =400 m/min	0.978	1.28	10.7	3.69	10.7
		<i>v<sub>c</sub></i> =500 m/min	1.74	2.33	23.5	6.87	23.4
		<i>v<sub>c</sub></i> =600 m/min	0.448	0.554	4.05	1.72	3.9
		<i>v<sub>c</sub></i> =700 m/min	0.411	0.513	4.09	1.77	4.04

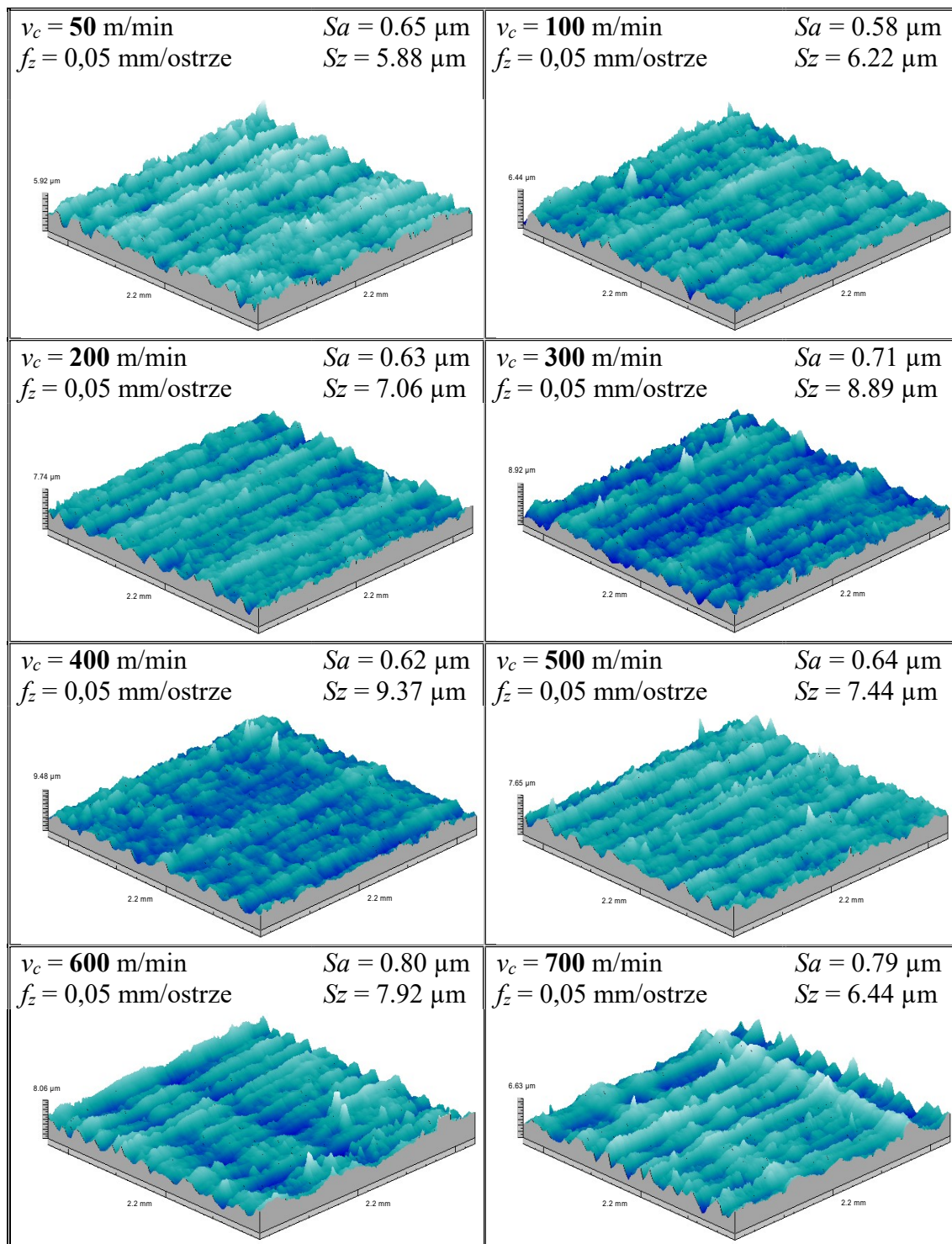
W Tab. 5.15 przedstawiono wszystkie uzyskane wykresy 3D mikronierówności powierzchni obrobionej dla różnych wartości prędkości skrawania dla frezu wykonanego z węglika spiekanego.

Następnie w Tab. 5.16 przedstawiono wszystkie uzyskane wykresy 3D mikronierówności powierzchni obrobionej dla różnych wartości prędkości skrawania dla frezu wykonanego z CBN, a w Tab. 5.17 dla frezu z powłoką diamentową CVD.

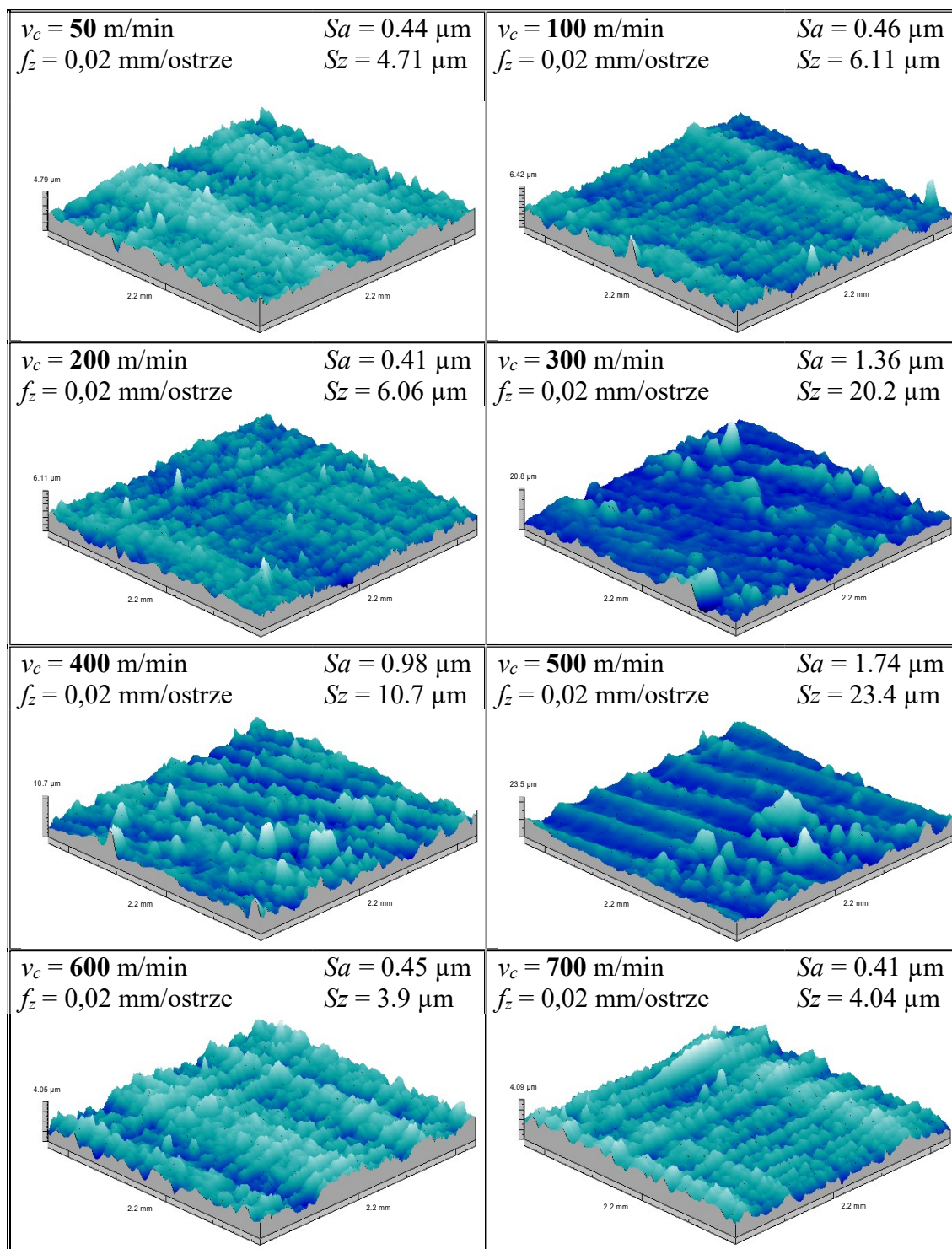
Tab. 5.15. Wykresy 3D dla różnych wartości prędkości skrawania przy stałym  $f_z=0,1$  mm/obr dla frezu z węgla spiekanego



Tab. 5.16. Wykresy 3D dla różnych wartości prędkości skrawania przy stałym  $f_z=0,1$  mm/obr dla frezu z azotku boru CBN

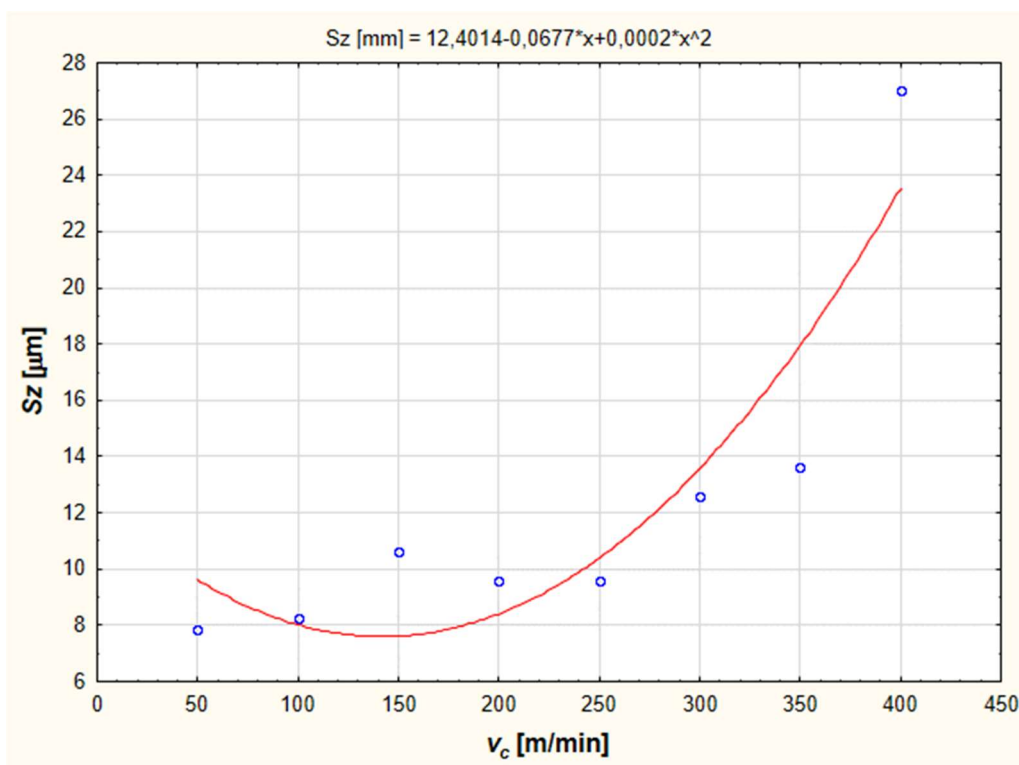


Tab. 5.17. Wykresy 3D dla różnych wartości prędkości skrawania przy stałym  $f=0,1$  mm/obr dla frezu z powłoką diamentową CVD



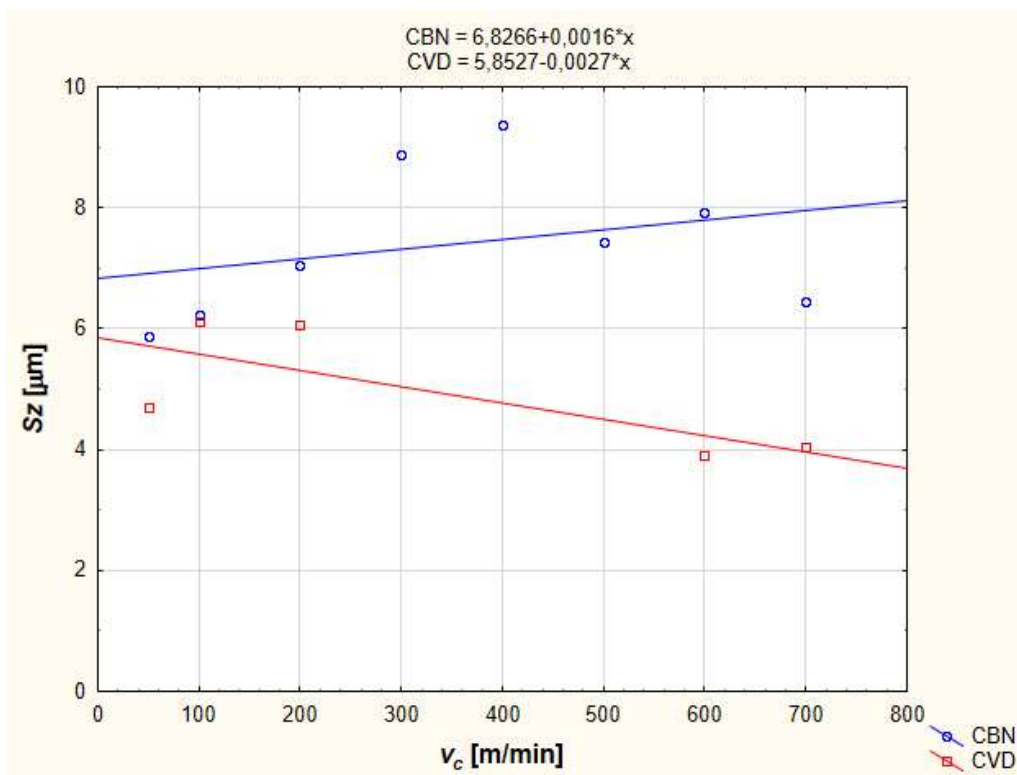
Korzystając z otrzymanych wyników sporządzono porównanie parametru  $Sz$  i  $Sa$  w funkcji prędkości skrawania  $v_c$  dla badanych frezów przy stałym posuwie na obrót  $f$  (Rys. 5.5 – Rys. 5.8). Ponieważ dla frezu z węglika spiekaneego z powłoką ceramiczną

zastosowano inny zakres prędkości skrawania, dlatego sporządzono dwa osobne wykresy (Rys. 5.5 i Rys. 5.6). Podobnie jak przy zmiennym posuwie, tak i dla zmiennej prędkości skrawania, największe wartości chropowatości uzyskano dla frezu z powłoką ceramiczną TiCN (Rys. 5.5). W przypadku frezu z azotku boru można zaobserwować niewielki trend rosnący (Rys. 5.6), jednak trudno w tym przypadku mówić o wpływie prędkości skrawania na chropowatość powierzchni. Podobne wyniki zaobserwowano w poprzedniej serii badań.



Rys. 5.5. Zmienność parametru  $S_z$  w funkcji prędkości skrawania dla frezu z powłoką ceramiczną przy stałym posuwie  $f = 0,1$  mm/obr

Dla frezu z powłoką diamentową CVD przy prędkościach skrawania  $v_c = 300, 400, 500$  m/min pojawiły się drgania samowzbudne znacznie zakłócając wyniki. Jest to wyraźnie widoczne na obrazach 3D (Tab. 5.16) i dlatego wyników tych nie brano pod uwagę. Stąd na Rys. 5.6 jest luka w wynikach dla tego frezu. Linia trendu dla frezu z powłoką diamentową jest malejąca, co oznacza, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania  $v_c$  maleje chropowatość powierzchni. Podobne zależności zaobserwowano dla parametru chropowatości  $S_a$  (Rys. 5.7 i Rys. 5.8).



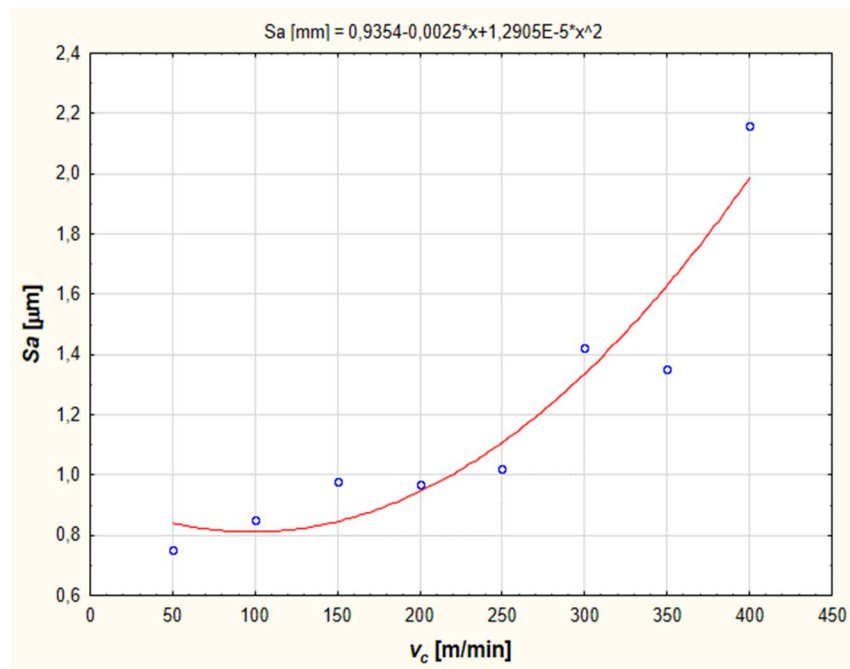
Rys. 5.6. Porównanie parametru  $S_z$  w funkcji prędkości skrawania dla frezów CBN i CVD przy stałym posuwie  $f = 0,1$  mm/obr

Analizując uzyskane wyniki dla badanych frezów nasuwa się taki sam wniosek jak w rozdziale 4.3 - *Porównanie chropowatości powierzchni obrobionej dla różnych materiałów narzędziowych przy stałym posuwie na obrót* - chcąc uzyskać jak najmniejsze parametry chropowatości, zalecane jest frezowanie ostrzami z powłoką diamentową lub ostrzami diamentowymi w zakresie podwyższonych prędkości skrawania  $v_c$ .

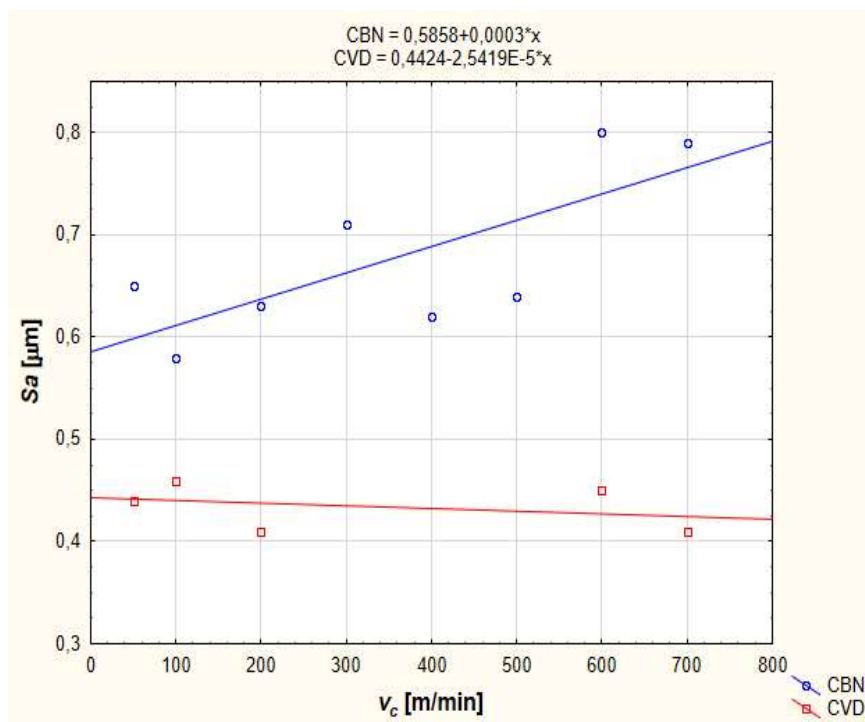
Spadek wysokości mikronierówności powierzchni obrobionej wraz ze wzrostem prędkości skrawania potwierdzony jest w wielu publikacjach. Związane to jest głównie ze zjawiskiem adhezji, konsekwencją którego jest powstawanie narostu. Im materiał obrabiany jest bardziej twardy tym zjawisko adhezji występuje z mniejszą intensywnością. Związane jest to z temperaturą procesu, która w przypadku materiałów twardych jest większa i przez to intensywność powstawania narostu jest mniejsza. Ogólnie im większa twardość materiału obrabianego tym niższa chropowatość powierzchni obrobionej, ponieważ twardość zmniejsza intensywność powstawania narostu [23, 31, 92]. Jednak, gdy twardość jest wynikiem twardych cząstek osadzonych w osnowie stopu aluminium,



w proporcjach 20% [48] lub 15% SiC [65], może występować tworzenie narostu i przypadkowe przylepanie cząstek SiC, które rysują obrabianą powierzchnię.



Rys. 5.7. Zmienność parametru  $S_a$  w funkcji prędkości skrawania dla frezu z powłoką ceramiczną przy stałym posuwie  $f = 0,1 \text{ mm/obr}$



Rys. 5.8. Porównanie parametru  $S_a$  w funkcji prędkości skrawania dla frezów CBN i CVD przy stałym posuwie  $f = 0,1 \text{ mm/obr}$

Zmiana prędkości skrawania pociąga za sobą zmianę temperatury, która rośnie wraz ze wzrostem  $v_c$ . Dlatego też jednym z kluczowych elementów w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrabianej jest temperatura procesu. Empiryczny wzór na temperaturę procesu skrawania można zapisać następująco (14):

$$t = C_t \cdot v_c^{x_t} \cdot f^{y_t} \cdot a_p^{z_t} \quad (14)$$

W zależności od materiału obrabianego, materiału ostrza i warunków skrawania wykładniki potęgowe przyjmują różne wartości. Jednak w ogólnym przypadku (stal konstrukcyjna – węgiel spiekany) można przyjąć założenie:

- dla prędkości skrawania  $x_t \approx 0.2 - 0.5$
- dla posuwu  $y_t \approx 0.1 - 0.3$
- dla głębokości skrawania  $z_t \approx 0$

Wynika z tego, że posuw nie tylko ma wpływ na chropowatość poprzez kinematyczno-geometryczne odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym, ale także prędkość skrawania, poprzez zmianę temperatury a przez to zmianę zakresu tworzenia się narostu.

## 5.2 Pomiary i analiza parametrów chropowatości powierzchni obrabianej przy zmiennych posuwach i prędkości skrawania

Ostatnia seria badań dotyczyła pozyskania danych wejściowych do opracowania modelu chropowatości uwzględniający posuw i prędkość skrawania. Ponieważ w dotychczasowych badaniach ostrza z powłokami diamentowymi wypadały najlepiej, planowany model teoretyczny dotyczyć będzie tylko ostrzy diamentowych. Dlatego też w tej serii badań zastosowano frez z ostrzami z polikrystalicznego diamentu PCD (Rys. 5.9). W Tab. 5.18. Parametry frezowania współbieżnego dla zmiennych posuwów i prędkości skrawania pokazano zastosowane parametry frezowania dla zmiennych posuwów i prędkości skrawania.



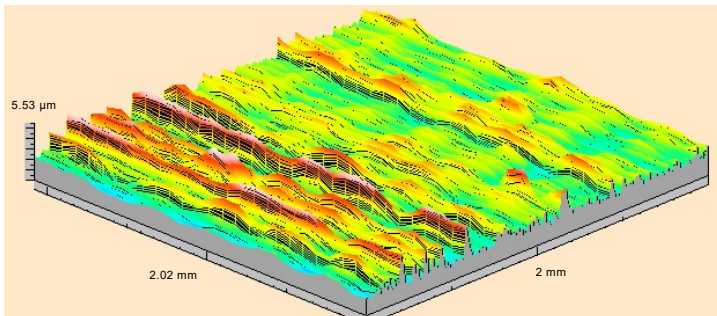
Rys. 5.9. Zastosowany frez diamentowy ( $z=2$ , kąt  $\lambda_s = 0^\circ$ , kąt  $\gamma_f = 0^\circ$ )

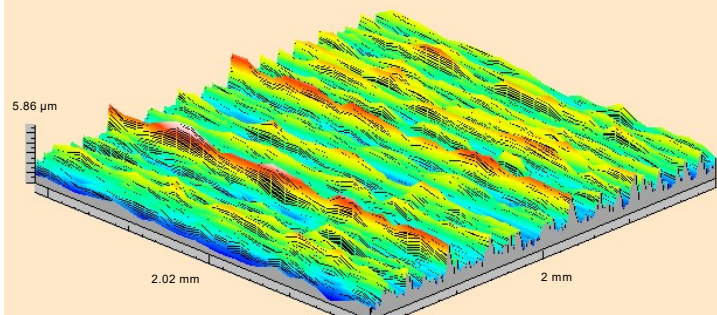
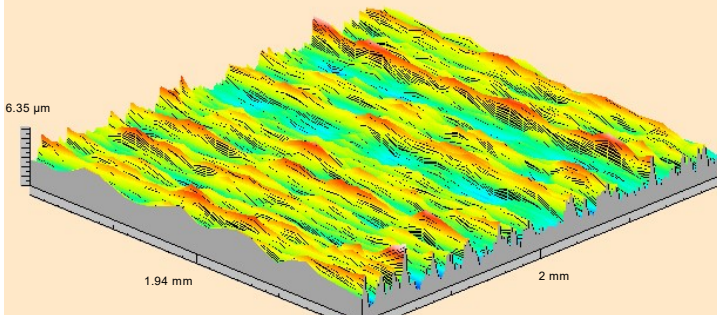
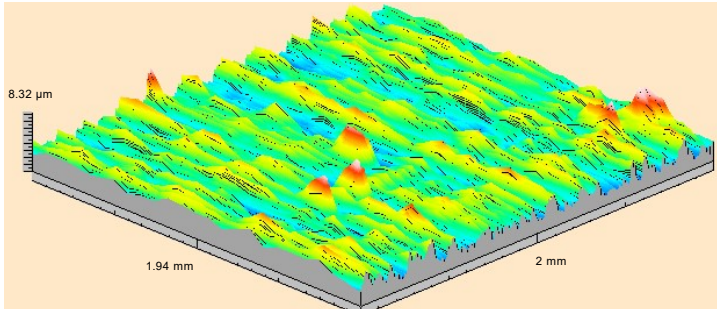
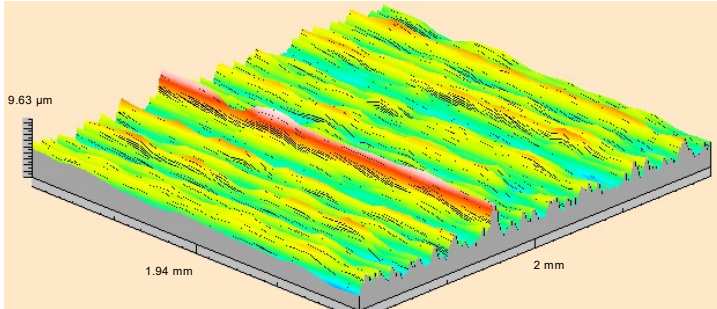
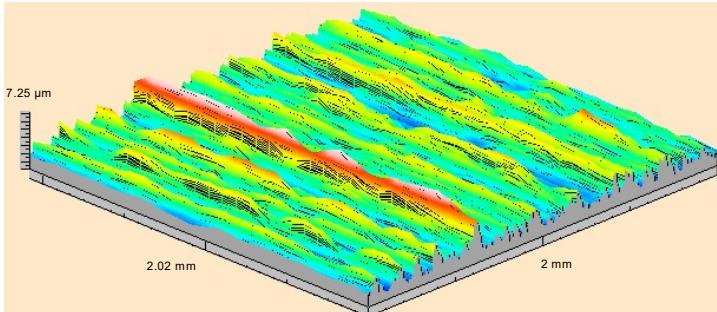
Tab. 5.18. Parametry frezowania współbieżnego dla zmiennych posuwów i prędkości skrawania

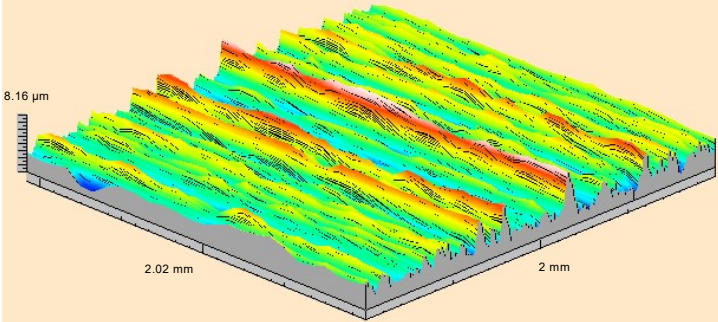
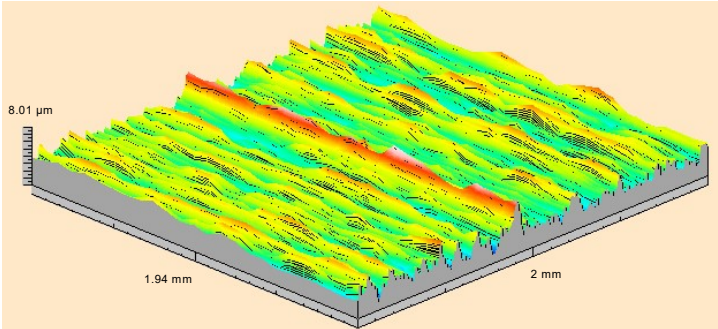
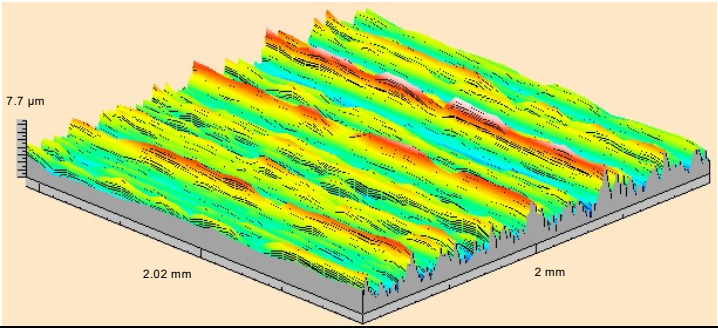
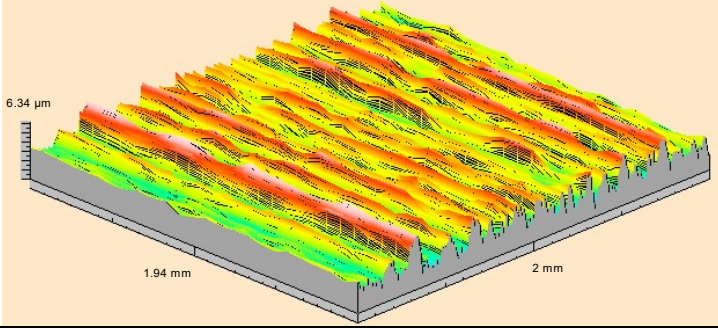
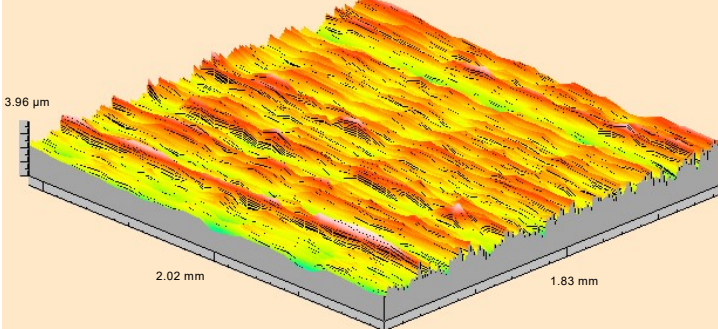
Nr	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm/obr]	$n$ [obr/min]	$v_f$ [mm/min]	$z$	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]	$d$ [mm]
1	100	0.01	3185	32	2	10	0.1	10
2		0.05		159				
3		0.10		318				
4		0.20		637				
5	300	0.01	9554	96				
6		0.05		478				
7		0.10		955				
8		0.20		1911				
9	700	0.01	22293	223				
10		0.05		1115				
11		0.10		2229				
12		0.20		4459				
13	900	0.01	28662	287				
14		0.05		1433				
15		0.10		2866				
16		0.20		5732				

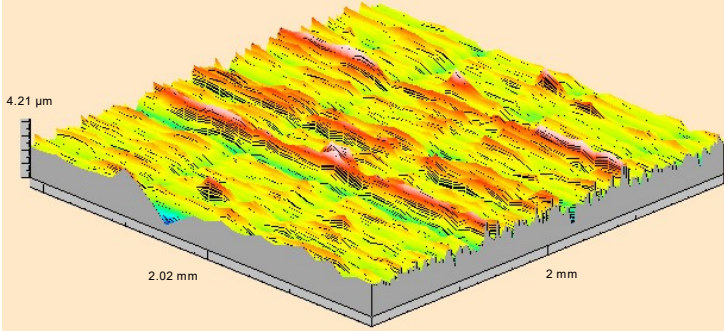
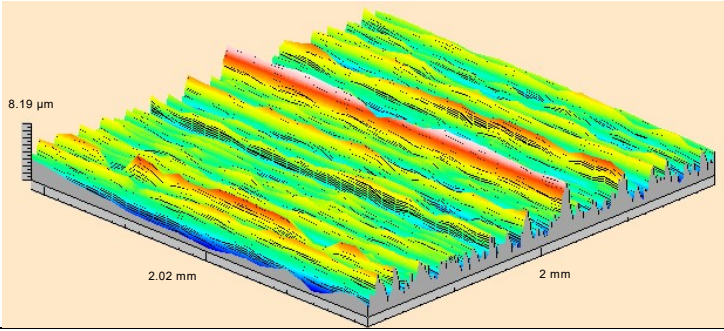
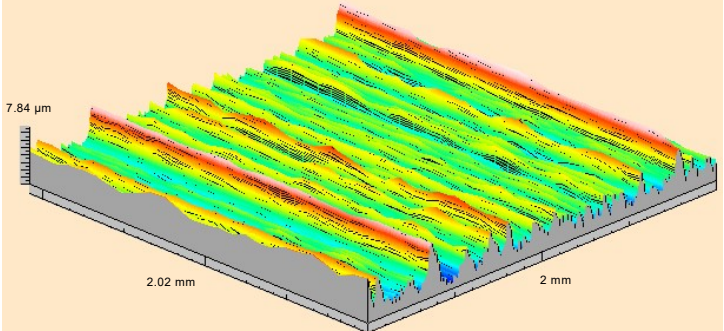
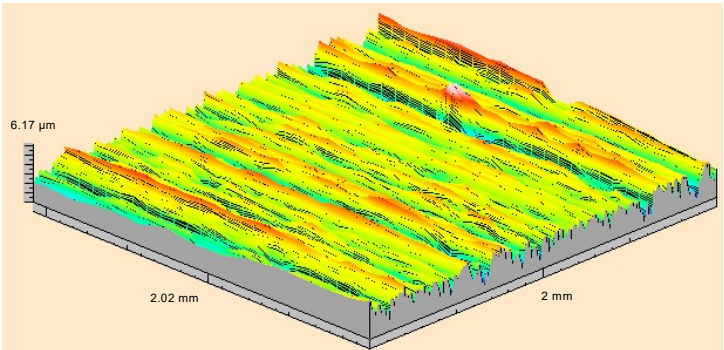
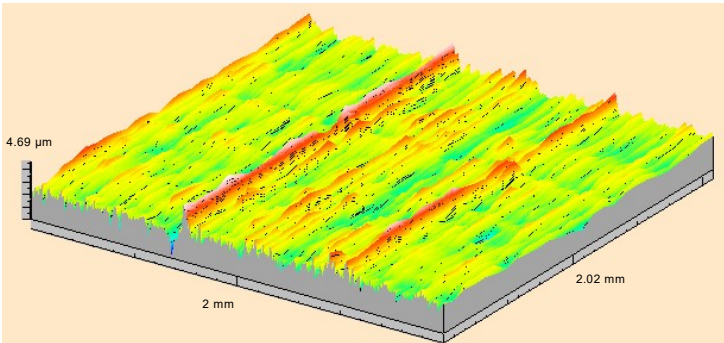
W oparciu o przeprowadzone badania uzyskano wyniki pokazane w Tab. 5.19.

Tab. 5.19. Wyniki przeprowadzonych badań

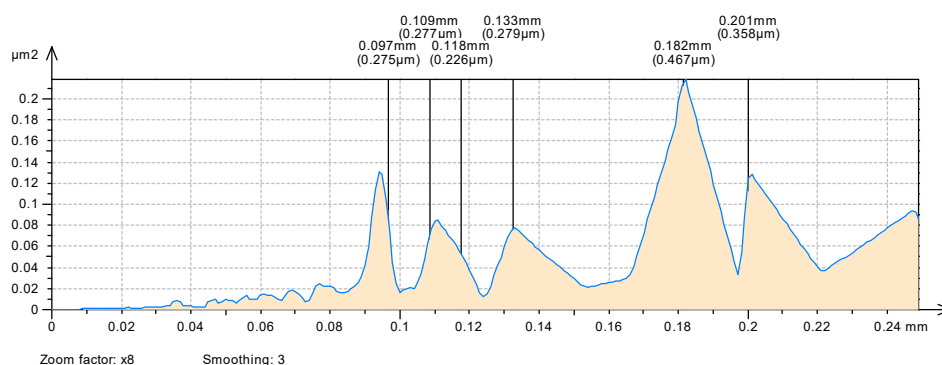
<p>Nr 1  <math>v_c = 100</math> m/min  <math>f = 0,01</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,46</math> μm  <math>St = 5,53</math> μm  <math>Sz = 5,01</math> μm</p>
---	--	--

<p>Nr 2  <math>v_c = 100</math> m/min  <math>f = 0,05</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,62</math> μm  <math>St = 5,86</math> μm  <math>Sz = 5,43</math> μm</p>
<p>Nr 3  <math>v_c = 100</math> m/min  <math>f = 0,1</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,65</math> μm  <math>St = 6,35</math> μm  <math>Sz = 5,23</math> μm</p>
<p>Nr 4  <math>v_c = 100</math> m/min  <math>f = 0,2</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,78</math> μm  <math>St = 8,32</math> μm  <math>Sz = 7,88</math> μm</p>
<p>Nr 5  <math>v_c = 300</math> m/min  <math>f = 0,01</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,85</math> μm  <math>St = 9,63</math> μm  <math>Sz = 7,89</math> μm</p>
<p>Nr 6  <math>v_c = 300</math> m/min  <math>f = 0,05</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,76</math> μm  <math>St = 7,25</math> μm  <math>Sz = 6,98</math> μm</p>

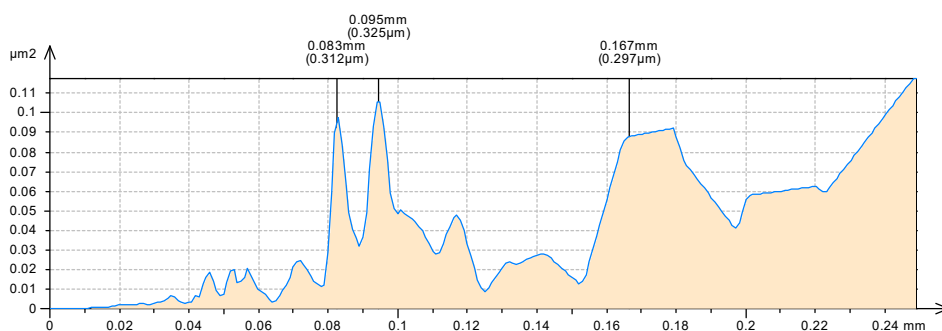
<p>Nr 7  <math>v_c = 300</math> m/min  <math>f = 0,1</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,87</math> μm  <math>St = 8,16</math> μm  <math>Sz = 7,37</math> μm</p>
<p>Nr 8  <math>v_c = 300</math> m/min  <math>f = 0,2</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,74</math> μm  <math>St = 8,01</math> μm  <math>Sz = 6,82</math> μm</p>
<p>Nr 9  <math>v_c = 700</math> m/min  <math>f = 0,01</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,89</math> μm  <math>St = 7,7</math> μm  <math>Sz = 7,24</math> μm</p>
<p>Nr 10  <math>v_c = 700</math> m/min  <math>f = 0,05</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,83</math> μm  <math>St = 6,34</math> μm  <math>Sz = 5,57</math> μm</p>
<p>Nr 11  <math>v_c = 700</math> m/min  <math>f = 0,1</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,29</math> μm  <math>St = 3,96</math> μm  <math>Sz = 3,43</math> μm</p>

<p>Nr 12  <math>v_c = 700</math> m/min  <math>f = 0,2</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,32</math> μm  <math>St = 4,21</math> μm  <math>Sz = 4,08</math> μm</p>
<p>Nr 13  <math>v_c = 900</math> m/min  <math>f = 0,01</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,91</math> μm  <math>St = 8,19</math> μm  <math>Sz = 7,91</math> μm</p>
<p>Nr 14  <math>v_c = 900</math> m/min  <math>f = 0,05</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,96</math> μm  <math>St = 7,84</math> μm  <math>Sz = 7,55</math> μm</p>
<p>Nr 15  <math>v_c = 900</math> m/min  <math>f = 0,1</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,73</math> μm  <math>St = 6,17</math> μm  <math>Sz = 5,74</math> μm</p>
<p>Nr 16  <math>v_c = 900</math> m/min  <math>f = 0,2</math> mm/obr</p>		<p><math>Sa = 0,34</math> μm  <math>St = 4,69</math> μm  <math>Sz = 4,21</math> μm</p>

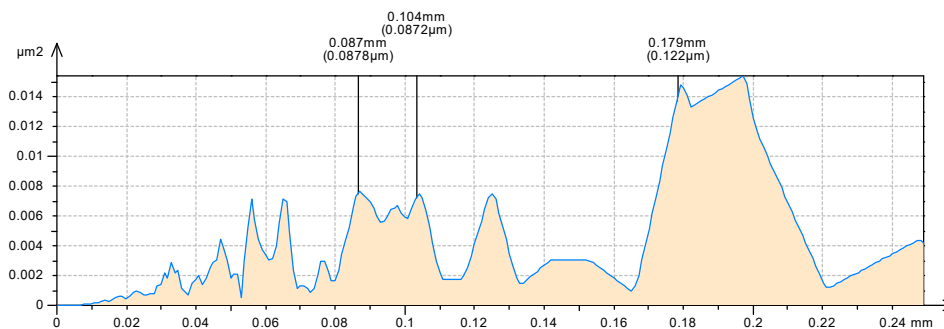
Na żadnym z przedstawionych obrazów 3D (Tab. 5.19) nie widać jednoznacznego odwzorowania ostrza w materiale obrabianym (odwzorowania posuwu). Sugeruje to brak odwzorowania kinematyczno-geometrycznego. Potwierdzeniem tego są pokazane przykładowe wykresy gęstości widmowej mocy dla uzyskanych powierzchni. Na Rys. 5.10 – Rys. 5.13 pokazano przykładowe widma tylko dla maksymalnych posuwów  $f = 0,2$  mm/obr. W przypadku gdyby było wyraźne odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym na osi  $X$  widać by było dominujący prążek o długości  $\lambda = 0,2$  mm. Skoro dla największego posuwu nie zaobserwowano takiego zjawiska to tym bardziej dla małych wartości  $f$  zjawisko odwzorowania posuwu nie wystąpi.



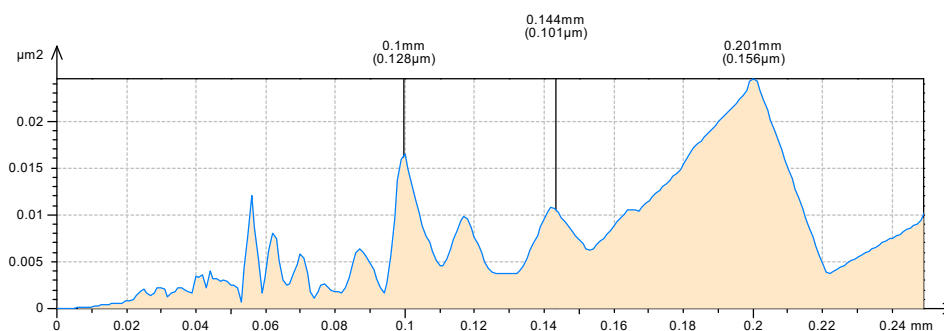
Rys. 5.10. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 4 ( $v_c=100$ m/min,  $f=0,2$ mm/obr)



Rys. 5.11. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 8 ( $v_c=300$ m/min,  $f=0,2$ mm/obr)



Rys. 5.12. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 12 ( $v_c=700\text{m/min}$ ,  $f=0,2\text{mm/obr}$ )



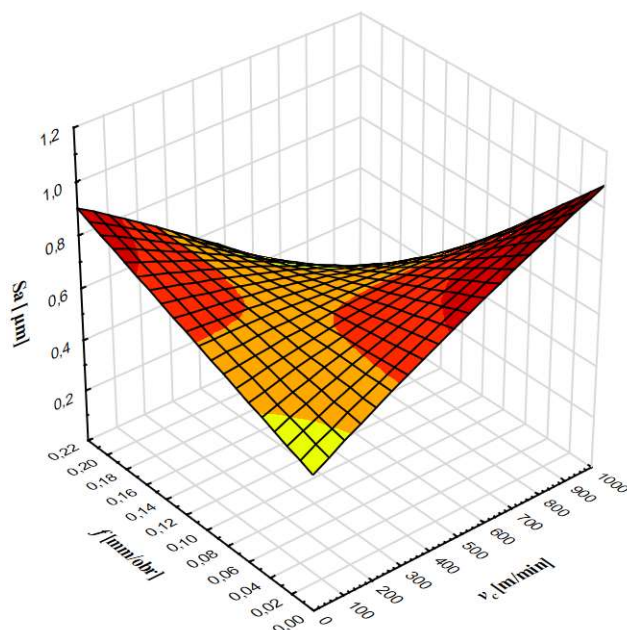
Rys. 5.13. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 16 ( $v_c=900\text{m/min}$ ,  $f=0,2\text{mm/obr}$ )

W oparciu o uzyskane parametry chropowatości wykonano wykresy 3D wpływu posuwu  $f$  i prędkości skrawania  $v_c$  na parametry  $Sa$ ,  $St$  i  $Sz$  (Rys. 5.14 – Rys. 5.16). Analizując wykres dla parametru  $Sa$  można stwierdzić:

- dla małych wartości posuwu  $f$  wzrost prędkości skrawania  $v_c$  powoduje zwiększenie parametru chropowatości  $Sa$ ,
- dla małych wartości prędkości skrawania  $v_c$  wzrost wartości posuwu  $f$  powoduje zwiększenie parametru chropowatości  $Sa$ ,
- przy jednoczesnym zwiększaniu wartości posuwu  $f$  i prędkości skrawania  $v_c$  wartość parametru chropowatości  $Sa$  maleje.

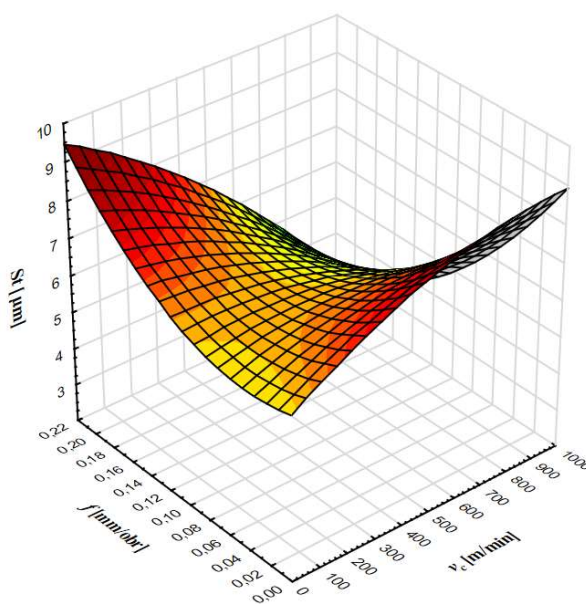
Podobne wnioski można wysunąć analizując wykresy dla parametrów  $Sz$  i  $St$ .





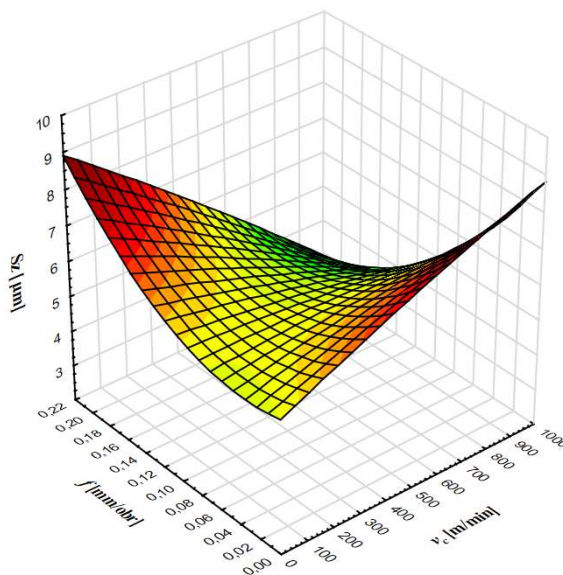
$$Sa = 0,52 + 0,0007 \cdot v_c + 1,68 \cdot f - 1,03E - 7 \cdot v_c^2 - 0,0063 \cdot v_c \cdot f + 0,36 \cdot f^2$$

Rys. 5.14. Wpływ posuwu i prędkości skrawania na wartość Sa



$$St = 6,4 + 0,0049 \cdot v_c - 8,61 \cdot f - 2,4E - 6 \cdot v_c^2 - 0,041 \cdot v_c \cdot f + 102,3 \cdot f^2$$

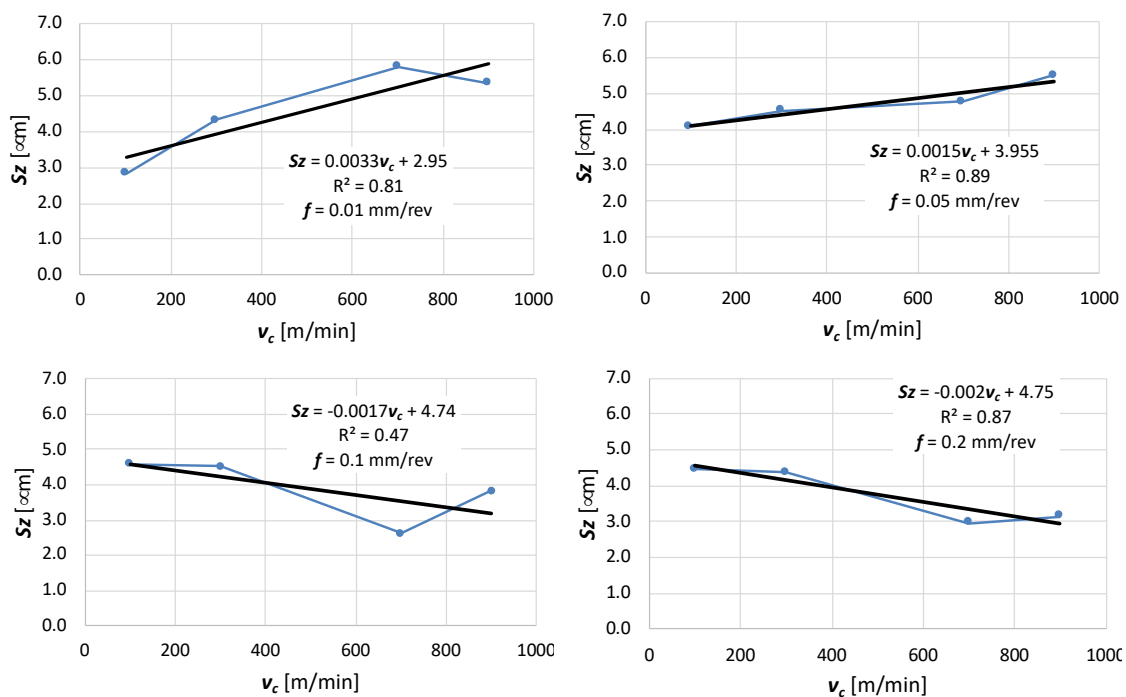
Rys. 5.15. Wpływ posuwu i prędkości skrawania na St dla II etapu



$$Sz = 5,7 + 0,0035 \cdot v_c - 7,23 \cdot f - 4,37E - 7 \cdot v_c^2 - 0,041 \cdot v_c \cdot f + 98,58 \cdot f^2$$

Rys. 5.16. Wpływ posuwu i prędkości skrawania na Sz dla II etapu

Na Rys. 5.17 pokazano wpływ prędkości skrawania na parametr Sz dla czterech różnych wartości posuwu  $f$ .



Rys. 5.17. Parametr chropowości Sz w funkcji prędkości skrawania  $v_c$  dla czterech różnych wartości posuwu  $f$

Wraz ze wzrostem posuwu zmienia się charakter wpływu prędkości  $v_c$  na parametr  $S_z$ . Oznacza to, że na etapie budowania modelu chropowatości konieczne będzie uwzględnienie posuwu i prędkości skrawania oraz ich wzajemnych interakcji.

Kinematyczno-geometryczne odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym jest głównym czynnikiem kształtującym chropowatość powierzchni obrobionej. Modele te jednak zawodzą dla małych wartości posuwów dedykowanych dla obróbki dokładnej, dla której chropowatość powierzchni jest podstawowym kryterium oceny. Z drugiej strony dla wielu materiałów obrabianych uzyskiwanie niskiej wartości chropowatości ograniczone jest zakresem powstawania narostu, który negatywnie wpływa na chropowatość powierzchni. Zakres powstawania narostu bezpośrednio zależy od prędkości skrawania, która ma bezpośrednie przełożenie na temperaturę procesu. Im temperatura jest większa tym intensywność procesu adhezji maleje. Dlatego w celu uzyskania niskiej wartości chropowatości powierzchni wskazane jest skrawanie z dużymi prędkościami skrawania, ponieważ wzrost temperatury minimalizuje intensywność zjawiska adhezji.

Z tego względu model chropowatości powinien uwzględniać nie tylko posuw, ale także prędkość skrawania. Ze związków przyczynowo skutkowych wynika, że nie da się połączyć posuwu i prędkości skrawania w jeden model analityczny. Mechanizmy posuwu i prędkości skrawania w kształtowaniu chropowatości powierzchni obrobionej są różne. Dlatego należy opracować model hybrydowy, który uwzględni te dwa czynniki.

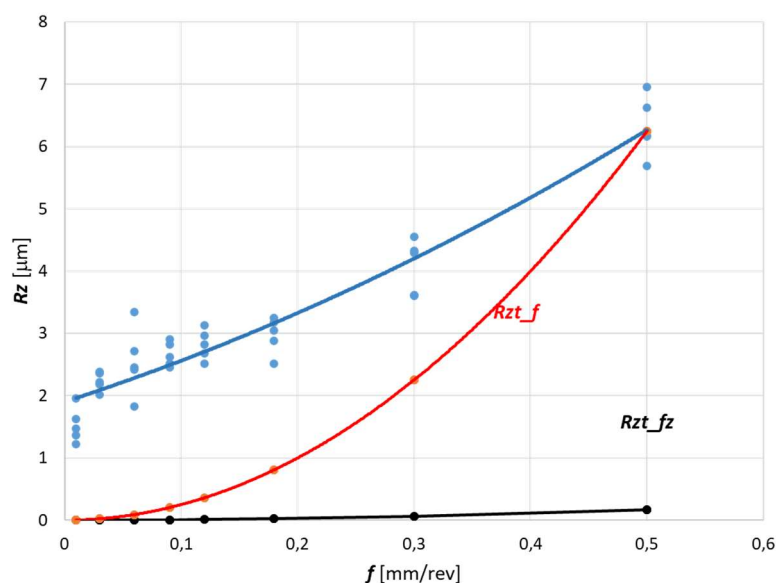
### **5.3 Modelowanie i weryfikacja opracowanego modelu**

Przystępując do zbudowania modelu chropowatości wzięto pod uwagę wnioski z wcześniejszych badań. Z analizy badań wstępnych i badań zasadniczych wypływa podstawowy wniosek, że oprócz wartości posuwu także prędkość skrawania odgrywa istotną rolę w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrobionej.

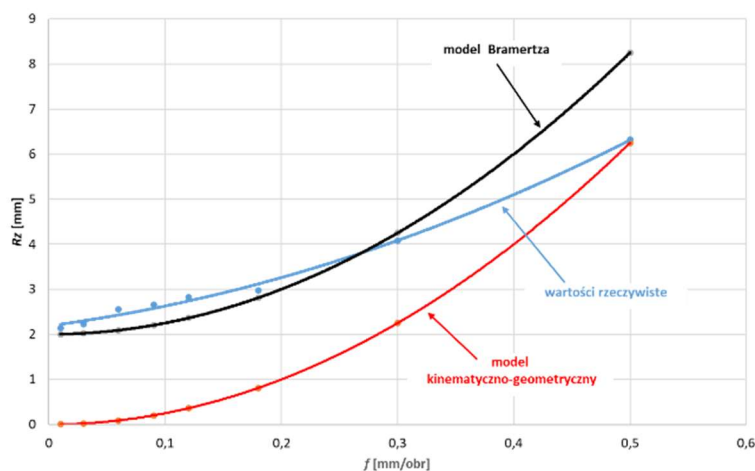
Z doniesień literaturowych można stwierdzić, że prawie wszystkie czynniki, które wpływają na proces skrawania, mają też wpływ na chropowatość powierzchni obrobionej. Opracowanie modelu analitycznego lub statystycznego ujmujące wszystkie te czynniki jest nie możliwe. Dlatego też skupiono się na najważniejszych czynnikach takich jak posuw i prędkość skrawania.

Wpływ posuwu na chropowatość powierzchni obrabianej jest oczywisty (choć nie zawsze jak w przypadku w przypadku kompozytu MMC). Jednak wiele badań (w tym badania własne) potwierdzają istotny wkład w kształtowaniu chropowatości powierzchni obrabianej, prędkości skrawania  $v_c$ . Dlatego też zaproponowany model hybrydowy uwzględnia prędkość skrawania. W modelu tym uwzględniono te dwa czynniki bazując na modelu Brammertz'a.

W pierwszej kolejności zweryfikowano dotychczasowe modele kinematyczno-geometryczne a wyniki pokazano na Rys. 5.18 i Rys. 5.19. Wyniki te dotyczyły procesu frezowania współbieżnego frezem o ostrzach diamentowych pokazanym na Rys. 5.20.



Rys. 5.18. Weryfikacja modelu kinematyczno-geometrycznego zawierająca wartości posuwu na obrót  $f$  i posuwu na ostrze  $f_z$



Rys. 5.19. Porównanie modelu kinematyczno-geometrycznego z modelem Brammertz'a



Rys. 5.20. Zastosowany frez do badań weryfikacyjnych

Jak widać z zamieszczonego rysunku (Rys. 5.18) posuw na obrót ma decydujący wpływ na chropowatość w porównaniu z posuwem na ostrze. W wielu publikacjach ten fakt jest potwierdzony i wynika to z tego, że monolityczne frezy mimo to, że są bardzo dobrze wyrównowane, to bicie promieniowe odgrywa istotną rolę w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrobionej. Jednak nie należy tego rozumieć, że bicie determinuje charakter mikronierówności, ponieważ jest to cecha charakterystyczna każdego odosobnionego układu OUPN.

Rys. 5.19 pokazuje różnice pomiędzy modelem klasycznym, a modelem Brammertz'a. Podstawową wadą modelu klasycznego jest to, że dla małych wartości posuwu daje bardzo duże błędy. Tej wady nie ma model Brammertz'a uwzględniając minimalną wartość grubości warstwy skrawanej.

Mając to na uwadze zaproponowano własny model chropowatości powierzchni obrobionej uwzględniający nie tylko wartość posuwu  $f$ , średnicę frezu -  $d$  i minimalną grubość warstwy skrawanej -  $h_{min}$ , ale także prędkość skrawania  $v_c$ . Opracowany model pokazano poniżej.

$$Rzt = \left[ \frac{f^2}{4d} + \frac{h_{min}}{2} \left( 1 + \frac{r_\epsilon h_{min}}{f^2} \right) \right] + (\alpha \cdot f) - (\beta \cdot f \cdot v_c) + (\gamma \cdot v_c) \quad (15)$$

Proponowany model składa się z dwóch członów:

- człon analityczny dotyczący modelu Brammertz'a (niebieski)
- człon doświadczalny (statystyczny – czerwony)

Człon doświadczalny dotyczy parametrów: posuw na obrót  $f$  i prędkości skrawania  $v_c$ . Współczynniki  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  zostały wyznaczone na drodze doświadczalnej. Dlatego też zaproponowany model jest modelem hybrydowym. W opaci o badania doświadczalne wyznaczono współczynniki  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ . Uzyskane wyniki dla badanego skojarzenia materiał obrabiany (stop MMC) i materiał ostrza (PCD) pokazano poniżej:

$$\alpha = 20$$

$$\beta = 0,05$$

$$\gamma = 0,0005$$

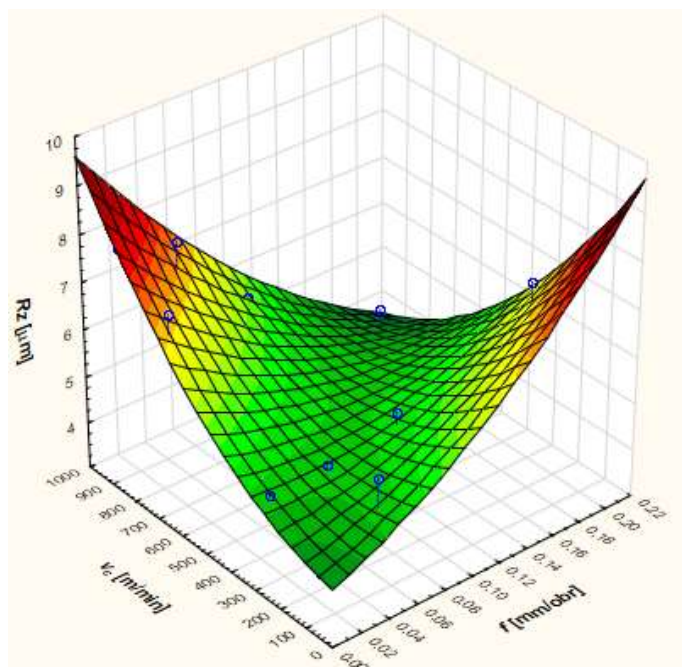
Są to współczynniki bezwymiarowe, które zgodnie z zasadami statystyki normują wartości zmiennych (wartości wejściowych) do wartości wyjściowych.

W Tab. 5.20 pokazano wyniki dla frezowania współbieżnego z różnymi parametrami skrawania dotyczącymi wartości rzeczywistych, wartości uzyskanych z modelu kinematyczno-geometrycznego, wartości z modelu Brammertz'a i wartości uzyskanych z proponowanego modelu hybrydowego –  $Sz_t$ .

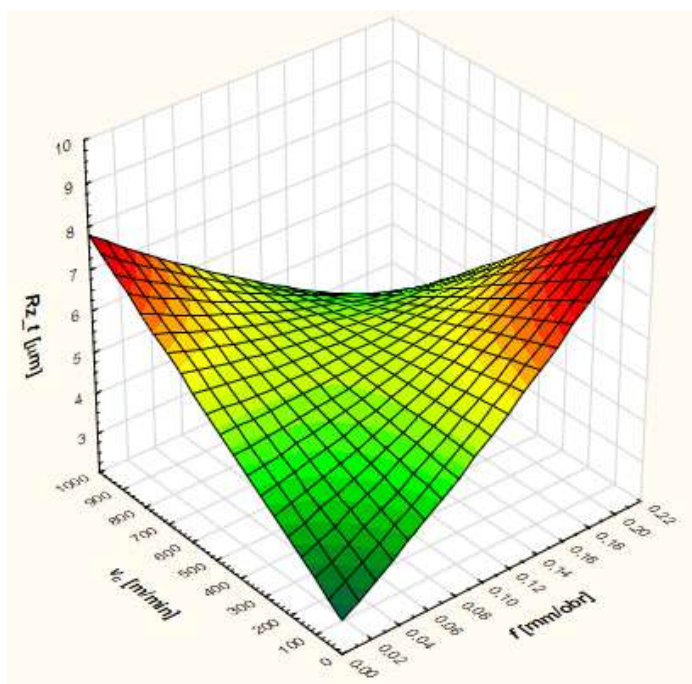
Tab. 5.20. Wyniki symulacji w porównaniu z wartościami rzeczywistymi

$f$ [mm/obr]	$v_c$ [m/min]	$Sz$ [ $\mu\text{m}$ ]	kinet_geom	Bramertz	$Sz_t$
0,01	100	4,01	0,0000025	2,82	3,50
0,05	100	5,43	0,0000625	2,88	4,28
0,1	100	5,23	0,00025	3,06	5,36
0,2	100	7,88	0,001	3,81	7,91
0,01	300	4,89	0,0000025	2,82	4,40
0,05	300	4,98	0,0000625	2,88	4,78
0,1	300	5,37	0,00025	3,06	5,36
0,2	300	6,82	0,001	3,81	6,91
0,01	700	7,24	0,0000025	2,82	6,20
0,05	700	5,57	0,0000625	2,88	5,78
0,1	700	4,74	0,00025	3,06	5,36
0,2	700	4,08	0,001	3,81	4,91
0,01	900	7,91	0,0000025	2,82	7,10
0,05	900	7,55	0,0000625	2,88	6,28
0,1	900	5,74	0,00025	3,06	5,36
0,2	900	4,21	0,001	3,81	3,91

Interpretację geometryczną uzyskanych wyników w postaci wykresów 3D pokazano na Rys. 5.21 i Rys. 5.22, przy czym wykres 5.21 prezentuje wyniki rzeczywiste, a wykres 5.22 wyniki modelowe wyznaczone z równania 15.



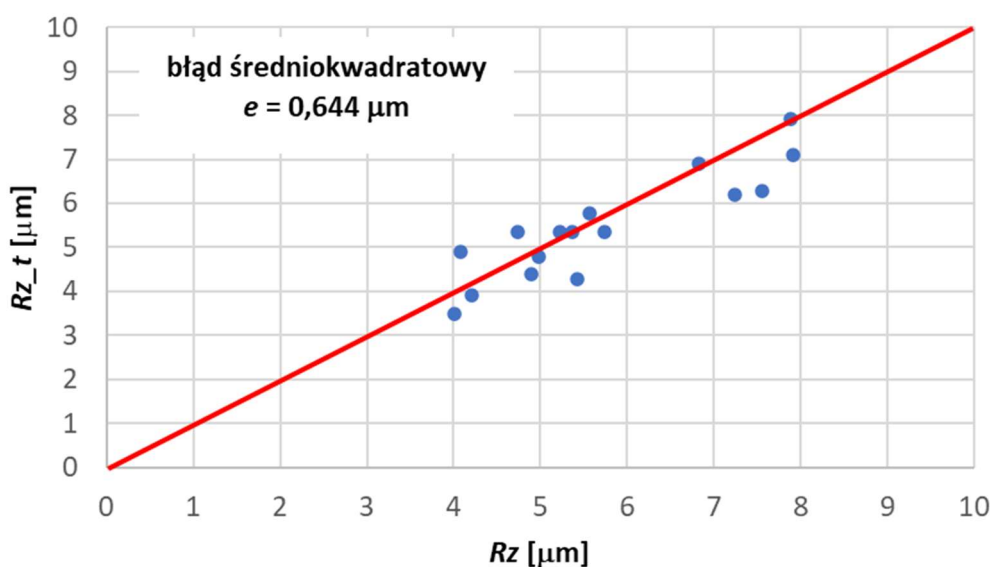
Rys. 5.21. Wpływ posuw i prędkości skrawania na parametr Rz (wyniki doświadczalne)



Rys. 5.22. Wpływ posuw i prędkości skrawania na parametr Rz (wyniki modelowe)

W oparciu o wyniki rzeczywiste i teoretyczne (wyznaczone z równania 15) obliczono błąd średniokwadratowy zgodnie ze wzorem 16. Interpretację graficzną uzyskanych wyników przedstawia Rys. 5.23.

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rz_r - Rz_t)^2} \text{ [um]} \quad (16)$$



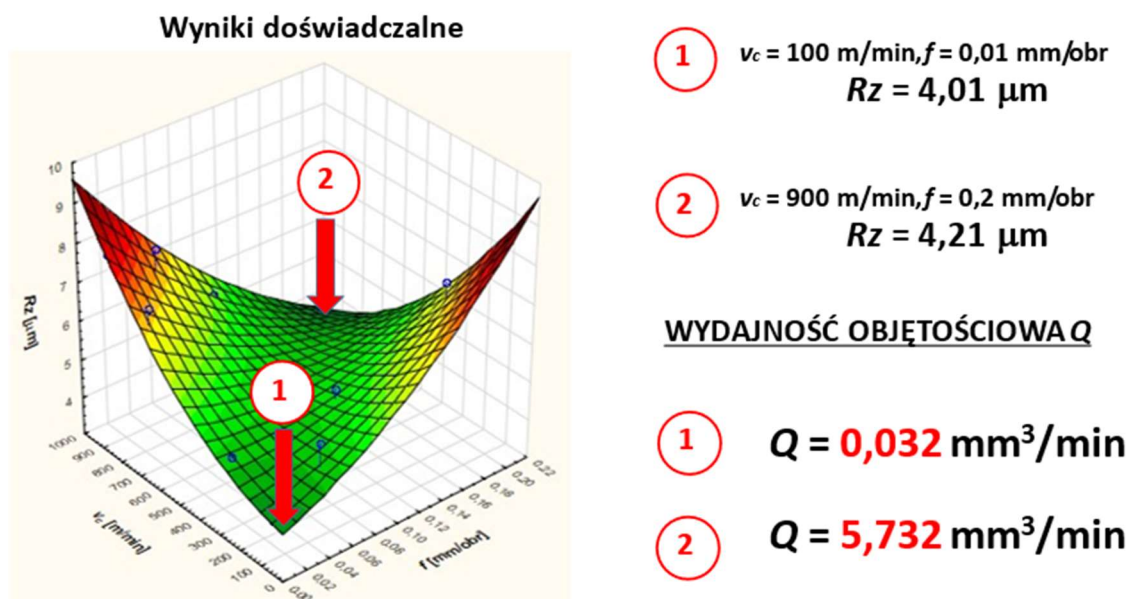
Rys. 5.23. Interpretacja graficzna uzyskanych wyników

Błąd średniokwadratowy wynosi  $e = 0,644 \mu\text{m}$ , co oznacza, że z taką dokładnością model hybrydowy przewiduje wartość parametru  $Rz$ . Jest to wynik bardzo zadowalający, mając na uwadze fakt, że chropowatość powierzchni obrabianej dla kompozytu metalowo ceramicznego jest obarczona dużym czynnikiem losowym.

Zakładając, że parametry chropowatości są funkcją dwóch zmiennych:  $f$  i  $v_c$  przeprowadzono analizę doboru parametrów skrawania pod kątem dokładności uzyskanej powierzchni (parametrów chropowatości) i wydajności procesu. Uzyskanie bardzo dobrej jakości powierzchni obrabianej wiąże się z wydłużonym czasem. Jednak wiadomo jest, że dla małych wartości posuw parametry chropowatości nie muszą być najmniejsze. Czasami jest wręcz przeciwnie, o czym już wspomiano w niniejszej dysertacji. Dlatego nie zawsze obróbka ze zmniejszonymi wartościami posuwu jest opłacalna.



Z danych, jakie dostarcza opracowany model hybrydowy wynika, że minimalne wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej można uzyskać nie koniecznie dla minimalnych wartości posuwu i prędkości skrawania. Z Rys. 5.24 wynika, że dla maksymalnych wartości posuwu i prędkości skrawania można uzyskać porównywalne wartości parametru  $Rz$  jak dla wartości minimalnych.



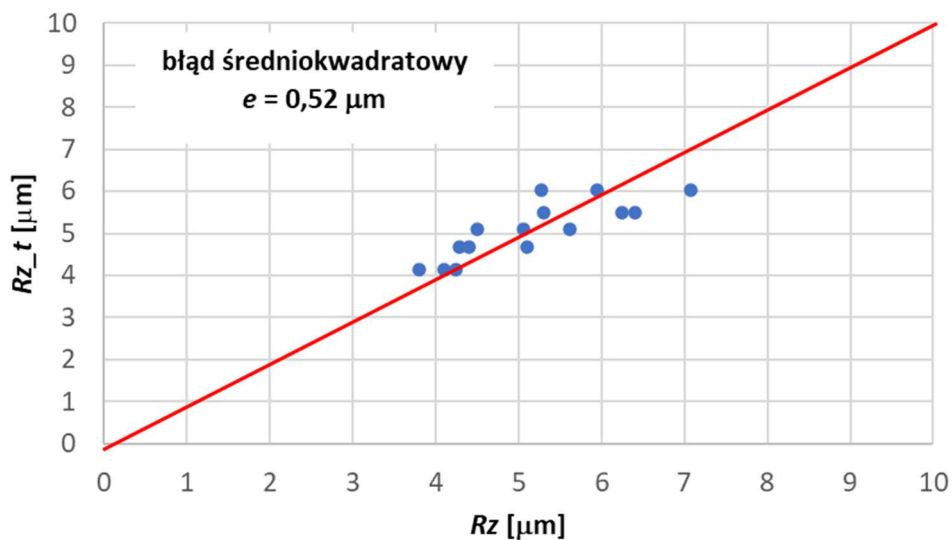
Rys. 5.24. Porównanie wydajności procesu dla dwóch różnych zakresów frezowania

Wynika z tego oczywisty wniosek, że nie należy frezować kompozytu MMC z wartościami minimalnego posuwu  $f$  i prędkości skrawania  $v_c$ , tylko z maksymalnymi. Obróbka z maksymalnymi prędkościami skrawania zawsze odbywa się kosztem trwałości ostrza, jednak zyski związane z wydajnością obróbki rekompensują straty związane ze zużyciem ostrza.

W celu weryfikacji i sprawdzenia opracowanego modelu hybrydowego przeprowadzono analizę zmian chropowatości powierzchni w funkcji zmiennej prędkości skrawania przy stałym posuwie na obrót  $f$ . Uzyskane wyniki pokazano w Tab. 5.21. Weryfikacja dotyczyła porównania wyników uzyskanych dla stałej wartości posuwu i dla zmiennej wartości prędkości skrawania. Interpretacja graficzna uzyskanego błędu średniokwadratowego prezentuje Rys. 5.25.

Tab. 5.21. Wyniki dla stałego posuwu  $f$

$f$	$v_c$	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]	$kinet\_geom$	$Brammertz$	$Sz\_t$
0,05	200	5,95	0,0625	2,06	6,02
0,05	200	5,27	0,0625	2,06	6,02
0,05	200	7,08	0,0625	2,06	6,02
0,05	400	6,4	0,0625	2,06	5,48
0,05	400	5,3	0,0625	2,06	5,48
0,05	400	6,24	0,0625	2,06	5,48
0,05	550	4,5	0,0625	2,06	5,08
0,05	550	5,06	0,0625	2,06	5,08
0,05	550	5,61	0,0625	2,06	5,08
0,05	700	5,1	0,0625	2,06	4,67
0,05	700	4,28	0,0625	2,06	4,67
0,05	700	4,4	0,0625	2,06	4,67
0,05	900	3,8	0,0625	2,06	4,13
0,05	900	4,1	0,0625	2,06	4,13
0,05	900	4,24	0,0625	2,06	4,13

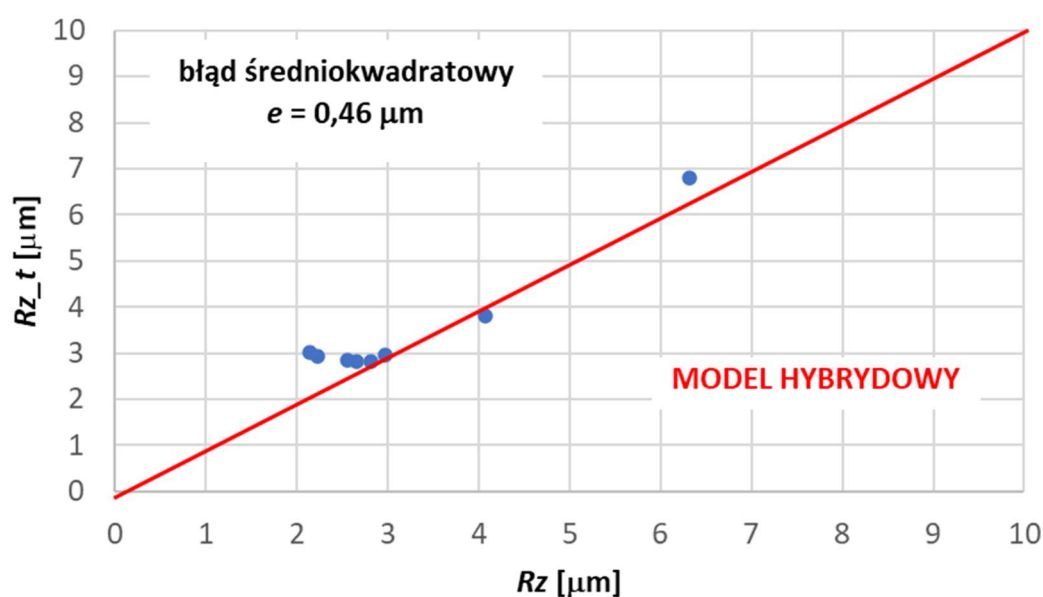


Rys. 5.25. Interpretacja graficzna uzyskanego błędu średniokwadratowego dla stałego posuwu  $f = 0,05$  mm/obr

Podobną symulację przeprowadzono dla stałej wartości prędkości skrawania  $v_c$ . Otrzymane wyniki przedstawia Tab. 5.22, a interpretację graficzną błędu średniokwadratowego pomiędzy wartościami rzeczywistymi a wartościami przewidywanymi przez model hybrydowy prezentuje Rys. 5.26.

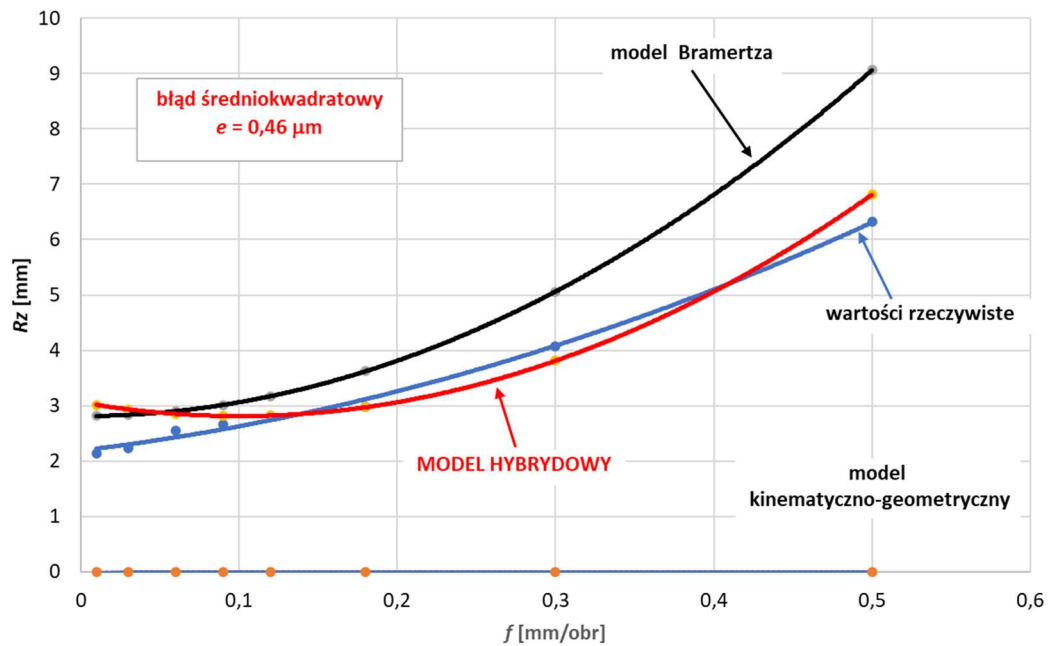
Tab. 5.22. Wyniki dla stałej prędkości  $v_c$

$v_c$	$f$	$Rz$	$kinet\_geom$	$Brammertz$	$Sz\_t$
500	0,01	2,143	0,0025	2,00	2,20
500	0,03	2,232	0,0225	2,02	2,12
500	0,06	2,554	0,09	2,09	2,04
500	0,09	2,66	0,2025	2,20	2,00
500	0,12	2,82	0,36	2,36	2,01
500	0,18	2,974	0,81	2,81	2,16
500	0,3	4,078	2,25	4,25	3,00
500	0,5	6,322	6,25	8,25	6,00



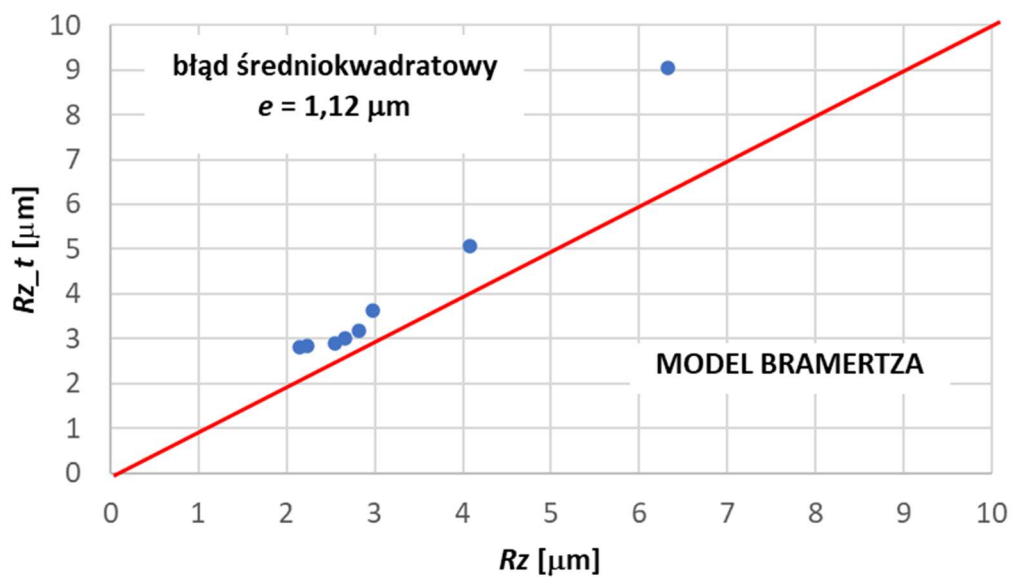
Rys. 5.26. Interpretacja graficzna uzyskanego błędu średniokwadratowego dla stałej prędkości skrawania  $v_c = 500$  m/min

Dokładność opracowanego modelu hybrydowego w porównaniu z modelem kinematyczno-geometrycznym i modelem Brammertz'a pokazano na Rys. 5.27. Z zaprezentowanych danych potwierdza się fakt, że najmniej dokładny jest model kinematyczno-geometryczny odwzorowania ostrza w materiale obrabianym. Model Brammertz'a i opracowany model hybrydowy daje podobne wyniki w zakresie małych wartości posuwu  $f < 0,1$  mm/obr. Jednak dla większych wartości posuw model hybrydowy daje wyniki zbliżone do wartości rzeczywistych. Dlatego też należy uznać przewagę modelu hybrydowego nad modelem Brammertz'a.



Rys. 5.27. Porównanie analizowanych modeli chropowatości

Na Rys. 5.28 pokazano wartość błędu średniokwadratowego dla modelu Bramertza, który wynosi  $e = 1,12 \mu\text{m}$ . Oznacza to, że z taką dokładnością można prognozować wartość chropowatości dla tego modelu. Z kolei model hybrydowy wartość parametru  $R_z$  prognozuje z dokładnością  $e = 0,46 \mu\text{m}$ .



Rys. 5.28. Porównanie analizowanych modeli chropowatości

## 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że obróbka frezarska kompozytu MMC sprawia spore problemy. Niezidentyfikowana forma występowania wzniesień i zagłębień wpływa na wartości parametrów chropowatości. Charakter i rozmieszczenie występujących wzniesień i zagłębień jest losowe, co może świadczyć, że są one pochodną występowania narostu, towarzyszącego prowadzonej obróbce materiału MMC.

Współczesna technologia, oprzyrządowanie i oprogramowanie umożliwiają w szybki i automatyczny sposób wyznaczać wartości parametrów chropowatości 3D powierzchni, generować krzywą udziału materiałowego oraz prowadzić analizę topografii 3D powierzchni, co pozwala wyznaczyć najkorzystniejsze warunki prowadzenia procesu skrawania do uzyskania optymalnych własności powierzchni obrobionej.

Uzyskane wyniki pozwalają wyznaczyć parametry obróbkowe, takie jak posuw  $f$  i prędkość skrawania  $v_c$ , z którymi prowadząc obróbkę można uzyskać oczekiwaną wartość chropowatości powierzchni. Najniższe wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionej kompozytu MMC uzyskujemy prowadząc obróbkę z dużą wartością posuwu  $f$  i dużą prędkością skrawania  $v_c$ . Najwyższą wartość parametrów chropowatości uzyskuje się prowadząc obróbkę z małą wartością posuwu  $f$  i dużą prędkością skrawania  $v_c$  oraz dla niskiej wartości prędkości skrawania  $v_c$  i dużego posuwu  $f$ .

Modele matematyczne, wykorzystane do prognozowania chropowatości teoretycznej, są najczęściej spotykanymi i wykorzystywanymi modelami w literaturze. Uzyskana wartość zależy od posuwu i własności geometrycznych narzędzia, co w przypadku prowadzenia obróbki kompozytu MMC okazało się niewystarczające. Uzyskane wartości chropowatości teoretycznej w sposób znaczący różniły się od rzeczywistych wartości chropowatości powierzchni obrobionej. Wpływ na to miało nieuwzględnienie w modelach matematycznych prędkości skrawania, która w sposób niemonotoniczny wpływa, na jakość powierzchni obrobionej.

## 7. WNIOSKI

### 7.1 Wnioski poznawcze

1. Spośród przebadanych materiałów narzędziowych stosowanych na frezy monolityczne (węgiel spiekany z powłoką ceramiczną, węgiel spiekany z powłoką diamentową, azotek boru, polikrystaliczny diament) najmniejsze parametry chropowatości uzyskano dla ostrzy z polikrystalicznego diamentu.
2. W badaniach potwierdzono dominujący wpływ posuwu na wartości parametrów chropowatości powierzchni po frezowaniu.
3. Decydujące znaczenie podczas kształtowania mikronierówności po frezowaniu kompozytu ma posuw na obrót  $f$  a nie posuw na ostrze  $f_z$ .
4. Na etapie badań wstępnych stwierdzono istotny wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni. Wraz ze wzrostem prędkości  $v_c$  parametry chropowatości mają tendencję spadkową, co oznacza, że korzystnie jest skrawać z dużymi prędkościami  $v_c$ .
5. Analizując wpływ posuwu i prędkości skrawania na chropowatość stwierdzono, że najniższe wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej kompozytu MMC uzyskujemy prowadząc obróbkę z dużą wartością posuwu  $f$  i dużą prędkością skrawania  $v_c$ . Najwyższą wartość parametrów chropowatości uzyskuje się prowadząc obróbkę z niską wartością posuwu  $f$  i dużą prędkością skrawania  $v_c$  oraz dla niskiej wartości prędkości skrawania  $v_c$  i dużego posuwu  $f$ .
6. Chcąc uzyskać zakładany parametr chropowatości powierzchni korzystnie jest skrawać z większą prędkością  $v_c$  i podwyższonym posuwem na obrót  $f$ . Dzięki temu uzyskujemy porównywalne parametry chropowatości i jednocześnie zwiększamy zdecydowanie wydajność obróbki.
7. W pracy porównano model kinematyczny chropowatości (kinematyczno-geometryczne odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym) dla wartości posuwu na obrót i posuwu na ostrze oraz model Brammertza, który w zastosowanym zakresie okazał się najdokładniejszy.

8. W ramach rozprawy opracowano własny model hybrydowy uwzględniający posuw na obrót i prędkość skrawania.
9. Błąd średniokwadratowy modelu hybrydowego dla parametru  $Rz$  wynosi  $e=0,644$  mm, co należy uznać za wynik bardzo dobry zważywszy na fakt, że kształtowanie mikronierówności powierzchni obrobionej obarczone jest w pewnym zakresie czynnikiem losowym.

## 7.2 Wnioski uylitarne

1. Opracowany model hybrydowy chropowatości pozwala na dobór odpowiednich parametrów frezowania kompozytów MMC pod kątem chropowatości powierzchni obrobionej.
2. W ogólnych przypadkach wskazane jest frezowanie z dużymi prędkościami skrawania, ponieważ wraz ze wzrostem prędkości obrotowej obniżają się parametry chropowatości.
3. Przy doborze parametrów frezowania pod kątem chropowatości należy uwzględnić dodatkowo wydajność procesu

## 7.3 Wnioski do dalszych badań

1. Proponuje się przeprowadzić kilka powtórzeń cyklu badań w celu uwierzytelnienia modelu hybrydowego i ewentualnego skorygowania współczynników, które w modelu wyznaczone są doświadczalnie. Dzięki temu możliwe będzie uzyskanie dokładniejszego modelu.
2. Celowe wydaje się opracowanie modelu dla frezów z węglika spiekaneego, który choć wypadł gorzej (większe parametry chropowatości) to jest to najpopularniejszy materiał narzędziowy w skali światowej.
3. Celowe jest przeprowadzenie badań dla innych materiałów obrabianych w celu weryfikacji zaproponowanego modelu hybrydowego, dzięki czemu model zyska na swojej uniwersalności.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] **Armarego E. J. A., Brown A.:** *“Machining of metals”*. Englewood Cliffs. Prentice-Hall, pp 36–62, 1969.
- [2] **Baek D. K. , Ko T. J., Kim H. S.:** *„Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model”*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 41, pp. 451–462, 2001.
- [3] **Balakrishnan M., Dinaharan I., Palanivel R., Sivaprakasam R.:** *“Synthesize of AZ31/ TiC magnesium matrix composites using friction stir processing”*. Journal of Magnesium and Alloys vol. 3 (1), pp. 76–78, 2015.
- [4] **Barnes S., Pashby I. R., Hashim B.:** *“Effect of heat treatment on the drilling performance of Aluminium/SiC MMCs”*. Applied Composite Materials vol. 6, pp.121–138, 1999.
- [5] **Benardos P. G., Vosniakos G. C.:** *„Predicting surface roughness in machining: a review”*. International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 43, pp. 833–844, 2003.
- [6] **Bieniaś J.:** *„Materiały kompozytowe o osnowie stopów aluminium wybrane aspekty strukturalne i korozyjne”*. Inżynieria Materiałowa, nr 3, pp. 561-564, 2006.
- [7] **Boczkowska A. Krześciński G.:** *„Kompozyty i techniki ich wytwarzania”*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016.
- [8] **Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.:** *“Kompozyty”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- [9] **Braszczyńska- Malik K. N., Pędzich Z., Pietrzak K., Roslaniec Z., Sterzyński T., Szweycer M.:** *„Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych”*. Kompozyty (Composites) vol. 5, pp. 19-24, 2005.
- [10] **Brautman L.J., Krock R.H.,** *“Composite materials”*. New York: Academic Press, 1975



- [11] **Bruni C., Forcellese A., Gabrielli F., Simoncini M.:** “*Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B*”. International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 46, pp. 1547–1554, 2006.
- [12] **Chandrasekaran H., Johansson J. O.:** “*On the behaviour of fibre/particle reinforced aluminium alloy matrix composites in milling and grinding*”. VDI Berichte vol. 1276, pp. 463–478, 1996.
- [13] **Chambers A. R.:** “*The machinability of light alloy MMCs*”. Composites Part A vol. 27A, pp. 143–147, 1996.
- [14] **Chen J. Y., Zhao Q. L.:** “*A model for predicting surface roughness in single-point diamond turning*”, Measurement vol. 69, pp. 20–30, 2015.
- [15] **Cheung C. F., Chan K. C., To S., Lee W. B.:** “*Effect of reinforcement in ultra-precision machining of Al6061/SiC metal matrix composites*”. Scripta Materialia vol. 47, pp. 77–82, 2002.
- [16] **Chu K., Wang F., Wang X., Li Y., Geng Z., Huang D., Zhang H.:** “*Interface design of graphene/copper composites by matrix alloying with titanium*”. Materials & Design vol. 144, pp. 290–303, 2018.
- [17] **Ciftci I., Turker M., Seker U.:** “*Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced Al-2014 alloy matrix composites*”. Materials & Design vol. 25 pp.251–255, 2004
- [18] **Cronjager W. M., Meister D.:** “*Machining of fibre and particle reinforced aluminium*”. CIRP Annals vol. 41(1), pp. 63–66, 1992
- [19] **Davim J. P., Antonio C. A.:** „*Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experimental and a genetic search model*”. Composites: Part A, tom 33, pp. 213-219, 2002
- [20] **Davim J. P., Baptista A. M.:** “*Relationship between cutting force and PDC cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium*”. Journal of Materials Processing Technology vol. 103, pp. 417–423, 2000

- [21] **Davim J. P., Conceição António C. A.:** “*Optimal drilling of particulate metal matrix composites based on experimental and numerical procedures*”. International Journal of Machine Tools and Manufacture vol. 41, pp. 21–31, 2001
- [22] **Deng B., Peng F., Zhou L., Yan R., Wang H., Yang M.:** “*Study on the surface layer formation of aluminum matrix composites and associated machinability in precision milling based on laser melting modification*”. Journal of Manufacturing Processes vol. 62, pp. 670–684, 2021.
- [23] **Demir H., Gündüz S.:** “*The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy*”. Journal Materials & Design vol. 30(5), pp. 1480–1483, 2009.
- [24] **Di Ilio A., Paoletti A.:** “*Machinability Aspects of Metal Matrix Composites*” w: “*Machining of metal matrix composites*” pod redakcją J. Paulo Dawim, Chapter 3 , str 63- 77, Springer 2012
- [25] **Diaz O. G., Luna G. G., Liao Z., Axinte D.:** „*The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity*”. International Journal of Machine Tools and Manufacture vol. 139, pp. 24–36, 2019.
- [26] **Dinaharan I., Saravanakumar S., Kalaiselvan K., Gopalakrishnan S.:** “*Microstructure and sliding wear characterization of Cu/TiB<sub>2</sub> copper matrix composites fabricated via friction stir processing*”. Journal of Asian Ceramic Societies vol.5 (3), pp. 295–303, 2017
- [27] **Ding X., Liew W. Y. H., Liu X. D.:** “*Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools*”. Wear vol. 259, pp. 1225–1234, 2005.
- [28] **Dobrzański L.A.:** „*Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*”, WNT, Warszawa, 2002
- [29] **Dobrzański L.A., Włodarczyk A., Adamiak M.:** „*Materiały kompozytowe o osnowie stopu aluminium AlCu4Mg1 wzmacniane cząstkami ceramicznymi*”. 12th Scientific International Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering AMME, pp. 297-300, 2003.
- [30] **Durand L.P.,** “*Composite materials research progress*”. New York: Nova Science Publishers, 2008

- [31] **Dwivedi D.K., Sharma A., Rajan T.V.:** “*Machining of LM13 and LM28 cast aluminium alloys: part I*”. *Journal of Materials Processing Technology* vol. 196(1–3), pp. 197–204, 2008.
- [32] **Fang X. D., Safi-Jahanshaki H.:** “*A new algorithm for developing a reference model for predicting surface roughness in finish machining of steels*”, *International Journal of Production Research* vol. 35 (1), pp. 179–197, 1997
- [33] **Feng X., Wang X.:** “*Development of empirical models for Surface roughness prediction in finish turning*”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 20, pp. 348–356, 2002.
- [34] **Fraś E., Kolbus A., Janas A.:** „*Porównanie niektórych właściwości mechanicznych kompozytów ex situ typu Duralcan z kompozytami in situ typu Al-TiC*”. *Kompozyty (Composites)* 2, nr 4, pp. 176-179, 2002.
- [35] **Ghandehariun A., Kishawy H., Balazinski M.:** „*On machining modeling of metal matrix composites: A novel comprehensive constitutive equation*”. *International Journal of Mechanical Sciences*, nr 107, pp. 235-241, 2016.
- [36] **Grzesik W.:** “*Prediction of surface topography in precision hard machining based on modelling of the generation mechanisms resulting from a variable feed rate*”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol.94 ,pp. 4115-4123, 2018.
- [37] **Hashiguchi D., Tricker D, Tarrant A., Campbell J., Pokross C.:** “*Discontinuously reinforced aluminum MMC extrusions*”. *Metal Powder Report* vol. 72 (4), pp. 252–258, 2017
- [38] **He C. L., Zong W. J., Sun T.:** “*Origins for the size effect of surface roughness in diamond turning*”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol. 106, pp. 22–42, 2016.
- [39] **He C. L., Zong W. J., Zhang J. J.:** “*Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art*”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* vol. 129, pp. 15–26, 2018.

- [40] **Huang S., Ali A. N.:** “*Effects of heat treatment on the microstructure and microplastic deformation behavior of SiC particles reinforced AZ61 magnesium metal matrix composite*”. Materials Science and Engineering. A vol. 711, pp. 670–682, 2018
- [41] **Hung N. P., Boey F. Y. C., Khor K. A., Phua Y. S., Lee H. F.:** “*Machinability of aluminium alloys reinforced with silicon carbide particulates*”. Journal of Materials Processing Technology vol. 56, pp. 966–977, 1996
- [42] **Hou L. G., Wu R. Z., Wang X. D., Zhang J. H., Zhang M. L., Dong A. P., Sun B. D.:** “*Microstructure, mechanical properties and thermal conductivity of the short carbon fiber reinforced magnesium matrix composites*”. Journal of Alloys and Compounds vol. 695, pp. 2820–2826, 2017
- [43] **Hyla I., Śleziona J.:** „*Kompozyty, elementy mechaniki i projektowania*”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004
- [44] **Iuliano L., Settineri L., Gatto A.:** “*High-speed turning experiments on metal matrix composites*”. Composites Part A vol. 29, pp.1501–1509, 1998
- [45] **Jiang R., Chen X., Ge R., Wang W., Song G.:** “*Influence of TiB<sub>2</sub> particles on machinability and machining parameter optimization of TiB<sub>2</sub>/Al MMCs*”. Chinese Journal of Aeronautics vol.31 (1), pp. 187–196, 2018
- [46] **Kaczmar J. W., Pietrzak K., Włosiński W.:** “*The production and application of metal matrix composite materials*”. Journal of Materials Processing Technology vol. 106 (1), pp. 58–67, 2000.
- [47] **Kaku S. M. Y., Khanra A. K., Davidson M. J.:** “*Effect of deformation on properties of Al/Al-alloy ZrB<sub>2</sub> powder metallurgy composite*”, Journal of Alloys and Compounds vol. 747, pp. 666–675, 2018
- [48] **Kannan S., Kishawy H.A.:** “*Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites*”. Journal of Materials Processing Technology vol. 198(1–3), pp. 399–406, 2008.
- [49] **Karacas M. S., Acir A., Ubeyli M., Ogel B.:** “*Effect of cutting speed on toolperformance in milling of B<sub>4</sub>Cp reinforced aluminium metal matrix composites*”. Journal of Materials Processing Technology vol.178, pp.241–246, 2006

- [50] **Karthikeyan R., Ganesan G., Nagarazan R. S., Pai B. C.:** “*A critical study on machining of Al/SiC composites*”. Materials and Manufacturing Processes vol. 16 (1), pp. 47–60, 2001
- [51] **Kishawy H. A., Kannan S., Parker G.:** “*Traditional Machining Processes of MMC*” w: “Machining of metal matrix composites” pod redakcją J. Paulo Dawim, Chapter 4 , str 79- 98, Springer 2012
- [52] **Knuefermann M. M. W., McKeown P. A.:** „*A Model for Surface Roughness in Ultraprecision Hard Turning*”. CIRP Annals, Volume 53, Issue 1, pp. 99-102, 2004.
- [53] **Lane G.:** “*The effect of different reinforcement on PCDtool life for aluminum composites*” In: Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium. ASM Materials Week, Chicago, IL, pp 3–15, 1992
- [54] **Li B., Tian X., Zhang M., Lv H. L.:** “*Application of RSM in the Prediction of Cutting Force and Surface Roughness during High-Speed Milling*”. Advances in Manufacturing – Article in press.
- [55] **Li H., Cheng L., Sun X., Li Y., Li B., Liang C., Wang H., Fan J.:** “*Fabrication and properties of magnesium matrix composite reinforced by urchin-like carbon nanotube-alumina in situ composite structure*”. Journal of Alloys and Compounds vol. 746, pp. 320–327, 2018
- [56] **Li X. P., Lu L.:** “*Study of reinforcement percentage of Al-Mg-SiC MMC in relation to the mechanical properties and machinability*”. Materials Science Forum vol.437–438, pp.185–188, 2003
- [57] **Li Z., Ding W., Shen L., Xi X., Fu Y.:** “*Comparative investigation on high-speed grinding of TiCp/Ti-6Al-4V particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed CBN wheels*”. Chinese Journal of Aeronautics Vol. 29 (5), pp.1414–1424, 2016
- [58] **Liao Z., Abdelhafeez A., Li H., Yang Y., Diaz O. G., Axinte D.:** “*State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites*”. International Journal of Machine Tools and Manufacture vol. 143, pp. 63–91, 2019.

- [59] **Lin J. T., Bhattacharyya D., Lane C.:** “*Machinability of a silicon carbide reinforced aluminium metal matrix composite*”. *Wear* vol. 181-183, pp. 883-888, 1995.
- [60] **Lin S. C., Chang M. F.:** “*A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning*”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* vol. 38 pp. 763–782, 1998
- [61] **Liu C., Ding W., Yu T., Yang C.:** “*Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites*”. *Precision Engineering* vol. 51, pp. 68–77, 2018.
- [62] **Liu K., Melkote S. N.:** „*Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process*”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, pp. 1778–1785, 2006.
- [63] **Ma L., Gong Y., Chen X.:** “*Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick point grinding*”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol. 77, pp. 82–92, 2014.
- [64] **Mai Y. J., Chen F. X., Lian W. Q., Zhang L. Y., Liu C. S., Jie X. H.:** “*Preparation and tribological behavior of copper matrix composites reinforced with nickel nanoparticles anchored graphene nanosheets*”. *Journal of Alloys and Compounds* vol. 756, pp.1–7, 2018
- [65] **Manna A., Bhattacharyya B.:** “*A study on different tooling systems during machining of Al/SiC-MMC*”. *Journal of Materials Processing Technology* vol. 123(3), pp.476–482, 2003.
- [66] **Miko E.:** „*Konstituowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrabionych narzędziem o zdefiniowanej stereometrii ostrzy*”. Monografie, studia, rozprawy 46. Kielce 2004.
- [67] **Morampudi P., Venkata Ramana V. S. N., Bhavani K., Amrita M., Srinivas V.:** “*The Investigation of Machinability and Surface Properties of Aluminium Alloy Matrix Composites*”. *Journal of Engineering and Technological Sciences* Vol. 53, No. 4, 2021

- [68] **Morin E, Masounave J, Laufer E. E.:** *“Effect of drill wear on cutting forces in the drilling of metal-matrix composites”*. Wear vol.184, pp.11–16, 1995
- [69] **Muniappan A., Maridurai D., Sakthivel T.G., Thiagarajan C.:** *“Modeling and analysis of CNC milling process parameters on surface integrity of aluminum hybrid composite”*. Materials Today: Proceedings, Article in press
- [70] **Muthuchamy A., Ram G. D. J., Sarma V. S.:** *“Spark plasma consolidation of continuous fiber reinforced titanium matrix composites”*, Materials Science and Engineering: A vol. 703, pp. 461–469, 2017
- [71] **Narutaki N.:** *„Machining of MMCs”*. VDI Berichete, tom 1276, pp. 359-370, 1996.
- [72] **Norrul Haq A, Marimuthu P, Jeyapaul R.:** *“Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method”*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol 37, pp.250–255, 2008
- [73] **Nowakowski Ł., Miko E.:** *„Modele do prognozowania parametru chropowatości Ra powierzchni frezowanych”*. Mechanik 88, str. 82-90, 2015.
- [74] **Ozcelik B., Bayramoglu M.:** *“The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling”*. International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 46, pp. 1395–1402, 2006.
- [75] **Ozel T., Karpaz Y.:** *„Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks”*. International Journal of Machine Tools & Manufacture vol.45, pp. 467–479, 2005.
- [76] **Paulo D. J.:** **“Diamond tool performance in machining metal-matrix composites”**. Journal of Materials Processing Technology vol. 128, pp.100–105, 2002
- [77] **Pederson W, Ramulu M.:** *“Facing with carbide tools SiCp/Mg metal matrix composites”*. Journal of Materials Processing Technology vol. 172, pp.417–423, 2006
- [78] **Pereira A., Prado M. T., Fenollera M., Wieczorowski M., Gapiński B., Mathia T.:** *„Influence of Cutting Conditions in the Topography of Texturized*

- Surfaces on Aluminium 7075 Plates Produced by Robot Machining*". International Scientific-Technical Conference MANUFACTURING: MANUFACTURING 2019: Advances in Manufacturing II, pp 107-121, 2019.
- [79] **Pędzich Z., Grabowski G., Saferna I., Ziabka M., Gubernat A., Kot M.**: "*The influence of residual stresses in selected non-oxide ceramics composites on their wear resistance in different environments*". Composites Theory and Practice, vol 4, pp. 203-208, 2015.
- [80] **Pramanik A., Zhang L. C., Arsecularatne J. A.**: "*An FEM investigation into the behaviour of metal matrix composites: tool–particle interaction during orthogonal cutting*". International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 47, pp.1497–1506, 2007.
- [81] **Pramanik A., Zhang L.C., Arsecularatne J. A.**: "*Machining of metal matrix composites: Effect of ceramic particles on residual stress, surface roughness and chip formation*". International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 48, pp. 1613–1625, 2008.
- [82] **Rahman M. A., Woon K. S., Venkatesh V. C., Rahman M.**: "*Modelling of the combined microstructural and cutting edge effects in ultraprecision machining*". CIRP Annals - Manufacturing Technology vol. 67, pp. 129–132, 2018.
- [83] **Rai R. N., Datta G. L., Chakraborty M., Chattopadhyay A.B.**: "*A study on the machinability behaviour of Al-TiC composite prepared by in situ technique*". Materials Science and Engineering A vol. 428, pp.34–40, 2006
- [84] **Ramnath B. V., Elanchezian C., Annamalai R., Aravind S., Sri Ananda Atreya T., Vignesh V., Subramanian C.**: „Aluminium metal matrix composites- A review". Reviews on Advanced Materials Science, nr 38, pp. 55-60, 2014.
- [85] **Ryu S. H., Choi D. K., Chu C. N.**: „*Roughness and texture generation on end milled surfaces*". International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, pp. 404–412, 2006.



- [86] **Saba F., Sajjadi S. A., Haddad-Sabzevar M., Zhang F.:** “*TiC-modified carbon nanotubes, TiC nanotubes and TiC nanorods: synthesis and characterization*”. *Ceramics International* vol 44 (7), pp. 7949–7954, 2018.
- [87] **Şahinoğlu A., Rafighi M.:** “*Optimization of cutting parameters with respect to roughness for machining of hardened AISI 1040 steel*”. *Materials Testing* vol. 62, pp. 85-95, 2020.
- [88] **Santhosh U., Ahmad J., Ojard G., Miller R., Gowayed Y.:** “*Deformation and damage modeling of ceramic matrix composites under multiaxial stresses*”. *Composites Part B: Engineering*, vol 4/1,90, pp. 97-106, 2016.
- [89] **Seeman M., Ganesan G., Karthikeyan R., Velayudham A.:** „*Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach*”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 48(5), pp. 613-624, 2010.
- [90] **Seguy S., Dessein G., Arnaud L.:** “*Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactions*”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol. 48, pp. 261–274, 2008.
- [91] **Shirvanimoghaddam K., Hamim S. U., Karbalaei Akbari M., Fakhrhoseini S. M., Khayyam H., Pakseresht A. H., Ghasali E., Zabet M., Munir K. S., Jia S., Davim J. P., Naebe M.:** “*Carbon fiber reinforced metal matrix composites: fabrication processes and properties*”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* vol. 92, pp.70–96, 2017.
- [92] **Singh A., Agrawal A.:** “*Investigation of surface residual stress distribution in deformation machining process for aluminum alloy*”. *Journal of Materials Processing Technology* vol.225, pp. 195–202, 2015.
- [93] **Sobczak J.J.,** „*Odlewane metalowe materiały kompozytowe*”, *Materiały Konferencji Naukowej „Nowoczesne tendencje w odlewnictwie w zakresie tworzyw i technologii*”, Kraków 13-14 czerwca 2013, Instytut Odlewnictwa, 2013
- [94] **Sobczak J., Wojciechowski S.:** „*Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych*”. *KOMPOZYTY (COMPOSITES)*, nr 2/3, str. 24-37, 2002.

- [95] **Twardowski P.:** „Wybrane aspekty frezowania w warunkach HSM zahartowanych stali”. Rozprawy Nr 479, WPP, Poznań 2012
- [96] **Xiaoping L., Seah W. K. H.:** “Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites”. *Wear* vol. 247, pp.161–171, 2001
- [97] **Xu F., Fang F., Zhang X.:** “Effects of recovery and side flow on surface generation in nano-cutting of single crystal silicon”. *Computational Materials Science* vol. 143, pp. 133–142, 2018.
- [98] **Whitehouse D.J.:** “*Handbook of Surface Metrology*”. Institute of Physics, Bristol, Philadelphia, 1994.
- [99] **Wieczorowski M.:** „Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni”. *Inżynieria Maszyn*, R. 18, z. 3, str. 7-34, 2013.
- [100] **Zhang L. C., Arsecularantne J. A., Pramanik A.:** „Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, tom 46, pp. 1795-1803, 2006.
- [101] **Zhang S. J., To S., Wang S. J., Zhu Z. W.:** „A review of surface roughness generation in ultra-precision machining”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 91, pp. 76–95, 2015.
- [102] **Znojkiwicz N., Twardowski P., Czyżycki J., Madajski M.:** “Surface roughness analysis after milling aluminum-ceramic composite”. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Industrial Measurements in Machining* vol. 145, pp. 45-54, 2020
- [103] **Zong W. J., Huang Y. H., Zhang Y. L., Sun T.:** “Conservation law of surface roughness in single point diamond turning”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 84, pp. 58–63, 2014.

## 8.1 Spis tabel

Tab. 2.1. Wpływ różnych czynników na chropowatość powierzchni obrabianej.....	34
Tab. 2.2. Zestawienie najczęściej stosowanych modeli chropowatości [39].....	39
Tab. 3.1. Parametry zastosowanych w badaniach frezów .....	49
Tab. 3.2. Skład chemiczny kompozytu aluminiowo- ceramicznego F3S.10S firmy Duralcan .....	51
Tab. 3.3. Wytrzymałość na rozciąganie i twardość podane przez producenta .....	51
Tab. 4.1. Parametry dla frezu z powłoką diamentową, KENNAMETAL.....	57
Tab. 4.2. Parametry dla frezu z węglika, FRAISA .....	58
Tab. 4.3. Otrzymane wyniki dla frezu z węglika spiekanego z powłoką diamentową .....	59
Tab. 4.4. Otrzymane wyniki dla frezu z węglika spiekanego z powłoką ceramiczną.....	60
Tab. 4.5. Porównanie wydajności frezowania przy zachowaniu porównywalnej wartości parametru Rz .....	62
Tab. 4.6. Parametry frezowania na mokro dla frezu z węglika spiekanego z powłoką TiCN.....	63
Tab. 4.7 Parametry frezowania na mokro dla dwóch serii CVD i CBN.....	64
Tab. 4.8. Parametry frezowania dla frezu węglkowego z powłoką TiCN (na mokro) .....	71
Tab. 4.9. Parametry frezowania dla frezów z powłoką diamentową CVD i CBN (na mokro) .....	71
Tab. 5.1. Parametry frezowania dla frezu z węglika spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN.....	81
Tab. 5.2. Parametry frezowania dla frezu z azotku boru CBN.....	81
Tab. 5.3. Parametry frezowania dla frezu z węglika spiekanego z powłoką diamentową CVD.....	82

Tab. 5.4. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką TiCN .....	83
Tab. 5.5. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z regularnego azotku boru CBN.....	84
Tab. 5.6. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z powłoką diamentową CVD.....	84
Tab. 5.7. Wykresy 3D dla różnych wartości posuwu przy stałym $v_c=250\text{m/min}$ dla frezu z węgliku spiekanego.....	85
Tab. 5.8. Wykresy 3D dla różnych wartości posuwu na obrót przy stałym $v_c=500\text{m/min}$ dla frezu z regularnego azotku boru.....	86
Tab. 5.9. Wykresy 3D dla różnych wartości posuwu na obrót przy stałym $v_c=500\text{m/min}$ dla frezu z powłoką diamentową CVD .....	87
Tab. 5.10. Parametry frezowania dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką ceramiczną TiCN dla stałej wartości posuwu $f$ .....	89
Tab. 5.11. Parametry frezowania dla frezu z azotku boru CBN oraz frezu z węgliku spiekanego z powłoką diamentową CVD dla stałej wartości posuwu $f$ .....	89
Tab. 5.12. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z węgliku spiekanego z powłoką TiCN .....	90
Tab. 5.13. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z regularnego azotku boru.....	91
Tab. 5.14. Wyniki uzyskane z topografii powierzchni dla frezu z powłoką diamentową .....	91
Tab. 5.15. Wykresy 3D dla różnych wartości prędkości skrawania przy stałym $f_z=0,1\text{ mm/obr}$ dla frezu z węgliku spiekanego .....	92
Tab. 5.16. Wykresy 3D dla różnych wartości prędkości skrawania przy stałym $f_z=0,1\text{ mm/obr}$ dla frezu z azotku boru CBN.....	93
Tab. 5.17. Wykresy 3D dla różnych wartości prędkości skrawania przy stałym $f_z=0,1\text{ mm/obr}$ dla frezu z powłoką diamentową CVD .....	94

Tab. 5.18. Parametry frezowania współbieżnego dla zmiennych posuwów i prędkości skrawania.....	99
Tab. 5.19. Wyniki przeprowadzonych badań .....	99
Tab. 5.20. Wyniki symulacji w porównaniu z wartościami rzeczywistymi .....	110
Tab. 5.21. Wyniki dla stałego posuwu $f$ .....	114
Tab. 5.22. Wyniki dla stałej prędkości $v_c$ .....	115

## 8.2 Spis rysunków

Rys. 2.1 Podział materiałów kompozytowych [25].....	14
Rys. 2.2. Udział procentowy procesów wytwórczych stosowanych przez producentów kompozytów metalowych [93].....	16
Rys. 2.3. Typowe typy osnów, kategorie zbrojenia i kluczowe właściwości, a także powszechne zastosowania MMC na bazie Al, Mg, Ti i Co [58].....	17
Rys. 2.4. Wysięgnik anteny teleskopu Hubble’a wykonany z kompozytu o osnowie stopu Al6061 zbrojonego włóknami grafitu .....	18
Rys. 2.5. Charakterystyka materiałów składowych związana ze skrawalnością MMC [24].....	21
Rys. 2.6. Siły skrawania i nacisku dla różnych materiałów kompozytowych i stopów [83].....	23
Rys. 2.7. Wpływ różnej ilości udziału objętościowego wiskerów SiC na profile chropowatości: (a) 15% i (b) 20%. [15].....	24
Rys. 2.8. Różnice w amplitudach sił skrawania między strefą zmodyfikowaną laserowo i pierwotną strefą w kierunkach 11- i 22-. Kierunek 11 jest zgodny z kierunkiem posuwu obrabiarki, a kierunek 22 jest prostopadły do kierunku posuwu. [58].....	26
Rys. 2.9. Wpływ posuwu na siłę skrawania przy różnych prędkościach [67].....	28
Rys. 2.10. Wykresy chropowatości powierzchni dla $a_p = 25$ mm przy różnych prędkościach skrawania [67] .....	28
Rys. 2.11. Wpływ prędkości posuwu na chropowatość powierzchni przy $a_p = 0,25$ mm. [67] .....	29
Rys. 2.12. Wpływ a) posuwu (przy prędkości 400 m/min) i b) prędkości (przy posuwie 0,1 mm/obr) na naprężenia szczątkowe w kierunku wzdłużnym [81] .....	30
Rys. 2.13. Czynniki wpływające na chropowatość powierzchni obrabianej (opracowano na podstawie [95]).....	33
Rys. 2.14. Odwzorowanie kinematyczno-geometryczne ostrza w materiale obrabianym dla toczenia a) i dla frezowania b).....	35

Rys. 2.15. Wpływ posuwu na chropowatość dla stopu MMC i dla stopu niewzmocnionego przy stałej prędkości skrawania $v_c = 400$ m/min i $a_p = 1$ mm .....	40
Rys. 2.16. Obrobiona powierzchni MMC przy różnych posuwach.....	40
Rys. 2.17. Obrobiona powierzchni stopu niewzmocnionego przy różnych posuwach.....	40
Rys. 2.18. Wpływ prędkości skrawania $v_c$ na chropowatość dla stopu MMC i dla stopu niewzmocnionego przy stałym posuwie $f = 0,1$ mm/obr i $a_p = 1$ mm.....	41
Rys. 2.19. Obrobiona powierzchni MMC przy różnych prędkościach skrawania .....	41
Rys. 2.20. Obrobiona powierzchni stopu niewzmocnionego przy różnych prędkościach skrawania.....	41
Rys. 2.21. Wartości modelowe i doświadczalne dla modelu opisanego równaniem 11 .....	43
Rys. 2.22. Powierzchnie odpowiedzi dla modelu z równania 12 .....	44
Rys. 2.23. Sieci neuronowe wykorzystywane do uczenia i przewidywania chropowatości powierzchni i zużycia narzędzi [75].....	44
Rys. 2.24. Wpływ ugięcia narzędzia na generowanie powierzchni obrobionej [85].....	45
Rys. 2.25. Wpływ ugięcia frezu na chropowatość powierzchni obrobionej.....	46
Rys. 3.1. Centrum obróbkowe firmy DECKEL MAHO model DMC 70V hi-dyn.....	50
Rys. 3.2. Frezy walcowo-czołowe zastosowane w badaniach a) PCD, b) CVD, c) CBN, d) WC .....	50
Rys. 3.3. Wymiary próbki kompozytu aluminiowo-ceramicznego firmy DURALCAN.....	51
Rys. 3.4. Miejsca pobrania próbek nr z dostarczonych fragmentów odlewów nr BB .903.0448-07419.001 (a) i BB .903.0448-07419.002 (b).....	52
Rys. 3.5 Mikrostruktura próbki nr BB .903.0448-07419.001.001 pobranej z fragmentu odlewu nr BB .903.0448-07419.001. LM: a – obszar 1 z okolicy środka próbki, b – powiększony fragment obszaru 1 .....	53

Rys. 3.6 Mikrostruktura próbki nr BB .903.0448-07419.002.001 pobranej z fragmentu odlewu nr BB .903.0448-07419.002. LM: a – obszar 1 z okolicy środka próbki, b – powiększony fragment obszaru 1 .....	53
Rys. 3.7. Profilografometr W5 firmy Hommelwerke .....	55
Rys. 3.8. Profilografometr firmy Hommelwerke T500 wraz z oprogramowaniem Turbo DataWin-NT 1.34 .....	55
Rys. 3.9. Stanowisko do pomiarów chropowatości powierzchni .....	56
Rys. 4.1. Frez pełnowęglkowy z pokryciem diamentowym $d=10$ mm, $z=6$ , firmy KENNAMETAL .....	57
Rys. 4.2. Frez pełnowęglkowy WC $d=16$ mm, $z=4$ , firmy FRAISA .....	57
Rys. 4.3. Parametr Rz dla frezu z węglkowego z powłoką diamentową .....	60
Rys. 4.4. Parametr Rz dla frezu węglkowego z powłoką ceramiczną .....	60
Rys. 4.5. Wykres Pareto efektów standaryzowanych dla Rz: .....	61
Rys. 4.6. Wykres powierzchniowy $Rz = f(v_c, f)$ : a) frez węglkowy z powłoką diamentową, b) frez węglkowy z powłoką ceramiczną .....	61
Rys. 4.7. Zastosowane frezy .....	63
Rys. 4.8. Wykres rozrzutu parametru $R_a$ dla WC przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	64
Rys. 4.9. Wykres rozrzutu parametru Rz dla WC przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	65
Rys. 4.10. Wykres rozrzutu parametru $R_t$ dla WC przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	65
Rys. 4.11. Wykres rozrzutu parametru $R_a$ dla CBN przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	66
Rys. 4.12. Wykres rozrzutu parametru Rz dla CBN przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	66
Rys. 4.13. Wykres rozrzutu parametru $R_t$ dla CBN przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	67



Rys. 4.14. Wykres rozrzutu parametru $R_a$ dla CVD przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	67
Rys. 4.15. Wykres rozrzutu parametru $R_z$ dla CVD przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	68
Rys. 4.16. Wykres rozrzutu parametru $R_t$ dla CVD przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	68
Rys. 4.17. Porównanie parametru $R_z$ dla badanych frezów przy stałej prędkości obrotowej $n$ .....	69
Rys. 4.18. Wykres rozrzutu parametru $R_a$ dla frezu z węglika spiekanego przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	72
Rys. 4.19. Wykres rozrzutu parametru $R_z$ dla frezu z węglika spiekanego przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	72
Rys. 4.20. Wykres rozrzutu parametru $R_t$ dla frezu z węglika spiekanego przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	73
Rys. 4.21. Wykres rozrzutu parametru $R_a$ dla frezu z CBN przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	74
Rys. 4.22. Wykres rozrzutu parametru $R_z$ dla frezu z CBN przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	74
Rys. 4.23. Wykres rozrzutu parametru $R_t$ dla frezu z CBN przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	75
Rys. 4.24. Wykres rozrzutu parametru $R_a$ dla frezu z CVD przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	76
Rys. 4.25. Wykres rozrzutu parametru $R_z$ dla frezu z CVD przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	76
Rys. 4.26. Wykres rozrzutu parametru $R_t$ dla frezu z CVD przy stałej wartości posuwu na obrót $f$ .....	77
Rys. 4.27. Wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrz podczas frezowania kompozytu MMC ostrzami węglowymi z powłoką diamentową .....	77
Rys. 4.28. Porównanie parametru $R_z$ dla badanych frezów przy stałym posuwie $f$ .....	78

Rys. 5.1. Schemat frezowania obwodowego .....	82
Rys. 5.2. Wykres 3D chropowatości powierzchni po frezowaniu z różnym posuwem dla frezu CBN.....	83
Rys. 5.3. Porównanie parametru Sz w funkcji posuwu f dla badanych frezów przy stałej prędkości obrotowej n .....	88
Rys. 5.4. Wykres 3D chropowatości powierzchni po frezowaniu z różnymi prędkościami skrawania $v_c$ .....	90
Rys. 5.5. Zmienność parametru Sz w funkcji prędkości skrawania dla frezu z powłoką ceramiczną przy stałym posuwie $f = 0,1$ mm/obr .....	95
Rys. 5.6. Porównanie parametru Sz w funkcji prędkości skrawania dla frezów CBN i CVD przy stałym posuwie $f = 0,1$ mm/obr .....	96
Rys. 5.7. Zmienność parametru Sa w funkcji prędkości skrawania dla frezu z powłoką ceramiczną przy stałym posuwie $f = 0,1$ mm/obr .....	97
Rys. 5.8. Porównanie parametru Sa w funkcji prędkości skrawania dla frezów CBN i CVD przy stałym posuwie $f = 0,1$ mm/obr .....	97
Rys. 5.9. Zastosowany frez diamentowy ( $z=2$ , kąt $\lambda_s = 0^0$ , kąt $\gamma_f = 0^0$ ).....	98
Rys. 5.10. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 4 ( $v_c=100$ m/min, $f=0,2$ mm/obr) .....	103
Rys. 5.11. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 8 ( $v_c=300$ m/min, $f=0,2$ mm/obr) .....	103
Rys. 5.12. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 12 ( $v_c=700$ m/min, $f=0,2$ mm/obr) .....	104
Rys. 5.13. Wykres widmowej gęstości mocy dla próbki 16 ( $v_c=900$ m/min, $f=0,2$ mm/obr) .....	104
Rys. 5.14. Wpływ posuwu i prędkości skrawania na wartość Sa .....	105
Rys. 5.15. Wpływ posuwu i prędkości skrawania na St dla II etapu.....	105
Rys. 5.16. Wpływ posuwu i prędkości skrawania na Sz dla II etapu .....	106

Rys. 5.17. Parametr chropowości Sz w funkcji prędkości skrawania $v_c$ dla czterech różnych wartości posuwu $f$ .....	106
Rys. 5.18. Weryfikacja modelu kinematyczno-geometrycznego zawierająca wartości posuwu na obrót $f$ i posuwu na ostrze $f_z$ .....	108
Rys. 5.19. Porównanie modelu kinematyczno-geometrycznego z modelem Brammertz'a .....	108
Rys. 5.20. Zastosowany frez do badań weryfikacyjnych .....	109
Rys. 5.21. Wpływ posuw i prędkości skrawania na parametr Rz (wyniki doświadczalne).....	111
Rys. 5.22. Wpływ posuw i prędkości skrawania na parametr Rz (wyniki modelowe).....	111
Rys. 5.23. Interpretacja graficzna uzyskanych wyników .....	112
Rys. 5.24. Porównanie wydajności procesu dla dwóch różnych zakresów frezowania .....	113
Rys. 5.25. Interpretacja graficzna uzyskanego błędu średniokwadratowego dla stałego posuwu $f = 0,05$ mm/obr .....	114
Rys. 5.26. Interpretacja graficzna uzyskanego błędu średniokwadratowego dla stałej prędkości skrawania $v_c = 500$ m/min.....	115
Rys. 5.27. Porównanie analizowanych modeli chropowości.....	116
Rys. 5.28. Porównanie analizowanych modeli chropowości.....	116