

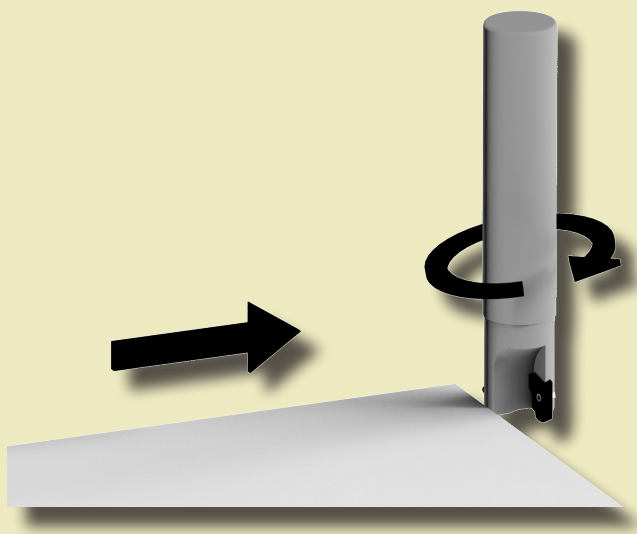


Krzysztof Ciecieląg

Kazimierz Zaleski

Krzysztof Kęcik

Struktura geometryczna powierzchni po obróbce frezowaniem kompozytów polimerowych



MONOGRAFIE

Struktura geometryczna powierzchni
po obróbce frezowaniem kompozytów
polimerowych

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Krzysztof Ciecieląg
Kazimierz Zaleski
Krzysztof Kęcik

Struktura geometryczna powierzchni po obróbce frezowaniem kompozytów polimerowych



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2020

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Joanna Iwaniec, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Redakcja i skład: Krzysztof Ciecieląg

Badania zostały sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-430-1

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1
www.djaf.pl

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

Nakład: 50 egz.

SPIS TREŚCI

Streszczenie	7
Abstract	8
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	9
WPROWADZENIE	11
1. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	13
1.1. Charakterystyka kompozytów polimerowych.....	13
1.1.1. Budowa i charakterystyka kompozytów polimerowych.....	15
1.1.2. Podstawowe sposoby wytwarzania kompozytów polimerowych...	23
1.2. Charakterystyka obróbki skrawaniem kompozytów polimerowych	24
1.2.1. Obróbka frezowaniem kompozytów polimerowych.....	27
1.2.2. Obróbka wierceniem kompozytów polimerowych	30
1.2.3. Obróbka toczeniem kompozytów polimerowych	31
1.3. Charakterystyka wad materiałowych.....	32
1.4. Metoda wykresów i wskaźników rekurencyjnych.....	34
1.4.1. Definicja diagramu rekurencyjnego	34
1.4.2. Metodyka tworzenia diagramu rekurencyjnego	35
1.4.3. Struktury wykresów rekurencyjnych	37
1.4.4. Wskaźniki rekurencyjne	38
1.4.5. Zastosowanie metody wykresów i wskaźników rekurencyjnych ..	43
2. PROGRAM I METODYKA BADAŃ	45
2.1. Obiekt i zakres badań	45
2.2. Metodyka badań.....	47
2.2.1. Materiały i narzędzia stosowane w badaniach	47
2.2.2. Warunki technologiczne frezowania kompozytów polimerowych i pomiary wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania.....	47
2.2.3. Badania chropowatości i falistości powierzchni po frezowaniu	49
2.2.4. Badania wad powierzchniowych.....	50

2.2.5. Metodyka badań możliwości wykrywania wad w procesie frezowania kompozytów.....	53
2.2.6. Analiza statystyczna wyników badań	56
3. WPLYW PARAMETRÓW FREZOWANIA NA STRUKTURĘ GEOMETRYCZNĄ POWIERZCHNI	58
3.1. Badania wstępne.....	58
3.2. Chropowatość i falistość powierzchni kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi przesyconych żywicą epoksydową.....	61
3.3. Obserwacje mikroskopowe wad powierzchniowych po obróbce frezowaniem	87
3.3.1. Wpływ obróbki skrawaniem na powstawanie wad powierzchniowych w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi.....	87
3.3.2. Wpływ obróbki skrawaniem na powstawanie wad powierzchniowych w kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi	89
4. BADANIA WAD KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH ZA POMOCĄ WYKRESÓW I WSKAŹNIKÓW REKURENCYJNYCH.....	108
4.1. Wpływ średnicy wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi.....	108
4.2. Wpływ średnicy wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi.....	118
4.3. Wpływ głębokości wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi.....	128
4.4. Wpływ głębokości wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi.....	138
4.5. Wykrywanie wad produkcyjnych w kompozytach z włóknami szklanymi i węglowymi.....	149
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	157
Literatura	160

Streszczenie

WPLYW WARUNKÓW FREZOWANIA NA STRUKTURĘ GEOMETRYCZNĄ POWIERZCHNI WYBRANYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

W monografii przedstawiono wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami szklanymi oraz włóknami węglowymi po obróbce frezowaniem.

Na wstępie scharakteryzowano proces powstawania kompozytów polimerowych i tematykę obróbki skrawaniem. Wyjaśniono zagadnienia związane ze strukturą geometryczną powierzchni.

W rozdziale dotyczącym analizy stanu zagadnienia omówiono kompozyty polimerowe i metody obróbki. Scharakteryzowano również wykresy rekurencyjne oraz opisano wskaźniki rekurencyjne zastosowane do analizy składowej posuwowej całkowitej siły skrawania po frezowaniu. Przedstawiono literaturę krajową i zagraniczną dotyczącą obróbki kompozytów polimerowych i metod rekurencyjnych.

W części praktycznej przedstawiono wyniki badań parametrów chropowatości i falistości powierzchni. Powierzchnię po obróbce frezowaniem poddano obserwacjom pod mikroskopem w celu wykrycia wad i określenia struktury geometrycznej powierzchni. Na podstawie pomiarów wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania dokonano analizy powierzchni za pomocą wykresów i wskaźników rekurencyjnych. W celu określenia minimalnych wielkości wad możliwych do wykrycia oraz z uwagi na małe rozmiary wad produkcyjnych przeprowadzono badania możliwości wykrycia sztucznych wad o różnej średnicy i głębokości za pomocą metod rekurencyjnych. Badania przeprowadzono dla różnych parametrów obróbki frezowaniem.

W ostatniej części monografii sformułowano rezultaty poznawcze i praktyczne.

Abstract

THE INFLUENCE OF MILLING CONDITIONS ON THE GEOMETRIC STRUCTURE OF THE SURFACE OF THE SELECTED POLYMER COMPOSITES

This paper presents the results of a study of the geometric structure of the surface of glass fiber reinforced plastic and carbon fiber reinforced plastic after milling.

At the beginning, the process of polymer composites formation and the subject of machining were characterized. Issues related to the geometric structure of the surface have been explained.

In the chapter concerning the analysis of the state of the issue, polymer composites and methods of machining have been discussed. Recurrence plots have also been characterized and recurrence quantifications for the analysis of component (feed force) of the total cutting force milling have been described. Domestic and foreign literature related to the machining of polymer composites and recurrence methods has been presented.

The practical part presents the results of a study on roughness and waviness parameters of surface. The surface after milling was observed under the microscope in order to detect the defects and determine the geometric structure of the surface. On the basis of the values of component (feed force) of the total cutting force measurements, the analysis of the surface was made using plots and recurrence quantifications. In order to determine the minimum size of the defect that can be detected and due to the small size of production defects, research on the possibility of detecting artificial defects of various diameters and depths by means of recurrence methods was conducted. The research was conducted for various parameters of milling.

In the last part of the paper, cognitive and practical results have been formulated.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

AFRP	– kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami organicznymi,
a_p	– głębokość skrawania,
CFRP	– kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami węglowymi,
d	– wymiar opóźnienia,
ε	– parametr odcięcia,
f_z	– posuw na ostrze,
FRP	– kompozyty polimerowe,
GFRP	– kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami szklanymi,
H	– funkcja skokowa Heaviside’a,
$H_v(v)$	– rozkład linii pionowych,
i, j	– numer stanu w zadanej przestrzeni,
m	– wymiar zanurzenia,
N	– liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
d_0	– średnica wykonanej wady sztucznej,
$p(l)$	– prawdopodobieństwo rozkładu długości linii diagonalnych,
$P(l)$	– histogram długości linii przekątnych,
$P(v)$	– histogram długości linii pionowych,
PCD	– narzędzie z płytkami z pokryciem diamentowym,
R_a	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
R_{ku}	– współczynnik nachylenia profilu chropowatości,
R_{sk}	– współczynnik asymetrii profilu chropowatości,
RP	– wykres rekurencyjny,
RQA	– kwantyfikatory rekurencyjne,
R_z	– największa wysokość profilu chropowatości,
S_a	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości,
S_p	– maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni,
S_v	– maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni,
S_z	– dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni,
S_x^2	– wariancja analizowanej zmiennej na podstawie wyników pomiarów próby wstępnej,
v_c	– prędkość skrawania,
v_f	– prędkość posuwu,
W_a	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu falistości,
W_{ku}	– współczynnik nachylenia profilu falistości,

Wsk – współczynnik asymetrii profilu falistości,
 Wz – największa wysokość profilu falistości,
 $\mathbf{x}$ – zrekonstruowany wektor w przestrzeni fazowej,
 $\mathbf{x}_i$ – i -ty wektor w przestrzeni fazowej,
 $\mathbf{x}_j$ – j -ty wektor w przestrzeni fazowej,
 $\|\mathbf{x}\|$ – norma (najczęściej euklidesowa lub normalna) wektora $\mathbf{x}$ w zrekonstruowanej przestrzeni fazowej.

Wskaźniki rekurencyjne:

CC – clustering coefficient,
 DET – determinism,
 ENTR – entropia,
 L – średnia długość przekątnej,
 L_{max} – najdłuższa długość linii przekątnej,
 LAM – laminarność,
 RPDE – znormalizowana entropia rozkładu rekurencji,
 RR – współczynnik rekurencji,
 T1 – czas rekurencji 1,
 T2 – czas rekurencji 2,
 TT – średnia długość linii pionowych,
 TRANS – transitivity,
 V_{max} – najdłuższa długość linii pionowej.

WPROWADZENIE

Materiały konstrukcyjne w postaci kompozytów polimerowych używane są przez człowieka od wieków. Od kilku tysięcy lat p.n.e. człowiek wykorzystywał kompozyty w postaci drewna. W obecnych czasach świadome wykorzystanie kompozytów jest coraz bardziej powszechne ze względu na zmieniające się warunki i wymagania przemysłu.

Początkowa faza wytwarzania kompozytu polimerowego to uformowanie kształtu części lub półfabrykatu z elementów wchodzących w skład zadanego rodzaju kompozytu polimerowego przy użyciu form i matryc z uwzględnieniem naddatków obróbkowych. Powstała wstępnie część lub element wyprodukowany w zależności od potrzeb rynku wymaga dalszego przetworzenia. Proces kształtowania części maszyn z kompozytów polimerowych wiąże się niejednokrotnie z potrzebami przeprowadzenia obróbki skrawaniem, najczęściej frezowania, toczenia i wiercenia. Obróbka frezowaniem jest konieczna z uwagi na wiele czynników. Jednym z czynników narzucającym potrzebę obróbki frezowaniem jest wymagana chropowatość. Chropowatość ma wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, dokładność pasowania i właściwości estetyczne. Parametry chropowatości określają jakość otrzymanej powierzchni. Obróbka kompozytów powinna powodować jak najmniej wad powierzchniowych, a przede wszystkim nie pogarszać właściwości wytrzymałościowych materiału.

W monografii przedstawiono badania doświadczalne opierające się na pomiarach składowych całkowitej siły skrawania podczas obróbki frezowaniem ze zmiennymi parametrami technologicznymi, takimi jak posuw na ostrze, prędkość skrawania i głębokość skrawania. Wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania posłużyły do wyznaczenia wykresów i wskaźników rekurencyjnych. Po obróbce frezowaniem wykonywane były pomiary parametrów chropowatości i falistości oraz obserwacje mikroskopowe struktury powierzchni powstałej po obróbce.

Pierwszy rozdział obejmuje charakterystykę kompozytów polimerowych oraz analizę literatury. Charakterystykę kompozytów polimerowych rozpoczęto od przedstawienia ich budowy. Scharakteryzowano obróbkę frezowaniem kompozytów polimerowych oraz uzasadniono konieczność jej stosowania. Opisano zakresy stosowanych parametrów oraz uzyskiwaną jakość powierzchni. Dodatkowo wprowadzono podział wad powierzchniowych kompozytów polimerowych w zależności od miejsca występowania (w osnowie lub we wzmocnieniu). Wyjaśniono również zagadnienia związane z metodami wykresów i wskaźników rekurencyjnych. Scharakteryzowano wskaźniki rekurencyjne i przedstawiono je za pomocą wzorów matematycznych. W rozdziale opisano zastosowania metod rekurencyjnych w różnych dziedzinach działalności człowieka.

Rozdział drugi przedstawia metodykę badań, charakteryzuje rodzaje użytych materiałów, narzędzi i opisuje sposób przeprowadzenia badań.

Rozdział trzeci przedstawia badania wstępne przeprowadzone na kompozytach polimerowych oraz wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni. Przeprowadzono pomiary chropowatości i falistości powierzchni po frezowaniu, a wady wykrywano stosując obserwację powierzchni pod mikroskopem. Przeprowadzono również analizę statystyczną wyników pomiarów.

W rozdziale czwartym przeprowadzono analizę wykrywania wad za pomocą metod rekurencyjnych na podstawie zarejestrowanych składowych posuwowych całkowitej siły skrawania podczas obróbki. Badania pozwoliły określić wielkość i głębokość wad możliwych do wykrycia.

Rozdział piąty zawiera rezultaty poznawcze i praktyczne.

1. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

1.1. Charakterystyka kompozytów polimerowych

Wyjaśnienie określenia materiałów nazwanych mianem kompozyt polimerowy należy rozpocząć od momentu, gdy człowiek starał się ulepszać otaczający go świat. Już w starożytnym Egipcie [78] wytwarzano i używano cegły gliniane wzmocnione ciętą słomą, które były jednymi z pierwszych znanych kompozytów. Naturalnym przykładem kompozytu polimerowego jest drewno, które składa się z miazgi drzewnej, stanowiącej osnowę polimerową, i podłużnie zorientowanych włókien, tworzących wzmocnienie. To właśnie przyroda była dla człowieka inspiracją do tworzenia nowych materiałów i wprowadzania usprawnień.

Definicję materiałów kompozytowych podaje Encyklopedia Powszechna PWN [25]:

Kompozyt jest to materiał składający się z co najmniej dwóch komponentów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma właściwości lepsze i (lub) właściwości nowe (dodatkowe) w stosunku do komponentów użytych osobno lub wynikających z prostego sumowania tych właściwości. Kompozyt jest materiałem zewnętrznym monolitycznym, jednakże z widocznymi granicami między komponentami.

Większość obecnych kompozytów (wyłączając kompozyty naturalne) jest wytworzona i udoskonalana przez człowieka.

Materiały kompozytowe stanowią zróżnicowaną grupę materiałów inżynierskich i są używane na świecie, coraz szerzej wypierając niejednokrotnie bardzo rozpowszechnioną stal i stopy aluminium. Wiąże się to z ich specyficznymi, bardzo dobrymi właściwościami. Gęstość kompozytu (ok. $1,2\div 2,5 \text{ g/cm}^3$) jest około 3÷5 razy mniejsza od stali i porównywalna lub niższa od gęstości stopów aluminium. Wytrzymałość kompozytu utworzonego z bardzo wytrzymałych włókien i osnowy jest kilkukrotnie większa od wytrzymałości stali konstrukcyjnej niestopowej ogólnego przeznaczenia. Poza niewielką gęstością i dużą wytrzymałością kompozyty posiadają zdolność do tłumienia drgań, dużą odporność na korozję, odporność na „zmęczenie materiałowe”, łatwość formowania dowolnego kształtu, jak również dobre właściwości elektroizolacyjne [95, 125, 162].

Długotrwałe użytkowanie kompozytów w wysokiej temperaturze jest dla kompozytów niekorzystne. Górna orientacyjna temperatura pracy ciągłej kompozytów, w zależności od osnowy, która jest czynnikiem determinującym właściwości cieplne kompozytu, wynosi 400°C dla osnowy polimerowej, 580°C dla osnowy metalicznej i 1000°C dla osnowy ceramicznej [8].

Właściwości kompozytu uzyskane po wytworzeniu go ze wzmocnienia, osnowy i środków dodatkowych nie są sumą, ani wartością średnią właściwości

pojedynczych jego składników. Parametry danego kompozytu zależą zarówno od właściwości osnowy i wzmocnienia, ale i od względnej zawartości włókien V_w i osnowy V_o liczonych jako frakcje objętościowe ($V_o + V_w = 100\%$) [100]. W tabeli 1.1 przedstawiono parametry wybranych materiałów konstrukcyjnych.

Tabela 1.1. Zestawienie właściwości wybranych materiałów konstrukcyjnych [31]

Rodzaj materiału	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Moduł Younga [GPa]
Stal S355J2G3	7,86	490	200÷220
Żeliwo szare EN-GJL-200	6,8÷7,25	205	80÷140
Stop aluminium 2017A	2,7÷2,8	350÷390	69
Stop tytanu Ti6Al4V	4,54	900	105÷120
Mosiądz CuZn38Pb2	8,4÷8,7	250	103÷124
Brąz CuSn10Zn2	8,8÷8,9	240	103÷124
Kompozyt wzmocniany włóknami szklanymi	1,8	2000	55
Kompozyt wzmocniany włóknami węglowymi	1,8÷2,5	2300	145
Kompozyt wzmocniany włóknami organicznymi	1,2÷1,4	2000	80

Duży stosunek wytrzymałości do masy właściwej sprawia, że są to materiały stosowane w lotnictwie, astronautyce [10, 162], motoryzacji [95], przemyśle okrętowym i budownictwie [42]. W początkowym okresie rozpowszechniania materiałów kompozytowych to właśnie potrzeby przemysłu kosmicznego, obronnego i lotniczego, w których głównym czynnikiem są właściwości, a nie koszt materiału, były napędem do ich rozwoju. Dzięki odporności na czynniki zewnętrzne kompozyty polimerowe stosowane są w medycynie. Kompozyty używane są również do naprawy i zabezpieczeń powierzchni przed działaniem stałych, ciekłych lub lotnych substancji chemicznych. Mogą być również używane do naprawy uszkodzonych elementów stalowych [133]. W zależności od zastosowanego kompozytu naprawiane mogą być wszelkiego rodzaju urządzenia i części maszyn, jak pompy, zawory, wymienniki ciepła, rolki, przekładnie, zbiorniki, rury i łopatkę wentylatorów. Z uwagi na bardzo dobre właściwości kompozytów naprawione urządzenia i elementy maszyn charakteryzują się często lepszymi parametrami niż wykonane tylko z metalu. Dzięki temu bardziej korzystna jest naprawa kompozytami niż wymiana części lub nawet całego urządzenia na nowe. Kompozyt stanowi bardzo dobre zabezpieczenie powierzchni przed ścieraniem się w transporcie cieczy i materiałów sypkich, wpływa na zwiększenie trwałości elementu, zabezpieczenie powierzchni przed słoną wodą powodującą erozję i korozję,

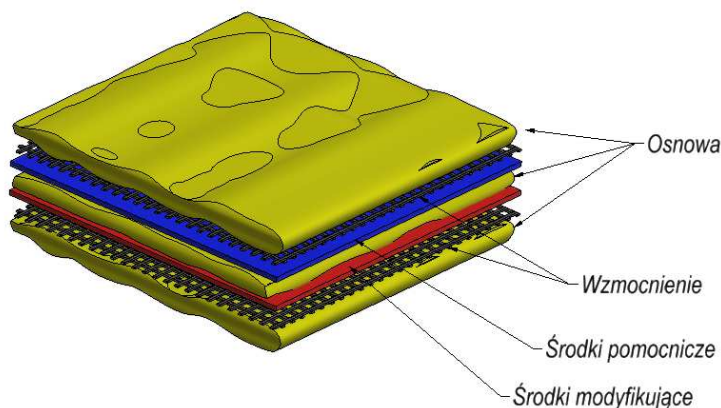
zmniejszenie zjawiska przyklejania się zanieczyszczeń do różnego rodzaju elementów.

Kompozyty można podzielić na trzy podstawowe grupy: polimerowe, metalowe i ceramiczne, spośród których kompozyty polimerowe są najbardziej rozpowszechnione. Obróbka kompozytów polimerowych bazowała początkowo na konwencjonalnych technikach obróbki ze względu na koszty. Następnie nastąpiły znaczne postępy w zakresie doboru parametrów i narzędzi. Wraz z rozwojem nowych i bardziej wymagających kompozytów z osnową metaliczną i ceramiczną, konwencjonalne procesy produkcyjne okazały się niewystarczające i nieodpowiednie. W związku z tym powstały inne alternatywne techniki obróbki, takie jak obróbka laserowa, obróbka wysokociśnieniowym strumieniem wody, obróbka elektroerozyjna, obróbka ultradźwiękowa i elektrochemiczna [75].

Postępy w procesach obróbki skrawaniem kompozytów dają możliwość ekonomicznego obrabiania tych materiałów, dzięki czemu można coraz szerzej wykorzystywać potencjał jaki dają nowoczesne materiały kompozytowe.

1.1.1. Budowa i charakterystyka kompozytów polimerowych

Kompozyt polimerowy włóknisty zbudowany jest z dwóch głównych składników i są nimi osnowa i włókna [130]. Poza wymienionymi podstawowymi składnikami w skład wchodzi również substancje, które nazywane są środkami pomocniczymi i modyfikującymi. Rys. 1.1 przedstawia uproszczony widok kompozytu.



Rys. 1.1. Schemat kompozytu

Osnowę (żywicę) kompozytów polimerowych stanowią polimery i są to przede wszystkim duroplasty, termoplasty i elastomery [101]. Polimery spełniają między innymi funkcję nadawania wyrobom określonego kształtu i dzięki dobrej przyczepności do powierzchni włókna łączą je między sobą

i zapewniają prawidłowe przenoszenie obciążeń przez włókna. Dobra przyczepność pozwala na prawidłowe zachowanie się kompozytu przy działaniu obciążeń mechanicznych lub cieplnych. Ponadto polimery w kompozycie wywierają duży wpływ na metodę wytwarzania kompozytów oraz decydują o właściwościach cieplnych i chemicznych. Wpływają również na palność kompozytów. Bardzo ważnymi cechami osnów polimerowych są ich właściwości relaksacyjne, co wpływa na likwidację zakłóceń w strukturze spowodowanych przez czynniki zewnętrzne i pozwala na powrót do stanu równowagi.

Wśród polimerów stosowanych na osnowę najbardziej rozpowszechnione są duroplasty, które stanowią ponad 50% całej produkcji kompozytów polimerowych [95]. Są to polimery termoutwardzalne i chemoutwardzalne. Do duroplastów stosowanych jako osnowa kompozytów zaliczane są polimery epoksydowe, melaminowo-formaldehydowe, poliestrowe, fenolowo-formaldehydowe i silikonowe [8]. Charakteryzując ogólnie polimery zaliczane do grupy duroplastów należy zaznaczyć, że posiadają one dobre właściwości elektroizolacyjne, odporność chemiczną, dużą wytrzymałość mechaniczną, trudnopalność i niską cenę. Dzięki swoim właściwościom znajdują szerokie zastosowanie w kompozytach polimerowych stosowanych na laminaty w przemyśle lotniczym i kosmicznym, ale i na osprzęt elektrotechniczny, oprzyrządowanie drukarskie, materiały dekoracyjne, sprzęt sportowy (deski surfingowe) oraz zbiorniki i rury. Żywica poliestrowa z odpowiednimi dodatkami określana mianem żelkotu nadaje gotowemu wyrobowi gładką, powierzchnię z połyskiem. Dzięki takiej powierzchni materiał ma podwyższoną odporność chemiczną, odporność na warunki zewnętrzne i promieniowanie UV.

Drugą grupą polimerów są termoplasty, które są tańsze od duroplastów. Do termoplastów zalicza się poliamid, polistyren (PS), polichlorek winylu (PVC), polipropylen (PP), poliformaldehyd (POM), poliwęglan (PC) i poliimid (PI) [8, 95]. Zastosowanie termoplastów w postaci poliamidów (PA 6 i PA 6.6) i polistyrenów w budowie kompozytów poprawia ich wytrzymałość na rozciąganie, zginanie i ścinanie. Polichlorek winylu poprawia właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie oraz zwiększa odporność na pękanie i pęknięcie. Polipropylen powoduje wzrost sprężystości, wytrzymałości na rozciąganie, a także odporności na pękanie i pęknięcie. Poliwęglan i poliimid powodują między innymi zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i zginanie, podwyższenie modułu sprężystości oraz poprawę własności zmęczeniowych.

Obok duroplastów i termoplastów trzecią grupę polimerów stanowią rzadziej stosowane elastomery, których przedstawicielem jest guma. Cechuje je zdolność odwracalnej deformacji wywołanej siłami mechanicznymi. Zachowują przy tym ciągłość struktury. Elastomery posiadają niską temperaturę zeszklenia, która jest niższa od temperatury pokojowej.

W tabeli 1.2 przedstawiono zestawienie właściwości wybranych osnów kompozytów polimerowych.

Tabela 1.2. Zestawienie właściwości osnów kompozytów polimerowych [8, 31, 42, 78, 144]

Rodzaj osnowy	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Moduł Younga [GPa]
epoksydowa	1,08÷1,37	25÷85	2,1÷5,5
poliestrowa	1,08÷1,37	40÷85	1,3÷4,1
winyloestrowa	1,04	85	3,3
fenolowa	1,18÷1,37	35÷60	2,7÷4,1
polietylenowa	0,88÷0,98	20÷35	0,7÷1,4
polipropylenowa	0,9÷0,92	25÷40	1,3÷1,8
poliwęglanowa	1,18	55÷70	2,1÷3,5
nylonowa	1,08	55÷90	1,3÷3,5

Wzmocnienie (włókna zbrojące) kompozytów polimerowych stanowią najczęściej włókna szklane [125], węglowe [95] i aramidowe (organiczne). Wzmocnienie jest to rozmieszony w osnowie materiał, który jest twardszy i bardziej wytrzymały niż osnowa. Materiały stosowane na wzmocnienia kompozytów polimerowych (włókna szklane i włókna węglowe) odpowiedzialne są za przenoszenie obciążeń w materiale kompozytowym. Głównym celem zastosowania w kompozycie włókien stanowiących wzmocnienia jest zwiększenie parametrów wytrzymałościowych gotowego kompozytu [8]. Włókna mają dużo większą wytrzymałość niż osnowa polimerowa. Krzywe naprężeń i odkształceń materiałów kompozytowych są bardzo mocno związane z orientacją włókien [128]. W przypadku poddawania próbki kompozytów polimerowych szybko następującym obciążeniom uszkodzenia w początkowej fazie obróbki frezowaniem powstają ze zwiększoną intensywnością [35]. Właściwości kompozytu zależą również od formy wzmocnienia i jego udziału procentowego w całym materiale.

Włókna stosowane na wzmocnienie kompozytów polimerowych mogą być ciągle (długie) lub nieciągle (krótkie). W porównaniu do włókien krótkich zaletami stosowania włókien długich w materiale kompozytowym jest uzyskiwanie lepszych właściwości mechanicznych, mniejszych skłonności do pękania i lepszej udatności elementu z karbem [100].

Najczęściej włókna stosowane do zbrojenia kompozytów występują w postaci rovingu. Roving to pasmo elementarnych włókien ciągłych, łączonych bez skrętu i pokrytych preparacją chemicznie czynną. Włókna występujące w postaci rovingu są najczęściej wykorzystywane bezpośrednio do wytwarzania wyrobów służących do zbrojenia kompozytów [8].

Poza rovingiem włókna mogą występować pod postacią:

- rovingu ciętego (służącego przede wszystkim do tworzenia tłoczyw miękkich),
- tkanin rovingowych (służą do układania w formach),
- włókiem mielonych,
- mat powierzchniowych,
- przędzy i nici.

Jako zbrojenie kompozytów polimerowych stosowane są włókna szklane, które oprócz niskiego kosztu posiadają dużą zdolność do pochłaniania energii [31] w odniesieniu do włókien węglowych. W około 85÷90% kompozyty na bazie włókien szklanych zastosowane są na przedmioty ogólnego przeznaczenia [168]. Włókna szklane są także szeroko stosowane na elementy samolotów, szybowców, nadwozi samochodowych, okrętów, ale i na małe elementy elektrotechniczne [78]. Wpływ na rozpowszechnienie włókna szklanego ma w pełni opracowana technologia wytwarzania, zapewniająca półfabrykat o stosunkowo dobrych właściwościach i odpowiednio niskiej cenie.

Włókno szklane jest niepalne, w temperaturze 20÷200°C wytrzymałość włókna szklanego nieco wzrasta, a w zakresie temperatury 200÷300°C nieco maleje. Po przekroczeniu 300°C wytrzymałość zmniejsza się bardzo gwałtownie. Wytrzymałość włókien szklanych spada o 50% przy ogrzewaniu w temperaturze 400°C przez czas 24 godzin. Biorąc po uwagę ujemne wartości temperatury to włókna te zachowują swoje pierwotne właściwości mechaniczne do -50°C [30, 31]. Włókna te są podatne na działanie wilgoci w środowisku o wilgotności na poziomie 50%. W takich warunkach wytrzymałość na rozciąganie włókien spada o 15% w porównaniu do środowiska suchego [95].

Pośród włókien szklanych najbardziej rozpowszechnione jest włókno typu E (ze względu na niski koszt wytworzenia), a pozostałe stanowią włókna specjalnego przeznaczenia i są to między innymi szkła o symbolach A, D, AR, ECR, C i S (w Europie włókno S znane jest pod oznaczeniem R).

Szkła oznaczone symbolem E (o gęstości 2,52 g/cm³) to włókna ze szkła boro–głino–krzemowego o zawartości tlenków alkalicznych Na₂O i K₂O poniżej 1%. Ten typ szkła cechuje się małą wytrzymałością mechaniczną, małym modulem sprężystości i podatnością na korozję. Mały moduł Younga nie daje kompozytom dużej sztywności [8]. Dlatego też, kompozyty wytworzone ze szkła E nie nadają się do wytwarzania elementów poddawanych dużym obciążeniom [78]. Tego rodzaju włókno jest najbardziej rozpowszechnione w kompozytach termo- i chemoutwardzalnych [163].

Wyższą elastyczność w porównaniu do włókna typu E zapewnia włókno typu ECR. Posiada również wysoką odporność termiczną oraz odporność na korozję chemiczną, co z kolei wiąże się ze wzrostem kosztów wyprodukowania takiego szkła [168]. Ze względu na brak tlenu boru i fluoru w strukturze włókna ECR nie zagraża ono środowisku na żadnym z etapów produkcji [163]. Z tego

względnie włókna te coraz częściej stosuje się na zbiorniki, rurociągi czy aparaturę przemysłu chemicznego [78].

Jedne z najważniejszych właściwości mechanicznych zapewnia włókno typu S. Posiada ono wyższy wskaźnik wytrzymałościowy niż szkła typu E, ma dobrą wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, wysoką odporność na działanie agresywnego środowiska kwasowego i wodnego oraz wysoki moduł Younga (moduł sprężystości wzdłużnej) [163]. Poza tym jest ono bardziej odporne na działanie wysokiej temperatury [78, 168] niż włókna typu E, których odporność termiczna wynosi jedynie 380°C.

Szkło typu D posiada dużo niższą względną przenikalność elektryczną w porównaniu do szkła typu E (3.56÷4.00 dla typu D, 6.86÷7.00 dla typu E). Tego typu szkło ma małe zapotrzebowanie ze względu na stosunkowo wysokie koszty wytworzenia [168].

Kolejnym rodzajem są włókna typu AR charakteryzujące się bardzo dużą odpornością chemiczną (w środowisku kwasowym i zasadowym). Dzięki tej właściwości włókna AR znajdują szerokie zastosowanie w wyrobach budowlanych [168].

W tabeli 1.3 przedstawiono zestawienie właściwości wybranych włókien szklanych.

Tabela 1.3. Zestawienie właściwości wzmocnienia kompozytów w postaci włókien szklanych [8, 31, 42, 78, 95, 144]

Rodzaj włókna szklanego	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Moduł Younga [GPa]
A	2,46÷2,55	2500÷3500	70÷72
D	2,14	2400	52
E	2,46÷2,54	3500÷3600	60÷77
AR	2,7	3600	70÷75
ECR	2,72	3445	81
S (i R)	2,49÷2,5	4500÷4800	83÷87

Poza włóknami szklanymi wzmocnienie stanowią również włókna węglowe. Są one droższe (ok. 10 razy), ale obok włókien szklanych stanowią najbardziej rozpowszechnioną obecnie grupę wzmocnień stosowaną do wytwarzania kompozytów polimerowych. Poza branżą lotniczą kompozyty wzmocnione włóknami węglowymi mają duży potencjał zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym [1]. Ogólnoświatowe dążenie do obniżenia kosztów produkcji przy jednoczesnym poprawianiu właściwości produkowanych pojazdów powodują, że kompozyt polimerowy z włóknami węglowymi ze względu na bardzo dobrą wytrzymałość i małą masę właściwą stosowany jest na części nadwozi i podwozi pojazdów. Coraz częściej elementy wykonane z kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi stosowane są na elementy

zespołów napędowych czy hamulcowych. Wprowadzanie lżejszych niż stal materiałów do konstrukcji pojazdu pozwala na redukcję masy, co wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa. Dzięki zastosowaniu kompozytów z włóknami węglowymi poprawia się również sztywność konstrukcji pojazdu [95]. Włókna węglowe są z powodzeniem stosowane w produktach narażonych na wilgoć i zmienne obciążenia [31]. Obok lotnictwa i motoryzacji kompozyty z włóknami węglowymi stosowane przy produkcji sprzętu sportowego i produktów użytku domowego [31].

Dużą wytrzymałość mechaniczną daje im bardzo dobrze zorganizowana struktura włókien węglowych. Włókna węglowe wykazują dobre właściwości tłumienia drgań (ok. 10 razy większe zdolności tłumienia drgań niż żeliwo i ok. 100 razy większe niż stal), małą przewodność cieplną w niskiej temperaturze, dobrą przewodność elektryczną, odporność na zmiany temperatury, dużą odporność na ścieranie [31, 95]. Włókna węglowe nie są podatne na działanie wilgoci.

Biorąc pod uwagę odporność cieplną włókien węglowych to jest ona znacząco wyższa od włókien szklanych. W temperaturze 3500°C następuje przechodzenie włókien ze stanu stałego w stan gazowy z pominięciem fazy ciekłej (sublimacja). W temperaturze do 1500÷2000°C w atmosferach nieutleniających zachowują swoje wysokie właściwości [31].

Spośród włókien węglowych stosowanych na wzmocnienie kompozytów polimerowych najczęściej stosowane są włókna typu HT o gęstości 1,78 g/cm³, dużej wytrzymałości na rozciąganie - na poziomie 3750 MPa, małym modułem Younga – na poziomie 240 GPa lub włókna typu HM o gęstości 1,85 g/cm³, które posiadają niższą wytrzymałość na rozciąganie (2450 MPa), ale za to duży moduł Younga o wartości 400 GPa. Występują również włókna typu IM, UHM i ST [1, 95].

Włókna UHM cechują się bardzo dużym modułem sprężystości wzdłużnej na poziomie minimum 500 GPa, z kolei włókna ST charakteryzują się dużymi wartościami odkształcenia przed wystąpieniem pęknięcia [78]. W porównaniu do wytrzymałości na rozciąganie stali S355J2G3 wynoszącej 490 MPa, stopu aluminium 2017A 350÷390 MPa i modułowi Younga dla stali wynoszącej 210 GPa, dla aluminium 70 GPa, włókna węglowe tworzące kompozyty polimerowe mają kilkukrotnie lepsze właściwości wytrzymałościowe.

W tabeli 1.4 przedstawiono zestawienie właściwości wybranych włókien węglowych.

Tabela 1.4. Zestawienie właściwości wzmocnienia kompozytów w postaci włókien węglowych [8, 78, 95]

Rodzaj włókna węglowego	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Moduł Younga [GPa]
HT	1,78	3750	240
HM	1,85	2450	400
UHM	2	1850	540

Włókna aramidowe (organiczne) są grupą włókien stanowiących wzmocnienie kompozytów polimerowych, które charakteryzują się małą gęstością (w granicach 1,5 g/cm³) i regularnością w półkryształicznej strukturze. Regularność zapewnia bardzo dobre właściwości mechaniczne. Trwałość i odporność cieplna zapewniona jest przez bardzo dużą stabilność chemiczną pierścieni aromatycznych [31]. Włókna o nazwach Nomex i Kevlar to dwa najbardziej rozpowszechnione rodzaje włókien organicznych. Włókna Nomex charakteryzują się bardzo dobrą odpornością cieplną, małą palnością, dobrymi właściwościami elektrycznymi i dużą odpornością chemiczną [78]. Mają one jednak znacznie gorsze właściwości niż inny ze znanych rodzajów włókien o nazwie Kevlar o numerach 29, 49 i 149, spośród których Kevlar 49 jest najpopularniejszy. Cechuje się małą gęstością, dużą wytrzymałością na rozciąganie, rzędu 3000 MPa (ok. 6 razy więcej niż stal S355J2G3, ok. 8 razy więcej niż stop aluminium 2017A, 3 razy więcej niż włókna szklane), temperaturą stałego użytkowania od 160°C do 210°C (włókno Kevlar 49 może być stosowane w zakresie temperatury od -70°C do 180°C) i trwałością do temperatury 300°C (w krótkim czasie do 540°C). Włókna Kevlar 49 nie palą się i nie topią, a wilgotność ma bardzo niewielki wpływ na właściwości mechaniczne. Dużą zaletą tych włókien jest odporność na ścieranie. Kevlar 49 najczęściej występuje z osnowami w postaci elastomerów. Dużą zaletą włókien kevlarowych jest fakt, że są one prawie niewrażliwe na wady powierzchniowe, ale mają za to małą wartość modułu Younga, małą wytrzymałość na ściskanie i są wrażliwe na promieniowanie UV. Dodawanie różnego rodzaju stabilizatorów w czasie wytwarzania włókien redukuje wpływ promieniowania na włókna kevlarowe [8, 78].

Szereg właściwości włókien aramidowych, ale i duży koszt ich wytworzenia powoduje, że są one stosowane tylko w takich konstrukcjach i aplikacjach, w których wyznacznikiem są dobre właściwości, a nie koszt wytworzenia włókien [31]. Do takiego rodzaju konstrukcji i aplikacji należą hełmy ochronne, kamizelki kuloodporne, narty, elementy dla przemysłu lotniczego, kosmicznego czy okrętowego [78]. W tabeli 1.5 przedstawiono zestawienie właściwości wybranych włókien organicznych.

Tabela 1.5. Zestawienie właściwości wzmocnienia kompozytów w postaci włókien organicznych [8, 31, 42, 78, 144]

Rodzaj włókna organicznego	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Moduł Younga [GPa]
Kevlar 29	1,44	2900	59
Kevlar 49	1,45	2800÷3600	120÷125
Spectra 1000	0,97	3000	175
Dynema SK 66	0,97	2000÷3500	50÷125
Twaron HM	1,45	3150	115

Poza osnową i włóknami bardzo ważną rolę w wytwarzaniu kompozytów odgrywają również środki modyfikujące i pomocnicze wprowadzane do kompozytów w ilości od ułamka procentu do kilkudziesięciu procent masy polimeru. Mają one na celu poprawę właściwości użytkowych gotowego kompozytu i mogą one występować w trzech różnych stanach skupienia: stałym, ciekłym i gazowym. Wybór danego środka zależy od oczekiwanych właściwości i kształtu kompozytu, sposobu wytwarzania kompozytu, a także od rodzaju polimeru.

Najbardziej popularnymi środkami modyfikującymi są barwniki i pigmenty, mające na celu poprawę właściwości estetycznych i uzyskanie żądanej barwy kompozytu, a w celu poprawy odporności na palenie dodawane są antypireny (niepalniacze). W zależności od wymaganych właściwości do kompozytu w fazie produkcji mogą być stosowane dodatki elektroprzewodzące, mające na celu zapewnienie przewodzenia ładunku elektrycznego. Spośród wielu dodawanych składników można zastosować środki przeciwskurczowe i antyelektrostatyczne, których celem jest zmniejszenie możliwości gromadzenia się ładunków elektrostatycznych. Niekorzystnym procesem w przypadku wszystkich materiałów inżynierskich, nie tylko kompozytów polimerowych, jest zjawisko degradacji i starzenia się i aby temu zapobiec lub zwiększyć odporność kompozytów na tego typu zjawiska stosowane są substancje w postaci antyutleniaczy i stabilizatorów. Elastomerowe związki antyudarowe dodawane są w celu zwiększenia udatności osnowy, której głównym zadaniem jest spajanie włókien wzmacniających odpowiedzialnych za przenoszenie obciążeń. Szeroki zakres zastosowań kompozytów sprawia, że potrzebne są także środki powodujące zmniejszenie lepkości polimerów (dodawane są tzw. rozcieńczalniki) i spieniacze powodujące spienienie polimeru [8]. Dodatkowe składniki w kompozytach z włóknami szklanymi mogą powodować polepszenie właściwości wytrzymałościowych [145]. Dodatek amoniaku zwiększa chropowatość i wzmacnia łączenie pomiędzy osnową i włóknami węglowymi [141]. Rodzaj i metoda przygotowania dodatków do kompozytu ma także istotny wpływ na chropowatość i stan późniejszej powierzchni [113]. Szereg dodatków wpływa na bardzo zróżnicowane właściwości gotowego kompozytu.

Obok środków modyfikujących zapewniających odpowiednie końcowe właściwości kompozytów polimerowych stosowane są środki pomocnicze, których celem jest poprawa warunków w czasie wytwarzania i produkcji materiałów. W celu zwiększenia trwałości połączenia poszczególnych składników kompozytu dodawane są zagęszczacze chemiczne. Niedostateczne połączenie w budowie kompozytów może być przyczyną nie tylko obniżenia właściwości wytrzymałościowych, ale i przyczyną powstawania wad w postaci porów i pęcherzyków powietrza. W celu zapobiegania przywieraniu polimerów do elementów urządzeń produkcyjnych i formy stosowane są środki antyadhezyjne, smarujące i upłynniające. Wśród wielu środków pomocniczych istnieją również zagęszczacze chemiczne (dodawane w celu zwiększenia lepkości wewnątrz mieszanki), utwardzacze oraz elementy odpowiedzialne za zmniejszanie parowania styrenu, który szybko i łatwo ulega polimeryzacji (proces łączenia się małych cząsteczek w celu utworzenia związków o większej masie) [8].

1.1.2. Podstawowe sposoby wytwarzania kompozytów polimerowych

Sposób wytwarzania kompozytów polimerowych ma istotny wpływ zarówno na właściwości materiału jak i na koszt ich wytworzenia. Każdy proces powstawania kompozytu musi być określony parametrami, takimi jak ciśnienie, temperatura, wilgotność, ilość cząstek stałych na 1 m^3 i czas wygrzewania w autoklawie, koniecznymi do otrzymania zadanych właściwości mechanicznych [30, 108]. Czynności takie jak formowanie ręczne, układanie taśmy i pakietów w formach wykonywane są przeważnie w pomieszczeniach, w których zachowane są odpowiednie warunki. W takich pomieszczeniach zachowana jest temperatura na poziomie $18\div 30^\circ\text{C}$ (niekiedy może być ona większa), wilgotność względna nie większa niż 60% (niekiedy 65%) oraz mała ilość zanieczyszczeń. Zasady utrzymywania czystości są ważne ze względu na kurz, pyły i zanieczyszczenia, które osadzając się na poszczególnych warstwach kompozytu mogłyby powodować powstawanie załączków wad. Po pracach typu formowanie ręczne kompozyt umieszczany jest w autoklawie. Najczęściej procesy w autoklawie przeprowadzane są w temperaturze $130\div 180^\circ\text{C}$ i nadciśnieniu na poziomie $0,3\div 0,6\text{ MPa}$.

Etap wytwarzania kompozytów jest bardzo często źródłem powstawania wad. Wilgoć, będąca istotnym parametrem wpływającym na stopień w jakim przesycono włókna przed połączeniem z żywicą, wpływa na ilość i wielkość pęcherzy powietrza i porów. Kompozyty na bazie żywic termoutwardzalnych nasycone wilgocią obniżają swoje właściwości w porównaniu do kompozytów nienasyconych [122]. Czas wygrzewania kompozytu ma istotny wpływ na chropowatość i właściwości międzywęzłowe [141]. Ostre i prostopadłe zakończenia włókien powodują wyższe wartości

naprężeń niż ma to miejsce w przypadku włókien o łagodnym zakończeniu [127]. Niedokładne ułożenie poszczególnych warstw może prowadzić do powstawania fałd i zagnieceń, co powoduje pogorszenie właściwości materiału.

Metody wytwarzania kompozytów można podzielić na „suchą” i „mokrą”. W metodzie „na sucho” tkaniny przed układaniem w formie nasyczone są wcześniej żywicą. Takie przesycone tkaniny lub taśmy nazywane są prepregami. W metodzie „na mokro” żywica z utwardzaczem dodawana jest w momencie układania tkanin, mat lub taśm w formie.

Do metod jednostkowych wytwarzania kompozytów polimerowych należy formowanie ręczne, formowanie próżniowe, formowanie ciśnieniowo-próżniowe, formowanie w autoklawie, formowanie za pomocą gumowego stempla, formowanie w zamykanych formach dwudzielnych, formowanie pomiędzy dwiema formami sztywnymi i formowanie natryskowe [8]. Proste sposoby wytwarzania kompozytów nie zawsze wiążą się z dobrą jakością i powtarzalnością elementów. Zła jakość związana jest z występowaniem różnego rodzaju wad będących przyczyną nieprzewidzianych zdarzeń w postaci pęknięcia elementu lub złej jakości powierzchni. Źle dobrana metoda wytwarzania może być przyczyną kilkukrotnego obniżenia właściwości wytrzymałościowych elementu wykonanego z kompozytu polimerowego.

W przypadku produkcji kompozytów polimerowych w metodach wielkoseryjnych wykorzystuje się pultruzję, metodę ciągłego nawijania, R-RIM, S-RIM, RTM, SMC i BMC [8]. Są to metody, które pozwalają na tworzenie powtarzalnych, jednorodnych i tanich elementów, które będą jednocześnie posiadały dobre właściwości wytrzymałościowe oraz małą liczbę wad.

1.2. Charakterystyka obróbki skrawaniem kompozytów polimerowych

Pomimo różnorodnych metod wytwarzania kompozytów polimerowych proces uzyskania gotowego wyrobu związany jest z obróbką skrawaniem stosowaną w celu osiągnięcia wymaganych kształtów i tolerancji wymiarowych. Obróbka kompozytów [74] znacznie różni się od operacji wykonywanych na metalach i ich stopach [77, 156, 157] ze względu na anizotropowość i niejednorodność struktury [7]. Kompozyty polimerowe są to materiały trudnoobrabialne, wymagające odpowiednich narzędzi i warunków obróbki. Tradycyjne sposoby obróbki, takie jak toczenie, wiercenie, frezowanie czy szlifowanie [54, 121], są szeroko stosowane do obróbki materiałów kompozytowych. Toczenie, wiercenie i frezowanie niezbędne jest do uzyskania powierzchni i kształtów niemożliwych do osiągnięcia na etapie wytwarzania. Obróbka skrawaniem materiałów kompozytowych stosowana jest głównie do wykonywania i pogłębiania otworów, wykonywania wycięć o skomplikowanym kształcie, wykonywania wgłębień, rowków i wąskich kanałów, wykonywania

gwintów, frezowania powierzchni bocznej, frezowania powierzchni czołowej (w celu uzyskania odpowiedniej chropowatości) oraz wielu innych operacji. Obróbka frezowaniem kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi wykonywana jest w celu odcięcia wypływek po wyjęciu elementu z formy. Prędkość skrawania i posuw muszą być odpowiednio dobrane, aby uniknąć delaminacji i przegrzania materiału [43, 51].

Podczas obróbki kompozytów materiał jest niejednorodny, zależnie od rodzaju, ułożenia i orientacji włókien, właściwości osnowy, zależności pomiędzy składnikami kompozytu [128], a także procesu wytwarzania [8, 107]. Tak duża ilość czynników wpływających na proces obróbki utrudnia znalezienie jednoznacznych relacji pomiędzy poszczególnymi elementami charakteryzującymi obróbkę skrawaniem.

Ważnym czynnikiem przy obróbce skrawaniem jest rodzaj narzędzia skrawającego. Spośród wielu rodzajów narzędzi, które mogą być użyte do obróbki kompozytów polimerowych, można wyróżnić narzędzia z płytkami z pokryciem diamentowym (PCD), narzędzia z chemicznie naniesioną cienką powłoką (CVD) oraz narzędzia z węglików spiekanych [150]. O doborze narzędzi decyduje ich cena i odporność na zużycie, ale uzależnione jest to także od rodzaju kompozytu, jego twardości i występującego w nim wzmocnienia. Według dotychczasowego stanu literatury najodpowiedniejszymi narzędziami do obróbki kompozytów polimerowych, ze względu na małą chropowatość powierzchni, są frezy z płytkami z pokryciem diamentowym (PCD) [130]. Ich koszt jest kilkukrotnie (nawet 10 razy) większy niż frezów z węglików spiekanych niepokrywanych. Natomiast frezy z węglików spiekanych niepokrywanych są nietrwałe, szybko się zużywają, a uzyskiwane powierzchnie są gorszej jakości w porównaniu z powierzchniami obrabianymi frezami z pokryciem diamentowym [130]. Kruche narzędzia ceramiczne nie nadają się do obróbki skrawaniem twardych kompozytów. Są one nieodpowiednie ze względu na ich wrażliwość na dynamiczne zmiany sił skrawania, które mogą doprowadzić do pęknięcia narzędzia ceramicznego [34, 130]. W przypadku obróbki kompozytów wzmocnionych włóknami szklanymi i węglowymi, czynnikiem decydującym o doborze jest materiał z jakiego wykonane jest narzędzie lub płytki skrawające. Zużycie ostrzy skrawających ma bezpośredni wpływ na siły skrawania. Narzędzie powinno być odporne na działanie zmiennych sił ze względu na niejednorodność struktury kompozytu, który w miejscu występowania osnowy kompozytu może nie stawiać znacznego oporu, a w przypadku obszaru występowania wzmocnienia narzędzie może być znacznie obciążone. Dla narzędzia do obróbki kompozytów z włóknami aramidowymi o charakterze plastycznym ważna jest jego geometria i zdolność odprowadzania wiórów. Obróbka kompozytów z włóknami aramidowymi powoduje szybkie nagrzewanie się narzędzia, a także niebezpieczeństwo jego zniszczenia [130]. Wyższe prędkości skrawania powodują szybsze zużywanie się narzędzia zarówno na powierzchni czołowej jak i bocznej [11].

Obok struktury kompozytu i zastosowanego narzędzia, także parametry obróbki mają bezpośredni wpływ na powstawanie wad powierzchniowych, takich jak mikropęknięcia, pory, pęcherzyki powietrza, transformacje mikrostrukturalne, deformacje plastyczne, delaminację (rozwarstwienie), przerwanie włókien, wyciąganie włókien, pęknięcie osnowy [96], które prowadzą do degradacji powierzchni i pogorszenia właściwości materiału. Dobór odpowiednich parametrów może pozwolić na zmniejszenie temperatury skrawania i uniknięcie lub ograniczenie powstawania różnego rodzaju wad powierzchniowych. Zrozumienie zjawisk występujących w strefie kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym ma zapobiegać powstawaniu defektów.

Dobór parametrów obróbki w procesie skrawania jest bardzo ważny i wymaga wielu badań w celu uzyskania zadowalającego (małego) poziomu zużycia narzędzia i małej ilości wad na powierzchni kompozytu. Dobrej jakości powierzchnia po obróbce skrawaniem powinna mieć jak najmniej wykruszeń osnowy i wzmocnienia, wyciągniętych włókien, rozwarstwień, przepalonych obszarów i innego rodzaju niepożądanych zjawisk. Liczba powstałych wad na powierzchni kompozytu polimerowego ma wpływ na jego dalszą eksploatację. Niejednokrotnie kompozyty polimerowe z włóknami węglowymi mają kontakt cierny ze stopami aluminium i stalą [22]. Poruszanie stykających się materiałów prostopadle do włókien powoduje poważne uszkodzenia włókien, zmniejszenie wytrzymałości materiału oraz powoduje mikrozniszczenia żywicy [22].

Struktura geometryczna powierzchni po obróbce charakteryzowana jest nie tylko przez wady powierzchniowe, ale również za pomocą chropowatości i falistości powierzchni. W ostatnich latach istnieje duża aktywność badawcza w dziedzinie przewidywania chropowatości powierzchni [6]. Konieczne jest wprowadzanie bardziej zautomatyzowanych systemów do monitorowania, pomiaru i kontroli na bieżąco procesu obróbki. Zastosowanie cieczy chłodzących w celu zmiany napięcia powierzchniowego podczas skrawania zwiększa chropowatość powierzchni. Można postawić taki wniosek na podstawie analizy wpływu płynów obróbkowych na chropowatość powierzchni kompozytów z włóknami węglowymi i włóknami szklanymi [5].

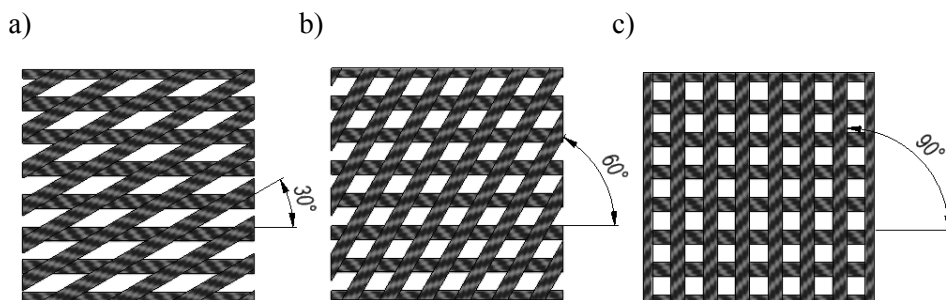
Kolejnym czynnikiem ściśle związanym z obróbką skrawaniem jest rodzaj wiórów, które są odpowiedzialne między innymi za odprowadzanie ciepła ze strefy skrawania. W wyniku obróbki kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi powstają wióry w postaci pyłu o średnicach ziaren rzędu $0,1 \div 0,5$ mm. Skrawanie kompozytów z włóknami szklanymi powoduje szybkie łamanie się wióra, co pozwala na szybkie odprowadzanie ciepła ze strefy obróbki i uniemożliwia zawijanie się wióra na narzędziu. Wiór formuje się w kształt poskręcanych elementów o długości około 2 mm. Obróbka kompozytów z włóknami organicznymi powoduje, że wióry nie łamią się, ale zawijają na narzędziu. Powoduje to, że narzędzie nie ma dobrego odprowadzania ciepła i następuje jego zniszczenie w wyniku przegrzewania. Mechanizmy formowania się wiórów w obróbce kompozytów polimerowych

wzmocnionych włóknami szklanymi, węglowymi i organicznymi są podstawą do analizy sił skrawania. W przypadku obróbki skrawaniem kompozytów z włóknami szklanymi wraz ze wzrostem głębokości skrawania zwiększa się długość wióra. Szybsze łamanie się wiórów, przez co są one krótsze, powodowane jest przez zwiększanie prędkości obrotowej. W przypadku frezowania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi z różnymi parametrami otrzymane wióry nie różnią się znacznie między sobą.

1.2.1. Obróbka frezowaniem kompozytów polimerowych

Operacje frezowania kompozytów polimerowych [124], w odróżnieniu od stali [135] oraz aluminium [155], tytanu i ich stopów [153, 154] charakteryzują się usuwaniem małej ilości materiału [16]. Frezowanie jest używane do obróbki końcowej otworów, wycięć, podebrań, pogłębień, usuwania i stępienia ostrych krawędzi, osiągania wysokiej jakości powierzchni płaskiej lub uzyskiwania końcowego kształtu i tolerancji wymiarowej [109].

Ważnym czynnikiem podczas obróbki jest kierunek ułożenia włókien. Włókna szklane i węglowe wskutek występujących podczas obróbki obciążeń ulegają kruchemu pękaniu, a włókna organiczne z kolei ulegają rozrywaniu [151]. W większości przypadków obróbki skrawaniem mniejszą chropowatość powierzchni uzyskuje się przy orientacji włókien pod kątem od 0° do 30° w stosunku do kierunku obróbki. Po przekroczeniu kąta 30° wartości parametrów chropowatości zaczynają wzrastać [7, 104]. Przy obróbce, gdy kąt orientacji włókien zbliżony jest do 0° , kompozyt poddany jest naprężeniom równoległym do włókien. Gdy kąt wzrasta włókna są sprasowywane i wyginane, co doprowadza do pęknięcia włókna w wyniku nacisku. Obciążenia pod kątem od 30° do 60° w stosunku do kierunku ułożenia włókien, powodują uzyskiwanie niskiej jakości powierzchni. W czasie obróbki kompozytu pod kątem 90° do kierunku ułożenia włókna, włókna są poddawane zginaniu i ścinaniu [73, 150]. Na poniższym rysunku przedstawiono schematy pokazujące ułożenie włókien w kompozycie o kącie zorientowania 30° (rys. 1.2a), 60° (rys. 1.2b) i 90° (rys. 1.2c).



Rys. 1.2. Schemat ułożenia włókien w kompozytach a) 30° , b) 60° , c) 90°

Siły skrawania są związane z orientacją i wytrzymałością włókien [72], a więc i właściwościami materiału, dlatego zdarza się, że obliczenia numeryczne oraz model doświadczalny pokazują pewne różnice pomiędzy wynikami. W przypadku obróbki frezowaniem kompozytów o osnowie epoksydowej z włóknami grafitowymi tworzenie się wiórów również jest związane z orientacją włókien. Wielkość wiórów zmniejszała się dla orientacji włókien w stosunku do kierunku skrawania pod kątem do 45° , a powyżej 45° nie obserwowano istotnych zmian w czasie oceny wizualnej [2]. Badania jakości powierzchni kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi za pomocą mikrofotografii [107] pokazują, że lepsza jakość powierzchni po frezowaniu osiągnięta jest przy orientacji włókien od 0° do 45° w stosunku do kierunku obróbki. W niektórych badaniach [65] wykazano, że siły skrawania przy orientacji włókien węglowych $45^\circ/135^\circ$ są mniejsze niż dla orientacji $0^\circ/90^\circ$.

Do obróbki frezowaniem kompozytów polimerowych [18] powinny być używane, narzędzia z płytkami z pokryciem diamentowym (PCD), które mają dużą odporność na ścieranie zachowując długo ostrą krawędź tnącą. Narzędzia z węglików spiekanych [17] i narzędzia z azotku boru (CBN) w przypadku obróbki tych kompozytów szybko się zużywają. W badaniach przeprowadzonych przy użyciu dwóch rodzajów frezów z węglików spiekanych (K10) o różnej liczbie ostrzy [20] pokazano wpływ prędkości skrawania i prędkości posuwu na chropowatość powierzchni oraz uszkodzenia w płytach z kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi. Dla obu rodzajów frezów z dwoma lub sześcioma ostrzami parametr chropowatości R_a zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości posuwu i maleje ze wzrostem prędkości skrawania. Oba narzędzia powodują, że liczba wad w postaci rozwarstwień lekko wzrasta wraz z prędkością posuwu, ale tylko frez z sześcioma ostrzami przy zwiększaniu prędkości skrawania powoduje wzrost liczby wad. Porównując oba rodzaje narzędzi można stwierdzić, że frez z dwoma ostrzami wytwarza mniej uszkodzeń w materiale kompozytowym CFRP niż frez z sześcioma ostrzami. Na podstawie tych badań wykazano, że prędkość posuwu jest parametrem, który wykazuje największy wpływ na chropowatość powierzchni oraz na współczynnik delaminacji. Narzędzia ceramiczne mają małą wytrzymałość i są kruche, co powoduje, że są bardzo wrażliwe na uderzenia, a ich bardzo małe przewodnictwo cieplne nie pozwala na rozproszenie ciepła generowanego podczas obróbki [136]. Tak jak w przypadku obróbki kompozytów z włóknami szklanymi i węglowymi tak i kompozytów z włóknami organicznymi nie można stosować do standardowych narzędzi (przeznaczonych do obróbki stali). Włókna organiczne przed ucięciem poddawane są naprężeniom rozciągającym. Narzędzia do obróbki kompozytów z włóknami organicznymi muszą być bardzo ostre, aby oddzielenie poprzez cięcie nastąpiło jak najszybciej. Włókna te mają duży współczynnik tarcia, a wióry tendencję do zawijania się i gromadzenia na narzędziu. Do obróbki takich kompozytów stosowane są zarówno narzędzia PCD jak i narzędzia

z gruboziarnistymi węglnikami oraz narzędzia pokryte azotkiem tytanu (TiN). Powłoka TiN redukuje współczynnik tarcia podczas frezowania, który w połączeniu ze zwiększoną odpornością na ścieranie narzędzia skutkuje dłuższym okresem użytkowania [130]. Geometria narzędzia jest ważnym czynnikiem podczas obróbki frezowaniem obrzeży kompozytów z włóknami węglowymi [52], ze względu na siły skrawania i powstawanie wad powierzchniowych. Obróbka obrzeży materiałów kompozytowych używana jest najczęściej po wyjęciu elementu z formy.

Wpływ parametrów obróbki (prędkość, posuw i głębokość skrawania) na siły i moment skrawania jest jedną z podstawowych zależności pozwalających poznać i zaplanować obróbkę. Znajomość efektów i zjawisk występujących podczas obróbki jest bardzo ważna, a możliwość wcześniejszego ich prognozowania pozwala na przeciwdziałanie niepowołanych sytuacjom. Część opublikowanych badań koncentruje się na procesie powstawania wiórów w celu prognozowania sił skrawania [45, 65, 66, 89, 97, 117, 137, 146, 147]. Matematyczny opis procesu skrawania i zjawisk w nim występujących pozwala obliczyć występujące siły skrawania. Znaczna część prac poświęcona prognozowaniu sił skrawania podaje zbieżne wyniki i wnioski. Na ich podstawie stwierdzono, że siła ta zależy głównie od kąta natarcia [117, 137, 147], orientacji i odporności włókien na pękanie [65, 66, 117, 147] oraz parametrów frezowania [137, 146].

Dobór parametrów w procesie frezowania kompozytów polimerowych jest zależny od struktury materiału, orientacji włókien, udziału włókien w całości materiału, rodzaju włókien i oczekiwanej chropowatości powierzchni. W większości przypadków dla kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi (GFRP) stosowane są prędkości skrawania: $60 \div 250$ m/min [43, 129], posuw: $0,01 \div 0,02$ mm/ostrze [43] ($0,08 \div 0,12$ mm/obrót [129]) i głębokości skrawania: $0,4 \div 2$ mm [4, 129]. Dla kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi (CFRP) stosowane są prędkości skrawania: $20 \div 250$ m/min [20, 43, 52, 107], a nawet 500 m/min [129], posuw: $0,01 \div 0,5$ mm/ostrze [43, 52, 65, 129] i głębokości skrawania: $0,1 \div 4$ mm [49, 52, 65, 107, 129].

W przypadku frezowania kompozytów z włóknami szklanymi oraz materiałów wzmacnianych włóknami węglowymi wykazano [4], że największy wpływ na chropowatość powierzchni ma prędkość posuwu, nieco mniejszy wpływ ma prędkość skrawania, a wpływ głębokości skrawania nie ma istotnego znaczenia. W większości przypadków wraz ze wzrostem prędkości posuwu chropowatość zwiększa się. Jednakże nie sama chropowatość opisuje jakość powierzchni, ważne są również obserwacje pod mikroskopem struktury geometrycznej powierzchni. Wzrost prędkości skrawania w przypadku obróbki kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi powoduje wzrost energii cieplnej, przez co przyspiesza zużycie narzędzi i pogarsza jakość powierzchni.

Prace poświęcone tematyce obróbki frezowaniem kompozytów polimerowych prowadzone są stosunkowo od niedawna i przedstawiają

różnorodne wyniki prowadzonych badań dotyczących wpływu parametrów, narzędzi, warunków cieplnych, orientacji włókien na wartości siły i momentu skrawania, jakość powierzchni (głównie chropowatość) oraz wielu innych aspektów.

Podsumowując przegląd prac poświęconych obróbce frezowaniem można przedstawić wniosek, że niejednorodność i anizotropowość materiałów kompozytowych utrudnia jednoznaczne scharakteryzowanie zjawisk i wad występujących podczas obróbki.

1.2.2. Obróbka wierceniem kompozytów polimerowych

Wiercenie jest ważnym procesem obróbki elementów wykonanych z kompozytów. W związku z tym, że kompozyty polimerowe należą do materiałów trudnoobrabialnych, wydajność objętościowa wiercenia jest mała i występują niepożądane rozwarstwienia. Obróbka wierceniem obejmuje głównie konwencjonalne wiercenie, wiercenie ze szlifowaniem, wiercenie wspomagane wibracjami i wiercenie z dużą prędkością [21, 82, 106, 160].

Jednym z podstawowych problemów, najczęściej występującym podczas wiercenia, jest zjawisko rozwarstwiania. Ta niepożądana wada jest powodowana przez składową posuwową całkowitej siły skrawania podczas wychodzenia narzędzia z materiału. Badania pokazały, że zminimalizowanie działania sił osiowych jest możliwe dzięki stosowaniu małych kątów wierzchołkowych, które powodują wzrost udziału sił odporowych w odniesieniu do sił osiowych [80]. Początkowo występuje gwałtowny wzrost sił i momentów z powodu wprowadzenia wiertła do materiału [32, 33]. Maksymalna siła i moment występują, gdy ścin przerywa dolną warstwę elementu [130, 142].

Ważnym czynnikiem podczas wiercenia w kompozytach polimerowych jest dobór narzędzi o specjalnej geometrii. Do wiercenia kompozytów polimerowych najczęściej stosowane są narzędzia z pokryciem diamentowym (PCD), które w porównaniu do narzędzi z węglików spiekanych są lepsze pod względem ekonomicznym i jakościowym. Narzędzia PCD pomimo wyższych kosztów ich zakupu są alternatywą dla węglików spiekanych z uwagi na trwałość narzędzia i możliwość stosowania większej prędkości skrawania. Otwory wykonane wiertłami z pokryciem diamentowym mają małą chropowatość. Ostra geometria może zmniejszyć nie tylko zjawisko delaminacji, ale i inny rodzaj wad powierzchniowych jakimi są wyrwania włókien.

Dobór parametrów wiercenia jest ważny z uwagi na siły skrawania i powstawanie delaminacji i powinien być przeprowadzony bardzo rozważnie. Wzrost prędkości posuwu powoduje wzrost siły skrawania, a wzrost prędkości skrawania powoduje zmniejszenie tej siły [26]. Przy doborze parametrów należy jednak wziąć pod uwagę, że w czasie wiercenia z dużą prędkością i małym posuwem wzrasta temperatura narzędzia i w konsekwencji wzrost jego zużycia.

Wzrost zużycia narzędzia może powodować zwiększenie ilości powstających wad powierzchniowych, a w szczególności delaminacji [98, 142]. Orientacja włókien ma wpływ na średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_q , R_z i R_t [26]. Dobór odpowiednich parametrów wiercenia to ważne zagadnienie mające związek zarówno z przebiegiem obróbki jak i powstawaniem defektów [103]. Standardowe wiercenie w kompozytach polimerowych przeprowadzane jest zazwyczaj z prędkością nie większą niż 100 m/min, prędkością obrotową nie większą niż 8000 obr/min i posuwem $0,05 \div 0,3$ mm/obr, w zależności od rodzaju kompozytu [10, 123, 126].

Obróbka wierceniem wspomaganym wibracjami [106, 111, 112, 138] stosowana jest zarówno do kompozytów wzmocnionych włóknami szklanymi jak i węglowymi. Ten rodzaj obróbki pozwala na zminimalizowanie występowania wad po obróbce [138] i zwiększenie liczby wykonanych otworów w porównaniu do tradycyjnego wiercenia bez oscylacji, zachowując zadany poziom zużycia narzędzia [111, 112].

1.2.3. Obróbka toczeniem kompozytów polimerowych

Obróbka toczeniem kompozytów polimerowych jest niezbędna przy produkcji elementów o dokładnej geometrii, małej chropowatości powierzchni i dokładności większej niż otrzymana na etapie wytwarzania części z kompozytu [12]. Dotyczy to części obrotowych, takich jak łożyska, wrzeciona, osie lub rolki. Narzędzie podczas toczenia, będąc w stałym kontakcie z materiałem kompozytowym, narażone jest na zmiany właściwości materiału przez różne ułożenie twardych włókien i miękkiej osnowy w kompozycie. Duży udział prac wykończeniowych związanych z toczeniem powoduje, że istnieją liczne publikacje poświęcone temu tematowi [12, 27, 55, 105, 110, 118, 119, 130, 148].

Badania czynników wpływających na chropowatość powierzchni [104] w procesie toczenia kompozytu polimerowego z włóknami szklanymi pokazują, że mniejszą chropowatość powierzchni uzyskuje się przy orientacji włókien pod kątem 30° w stosunku do kierunku obróbki, po przekroczeniu tego kąta chropowatość zaczyna wzrastać.

Ważnym czynnikiem, jak w każdej obróbce skrawaniem, jest dobór parametrów skrawania stosowanych do toczenia. Na podstawie literatury [27, 55, 105, 118, 119] zakres parametrów skrawania stosowanych do toczenia wynosi: prędkość skrawania w granicach $50 \div 230$ m/min, głębokość skrawania $0,25 \div 1,75$ mm, posuw $0,05 \div 0,75$ mm/obrót, a kąt ułożenia (orientacji) włókien $15 \div 120^\circ$. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania chropowatość maleje, ponieważ wiór szybko się łamie, odprowadzając ciepło z miejsca obróbki, nie dopuszcza do przegrzania powierzchni skrawania. Wzrost prędkości posuwu powoduje bardziej intensywne wydzielanie się ciepła w strefie skrawania i pogorszenie chropowatości powierzchni kompozytu GFRP [105]. Inne badania

[148] potwierdzają, że na chropowatość powierzchni największy wpływ ma prędkość posuwu i prędkość skrawania, a najmniejszy głębokość skrawania. Przy toczeniu materiałów z krótkimi nieciągłymi włóknami wpływ parametrów jest mniejszy niż przy obróbce kompozytów polimerowych z włóknami ciągłymi [110].

Obróbka toczeniem wymaga stosowania odpowiednio dobranych narzędzi. Z uwagi na zużycie narzędzia i jakość powierzchni po obróbce najodpowiedniejsze są narzędzia z płytkami z pokryciem diamentowym (PCD). Narzędzia z regularnego azotku boru (CBN) mogą być stosowane do obróbki kompozytów polimerowych, ponieważ są bardziej wydajne niż narzędzia z węglików wolframu lub ceramiki [110]. Narzędzia PCD chronione są przed szybkim zużyciem ściernym i termicznym z powodu wysokiego przewodnictwa cieplnego warstwy diamentowej [130]. Badania pokazują, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania rośnie zużycie narzędzia, a wraz ze wzrostem głębokości skrawania pogarsza się chropowatość powierzchni i zwiększa liczba wad powstałych po obróbce [110].

1.3. Charakterystyka wad materiałowych

Kompozyt polimerowy wytworzony z włókien i osnowy powinien spełniać wymagania dotyczące niezawodności i wytrzymałości. Niejednokrotnie te parametry mogą być zakłócone przez złą jakość powierzchni i występujące wady powierzchniowe. Materiały konstrukcyjne, takie jak stal oraz tytan czy aluminium i ich stopy oraz kompozyty polimerowe, narażone są na występowanie wad powierzchniowych. Wytworzenie gotowego produktu kompozytowego z włóknami węglowymi (CFRP) wymaga obróbki krawędzi w celu usunięcia zadziorów, wystających włókien i ukształtowania końcowego konturu elementu [19, 49]. Na jakość obróbki krawędzi, odbywającej się zwykle za pomocą frezowania, wpływają wady, takie jak rozwarstwienia kompozytu. Powodem występowania rozwarstwień są często naprężenia powstające podczas wchodzenia narzędzia w materiał obrabiany. W tym czasie włókna mogą być uginane zamiast odcinane. Badania pokazują, że wystające wiązki włókien prowadzą do znacznie głębszej delaminacji warstwy górnej niż wystające pojedyncze włókna [49]. Należy na wstępie oddzielić wady powstałe na etapie wytworzenia wstępnego zarysu elementu, od wad powstałych na etapie obróbki ubytkowej. Do wad powstałych na etapie produkcji należą głównie pęcherze powietrza, pory, karby, fałdy, zagniecenia, wtrącenia ciał obcych, niekompletne utwardzenie żywicy, pomarszczone warstwy, nieciągłości osnowy i włókien. Ukryte w strukturze materiału wady powstałe na etapie wytwarzania mogą zostać uwidocznione podczas skrawania materiału. Do wad powierzchniowych powstałych po obróbce frezowaniem należy zaliczyć delaminację (rozwarstwienie), mikropęknięcia włókien, deformacje plastyczne, przerwanie włókien, pęknięcie osnowy, utratę spójności pomiędzy włóknami

a osnową, wykruszania się włókien, wykruszanie się osnowy czy degradację termiczną osnowy.

Wady, które zostały zakwalifikowane do tych, które powstały podczas obróbki skrawaniem, można podzielić biorąc pod uwagę dwa główne składniki kompozytu, a mianowicie włókna i osnowę. Do wad powierzchniowych związanych ze wzmocnieniem można zaliczyć delaminację, mikropęknięcia włókien, przerwanie włókien, wykruszanie się włókien, a do wad związanych z osnową można zaliczyć deformacje plastyczne, pęknięcia osnowy, wykruszanie się osnowy, degradację termiczną osnowy. Wadą związaną zarówno z włóknami jak i osnową jest utrata spójności pomiędzy składnikami.

Ocena stanu powierzchni kompozytów o osnowie polimerowej może być przeprowadzana metodami niszczącymi jak i nieniszczącymi. Do badań niszczących zaliczane są badania wytrzymałościowe, procesy degradacji cieplnej, termoutlenianie i fotoutlenianie [127]. Badanie próbek pod obciążeniem [28, 53] ujawnia miejsce pęknięcia, które zawsze występuje w miejscu występowania wady, a wraz ze wzrostem obciążenia dana wada się powiększa. Metody nieniszczące badań stanu powierzchni pozwalają na uzyskanie informacji o wadach, anomaliach lub właściwościach elementu bez pogorszenia jego właściwości użytkowych. Do badań nieniszczących stosowane są metody termowizyjne, ultradźwiękowe [9], obserwacje pod mikroskopem [81], akustyczne, prądów wirowych i radiologiczne [48], które można podzielić na dwie grupy, takie jak metody badań objętościowe i powierzchniowe [127].

Do badania wad w materiale można używać metod bazujących na zmianach barw [39]. Na podstawie odbijania czarnego i białego światła i przechwytywaniu obrazu w specjalnej kamerze powstaje obraz wad powierzchniowych. Dzięki badaniu kompozytów z włóknami węglowymi i szklanymi tą metodą można opracować mapę rozkładu wad na powierzchni materiału. Wykrycie wady występuje w formie ciemniejszych przebarwień na powierzchni badanej próbki. Wykryte wady mogą być spowodowane przez uszkodzenie żywicy i niejednorodność struktury kompozytu. Znaczący wpływ na rozwój wad ma temperatura i wilgotność, których wzrost zwiększa liczbę wad i ich wielkość.

Do badania elementów kompozytowych z włóknami szklanymi i węglowymi można wykorzystywać częstotliwości fal radiowych [87, 120, 134]. Za odbiór, analizę i interpretację fal po przejściu przez materiał odpowiedzialny jest program wykorzystujący metodę elementów skończonych. Fala przetworzona przez program daje obraz graficzny badanej powierzchni [87]. Kolejne badania delaminacji w kompozytach pokazują, że badania analityczne i eksperymentalne wykazują bardzo dobrą zgodność. Obecność wad w postaci rozwarstwień jest widoczna w zmianach częstotliwości fal i ich tłumieniu [120]. Metody oparte na drganiach elementu połączone z analizą modalną dostarczają informacji na temat struktury materiałów kompozytowych [161]. Najważniejszym zadaniem w wykrywaniu uszkodzeń jest znalezienie

poszczególnych mechanizmów, które najlepiej opisują pojedyncze wystąpienie uszkodzenia.

Zastosowanie nieliniowej techniki akustycznej uderzenia pozwala na wykrycie uszkodzeń w materiałach kompozytowych [3]. Występujące uszkodzenia i rozwarstwienia powodują wytwarzanie wokół nich zmian akustycznych.

W pracy naukowej poświęconej badaniom obróbki kompozytów z włóknami węglowymi [50] udowodniono, że występowanie delaminacji zależy od stanu narzędzia i kąta pod jakim skrawane są włókna. Określono zakres kąta ułożenia włókien w stosunku do kierunku ruchu narzędzia, który powoduje brak rozwarstwiania. Badania pozwalają na dobranie procesów frezowania w taki sposób, aby zapobiegać powstawaniu rozwarstwień. Ma to ogromne znaczenie ze względu na oszczędności czasu i kosztów związanych z wytwarzaniem kompozytów polimerowych. W kolejnej pracy naukowej dowiedziono, że wady powierzchniowe są związane z ułożeniem włókien węglowych [57]. Stwierdzono ponadto, że siły skrawania zależą od orientacji włókien. Na tej podstawie wysunięto przypuszczenie, że całkowita siła skrawania może być użyta w celu określenia wpływu parametrów obróbki na powstawanie wad powierzchniowych podczas frezowania kompozytów polimerowych.

1.4. Metoda wykresów i wskaźników rekurencyjnych

1.4.1. Definicja diagramu rekurencyjnego

Rozwój technik komputerowych znacznie poprawił możliwości poznawcze człowieka z zakresu analizy procesów nieliniowych [46, 102, 114, 115]. Początkowo większość badań i analizy danych bazowało na analizie liniowej, co wiązało się z występowaniem bliżej nieokreślonych błędów. W 1987 roku Jean-Pierre Eckmann [23] zaproponował wykres rekurencyjny służący do analizy sygnałów o charakterze nieliniowym. Wykres rekurencyjny bazuje na metodzie współrzędnych opóźnionych.

Biorąc pod uwagę matematyczne podejście, wykres rekurencyjny można opisać wzorem:

$$R_{i,j} = H(\varepsilon - ||\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j||), \quad (1.1)$$

gdzie, i, j są numerami stanów w zrekonstruowanej przestrzeni fazowej, przyjmują one wartości $1, 2, \dots, N$ (N oznacza liczbę stanów). Symbole $\mathbf{x}_i$ i $\mathbf{x}_j$ oznaczają wektory w przestrzeni fazowej. Symbol H oznacza funkcję skokową Heaviside'a, która jest funkcją nieciągłą. Funkcja ta przyjmuje wartość 0 dla ujemnych argumentów oraz wartość 1 dla dodatnich wartości:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < 0 \\ 1 & \text{dla } x \geq 0 \end{cases} . \quad (1.2)$$

Wyrażenie $\|x\|$ jest to norma (najczęściej euklidesowa lub maksymalna) wektora x w zrekonstruowanej przestrzeni fazowej, a symbol ε jest to parametr odcięcia (promień poszukiwań), który jest zawsze liczbą nieujemną.

Wykres rekurencyjny jest tablicą punktów i, j przedstawionych graficznie za pomocą białych i czarnych kropek (zero-jedynkowa kwadratowa macierz). Otrzymany diagram jest symetryczny względem głównej przekątnej macierzy. Punkty w postaci białych i czarnych kropek oznaczają elementy przyjmujące odpowiednio wartości 0 i 1. Punkt jest widoczny na wykresie rekurencyjnym, gdy x_j jest wystarczająco blisko elementu x_i .

Dobór parametru odcięcia ε jest bardzo istotny. Gdy odległość między x_i i x_j jest mniejsza niż wartość ε to $R_{ij} = 1$, w przeciwnym wypadku $R_{ij} = 0$.

1.4.2. Metodyka tworzenia diagramu rekurencyjnego

Diagram rekurencyjny otrzymuje się z analizy sygnału przez rekonstrukcję wektora stanu w m -wymiarowej przestrzeni za pomocą tzw. metody opóźnień. Rekonstrukcja wiąże się z doбором wymiaru opóźnienia d , wymiaru zanurzenia m i parametru odcięcia ε .

Rekonstrukcja wektora x w przestrzeni fazowej utworzonej dla nowych współrzędnych tzw. opóźnionych odbywa się za pomocą metody opóźnień [115]. Zrekonstruowany wektor x badanego sygnału opisany jest wzorem:

$$x = (x_i, x_{i+d}, x_{i+2d}, \dots, x_{i+(m-1)d}), \quad (1.3)$$

gdzie: x_i oznacza i -tą współrzędną w danym przebiegu czasowym $x(t)$, symbol d oznacza wymiar opóźnienia (czas opóźnienia), symbol m oznacza wymiar zanurzenia.

Zrekonstruowany wektor x zależy od doboru wielkości wymiaru opóźnienia d , który może być wyznaczany za pomocą dwóch podstawowych metod. W pierwszej metodzie mającej zastosowanie przede wszystkim do układów liniowych [24], do wyznaczenia wymiaru d należy się posłużyć funkcją autokorelacji $C(d)$:

$$C(d) = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^{N-d} (x_i - \bar{x})(x_{i+d} - \bar{x}). \quad (1.4)$$

We wzorze (1.4) x_i oznacza i -tą współrzędną w przebiegu czasowym $x(t)$, $\bar{x}$ oznacza wartość średnią ze wszystkich współrzędnych, N oznacza liczbę punktów pomiarowych.

Drugą metodą (częściej używaną) jest metoda informacji wzajemnej (z ang. Average Mutual Information – AMI). Metoda AMI ma na celu określenie zawartości uśrednionej ilości informacji w jednym stanie, która może być wynikiem przewidywania (predykcji) z informacji znajdującej się w poprzednim stanie [139]:

$$AMI = - \sum_{ij} p_{ij}(d) \ln \frac{p_{ij}(d)}{p_i p_j}, \quad (1.5)$$

gdzie: p_i określa prawdopodobieństwo znalezienia wartości czasowej układu w i -tym przedziale, p_{ij} określa prawdopodobieństwo, że obserwacja danej chwili czasu t należy do i -tego przedziału [139].

Wartość opóźnienia d przyjmuje się zwykle jako miejsce pierwszego minimum na wykresie funkcji AMI (Average Mutual Information). [37, 114]. Dobór wymiaru opóźnienia jest to pierwszy etap potrzebny do rekonstrukcji wektora. Jest to zwykle wartość pierwszego minimum lokalnego funkcji AMI. Istotą AMI jest oszacowanie ile średnio informacji zawartej w jednym stanie, może być wynikiem predykcji z informacji zawartej w stanie poprzednim. Zbyt mała wartość d powoduje, że w zrekonstruowanym wektorze x wartości pomiędzy współrzędnymi x_i i x_{i+1} będą nie do odróżnienia. Zbyt duża wartość d powoduje, że jeden punkt sygnału będzie zakłócał kolejny [139].

Następnym etapem tworzenia diagramu rekurencyjnego jest dobór wymiaru zanurzenia m oszacowanego za pomocą metody najbliższych fałszywych sąsiadów (ang. False Nearest Neighbours – FNN). Wymiar zanurzenia m powinien być tak dobrany, aby nie uwzględniać fałszywych punktów na diagramie rekurencyjnym. W przypadku, gdy wymiar zanurzenia jest za mały, punkty mogą znajdować się zbyt blisko, co może powodować zmianę struktury wykresu rekurencyjnego [67].

Jeśli w m -wymiarach oznaczy się r -tego najbliższego sąsiada $x(i)$ przez $x^{(r)}(i)$, to z równania (1.3) (równanie opisujące zrekonstruowany wektor x) odległość pomiędzy punktem $x(i)$ i jego sąsiadem opisana jest wzorem:

$$R_m^2(i, r) = \sum_{k=0}^{m-1} [x_{(i+md)} - x^{(r)}_{(i+md)}]^2. \quad (1.6)$$

Zmieniając wymiar zanurzenia m na wymiar $m+1$ koryguje się każdy z wektorów x . Nowa skoordynowana współrzędna ma postać $x(i+md)$. Skoordynowana odległość pomiędzy $x(i)$ i jego r -tym najbliższym sąsiadem opisana jest wzorem:

$$R_{m+1}^2(i, r) = R_m^2(i, r) + [x_{(i+md)} - x^{(r)}_{(i+md)}]^2. \quad (1.7)$$

Naturalnym kryterium do znalezienia błędów wyznaczenia wymiaru zanurzenia jest zwiększenie odległości pomiędzy x i $x^r(i)$.

Kryterium to określa fałszywego sąsiada, dla którego:

$$\frac{|x_{(i+md)} - x_{(i+md)}^{(r)}|}{R_m(i, r)} > R_{tol}, \quad (1.8)$$

gdzie: R_{tol} jest pewną wartością progową.

Dobór odpowiedniej wartości parametru odcięcia ε jest bardzo ważny ze względu na liczbę otrzymanych punktów na wykresie rekurencyjnym. Jeśli wartość progowa ε jest zbyt mała, może nie być prawie żadnych punktów rekurencji i struktura wykresu rekurencyjnego będzie bezużyteczna [149]. Z kolei, gdy liczba punktów jest za duża, to prowadzi to do pojawiania się fałszywej rekurencji lub punktów sztucznych, które zniekształcają obraz i strukturę, uniemożliwiając ich prawidłową analizę. Ważne jest, aby wybrać wartość ε jak najmniejszą, mając również na uwadze szumy w analizowanym sygnale.

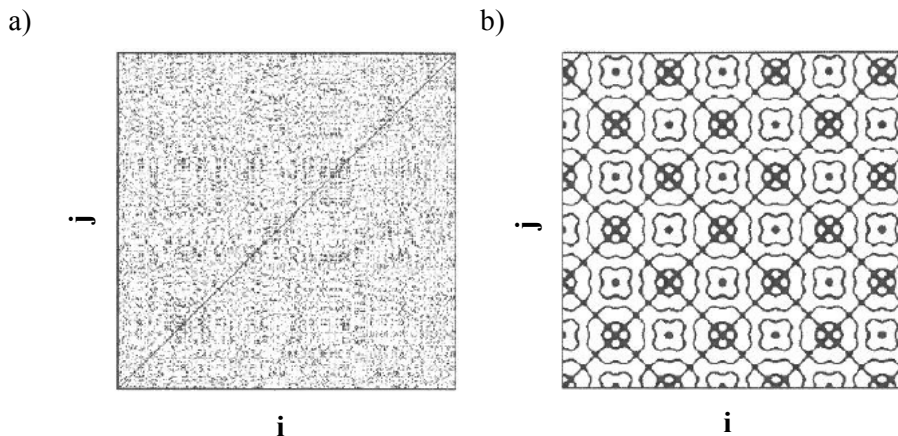
W literaturze przedstawiono kilka zasad wyboru parametru odcięcia [29, 131, 159]. Na przykład Zbilut [159] proponuje, aby przyjąć małą wartość progową, która w przybliżeniu stanowi 1% rekurencji.

1.4.3. Struktury wykresów rekurencyjnych

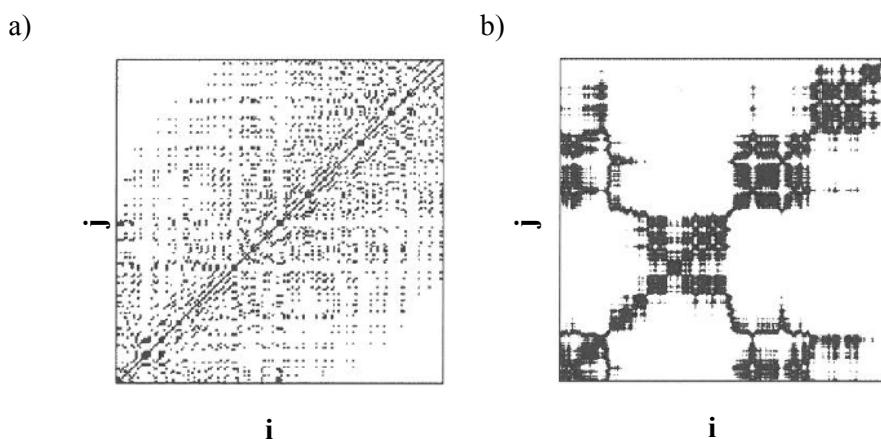
Wykresy (diagramy) rekurencyjne mogą składać się z pojedynczych punktów i tekstury tworzonej przez linie pionowe i poziome. Sygnały okresowe na wykresie przedstawione są zwykle za pomocą linii ukośnych lub powtarzających się symetrycznych struktur.

Biorąc pod uwagę różnorodność struktur występujących na wykresach rekurencyjnych, należy podzielić je na odpowiednie grupy [83, 139]. Spośród powstających struktur rekurencyjnych można wyróżnić następujące grupy:

- jednorodne: występujące dla przebiegów stacjonarnych, wizualnie wykres w całym swoim przebiegu jest jednorodny (rys. 1.3a),
- okresowe i quasi-okresowe: występują na nich struktury, które się powtarzają co pewien okres lub w dużym przybliżeniu (rys. 1.3b),
- dryfujące: występujące dla przebiegów niestacjonarnych (rys. 1.4a),
- poszarpane: na wykresie występują obszary (białe obszary) odróżniające się od całego wykresu, są one spowodowane zmianami występującymi w układzie (rys. 1.4b).



Rys. 1.3. Wykres rekurencyjny o strukturze: a) jednorodnej, b) okresowej [139]



Rys. 1.4. Wykres rekurencyjny o strukturze: a) dryfującej, b) poszarpanej [139]

1.4.4. Wskaźniki rekurencyjne

Diagramy rekurencyjne są w stanie dostarczyć tylko jakościowych informacji o analizowanym sygnale. Wskaźniki rekurencyjne wprowadzone przez Zbiluta i Webbera [140, 158], a następnie rozszerzone (o nowe wskaźniki) przez Marwana [90], w połączeniu z wykresami rekurencyjnymi, są zaawansowanym narzędziem do analizy nieliniowych sygnałów.

Opis wykresów rekurencyjnych za pomocą wskaźników rekurencyjnych nazwano techniką ilościowej analizy, a same wskaźniki nazywane są kwantyfikatorami rekurencyjnymi (RQA).

Spośród wielu wskaźników rekurencyjnych można wyróżnić:

- współczynnik rekurencji (recurrence rate – RR) [90, 167], określający stosunek między rekurencyjnymi stanami, a wszystkimi stanami na wykresie (miara gęstości punktów rekurencyjnych na wykresie rekurencyjnym), opisany jest wzorem:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}, \quad (1.9)$$

N – liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
i, j – numer stanu w zadanej przestrzeni,

- determinizm (DET) [90, 93, 167], procentowy udział rekurencyjnych stanów, które tworzą przekątne segmenty liniowe na wykresie RP (równoległe do głównej przekątnej):

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l \cdot P(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}, \quad (1.10)$$

N – liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
i, j – numer stanu w zadanej przestrzeni,
l – długość linii przekątnej,
P(l) – histogram długości linii przekątnych,

- średnia długość przekątnej (averaged diagonal length – L), występująca na diagramie rekurencyjnym równoległe do głównej przekątnej [90, 167], opisana jest wzorem:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l \cdot P(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P(l)}, \quad (1.11)$$

N – liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
l – długość linii przekątnej,
P(l) – histogram długości linii przekątnych,

- najdłuższa długość linii przekątnej (length of longest diagonal line – $L_{\max}$) [90, 91, 93, 167] w strukturze RP, z wyłączeniem głównej linii przekątnej, równoległa do głównej przekątnej, definiowana jest wzorem:

$$L_{\max} = \max (\{l_i; i = 1 \dots N_l\}), \quad (1.12)$$

N_l	– liczba linii przekątnych,
i	– numer stanu w zadanej przestrzeni,
l_i	– długość i -tej linii przekątnej,

- odwrotnością najdłuższej linii przekątnej jest dywergencja (DIV) [40, 90, 167], powiązana z wykładnikiem/wykładnikami Lapunowa, która określa tempo z jakim rozchodzą się trajektorie, opisana jest wzorem:

$$DIV = \frac{1}{L_{\max}}, \quad (1.13)$$

- entropia (ENTR) [40, 90, 167], określa prawdopodobieństwo długości segmentów liniowych równoległych do głównej przekątnej diagramu rekurencyjnego, przedstawiana jest za pomocą wzoru:

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l), \quad (1.14)$$

N	– liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
l	– długość linii przekątnej,
$p(l)$	– prawdopodobieństwo rozkładu długości linii diagonalnych,

Entropia (entropia Shannona) jest średnią miarą informacji związaną z rozkładem prawdopodobieństwa długości segmentów liniowych na diagramie RP równoległych do głównej przekątnej. Wielkość entropii charakteryzuje złożoność wykresu rekurencyjnego ze względu na linie diagonalne. Wysoka entropia jest zwykle typowa dla zachowań periodycznych układu dynamicznego, niska entropia odpowiada układom chaotycznym, a bardzo niska (zblizona do zera) nieskorelowanemu szumowi.

- współczynnik pomiędzy punktami rekurencji tworzących pionowe linie na wykresie RP, a całym zbiorem punktów rekurencji nazywany jest laminarnością (LAM) [40, 90, 91, 167]:

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v \cdot P(v)}{\sum_{v=1}^N v \cdot P(v)}, \quad (1.15)$$

N	– liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
v	– długość linii pionowej,
$P(v)$	– histogram długości linii pionowych,

- średnia długość linii pionowych (trapping time – TT) [90, 167], która pokazuje jak długo system występuje w danym stanie:

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v \cdot P(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P(v)}, \quad (1.16)$$

- N – liczba analizowanych punktów w przestrzeni fazowej,
v – długość linii pionowej,
P(v) – histogram długości linii pionowych,

- najdłuższa długość linii pionowej (length of longest vertical line $V_{\max}$) [90, 167]:

$$V_{\max} = \max(\{v_i; i = 1 \dots N_v\}), \quad (1.17)$$

- i – numer stanu w zadanej przestrzeni,
v – długość linii pionowej,
 N_v – liczba pionowych linii na wykresie rekurencyjnym,

- czas rekurencji 1 (T_1) [40] opisany jest wzorem:

$$T_1 = \left| \{ \{i, j: \bar{x}_i, \bar{x}_j\} \in R_i \} \right|, \quad (1.18)$$

- i, j – numer stanu w zadanej przestrzeni,
 $\bar{x}_i$ – i-ty wektor,
 $\bar{x}_j$ – j-ty wektor,
 $\{\bar{x}_i, \bar{x}_j\} \in R_i$ – punkty rekurencji należące do wektora $\bar{x}_i$ i do $\bar{x}_j$,

- czas rekurencji 2 (T_2) [40] opisany jest wzorem:

$$T_2 = \left| \{ \{i, j: \bar{x}_i, \bar{x}_j\} \in R_i, \quad \bar{x}_j \notin R_i \} \right|, \quad (1.19)$$

- i, j – numer stanu w zadanej przestrzeni,
 $\bar{x}_i$ – i-ty wektor,
 $\bar{x}_j$ – j-ty wektor,
 $\{\bar{x}_i, \bar{x}_j\} \in R_i$ – punkty rekurencji należące do wektora $\bar{x}_i$ i do $\bar{x}_j$
 $\bar{x}_j \notin R_i$ – punkty rekurencji nie należące do wektora $\bar{x}_j$,

- znormalizowana entropia rozkładu rekurencji (recurrence period density entropy – RPDE) [93] opisana jest wzorem :

$$RPDE = -\frac{1}{\ln v_{MAX}} \sum_{v=1}^{v_{MAX}} H_v(v) \ln H_v(v), \quad (1.20)$$

V – długość linii pionowej,
 $H_v(v)$ – rozkład (zastosowany w celu uzyskania entropii czasu rekurencji) linii pionowych,

- clustering coefficient – CC opisany jest wzorem:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{j,k}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}{\sum_{j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}}}{\sum_{j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}}, \quad (1.21)$$

$\sum_{j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}$ – lokalny współczynnik rekurencji (recurrence rate),
 i, j – numer stanu w zadanej przestrzeni,
 k – parametr, który określa się jako liczbę sąsiadów,
 m – wymiar zanurzenia,
 ε – parametr odcięcia,
 $R_{j,k}$ – ilość sąsiadów wokół j -tego punktu na wykresie rekurencyjnym,
 $R_{k,i}$ – ilość sąsiadów wokół i -tego punktu na wykresie rekurencyjnym,

- transitivity – TRANS [93], charakteryzuje prawdopodobieństwo występowania punktów w sąsiedztwie:

$$TRANS = \frac{\sum_{i,j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{j,k}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}{\sum_{i,j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}, \quad (1.22)$$

i, j – numer stanu w zadanej przestrzeni,
 k – parametr, który określa się jako liczbę sąsiadów,
 m – wymiar zanurzenia,
 ε – parametr odcięcia,
 $R_{j,k}$ – ilość sąsiadów wokół j -tego punktu na wykresie rekurencyjnym,

$R_{k,i}$ – ilość sąsiadów wokół i -tego punktu na wykresie rekurencyjnym.

Wskaźniki rekurencyjne można analizować za pomocą dwóch głównych metod [79]. Pierwsza z nich polega na założeniu, że parametr odcięcia ε jest stały. Druga metoda polega na tym, że współczynnik rekurencji RR jest stały, a zmienia się parametr odcięcia ε tak, aby zapewnić stałą wartość RR.

1.4.5. Zastosowanie metody wykresów i wskaźników rekurencyjnych

Metoda wykresów rekurencyjnych w skrócie oznaczana jako RP jest metodą szeroko stosowaną [62] w różnych obszarach przemysłu [36, 64], medycyny [60, 94, 132], finansów i wielu innych dziedzinach działalności człowieka.

Za pomocą wykresów i wskaźników rekurencyjnych istnieje możliwość badania procesu frezowania [71, 86], toczenia [84] oraz monitorowania stanu narzędzi [83]. Metody te wykorzystywane są również do badania stabilności procesu frezowania [68, 116].

Analiza modalna czyli technika badania własności dynamicznych, takich jak częstość drgań własnych [63], postacie drgań i wartość współczynnika tłumienia obiektów mechanicznych, polega na wzbudzaniu drgań i oczekiwaniu na odpowiedź do oszacowania modalnych i fizycznych parametrów. Wykresy rekurencyjne i technikę ilościowej analizy danych wykorzystywano do analizy częstotliwości drgań na przykładzie badań nieuszkodzonych i popękanych płyt aluminiowych [59, 63].

Nowym podejściem do wykrywania uszkodzenia zmęczeniowego podczas wczesnych etapów jego powstawania jest wykorzystanie analizy wahań prądu [44] i ich analiza za pomocą wykresów rekurencyjnych. W artykule [85] G. Litak przeprowadza ocenę popękanego i nieuszkodzonego wirnika za pomocą wzbudzenia magnetycznego wykorzystując metody rekurencyjne [85]. Wyznaczając wskaźnik rekurencji (RR) stwierdzono, że może on posłużyć do oceny uszkodzenia elementu obrotowego. Do wykrywania powstającego uszkodzenia, oprócz wskaźnika rekurencji (RR), można wykorzystać również determinizm (DET). Oba wskaźniki wykazują bardzo dużą czułość podczas badania uszkodzonych elementów [99]. Metody rekurencyjne są wykorzystywane przy analizie różnych układów dynamicznych. W tym celu odpowiedzi układów (sygnały drgań) są analizowane metodami rekurencyjnymi. [38, 58, 61].

Wśród wielu defektów w elementach najbardziej niepożądaną wadą materiałową jest korozja międzykrystaliczna. Wykrywanie dynamiki korozji międzykrystalicznej przy pomocy sygnałów elektrochemicznych i analizę wyników za pomocą wykresów rekurencyjnych w początkowym stadium rozwoju przedstawiono w pracy [41]. Wskaźniki rekurencji mogą być użyte do

oceny zużycia powierzchni przyłożenia frezu [96]. Ocena zużycia narzędzia pozwala na określenie jego stanu i przydatności do dalszego stosowania.

Poza stosowaniem wykresów i wskaźników rekurencyjnych do wykrywania wad i uszkodzeń w materiałach [14, 15] znajdują one również zastosowanie w różnych innych dziedzinach wiedzy. Technikę RP i RQA można wykorzystać przy analizie prędkości obrotowej wału korbowego w silnikach Diesla [88] oraz analizować pracę silnika benzynowego [56]. Podobnie jak w przypadku obróbki skrawaniem, tak i w przypadku silników metody wskaźników i wykresów rekurencyjnych mogą być wykorzystywane do opracowania skutecznych metod kontroli. W branży motoryzacyjnej, metod rekurencyjnych można użyć do określania prędkości, ciężaru i klasy pojazdów poruszających się po drogach wykorzystując czujniki rejestrujące naciski osi na podłoże, odległości między osiami, liczbę osi, długość i prędkość pojazdu [46].

Obserwacja zakresu zmian klimatycznych i stosowanie technik rekurencyjnych do analizy danych klimatycznych [92] pozwala znaleźć relację np. między zjawiskiem El Nino (zjawisko, w którym na powierzchni wody w strefie równikowej Pacyfiku utrzymuje się wysoka temperatura), a padającymi deszczami w pewnych obszarach Ziemi.

W zakresie medycyny, technik rekurencyjnych można używać do analizy zmienności rytmu serca [94]. Badając parametry pracy serca można wykryć przejścia pomiędzy stanami chaotycznymi i okresowymi, ale także zidentyfikować stany laminarne. Dzięki temu można wykryć niebezpieczeństwo zanim wystąpi sytuacja zagrażająca życiu.

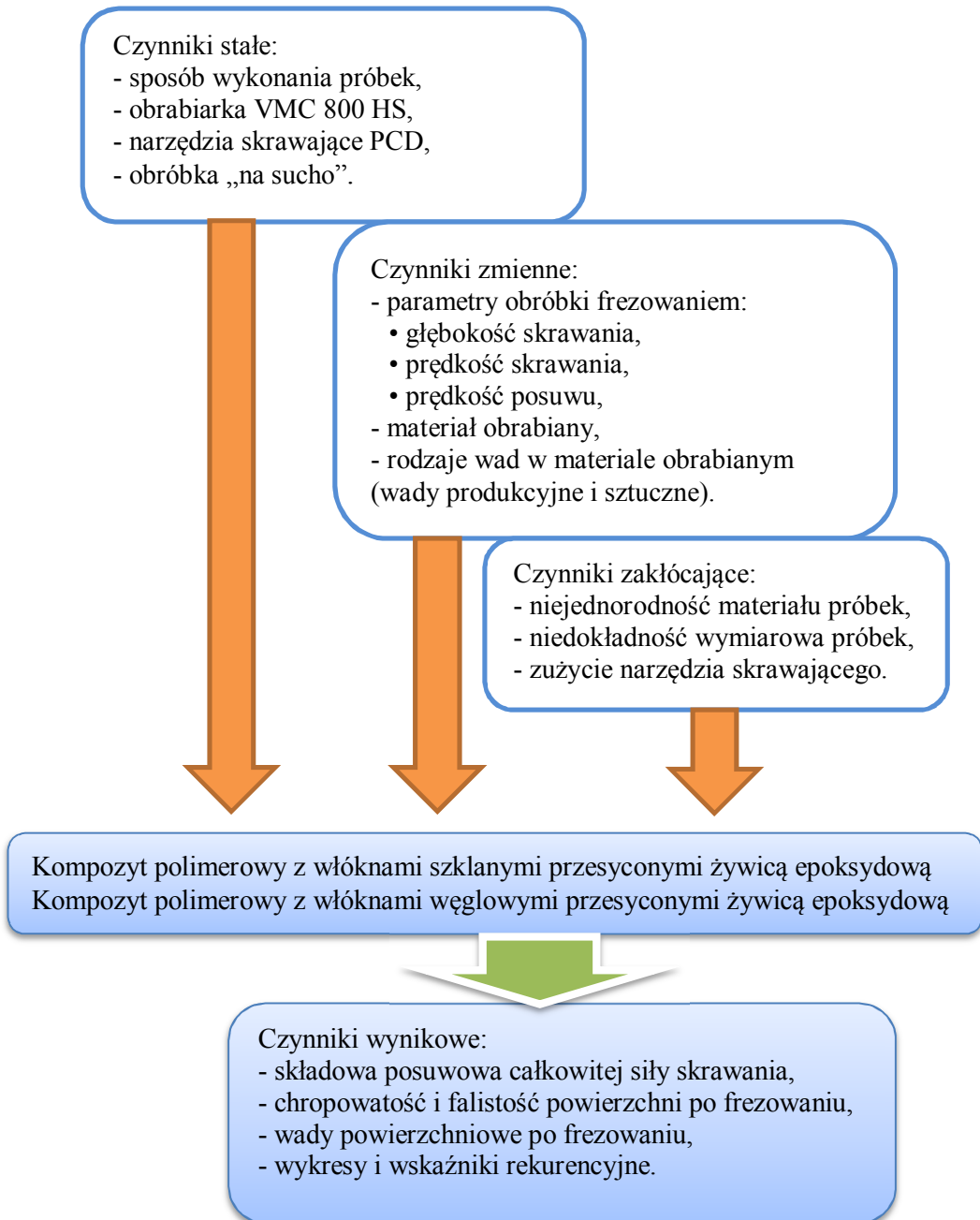
Na podstawie powyższych przykładów można stwierdzić, że metody rekurencyjne są przydatne do analizy wybranych procesów. Wspólną cechą wszystkich zjawisk jest bardziej lub mniej okresowa powtarzalność, dzięki której można przewidywać zjawiska.

2. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

2.1. Obiekt i zakres badań

Badania przeprowadzono w celu określenia wpływu warunków frezowania na strukturę geometryczną powierzchni kompozytów polimerowych. Strukturę geometryczną powierzchni określano za pomocą pomiarów parametrów chropowatości, falistości i wad powierzchniowych. Powierzchnie kompozytów polimerowych narażone na powstawanie wad po frezowaniu badano za pomocą mikroskopu. Przeprowadzono próby wykrycia wad celowo wprowadzonych do materiału kompozytowego oraz wad produkcyjnych. Składowe posuwowe całkowitej siły skrawania zarejestrowane podczas prób frezowania materiału z wadami oraz bez wad analizowano przy użyciu wykresów i wskaźników rekurencyjnych. Badania miały na celu wyselekcjonowanie wskaźników, które posłużą do identyfikacji uszkodzeń na powierzchni kompozytów polimerowych. Wszystkie stanowiska badawcze znajdują się w Katedrze Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej. Próbkę w postaci kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi przesyconymi żywicą epoksydową oraz kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową frezowano za pomocą narzędzi przeznaczonych do obróbki materiałów trudnoobrabialnych.

W wyniku wcześniej przeprowadzonych badań wstępnych sporządzono (rys. 2.1) zbiór czynników stałych i zmiennych, które przy udziale niepożądanych czynników zakłócających pozwoliły otrzymać czynniki wynikowe.



Rys. 2.1. Model obiektu badań.

2.2. Metodyka badań

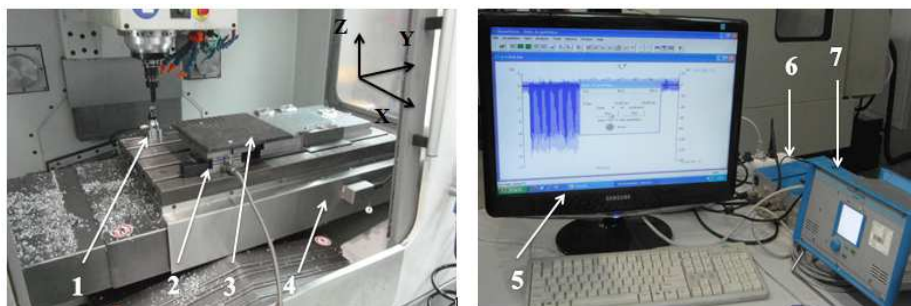
2.2.1. Materiały i narzędzia stosowane w badaniach

W badaniach wykorzystano kompozyty polimerowe z włóknami szklanymi przesycane żywicą epoksydową, określone symbolem EGL/EP 3200-120 oraz kompozyty polimerowe z włóknami węglowymi przesycane żywicą epoksydową, określone symbolem GR/EP 985-GF-3070. Wszystkie próbki występowały w postaci płytek o wymiarach 300 mm x 300 mm x 15 mm. Każda z próbek o grubości 15 mm składała się z 50 arkuszy prepregów ułożonych naprzemiennie w układzie 0-90°. Próbki powstały przy zachowaniu zasad utrzymywania czystości, tzn. ilości cząstek stałych na 1 m³ nie przekraczającej 10000 oraz parametrów otoczenia takich jak temperatura (w zakresie od 18°C do 30°C) i wilgotność (nie większa niż 60%). Po złożeniu arkuszy w próbki, włożono je do autoklawu i wygrzewano przez 2 godziny w temperaturze 177°C (+/- 2°C) i ciśnieniu 0,3 MPa. Po wyjęciu i ostygnięciu, próbki poddano operacji obcięcia wypływek żywicy i pozostałości włókien.

Obróbkę frezowaniem przeprowadzono za pomocą frezów składanych o średnicy ϕ 20 mm przeznaczonych do obróbki kompozytów. Frezy składane o symbolu 20A02R028A20ED10 firmy Kennametal składały się z korpusu oraz dwóch wymiennych jednoostrzowych płytek skrawających o symbolu EDCT10T304PDFR-PCD (oznaczenie według ISO) firmy Kennametal pokrytych diamentem polikrystalicznym o symbolu KD1410.

2.2.2. Warunki technologiczne frezowania kompozytów polimerowych i pomiary wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania

W początkowym etapie badań frezowano kompozyty z włóknami szklanymi i węglowymi na pionowym centrum obróbkowym Avia – VMC 800 HS. Badania wartości składowe posuwowej całkowitej siły skrawania przeprowadzono przy użyciu dynamometru Kistler 3D (typ 9257B) podłączonego do wzmacniacza Kistler typ 5070. Sygnały zapisywano za pomocą oprogramowania Dynowave (typ 2825A) przy użyciu karty akwizycji danych Dynoware (typ 5697A). Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku. 2.2.



Rys. 2.2. Schemat stanowiska obróbkowego do frezowania i pomiarów składowych posuwowych całkowitej siły skrawania: 1 – narzędzie skrawające, 2 – dynamometr Kistler 3D (typ 9257B), 3 – próbka z kompozytu polimerowego, 4 – pionowe centrum obróbkowe Avia VMC800HS, 5 – oprogramowanie Dynoware typ 2825A, 6 – karta akwizycji danych Dynoware typ 5697A, 7 – wzmacniacz Kistler typ 5070.

Obróbkę frezowaniem czołowym przeprowadzono na centrum obróbkowym wzdłuż osi „X” zgodnej z kierunkiem ruchu posuwowego. Frezowanie przeprowadzono bez udziału medium chłodzącego. Otrzymaną powierzchnię po frezowaniu badano w celu oceny wpływu parametrów skrawania na jej jakość. Zebrane wyniki pomiarów wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania zostały poddane analizie metodami diagramów rekurencyjnych i analizy RQA.

Obróbka frezowaniem wybranych kompozytów polimerowych wiązała się z doбором odpowiedniego narzędzia i parametrów skrawania. Na podstawie wstępnych badań i analizy literatury dobrano parametry frezowania, które pozwalały określić ich wpływ na jakość powierzchni oraz jednocześnie nie narażały narzędzia na zniszczenie lub przegrzanie. W tabeli 2.1 zestawiono parametry frezowania użyte do badań.

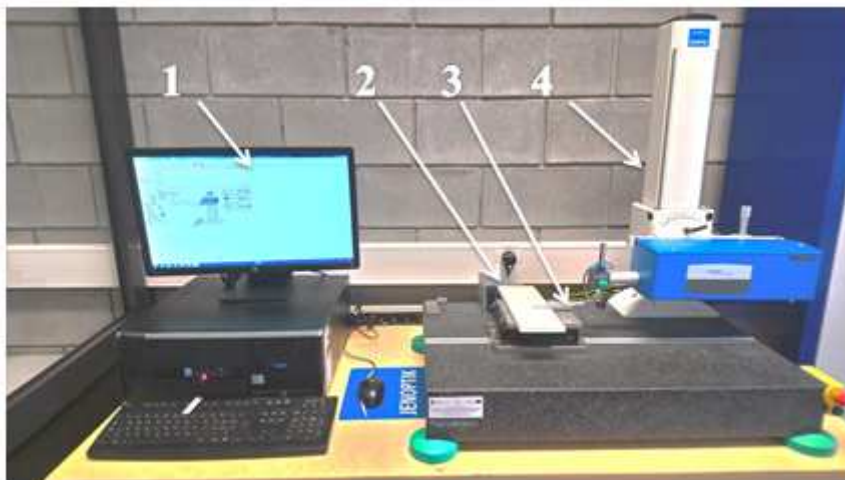
Tabela 2.1. Zestawienie parametrów frezowania dla kompozytów polimerowych

Lp	a_p [mm]	f_z [mm/ostre]	v_c [m/min]
1	2,5	0,2	250
2	2	0,2	250
3	1,5	0,2	250
4	1	0,04	250
5	1	0,1	250
6	1	0,2	250
7	1	0,4	250
8	1	0,6	250
9	1	0,2	50
10	1	0,2	100
11	1	0,2	350
12	1	0,2	500
13	0,5	0,2	250

2.2.3. Badania chropowatości i falistości powierzchni po frezowaniu

Chropowatość i falistość powierzchni są podstawowymi wielkościami stosowanymi w analizie struktury geometrycznej powierzchni po obróbce skrawaniem. Parametry chropowatości i falistości pozwalają określić jakość powierzchni po frezowaniu.

Badania struktury geometrycznej powierzchni oraz topografii 3D przeprowadzono za pomocą urządzenia T8000RC 120-140 firmy Hommel-Etamic (rys. 2.3).

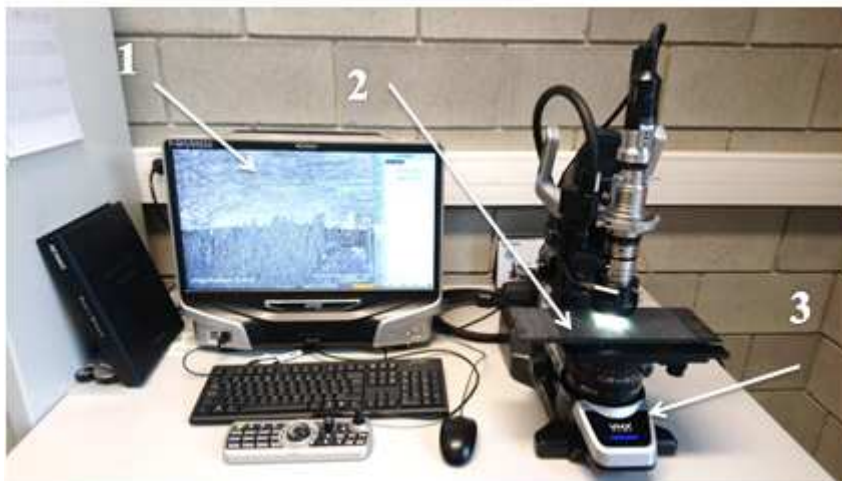


Rys. 2.3. Schemat stanowiska do pomiaru chropowatości, falistości i topografii badanych powierzchni: 1 – stanowisko komputerowe, 2 – próbka z kompozytu polimerowego, 3 – końcówka pomiarowa, 4 – urządzenie Hommel-Etamic T8000RC 120-140

Urządzenie umożliwia wyznaczenie parametrów chropowatości i falistości powierzchni wg PN-EN ISO 4287:1998. Mierzono następujące parametry chropowatości: R_a (średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości), R_z (największa wysokość profilu chropowatości), R_{sk} (współczynnik asymetrii profilu chropowatości), R_{ku} (współczynnik nachylenia profilu chropowatości) oraz parametry falistości: W_a (średnia arytmetyczna rzędnych profilu falistości), W_z (największa wysokość profilu falistości), W_{sk} (współczynnik asymetrii profilu falistości) oraz W_{ku} (współczynnik nachylenia profilu falistości). Poza parametrami chropowatości i falistości można również uzyskać topografie frezowanych powierzchni wraz z parametrami 3D struktury geometrycznej (wg PN-EN ISO 25178-2:2012) S_a (średnia arytmetyczna wysokość powierzchni), S_z (maksymalna wysokość powierzchni), S_p (maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni) i S_v (maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni). Badano powierzchnię o wymiarach 4,8 mm x 4,8 mm, przyjęto długość odcinka elementarnego równą 0,8 mm i dokładność 0,01 μm .

2.2.4. Badania wad powierzchniowych

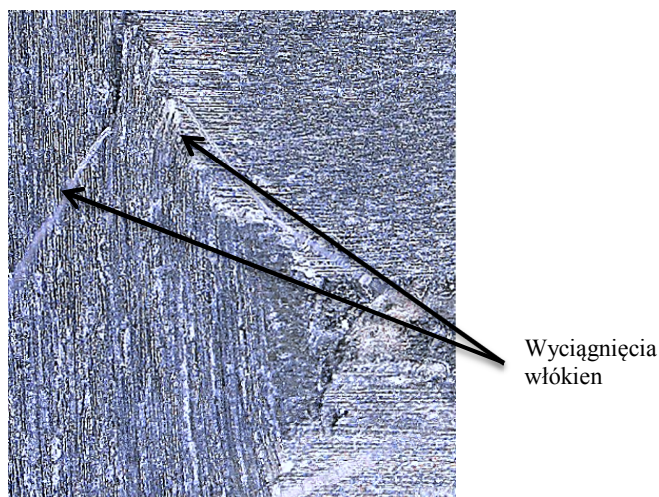
Niejednorodność struktury kompozytów polimerowych i występujące wady obserwowano za pomocą cyfrowego mikroskopu VHX-5000 (rys. 2.4) przy 100-krotnym powiększeniu, ze zwróceniem szczególnej uwagi na wady powierzchniowe.



Rys. 2.4. Schemat stanowiska do obserwacji powierzchni po obróbce frezowaniem: 1 – stanowisko komputerowe, 2 – próbka z kompozytu polimerowego, 3 – cyfrowy mikroskop VHX-5000

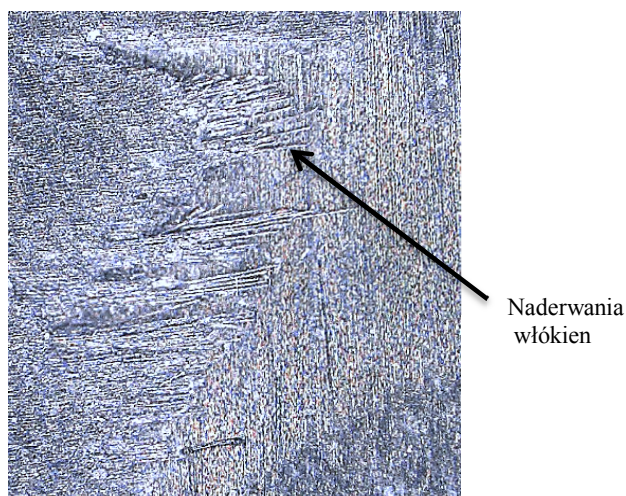
Wady występujące w kompozytach polimerowych można klasyfikować przyjmując różne kryteria. Z uwagi na najczęściej występujące wady w postaci wyciągnięć i naderwań włókien, wykruszeń osnowy, wykruszeń na granicy włókien i osnowy przyjęte zostało kryterium kształtu powstającej wady.

Wada w postaci wyciągnięć włókien (rys. 2.5) występująca najczęściej w kompozytach CFRP charakteryzuje się wystającymi znacznie ponad powierzchnię podłużnymi pojedynczymi włóknami, które podczas frezowania zostały odspojone od materiału.



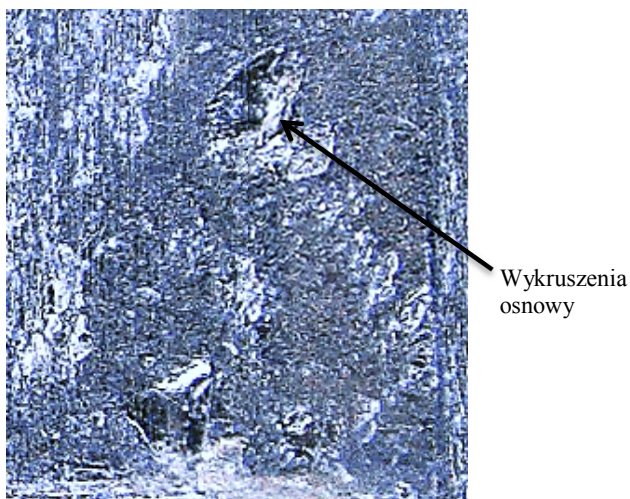
Rys. 2.5. Wada w postaci wyciągnięć włókien

Innym rodzajem wad, związanych ze wzmocnieniem, powstających podczas frezowania kompozytów CFRP, są naderwania włókien. Za taką wadę uznana została niedoskonałość, która charakteryzuje się przeciętymi, podłużnymi włóknami odspojonymi od osnowy (niewystającymi ponad powierzchnię materiału). Wygląd takiej wady świadczy o tym, że po obróbce nastąpiło osłabienie połączenia włókno-osnowa. Ten rodzaj wad przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Wada w postaci naderwań włókien

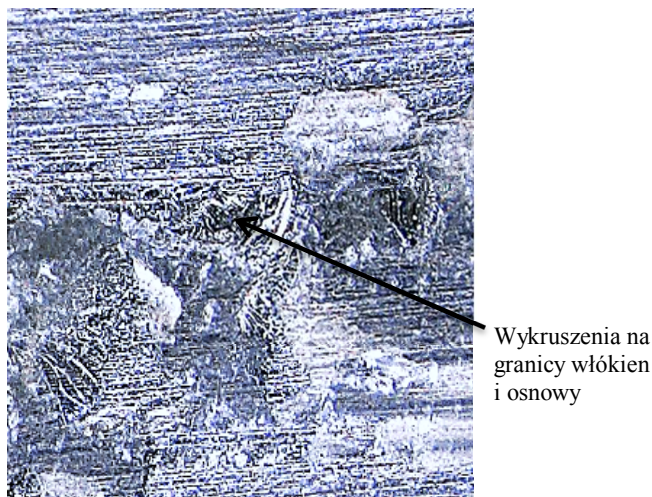
Na powierzchni materiałów kompozytowych GFRP i CFRP występują również wykruszenia osnowy. Są to najczęściej występujące wady powierzchniowe. Ich charakterystyczną cechą jest zróżnicowany kształt, ale w większości zbliżony do wieloboku lub okręgu. Występują one na powierzchni osnowy pomiędzy wzmocnieniami. Przykład wykruszenia osnowy przedstawiono na rysunku 2.7. Tego rodzaju wady to „niedoskonałości”, których „spód” znajduje się poniżej powierzchni materiału.



Rys. 2.7. Wada w postaci wykruszeń osnowy

Wykruszenia na granicy włókien i osnowy, przedstawione na rysunku 2.8, są to wady o kształcie zbliżonym do wykruszeń samej osnowy, ale znajdują się na granicy włókien i osnowy. Charakteryzują się podobnymi wymiarami jak wykruszenia osnowy.

W badaniach wykruszeń osnowy i wykruszeń na granicy włókien i osnowy, „niedoskonałości” były posypywane proszkiem o barwie kontrastującej z badanym rodzajem materiału kompozytowego. Pozwoliło to, przy użyciu mikroskopu (mikroskop posiada funkcję zliczenia pól o różnych barwach), na wyznaczenie udziałów procentowych tego rodzaju wad na rozpatrywanej powierzchni.



Rys. 2.8. Wada w postaci wykruszeń na granicy włókien i osnowy

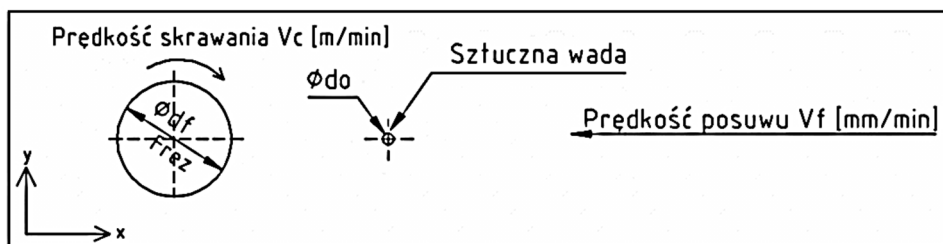
Scharakteryzowane wady zbadano, a wyniki opisano w rozdziale trzecim. Wady w postaci wyciągnięć włókien, naderwań włókien, wykruszeń osnowy i wykruszeń na granicy włókien i osnowy poddano obserwacjom pod mikroskopem. Wykruszenia osnowy i wykruszenia na granicy włókien i osnowy to wady, które można poddać badaniom za pomocą metod rekurencyjnych. Z tego względu „zasymulowano” tego rodzaju wady za pomocą otworów, aby zbadać ich wymiar możliwy do wykrycia. Następnie przeprowadzono badania wad produkcyjnych. Udziały przekroju poprzecznego wykrytych otworów w przekroju warstwy usuwanej zostały przedstawione i wyjaśnione w rozdziale czwartym, w podrozdziałach dotyczących badań za pomocą metod rekurencyjnych.

2.2.5. Metodyka badań możliwości wykrywania wad w procesie frezowania kompozytów

Przeprowadzono badania frezowania kompozytów polimerowych na bazie włókna szklanego i węglowego z wadami sztucznymi w postaci otworów o różnych średnicach i głębokościach. Badania miały na celu określenie średnicy i głębokości wady, jaką można wykryć za pomocą wykresów i wskaźników rekurencyjnych. Badania wykonano przy stałej głębokości skrawania $a_p = 2$ mm, posuwie 0,2 mm/ostrze i prędkości skrawania 250 m/min. Średnice badanych wad sztucznych wynosiły $\phi 0,4$ mm; $\phi 0,6$ mm; $\phi 0,8$ mm; $\phi 1$ mm; $\phi 1,2$ mm; $\phi 1,5$ mm; $\phi 1,8$ mm; $\phi 2$ mm; $\phi 3$ mm; $\phi 4$ mm; $\phi 5$ mm; $\phi 6$ mm; $\phi 8$ mm i $\phi 10$ mm. W przypadku badania wpływu głębokości wady sztucznej na wykrywalność za pomocą wykresów i wskaźników rekurencyjnych przyjęto otwory o średnicach

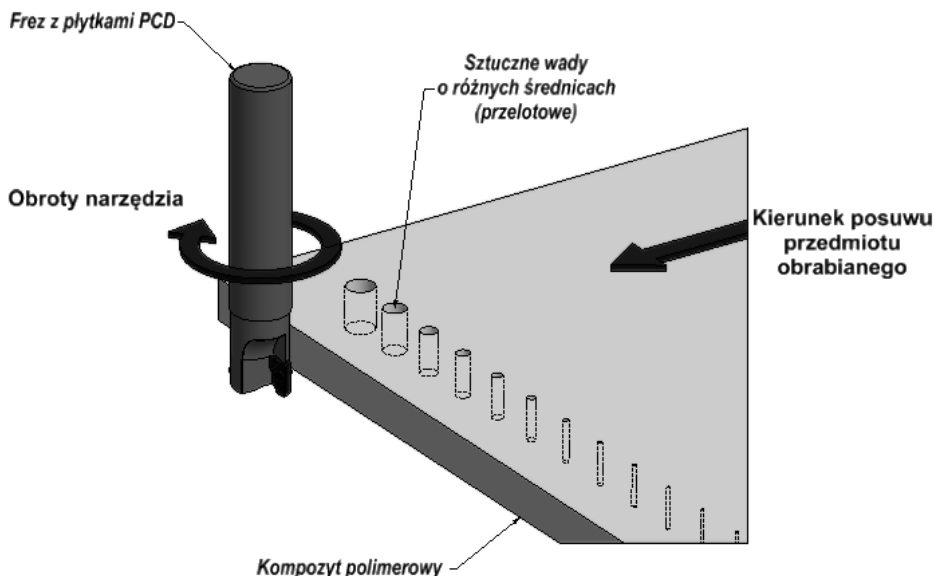
$\phi 2$ mm, $\phi 4$ mm i $\phi 6$ mm o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm dla każdej z badanych średnic. Podczas badania wpływu średnicy wady na wykrywalność za pomocą metod rekurencyjnych okres próbkowania aparatury pomiarowej wynosił 0,002 [s], a dla badania wpływu głębokości otworów została ustalona na poziomie 0,0002 [s]. Uzyskano przy tym dokładności badanej siły na poziomie 0,000001 [N].

Na rysunku 2.9 przedstawiono schemat obróbki frezowaniem, na którym przedmiot obrabiany z wadą sztuczną o średnicy d_0 przesuwany jest (zgodnie z kierunkiem osi „X”) względem obracającego się frezu o średnicy d_f .

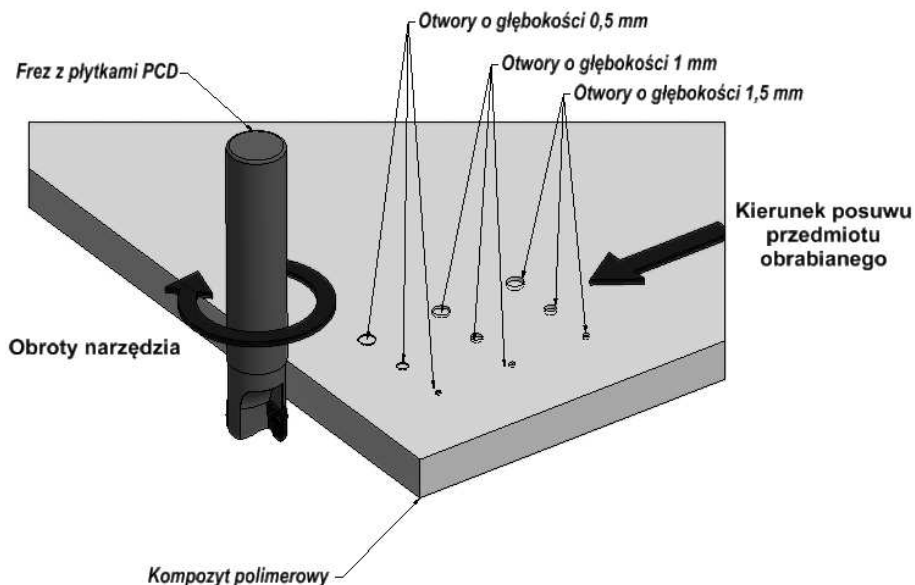


Rys. 2.9. Schemat obróbki frezowaniem kompozytu ze sztuczną wadą w postaci otworu ϕd_0

Na rysunku 2.10 zaprezentowano schemat obróbki kompozytów z wadami o różnych średnicach, a na rysunku 2.11 zaprezentowano schemat obróbki kompozytów z wadami o różnych głębokościach.



Rys. 2.10. Schemat obróbki kompozytów z wadami o różnych średnicach



Rys. 2.11. Schemat obróbki kompozytów z wadami o różnych głębokościach

Przy zachowaniu tych samych parametrów frezowania, porównano zarejestrowane składowe posuwowe całkowitej siły skrawania podczas frezowania powierzchni z wadami sztucznymi z powierzchniami bez wad sztucznych. Do analizy każdego przejścia przyjęto odpowiednią liczbę punktów. Według przyjętej metodyki liczba tych punktów była większa niż „długość” otworu. Pod pojęciem „długość” otworu należy rozumieć taką liczbę punktów, która obejmuje co najmniej kilkadziesiąt punktów przed i kilkadziesiąt punktów po wyjściu narzędzia z otworu.

Na podstawie wzoru (1.1) utworzono wykresy rekurencyjne za pomocą przybornika CRP w Matlabie [169]. Następnym etapem wykrywania wady jest obliczanie wskaźników rekurencyjnych. W tym celu zastosowano tzw. „metodę okna ruchomego”. Metoda ta polegała na przyjęciu przedziału o pewnej długości (dla każdej analizy w badaniach przyjęto 50 punktów dla badań wpływu średnicy otworów i 200 punktów dla badań wpływu głębokości otworu) i przesuwaniu go o pewną wartość (dla każdej analizy przyjęto wartość 1). Analiza metodami rekurencyjnymi została przeprowadzona przy stałej wartości współczynnika rekurencji RR. Przeprowadzone dotychczasowe badania wstępne [13, 69, 70] pozwalają stwierdzić, że możliwe jest wykrywanie wad i uszkodzeń w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi po obróbce frezowaniem.

2.2.6. Analiza statystyczna wyników badań

W celu oceny wpływu parametrów frezowania na chropowatość, falistość i wady powierzchniowe przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników.

Pierwszym etapem analizy statystycznej jest sprawdzenie za pomocą testu Shapiro-Wilka czy rozkład badanej zmiennej jest rozkładem normalnym. W celu przeprowadzenia dalszych badań statystycznych konieczne jest, aby rozkład badanej zmiennej i rozkład normalny były do siebie zbliżone.

Wartość testowa statystyki dla testu Shapiro-Wilka przedstawiona jest za pomocą zależności [165]:

$$W = \frac{\left[\sum_i a_i(n) (X_{(n-i+1)} - X_{(i)})^2 \right]}{\sum_{j=1}^n (X_{(j)} - \bar{X})^2}, \quad (2.1)$$

gdzie:

- a_i – stałe podawane w tablicach [166],
- i – różnice pomiędzy skrajnymi wynikami,
- j – kolejne obserwacje w próbie,
- X – zmienna, która jest analizowana,
- $\bar{X}$ – średnia analizowanej zmiennej,
- n – całkowita liczba pomiarów.

Na podstawie tablic dla zadanej liczby pomiarów n oraz z prawdopodobieństwem p wyznaczono wartość krytyczną dla testu Shapiro-Wilka W_{kr} . Jeśli $W \geq W_{kr}$ to badana cecha X , ma rozkład zbliżony do normalnego. Jest to podstawa do analizowania wyników za pomocą testu wartości średniej.

Za pomocą testu wartości średniej zbadano wpływ zmiennych parametrów frezowania na parametry chropowatości, falistości i wady powierzchniowe. Na wstępie należy określić hipotezę zerową o równości średniej z dwóch prób $H_0: \bar{y}_1 = \bar{y}_2$ oraz hipotezę alternatywną ($H_0: \bar{y}_1 > \bar{y}_2$ lub $H_0: \bar{y}_1 < \bar{y}_2$).

Z uwagi na to, że liczności prób są jednakowe, jako statystykę testową przyjęto:

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n-1}}}, \quad (2.2)$$

gdzie:

- $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ – średnia arytmetyczna prób,
- S_1, S_2 – odchylenie standardowe,
- n – liczność próby.

Po obliczeniu wartości testowej t obliczono liczbę stopni swobody:

$$f = n - 1. \quad (2.3)$$

Dla przyjętego poziomu istotności α i liczby stopni swobody f dobrano wartość krytyczną współczynnika t_{kr} i porównano do wartości testowej t . Gdy $t \geq t_{kr}$ to daje to podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej na korzyść hipotezy alternatywnej. Na tej podstawie można stwierdzić, że parametry frezowania mają wpływ na strukturę geometryczną powierzchni (chropowatość, faliistość i wady powierzchniowe). W przypadku gdy $t < t_{kr}$ można stwierdzić, że zmiana parametrów frezowania nie ma wpływu na strukturę geometryczną powierzchni.

3. WPLYW PARAMETRÓW FREZOWANIA NA STRUKTURĘ GEOMETRYCZNĄ POWIERZCHNI

3.1. Badania wstępne

W celu określenia liczby powtórzeń w poszczególnych badaniach przeprowadzono badania wstępne. Określono liczebność próby przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Na podstawie poniższej zależności obliczono liczebność próby [76]:

$$n = \frac{t_{\alpha, f}^2 \cdot S_x^2}{\varepsilon_o^2}, \quad (3.1)$$

gdzie:

- t – wartość krytyczna rozkładu t -Studenta,
- α – poziom istotności,
- f – liczba stopni swobody,
- S_x^2 – wariancja analizowanej zmiennej na podstawie wyników pomiarów próby wstępnej,
- ε_o – dokładność oceny.

Do badań wstępnych wytypowano zestaw parametrów technologicznych frezowania (prędkość skrawania $v_c = 250$ m/min, posuw na ostrze $f_z = 0,2$ mm/ostrze, głębokość skrawania $a_p = 1$ mm), przy których przeprowadzono badania chropowatości powierzchni po frezowaniu dwóch rodzajów kompozytów polimerowych, wzmacnianych włókami szklanymi (GFRP) i węglowym (CFRP), przesyconych żywicą epoksydową. Na każdej z powierzchni dokonano pomiarów parametrów chropowatości takich jak R_a , R_z , R_{sk} i R_{ku} . Pomiary parametrów chropowatości przeprowadzono sześciokrotnie dla danego zestawu parametrów. Podczas badania frezowania przeprowadzono również pomiary wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania, której kierunek jest zgodny z kierunkiem ruchu posuwowego stołu. Wyznaczono siły z dziesięciu pomiarów dla danego zestawu parametrów. Dokładność oceny ε przyjęto na poziomie 5% wartości średniej dla danego zestawu parametrów technologicznych. Dla pomiarów chropowatości i składowej posuwowej całkowitej siły skrawania dla zadanych liczb stopni swobody na poziomie $f = 5$ (dla chropowatości) i $f = 10$ (dla sił posuwowych) oraz zadanego poziomu istotności $\alpha = 0,05$, korzystając z tablic rozkładu t -Studenta, dobrano współczynnik $t = 2,5706$.

Tabela 3.1. Wyniki badań wstępnych chropowatości powierzchni w celu wyznaczenia liczebności próby

	Kompozyt GFRP				Kompozyt CFRP			
Numer próby	Parametr chropowatości							
	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsk [μm]	Rku [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsk [μm]	Rku [μm]
1	1,15	8,64	-0,463	3,09	1,69	9,72	-0,795	2,57
2	1,21	9,66	-0,422	3,40	1,82	10,21	-0,892	2,84
3	1,24	9,66	-0,435	3,35	1,81	11,12	-0,807	2,84
4	1,22	9,51	-0,409	3,32	1,64	9,95	-0,824	2,85
5	1,13	9,43	-0,425	3,53	1,68	10,48	-0,852	2,96
6	1,24	9,58	-0,432	3,25	1,65	10,21	-0,825	2,76
średnia	1,20	9,41	-0,430	3,32	1,72	10,28	-0,83	2,80
odchylenie standard.	0,047	0,389	0,018	0,148	0,080	0,485	0,0349	0,131
wariancja	0,002	0,151	0,001	0,022	0,006	0,236	0,0012	0,017
dokł. oceny	0,060	0,471	-0,022	0,166	0,086	0,514	-0,042	0,140
poziom istotności	0,05							
t-Studenta	2,5706							
Liczebność prób	4,08	4,52	4,67	5,22	5,71	5,89	4,66	5,77

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów chropowatości powierzchni, korzystając ze wzoru (3.1), obliczono ilość prób (tabela 3.1). Największa wartość wynosiła 5,89 – przyjęto liczebność prób na poziomie liczby 6.

Tabela 3.2. Wyniki badań wstępnych wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania w celu wyznaczenia liczebności próby

Material	GFRP	CFRP
Siła skrawania	Fx [N]	Fx [N]
Numer próby		
1	314,41	225,68
2	328,20	241,79
3	309,54	219,54
4	298,65	221,44
5	318,28	215,79
6	340,39	212,22
7	289,74	216,30
8	273,06	220,92
9	325,65	248,64
10	304,05	232,36
średnia	310,20	225,47
Odchylenie standardowe	19,7959	11,9070
wariancja	391,8770	141,7767
dokładność oceny	15,5098	11,2734
poziom istotności	0,05	
t	2,2622	
liczebność próby	8,34	5,71

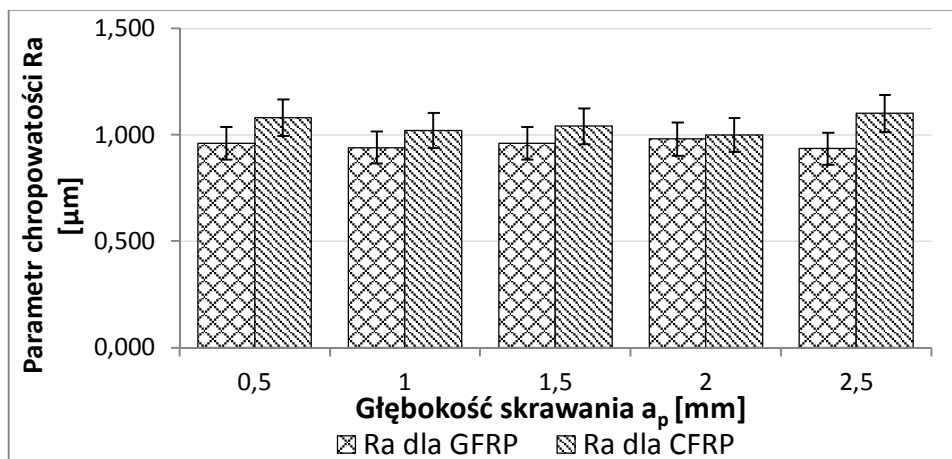
W przypadku badań wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania i wyznaczonych liczebności prób, z których największa wartość wynosiła 8,34 – przyjęto do dalszych badań liczebność próby na poziomie 9 (tabela 3.2).

3.2. Chropowatość i falistość powierzchni kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi przesyconych żywicą epoksydową

Parametry chropowatości i falistości zaliczane są do głównych czynników pozwalających ocenić strukturę geometryczną powierzchni [152]. Spośród wielu różnych parametrów chropowatości i falistości wybrano i zmierzono następujące parametry: średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości R_a i falistości W_a , największą wysokość profilu chropowatości R_z i falistości W_z , współczynnik asymetrii (skośności) profilu chropowatości R_{sk} i falistości W_{sk} oraz współczynnik nachylenia (kurtozy) profilu chropowatości R_{ku} i falistości W_{ku} . Wybrano te parametry w celu pokazania wpływu parametrów skrawania na chropowatość i falistość powierzchni kompozytów polimerowych na bazie włókien szklanych (GFRP) oraz węglowych (CFRP) przesyconych żywicą epoksydową. R_a i W_a są szeroko stosowane między innymi w Stanach Zjednoczonych, Polsce czy Wielkiej Brytanii, ponieważ są dobrymi parametrami do monitorowania procesów [143]. Parametry R_z i W_z są uśrednioną miarą maksymalnych chropowatości powierzchni, a ich wyznaczanie jest uzasadnione, gdy na działanie części nie wpływają pojedyncze wzniesienia profilu [143]. Parametry R_{sk} i R_{ku} mają znaczenie eksploatacyjne, ponieważ są one związane z tarciem i zużyciem powierzchni [47]. Na podstawie dotychczasowych badań wpływu tych parametrów na współczynnik tarcia „na sucho” wykazano, że dodatnie wartości współczynnika R_{sk} (gdy $R_{ku} < 3$) wpływają na zmniejszanie współczynnika tarcia, a ujemne wartości świadczą o gorszej jakości powierzchni, a więc zwiększaniu współczynnika tarcia. Gdy wartości R_{ku} są większe od 3, obecność środków smarnych na powierzchni z ujemnymi wartościami skośności (R_{sk}) powoduje zmniejszanie tarcia [47]. R_{ku} jest parametrem, za pomocą którego można wykrywać wady powierzchniowe [143].

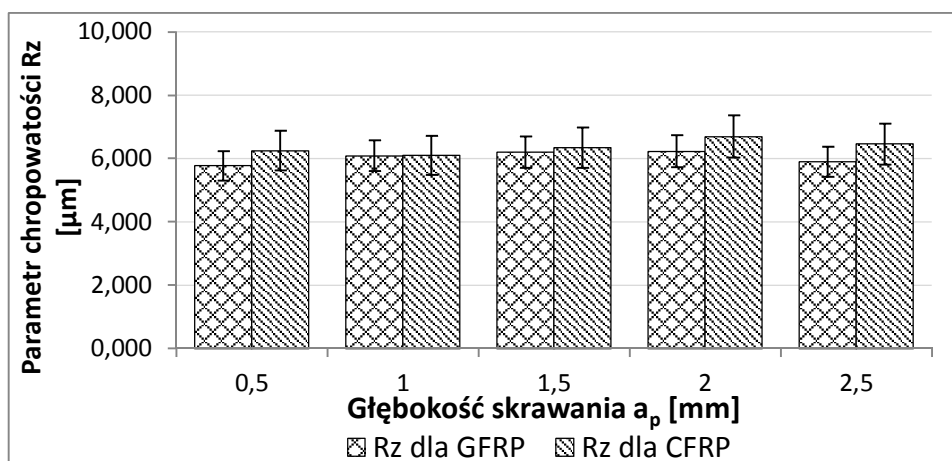
Badania polegały na pomiarze chropowatości i falistości powierzchni po frezowaniu ze zmiennymi parametrami przedstawionymi w tabeli 2.1. Dokonano 8-krotnego pomiaru chropowatości i falistości powierzchni w kilku różnych miejscach dla każdej z frezowanych próbek, z czego największą i najmniejszą wartość odrzucono jako błąd pomiarowy. Na podstawie zmierzonych wartości wyznaczono wartość średnią i odchylenie standardowe z uzyskanych pomiarów.

Na wykresach (rys. 3.1÷3.12) przedstawiono wpływ głębokości skrawania, posuwu na ostrze i prędkości skrawania na parametry chropowatości. Na rysunku 3.1 przedstawiono wpływ głębokości skrawania (od 0,5 mm do 2,5 mm) na parametr chropowatości R_a . Wartości parametrów R_a oscylują wokół wartości 1 μm dla GFRP i CFRP.



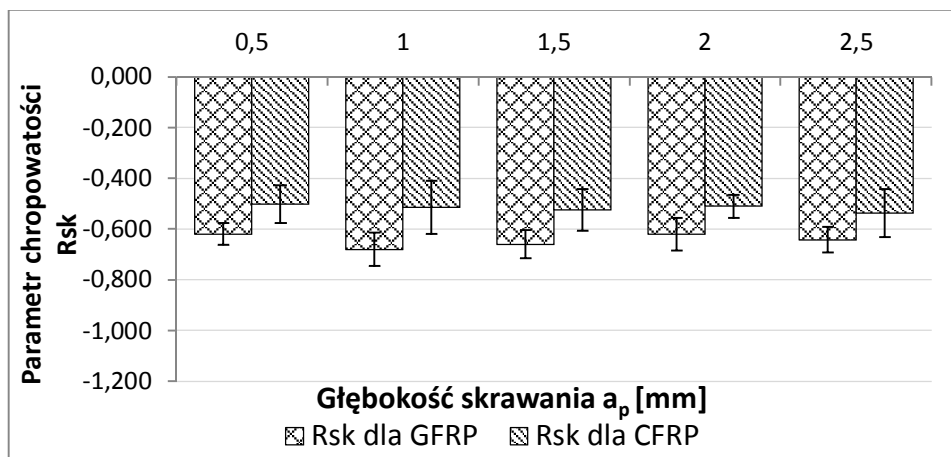
Rys. 3.1. Wpływ głębokości skrawania na parametr chropowatości Ra

Wpływ głębokości skrawania na parametr Rz przedstawiono na rysunku 3.2. Na podstawie wykresu, dla GFRP, można zauważyć niewielką tendencję wzrostową w całym zakresie badanych głębokości (od 0,5 mm do 2,5 mm).



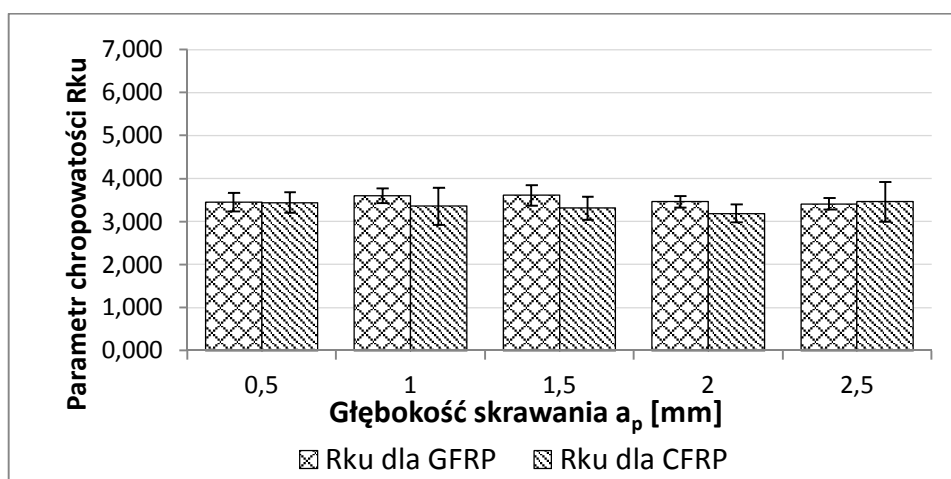
Rys. 3.2. Wpływ głębokości skrawania na parametr chropowatości Rz

Analiza wpływu głębokości skrawania na parametr Rsk (rys. 3.3) pokazuje, że dla materiału kompozytowego GFRP, w zakresie głębokości 0,5÷1 mm, wartości parametru Rsk powoli maleją, a po przekroczeniu 1 mm uzyskują tendencję wzrostową. Dla materiału CFRP wartości parametru chropowatości Rsk utrzymują się na stałym poziomie.



Rys. 3.3. Wpływ głębokości skrawania na parametr chropowatości Rsk

Na wykresach wpływu głębokości skrawania na parametr Rku (rys. 3.4) można zauważyć, że wyniki (dla GFRP i CFRP) dla każdej głębokości oscylują wokół wartości $R_{ku} = 3,30$.



Rys. 3.4. Wpływ głębokości skrawania na parametr chropowatości Rku

Wyniki badań wpływu głębokości skrawania na parametry chropowatości poddano analizie statystycznej przy użyciu testu Shapiro-Wilka. W tabelach 3.3 i 3.4 przedstawiono wyniki badań normalności rozkładu dla parametrów chropowatości przy zmiennych głębokościach skrawania. Przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i określonej liczebności prób $N = 6$ przedstawiono wartości testowe statystyki i porównano do wartości krytycznej dla testu Shapiro-Wilka $W_{kr} = 0,788$ [164].

Tabela 3.3. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz, Rsk, Rku, po frezowaniu powierzchni przy zmiennej głębokości skrawania (kompozyt GFRP)

Głębokość skrawania a_p [mm]	Liczebność próby N	Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka W_{kr}	Parametr chropowatości powierzchni			
			Ra	Rz	Rsk	Rku
			Wartość testu Shapiro-Wilka W			
0,5	6	0,788	0,861	0,926	0,954	0,837
1			0,857	0,912	0,888	0,930
1,5			0,919	0,908	0,926	0,793
2			0,867	0,922	0,818	0,906
2,5			0,946	0,879	0,908	0,862

Tabela 3.4. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz, Rsk, Rku, po frezowaniu powierzchni przy zmiennej głębokości skrawania (kompozyt CFRP)

Głębokość skrawania a_p [mm]	Liczebność próby N	Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka W_{kr}	Parametr chropowatości powierzchni			
			Ra	Rz	Rsk	Rku
			Wartość testu Shapiro-Wilka W			
0,5	6	0,788	0,859	0,948	0,904	0,946
1			0,970	0,951	0,897	0,802
1,5			0,860	0,902	0,908	0,809
2			0,865	0,838	0,855	0,862
2,5			0,959	0,983	0,878	0,893

Stwierdzono, że badany rozkład jest zbliżony do normalnego, ponieważ $W \geq W_{kr}$. Jest to podstawa do dalszych analiz statystycznych za pomocą testu wartości średniej. W tabeli 3.5 i 3.6 zestawiono analizę statystyczną (dla parametru chropowatości Ra dla kompozytu GFRP i CFRP) dla testu wartości średniej, gdzie wartość testu t porównano z wartością krytyczną testu t_{kr} odczytaną z tabeli [76].

Tabela 3.5. Wyniki badań testu wartości średniej dla parametrów chropowatości powierzchni Ra po frezowaniu powierzchni przy zmiennej głębokości skrawania (kompozyt GFRP)

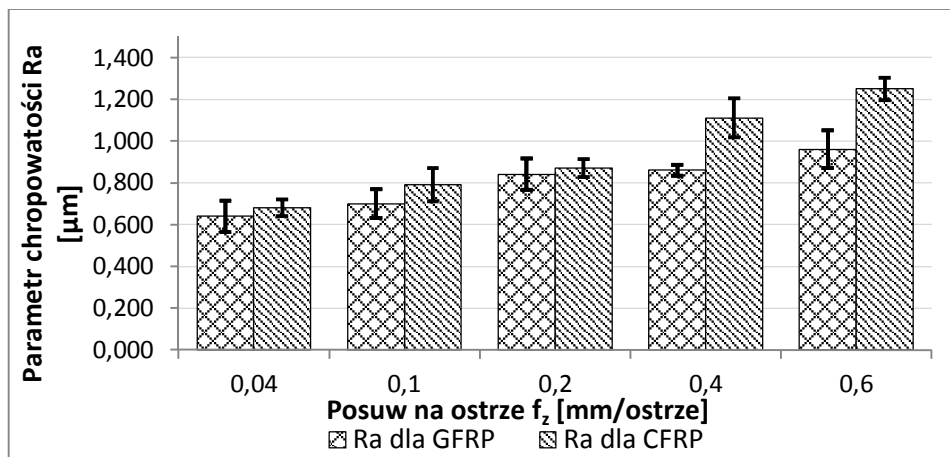
	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Parametr chropowatości Ra [μm]	$a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	0,67495	2,571	$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	1,31709		$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 1,5 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	0,71048		$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 2 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	1,59970		$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 2,5 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$			$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu

Tabela 3.6. Wyniki badań testu wartości średniej dla parametrów chropowatości powierzchni Ra po frezowaniu powierzchni przy zmiennej głębokości skrawania (kompozyt CFRP)

	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Parametr chropowatości Ra [μm]	$a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	2,42348	2,571	$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	2,07442		$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 1,5 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	0,79727		$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 2 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	0,16140		$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu
	$a_p = 2,5 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$			$t < t_{kr}$	brak istotności wpływu

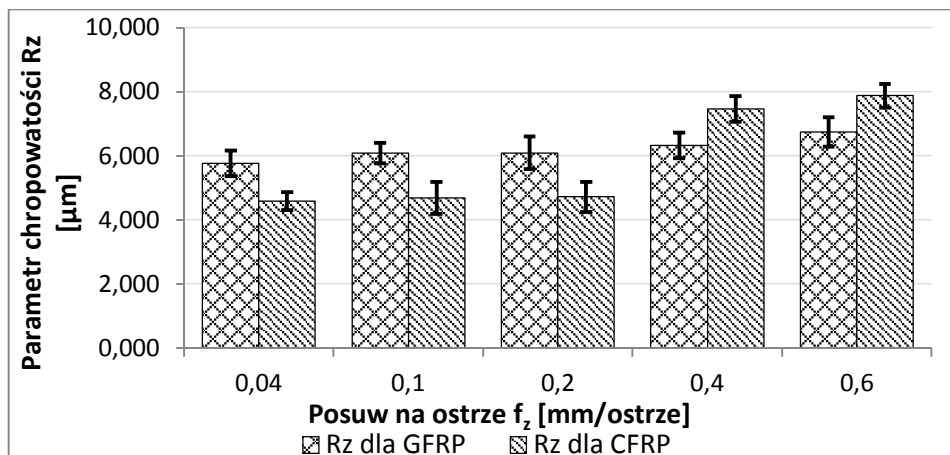
Na podstawie przedstawionych w tabelach wyników postawiono wniosek, że głębokość skrawania nie ma istotnego wpływu na parametr chropowatości Ra dla obu rodzajów badanych materiałów, ponieważ wartości testów t są mniejsze niż ich odpowiednie wartości krytyczne (t_{kr}). Przeprowadzono również badania dla pozostałych parametrów chropowatości (R_z , R_{sk} i R_{ku}), w których również postawiono wniosek braku wpływu głębokości skrawania na te parametry dla GFRP i CFRP. Brak znaczącego wpływu głębokości skrawania na parametry chropowatości potwierdzają również wyniki w innej pracy badawczej [4].

Na rysunku 3.5 pokazano wpływ posuwu na ostrze na parametr chropowatości Ra. Na podstawie przedstawionego wykresu sporządzonego dla materiału GFRP i CFRP zauważono, że wraz ze wzrostem posuwu parametr chropowatości Ra rośnie. W przypadku kompozytu GFRP wzrost ten jest mniej intensywny niż w przypadku kompozytu CFRP. Świadczy to o tym, że GFRP jest mniej wrażliwy na powstawanie mikronierówności, w porównaniu do CFRP.



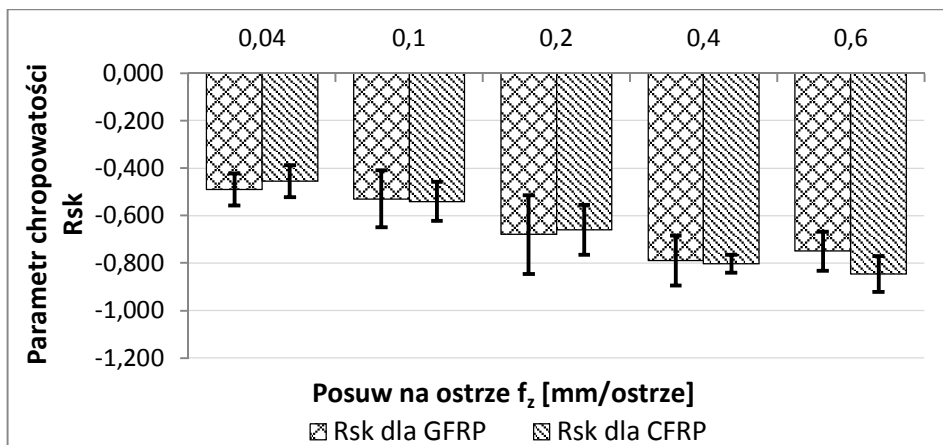
Rys. 3.5. Wpływ posuwu na ostrze na parametr chropowatości Ra

Wpływ posuwu na parametr chropowatości Rz przedstawiono na rysunku 3.6. Dla obu rodzajów materiału (GFRP i CFRP) zauważono, że wraz ze wzrostem posuwu parametr chropowatości Rz ma tendencję rosnącą, ale dla materiału CFRP wzrost jest bardziej wyraźny.



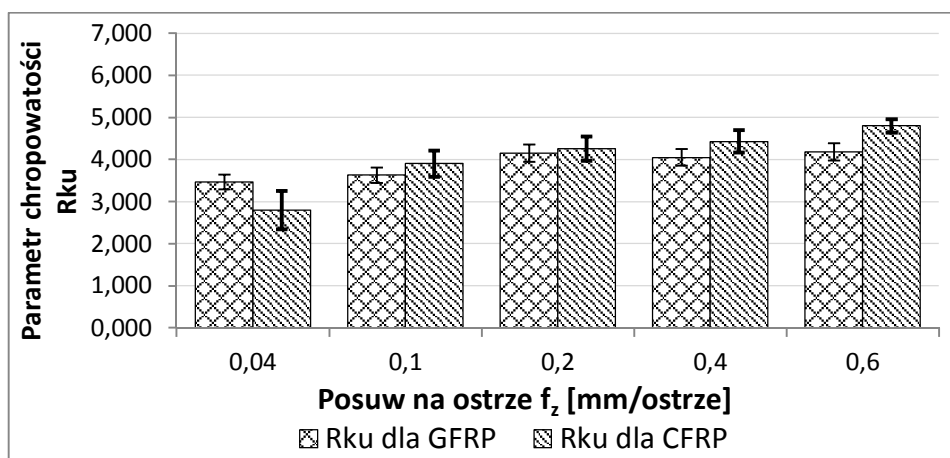
Rys. 3.6. Wpływ posuwu na ostrze na parametr chropowatości Rz

Analizując materiały kompozytowe GFRP i CFRP i wpływ posuwu na strukturę geometryczną powierzchni, do analizy wzięto również parametry R_{sk} i R_{ku} . Przedstawione wykresy pokazują, że wraz ze wzrostem posuwu wartości parametru R_{sk} mają tendencję malejącą (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Wpływ posuwu na ostrze na parametr chropowatości R_{sk}

Na rysunku 3.8 przedstawiono stały wzrost wartości parametru R_{ku} (parametr związany z wadami powierzchniowymi) w funkcji posuwu dla obu rodzajów materiałów. Wartości dla obu rodzajów materiałów mają tendencję wzrostową (bardziej wyraźną dla CFRP) w całym zakresie badanego posuwu na ostrze (0,04÷0,6 mm/ostre).



Rys. 3.8. Wpływ posuwu na ostrze na parametr chropowatości R_{ku}

Pogarszającą się jakość powierzchni po skrawaniu ze zwiększającą się wartością posuwu na ostrze można tłumaczyć większymi oporami podczas frezowania. Ze wzrostem posuwu zwiększa się pole przekroju warstwy skrawanej i teoretyczna wysokość chropowatości. Zmiany parametrów chropowatości są niewielkie dla dużych zmian posuwu. Wpływ wzrostu posuwu na ostrze na wartości parametrów chropowatości podczas frezowania kompozytów polimerowych jest zgodny z wynikami innych badaczy [4, 20].

W celu oceny wpływu posuwu na ostrze na parametry chropowatości przeprowadzono analizę za pomocą testu Shapiro-Wilka (tabela 3.7 i 3.8), gdzie wykazano, że rozkład badanej zmiennej jest zbliżony do rozkładu normalnego, ponieważ wartości W są większe od wartości W_{kr} , co stanowi podstawę do dalszej analizy statystycznej.

Tabela 3.7. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_z , R_{sk} , R_{ku} , po frezowaniu powierzchni przy zmiennym posuwie na ostrze (kompozyt GFRP)

Posuw na ostrze [mm/ostrze]	Liczebność próby N	Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka W_{kr}	Parametr chropowatości powierzchni			
			R_a	R_z	R_{sk}	R_{ku}
			Wartość testu Shapiro-Wilka W			
0,04	6	0,788	0,827	0,874	0,839	0,832
0,1			0,879	0,839	0,829	0,837
0,2			0,868	0,905	0,799	0,898
0,4			0,849	0,950	0,875	0,923
0,6			0,929	0,961	0,819	0,961

Tabela 3.8. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_z , R_{sk} , R_{ku} , po frezowaniu powierzchni przy zmiennym posuwie na ostrze (kompozyt CFRP)

Posuw na ostrze [mm/ostrze]	Liczebność próby N	Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka W_{kr}	Parametr chropowatości powierzchni			
			R_a	R_z	R_{sk}	R_{ku}
			Wartość testu Shapiro-Wilka W			
0,04	6	0,788	0,820	0,851	0,933	0,885
0,1			0,808	0,870	0,888	0,820
0,2			0,963	0,974	0,834	0,867
0,4			0,819	0,929	0,821	0,840
0,6			0,938	0,937	0,995	0,928

W tabeli 3.9 i 3.10 dla dwóch rodzajów materiału przedstawiono testy wartości średniej, na podstawie których określono, że badany parametr posuwu

na ostrze ma istotny wpływ na zmianę parametru chropowatości Ra. Analizie statystycznej poddano również wpływ posuwu na ostrze na parametry chropowatości Rz, Rsk i Rku (dla GFRP i CFRP), gdzie wykazano, że jest to parametr wpływający w istotny sposób na strukturę geometryczną powierzchni.

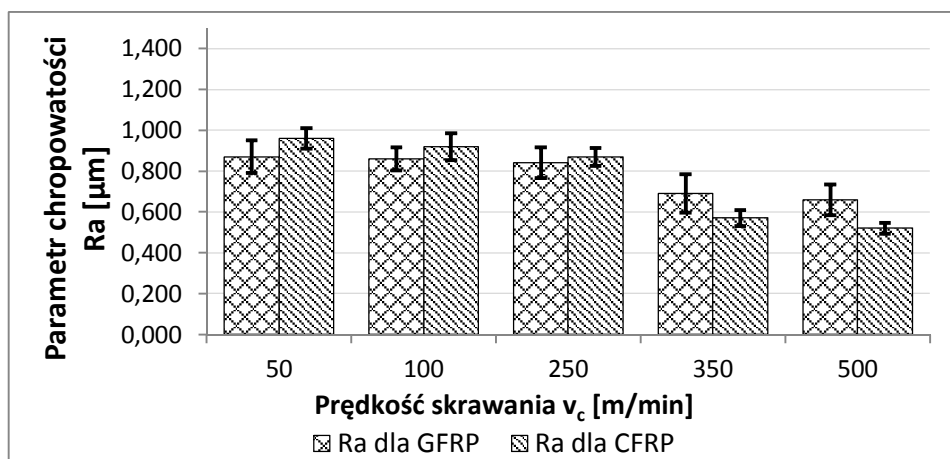
Tabela 3.9. Wyniki badań testu wartości średniej dla parametrów chropowatości powierzchni Ra po frezowaniu powierzchni przy zmiennym posuwie na ostrze (kompozyt GFRP)

	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t _{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Parametr chropowatości Ra [μm]	a _p = 1 mm, f _z = 0,04 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	3,21489	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,1 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	4,46118		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min				
	a _p = 1 mm, f _z = 0,4 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	5,12019		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,6 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	5,68362		t>t _{kr}	wpływ istotny

Tabela 3.10. Wyniki badań testu wartości średniej dla parametrów chropowatości powierzchni Ra po frezowaniu powierzchni przy zmiennym posuwie na ostrze (kompozyt CFRP)

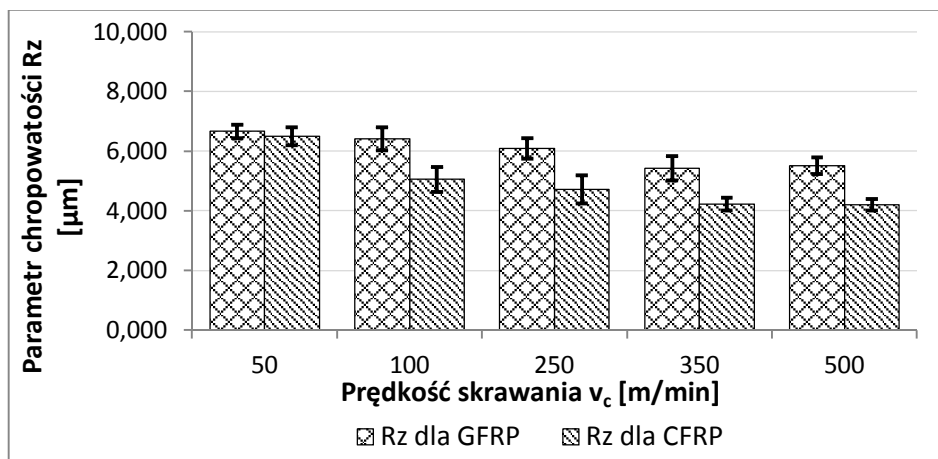
	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t _{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Parametr chropowości Ra [μm]	a _p = 1 mm, f _z = 0,04 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	3,44987	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,1 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	3,06420		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min			t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,4 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	6,18264		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,6 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	3,21255		t>t _{kr}	wpływ istotny

Dla obu rodzajów kompozytów zbadano również wpływ prędkości skrawania na parametry chropowatości. Na rysunku 3.9 pokazano wpływ prędkości skrawania na parametr Ra. Zauważono, że ze wzrostem prędkości skrawania chropowatość powierzchni ulega poprawie, a więc wartości parametru chropowatości Ra zmniejszają się. Powyżej prędkości skrawania 250 m/min zmniejszenie wartości jest bardziej dynamiczne, ponieważ wartość Ra zmniejsza się z 0,870 μm do 0,520 μm dla największej badanej prędkości skrawania.



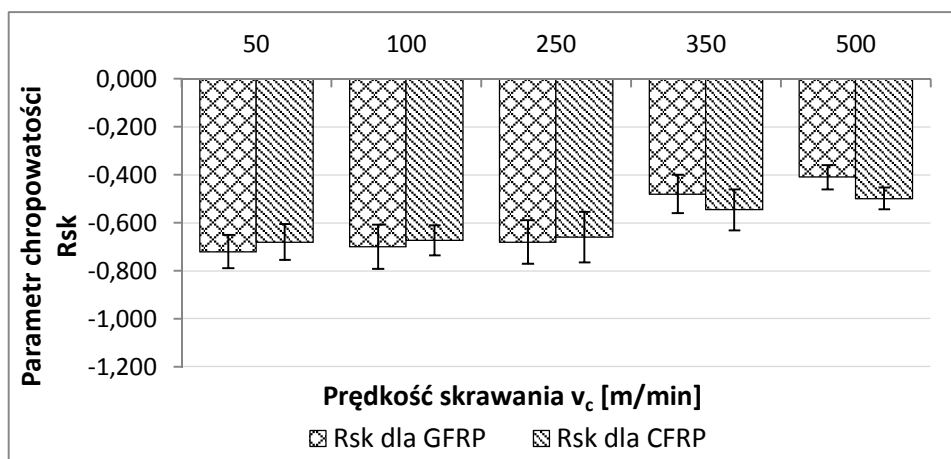
Rys. 3.9. Wpływ prędkości skrawania na parametr chropowatości Ra

Rysunek 3.10 przedstawia wpływ prędkości skrawania na parametr chropowatości Rz. Na podstawie wykresu stwierdzono, że frezowanie z większą prędkością skrawania, a więc i prędkością obrotową narzędzia, powoduje zmniejszanie wartości parametru Rz. Wzrost prędkości skrawania ma większy wpływ na zmianę parametru chropowatości Rz dla materiału CFRR niż dla GFRP.



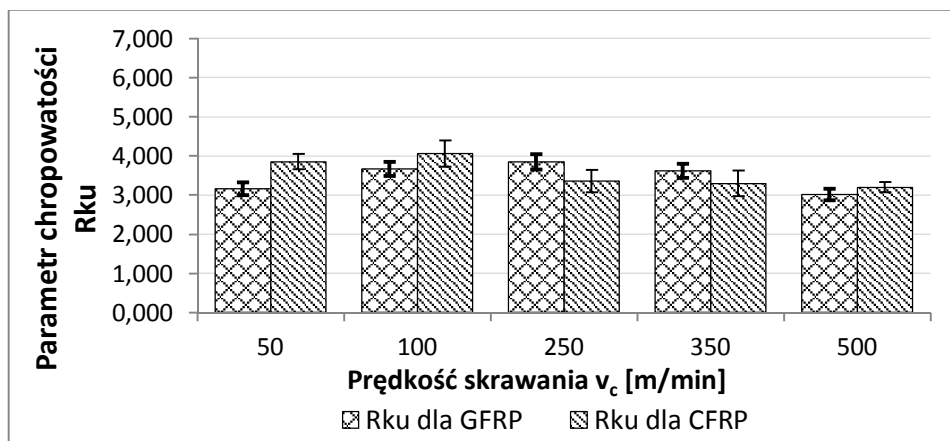
Rys. 3.10. Wpływ prędkości skrawania na parametr chropowatości Rz

Na podstawie rysunku 3.11 (przedstawia wpływ prędkości skrawania na parametr Rsk) zauważono tendencję wzrostową parametru Rsk (dla GFRP i CFRP), gdzie wartości parametru zbliżają się do „0”.



Rys. 3.11. Wpływ prędkości skrawania na parametr chropowatości Rsk

Analiza parametru Rku (rys. 3.12) pokazuje, że wzrost prędkości skrawania powoduje na początku niewielki wzrost (do prędkości skrawania 250 m/min), a potem następuje spadek parametru Rku dla obydwu materiałów.



Rys. 3.12. Wpływ prędkości skrawania na parametr chropowatości Rku

Zwiększająca się prędkość skrawania związana jest z większą prędkością obrotową frezu. Włókna kompozytów polimerowych w wyniku szybszych obrotów narzędzia są szybciej ścinane. Taka sytuacja korzystnie wpływa na powierzchnię materiału (parametry chropowatości maleją), który należy do grupy materiałów trudnoobrabialnych. Wyniki badań publikowane w innej pracy naukowej pokazują, że wzrost prędkości skrawania wpływa na zwiększenie parametrów chropowatości [4].

Istotność wpływu prędkości skrawania na parametry chropowatości potwierdzono za pomocą analizy statystycznej otrzymanych wyników. Po sprawdzeniu, że rozkład badanej zmiennej jest zbliżony do normalnego zarówno dla kompozytu GFRP jak i CFRP (tabela 3.11 i 3.12) przeprowadzono kolejne analizy statystyczne.

Tabela 3.11. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz, Rsk, Rku, po frezowaniu powierzchni przy zmiennej prędkości skrawania (kompozyt GFRP)

Prędkość skrawania [m/min]	Liczebność próby N	Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka W _{kr}	Parametr chropowatości powierzchni			
			Ra	Rz	Rsk	Rku
			Wartość testu Shapiro-Wilka W			
50	6	0,788	0,918	0,984	0,811	0,835
100			0,903	0,944	0,832	0,919
250			0,907	0,812	0,946	0,998
350			0,879	0,797	0,931	0,890
500			0,829	0,859	0,933	0,968

Tabela 3.12. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rz, Rsk, Rku, po frezowaniu powierzchni przy zmiennej prędkości skrawania (kompozyt CFRP)

Prędkość skrawania [m/min]	Liczebność próby N	Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka W _{kr}	Parametr chropowatości powierzchni			
			Ra	Rz	Rsk	Rku
			Wartość testu Shapiro-Wilka W			
50	6	0,788	0,969	0,918	0,942	0,869
100			0,791	0,985	0,832	0,941
250			0,820	0,951	0,886	0,867
350			0,858	0,847	0,818	0,945
500			0,978	0,823	0,952	0,874

Po sprawdzeniu rozkładu badanej zmiennej za pomocą testu Shapiro-Wilka udowodniono za pomocą testu wartości średniej, że prędkość skrawania wpływa w istotny sposób na parametr Ra (tabela 3.13 i 3.14), a także na parametry Rz, Rsk i Rku. Obok posuwu na ostrze jest to drugi parametr wpływający na strukturę geometryczną powierzchni po frezowaniu kompozytów z włóknami szklanymi i węglowymi.

Tabela 3.13. Wyniki badań testu wartości średniej dla parametrów chropowatości powierzchni Ra po frezowaniu powierzchni przy zmiennej prędkości skrawania (kompozyt GFRP)

	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t _{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Parametr chropowatości Ra [μm]	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 50 m/min	3,49236	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 100 m/min	3,53657		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min				
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 350 m/min	5,30211		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 500 m/min	11,97246		t>t _{kr}	wpływ istotny

Tabela 3.14. Wyniki badań testu wartości średniej dla parametrów chropowatości powierzchni Ra po frezowaniu powierzchni przy zmiennej prędkości skrawania (kompozyt CFRP)

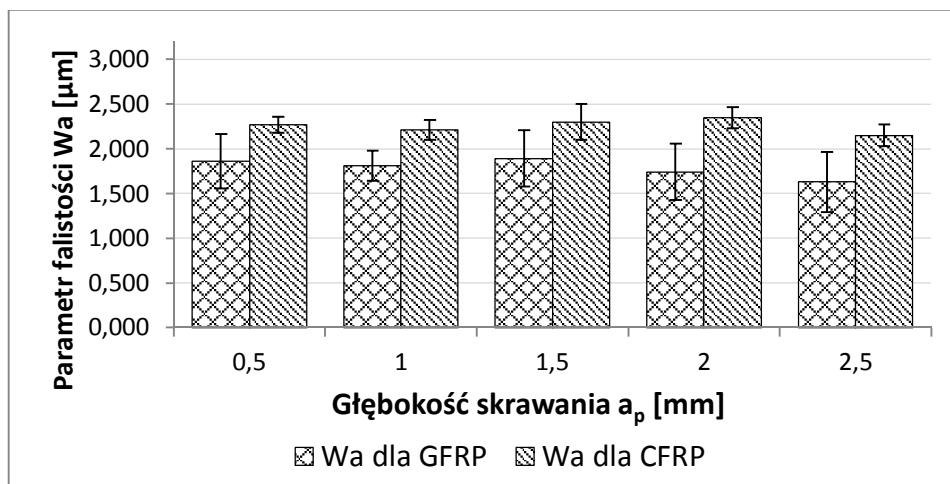
	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Parametr chropowości Ra [μm]	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 50 \text{ m/min}$	3,78436	2,571	$t > t_{kr}$	wpływ istotny
	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 100 \text{ m/min}$	9,03685		$t > t_{kr}$	wpływ istotny
	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$	2,80768		$t > t_{kr}$	wpływ istotny
	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 350 \text{ m/min}$	17,60123		$t > t_{kr}$	wpływ istotny
	$a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$, $v_c = 500 \text{ m/min}$				

Podsumowując otrzymane wyniki można postawić wniosek, że zmiana głębokości skrawania nie wpływa w sposób istotny, w całym zakresie przeprowadzonych badań, na spadek lub wzrost wartości parametrów chropowatości. Wyniki badań pokazują natomiast, że wraz ze wzrostem posuwu na ostrze wartości parametrów chropowatości Ra, Rz i Rku rosną, a Rsk maleją. Wzrost prędkości skrawania powoduje spadek wartości parametrów chropowatości Ra, Rz, Rku (powyżej 250 m/min) oraz wzrost Rsk.

Porównanie wyników badań dwóch rodzajów materiałów pozwala zauważyć, że w przypadku zmian posuwu na ostrze i prędkości skrawania wartości parametrów chropowatości Ra, Rz, Rsk i Rku zmieniają się w większym zakresie dla kompozytów z włóknami węglowymi (CFRP). Na podstawie tych wyników można wstępnie przedstawić wniosek, że kompozyt z włóknami węglowymi będzie bardziej narażony na powstawanie wad powierzchniowych. Materiał GFRP jest mniej „wrażliwy” na zmiany parametrów. Świadczą o tym wyniki pomiarów chropowatości, które albo oscylowały na określonym poziomie wartości badanej chropowatości (np. rys. 3.6, rys. 3.12), albo zmieniały się mniej dynamicznie niż wyniki badań dla CFRP (np. rys. 3.5, rys. 3.7, rys. 3.9 rys. 3.10).

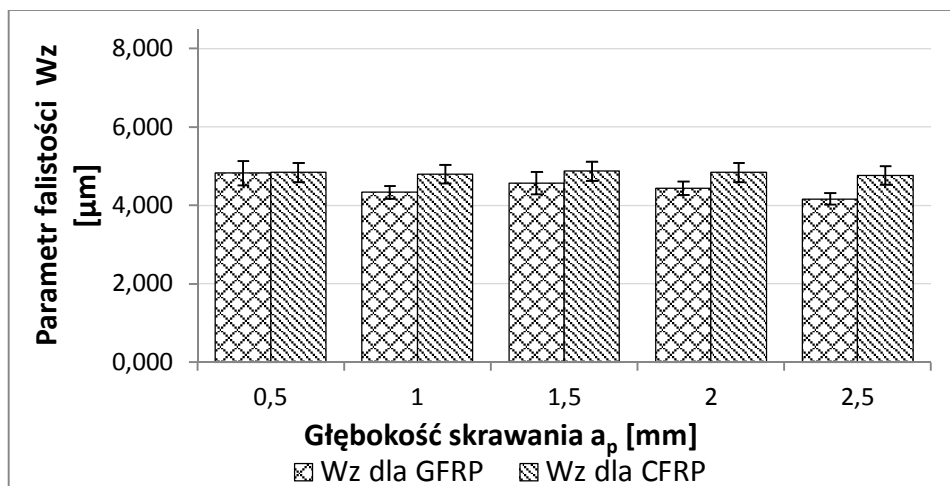
Struktura geometryczna powierzchni związana jest również z falistością. W związku z tym zbadano wpływ głębokości skrawania, posuwu na ostrze i prędkości skrawania na parametry falistości Wa, Wz, Wsk i Wku (rys. 3.13÷3.24).

Na rysunku 3.13 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na parametr falistości Wa. Na podstawie wykresu zauważono, że dla obu rodzajów materiałów wartości parametru Wa utrzymują się na zbliżonym poziomie.



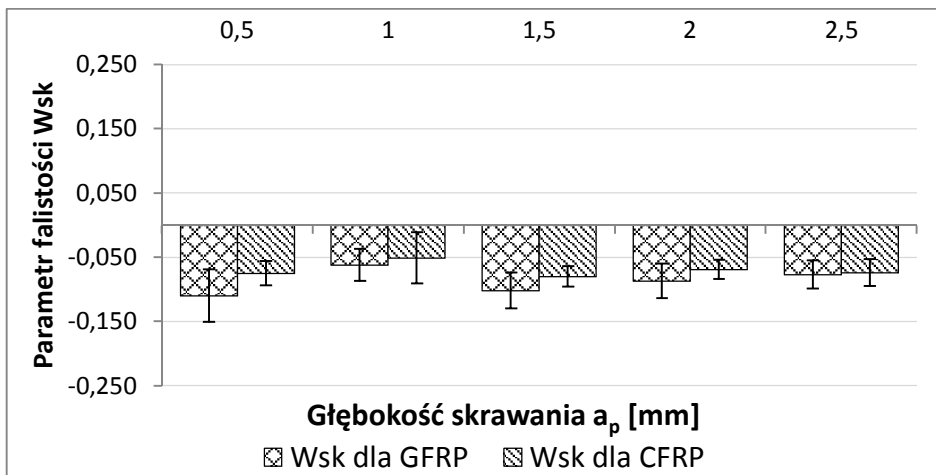
Rys. 3.13. Wpływ głębokości skrawania na parametr falistości W_a

Kolejnym analizowanym parametrem falistości był parametr W_z (rys. 3.14). W zakresie głębokości skrawania 0,5÷1 mm i 1,5÷2,5 mm dla obu rodzajów materiałów parametry falistości W_z mają niewielką tendencję malejącą. Dla głębokości skrawania 1÷1,5 mm parametry falistości rosły. Największą wartość parametru falistości uzyskano dla materiału CFRP dla głębokości $a_p = 1$ mm.



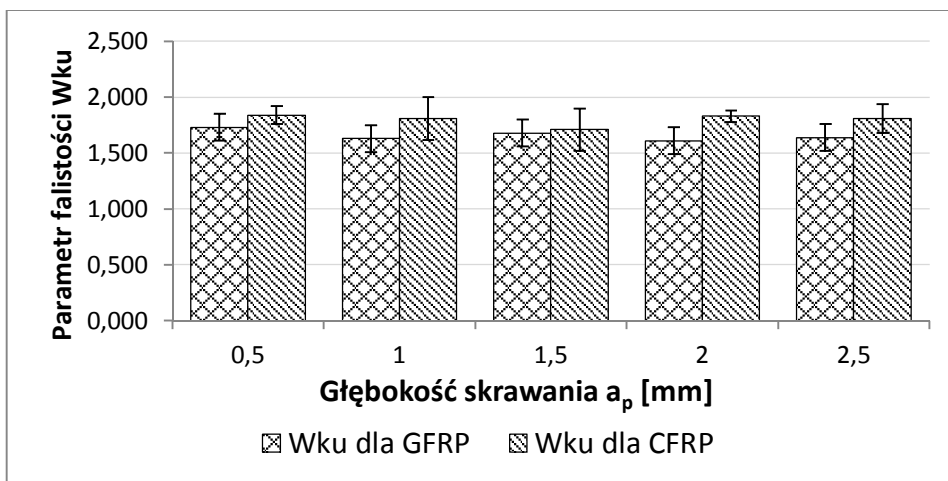
Rys. 3.14. Wpływ głębokości skrawania na parametr falistości W_z

Analiza wpływu głębokości skrawania na parametr falistości W_{sk} (rys. 3.15) nie wykazała znaczących zmian w przebiegu wartości tego parametru ze wzrostem głębokości skrawania.



Rys. 3.15. Wpływ głębokości skrawania na parametr falistości Wsk

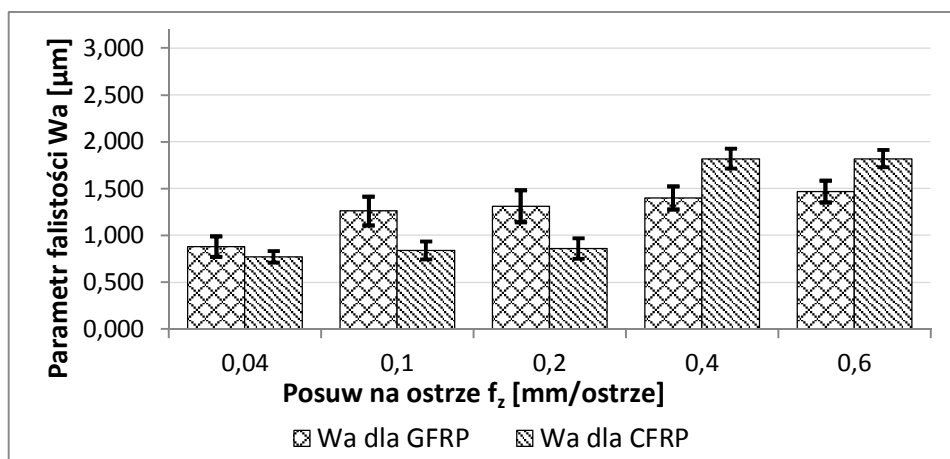
Ostatnim analizowanym parametrem falistości pod kątem wpływu głębokości skrawania był parametr Wku (rys. 3.16). Na wykresie można zauważyć, że wartości parametru Wku dla materiału GFRP mają niewielką tendencję malejącą. W przypadku materiału CFRP parametry falistości Wku oscylują wokół wartości 1,75.



Rys. 3.16. Wpływ głębokości skrawania na parametr falistości Wku

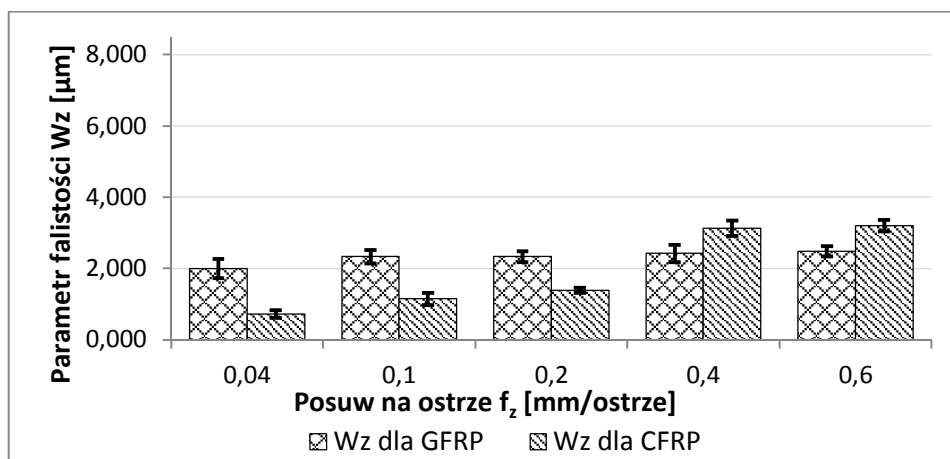
Otrzymane wyniki badań wpływu głębokości skrawania na parametry falistości poddano analizie statystycznej, która potwierdziła brak istotności wpływu głębokości skrawania na wartość każdego z badanych parametrów.

Na rysunkach 3.17–3.21 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na wybrane parametry falistości. Na rysunku 3.17 można zauważyć, że dla obu rodzajów materiałów wraz ze wzrostem posuwu na ostrze, parametry falistości W_a mają tendencję rosnącą.



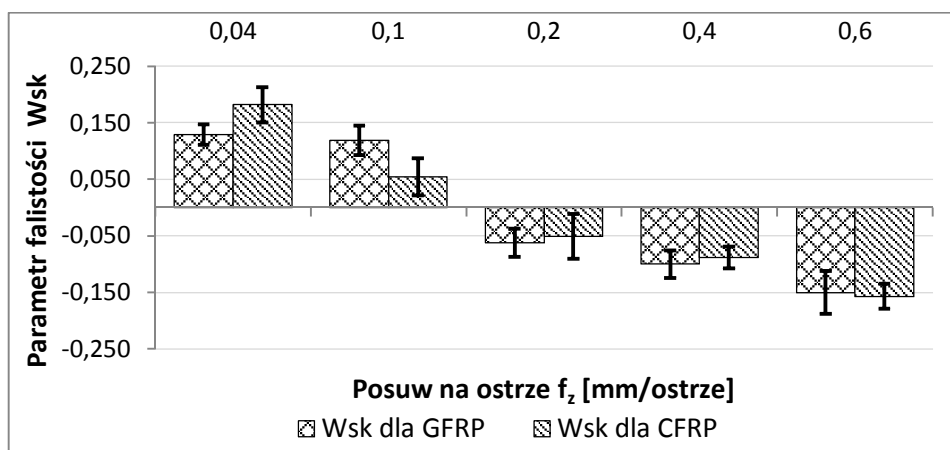
Rys. 3.17. Wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości W_a

Rysunek 3.18 przedstawia wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości W_z , gdzie podobnie jak w przypadku parametru W_a , dla obu rodzajów materiałów parametr ten ma tendencję rosnącą.



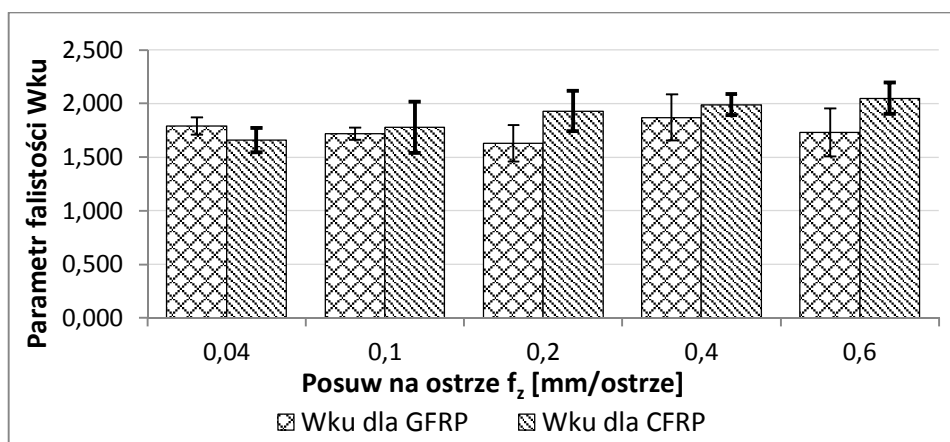
Rys. 3.18. Wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości W_z

Wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości Wsk przedstawiono na rysunku 3.19, gdzie w przypadku każdego z dwóch materiałów wraz ze wzrostem posuwu na ostrze parametr falistości Wsk maleje. Dla materiału z włóknami węglowymi wartości parametru Wsk maleją szybciej niż dla materiału GFRP. W zakresie posuwów $0,04 \div 0,1$ mm/ostrze wartości parametrów falistości Wsk przyjmują wartości dodatnie, a powyżej $0,1$ mm/ostrze wartości ujemne dla obydwu rodzajów materiałów.



Rys. 3.19. Wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości Wsk

Rysunek 3.20 przedstawia wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości Wku. Na podstawie wykresu można zauważyć, że wzrost posuwu na ostrze wpływa w niewielkim stopniu na wzrost parametru Wku, ale wartości dla obu materiałów nie przekraczają $1,7 \div 2,0$.

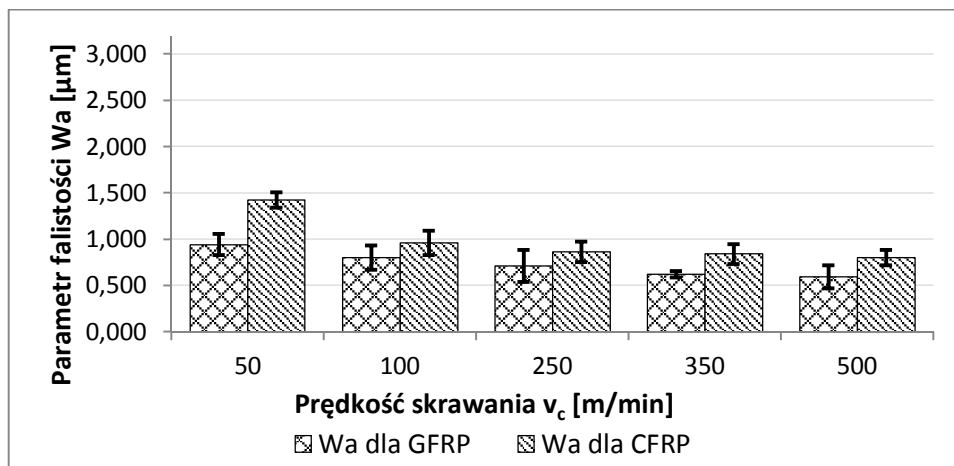


Rys. 3.20. Wpływ posuwu na ostrze na parametr falistości Wku

Pogarszającą się jakość powierzchni wraz ze wzrostem posuwu na ostrze można wytłumaczyć wzrostem wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania narzędzia. Zwiększający się opór narzędzia może spowodować większą amplitudę drgań i przekładać się na wzrost parametrów falistości W_a , W_z , W_{ku} i spadek W_{sk} .

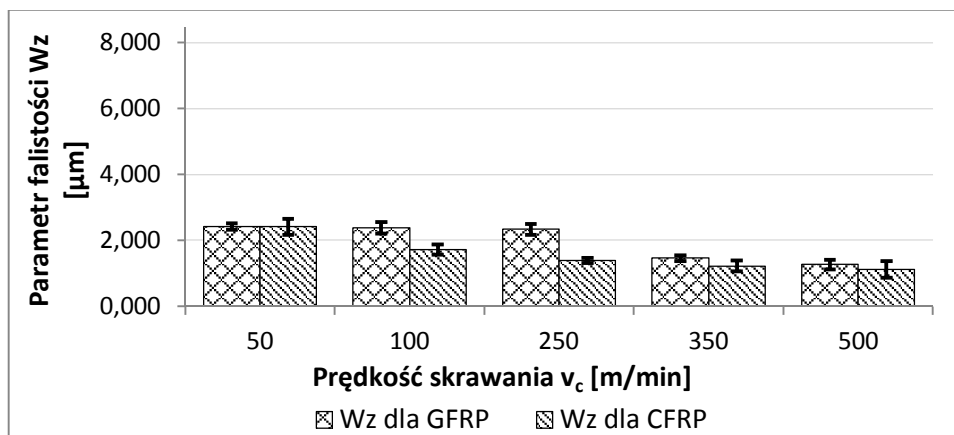
Wyniki badań falistości poddano sprawdzeniu za pomocą testu Shapiro-Wilka oraz testu wartości średniej, wykazano że posuw na ostrze ma istotny wpływ na badane parametry W_a , W_z , W_{sk} i W_{ku} .

Ostatnim analizowanym parametrem frezowania była prędkość skrawania. Na rysunku 3.21 przedstawiono zależność pomiędzy prędkością skrawania, a parametrem falistości W_a . Przeprowadzone badania frezowania i zmierzone wartości parametru falistości W_a pozwoliły sporządzić wykres, na którym można zauważyć, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania (dla GFRP i CFRP) wartości W_a mają tendencję malejącą w całym zakresie badanej prędkości skrawania (50÷500 m/min).



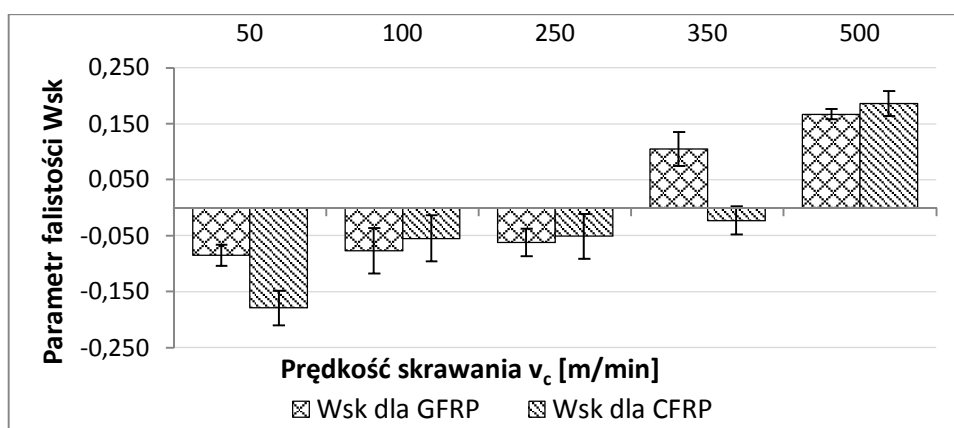
Rys. 3.21. Wpływ prędkości skrawania na parametr falistości W_a

W przypadku badania wpływu prędkości skrawania na parametr falistości W_z (rys. 3.22) zauważono, że (podobnie jak dla parametru W_a) wartość parametru falistości W_z ma tendencję malejącą wraz ze wzrostem prędkości skrawania.



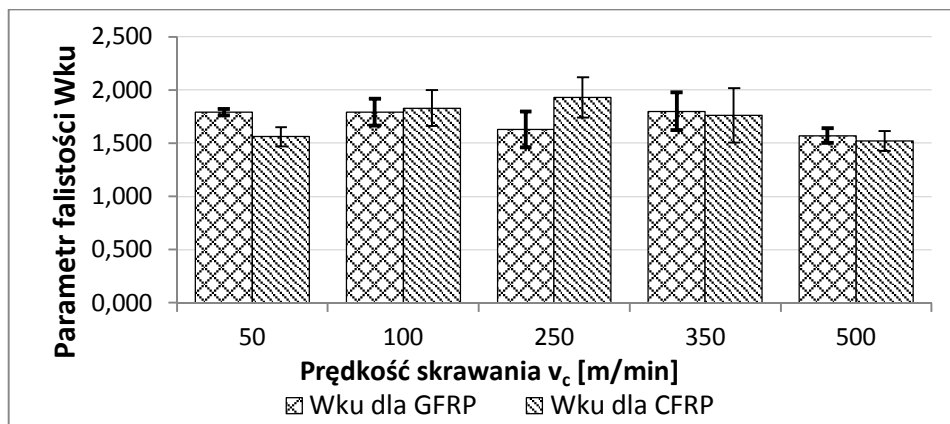
Rys. 3.22. Wpływ prędkości skrawania na parametr falistości Wz

Rysunek 3.23 przedstawia wykres zależności parametru falistości Wsk od prędkości skrawania. Dla materiału GFRP w zakresie 50÷350 m/min wartości parametrów Wsk przyjmują wartości ujemne, a dla 500 m/min występuje wartość dodatnia. W przypadku materiału CFRP wartości Wsk są ujemne dla 50 m/min, 100 m/min i 250 m/min. Dla prędkości skrawania równych 350 m/min i 500 m/min parametr Wsk przyjmuje wartości dodatnie. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że wzrost prędkości skrawania wpływa na zwiększanie wartości Wsk, przy czym wpływ ten jest bardziej widoczny dla materiału kompozytowego z włóknami węglowymi, z uwagi na najmniejszą i największą wartość falistości w zakresie badanych parametrów. Taka charakterystyka świadczy o zmniejszaniu głębokości wgłębień profilu falistości wraz ze wzrostem prędkości skrawania.



Rys. 3.23. Wpływ prędkości skrawania na parametr falistości Wsk

Wpływ prędkości skrawania na wartości parametrów falistości Wku przedstawia rysunek 3.24. Dla materiału GFRP wartości Wku znajdują się w zakresie od 1,6 do 1,9. W przypadku CFRP można zauważyć, że wartości falistości Wku rosną wraz ze wzrostem prędkości skrawania w zakresie 50÷250 m/min, a dla większej prędkości skrawania maleją.



Rys. 3.24. Wpływ prędkości skrawania na parametr falistości Wku

Przedstawione na wykresach wyniki badań pozwalają stwierdzić, że prędkość skrawania wpływa istotnie na parametry falistości. Niniejsze stwierdzenie potwierdzają również przeprowadzone analizy statystyczne, gdzie test wartości średniej wykazał istotność tego parametru. W przeprowadzonych analizach wartości testu t przekraczają wartości krytyczne.

Podsumowując wyniki badań chropowatości i falistości powierzchni można stwierdzić, że wzrost posuwu na ostrze wpływa na pogarszanie jakości powierzchni (wzrost wartości R_a , W_a , R_z , W_z , R_{ku} , W_{ku} , spadek wartości R_{sk} i W_{sk}). Z kolei wzrost prędkości skrawania powoduje zmniejszenie wartości parametrów R_a , W_a , R_z , W_z oraz wzrost parametrów R_{sk} i W_{sk} . Dla prędkości skrawania powyżej 250 m/min następuje zmniejszenie parametrów R_{ku} i W_{ku} . W przypadku wpływu głębokości skrawania nie zauważa się jednoznacznej zależności związanej ze wzrostem lub spadkiem parametrów chropowatości i falistości. Na podstawie wyników badań parametrów chropowatości i falistości, a w szczególności R_{ku} i W_{ku} (związanych z wadami powierzchniowymi) można stwierdzić, że kompozyt polimerowy wzmocniony włóknami węglowymi będzie bardziej narażony na występowanie wad powierzchniowych. Świadczą o tym wykresy, na których zauważa się, że dla kompozytu CFRP zmiany parametrów są większe niż dla GFRP. Przykładowo dla kompozytu GFRP wzrost wartości R_a wynosił 50%, a dla kompozytu CFRP 81,11%, porównując wartości chropowatości dla największej i najmniejszej wartości posuwu. Natomiast wartości parametrów falistości W_a wzrosły o 67,05% (dla GFRP)

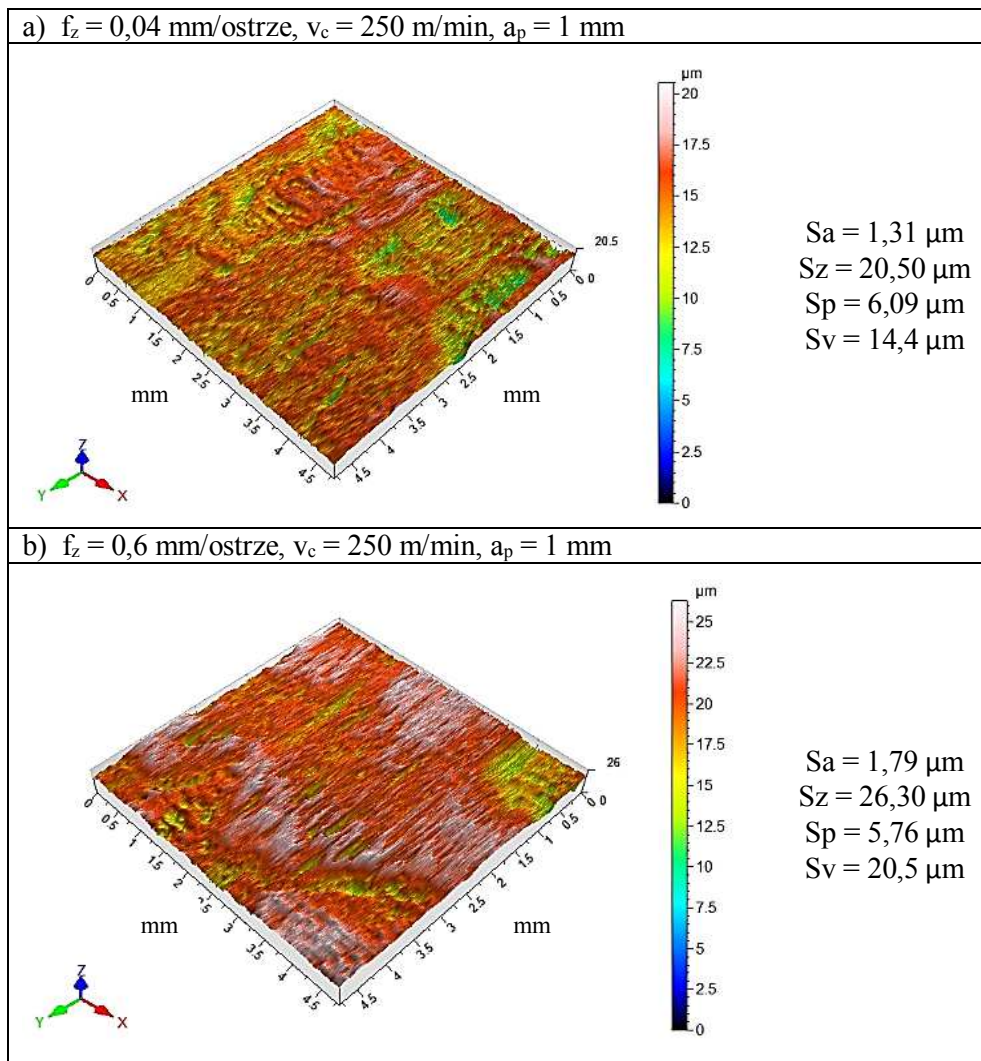
i 136,36% (dla CFRP) zestawiając największą i najmniejszą wartość posuwu. Analizując największą i najmniejszą wartość prędkości skrawania parametry chropowatości R_a zmniejszyły się o 31,82% (dla GFRP) i 84,62% (dla CFRP), a faliistości o 59,32% (dla GFRP) i 77,50% (dla CFRP).

W tabelach 3.15÷3.18 przedstawiono topografie wraz z parametrami 3D struktury geometrycznej (S_a , S_z , S_p i S_v) powierzchni kompozytów polimerowych po frezowaniu.

Analizowano topografie powierzchni po frezowaniu ze zmiennymi parametrami (przedstawionymi w tabeli 2.1). W tabeli 3.15 przedstawiono topografie i parametry 3D geometrycznej struktury powierzchni dla kompozytu polimerowego z włóknami szklanymi, dla najmniejszej i największej wartości posuwu.

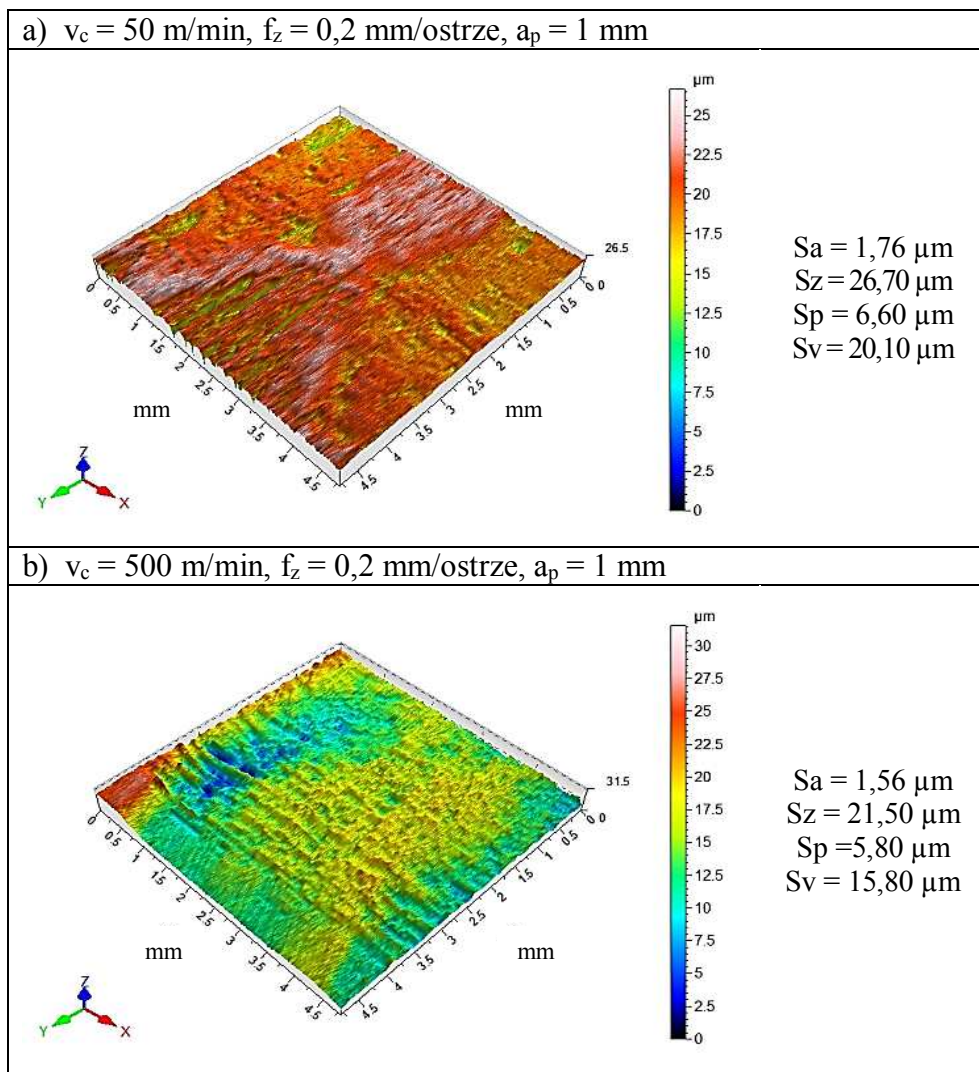
Na podstawie wyników pomiarów parametrów chropowatości oraz topografii stwierdzono, że dla małych wartości posuwu parametry chropowatości są mniejsze niż dla posuwów o dużych wartościach. Na podstawie zdjęć topografii powierzchni można zauważyć większy udział pól jasnoczerwonych (na skali oznaczają wysokość powyżej 25 μm , tabela 3.15b) dla największej wartości posuwu na ostrze (świadczy to o gorszej jakości tej powierzchni w porównaniu do powierzchni frezowanej z najmniejszą wartością posuwu na ostrze).

Tabela 3.15. Topografia powierzchni po frezowaniu kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi z najmniejszą (a) i największą (b) wartością posuwu na ostrze



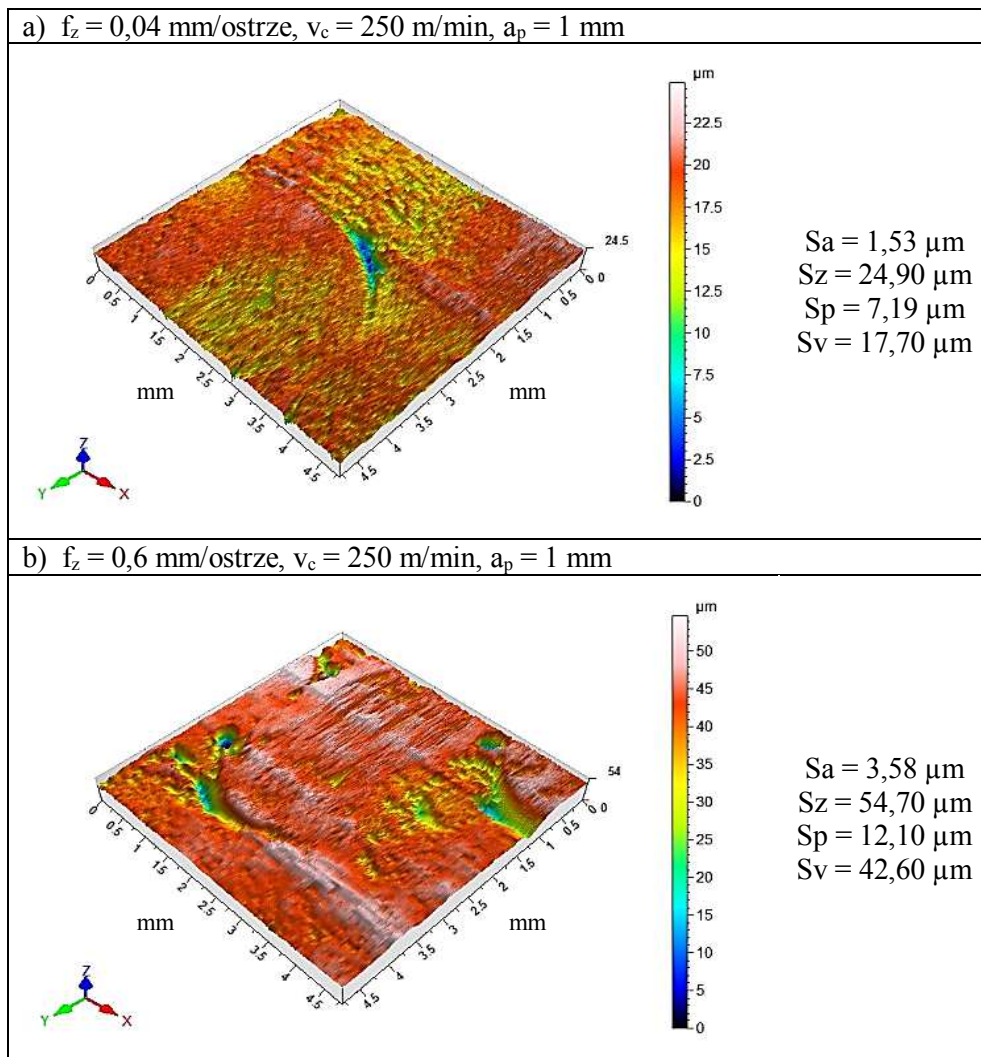
W tabeli 3.16 przedstawiono topografię i parametry powierzchni frezowanej z najmniejszą i największą wartością prędkości skrawania dla kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi. W przypadku największej prędkości skrawania można zauważyć duży udział pól niebieskich (zakres od $7,5 \text{ } \mu\text{m}$ do $12,5 \text{ } \mu\text{m}$, tabela 3.16b), co świadczy o lepszej jakości powierzchni w porównaniu do powierzchni frezowanej z prędkością skrawania 50 m/min, gdzie zauważa się większy udział powierzchni o wysokości nierówności powyżej $25 \text{ } \mu\text{m}$ (tabela 3.16a).

Tabela 3.16. Topografia powierzchni po frezowaniu kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi z najmniejszą (a) i największą (b) wartością prędkości skrawania



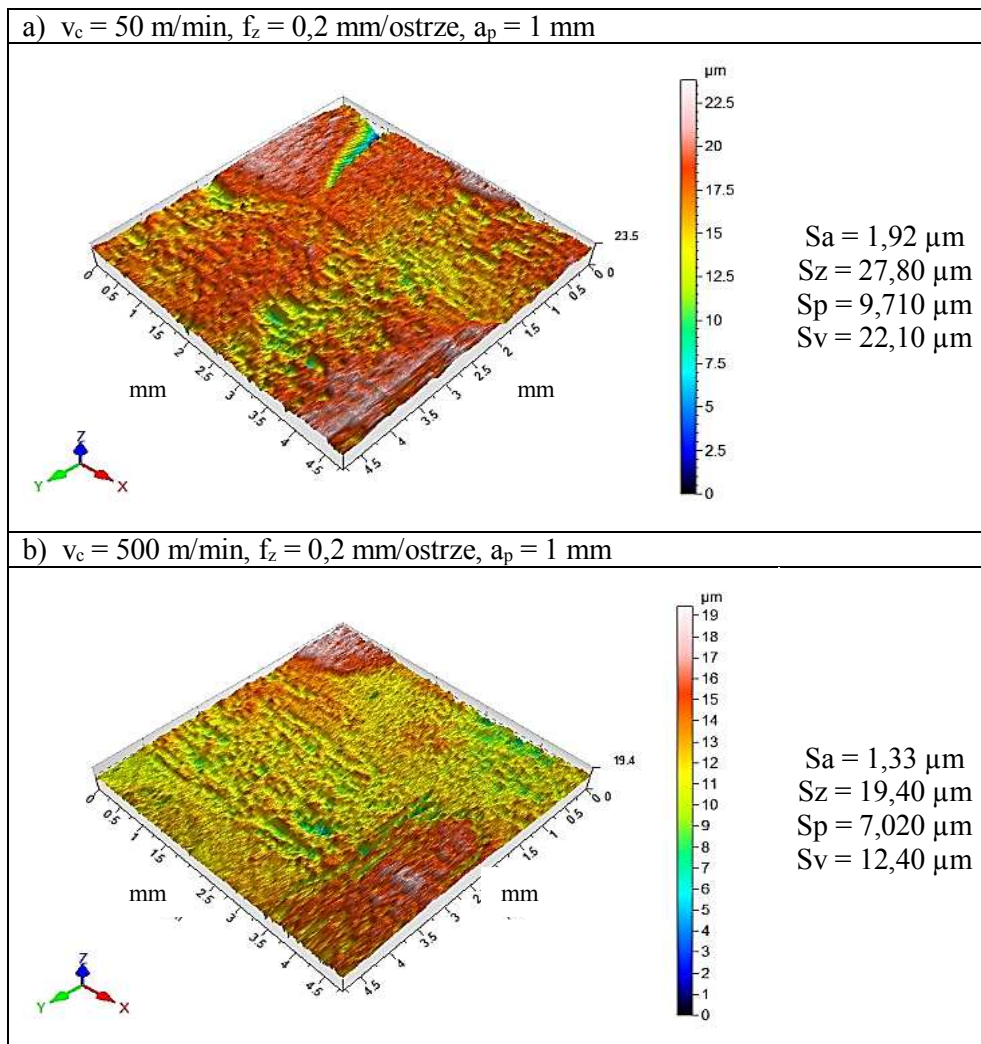
Topografię powierzchni frezowanej z najmniejszą i największą wartością posuwu dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi przedstawiono w tabeli 3.17. Analizując rysunki topografii dla CFRP w przypadku największej wartości posuwu na ostrze (tabela 3.17b) występuje duży udział nierówności o wysokości powyżej 50 μm . Dla najmniejszej wartości posuwu na ostrze wysokości nierówności nie przekraczają 25 μm (tabela 3.17a).

Tabela 3.17. Topografia powierzchni po frezowaniu kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi z najmniejszą (a) i największą (b) wartością posuwu na ostrze



Wraz ze wzrostem prędkości skrawania chropowatość powierzchni ulega polepszeniu, o czym świadczą przedstawione topografie i parametry S_a , S_z , S_p i S_v (tabela 3.18). Dla najmniejszej wartości prędkości skrawania powierzchnie otrzymane po frezowaniu charakteryzują się parametrem S_a wynoszącym $1,92 \mu\text{m}$, a wysokość nierówności na poziomie $20 \mu\text{m}$ (tabela 3.18a). Otrzymana topografia dla największej prędkości skrawania pozwala zauważyć duży udział nierówności w zakresie $10\div 13 \mu\text{m}$ (tabela 3.18b).

Tabela 3.18. Topografia powierzchni po frezowaniu kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi z najmniejszą (a) i największą (b) wartością prędkości skrawania



Porównując topografie i parametry 3D chropowatości powierzchni dwóch badanych materiałów stwierdzono, że wzrost posuwu na ostrze wpływa w większym stopniu na chropowatość powierzchni w materiale CFRP, gdzie dla małej wartości posuwu na ostrze (0,04 mm/ostre) parametr chropowatości S_a wynosił 1,53 μm , a dla największej badanej wartości posuwu na ostrze (0,6 mm/ostre) S_a wynosił 3,58 μm . Dla materiału GFRP różnice wartości chropowatości S_a dla najmniejszej i największej wartości posuwu na ostrze wynoszą 0,48 μm .

W przypadku wpływu wzrostu prędkości skrawania na topografię i parametry 3D chropowatości powierzchni można zauważyć, że dla kompozytu CFRP zmiana jest bardziej wyraźna, ponieważ wartość parametru 3D chropowatości S_a zmniejszyła się z $1,92\ \mu\text{m}$ (dla $50\ \text{m/min}$) do $1,33\ \mu\text{m}$ (dla $500\ \text{m/min}$). Dla GFRP wzrost prędkości skrawania spowodował zmniejszenie parametru S_a z $1,76\ \mu\text{m}$ do $1,56\ \mu\text{m}$ (odpowiednio dla najmniejszej i największej wartości prędkości skrawania).

3.3. Obserwacje mikroskopowe wad powierzchniowych po obróbce frezowaniem

Wytwarzanie i obróbka frezowaniem wiąże się z powstawaniem wad na powierzchni materiału kompozytowego. Za wadę powierzchniową w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi uznano każdą niedoskonałość struktury powierzchni materiału, której wymiary przekraczają kilkakrotnie średnicę włókna.

Rodzaje wad materiałowych w kompozytach polimerowych uzależnione są przede wszystkim od rodzaju i struktury materiału, sposobu wytwarzania i obróbki. Do wad powstałych na etapie wytwarzania zalicza się pęcherze powietrza, pory, karby, fałdy, zagniecenia, wtrącenia ciał obcych, niekompletne utwardzenie żywicy, pomarszczone warstwy, nieciągłości osnowy i włókien. Wady te mogą zostać uwidocznione podczas obróbki.

Charakterystykę wad powierzchniowych przedstawiono w podrozdziale 1.3, a klasyfikację wad przedstawiono w podrozdziale 2.2.4. Charakteryzując wady w kompozytach polimerowych dokonano ogólnego podziału na wady powstałe w kompozytach polimerowych wzmocnionych włóknami szklanymi przesyconych żywicą epoksydową i kompozytach polimerowych wzmocnionych włóknami węglowymi przesyconych żywicą epoksydową na skutek zmiennych parametrów obróbki skrawaniem.

Badania wad polegały na obserwacji powierzchni kompozytu pod mikroskopem. W celu ilościowego określenia wad badane powierzchnie posypano proszkiem o wielkości ziarna mniejszej niż obserwowane wady. Proszek dobrano o kolorze kontrastującym z badaną powierzchnią. Następnie za pomocą mikroskopu zmierzono powierzchnię wad zakrytych proszkiem.

3.3.1. Wpływ obróbki skrawaniem na powstawanie wad powierzchniowych w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi

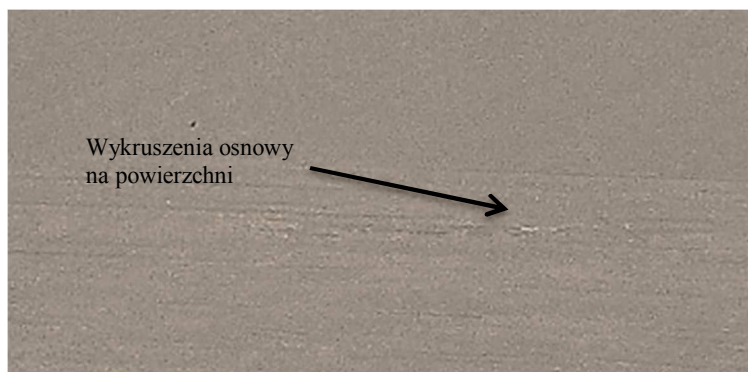
Strukturę powierzchni kompozytów GFRP po frezowaniu poddano obserwacjom pod mikroskopem i ocenom ilościowym powstających wad. Pierwszym zmiennym parametrem była głębokość skrawania. Na podstawie

obserwacji nie wykazano wyraźnych zmian i uzależniania występujących wad na powierzchni badanego materiału od zmiany głębokości frezowania.

Kompozyt polimerowy z włóknami szklanymi jest materiałem wizualnie zewnętrznie monolitycznym i stosunkowo jednorodnym. W przypadku obróbki takiego rodzaju materiału najczęściej występującą wadą są wykruszenia żywicy. Zmiana parametru frezowania jakim jest posuw na ostrze powoduje, że wraz z jego wzrostem powstaje więcej wykruszeń w strukturze materiału. Porównując powierzchnie frezowane z najmniejszym posuwem do powierzchni frezowanej z posuwem 0,6 mm/ostrze, czyli o największej badanej wartości posuwu, wykazano, że dużo lepszą jakość powierzchni uzyskano przy małym posuwie. Jest ona wolna od wad, które można zauważyć pod mikroskopem. Po frezowaniu z posuwem 0,6 mm/ostrze powstają widoczne wykruszenia żywicy. Liczba wykruszeń w odniesieniu do zmiany posuwu jest trudna do obliczenia z powodu wielkości takich wad. Średnice ziaren proszków o kolorach kontrastujących z badaną powierzchnią były większe niż powstające wady w kompozytach polimerowych wzmocnionych włóknami szklanymi.

Ostatnim z analizowanych parametrów frezowania w przypadku GFRP była prędkość skrawania. Obróbka z dużą prędkością może powodować szybsze zużywanie się narzędzi.

Rysunek 3.25 przedstawia przykładową powierzchnię po frezowaniu z najmniejszą prędkością skrawania 50 m/min, posuwem 0,2 mm/ostrze i głębokością skrawania 1 mm, gdzie występują niewielkie wykruszenia osnowy.



Rys. 3.25. Powierzchnia kompozytu polimerowego z włóknami szklanymi przesasyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostrze, prędkością skrawania 50 m/min i głębokością skrawania 1 mm z widocznymi wadami osnowy (powiększenie $\times 100$)

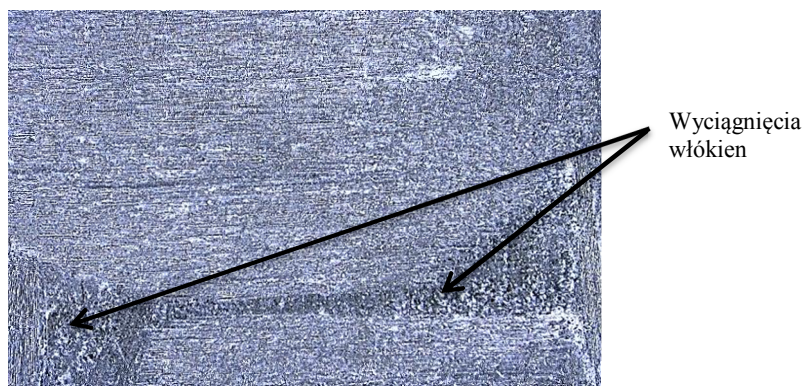
Liczba wad występujących po frezowaniu kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami szklanymi oraz ich powierzchnie są trudne do określenia z powodu małych wymiarów tych wad. Wymiary ziaren proszku o kolorze kontrastującym z badaną powierzchnią były większe niż powstające wady w kompozytach polimerowych wzmocnionych włóknami szklanymi.

3.3.2. Wpływ obróbki skrawaniem na powstawanie wad powierzchniowych w kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi

Kompozyty polimerowe z włóknami węglowymi w porównaniu do kompozytów z włóknami szklanymi charakteryzują się dużo gorszą jakością powierzchni, biorąc pod uwagę zarówno chropowatość oraz falistość, jak i występujące wady powierzchniowe. Dla kompozytu CFRP przebadano wpływ parametrów frezowania na wady powierzchniowe.

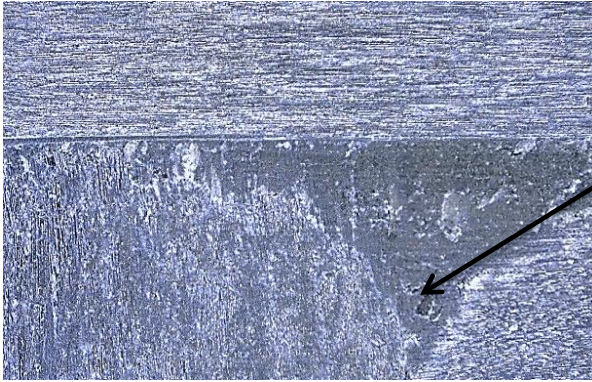
W badaniach przedstawionych w poprzednich podrozdziałach dokonano analizy chropowatości i falistości powierzchni kompozytów CFRP, w której wykazano pogarszanie się jakości powierzchni pod wpływem zwiększania się wartości posuwu i poprawy jakości powierzchni wraz ze wzrostem prędkości skrawania.

Na rysunku 3.26, 3.27 i 3.28 zestawiono przykładowe powierzchnie po frezowaniu kompozytu CFRP ze zmieniającą się głębokością skrawania. Badania wpływu głębokości skrawania na powierzchnię kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi z uwagi na wady powierzchniowe pokazały znikomy wpływ głębokości skrawania na jakość powierzchni po frezowaniu. Na rysunkach 3.27a, 3.27b i 3.27c można zauważyć wykruszenia żywicy (osnowy), których wymiary i ilość zmienia się, ale bez związku ze zmianą głębokości skrawania. Na powierzchniach po frezowaniu ze zmienną głębokością skrawania pojawiają się również wyciągnięcia włókien (rys. 3.26 i rys. 3.28), niezależnie od zmiany głębokości skrawania.



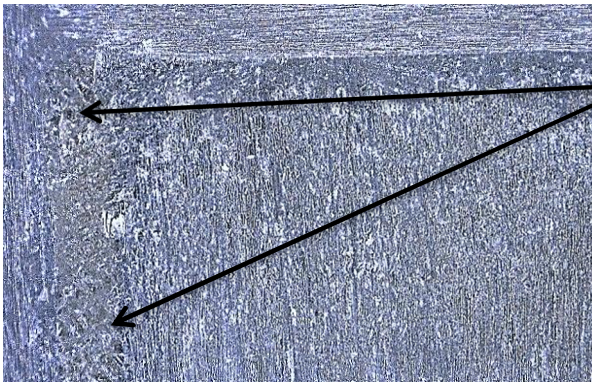
Rys. 3.26. Powierzchnia kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostre, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 0,5 mm (powiększenie x100)

a)



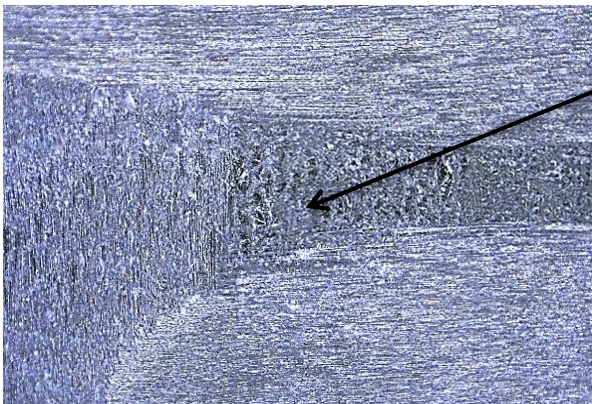
Wykruszenia żywicy

b)



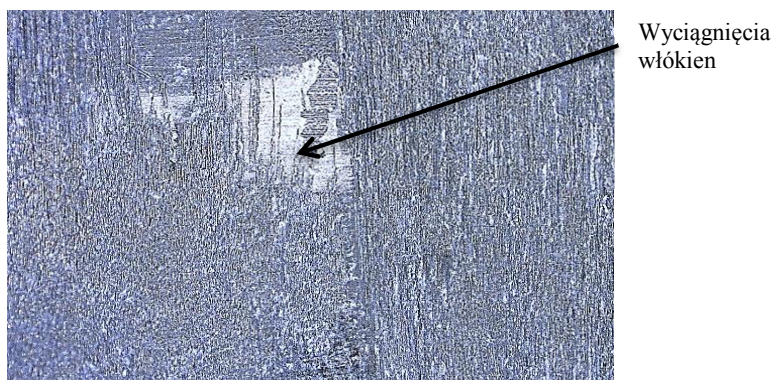
Wykruszenia żywicy

c)



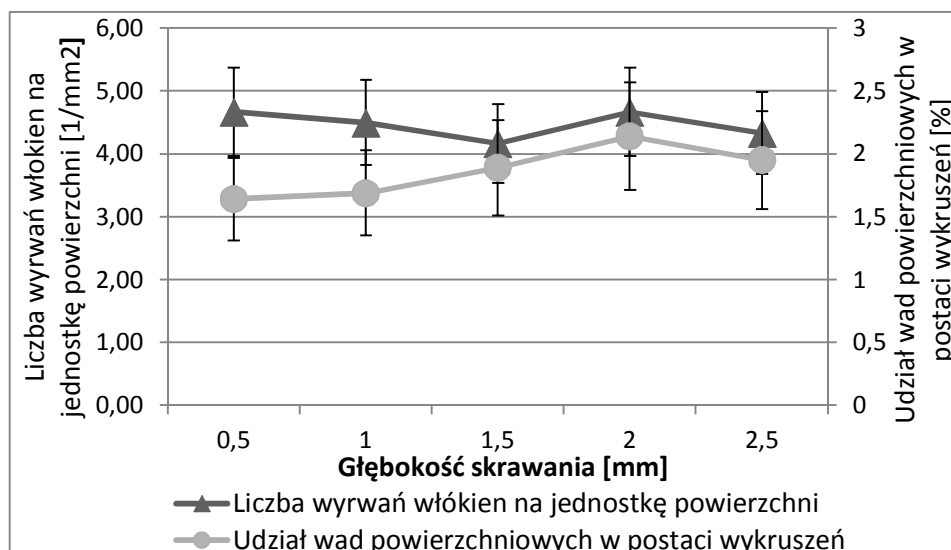
Wykruszenia żywicy

Rys. 3.27. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostrze, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania: a) 1 mm, b) 1,5 mm, c) 2 mm (powiększenie x100)



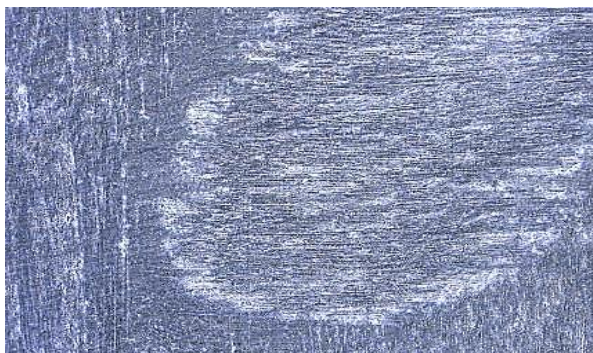
Rys. 3.28. Powierzchnia kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostre, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 2,5 mm (powiększenie x100)

Na rysunku 3.29 przedstawiono wpływ zmieniającej się głębokości skrawania na liczbę wyrwań na jednostkę powierzchni oraz na procentowy udział wad powierzchniowych w postaci wykruszeń osnowy i wzmocnienia w odniesieniu do badanej powierzchni. Na przedstawionym wykresie można zauważyć, że zarówno liczba wyrwań na jednostkę powierzchni, jak i udział wad w postaci wykruszeń osnowy w kompozycie CFRP nie zależy jednoznacznie od głębokości skrawania.



Rys. 3.29. Wpływ głębokości skrawania na liczbę wyrwań i udział wad powierzchniowych w postaci wykruszeń osnowy w kompozycie CFRP

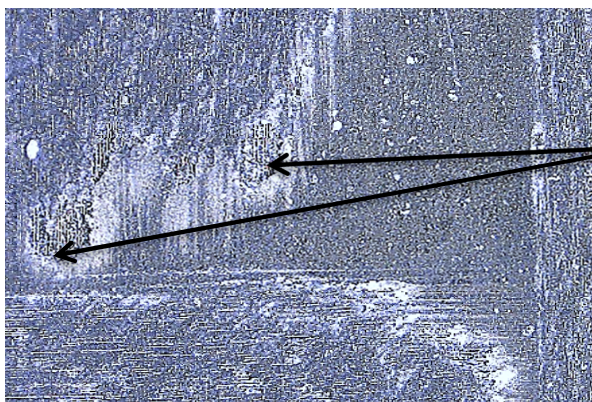
Na rysunku 3.30 przedstawiono powierzchnię po frezowaniu z małym posuwem na ostrze, na poziomie 0,04 mm/ostrze, gdzie brak jest wyraźnie widocznych uszkodzeń żywicy i wzmocnienia.



Rys. 3.30. Powierzchnia kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskana podczas frezowania z posuwem 0,04 mm/ostrze, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 1 mm (powiększenie x100)

Na powierzchni frezowanej z posuwem 0,1 mm/ostrze przedstawionej na rysunku 3.31 zaczynają się pojawiać wykruszenia osnowy będące najczęstszą wadą występującą w materiale CFRP. Są to wykruszenia powstające głównie na granicy pomiędzy elementami składowymi kompozytu, czyli osnowy i wzmocnienia.

Wyniki badań pokazują, że wraz ze wzrostem posuwu na ostrze jakość powierzchni ulega pogorszeniu. W przyjętym zakresie zmian posuwu powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki z najmniejszą wartością tego parametru wykazuje najmniejszą liczbę wad. Wraz ze wzrostem posuwu pojawiają się większe i liczniejsze różnego rodzaju wady.

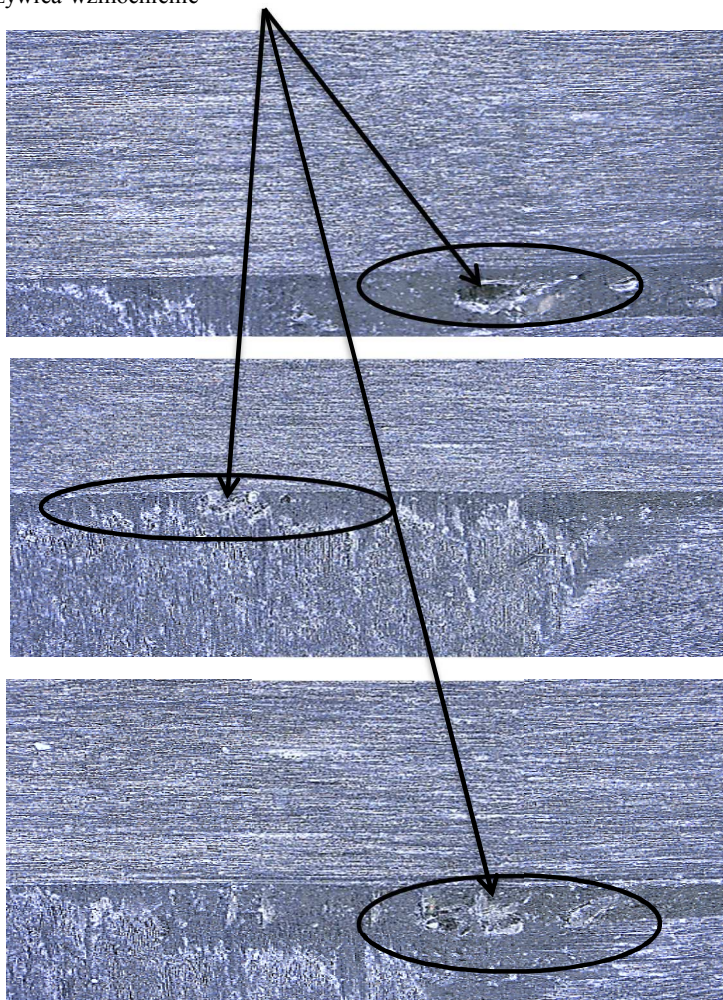


Wykruszenia na
granicy żywica-
wzmocnienie

Rys. 3.31. Powierzchnia kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,1 mm/ostrze, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 1 mm (powiększenie x100)

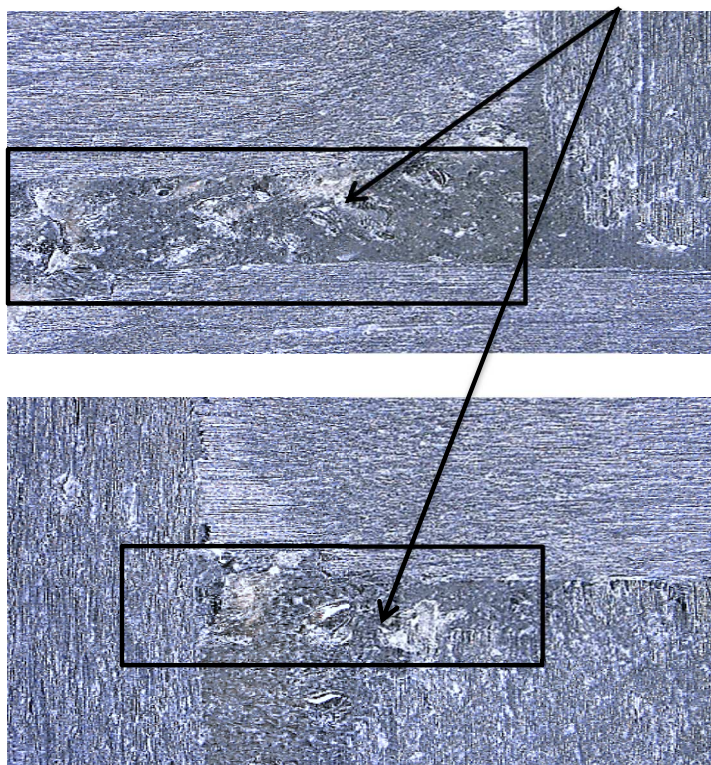
Wzrost posuwu powoduje, że oprócz wad w postaci wykruszeń na granicy spójności, które zaczynają zajmować coraz większą powierzchnię, pojawiają się również wykruszenia w obszarze samej żywicy, co jest widoczne na rysunku 3.32 (dla posuwu 0,2 mm/ostrze) oraz na rysunku 3.33 (dla posuwu 0,4 mm/ostrze).

Wykruszenia żywicy oraz wykruszenia na granicy żywica-wzmocnienie



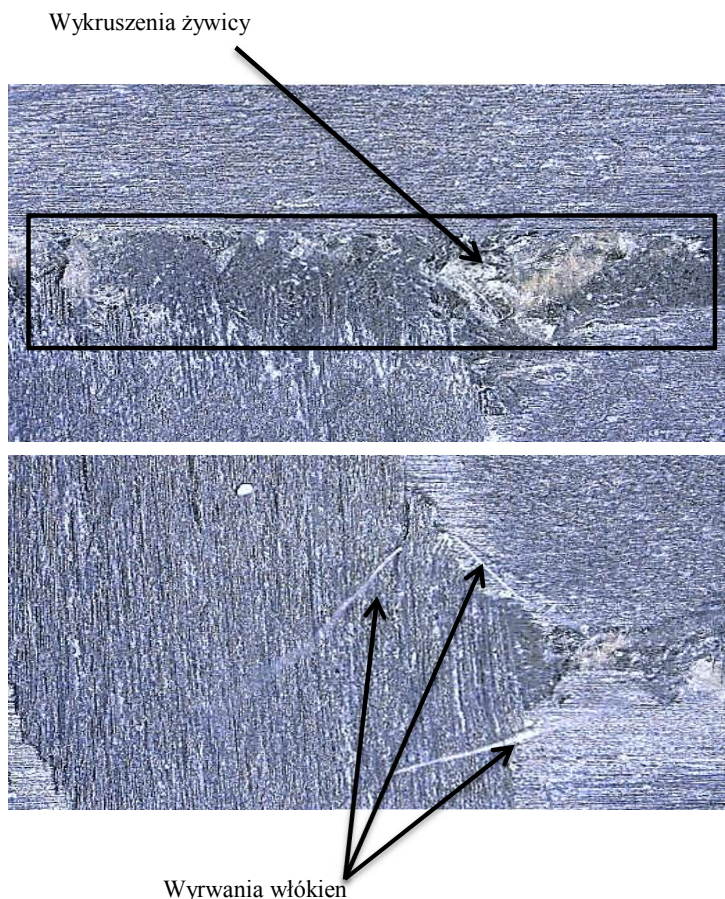
Rys. 3.32. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostrze, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 1 mm (powiększenie x100)

Wykruszenia żywicy oraz wykruszenia na granicy
żywica-wzmocnienie



Rys. 3.33. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,4 mm/ostrze, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 1 mm (powiększenie x100)

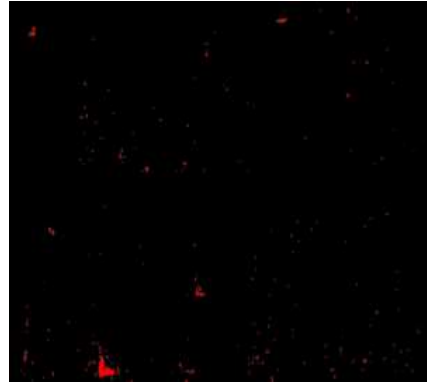
Przy badaniu powierzchni po frezowaniu z posuwem 0,6 mm/ostrze można zauważyć znaczne wykruszenia żywicy i wyrwania włókien przedstawione na rysunku 3.34.



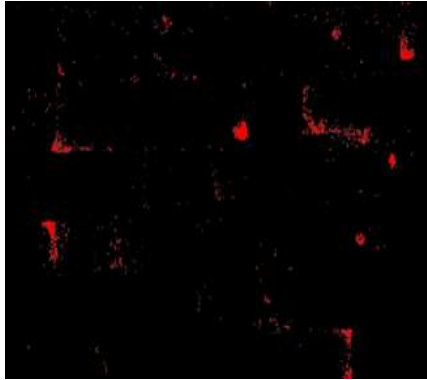
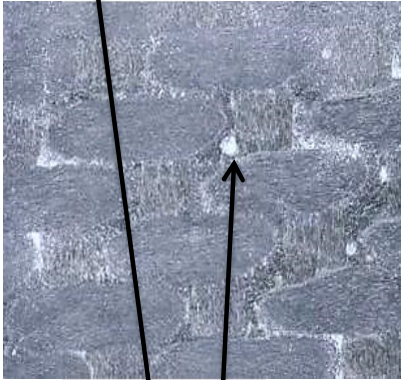
Rys. 3.34. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,6 mm/ostrze, prędkością skrawania 250 m/min i głębokością skrawania 1 mm (powiększenie $\times 100$)

Obserwacje poparto również analizą ilościową powstających wad. Na rysunkach 3.35 oraz 3.36 przedstawiono ilościową analizę wad w postaci wykruszeń, które stanowią od 0,33% (dla posuwu 0,04 mm/ostrze) do 1,92% (dla posuwu 0,6 mm/ostrze) badanej powierzchni.

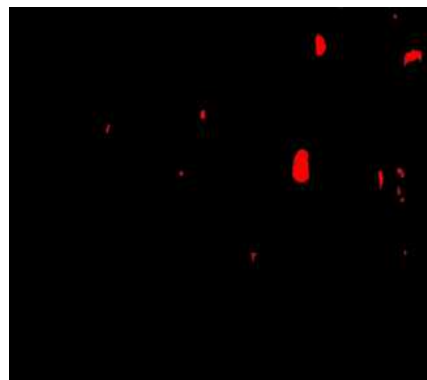
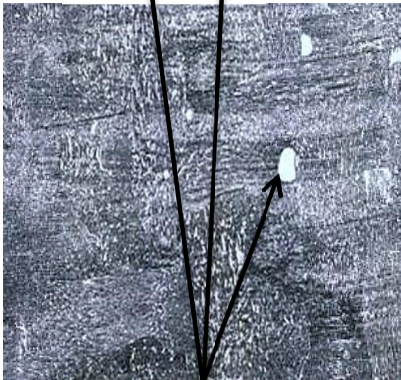
a)



b)

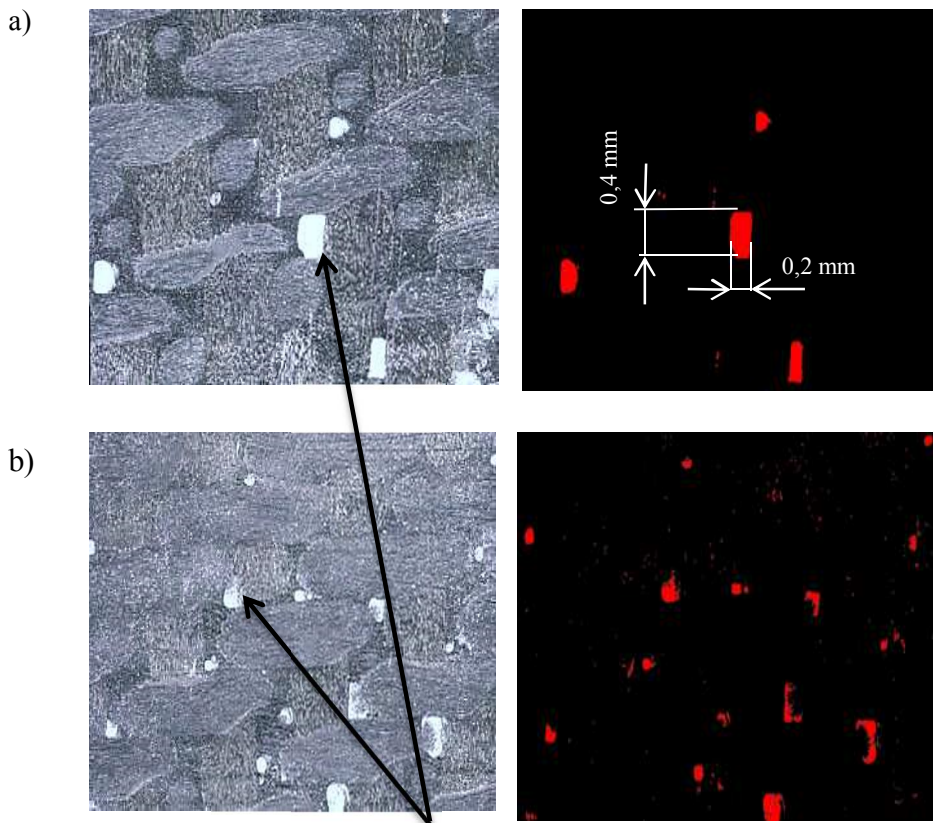


c)



Wykruszenia żywicy i wzmocnienia

Rys. 3.35. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z prędkością skrawania 250 m/min, głębokością skrawania 1 mm i zmiennymi wartościami posuwu: a) 0,04 mm/ostrze, b) 0,1 mm/ostrze, c) 0,2 mm/ostrze (powiększenie x100)

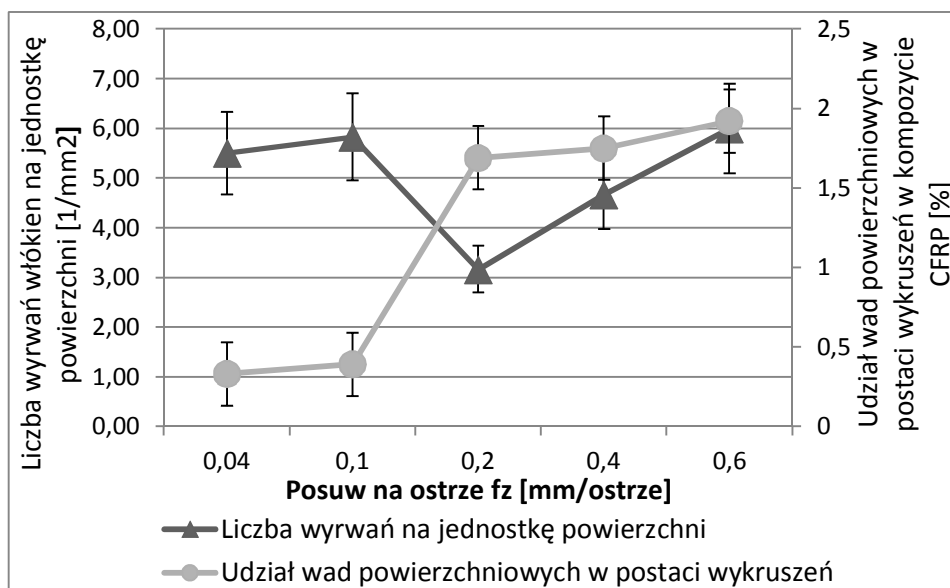


Wykruszenia żywicy i wzmocnienia

Rys. 3.36. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z prędkością skrawania 250 m/min, głębokością skrawania 1 mm i zmiennymi wartościami posuwu: a) 0,4 mm/ostre, b) 0,6 mm/ostre (powiększenie x100)

Do badań użyto proszku o kontrastującym kolorze. Za wadę uznano wgłębienie, którego wymiary przekraczają 5-krotnie średnicę włókna. Na rysunku 3.36a zaznaczono wymiary wady produkcyjnej powstałej na powierzchni kompozytów CFRP. Największa zmierzona wada w postaci wykruszenia żywicy i wzmocnienia wynosi 0,4 mm x 0,2 mm, a powierzchnia wszystkich wad stanowiła 1,75% całej badanej powierzchni. Na rysunku 3.37 przedstawiono wykres pokazujący wpływ posuwu na ostrze na liczbę wyrwań na jednostkę powierzchni i udział procentowy wad powierzchniowych w postaci wykruszeń osnowy i żywicy. Zmiana posuwu na ostrze powoduje, że liczba wyrwań na jednostkę powierzchni w początkowym zakresie badanych posuwów ma tendencję rosnącą, następnie spada dla posuwu 0,2 mm/ostre (dla posuwu 0,2 mm/ostre osiąga najmniejszą liczbę wyrwań), a powyżej 0,4 mm/ostre do

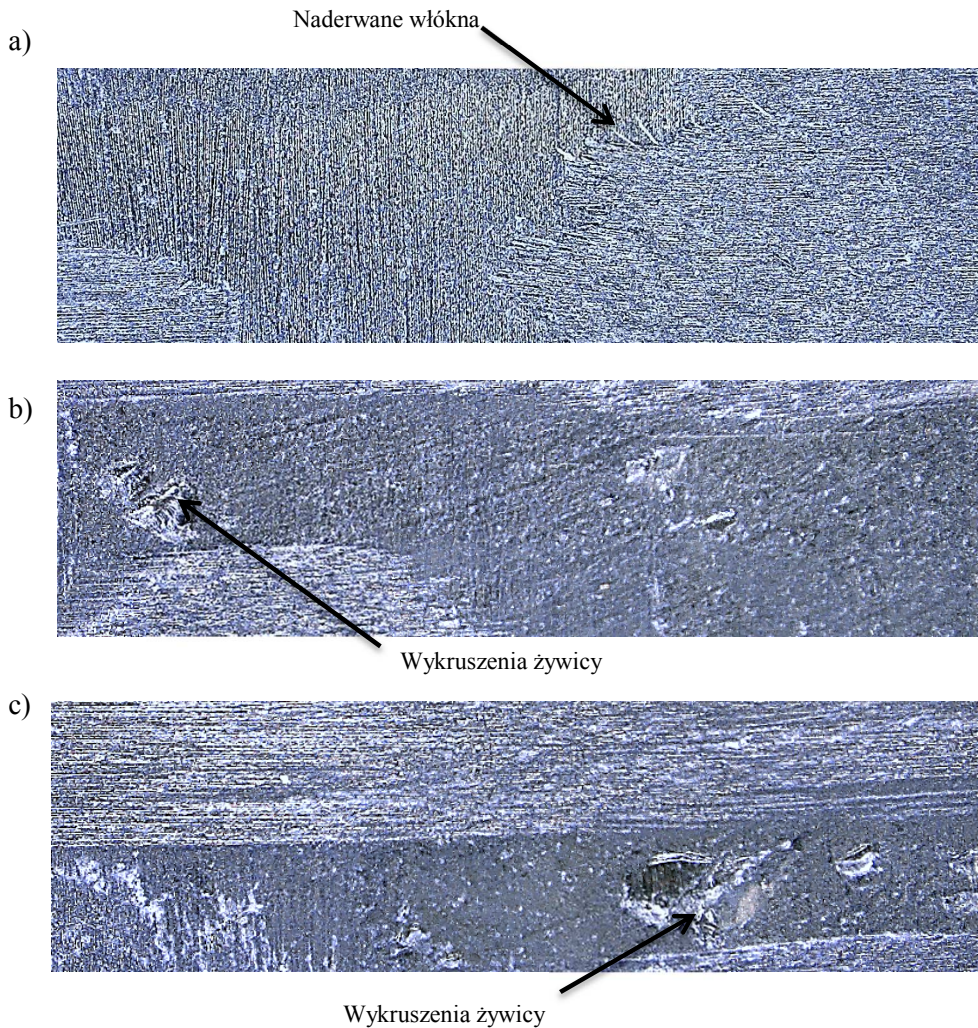
0,6 mm/ostrze ma tendencję rosnącą. Uzyskane wyniki badań wad powierzchniowych pokrywają się z badaniami parametrów struktury geometrycznej powierzchni, gdzie o ilości wad świadczą parametry Rku i Wku. Zwiększając się liczba wyrwań można wyjaśnić stwierdzeniem, że wraz ze wzrostem posuwu na ostrze włókna są wyrywane zamiast ścinane. Wyciągane włókna naruszają strukturę materiału kompozytowego co powoduje wykruszenia na granicy włókno/osnowa, a także w samej osnowie.



Rys. 3.37. Wpływ posuwu na ostrze na liczbę wyrwań i udział powierzchniowych wad w postaci wykruszeń osnowy w kompozycie CFRP

Przeprowadzając analizę wpływu prędkości skrawania na powstawanie wad powierzchniowych stwierdzono, że przy małej prędkości skrawania kompozyt z włóknami węglowymi narażony jest na wyrywanie włókien. Przy małej prędkości skrawania włókna zamiast ścinania są częściowo wyciągane. Na rysunku 3.38a przedstawiono powierzchnię po frezowaniu z prędkością skrawania 50 m/min, na której zaznaczono naderwane włókna.

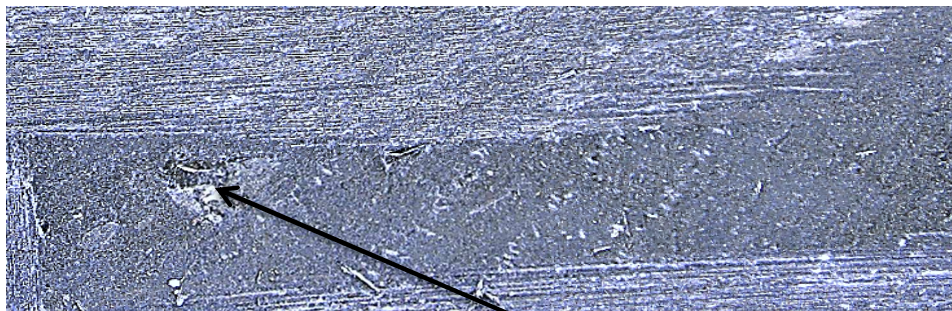
Powierzchnię po frezowaniu z prędkością 100 m/min przedstawiono na rysunku 3.38b, gdzie są widoczne niewielkie wykruszenia osnowy, których wymiary zwiększają się ze wzrostem prędkości skrawania osiągając największe wartości dla prędkości skrawania 250 m/min (rys. 3.38c).



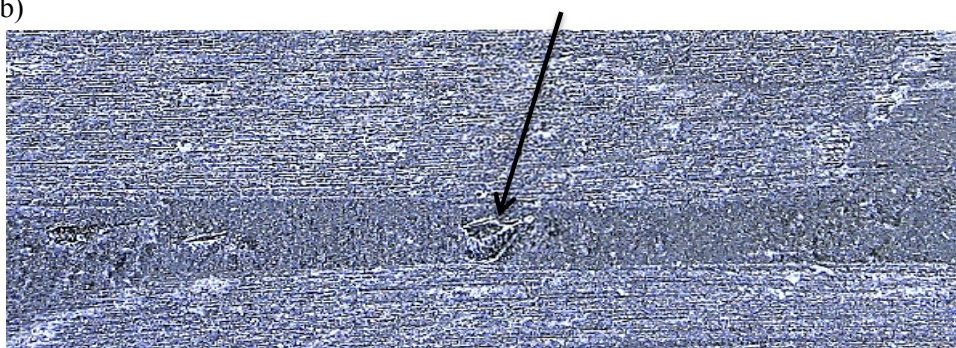
Rys. 3.38. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostre, głębokością skrawania 1 mm i zmienną prędkością skrawania: a) 50 m/min, b) 100 m/min, c) 250 m/min (powiększenie x100)

Po przekroczeniu 250 m/min i wraz ze wzrostem prędkości skrawania wielkość pojedynczych wykruszeń żywicy zmniejsza się, co przedstawiono na rysunkach 3.39a i 3.39 b.

a)



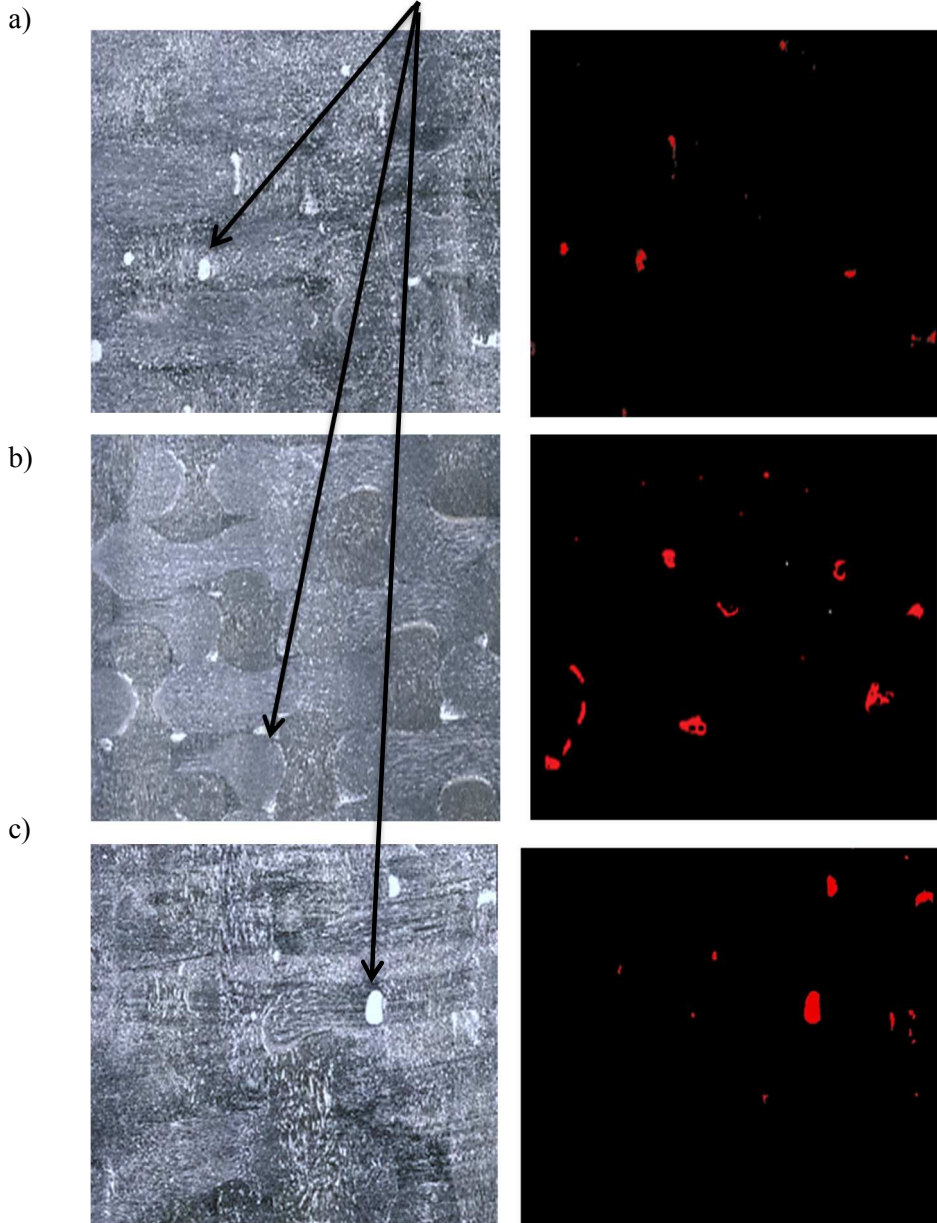
b)



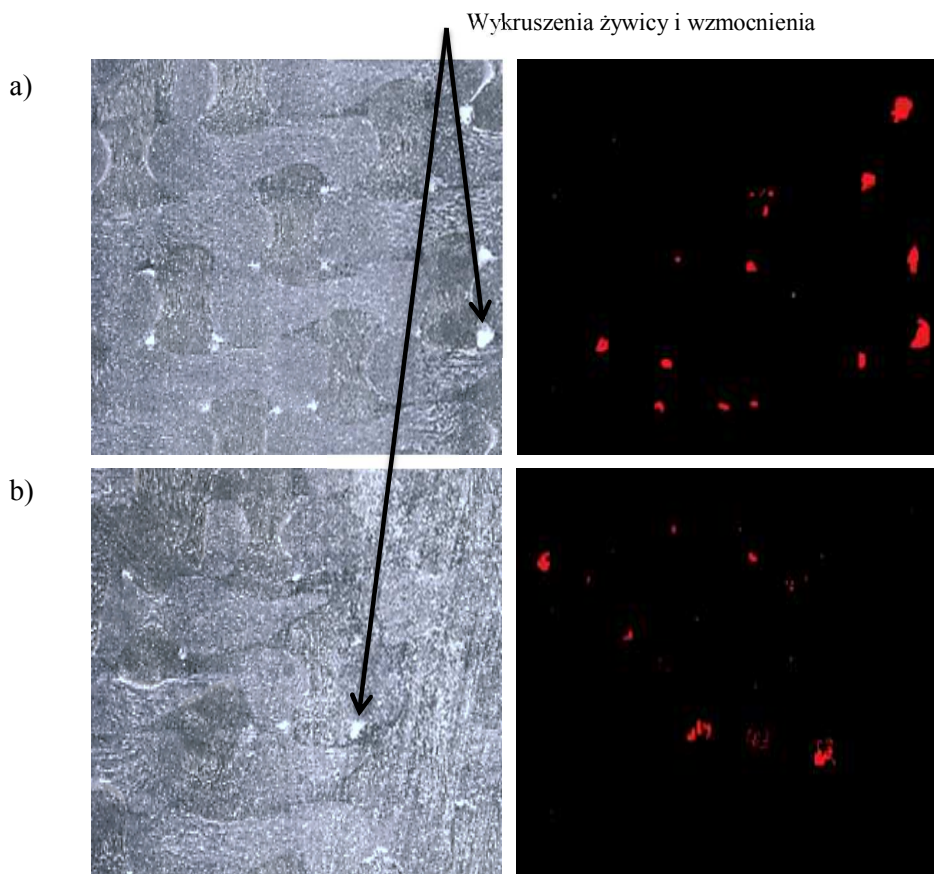
Rys. 3.39. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostre, głębokością skrawania 1 mm i zmienną prędkością skrawania: a) 350 m/min, b) 500 m/min (powiększenie x100)

Zmiany na frezowanej powierzchni wraz ze zwiększaniem prędkości skrawania określono ilościowo jako udział procentowy wad w stosunku do całej wziętej do analizy powierzchni. Na rysunkach 3.40 i 3.41 przedstawiono zmieniającą się liczbę wad w postaci wykruszeń na powierzchniach frezowanych z różną prędkością skrawania. Po frezowaniu z najmniejszą prędkością skrawania stwierdzono 0,35% wad na powierzchni, ale wraz ze wzrostem v_c udział wad wzrasta do poziomu 1,69% dla prędkości skrawania 250 m/min. Powyżej tej wartości, a więc przy dalszym wzroście prędkości skrawania, udział wad zmniejsza się.

Wykruszenia żywicy i wzmocnienia



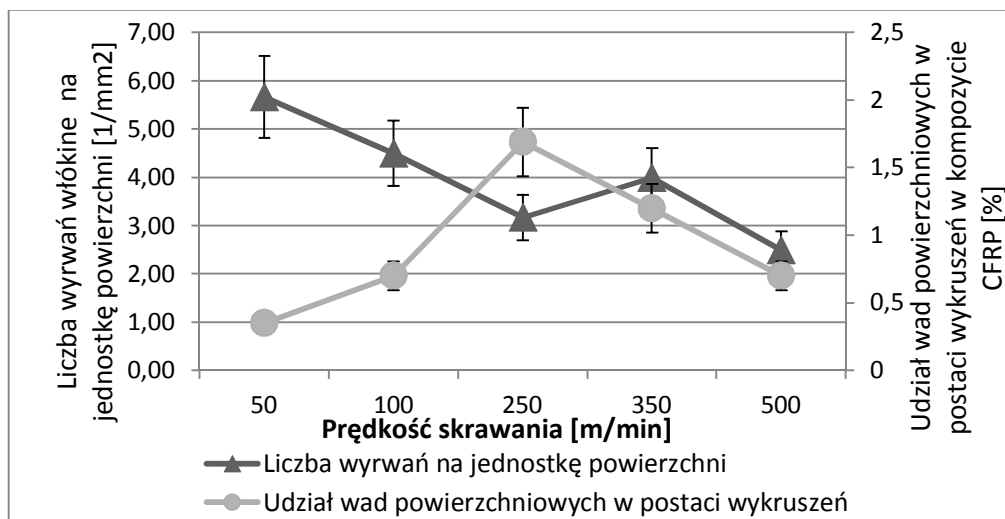
Rys. 3.40. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostrze, głębokością skrawania 1 mm i zmiennymi wartościami prędkości skrawania: a) 50 m/min, b) 100 m/min, c) 250 m/min (powiększenie x100)



Rys. 3.41. Powierzchnie kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową uzyskane podczas frezowania z posuwem 0,2 mm/ostrze, głębokością skrawania 1 mm i zmiennymi wartościami prędkości skrawania: a) 350 m/min, b) 500 m/min (powiększenie x100)

Zależności liczby wyrwań włókien oraz udziału powierzchniowego wad w postaci wykruszeń od prędkości skrawania przedstawiono na rysunkach 3.42. Liczbę tę określono na powierzchni o wymiarach $2000\ \mu\text{m} \times 3000\ \mu\text{m}$, a następnie odniesiono do $1\ \text{mm}^2$. W całym zakresie wzrostu prędkości skrawania liczba wyrwań włókien ma tendencję malejącą. Udział wad w postaci wykruszeń żywicy rośnie do prędkości skrawania 250 m/min, a powyżej tej wartości zmniejsza się wraz ze wzrostem tego parametru skrawania.

Można przypuszczać, że zbyt mała prędkość skrawania (do 250 m/min) powoduje wykruszenia, a duża prędkość skrawania powoduje, że włókna są ścinane, a nie wyciągane. Brak uszkodzeń włókien i ich wyciągania powoduje również coraz mniejszą liczbę wykruszeń na powierzchni kompozytów polimerowych.



Rys. 3.42. Wpływ prędkości skrawania na liczbę wyrwań i udział wad w postaci wykruszeń osnowy w kompozycie CFRP

Wyniki przeprowadzonych badań wpływu parametrów frezowania na wady powierzchniowe poddano analizie statystycznej. Wykazano, że rozkład badanych zmiennych jest zbliżony do normalnego (tabela 3.19).

Tabela 3.19 Wyniki badań normalności rozkładu wad powierzchniowych na powierzchni po frezowaniu przy zmiennych parametrach skrawania, (kompozyt GFRP)

Głębokość skrawania [mm]	N	Wkr	Udział wad w postaci wykruszeń	Liczba wyrwań
0,5	6	0,788	0,823	0,921
1			0,829	0,809
1,5			0,933	0,920
2			0,934	0,920
2,5			0,886	0,906
Posuw na ostrze [mm/ostrze]	N	Wkr	Udział wad w postaci wykruszeń	Liczba wyrwań
0,04	6	0,788	0,877	0,867
0,1			0,929	0,992
0,2			0,839	0,909
0,4			0,883	0,990
0,6			0,809	0,864
Prędkość skrawania [m/min]	N	Wkr	Udział wad w postaci wykruszeń	Liczba wyrwań
50	6	0,788	0,869	0,931
100			0,808	0,959
250			0,814	0,820
350			0,826	0,970
500			0,859	0,916

W tabeli 3.19 liczba wyrwań określa ile wyrwanych włókien przypada na 1 mm^2 .

Po przeprowadzeniu testów wartości średniej (tabele 3.20, 3.21 i 3.22) dla zmiennych parametrów frezowania stwierdzono, że głębokość skrawania nie ma istotnego wpływu, natomiast posuw i prędkość skrawania mają istotny wpływ na liczbę wyrwań na jednostkę powierzchni oraz na udział procentowy wad w postaci wykruszeń.

Tabela 3.20. Wyniki badań testu wartości średniej dla wad powierzchniowych na powierzchni po frezowaniu przy zmiennej głębokości skrawania (kompozyt CFRP)

	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t _{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Udział wad powierzchniowych w postaci wykruszeń	a _p = 0,5 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	1,95747	2,571	t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	0,16631		t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 1,5 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	1,54243		t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 2 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	0,59483		t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 2,5 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min				
Liczba wyrwań włókien na jednostki powierzchni	a _p = 0,5 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	1,11803	2,571	t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	2,14834		t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 1,5 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	0,96825		t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 2 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	0,53709		t<t _{kr}	brak istotności wpływu
	a _p = 2,5 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min				

Tabela 3.21 Wyniki badań testu wartości średniej dla wad powierzchniowych na powierzchni po frezowaniu przy zmiennym posuwie na ostrze (kompozyt CFRP)

	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t _{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Udział wad powierzchniowych w postaci wykruszeń	a _p = 1 mm, f _z = 0,04 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	13,96693	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,1 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	3,55505		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	9,10479		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,4 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	26,69097		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,6 mm/ostrze, v _c = 250 m/min				
Liczba wyrwań włókien na jednostki powierzchni	a _p = 1 mm, f _z = 0,04 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	2,67790	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,1 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	2,85180		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	2,93719		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,4 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	2,80686		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,6 mm/ostrze, v _c = 250 m/min				

Tabela 3.22. Wyniki badań testu wartości średniej dla wad powierzchniowych na powierzchni po frezowaniu przy zmiennej prędkości skrawania (kompozyt CFRP)

	Parametry obróbki	Wartość testu t	Wartość testu t _{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Udział wad powierzchniowych w postaci wykruszeń	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 50 m/min	21,24274	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 100 m/min	3,30530		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	11,21856		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 350 m/min	11,53909		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 500 m/min				
Liczba wyrwań włókien na jednostki powierzchni	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 50 m/min	3,57589	2,571	t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 100 m/min	3,86702		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 250 m/min	4,18445		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 350 m/min	4,26028		t>t _{kr}	wpływ istotny
	a _p = 1 mm, f _z = 0,2 mm/ostrze, v _c = 500 m/min				

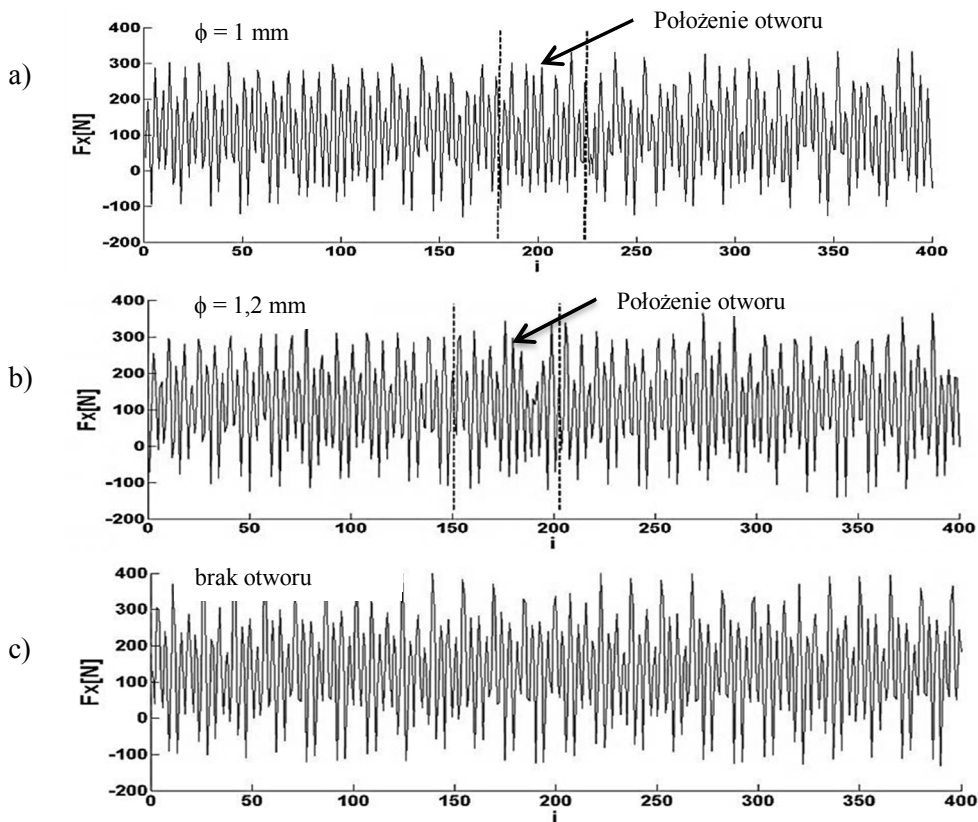
Podsumowując przeprowadzone badania struktury geometrycznej na powierzchni kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi można stwierdzić, że na powierzchniach tych materiałów występują różnego rodzaju wady. Na powierzchni kompozytu GFRP wady są mniej widoczne niż w przypadku CFRP. W kompozycie CFRP głębokość skrawania nie wpływa jednoznacznie na liczbę wyrwań na jednostkę powierzchni i udział wad w postaci wykruszeń osnowy. W przypadku kompozytu polimerowego

z włóknami węglowymi największy wpływ na pogarszanie jakości powierzchni i powstawanie wad ma wzrost posuwu na ostrze. Świadczą o tym zarówno badania struktury geometrycznej powierzchni w postaci parametrów chropowatości i falistości, jak i badania wad powierzchniowych. W przypadku wzrostu posuwu na ostrze można zauważyć jednoznaczny wzrost parametrów chropowatości i falistości powierzchni. Posuw na ostrze wpływa również jednoznacznie na wzrost udziału wad w postaci wykruszeń osnowy. Na wykresach ($R_{ku}(f_z)$ i $W_{ku}(f_z)$) widać wyraźny wpływ posuwu na ostrze (wraz z jego wzrostem wartości chropowatości i falistości jednostajnie rosły). Za drugi w kolejności, z uwagi na jednoznaczność wyników, parametr mający wpływ na powstawanie wad powierzchniowych w CFRP można uznać prędkość skrawania, której wzrost powyżej 250÷350 m/min powoduje spadek wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni i zmniejszanie ilości wyrwań włókien oraz wykruszeń osnowy.

4. BADANIA WAD KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH ZA POMOCĄ WYKRESÓW I WSKAŹNIKÓW REKURENCYJNYCH

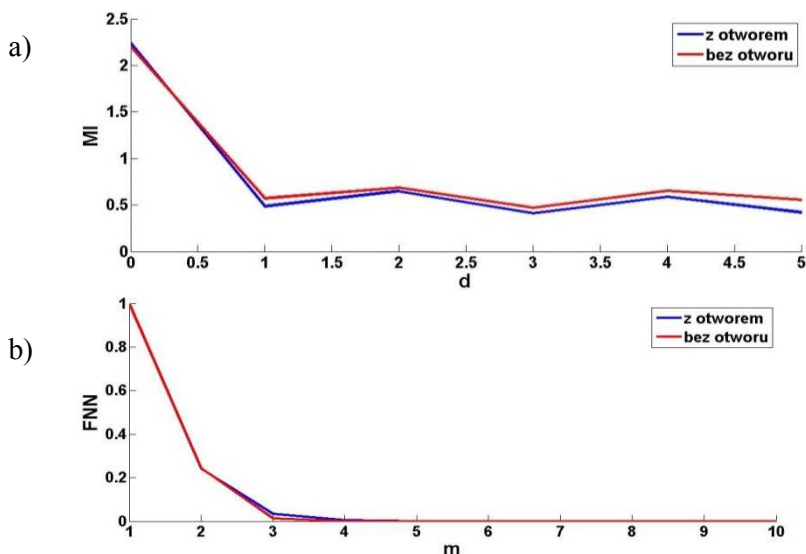
4.1. Wpływ średnicy wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki analiz powierzchni po frezowaniu próbek z otworami o średnicach $\phi 1$ mm, $\phi 1,2$ mm, $\phi 2$ mm i $\phi 4$ mm. Na rysunku 4.1 przedstawiono przykładowe przebiegi siły F_x uzyskane na podstawie zarejestrowanego sygnału sił frezowania czołowego płaskiej powierzchni, na której znajdowały się sztuczne wady o średnicy $\phi 1$ mm, $\phi 1,2$ mm i powierzchni, na której nie ma wad sztucznych. Położenie otworów zaznaczono przerywanymi liniami. Na poziomej osi symbolem „i” oznaczono ilość analizowanych punktów.



Rys. 4.1. Przebieg siły F_x podczas frezowania powierzchni z otworem o średnicy: a) $\phi 1$ mm, b) $\phi 1,2$ mm i c) bez otworu (kompozyt GFRP)

Analizę wyników badań rozpoczęto od doboru wymiaru opóźnienia d i zanurzenia m . Wymiar opóźnienia d to liczba całkowita występująca w minimum funkcji AMI. Wymiar zanurzenia m to liczba, przy której wykres FNN najbardziej zbliża się do wartości 0. Przykładowy wykres wymiaru opóźnienia d i wymiar zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z otworem $\phi 1,2$ mm przedstawiono na rysunkach 4.2a i 4.2b. W tabeli 4.1 przedstawiono wymiary d i m dla frezowanej powierzchni z otworami o różnej średnicy. Wartość parametru odcięcia przyjęto na poziomie $\varepsilon = 8$. Parametr odcięcia stanowił około 5% amplitudy siły skrawania.



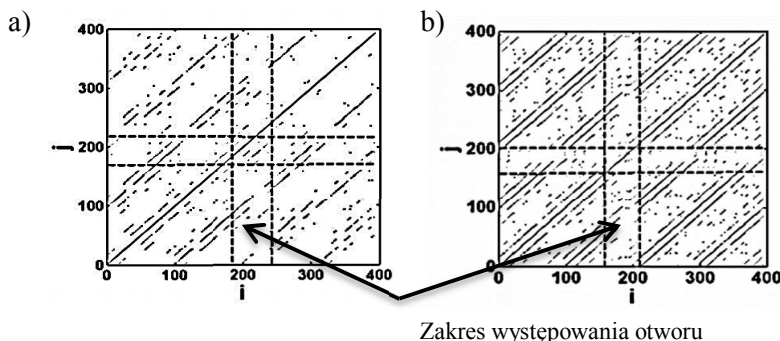
Rys. 4.2. Wykresy funkcji: a) do określenia wymiaru opóźnienia d dla otworu $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) do określenia wymiaru zanurzenia m dla otworu $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)

Tabela 4.1. Wymiary opóźnienia d i zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z otworami o danej średnicy

Średnica otworu [mm]	Wymiar opóźnienia d	Wymiar zanurzenia m
brak otworu	1	5
1	1	5
1,2	1	5
2	1	6
4	1	5

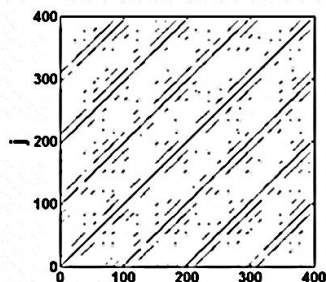
Na podstawie powyższej tabeli stwierdzono, że średnica wady sztucznej nie wpływa na wymiary d i m . Po wyznaczeniu wymiaru opóźnienia i zanurzenia utworzono wykresy rekurencyjne. Na wykresach rekurencyjnych (uzyskanych na podstawie zarejestrowanego sygnału sił skrawania) powierzchnie z otworem o średnicy $\phi 1$ mm (rys. 4.3a), z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm (rys. 4.3b)

zaznaczono przerywanymi liniami położenie otworu (wady sztucznej). Na osiach pionowych i poziomych i oraz j oznaczają i -ty i j -ty punkt zrekonstruowanego wektora siły.



Rys. 4.3. Wykres rekurencyjny opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem o średnicy: a) $\phi 1$ mm, b) $\phi 1,2$ mm (kompozyt GFRP)

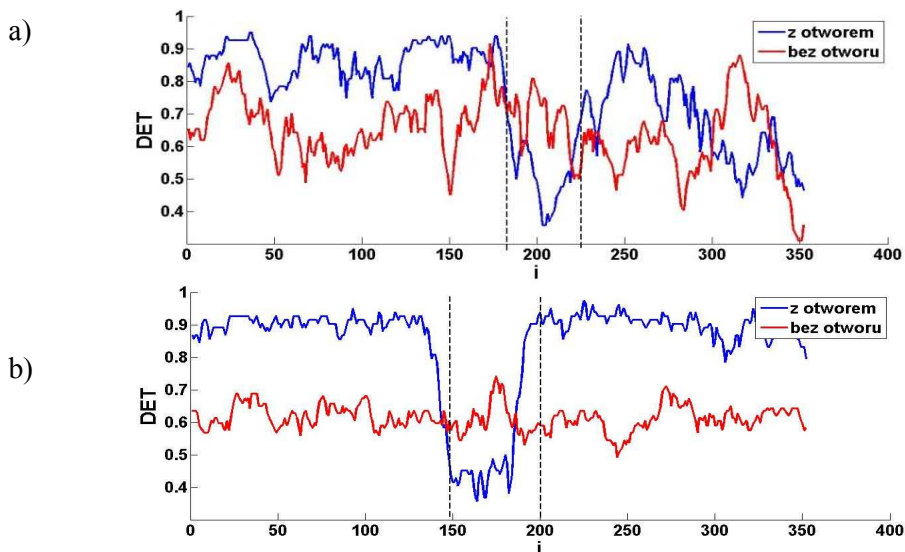
Na rysunku 4.4 przedstawiono wykres rekurencyjny uzyskany na podstawie zarejestrowanego sygnału sił skrawania powierzchni bez otworu.



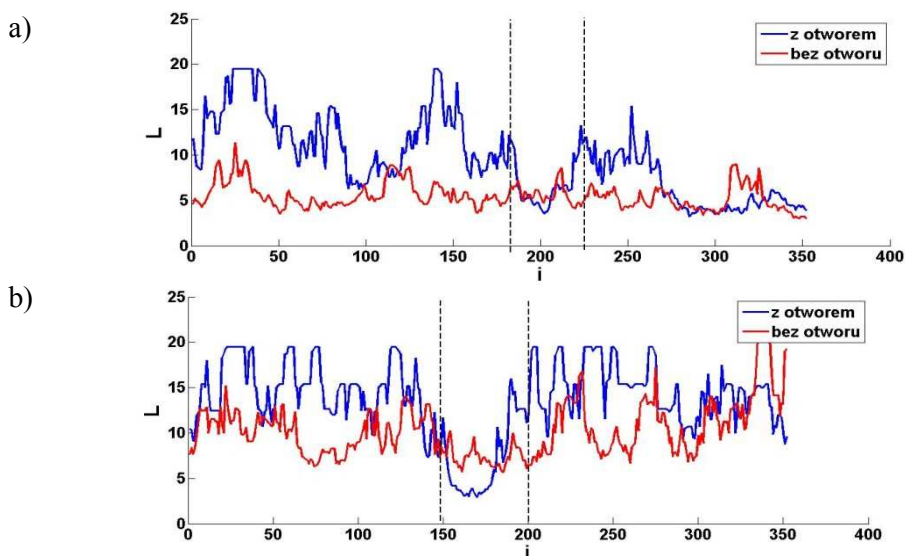
Rys. 4.4. Wykres rekurencyjny opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki bez otworu (kompozyt GFRP)

Z uwagi na to, że wykresy są trudne do interpretacji, obliczono wskaźniki rekurencyjne. Przy stałej wartości współczynnika rekurencji $RR = 0,069$ wykazano, że spośród wielu wskaźników tylko niektóre są odpowiednie do wykrycia wady, tzn. determinizm DET (rys. 4.5), średnia długość przekątnej L (rys. 4.6), entropia ENTR (rys. 4.7), czas rekurencji typu T_1 (rys. 4.8), czas rekurencji typu T_2 (rys. 4.9), znormalizowana entropia rozkładu rekurencji RPDE (rys. 4.10), clustering coefficient CC (rys. 4.11) i transitivity TRANS (rys. 4.12). Na frezowanych powierzchniach z otworem, wadę zaznaczono pionowymi liniami przerywanymi. Dla każdego ze wskaźników wybrano i przedstawiono wyniki uzyskane po frezowaniu powierzchni z otworem o średnicy $\phi 1$ mm oraz z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm, które porównano do

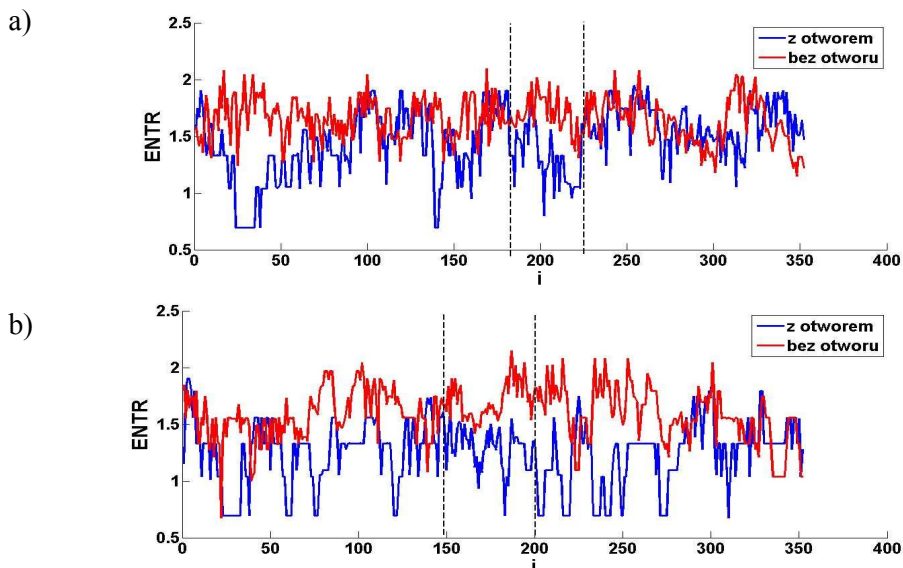
powierzchni po frezowaniu bez otworu. Na przedstawionych wykresach na osi poziomej zaznaczono liczbę punktów, a na osi pionowej zaznaczone są wartości wskaźników.



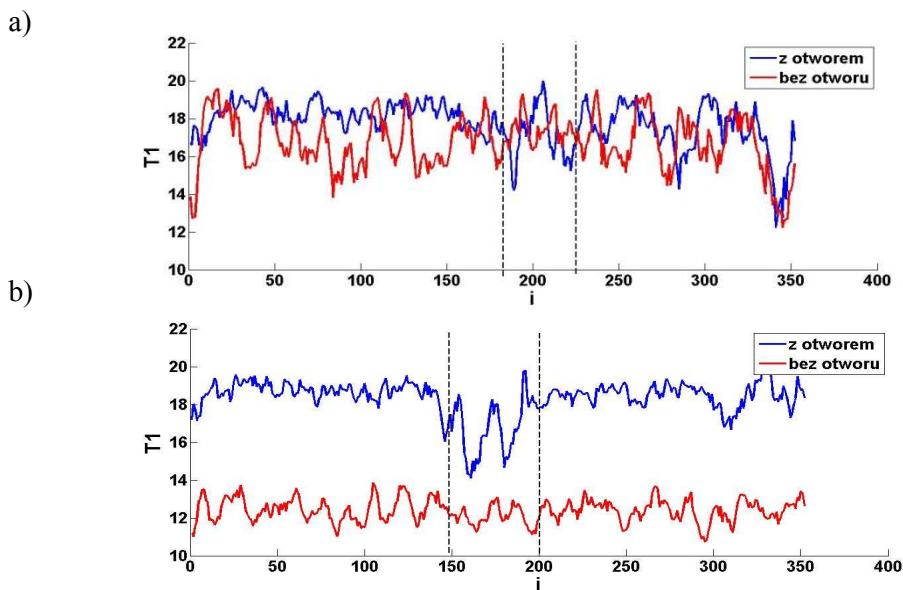
Rys. 4.5. Determinizm DET dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)



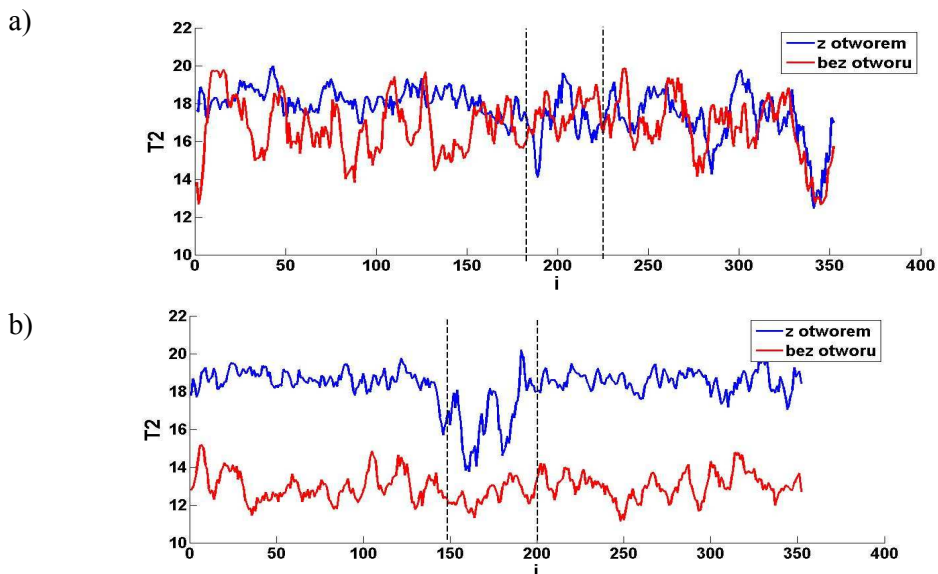
Rys. 4.6. Średnia długość przekątnej L dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)



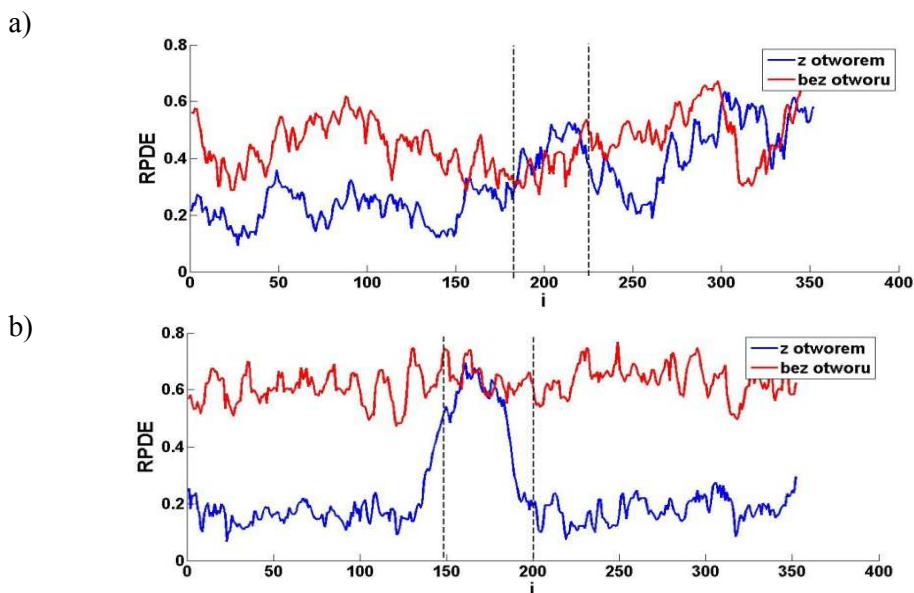
Rys. 4.7. Entropia ENTR dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)



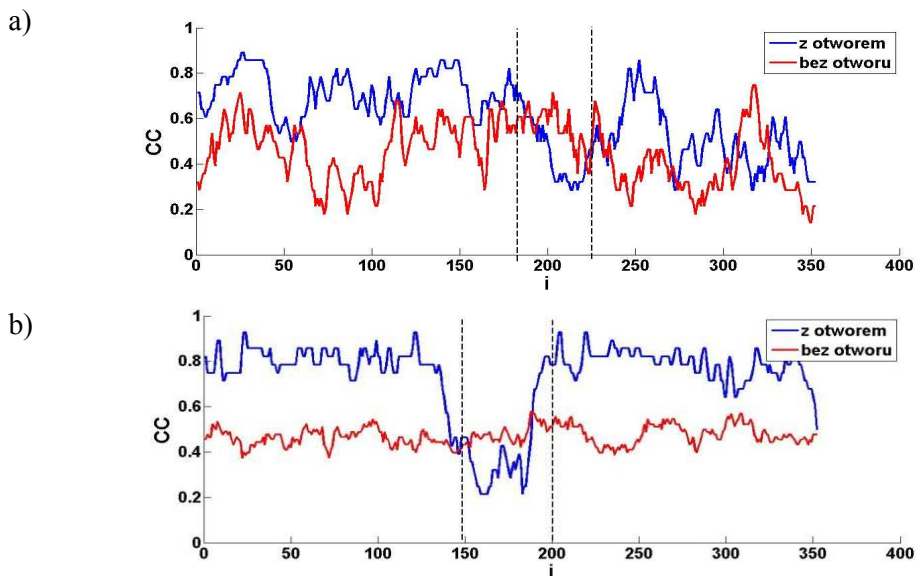
Rys. 4.8. Czas rekurencji typu T_1 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)



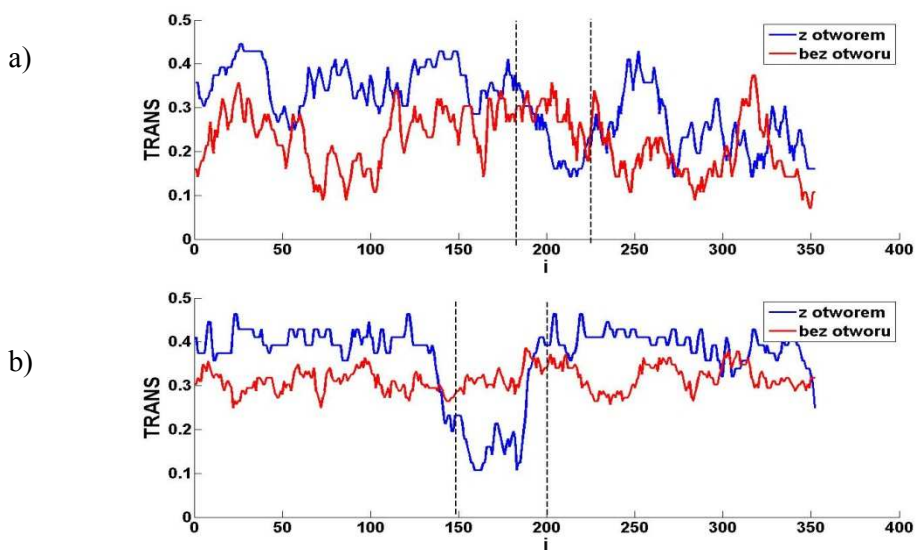
Rys. 4.9. Czas rekurencji typu T_2 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)



Rys. 4.10. Znormalizowana entropia rozkładu rekurencji $RPDE$ dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)

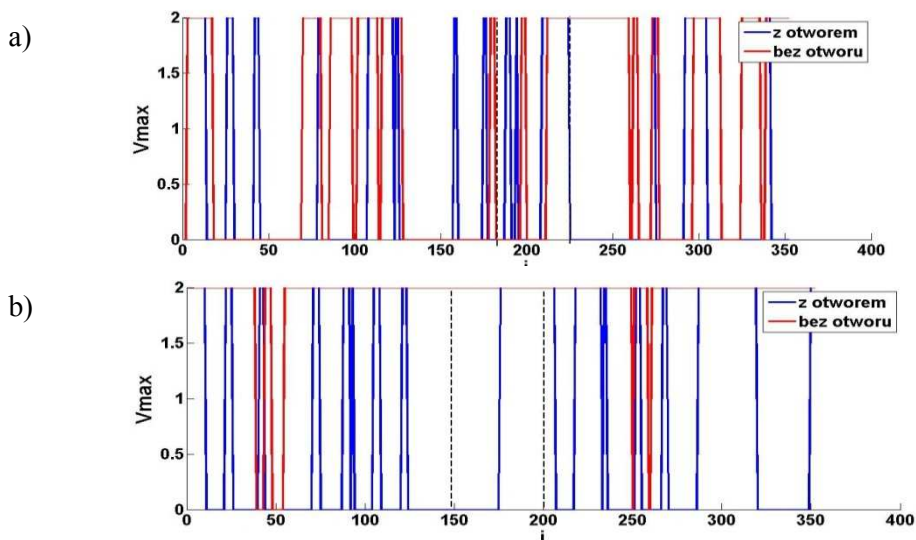


Rys. 4.11. Clustering coefficient CC dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)



Rys. 4.12. Transitivity TRANS dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)

Niektóre wskaźniki rekurencyjne w przeprowadzonych badaniach nie mogą być wykorzystane, ponieważ nie są w stanie wykryć wad na powierzchni badanego materiału. Brak jest zauważalnej zmiany w przebiegach wskaźników w miejscu występowania wady. Do takich wskaźników należy najdłuższa długość linii pionowej $V_{\max}$ (rys. 4.13).



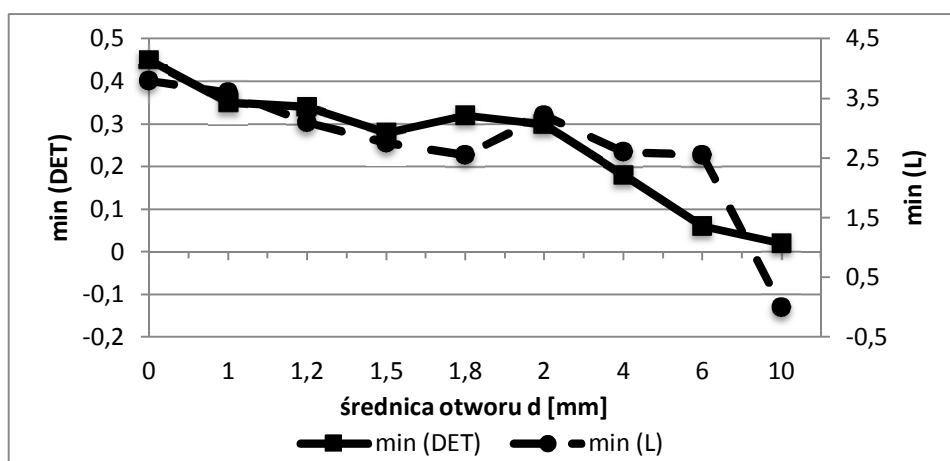
Rys. 4.13. Najdłuższa długość linii pionowej $V_{\max}$ dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu (kompozyt GFRP)

Przedstawione wyniki badań kompozytu GFRP wykazały, że otwór mniejszy niż $\phi 1$ mm nie jest możliwy do wykrycia. Wady w postaci otworów o średnicy nie mniejszej niż $\phi 1,2$ mm i głębokości większej niż głębokość skrawania są możliwe do wykrycia. Dla wszystkich badanych wad w postaci otworów o średnicy mniejszej niż $\phi 1$ mm nie stwierdzono zmian na wykresach wskaźników. Wady w postaci otworów o średnicach $\phi 1,2$ mm; $\phi 1,5$ mm; $\phi 1,8$ mm; $\phi 2$ mm; $\phi 3$ mm; $\phi 4$ mm; $\phi 5$ mm; $\phi 6$ mm; $\phi 8$ mm i $\phi 10$ mm są widoczne na wykresach wskaźników rekurencyjnych (DET, L, ENTR, T_1 , T_2 , RPDE, CC i TRANS).

Podczas frezowania frezem o średnicy $\phi 20$ mm (szerokość frezowania $a_e = 20$ mm, głębokość skrawania $a_p = 2$ mm) wykrywane były wady, jeżeli w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku posuwu pole przekroju wady stanowi co najmniej 6% pola przekroju usuwanej warstwy.

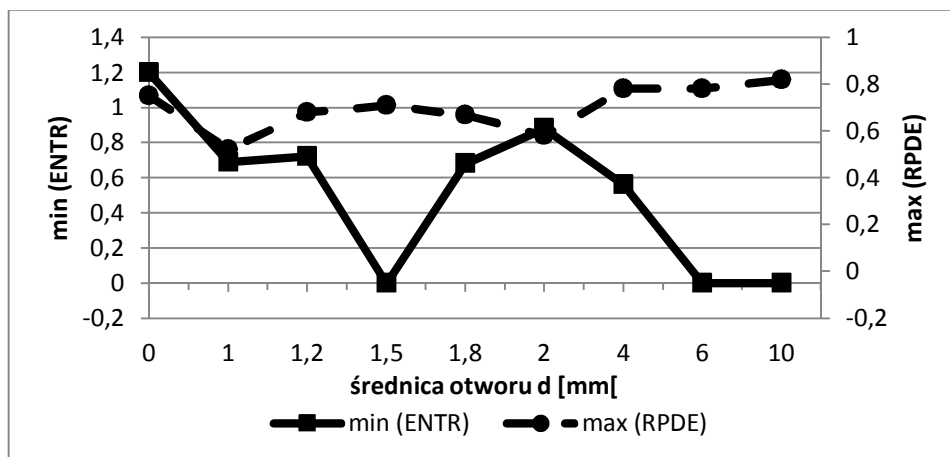
Na kolejnych wykresach przedstawiony został wpływ średnicy otworu (wady sztucznej) na zmianę wskaźników rekurencyjnych. W zależności od rodzaju wskaźnika wybrano minimalne lub maksymalne jego wartości. Uzależnione jest to od tego czy dany wskaźnik w miejscu występowania otworu uzyskuje

wartości mniejsze lub większe od wartości uzyskanych w miejscach bez występujących wad sztucznych. Na rysunku 4.14 przedstawiono wpływ badanych wymiarów wad na minimalne wartości wskaźników DET i L w obszarze występowania wady. Opracowane wykresy pokazują spadek minimalnej wartości DET dla powierzchni frezowanych z otworem do średnicy $\phi 1,5$ mm, następnie wzrost dla powierzchni frezowanej z otworem o średnicy $\phi 1,8$ mm, a powyżej średnicy $\phi 1,8$ mm minimalne wartości wskaźnika znów maleją. Podobnie jak w przypadku wskaźnika DET, minimalne wartości wskaźnika L maleją, dla powierzchni frezowanych z otworem do średnicy $\phi 1,8$ mm. Dla powierzchni frezowanej z otworem do $\phi 2$ mm minimalne wartości L rosną, a następnie maleją.



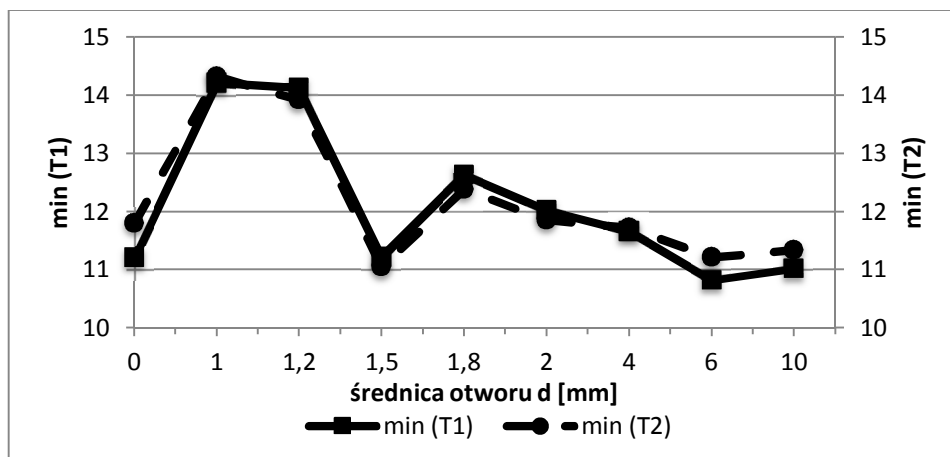
Rys. 4.14. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości DET i L (kompozyt GFRP)

Na kolejnych rysunkach pokazano wpływ wymiaru sztucznej wady występującej na frezowanej powierzchni na minimalne wartości wskaźników ENTR i maksymalne wartości RPDE (rys. 4.15). Na podstawie przedstawionego wykresu można zauważyć, że wartości przedstawionych wskaźników rosną i maleją w zakresie od 0 do 1,2 (dla min(ENTR)) i $0,528 \div 0,82$ (dla max(RPDE)).



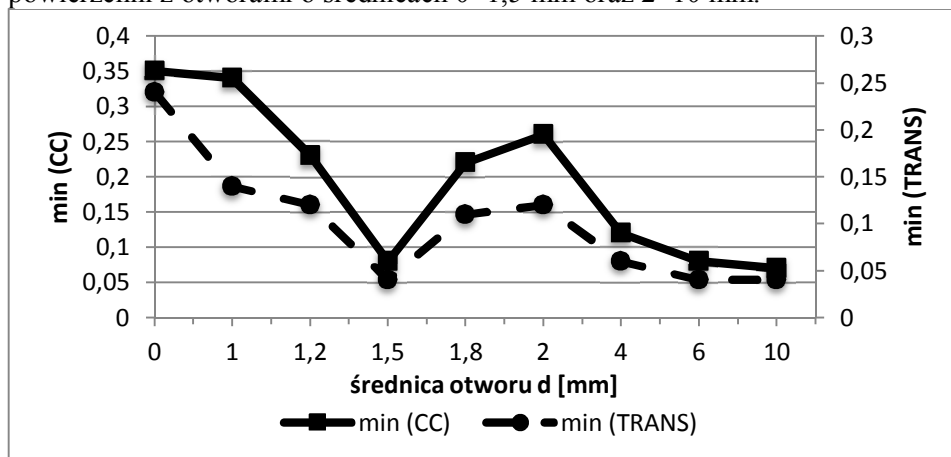
Rys. 4.15. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości ENTR oraz maksymalne wartości RPDE (kompozyt GFRP)

W przypadku minimalnych wartości wskaźników T1 i T2 (rys. 4.16) zauważa się, że wartości rosną od 11,2 (dla min(T1)) i 11,8 (dla min(T2)) dla powierzchni bez występującej wady sztucznej do 14,21 (dla min(T1)) i 14,32 (dla min(T2)) dla powierzchni z wadą o średnicy $\phi 1$ mm. Tendencja rosnąca występuje również w przypadku powierzchni z otworami o średnicach w zakresie $\phi 1,5 \div 1,8$ mm. W pozostałych przypadkach zbadanych średnic występowała tendencja malejąca dla obu wskaźników rekurencyjnych.



Rys. 4.16. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości T1 i T2 (kompozyt GFRP)

Przedstawiony na rysunku 4.17 wykres dla minimalnych wartości CC i TRANS pozwala zauważyć, że wartości wskaźników maleją w przypadku powierzchni z otworami o średnicach 0÷1,5 mm oraz 2÷10 mm.

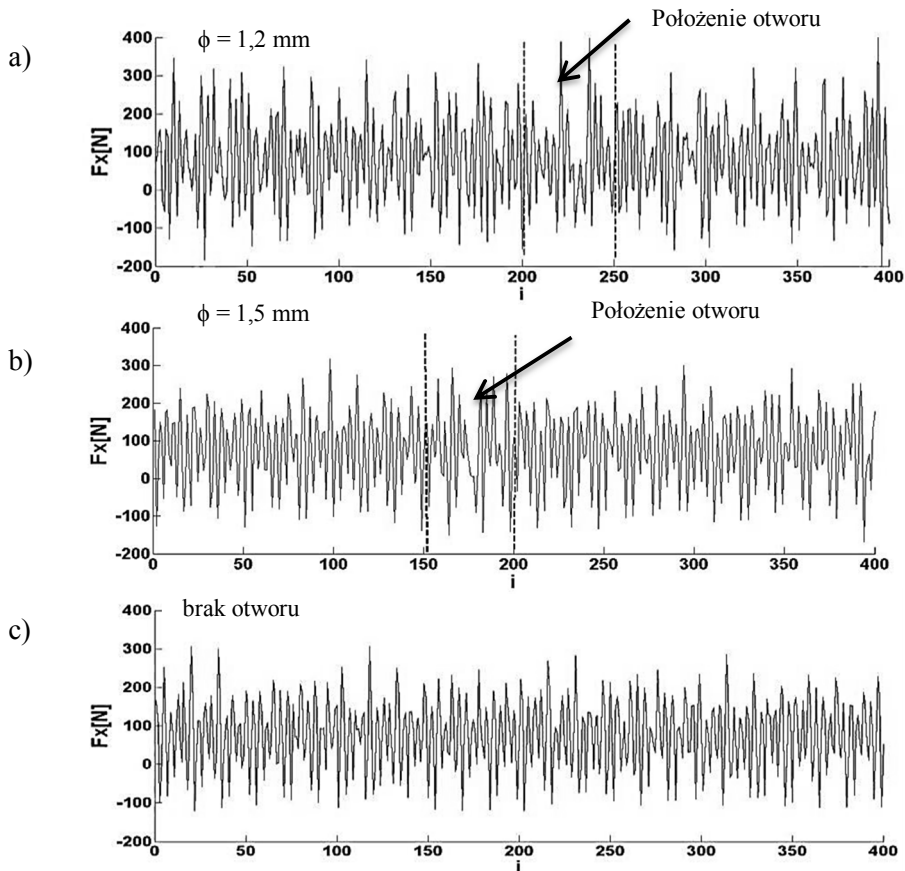


Rys. 4.17. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości CC i TRANS (kompozyt GFRP)

Przedstawione na wykresach zależności pokazują, że średnica otworu na frezowanych powierzchniach ma wpływ na wskaźniki rekurencyjne. Dla określonych wymiarów wad można zauważyć tendencję spadkową lub wzrostową minimalnych lub maksymalnych wartości wskaźników. Minimalne wartości wskaźników DET, L, ENTR, CC i TRANS dla powierzchni bez otworu przyjmują większe wartości niż wskaźniki dla powierzchni z występującymi wadami sztucznymi.

4.2. Wpływ średnicy wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi

W badaniach kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą epoksydową (CFRP), podobnie jak przy badaniu kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi, przeanalizowano frezowane powierzchnie ze sztucznymi wadami o średnicach od $\phi 0,4$ mm do $\phi 10$ mm. W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki analiz frezowania powierzchni z wadą o średnicy $\phi 1,2$ mm, $\phi 1,5$ mm, $\phi 2$ mm i $\phi 4$ mm. Na rys. 4.18a i 4.18b, dla kompozytu z włóknami węglowymi, przedstawiono przykładowe przebiegi siły F_x uzyskane na podstawie zarejestrowanego sygnału sił posuwowych podczas frezowania próbek z CFRP. Na powierzchniach próbek znajdowała się sztuczna wada w postaci otworu o średnicy $\phi 1,2$ mm oraz $\phi 1,5$ mm, której położenie zaznaczono przerywanymi liniami. Na rysunku 4.18c przedstawiono przebieg siły dla powierzchni, na której nie ma wad sztucznych.



Rys. 4. 18. Przebieg siły F_x opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem $\phi 1,2 \text{ mm}$, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5 \text{ mm}$, c) bez otworu (kompozyt CFRP)

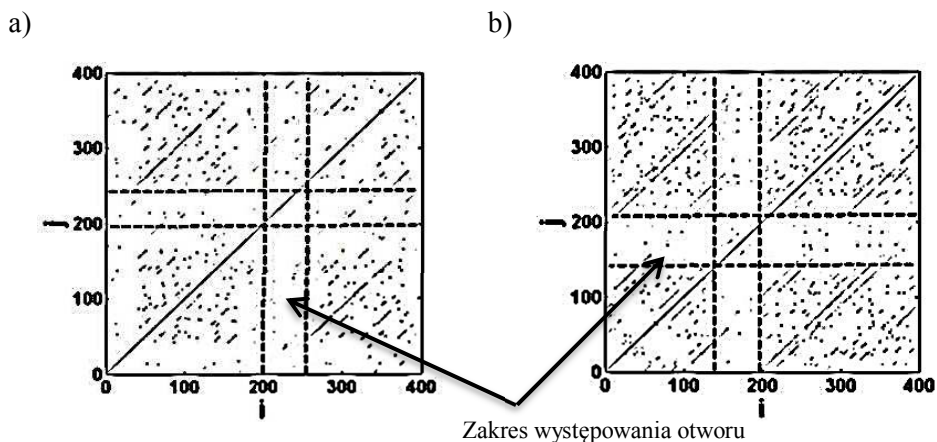
W tabeli 4.2 przedstawiono wymiary opóźnienia d i wymiary zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z otworami o danej średnicy. Parametr odcięcia w badaniach wpływu średnicy wady sztucznej na jej wykrywalność dla kompozytu CFRP przyjęto na poziomie $\varepsilon = 8$.

Tabela 4.2. Wymiary opóźnienia d i zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z otworami o danej średnicy

Średnica otworu [mm]	Wymiar opóźnienia d	Wymiar zanurzenia m
brak otworu	2	5
1,2	2	5
1,5	2	4
2	2	5
4	2	4

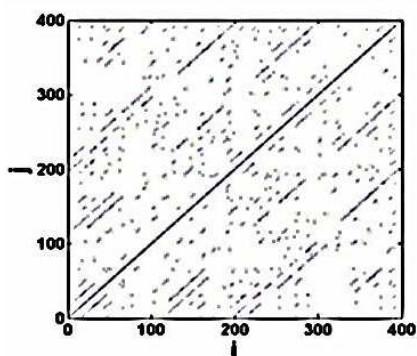
Wymiary d i m nie są uzależnione od średnicy wady sztucznej co pokazuje powyższa tabela.

Położenie otworów zaznaczono liniami przerywanymi na wykresach rekurencyjnych uzyskanych na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm (rys. 4.19a) i otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm (rys. 4.19b).



Rys. 4.19. Wykres rekurencyjny opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm , b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm (kompozyt CFRP)

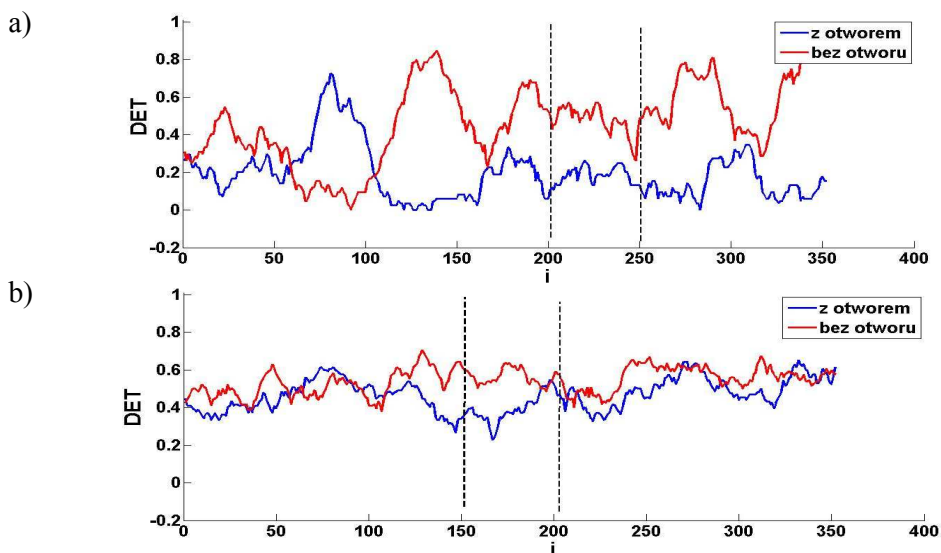
Na rysunku 4.20 przedstawiono wykres rekurencyjny uzyskany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki bez otworu.



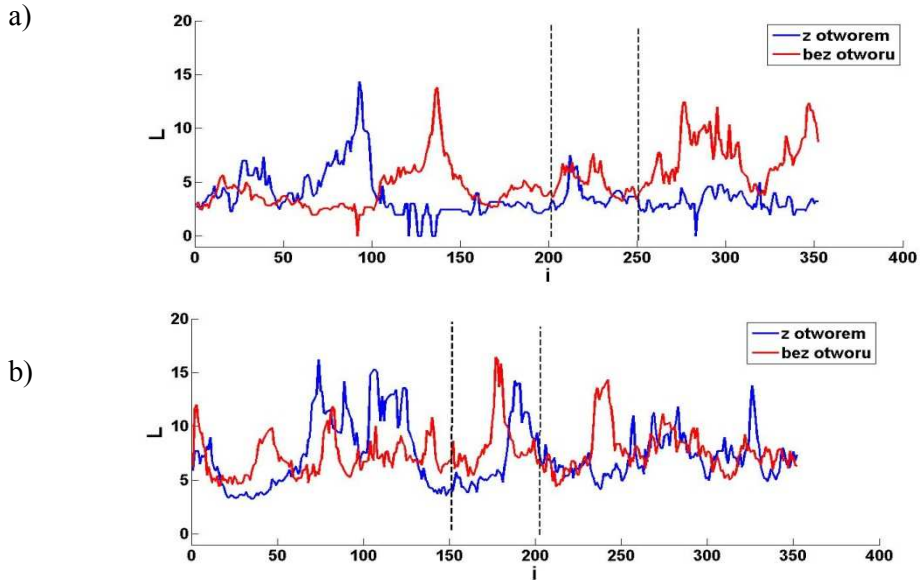
Rys. 4. 20. Wykres rekurencyjny opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki bez otworu (kompozyt CFRP)

Ocenę możliwości wykrywania wad za pomocą metod rekurencyjnych dokonano za pomocą wskaźników rekurencyjnych. Przy ustalonym współczynniku rekurencji $RR = 0,08$ wykazano, że wskaźnikami odpowiednimi do lokalizacji wad w kompozycie CFRP są: DET (rys. 4.21), L (rys. 4.22), ENTR (rys. 4.23), T1 (rys. 4.24), T2 (rys. 4.25), RPDE (rys. 4.26), CC (rys. 4.27) i TRANS (rys. 4.28). Na frezowanych powierzchniach z otworem wadę zaznaczono pionowymi liniami przerywanymi.

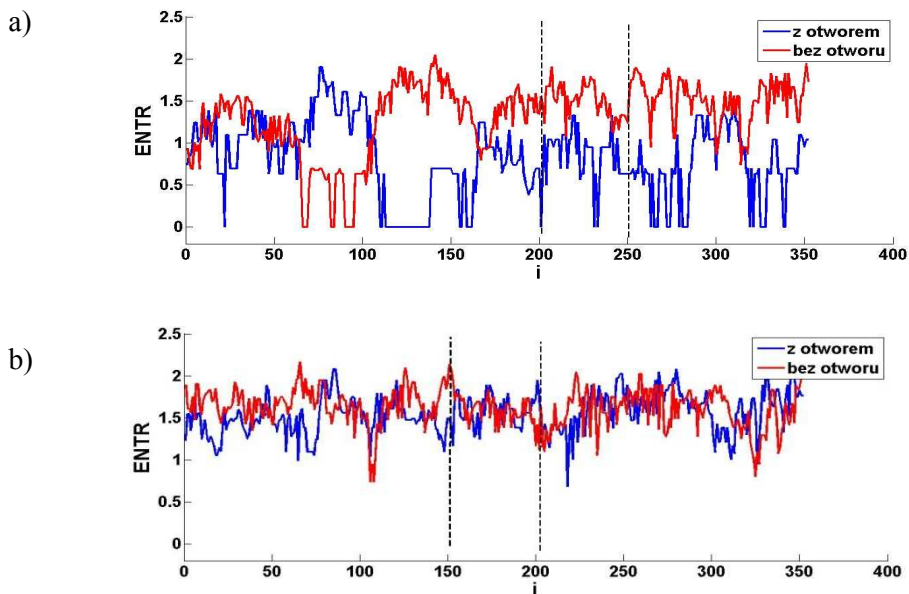
W celu przedstawienia wskaźników rekurencyjnych wybrano wyniki uzyskane po frezowaniu powierzchni z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm oraz z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm, które porównano do powierzchni po frezowaniu bez otworu. Na osi poziomej zaznaczono liczbę punktów, a na linii pionowej wskaźniki, na których widać różnice w przebiegu w postaci zmiany wartości poszczególnych wskaźników.



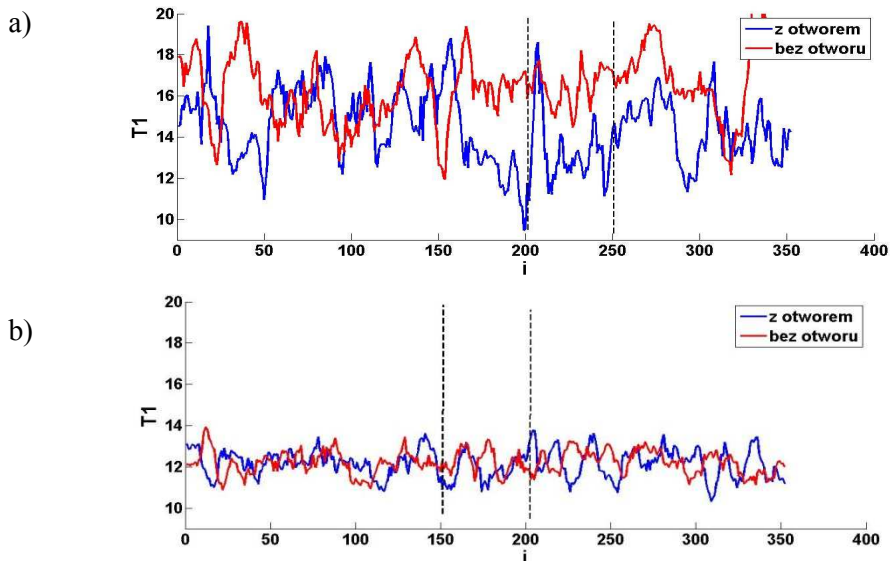
Rys. 4.21. Determinizm DET dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)



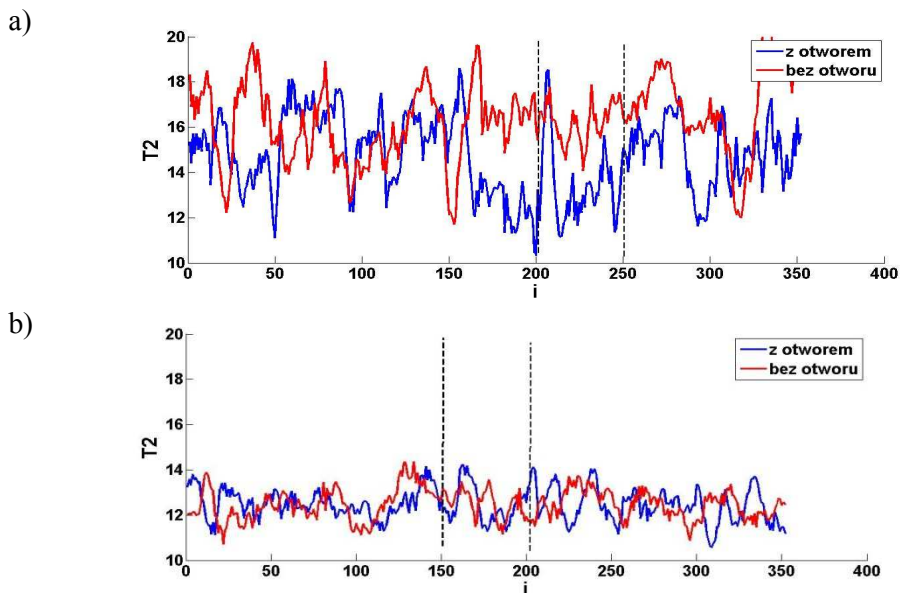
Rys. 4.22. Średnia długość przekątnej L dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)



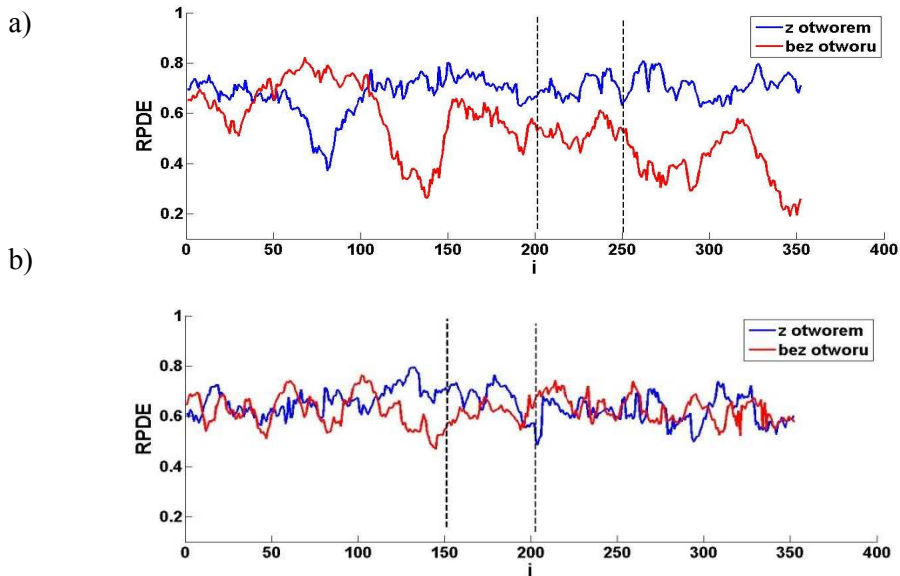
Rys. 4.23. Entropia ENTR dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)



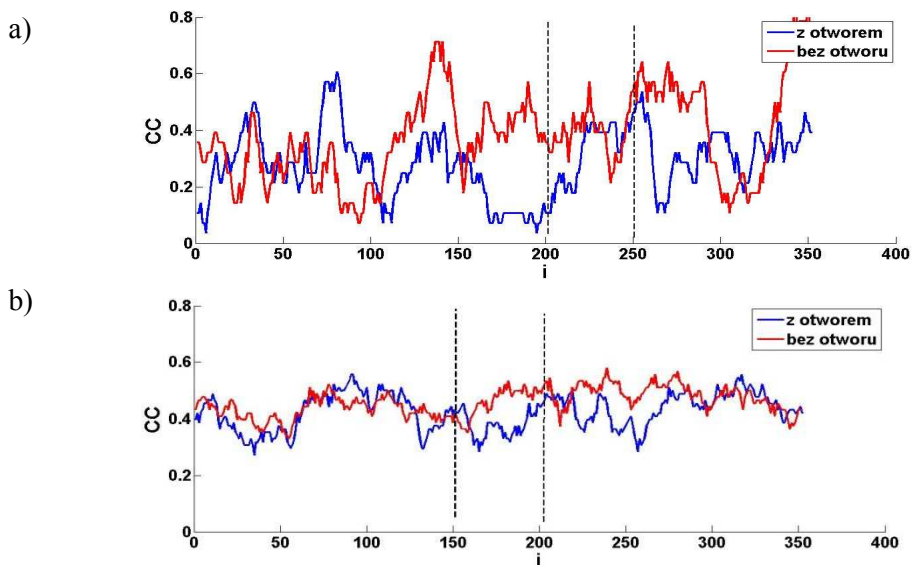
Rys. 4.24. Czas rekurencji 1 typu T_1 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)



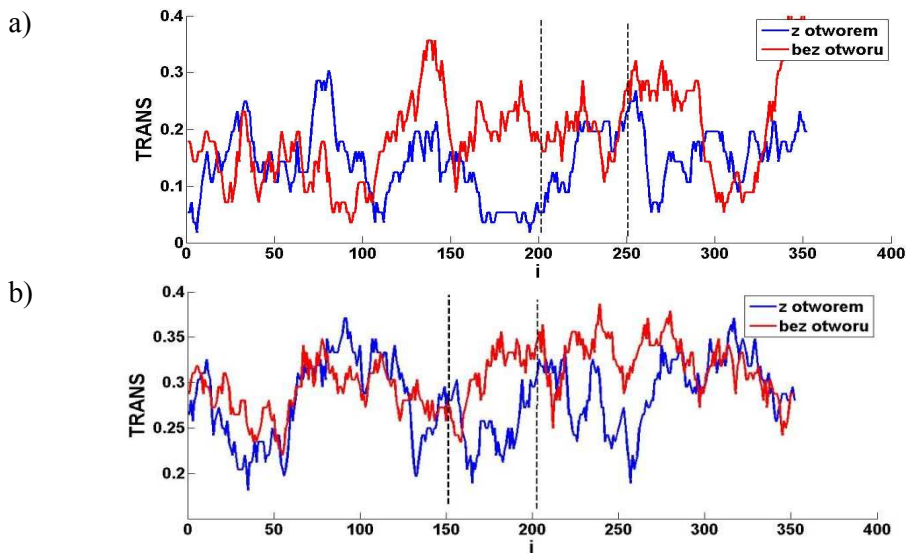
Rys. 4.25. Czas rekurencji 2 typu T_2 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)



Rys. 4.26. Znormalizowana entropia rozkładu rekurencji RPDE dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)

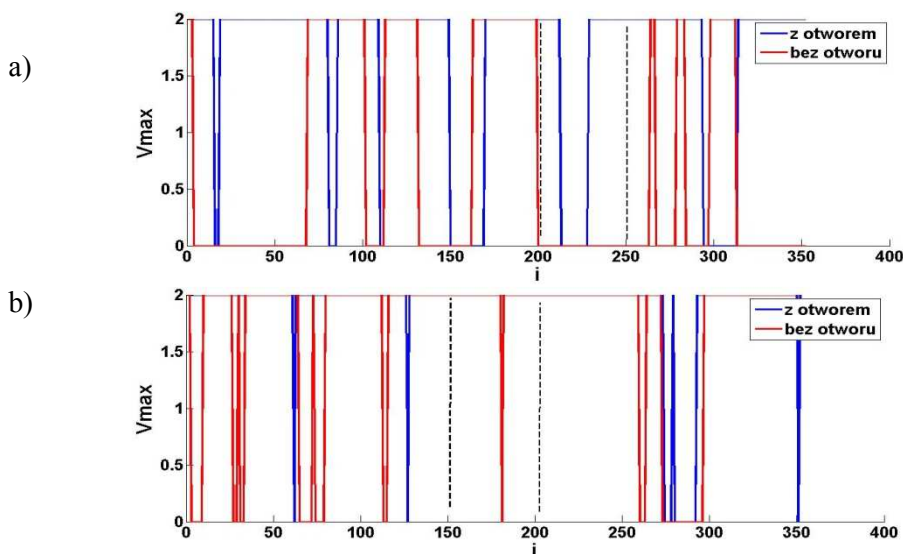


Rys. 4.27. Clustering coefficient CC dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)



Rys. 4.28. Transitivity TRANS dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)

Istnieją wskaźniki takie jak najdłuższa długość linii pionowej $V_{\max}$ (rys. 4.29), które nie wykazują w swoim przebiegu zmian.

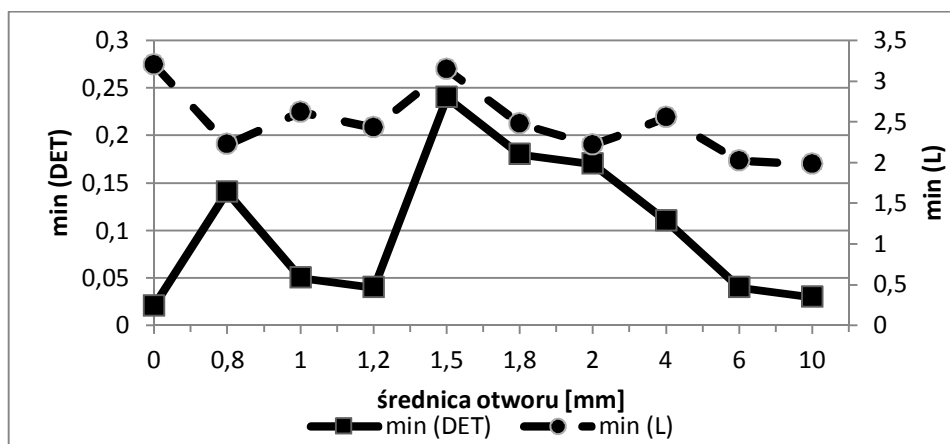


Rys. 4.29. Najdłuższa długość linii pionowej $V_{\max}$ dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 1,2$ mm i bez otworu, b) z otworem o średnicy $\phi 1,5$ mm i bez otworu (kompozyt CFRP)

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że możliwe jest wykrycie wady powierzchniowej o średnicy większej lub równej $\phi 1,5$ mm. Badania wad o otworach mniejszych niż $\phi 1,5$ mm nie wykazały widocznych zmian na wykresach wskaźników.

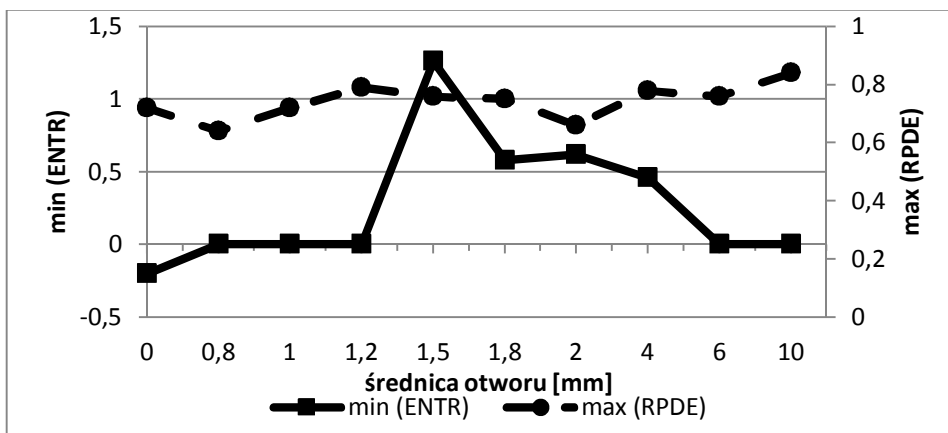
W odniesieniu do wielkości wykrytej wady podczas frezowania frezem o średnicy $\phi 20$ mm i głębokości skrawania $a_p = 2$ mm stwierdzono, że możliwa do wykrycia jest wada, której maksymalne pole przekroju płaszczyzną prostopadłą do kierunku ruchu posuwowego stanowi co najmniej 7,5% pola przekroju poprzecznego usuwanej warstwy.

Rysunek 4.30 przedstawia wpływ wymiarów badanych wad na minimalne wartości wskaźników DET i L dla kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi. Opracowane wykresy pokazują spadek minimalnej wartości DET dla powierzchni frezowanych z otworem od średnicy $\phi 0,8$ mm do średnicy $\phi 1,2$ mm. Dla powierzchni frezowanej z otworem w zakresie $\phi 0 \div \phi 0,8$ mm oraz $\phi 1,2 \div \phi 1,5$ mm, minimalne wartości tego wskaźnika rosną, a powyżej średnicy wady $\phi 1,5$ mm minimalne wartości wskaźnika DET znów maleją. Wartości wskaźnika L mają głównie tendencję malejącą wraz z wielkością wady sztucznej występującej na badanej powierzchni, chociaż występują zakresy, w których wartości $\min(L)$ rosną.



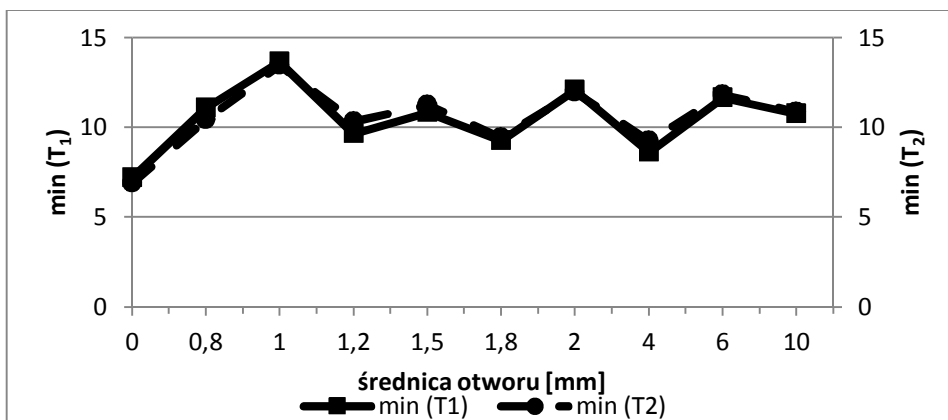
Rys. 4.30. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości DET i L (kompozyt CFRP)

Wpływ średnicy sztucznej wady, występującej na frezowanej powierzchni na minimalne wartości wskaźnika ENTR i maksymalne RPDE przedstawiono na rysunku 4.31. Stwierdzono, że wymiar wady na badanej powierzchni nie powoduje jednoznacznej zależności spadku lub wzrostu wskaźników $\min(ENTR)$ i $\max(PRDE)$.



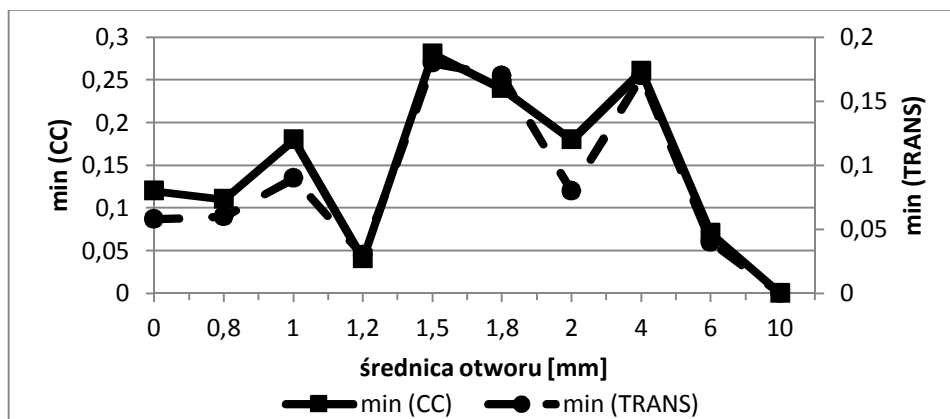
Rys. 4.31. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości ENTR i maksymalne wartości RPDE (kompozyt CFRP)

Na podstawie wykresu zależności T_1 i T_2 od średnicy wady sztucznej stwierdzono, że oba wskaźniki mają bardzo zbliżony przebieg, chociaż nie zauważono jednoznacznej zależności (rys. 6.32).



Rys. 4.32. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości T_1 i T_2 (kompozyt CFRP)

Wyniki zależności $\min(CC)$ i $\min(TRANS)$ (rys. 4.33) nie wykazały konkretnej zależności wartości minimalnych CC i TRANS od zwiększającej się średnicy badanej wady.

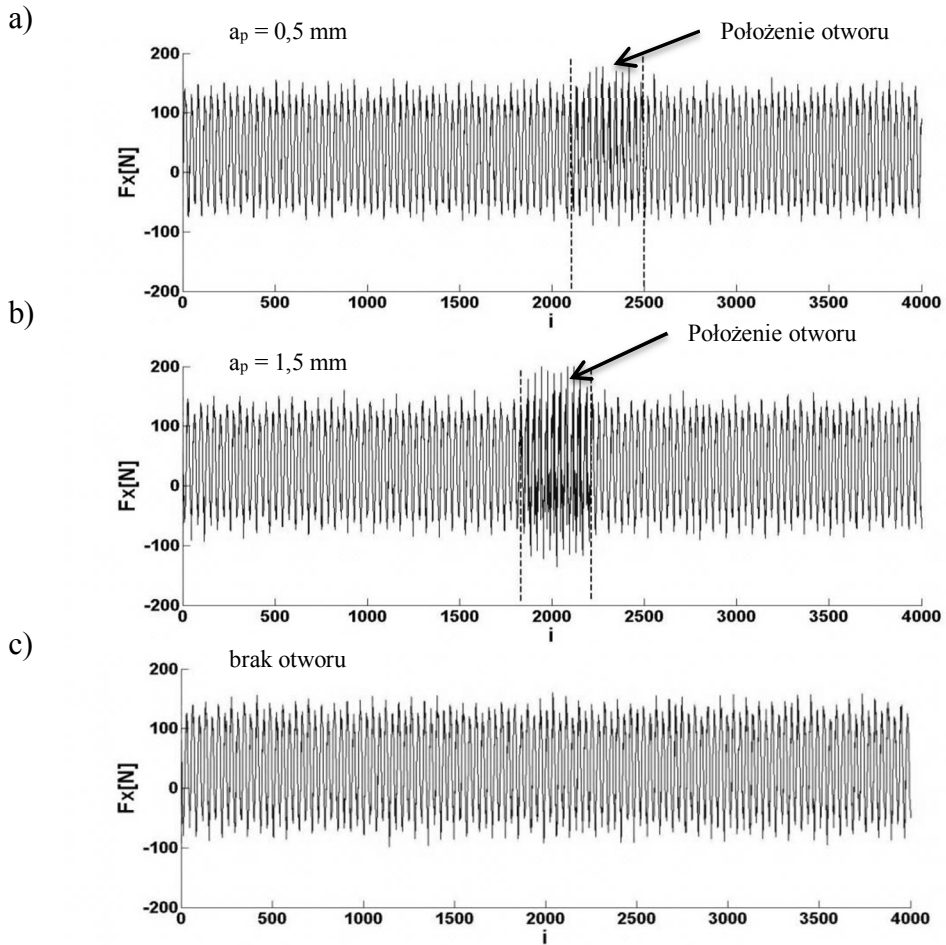


Rys. 4.33. Wpływ średnicy otworu na minimalne wartości CC i TRANS (kompozyt CFRP)

Na podstawie rysunków 4.30÷4.33 stwierdzono, że średnica otworu na frezowanych powierzchniach ma wpływ na wskaźniki rekurencyjne, ale wpływ zmieniającej się średnicy wady nabrane wskaźniki jest niejednostajny. Minimalne i maksymalne wartości wskaźników nie wykazują jednoznacznych tendencji rosnących lub malejących. Analizując różnice pomiędzy powierzchniami bez wady i powierzchniami z wadą na wykresach min(DET), min(L), min(T₁) i min(T₂) stwierdzono, że wartości wyraźnie się między sobą różnią, przyjmując większe (min(L)) lub mniejsze (min(DET), min(T₁), min(T₂)) wartości. Dla pozostałych wskaźników (min(ENTR), max(RPDE), min(CC) i min(TRANS)) nie wykazano istotnych różnic pomiędzy powierzchniami z wadami i bez wad.

4.3. Wpływ głębokości wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi

Badając możliwości wykrywania głębokości wady sztucznej przeanalizowano wady w postaci otworów $\phi 2$ mm, $\phi 4$ mm i $\phi 6$ mm o głębokościach 0,5 mm, 1 mm i 1,5 mm, przy głębokości frezowania 2 mm. Na rysunku 4.34 przedstawiono przykładowe przebiegi siły F_x uzyskane na podstawie zarejestrowanego sygnału podczas frezowania powierzchni próbki, na której znajdowały się sztuczne wady w postaci otworów o głębokościach 0,5 mm i 1,5 mm o średnicy $\phi 2$ mm i porównane do sił uzyskanych po frezowaniu powierzchni, na której nie było wad sztucznych. Położenie otworów zaznaczono przerywanymi liniami.



Rys. 4.34. Przebieg siły F_x opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 2 \text{ mm}$ oraz głębokości $0,5 \text{ mm}$, b) z otworem o średnicy $\phi 2 \text{ mm}$ oraz głębokości $1,5 \text{ mm}$, c) bez otworu (kompozyt GFRP)

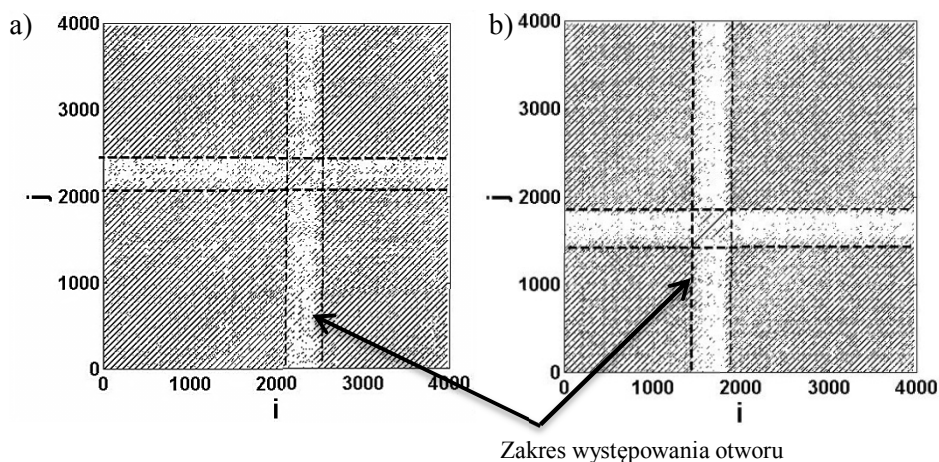
Analizę wyników rozpoczęto od doboru wymiaru opóźnienia d i zanurzenia m . W tabeli 4.3 przedstawiono wymiary opóźnienia d i wymiary zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z otworami o określonych średnicach i różnych głębokościach wady sztucznej.

Tabela 4.3. Wymiary opóźnienia d i zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z wadami o danej średnicy i różnych głębokościach

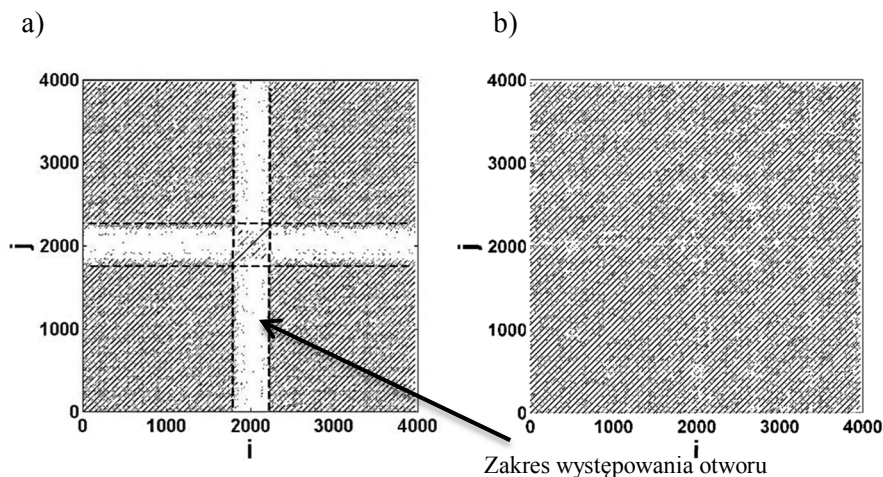
Średnica otworu [mm]	Głębokość wady [mm]	Wymiar opóźnienia d	Wymiar zanurzenia m
brak otworu	-	10	5
2	0,5	8	5
	1	9	5
	1,5	9	5
4	0,5	8	5
	1	8	5
	1,5	8	5
6	0,5	10	5
	1	10	6
	1,5	10	6

Na podstawie tabeli 4.3 można stwierdzić, że głębokość wady dla każdej badanej średnicy nie wpływa na wymiary d i m .

Na rysunkach 4.35 i 4.36 przedstawiono wykresy rekurencyjne, na których utworzył się „krzyż” dla frezowanej powierzchni z otworem o średnicy $\phi 2$ mm i głębokości 0,5 mm (rys. 4.35a), 1 mm (rys. 4.35b), 1,5 mm (rys. 4.36a) oraz wykres rekurencyjny opracowany dla frezowanej powierzchni bez wady sztucznej (rys. 4.36b).

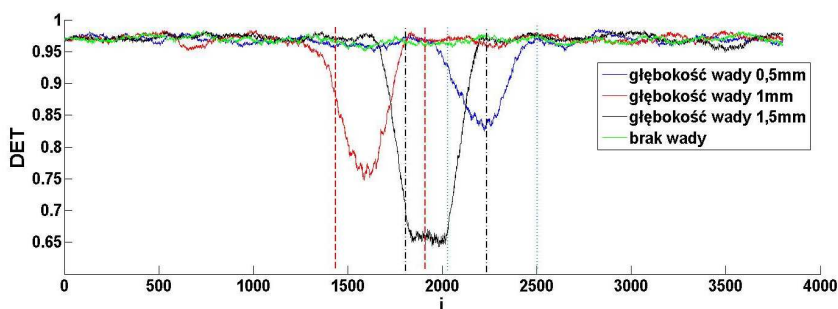


Rys. 4.35. Wykresy rekurencyjne, opracowane na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 0,5 mm, b) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 1 mm (kompozyt GFRP)

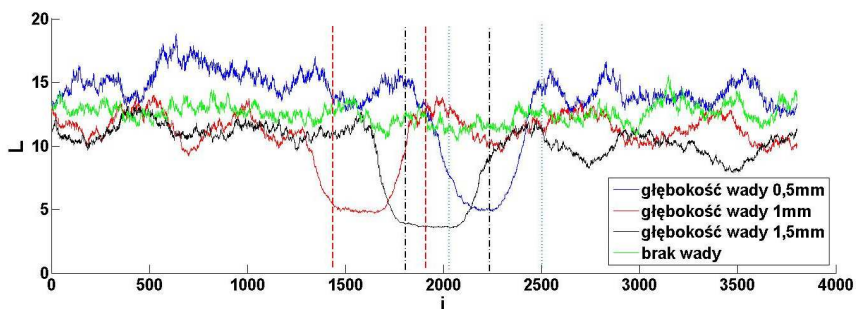


Rys. 4.36. Wykresy rekurencyjne, opracowane na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 1,5 mm, b) bez otworu (kompozyt GFRP)

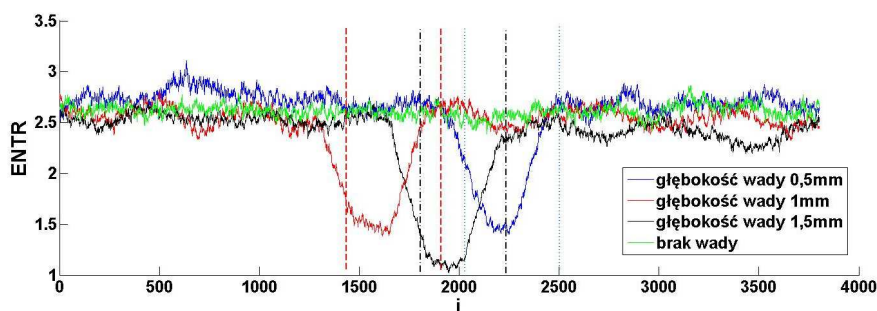
Przy stałej wartości parametru odcięcia $\varepsilon = 20$ i wartości współczynnika rekurencji $RR = 0,19$ wykazano, że istnieją wskaźniki, które pozwalają wykryć wadę. Na rysunkach 4.37÷4.46 przedstawiono te wskaźniki, które są odpowiednie do detekcji wad. Wskaźniki DET (rys. 4.37), L (rys. 4.38), ENTR (rys. 4.39), LAM (rys. 4.40), TT (rys. 4.41), T_1 (rys. 4.42), T_2 (rys. 4.43), RPDE (rys. 4.44), CC (rys. 4.45) i TRANS (rys. 4.46) służą do detekcji wad. Na frezowanych powierzchniach (z otworem o średnicy $\phi 2$ mm) pionowymi liniami zaznaczono położenie wad o różnej głębokości (niebieskie linie dla wady o głębokości 0,5 mm, czerwone linie dla wady o głębokości 1 mm oraz czarne linie dla wady o głębokości 1,5 mm). Opracowane wskaźniki po frezowaniu powierzchni ze sztucznymi wadami porównano do wskaźników uzyskanych po frezowaniu powierzchni bez sztucznej wady (zielone linie).



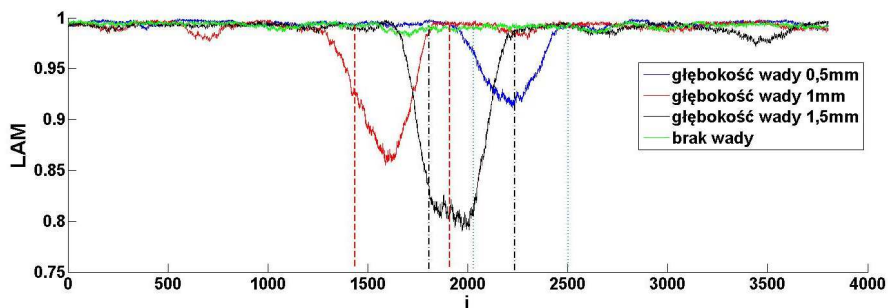
Rys. 4.37. Determinizm DET dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



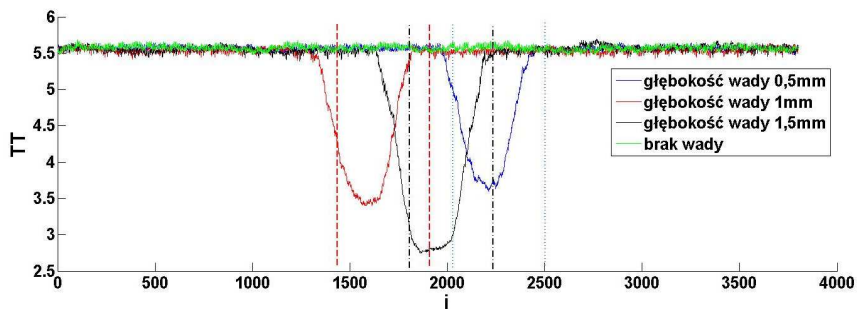
Rys. 4.38. Średnia długość przekątnej L dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



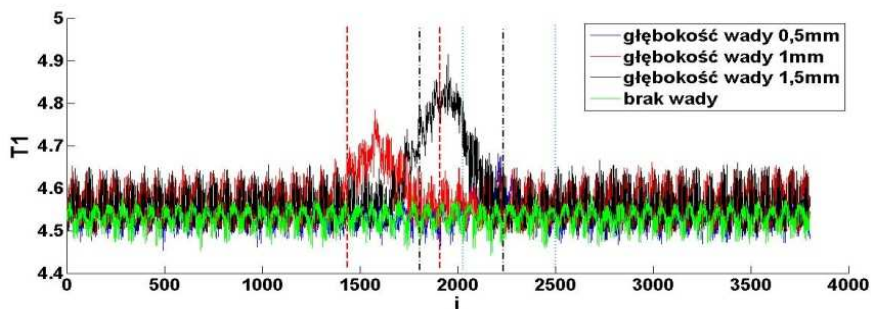
Rys. 4.39. Entropia $ENTR$ dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



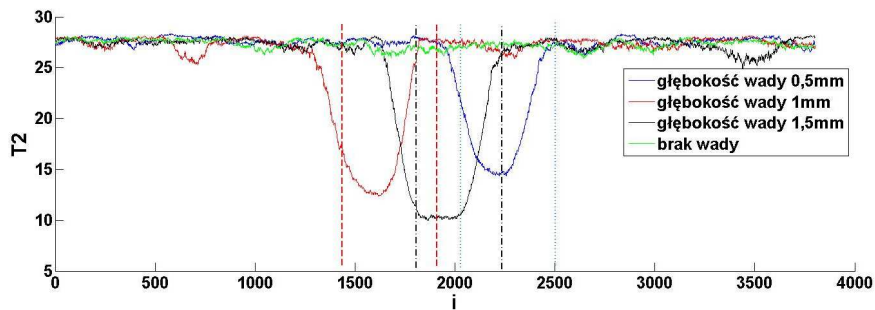
Rys. 4.40. Laminarność LAM dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



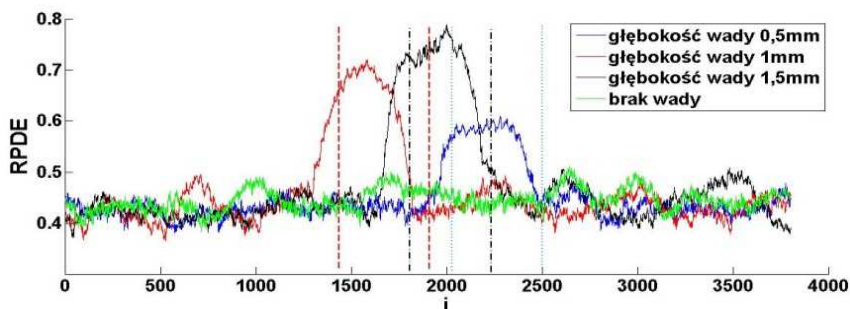
Rys. 4.41. Trapping time TT dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



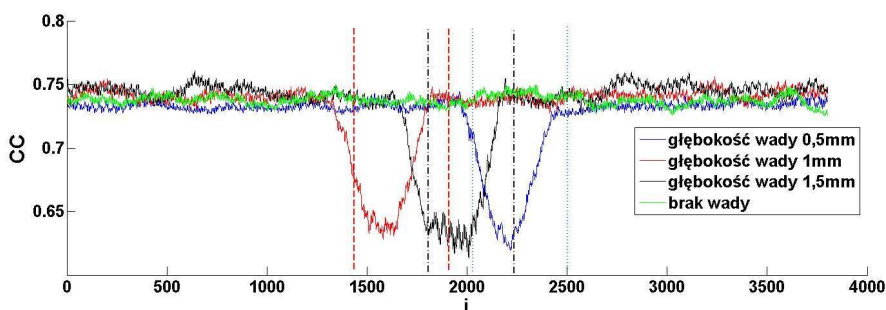
Rys. 4.42. Czas rekurencji 1 typu T_1 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



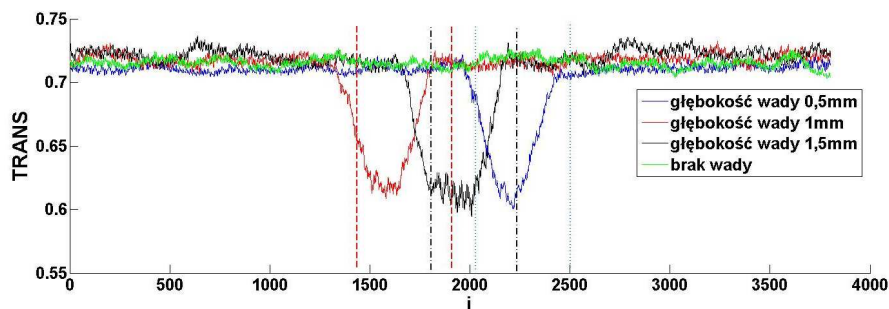
Rys. 4.43. Czas rekurencji 2 typu T_2 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



Rys. 4.44. Znormalizowana entropia rozkładu rekurencji RPDE dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)



Rys. 4.45. Clustering coefficient CC dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)

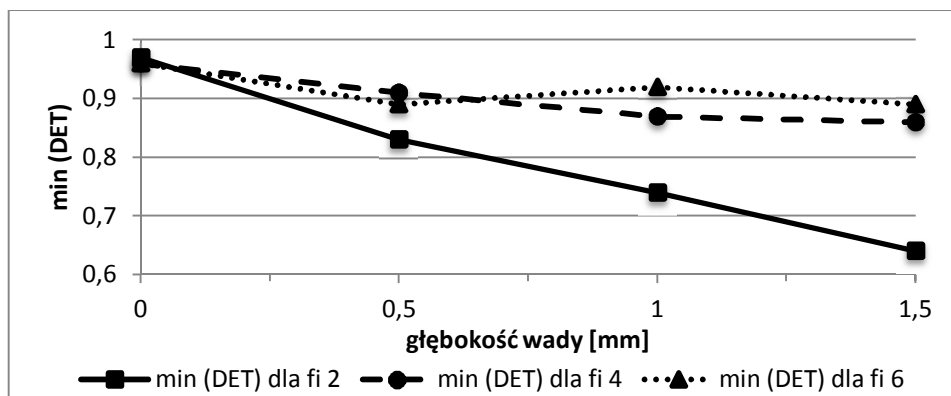


Rys. 4.46. Transitivity TRANS dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt GFRP)

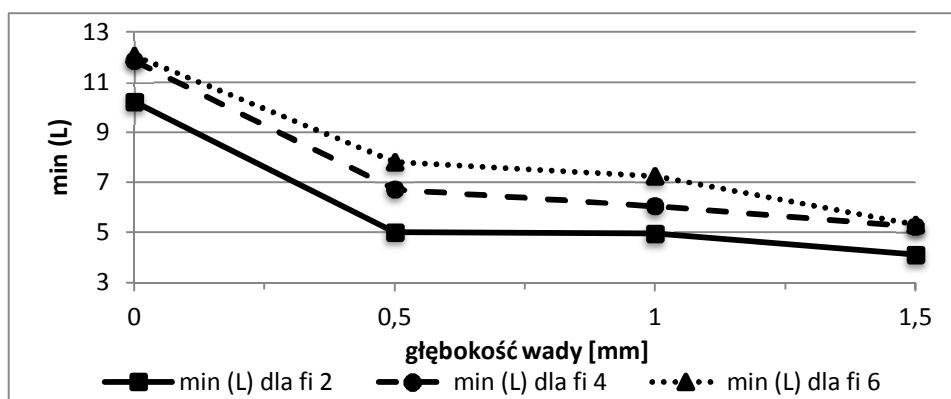
Do wskaźników, które nie wykazują w swoim przebiegu zmian na powierzchni badanego materiału, należy najdłuższa długość linii pionowej $V_{\max}$.

Na podstawie przeprowadzonych badań frezowania powierzchni i określonych szerokości i głębokości frezowania stwierdzono, że możliwe do wykrycia pole przekroju wady powinno wynosić co najmniej 2,5% pola przekroju warstwy usuwanej.

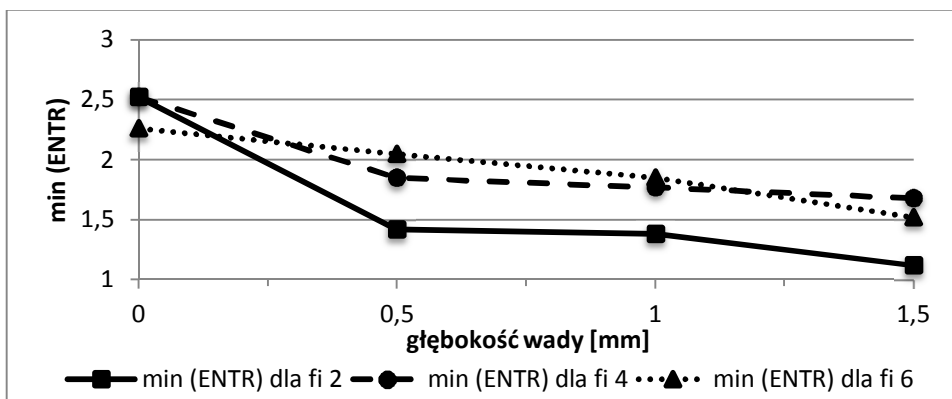
Przeprowadzone badania frezowanych powierzchni z wadami pozwalają na wyznaczenie zależności wpływu głębokości wady (dla określonej średnicy) na wskaźniki rekurencyjne. Na rysunkach 4.47÷4.54 przedstawiono wpływ głębokości wady na minimalne wartości wskaźników. Z kolei na rysunkach 4.55 i 4.56 przedstawiono wpływ głębokości wad na maksymalne wartości wskaźników.



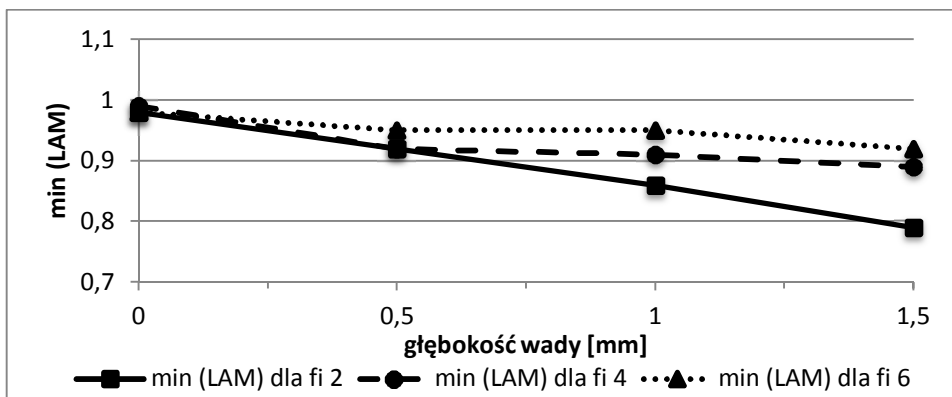
Rys. 4.47. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości DET (kompozyt GFRP)



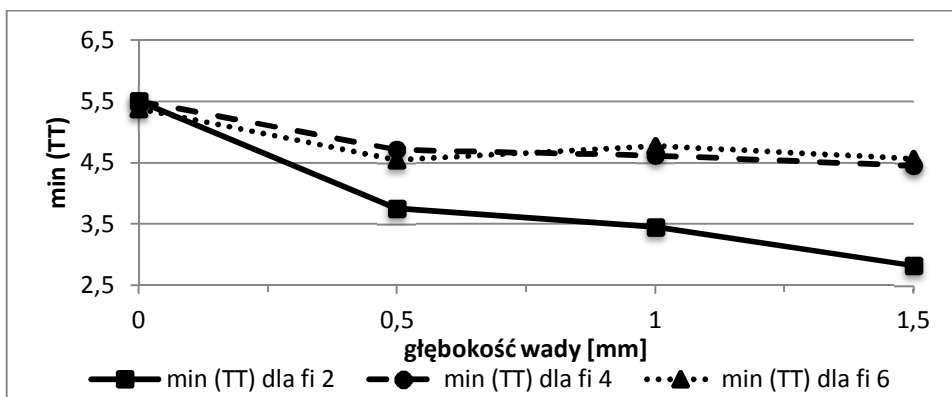
Rys. 4.48. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości L (kompozyt GFRP)



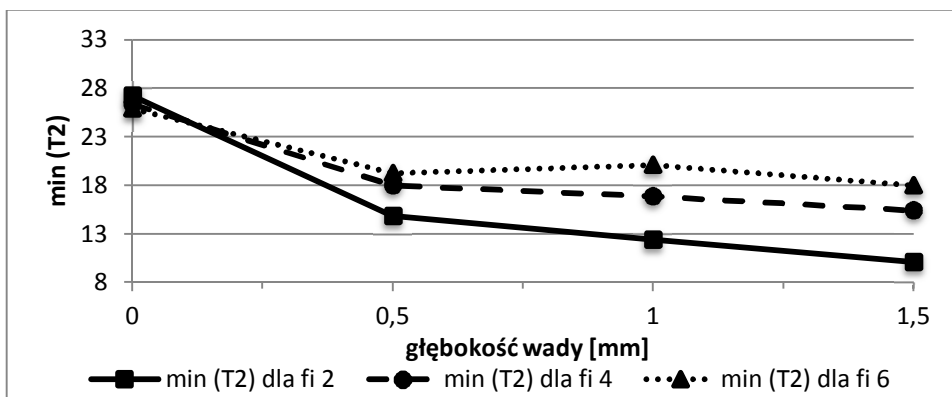
Rys. 4.49. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości ENTR (kompozyt GFRP)



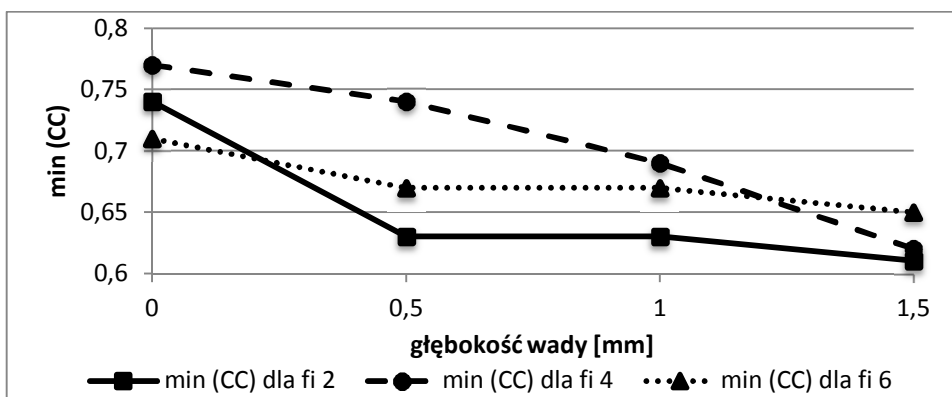
Rys. 4.50. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości LAM (kompozyt GFRP)



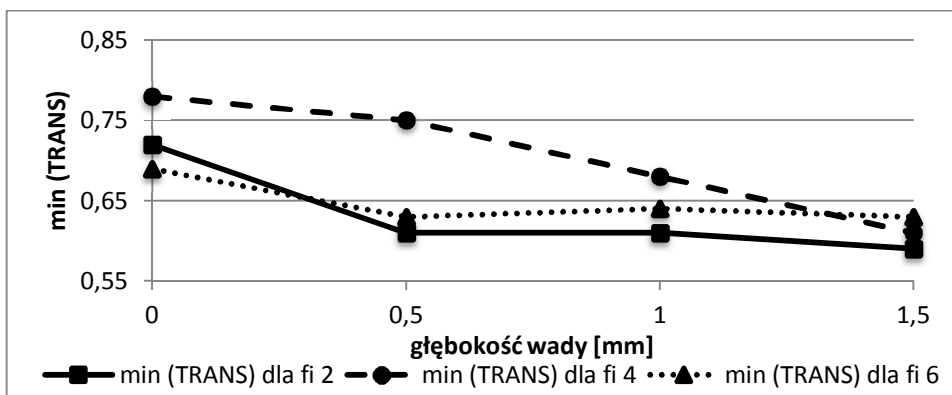
Rys. 4.51. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości TT (kompozyt GFRP)



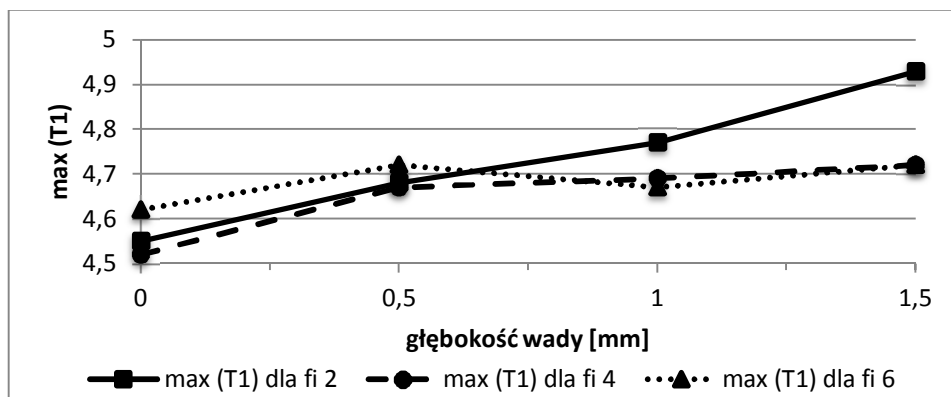
Rys. 4.52. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości T2 (kompozyt GFRP)



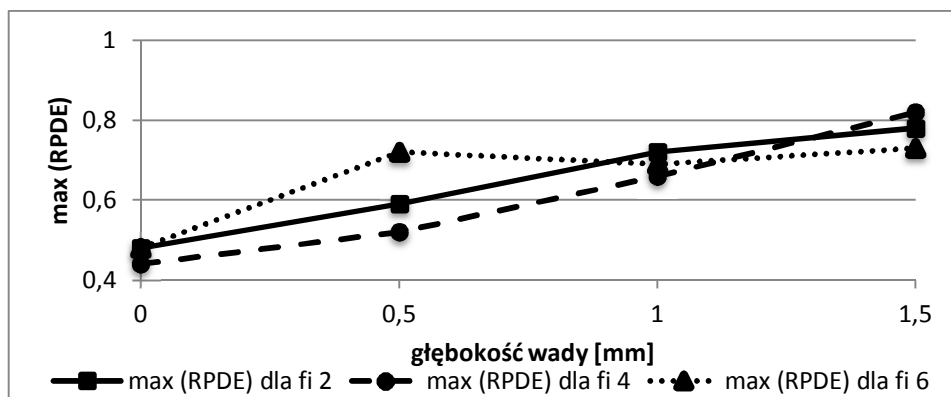
Rys. 4.53. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości CC (kompozyt GFRP)



Rys. 4.54. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości TRANS (kompozyt GFRP)



Rys. 4.55. Wpływ głębokości wady na maksymalne wartości T1 (kompozyt GFRP)



Rys. 4.56. Wpływ głębokości wady na maksymalne wartości RPDE (kompozyt GFRP)

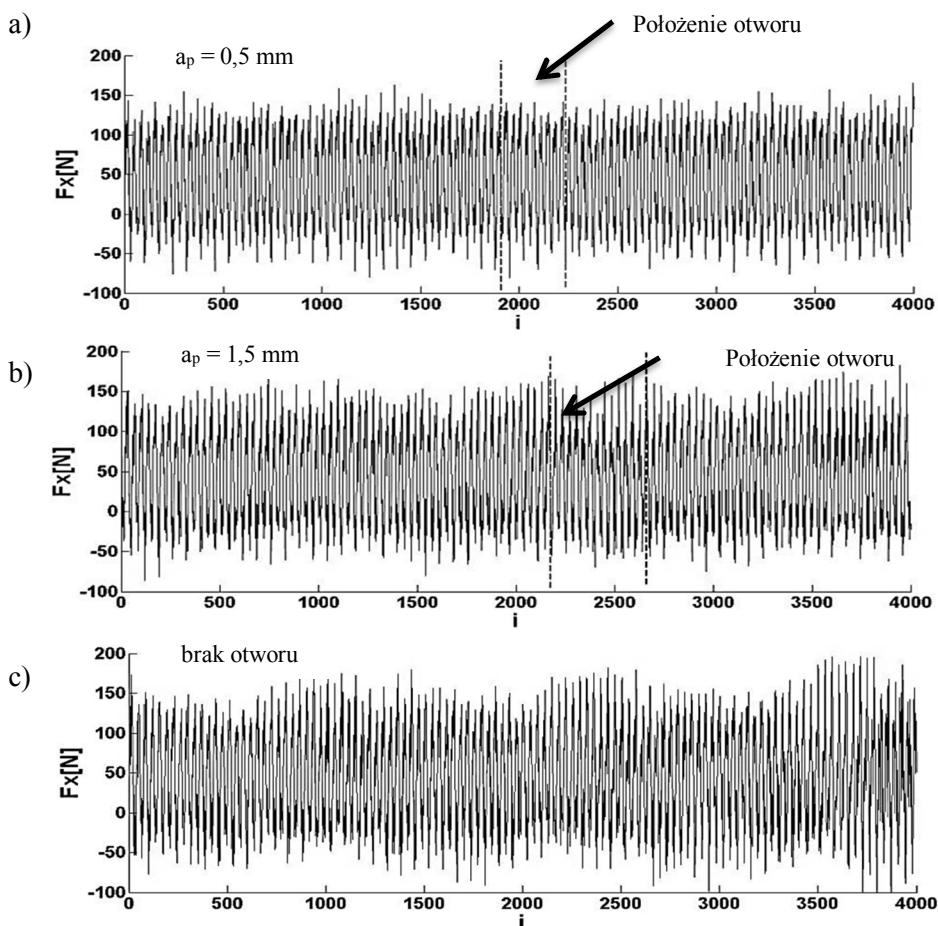
Na podstawie przedstawionych wykresów stwierdzono, że głębokość wady ma wpływ na wskaźniki rekurencyjne. Zauważono, że wraz ze wzrostem głębokości wady, minimalne wartości wskaźników mają tendencję malejącą, a maksymalne wartości wskaźników rosną wraz ze wzrostem głębokości wady.

Porównując wartości wskaźników otrzymanych dla powierzchni bez wad sztucznych do wskaźników uzyskanych dla powierzchni z wadami, wyraźnie zauważalna jest zmiana wartości wskaźników, ponieważ minimalne wartości wskaźników maleją, a maksymalne wartości wskaźników mają tendencję rosnącą.

4.4. Wpływ głębokości wady sztucznej na jej wykrywalność w kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi

Podobnie jak w przypadku analizy kompozytów z włóknami szklanymi tak i dla kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi przesyconymi żywicą

epoksydową możliwe jest wykrywanie wad sztucznych w postaci otworów o różnych głębokościach za pomocą wykresów i wskaźników rekurencyjnych. Przeprowadzono badania powierzchni z różnymi głębokościami wad o średnicach $\phi 2$ mm, $\phi 4$ mm i $\phi 6$ mm. Przykładowe siły F_x uzyskane na podstawie zarejestrowanego sygnału sił skrawania przedstawiono na rysunku 4.57. Wyniki pomiarów powierzchni ze sztucznymi wadami w postaci otworów o głębokościach 0,5 mm, 1 mm i 1,5 mm dla średnicy $\phi 2$ mm porównano do wyników po frezowaniu powierzchni, na której nie było wad sztucznych. Położenie otworów zaznaczono przerywanymi liniami.



Rys. 4.57. Przebieg siły F_x opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 0,5 mm b) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 1,5 mm, b) bez otworu (kompozyt CFRP)

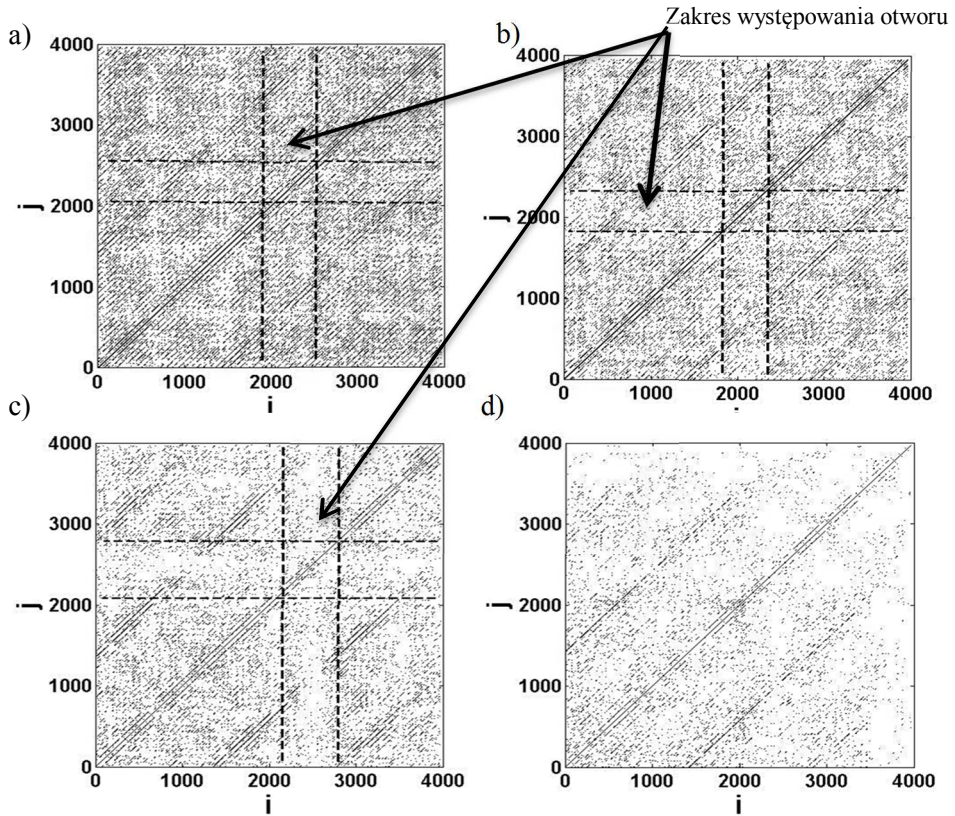
W tabeli 4.4 przedstawiono wymiary opóźnienia d i wymiary zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z otworami o określonych średnicach i różnych głębokościach wady sztucznej dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi.

Tabela 4.4. Wymiary opóźnienia d i zanurzenia m dla frezowanej powierzchni z wadami o danej średnicy i różnych głębokościach

Średnica wady [mm]	Głębokość wady [mm]	Wymiar opóźnienia d	Wymiar zanurzenia m
brak wady	-	8	5
2	0,5	9	5
	1	10	5
	1,5	8	5
4	0,5	10	5
	1	8	5
	1,5	8	5
6	0,5	11	5
	1	8	6
	1,5	8	6

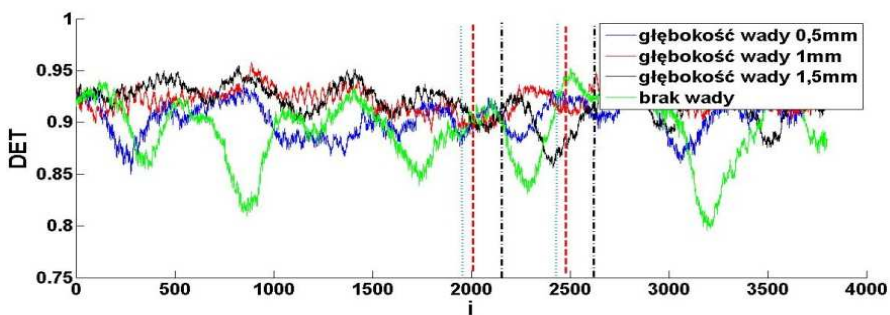
Podobnie jak dla kompozytu GFRP, tak i dla CFRP, analizując wyznaczone wymiary d i m można stwierdzić, że ich wartość nie zależy od głębokości badanej wady.

Na rysunku 4.58 przedstawiono wykresy rekurencyjne, na których zaznaczono miejsce występowania wady sztucznej o średnicy $\phi 2$ mm i głębokości 0,5 mm (rys. 4.58a), 1 mm (rys. 4.58b), 1,5 mm (rys. 4.58c) oraz wykres rekurencyjny opracowany dla frezowanej powierzchni bez wady sztucznej (rys. 4.58d).

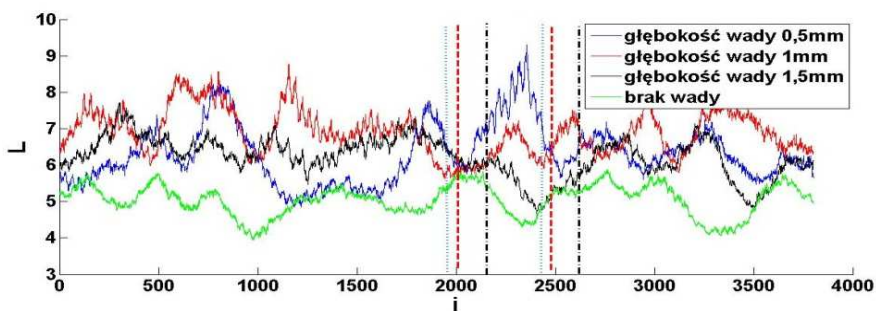


Rys. 4.58. Wykres rekurencyjny opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki: a) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 0,5 mm), b) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 1 mm, c) z otworem o średnicy $\phi 2$ mm oraz głębokości 1,5 mm, d) bez otworu (kompozyt CFRP)

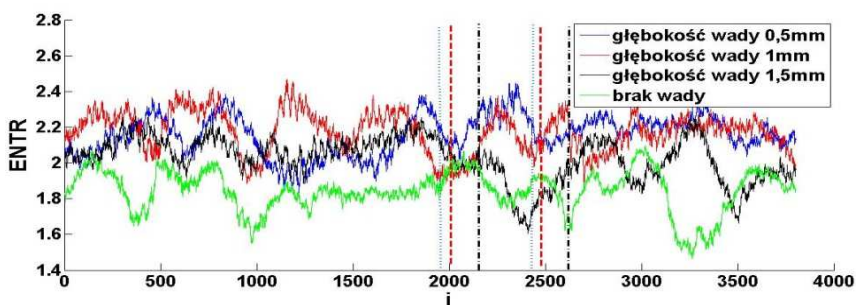
Na rysunkach 4.59÷4.68 przedstawiono wskaźniki, takie jak DET (rys. 4.59), L (rys. 4.60), ENTR (rys. 4.61), LAM (rys. 4.62), TT (rys. 4.63), T_1 (rys. 4.64), T_2 (rys. 4.65), RPDE (rys. 4.66), CC (rys. 4.67) i TRANS (rys. 4.68), które są odpowiednie do detekcji wad przy stałej wartości parametru odcięcia $\varepsilon = 20$ i wartości współczynnika rekurencji $RR = 0,20$. Pionowymi liniami na badanych frezowanych powierzchniach oznaczono położenie wad o różnej głębokości (niebieskie linie dla wady o głębokości 0,5 mm, czerwone linie dla wady o głębokości 1 mm oraz czarne linie dla wady o głębokości 1,5 mm).



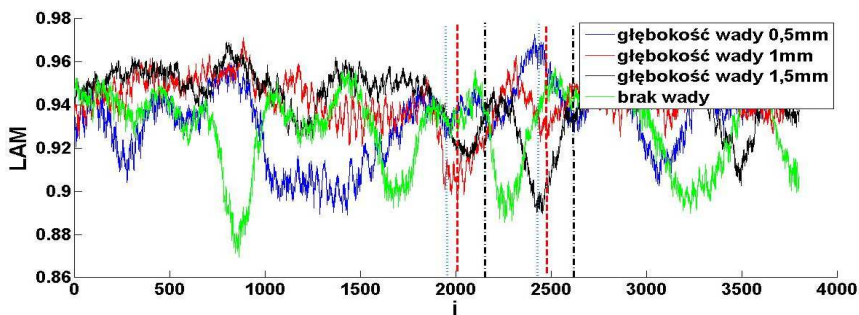
Rys. 4.59. Determinizm DET dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



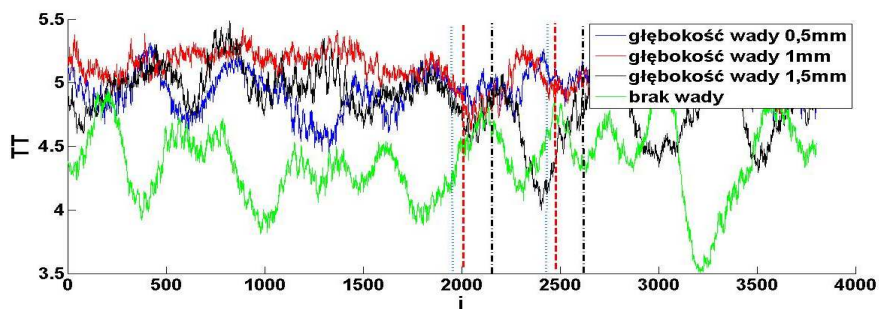
Rys. 4.60. Średnia długość przekątnej L dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



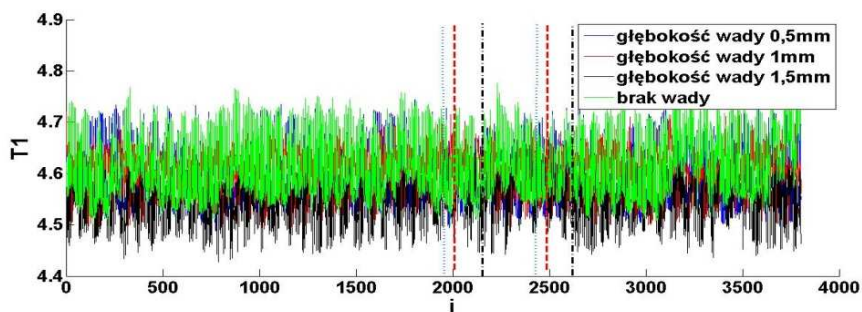
Rys. 4.61. Entropia ENTR dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



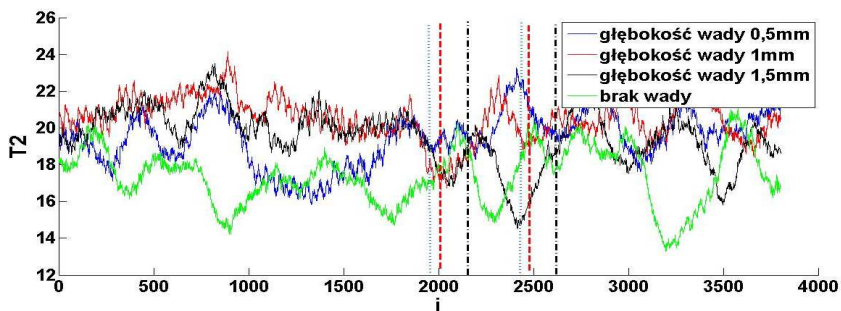
Rys. 4.62. Laminarność LAM dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



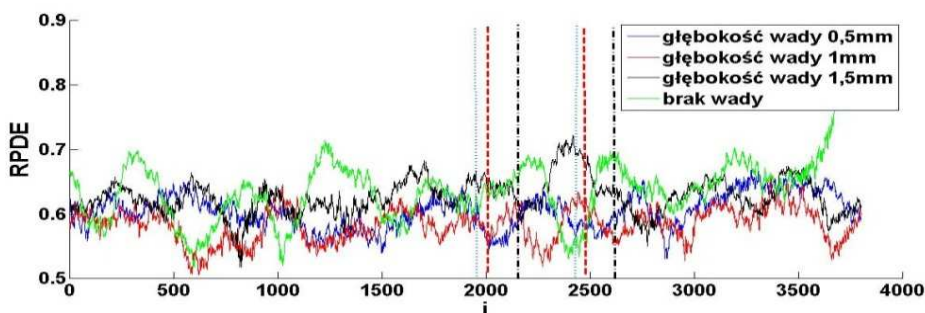
Rys. 4.63. Trapping time TT dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



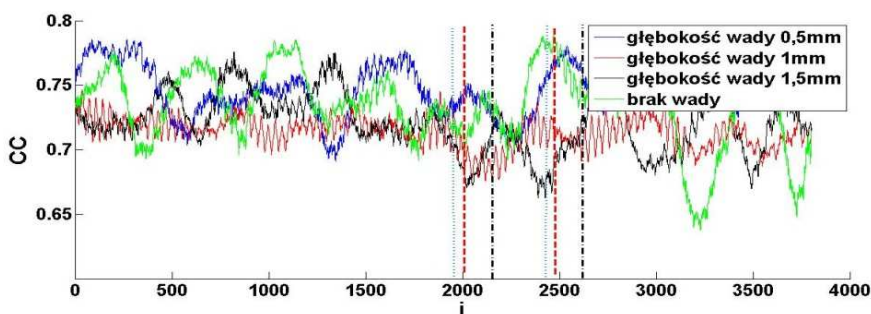
Rys. 4.64. Czas rekurencji 1 typu T_1 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



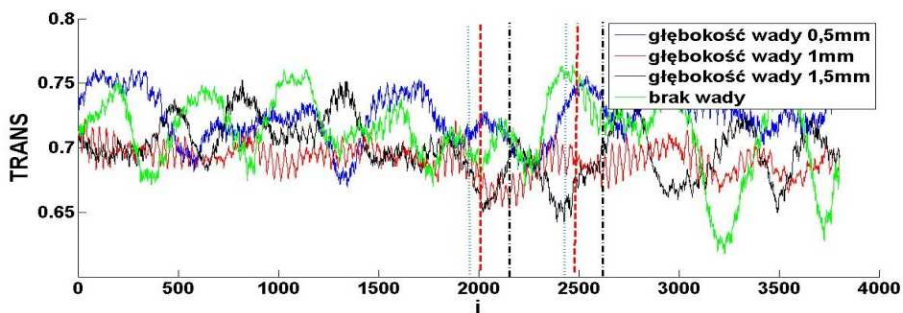
Rys. 4.65. Czas rekurencji 2 typu T_2 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



Rys. 4.66. Znormalizowana entropia rozkładu rekurencji RPDE dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)



Rys. 4.67. Clustering coefficient CC dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)

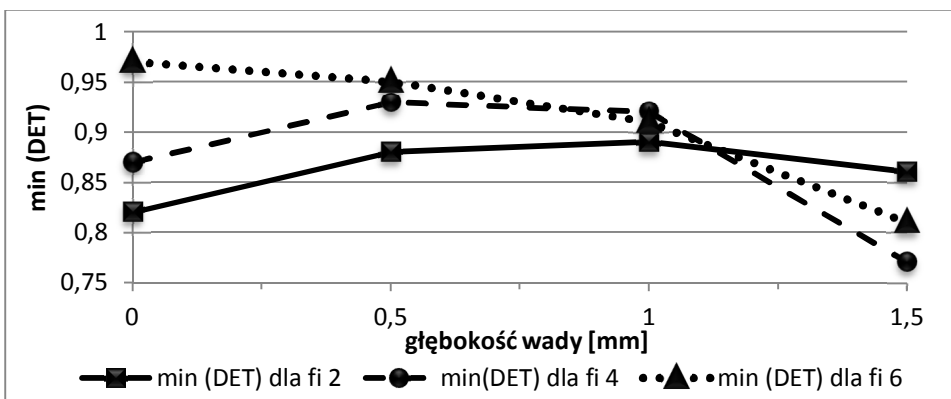


Rys. 4.68. Transitivity TRANS dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z otworem $\phi 2$ mm (o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) i bez otworu (kompozyt CFRP)

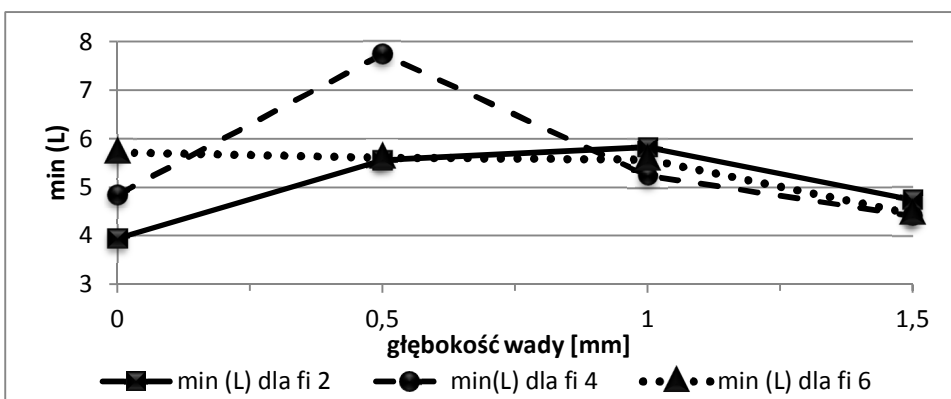
Najdłuższa długość linii pionowej $V_{\max}$ należy do wskaźników, które nie wykazują w swoim przebiegu zmian i nie są w stanie wykryć wad na powierzchni badanego materiału.

Przedstawione wyniki badań pokazują możliwość wykrycia wad powierzchniowych, gdy głębokość wady jest mniejsza niż głębokość skrawania. Dla wady o średnicy $\phi 2$ mm możliwe jest wykrycie wady o głębokości nie mniejszej od 1,5 mm, co przy zadanej średnicy frezu stanowi 7,5% pola przekroju warstwy usuwanej. W pozostałych przeprowadzonych badaniach udowodniono, że dla wady o średnicy $\phi 4$ mm możliwe jest wykrycie wady nie mniejszej niż 1 mm, co stanowi 10% pola przekroju warstwy usuwanej, a dla średnicy wady $\phi 6$ mm możliwe jest wykrycie wady nie mniejszej niż 0,5 mm będącej 7,5% pola przekroju warstwy usuwanej.

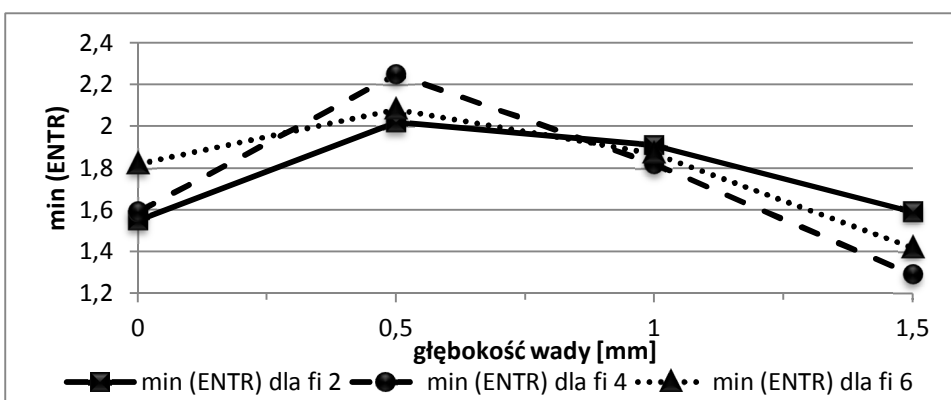
Na rysunkach 4.69÷4.76 przedstawiono wpływ głębokości wady na minimalne wartości wskaźników, a na rysunkach 4.77 i 4.78 przedstawiono wpływ głębokości wad na maksymalne wartości wskaźników. Najmniejsze i największe wartości wskaźników wyznaczono w miejscu występowania wady.



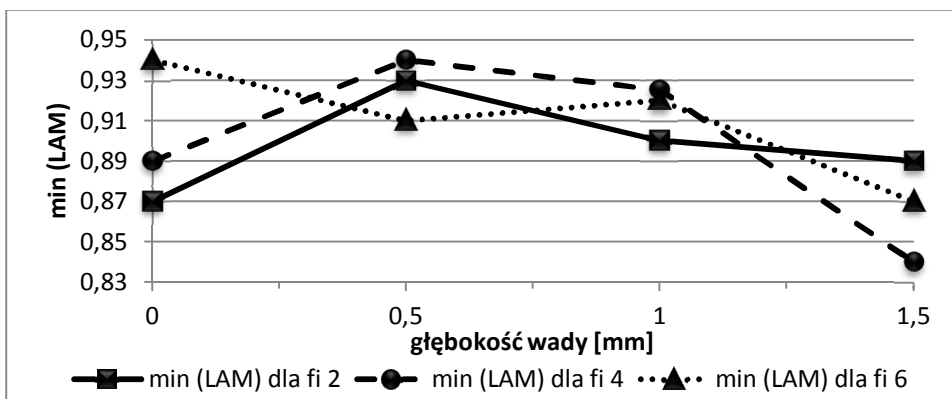
Rys. 4.69. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości DET (kompozyt CFRP)



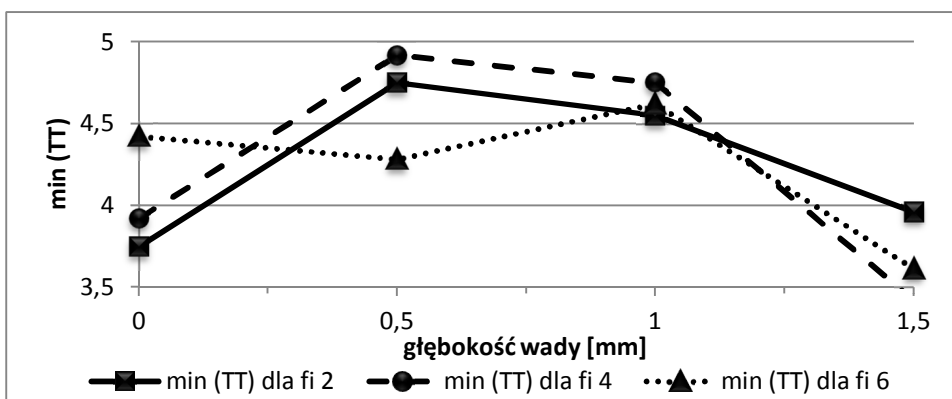
Rys. 4.70. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości L (kompozyt CFRP)



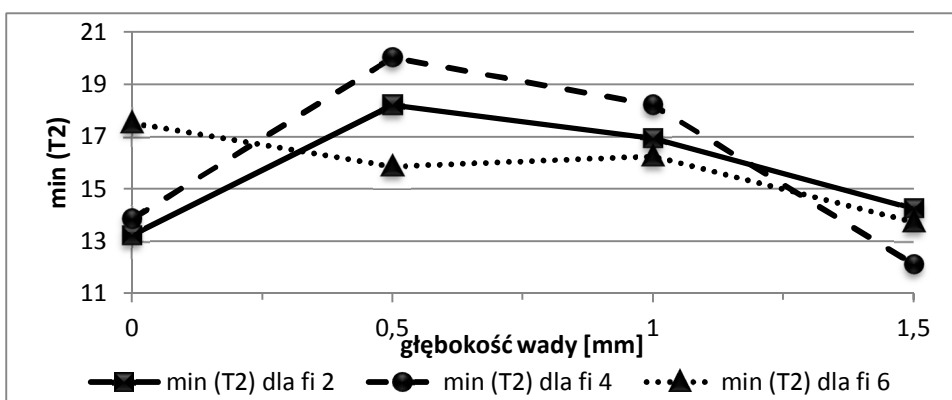
Rys. 4.71. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości ENTR



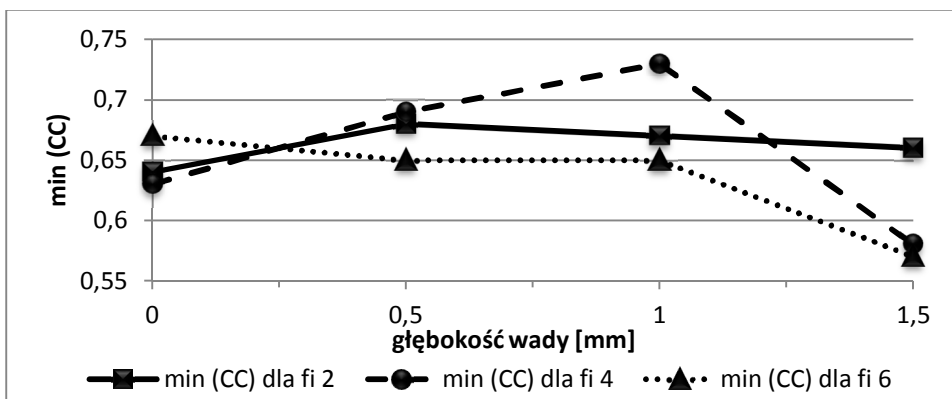
Rys. 4.72. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości LAM



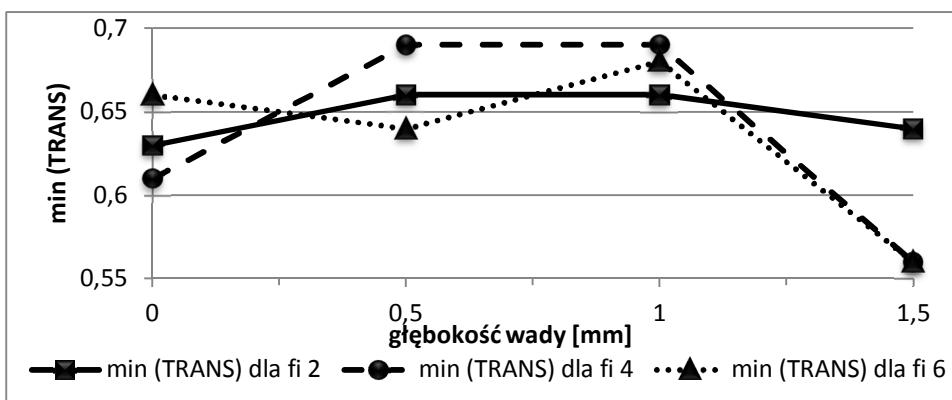
Rys. 4.73. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości TT



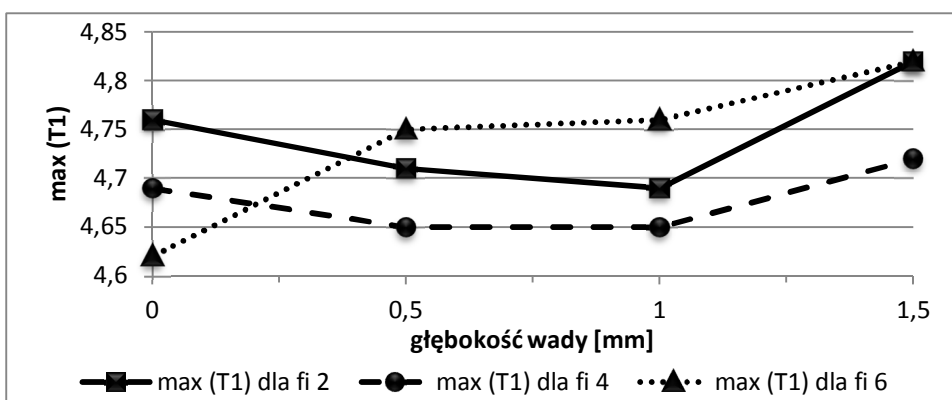
Rys. 4.74. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości T2



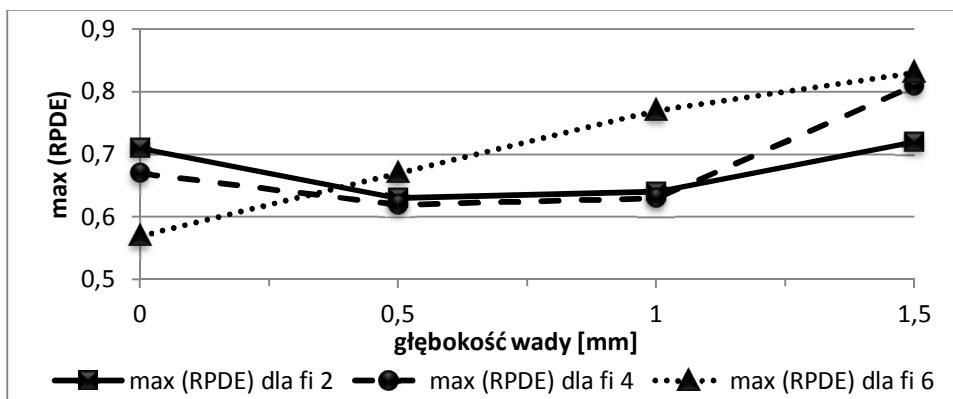
Rys. 4.75. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości CC



Rys. 4.76. Wpływ głębokości wady na minimalne wartości TRANS



Rys. 4.77. Wpływ głębokości wady na maksymalne wartości T1



Rys. 4.78. Wpływ głębokości wady na maksymalne wartości RPDE

Przedstawione wykresy pozwalają stwierdzić, że wskaźniki rekurencyjne są uzależnione od głębokości wady. Wartości wskaźników maleją (dla wartości minimalnych) lub rosną (dla wartości maksymalnych) dla średnicy $\phi 2$ mm od głębokości 1,5 mm, dla $\phi 4$ mm od głębokości 1 mm, $\phi 6$ mm od głębokości 0,5 mm. Zależności przedstawione na wykresach potwierdzają się w analizie wykresów samych wskaźników, a mianowicie zauważalna jest zmiana wskaźników dla określonych średnic i głębokości wad sztucznych.

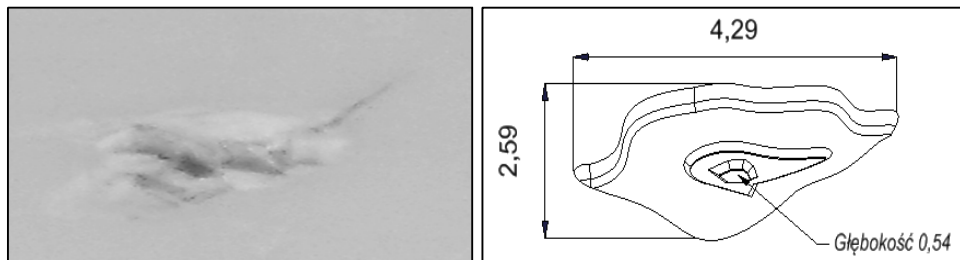
Podsumowując badania sztucznych wad o różnej średnicy i różnej głębokości na powierzchniach frezowanych kompozytów polimerowych stwierdzono, że możliwe jest wykrywanie wad powierzchniowych o różnych średnicach i głębokościach używając wykresów i wskaźników rekurencyjnych.

Analiza porównawcza wskaźników pozwoliła zauważyć różnice pomiędzy wartościami wskaźników otrzymanych dla powierzchni z wadami i bez wad (minimalne wartości wskaźników są mniejsze, a maksymalne wartości są większe od tych otrzymanych dla powierzchni z wadami sztucznymi).

4.5. Wykrywanie wad produkcyjnych w kompozytach z włóknami szklanymi i węglowymi

W kompozytach polimerowych z włóknami szklanymi jak i węglowymi mogą niekiedy występować wady, które powstały w procesach produkcyjnych, w sposób niekontrolowany. Do takich wad zaliczane są między innymi pęcherze i pory powstałe na etapie wytwarzania i uwidocznione na etapie obróbki skrawaniem. Na powierzchni mogą także występować uszkodzenia powierzchni powstałe w wyniku poprzednich prac związanych z wytwarzaniem materiału. Tego typu wady wpływają na pogorszenie jakości struktury geometrycznej powierzchni i mogą wpływać na rozwój zniszczenia powierzchni. Na etapie obróbki skrawaniem uwidocznienie występowania wady może się przyczynić do

eliminacji wadliwego elementu i wprowadzenia zmian lub kontroli we wcześniejszych etapach produkcji. Na rysunkach 4.79 i 4.80 przedstawiono przykładowe wady produkcyjne i ich wymiary powstałe na powierzchni kompozytów GFRP i CFRP.



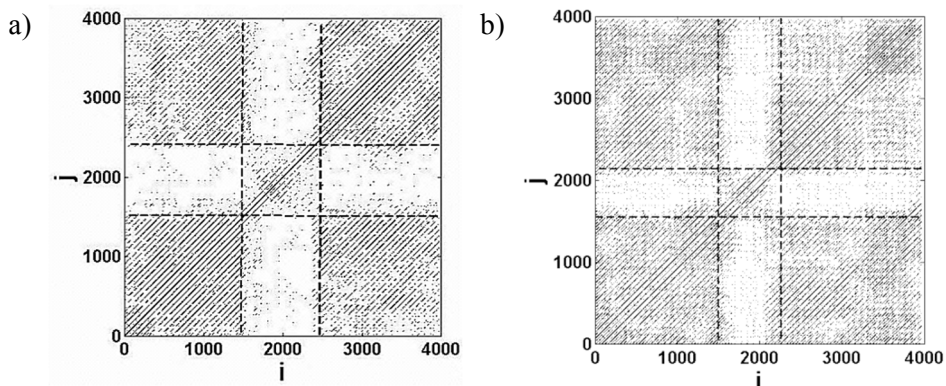
Rys. 4.79. Wada produkcyjna na powierzchni kompozytu GFRP



Rys. 4.80. Wada produkcyjna na powierzchni kompozytu CFRP

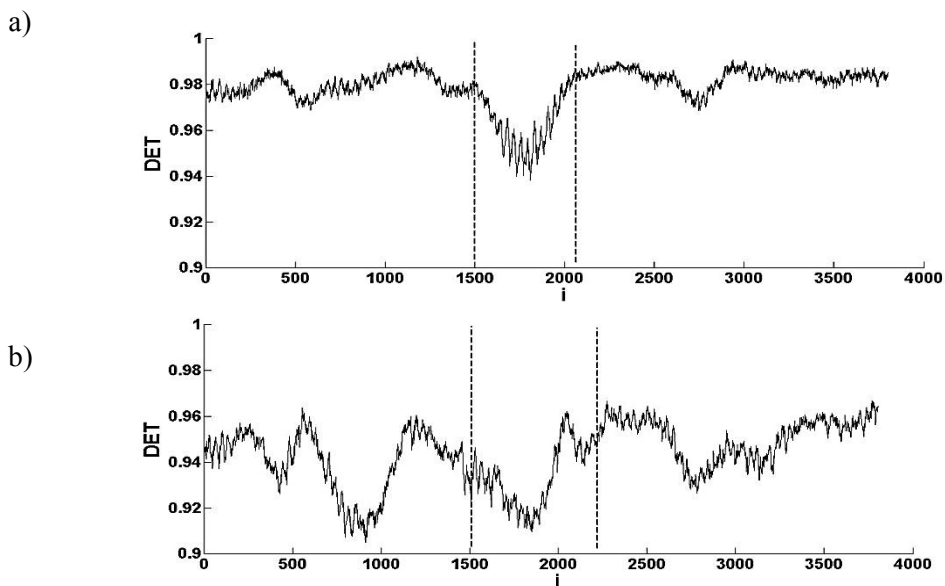
W badaniach przyjęto głębokość skrawania na poziomie 1 mm, posuw na ostrze równy 0,2 mm/ostrze i prędkość skrawania 250 m/min. Dobrano wymiary opóźnienia d i zanurzenia m , które dla kompozytu GFRP wynosiły $d = 9$, $m = 5$, a dla kompozytu CFRP $d = 10$, a $m = 5$.

Na rysunkach 4.81 przedstawiono wykresy rekurencyjne, na których można zauważyć położenie wady produkcyjnej na kompozycie GFRP (rys. 4.81a) i CFRP (rys. 4.81b).

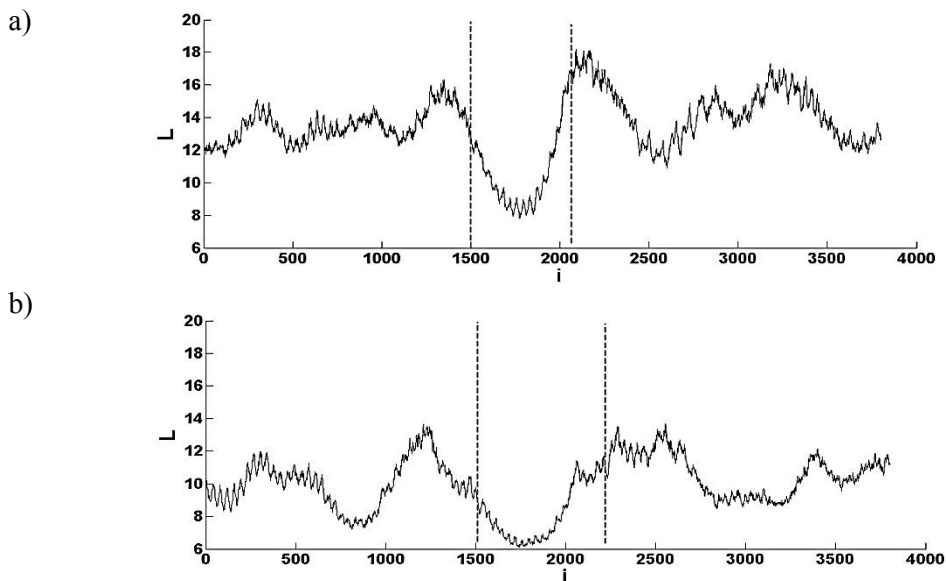


Rys. 4.81. Wykresy rekurencyjne opracowane na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadami produkcyjnymi w kompozycie: a) GFRP, b) CFRP

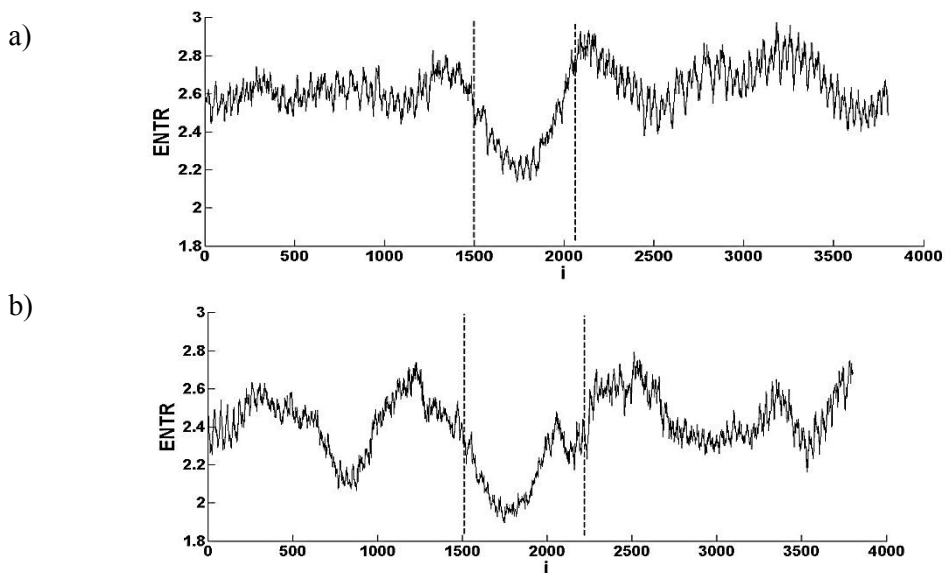
Przy stałej wartości parametru odcięcia $\varepsilon = 20$ i wartości wskaźnika rekurencji $RR = 0,02$ przedstawiono wskaźniki, które służą do wykrycia wad produkcyjnych. Na wykresach wskaźników rekurencyjnych (rys. 4.82÷4.91), pionowymi, przerywanymi kreskami zaznaczono położenie wady produkcyjnej.



Rys. 4.82. Determinizm DET dla wykresu rekurencyjnego opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

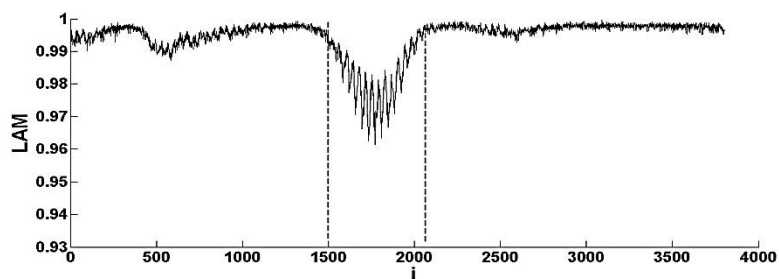


Rys. 4.83. Średnia długość przekątnej L dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

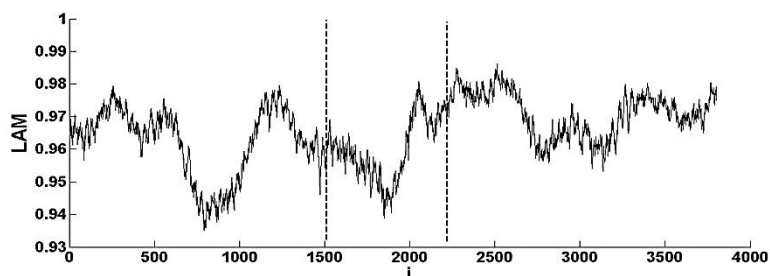


Rys. 4.84. Entropia $ENTR$ dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

a)

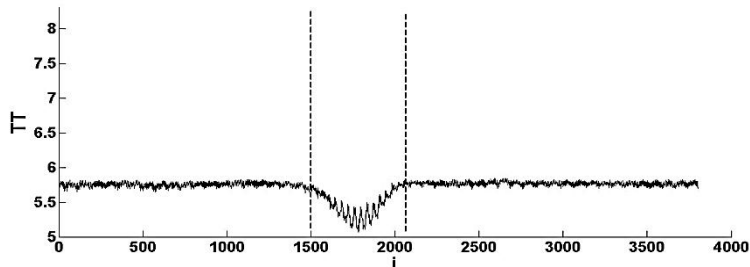


b)

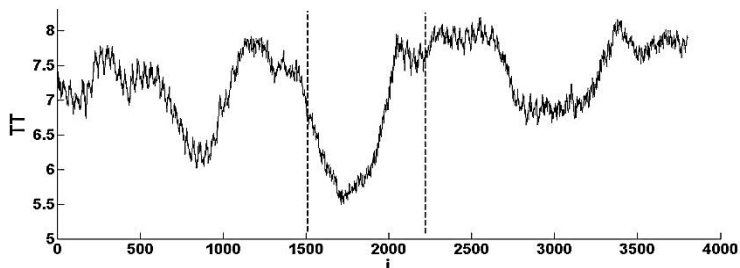


Rys. 4.85. Laminarność LAM dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

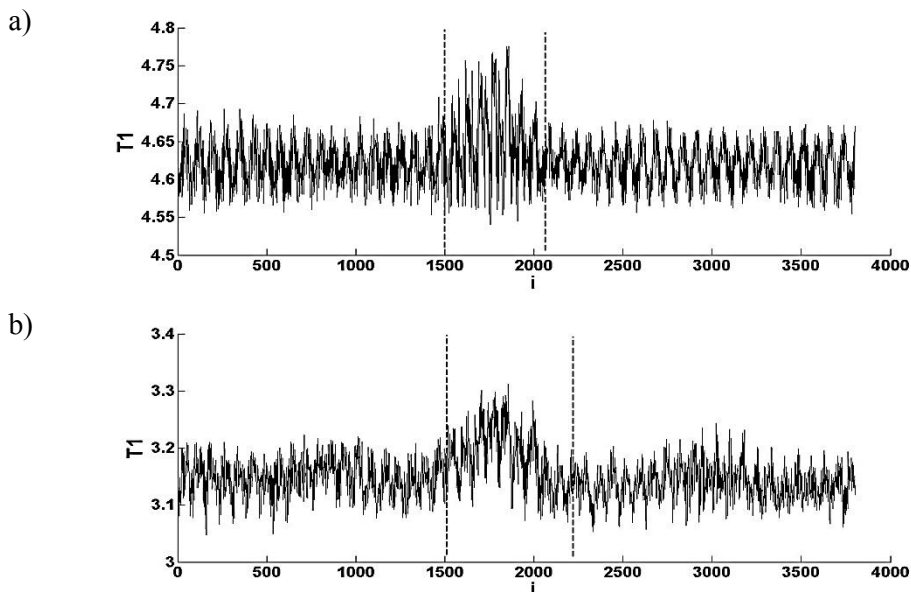
a)



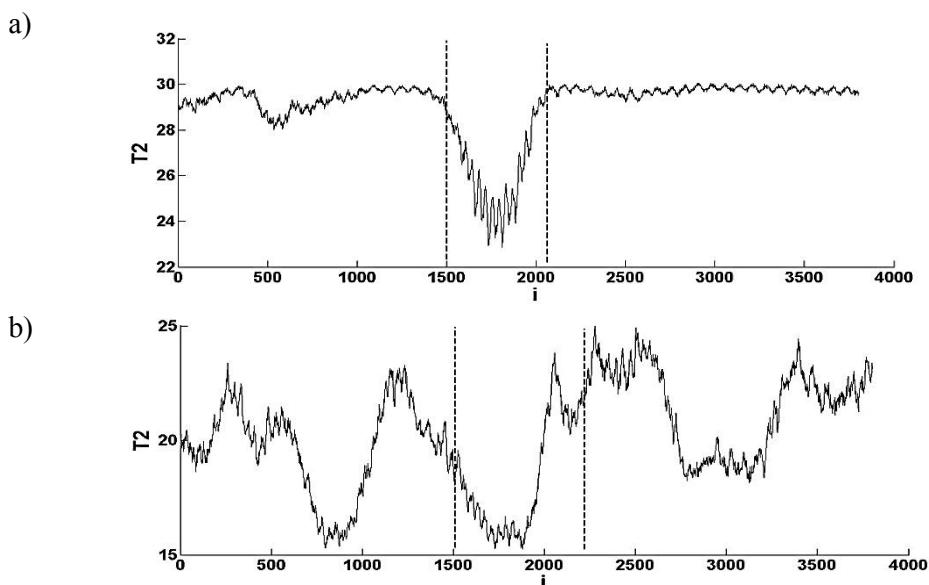
b)



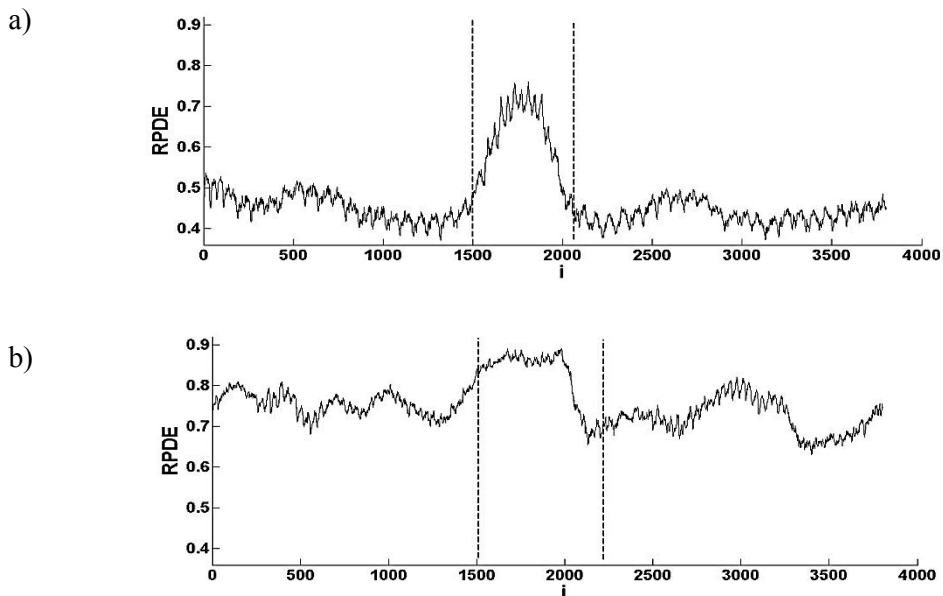
Rys. 4.86. Trapping time TT dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP



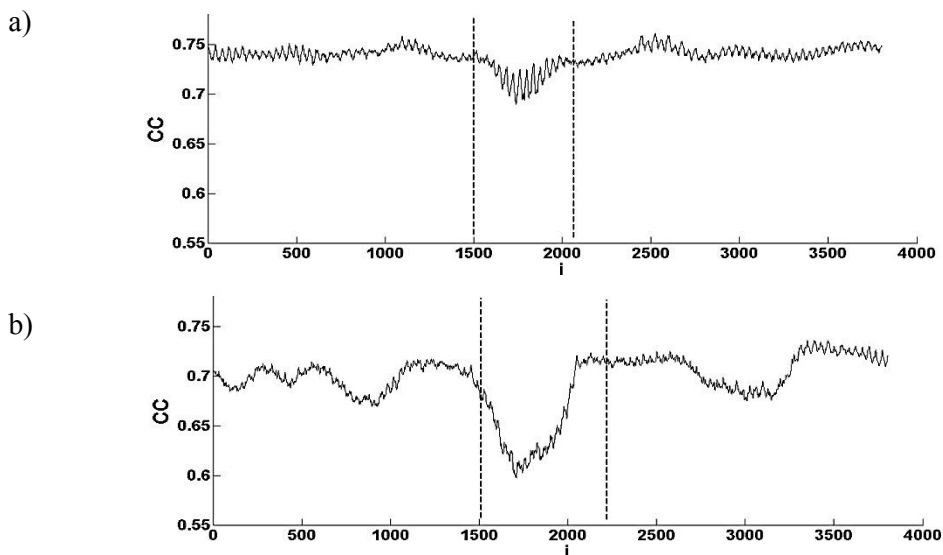
Rys. 4.87. Czas rekurencji 1 typu T_1 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP



Rys. 4.88. Czas rekurencji 2 typu T_2 dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

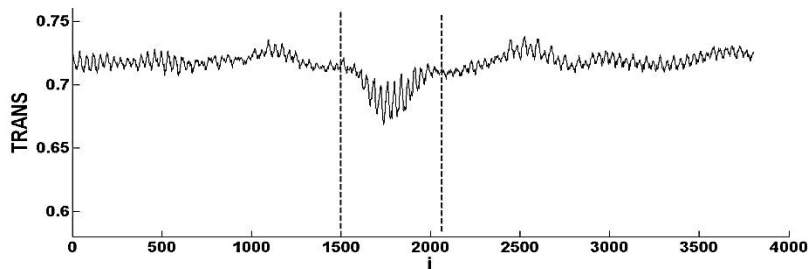


Rys. 4.89. Znormalizowana entropia rozkładu rekurencji RPDE dla wykresu rekurencyjnego, opracowana na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

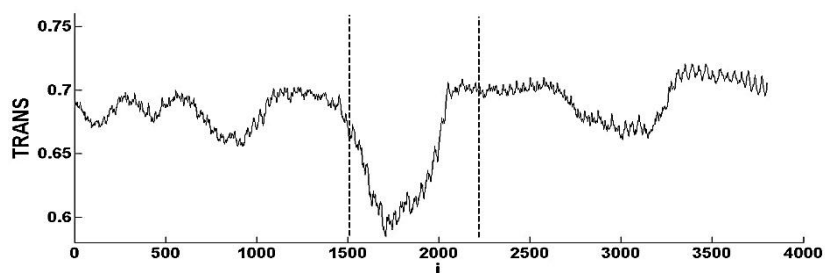


Rys. 4.90. Clustering coefficient CC dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

a)



b)



Rys. 4.91. Transitivity TRANS dla wykresu rekurencyjnego, opracowany na podstawie zarejestrowanego sygnału siły posuwowej podczas skrawania próbki z wadą produkcyjną materiału: a) GFRP, b) CFRP

Na podstawie przedstawionych na rysunkach wykresów wskaźników rekurencyjnych stwierdzono, że wskaźniki rekurencyjne DET (rys. 4.82), L (rys. 4.83), ENTR (rys. 4.84), LAM (rys. 4.85), TT (rys. 4.86), T1 (rys. 4.87), T2 (rys. 4.88), RPDE (rys. 4.89), CC (rys. 4.90) i TRANS (rys. 4.91) są odpowiednie do wykrycia wad produkcyjnych (pęcherzy i porów). W miejscu położenia wady (widocznej w zakresie zaznaczonym przerywanymi liniami) wskaźniki znacznie zmieniają swoje wartości.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej monografii przedstawiono analizę wpływu warunków frezowania na strukturę geometryczną powierzchni wybranych kompozytów polimerowych. Do badań przyjęto kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami szklanymi oraz wzmocnione włóknami węglowymi, przesycane żywicą epoksydową. Zmiennymi warunkami frezowania były parametry skrawania takie jak głębokość skrawania, posuw oraz prędkość skrawania.

Występowanie niepożądanych wad powierzchniowych ogranicza lub niejednokrotnie uniemożliwia wykorzystanie elementów jako części składowych maszyn i urządzeń. Kosztowny proces wytworzenia elementów z kompozytów polimerowych narzuca rygorystyczne podejście do ich kontroli.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz przedstawione wyniki badań eksperymentalnych pozwalają na przedstawienie rezultatów poznawczych i praktycznych oraz uwag dotyczących kierunków dalszych badań.

Rezultaty poznawcze:

1. W wyniku przeprowadzonych badań powierzchni kompozytów polimerowych po frezowaniu stwierdzono, że parametry technologiczne frezowania mają wpływ na rodzaj i liczbę wad powierzchniowych kompozytów polimerowych.
2. Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń wskaźników rekurencyjnych stwierdzono, że możliwe jest wykrycie wad w materiałach kompozytowych na podstawie wartości składowej posuwowej całkowitej siły skrawania za pomocą technik rekurencyjnych.
3. Na podstawie wyników badań chropowatości i falistości powierzchni po obróbce frezowaniem kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi, w zakresie badanych warunków frezowania wykazano, że zmieniające się wybrane parametry skrawania wpływają na parametry R_a , R_z , R_{sk} , R_{ku} , W_a , W_z , W_{sk} i W_{ku} . Zmiana głębokości frezowania nie ma istotnego wpływu na zmianę parametrów chropowatości i falistości powierzchni, co potwierdziły analizy statystyczne. Wzrost posuwu wpływa na zwiększenie wartości parametrów R_a , W_a , R_z , W_z , R_{ku} i W_{ku} oraz zmniejszenie R_{sk} i W_{sk} . Wynika to z większych oporów jakie oddziałują na narzędzie w obrabianym materiale. W przypadku wpływu prędkości skrawania wykazano, że wzrost tego parametru frezowania powoduje zmniejszenie wartości parametrów R_a , W_a , R_z , W_z , oraz wzrost parametrów R_{sk} i W_{sk} . Wzrost prędkości skrawania powyżej 250 m/min powoduje zmniejszenie R_{ku} i W_{ku} . Większa prędkość skrawania wpływa na szybsze ucinanie włókien kompozytów nie powodując wykruszenia żywicy. Ograniczeniem stosowania dużych prędkości skrawania jest trwałość ostrza. Badania porównawcze dwóch rodzajów kompozytów polimerowych pokazały, że kompozyt CFRP jest bardziej wrażliwy (zmiana

parametrów chropowatości i falistości jest bardziej wyraźna) na zmianę parametrów frezowania niż kompozyt GFRP. W przypadku występujących małych zmian parametrów chropowatości i falistości należy stosować duże wartości posuwu i duże prędkości skrawania.

4. Analiza topografii i parametrów S_a , S_z , S_p i S_v pokazała, że wraz ze wzrostem posuwu na ostrze, parametry struktury geometrycznej powierzchni zwiększają się. Posuw na ostrze w większym stopniu wpływa na zwiększenie wartości parametrów 3D geometrycznej struktury powierzchni w materiale CFRP. Wzrost prędkości skrawania powoduje zmniejszenie wartości parametrów dla obu rodzajów kompozytów, a w szczególności CFRP, gdzie zmiany są bardziej wyraźne.
5. Obserwacje pod mikroskopem pozwalają stwierdzić, że w kompozytach z włóknami szklanymi i węglowymi występują różnego rodzaju wady. Ocena ilościowa wad w kompozycie GFRP jest trudna ze względu na małe wymiary powstających wad. Na powierzchni materiału CFRP wady są wyraźne i możliwe do zliczenia. Głębokość skrawania nie wpływa istotnie na powstawanie wad na powierzchni CFRP. Najistotniejszy wpływ na strukturę geometryczną powierzchni i powstawanie wad powierzchniowych ma wzrost posuwu na ostrze. Świadczą o tym także wykresy pokazujące wpływ posuwu na ostrze na parametr R_{ku} (związany z wadami powierzchniowymi) oraz przeprowadzona analiza statystyczna. Drugim w kolejności, istotnym, z uwagi na jednoznaczność wyników, parametrem jest prędkość skrawania. Powoduje ona zmniejszanie liczby wyrwań włókien i wykruszeń osnowy na powierzchni kompozytu CFRP.
6. Wykrycie wad powierzchniowych w kompozytach GFRP i CFRP możliwe jest za pomocą wykresów rekurencyjnych oraz wskaźników DET, L, ENTR, T_1 , T_2 , RPDE, CC i TRANS. W przypadku GFRP pole przekroju wady w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu posuwowego możliwej do wykrycia wady (większa niż głębokość skrawania a_p) powinno stanowić co najmniej 6% przekroju poprzecznego warstwy usuwanej, a w przypadku CFRP, co najmniej 7,5% przekroju warstwy usuwanej. Wykresy zależności wskaźników rekurencyjnych od średnic otworów pokazują, że wymiar wady sztucznej największy wpływ ma na $\min(\text{DET})$ i $\min(\text{L})$ (dla kompozytu GFRP i CFRP) oraz nieco mniejszy dla wskaźników $\min(\text{CC})$ i $\min(\text{TRANS})$ (dla kompozytu CFRP).
7. Wykrycie wad powierzchniowych w postaci otworów o różnej głębokości w kompozytach GFRP i CFRP możliwe jest za pomocą wykresów rekurencyjnych oraz wskaźników DET, L, ENTR, LAM, TT, T_1 , T_2 , RPDE, CC i TRANS. W przypadku GFRP wadę płytszą niż głębokość skrawania a_p można wykryć, gdy stanowi co najmniej 2,5% przekroju poprzecznego warstwy usuwanej, a w przypadku CFRP 7,5% przekroju warstwy usuwanej. Głębokość wady ma jednoznaczny wpływ na wskaźniki rekurencyjne. Dla obu rodzajów kompozytów, wraz ze wzrostem

głębokości wady minimalnej wartości wskaźników mają tendencję malejącą, a maksymalne wartości wskaźników mają tendencję rosnącą. W przypadku materiału CFRP wartości wskaźników maleją (dla wartości minimalnych) lub rosną (dla wartości maksymalnych) dla średnicy wady $\phi 2$ mm od głębokości 1,5 mm, dla $\phi 4$ mm od głębokości 1 mm, dla $\phi 6$ mm od głębokości 0,5 mm.

8. Poza wadami sztucznymi na powierzchni kompozytów polimerowych za pomocą metod rekurencyjnych wykryto wady produkcyjne.

Rezultaty praktyczne:

1. Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych mogą być pomocne w doborze parametrów technologicznych frezowania kompozytów polimerowych.
2. W większości przypadków obróbka frezowaniem może stanowić obróbkę wykończeniową elementów maszyn i urządzeń z kompozytów polimerowych.
3. Nie zaleca się stosowania dużych wartości posuwów oraz małych prędkości skrawania, gdyż powoduje to pogarszanie struktury geometrycznej powierzchni.
4. Istnieje możliwość wykorzystania wskaźników i wykresów rekurencyjnych do identyfikacji wad w kompozytach polimerowych.

Literatura

- [1] Adam H., *Carbon fibre in automotive applications*, „Materials and Design”, 1997, tom 18, nr 4/6, s. 349–355.
- [2] Arola D., Ramulu M., Wang D. H., *Chip formation in orthogonal trimming of graphite-epoxy composites*, „Composites: Part A”, 1996, nr 27A, s. 121–133.
- [3] Aymerich F., Staszewski W.J., *Impact damage detection in composite laminates using nonlinear acoustics*, „Composites: Part A”, 2010, nr 41, s. 1084–1092.
- [4] Azmi A. I., Lin R. J. T., Bhattacharyya D., *Machinability study of glass fibre reinforced polymer composites during end milling*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2013, tom 64, s. 247–261.
- [5] Benard Q., Fois M., Grisel M., *Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces*, „Applied Surface Science”, 2007, nr 253, s. 4753–4758.
- [6] Benardos P.G., Vosniakos G. C., *Predicting surface roughness in machining a review*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2003, nr 43, s. 833–844.
- [7] Bhatnagar N., Ramakrishnan N., Naik N. K., Komanduri R., *On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 1995, tom 35, nr 5 s. 701–716.
- [8] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., *Kompozyty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [9] Brandt Carsten, Maas P., *Recurrence Quantification Analysis for non-destructive evaluation with an application in aeronautic industry*, „19-th World Conference on Non-Destructive Testing”, 2016, s. 1–8.
- [10] Brinksmeier E., Fangmann S., Rentsch R., *Drilling of composites and resulting surface integrity*, „CIRP Annals, Manufacturing Technology”, 2011, nr 60, s. 57–60.
- [11] Caprino G., De Iorio I., Nele L., Santo L., *Effect of tool wear on cutting forces in the orthogonal cutting of unidirectional glass fibre-reinforced plastics*, „Composites: Part A”, 1996, nr 27A, s. 409–415.
- [12] Chung-Shin Chang, *Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools*, „Journal of Materials Processing Technology”, 2006, nr 180, s. 117–129.
- [13] Ciecieląg K., Kęcik K., Zaleski K., *Influence of defect diameter on its detection in milling process of composite material using recurrence plot technique*, „Composites Theory and Practice”, 2017, nr 17:4, s. 194–199.

- [14] Cieciela K., Kęcik K., Zaleski K., *Defects detection from time series of cutting force in composite milling process by recurrence analysis*, „Journal of Reinforced Plastics and Composites”, 2020, vol. 39 (23–24), s. 890–901.
- [15] Cieciela K., Kęcik K., Zaleski K., *Effect of depth surface defects in carbon fibre reinforced composite material on the selected recurrence quantifications*, „Advances in Material Science”, 2020, vol. 20, no. 2(64), s. 71–80.
- [16] Cieciela K., Zaleski K., *Comparative study in the passive force and cutting torque in the milling process of polymer matrix composites and aluminum alloys*, „Advances in Science and Technology – Research Journal”, 2013, tom 7, nr 18, s. 6–12.
- [17] Cieciela K., Zaleski K., *Cutting forces during milling of carbon fiber reinforced plastics using carbide tools*, [in:] „Material of scientific international technical conference of students, postgraduate and young scientists: Progressive directions and mechanical engineering, device building transportation industries and ecology”, Sevastopol, 2013, s. 158–159.
- [18] Cieciela K., Zaleski K., Kęcik K., *Wpływ parametrów frezowania na chropowatość powierzchni kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi i węglowymi*, „Mechanik”, 2019, nr 10, s. 649–651.
- [19] Colligan K., Ramulu M., *The effect of edge trimming on composite surface plies*, „Manufacturing Review”, 1992, tom 5, nr 4, s. 274–283.
- [20] Davim J. P., Rei P., *Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments*, „Journal of Materials Processing Technology”, 2005, nr 160, s. 160–167.
- [21] DeFu Liu, Yong Jun Tang, Cong W.L., *A review of mechanical drilling for composite laminates*, „Composite Structures”, 2012, nr 94, s. 1265–1279.
- [22] Dhieb H., Buijnsters J.G., Eddoumy F., Celis J.P., *Surface damage of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy composites under reciprocating sliding in ambient air*, „Composites Science and Technology”, 2011, nr 71, s. 1769–1776.
- [23] Eckmann J.P., Oliffson Kamphorst S., Ruelle D., *Recurrence Plots of dynamical systems*, „Europhysics Letters”, 1987, nr 4 (9), s. 973–977.
- [24] Fabretti A., Ausloos M.: *Recurrence plot and recurrence quantification analysis techniques for detecting a critical regime. examples from financial market indices*, „International Journal of Modern Physics C”, 2005, tom 16, s. 1–32.
- [25] *Encyklopedia Powszechna PWN*, Warszawa 1988, tom 5, s. 187.
- [26] Eneyew E. D., Ramulu M., *Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional GFRP composites*, „Journal of Materials Research and Technology”, 2014, nr 3(4), s. 354–362.

- [27] Eriksen E., *Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fibre reinforced thermoplastic*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 1999, nr 39, s. 1611–1618.
- [28] Fard M. Y., Sadat S. M., Raji B. B., Chattopadhyay A., *Damage characterization of surface and sub-surface defects in stitch-bonded biaxial carbon/epoxy composites*, „Composites: Part B”, 2014, nr 56, s. 821–829.
- [29] Fathi Y., Poonthanomsook Ch., *A Quartic Quality Loss Function and its Properties*, „Journal of Industrial and Systems Engineering”, 2007, tom 1, nr 1, s. 8–22.
- [30] Feih S., Boiocchi E., Mathys G., Mathys Z., Gibson A.G., Mouritz A.P., *Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres*, „Composites: Part B”, 2011, nr 42, s. 350–358.
- [31] Fejdyś M., Łandwijt M., *Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe*, „Techniczne Wyroby Włókiennicze”, 2010, s. 12–22.
- [32] Fernandes M., Cook Ch., *Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2006, nr 46, s. 70–75.
- [33] Fernandes M., Cook Ch., *Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part II empirical modeling of maximum thrust force*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2006, nr 46, s. 76–79.
- [34] Ferreira J. R., Coppini N. L., Miranda G. W. A., *Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials*, „Journal of Materials Processing Technology”, 1999, nr 92–93, s. 135–140.
- [35] Fitoussi J., Meraghni F., Jendli Z., Hug G., Baptiste D., *Experimental methodology for high strain-rates tensile behaviour analysis of polymer matrix composites*, „Composites Science and Technology”, 2005, nr 65, s. 2174–2188.
- [36] Foote J., Cooper M., *Visualizing musical structure and rhythm via self-similarity*, [w:] „Proceedings of the International Conference on Computer Music”, Havana, Cuba, 2001.
- [37] Fraser A. M., Swinney H. L., *Independent coordinates for strange attractors from mutual information*, „Physical Review A”, 1986, nr 33, s. 1134–1110.
- [38] Friswell M.I., Litak G. and Sawicki J.T., *Crack identification in rotating machines with active bearings*, [w:] „Proceedings of ISMA 2010 including USD”, 2010, s. 2843–2855.
- [39] Fotsing E. R., Ross A., Ruiz E., *Characterization of surface defects on composite sandwich materials based on deflectometry*, „NDT and E International”, 2014, nr 62, s. 29–39.

- [40] Gao J., Cai H. *On the structures and quantification of recurrence plots*, „Physics Letter A”, 2000, nr 270, s. 75–87.
- [41] Garcia-Ochoa E., Gonzalez-Sanchez J., Acuna N., Euan J., *Analysis of the dynamics of Intergranular corrosion process of sensitised 304 stainless steel using recurrence plots*, „Journal of Applied Electrochemistry”, 2009, nr 39, s. 637–645.
- [42] German J., *Materiały kompozytowe w budownictwie cz. I*, „Kalejdoskop Budowlany”, PWB Warszawa, 2000, nr 6, s. 14–17.
- [43] Ghidossi P., El Mansori M., Pierron F., *Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons*, „Composites: Part A”, 2004, nr 35, s. 989–999.
- [44] Gonzleza N. A., Ochoa E. G., Snchez J. G., *Assessment of the dynamics of corrosion fatigue crack initiation applying recurrence plots to the analysis of electrochemical noise data*, „International Journal of Fatigue”, 2008, nr 30 (7), s. 1211–1219.
- [45] Gordon S., Hillery M. T., *A review of the cutting of composite materials*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications”, 2003, nr 217, s. 35–45.
- [46] Grabowski T., *Zastosowanie metody recurrence plots w analizie danych pomiarowych*, „Elektrotechnika i Elektronika”, Kraków, 2006, tom 25, z. 2, s. 85–96.
- [47] Grzesik W., *Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn*, „Mechanik”, 2015, nr 8-9, s. 587–592.
- [48] Heslehursts Bentom R., *Defects and damage in composite materials and structures*, CRC Press, 2014.
- [49] Hintze W., Hartmann D., *Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP*, „Procedia CIRP”, 2013, nr 8, s. 444–449.
- [50] Hintze W., Hartmann D., Schutte Ch., *Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics*, „Composites Science and Technology”, 2011, nr 71, s. 1719–1726.
- [51] Hocheng H. , Puw H. Y., Huang Y., *Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics*, „Composites Manufacturing”, 1993, nr 4(2), s. 103–108.
- [52] Hosokawa A., Hirose N., Ueda T., Furumoto T., *High quality machining of CFRP with high helix end mill*, „CIRP Annals, Manufacturing Technology”, 2014, nr 63, s. 89–92.
- [53] Hu H., Wang B. T., Lee Ch. H., Su J. Sh., *Damage detection of surface cracks in composite laminates using modal analysis and strain energy method*, „Composite Structures”, 2006, nr 74, s. 399–405.
- [54] Hu N.S., Zhang L.C., *Some observations in grinding unidirectional carbon fibre reinforced plastics*, „Journal of Materials Processing Technology”, 2004, nr 152, s. 333–338.

- [55] Hussain S. A., Pandurangadu V., Kumar K. P., *Machinability of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials*, „International Journal of Engineering, Science and Technology”, 2011, tom 3, nr 4, s. 103–118.
- [56] Ilie C. O., Alexa O., Lespezeanu I., Marinescu M., Grosu D., *Recurrence plot analysis to study parameters of a gasoline engine*, „Applied Mechanics and Materials”, 2016, tom 823, s. 323–328.
- [57] Islam F., Ramkumar J., Milani A. S., *A simplified damage prediction framework for milling of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics*, „Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science”, 2015, nr 1:4, s. 175–184.
- [58] Iwaniec J., *Badanie determinizmu układów płytowych z zastosowaniem metody diagramów rekurencyjnych*, Modelowanie Inżynierskie, 2011, tom 11, nr 42, s. 163–170.
- [59] Iwaniec J., *Investigation of selected mechanical systems by recurrence plots method*, „International Journal of Structural Stability and Dynamics”, 2013, tom 13, nr 7, s. 1340008-1–1340008-10.
- [60] Iwaniec J., Iwaniec M., *Application of Recurrence-Based Methods to Heart Work Analysis*, [w:] *Advances in Technical Diagnostics*, 2016, s. 343–352.
- [61] Iwaniec J., Klepka A., Uhl T., *Recurrence plots and RQA analysis for damage detection in mechanical systems*, 2011, [w:] *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*, s. 2476–2482.
- [62] Iwaniec J., Kurowski P., *Experimental verification of selected methods sensitivity to damage size and location*, *Journal of Vibration and Control*, 2017, tom 23(7), s. 1133–1151.
- [63] Iwaniec J., Uhl T., Staszewski W. J., Klepka A., *Detection of changes in cracked aluminium plate determinism by recurrence analysis*, „Nonlinear Dynamics”, 2012, nr 70(1), s. 125–140.
- [64] Jin Ningde, Zheng Guibo, Dong Fang, Chen Wanpeng, *Application of chaotic recurrence plot analysis to identification of oil/water two-phase flow patterns*, [w:] „Fuzzy Systems and Knowledge Discovery”, 2006, s. 1213–1217.
- [65] Karpat Y., Bahtiyar O., Deger B., *Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2012, nr 56, s. 79–93.
- [66] Karpat Y., Bahtiyar O., Deger B., *Milling force modelling of multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates*, „Procedia CIRP 1”, 2012, s. 460–465.
- [67] Kennel M., Brown R., Abarbanel H., *Determining embedding dimension for phase space reconstruction using a geometrical construction*, „Physical Review A”, 1992, nr 45(6), s. 3403–3411.

- [68] Kęcik K., Borowiec M., Rusinek R., *Verification of the stability lobes of Inconel 718 milling by recurrence plot applications and composite multiscale entropy analysis*, „European Physical Journal Plus”, 2016, tom 131, nr 14, s.1–9.
- [69] Kęcik K., Ciecieląg K., Zaleski K., *Damage detection of composite milling process by recurrence plots and quantifications analysis*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2017, nr 89, s. 133–144.
- [70] Kęcik K., Ciecieląg K., Zaleski K., *Damage detection of composite milling process using recurrence plots technique*, [w:] „Conference Proceedings, VIII-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures”, Augustów, Poland, 2015, s. 111–117.
- [71] Kęcik K., Rusinek R., Warminski J., *Stability lobes analysis of nickel superalloys milling*, „International Journal of Bifurcation and Chaos”, tom 21, nr 10, 2011, s. 2943–2954.
- [72] Kęcik K., Rusinek R., Warminski J., Weremczuk A., *Chatter control in the milling process of composite materials*, „Journal of Physics: Conference Series”, 2012, tom 382, nr 1, s. 1–6.
- [73] Klocke F., König, W., Rummenholler, S., Wurtz, C., *Milling of Advanced Composites*, „Machining of Ceramics and Composites”, 1999, s. 249–265.
- [74] Koch I., Just G., Brod M., *Evaluation and modeling of the fatigue damage behavior of polymer composites at reversed cyclic loading*, „Materials”, 2019, nr 12, 1–22.
- [75] Komanduri R., *Machining fiber-reinforced composites*, „The Journal of Mechanical Engineering”, 1993, s. 58–64.
- [76] Korzyński M., *Metodyka eksperymentu*, Warszawa, WNT, 2006
- [77] Królczyk G., Legutko S., *The machinability of Duplex Stainless Steel – solutions in practice*, „Manufacturing Technology”, 2013, tom 13, nr 4, s. 473–478.
- [78] Królikowski W., *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [79] Lange H., Boese S., *Recurrence quantification and recurrence network analysis of global photosynthetic activity*, „Recurrence quantification analysis, theory and best practices”, 2015, s. 349–374.
- [80] Langella A., Nele L., Maio A., *A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials*, „Composites: Part A”, 2005, nr 36, s. 83–93.
- [81] Legutko S., Królczyk G., Królczyk J., *Quality evaluation of surface layer in highly accurate manufacturing*, „Manufacturing Technology”, 2014, tom 14, nr 1, s. 50–56.
- [82] Lin S.C., Chen I. K., *Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed*, „Wear”, 1996, nr 194, s. 156–162.

- [83] Litak G., Gajewski J., Syta A., Jonak J., *Quantitative estimation of the tool wear effects in a ripping head by recurrence plots*, „Journal of Theoretical and Applied Mechanics”, 2008, tom 46, nr 3, s. 521–530.
- [84] Litak G., Rusinek R., *Dynamics of a stainless steel turning process by statistical and recurrence analyses*, „Mechanica”, 2012, nr 47, s. 1517–1526.
- [85] Litak G., Sawicki J. T., Kasperek R., *Cracked rotor detection by recurrence plots*, „Nondestructive Testing and Evaluation”, 2009, tom 24, nr 4, s. 347–351.
- [86] Litak G., Syta A., Rusinek R., *Dynamical changes during composite milling: recurrence and multiscale entropy analysis*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2011, nr 56, s. 445–453.
- [87] Liu G. R., Lam K. Y., Shang H. M., *A new method for analysing wave fields in laminated composite plates: two-dimensional cases*, „Composites Engineering”, 1995, tom 5, nr 12, s. 1489–1498.
- [88] Longwic R., Litak G., Senc A. K., *Recurrence Plots for Diesel Engine Variability Tests*, „Zeitschrift für Naturforschung” 2009, nr 64a, s. 96–102.
- [89] Mahdi M., Zhang L., *A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials*, „Journal of Materials Processing Technology”, 2001, nr 113, s. 373–377.
- [90] Marwan N., Carmen Romano M., Thiel M., Kurths J., *Recurrence plots for the analysis of complex systems*, „Physics Reports”, 2007, nr 438, s. 237–329.
- [91] Marwan N., Donges J. F., Zou Y., Donner R. V., Kurths J., *Complex network approach for recurrence analysis of time series*, „Physics Letter A”, 2009, nr 373(46), s. 4246–4254.
- [92] Marwan N., Kurths J., *Nonlinear analysis of bivariate data with cross-recurrence plots*, „Physics Letter A”, 2002, nr 302, s. 299–307.
- [93] Marwan N., Kurths J., Foerster S., *Analysing spatially extended high-dimensional dynamics by recurrence plots*, „Physics Letters A”, 2014, nr 379, s. 894–900.
- [94] Marwan N., Wessel N., Meyerfeldt U., Schirdewan A., Kurths J., *Recurrence Plot Based Measures of Complexity and its Application to Heart Rate Variability Data*, „Physics Review E”, 2002, nr 66(2), s. 026702-1–026702-8.
- [95] Mayer, P., Pach, J., *Zastosowanie nowoczesnych kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi i szklanymi w motoryzacji*, „Przegląd Mechaniczny”, 2010, zeszyt 9, s. 30–34.
- [96] Mhalsekar S. D., Rao S. S., Gangadharan K. V., *Investigation on feasibility of recurrence quantification analysis for detecting flank wear in face milling*, „International Journal of Engineering Science and Technology”, 2010, tom 2, nr 5, s. 23–38.

- [97] Mkaddem A., Demirci I., El Mansori M., *A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis*, „Composites Science and Technology”, 2008, nr 68, s. 3123–3127.
- [98] Murphy C., Byrne G., Gilchrist M. D., *The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials*, *Journal of Engineering Manufacture*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”, 2002, tom 216, część B, s. 143–152.
- [99] Nichols J. M. , Trickey S. T., Seaver M., *Damage detection using multivariate recurrence quantification analysis*, „Mechanical Systems and Signal Processing”, 2006, nr 20, s. 421–437.
- [100] Oczos K. E., *Kompozyty włókniste-właściwości, zastosowanie obróbka*, „Mechanik”, 2008, 7, s. 579–592.
- [101] Ozimina D., Madej M., *Tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2010.
- [102] Packard N. H., Crutschfield J. P., Farmer J. D., Shaw R. S., *A brief introduction to nonlinear time series analysis and recurrence plots*, „Vibration”, 2019, nr 2, s. 332–368.
- [103] Palanikumar K., *Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites*, „Measurement”, 2011, nr 44, s. 2138–2148.
- [104] Palanikumar K., Karunamoorthy L., Karthikeyan R., *Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber reinforces polymer composites*, „Materials and Design”, 2006, nr 27, s. 862–871.
- [105] Palanikumar K., *Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology*, „Materials and Design”, 2007, nr 28, s. 2611–2618.
- [106] Park K. Y., Choi J. H. , Lee D. G., *Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics*, „The Journal of Composite Materials”, 1995, nr 29, s. 1988–2002.
- [107] Pecat O., Rentsch R., Brinksmeier E., *Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP*, „Procedia CIRP 1”, 2012, s. 466–470.
- [108] Pegoretti A., Zanolli A., Migliaresi C., *Preparation and tensile mechanical properties of unidirectional liquid crystalline single-polymer composites*, „Composites Science and Technology”, 2006, nr 66, s. 1970–1979.
- [109] Puw H. Y., Hocheng H., *Machinability test of carbon fiber reinforced plastics in milling*, „Materials and Manufacturing Processes”, 1993, nr 8(6), s. 717–729.
- [110] Rahman M., Ramakrishna S., Prakash J.R.S., Tan D.C.G., *Machinability study of carbon fiber reinforced composite*, „Journal of Materials Processing Technology”, 1999, nr 89–90, s. 292–297.

- [111] Ramkumar J., Aravindan S., Malhotra S. K., *An enhancement of the machining performance of GFRP by oscillatory assisted drilling*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2004, nr 23, s. 240–244.
- [112] Ramkumar J., Malhotra S. K., Krishnamurthy R., *Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates*, „Journal of Materials Processing Technology”, 2004, nr 152, s. 329–332.
- [113] Reis F. A., Giannini M., Lovadino J. R., Ambrosano G. M., *Effects of various finishing systems on the surface roughness and staining susceptibility of packable composite resins*, „Dental Materials”, 2003, nr 19, s. 13–18.
- [114] Rusinek R., Kęcik K., Warmiński J., *Analiza stabilności procesu frezowania stopu tytanu*, [w:] „Proceedings of SOS”, Łódź, 2010, s. 253–260.
- [115] Rusinek R., *Vibrations in cutting proces of titanium alloy*, „Maintenance and reliability”, 2010, nr 3, s. 48–55.
- [116] Rusinek R., Zaleski K., *Dynamics of thin-walled element milling expressed by recurrence analysis*, „Meccanica”, 2016, tom 51, s. 1275–1286.
- [117] Sahraie Jahromi A., Bahr B., *An analytical method for predicting cutting forces in orthogonal machining of unidirectional composites*, „Composites Science and Technology”, 2010, nr 70, s. 2290–2297.
- [118] Sakuma K., Seto M., *Tool wear in cutting glass fiber reinforced plastics*, „Bulletin of the JSME”, 1981, tom 24, nr 190, s. 748–755.
- [119] Sang-Ook An, Eun-Sang Lee, Sang-Lai Noh, *A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries*, „Journal of Materials Processing Technology”, 1997, nr 68, s. 60–67.
- [120] Saravanos D. A. Hopkins D. A., *Effects of delaminations on the damped dynamic characteristics of composite laminates: analysis and experiments*, Journal of Sound and Vibration, 1996, nr 192 (5), s. 977–993.
- [121] Sasahara H., Kikuma T., Koyasu R., Yao Y., *Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel*, „Precision Engineering”, 2014, nr 38, s. 775–782.
- [122] Selzer R., Friedrich K., *Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture*, „Composites Part A”, 1997, nr 28A, s. 595–604.
- [123] Seung Chul Lee, Seong Taek Jeong, Jong Nam Park, Sun Jin Kim, Gyu Jae Cho, *Study on drilling characteristics and mechanical properties of CFRP composites*, „Acta Mechanica Solida Sinica”, 2008, tom 21, nr 4, s. 364–368.
- [124] Shi, Z. Y., Cui, P. and Li, X., *A review on research progress of machining technologies of carbon fiber-reinforced polymer and aramid fiber-reinforced polymer*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C:

- Journal of Mechanical Engineering Science”, 2019, tom 233, nr 13, s. 4508–4520.
- [125] Sobczak R., Nitkiewicz Z., Koszkuł J., *Właściwości dynamiczne i struktura kompozytów polipropylenu z włóknem szklanym*, „Kompozyty”, 2004, nr 4, s. 369–373.
- [126] Stone R., K. Krishnamurthy K., *A neutral network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 1996, tom 36, nr 9, s. 985–1003.
- [127] Szymiczek M., *Ocena stopnia degradacji poliestrowo-szklanych kompozytów nawijanych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2016.
- [128] Tarfaoui M., Choukri S., Neme A., *Effect of fibre orientation on mechanical properties of the laminated polymer composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings*, „Composites Science and Technology”, 2008, no. 68, s. 477–482.
- [129] Teicher U., Rosenbaum T., Nestler A., Brosius A., *Characterization of the surface roughness of milled carbon fiber reinforced plastics structures*, „Procedia CIRP”, 2017, nr 66, s. 199–203.
- [130] Teti R., *Machining of composite materials*, University of Naples Federico II, Italy, 2002.
- [131] Theiler J., Eubank S., Longtin A., Galdrikian B., J. Farmer, *Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data*, „Physica D: Nonlinear Phenomena”, 1992, nr 58 (1), s. 77–94.
- [132] Thomasson N., Hoepfner T. J., Webber C. L. Jr, Zbilut J. P., *Recurrence quantification in epileptic EEGs*, „Physics Letters A”, 2001, nr 279, s. 94–101.
- [133] Tien-Cuong Nguyen, Yu Bai, Xiao-Ling Zhao, Riadh Al-Mahaidi, *Mechanical characterization of steel-CFRP double strap joints at elevated temperatures*, „Composite Structures”, 2011, nr 93, s. 1604–1612.
- [134] Tracy J.J., Pardo G.C., *Effect of delamination on the natural frequencies of composite laminates*, „Journal of Composite Materials”, 1989, tom 23, s. 1200–1215.
- [135] Twardowski P., Legutko S., Królczyk G. M., Hloch S., *Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling*, „Advances in Mechanical Engineering”, 2015, tom 7(6), s. 1–9.
- [136] Uhlmann E., Sammler F., Richarz S., Heitmüller F., Bilz M., *Machining of carbon fibre reinforced plastics*, „Procedia CIRP”, 2014, nr 24, s. 19–24.
- [137] Wang D. H., Ramulu M., Arola D., *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 1995, tom 35, nr 12, s. 1623–1638.

- [138] Wang X., Wang L.J., Tao J.P., *Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics*, „Journal of Materials Processing Technology”, 2004, nr 148, s. 239–244.
- [139] Warmiński J., Latański J., Rusinek R., Mitura A., Borowiec M., *Podstawy analizy sygnałów*, „Metody Komputerowe w Mechanice”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2015, s. 59–85
- [140] Webber C. L. Jr, Zbilut J. P., *Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies*, „Journal of Applied Physiology”, 1994, nr 76(2), s. 965–973.
- [141] Wei Song, Aijuan Gu, Guozheng Liang, Li Yuan, *Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites*, „Applied Surface Science”, 2011, nr 257, s. 4069–4074.
- [142] Wen Chou Chen, *Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 1997, tom 37, nr 8, s. 1097–1108.
- [143] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2003.
- [144] Wilczyński A. P., *Polimerowe kompozyty włókniste*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
- [145] Withers G.J., Yu Y., Khabashesku V.N, Cercone L., Hadjiev V.G., Souza J.M., Davis D.C., *Improved mechanical properties of an epoxy glass-fiber composite reinforced with surface organomodified nanoclays*, „Composites: Part B”, 2015, nr 72, s. 175–182.
- [146] Venu Gopala Rao G., Mahajan P., Bhatnagar N., *Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism*, „Composites Science and Technology”, 2007, nr 67, s. 2271–2281.
- [147] Venu Gopala Rao G., Mahajan P., Bhatnagar N., *Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – cutting force analysis*, „Composites Science and Technology”, 2007, nr 67, s. 579–593.
- [148] Vijaya Kini M., Chincholkar A.M. , *Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes*, „Materials and Design”, 2010, nr 31, s. 3590–3598.
- [149] Yang Dong, Ren Wei-Xen, Hu Yi-Ding, Li Dan, *Selection of optimal threshold to construct recurrence plot for structural operational vibration measurements*, „Journal of Sound and Vibration”, 1992, nr 349, s. 361–374.
- [150] Yingying Wei, Qinglong An, Xiaojiang Cai, Ming Chen and Weiwei Ming, *Influence of fiber orientation on single-point cutting fracture behavior of carbon-fiber/epoxy prepreg sheets*, „Materials”, 2015, nr 8, s. 6738–6751.
- [151] Zaleski K., Ciecieląg K., *Badania momentu skrawania i siły biernej w procesie frezowania kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami*

- węglowymi i aramidowymi, [w:] Świć A, Taranenko W. (red), „Innowacyjne procesy wytwórcze”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2013, s. 68–77.
- [152] Zaleski K., Ciecieląg K., *Research of the surface roughness of polymer matrix composites by spherical and end cutters milling*, [w:] Lipski J., Świć A., Bojanowska A. (red), „Informatics methods as tools to solve industrial problems”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2012, s. 51–63.
- [153] Zaleski K., Matuszak J., *Badania porównawcze wpływu parametrów technologicznych frezowania wybranych stopów tytanu na moment skrawania i chropowatość obrobionej powierzchni*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 295”, Mechanika nr 89, 4/2017, s. 563–572.
- [154] Zaleski K., Matuszak J., Zyśko A., *Badania wpływu podwyższonych prędkości skrawania w procesie frezowania stopu tytanu na moment skrawania i siłę bierną*, „Stal, Metale & Nowe Technologie”, 2018, nr 7–8, s. 16–20.
- [155] Zaleski K., Pałka T., *Wpływ geometrii ostrza na siły skrawania podczas frezowania stopów aluminium*, „Mechanik”, 2014, nr 8–9, s. 639–646.
- [156] Zaleski K., Skoczylas A., Ciecieląg K., *The investigations of the surface layer properties of c45 steel after plasma cutting and centrifugal shot peening*, [w:] Królczyk G. M., Niesłony P., Królczyk J. (red), „Industrial Measurements in Maching”, Wydawnictwo Springer, 2020, s. 172–185.
- [157] Zaleski K., Matuszak J., Zyśko A., *Highly efficient milling on the example of selected machining strategies*, „Advances in Science and Technology Research Journal”, 2020, tom 14, nr 1, s. 167–177.
- [158] Zbilut J. P., Webber C. L. Jr, *Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots*, „Physics Letters A”, 1992, nr 171, s. 199–203.
- [159] Zbilut J. P., Zaldivar-Comenges J. M., Strozzi F., *Recurrence quantification based Liapunov exponents for monitoring divergence in experimental data*, „Physics Letters A”, 2002, nr 297(3), s. 173–181.
- [160] Zhang L., Wang L., Wang X., *Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method*, „Composites: Part A”, 2003, nr 34, s. 237–244.
- [161] Zou Y., Tong L., Steven G. P., *Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures – a review*, „Journal of Sound and Vibration”, 2000, nr 230 (2), s. 357–378.
- [162] Żach P., *Materiały kompozytowe w zastosowaniach specjalnych maszyn*, „Tworzywa Sztuczne i Chemia”, 2005, nr 2.
- [163] <http://www.ecta-gmbh.de/polish/glasfaser.html>, 29.07.2018
- [164] <http://www.naukowiec.org/tablice/statystyka/rozklad-w-test-shapiro-wilka-335.html>, 22.05.2018

- [165] http://www.naukowiec.org/wzory/statystyka/test-shapiro-wilka_333.html, 22.05.2018
- [166] http://www.naukowiec.org/tablice/statystyka/wartosci--a_i-n--dla-testu-shapiro-wilka_338.html, 22.05.2018
- [167] <http://www.recurrence-plot.tk/rqa.php>, 15.05.2018
- [168] <http://www.wloknocyronowe.pl/wlokna.html>, 10.04.2018
- [169] <http://tocsy.pik-potsdam.de/CRPtoolbox>, 15.05.2018