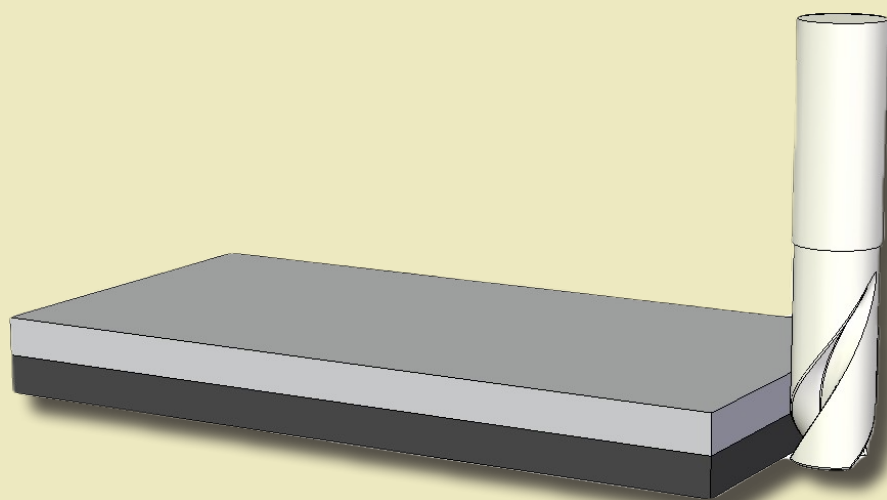




Elżbieta Doluk
Anna Rudawska

Analiza wybranych zagadnień obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych



M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Lublin 2022

Analiza wybranych zagadnień
obróbki hybrydowych konstrukcji
przekładkowych

Monografie – Politechnika Lubelska

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:
Agnieszka RZEPKA

Dyrektor CIN-T:
Dorota TKACZYK

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena CHOŁOJCZYK
Jarosław GAJDA
Anna KOŁTUNOWSKA
Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna DUDZIŃSKA
Małgorzata FRANUS
Arkadiusz GOLA
Paweł KARCZMAREK
Beata KOWALSKA
Anna KUCZMASZEWSKA
Jarosław LATAJSKI
Tomasz LIPECKI
Zbigniew ŁAGODOWSKI
Joanna PAWŁAT
Lucjan PAWŁOWSKI
Natalia PRZESMYCKA
Magdalena RZEMIENIAK
Mariusz ŚNIADKOWSKI

Przedstawiciele honorowi:

Zhihong CAO, Chiny
Miroslav GEJDOŠ, Słowacja
Karol HENSEL, Słowacja
Hrvoje KOZMAR, Chorwacja
Frantisek KRCMA, Czechy
Sergio Lujan MORA, Hiszpania
Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan
Sirgii PAWŁOW, Ukraina
Natalia SAVINA, Ukraina
Natia SHENGELIA, Gruzja
Daniele ZULLI, Włochy

Elżbieta Doluk
Anna Rudawska

Analiza wybranych zagadnień obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDAWNICTWO

Lublin 2022

Recenzeci:

prof. dr hab. inż. Józef Gawlik, Politechnika Krakowska

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

dr hab. Ewa Olewnik-Kruszkowska, prof. Uniwersytetu Mikołaja
Kopernika w Toruniu

Wydanie monografii zostało sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska –
Regionalna Inicjatywa Dokończenia ze środków Ministerstwa Nauki i
Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Monografia powstała na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Frezowanie
konstrukcji przekładkowej stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy”,
napisanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Anny Rudawskiej oraz dr inż. Pawła
Pieśko, która została obroniona w roku 2021 na Wydziale Mechanicznym
Politechniki Lubelskiej.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2022

ISBN: 978-83-7947-523-0

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

Druk: Soft Vision Mariusz Rajski
www.printone.pl

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

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych
samyach warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenie.....	7
Abstract	8
Wykaz najważniejszych oznaczeń.....	9
Wprowadzenie.....	13
1. Analiza stanu zagadnienia.....	15
1.1. Budowa konstrukcji przekładkowych	15
1.2. Podział konstrukcji przekładkowych.....	21
1.3. Materiały stosowane w konstrukcjach przekładkowych	23
1.3.1. Materiały stosowane na warstwy zewnętrzne	24
1.3.2. Materiały stosowane na rdzeń	37
1.4. Łączenie konstrukcji przekładkowych	41
1.5. Obróbka hybrydowych konstrukcji przekładkowych.....	47
1.6. Wnioski z analizy stanu zagadnienia	53
2. Metodyka badań.....	55
2.1. Dobór materiałów do badań	58
2.2. Klejenie materiałów	61
2.3. Model przedmiotu obrabianego	63
2.4. Dobór narzędzi i parametrów obróbki	64
2.5. Metodyka pomiarów analizowanych wielkości	68
2.6. Statystyczne opracowanie wyników	73
3. Badania wstępne.....	77
3.1. Badania uskoku.....	78
3.2. Wyznaczenie liczebności prób do badań uskoku.....	83
4. Badania zasadnicze	85
4.1. Badania uskoku.....	85
4.1.1. Uskok po frezowaniu konstrukcji II warstwowej	87
4.1.2. Uskok po frezowaniu konstrukcji III warstwowej.....	92
4.1.3. Wskaźnik jakości powierzchni	95
4.1.4. Podsumowanie badań uskoku	96
4.2. Badania chropowatości i topografii powierzchni	97
4.2.1. Chropowatość powierzchni konstrukcji II warstwowej.....	98
4.2.2. Topografia powierzchni	114
4.2.3. Ocena jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych za pomocą równomierności rozłożenia wady.....	120

4.2.4. Wskaźnik jednorodności powierzchni	122
4.2.5. Podsumowanie pomiarów chropowatości powierzchni	124
4.3. Siły skrawania	125
4.3.1. Siły skrawania podczas frezowania konstrukcji II warstwowej.....	126
4.3.2. Siły skrawania podczas frezowania próbek referencyjnych.....	128
4.3.3. Podsumowanie pomiarów składowych siły skrawania	130
5. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	133
5.1. Wnioski poznawcze	133
5.2. Wnioski uytylitarne	134
5.3. Charakterystyka kierunków dalszych badań	135
Literatura	137

Analiza wybranych zagadnień obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych.

Omówiono teoretyczne aspekty związane z budową, klasyfikacją i właściwościami kompozytów warstwowych. Scharakteryzowano problemy i trudności towarzyszące obróbce tego typu materiałów.

W części badawczej dokonano oceny wpływu parametrów skrawania, konfiguracji materiałów w trakcie obróbki i rodzaju narzędzia na jakość powierzchni po frezowaniu. Przedmiotem badań były II i III warstwowe konstrukcje typu stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy i stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy – stop aluminium. Jakość powierzchni została definiowana za pomocą uskoku tworzącego się na granicy warstw oraz chropowatości i topografii powierzchni. Analizie poddane zostały także składowe siły skrawania. Dokładność wykonania została oceniona również przez pryzmat jednorodności wady na powierzchni przedmiotu obrabianego. Na podstawie otrzymanych wyników zdefiniowano wskaźniki jakości dla konstrukcji przekładkowych.

W końcowej części monografii podsumowano uzyskane rezultaty oraz sformułowano wnioski końcowe.

Słowa kluczowe: frezowanie, konstrukcja przekładkowa, stop aluminium, kompozyt CFRP

Analysis of selected processing problems of hybrid sandwich structures

Abstract

The work presents the results of research on the processing of hybrid sandwich structures. The theoretical aspects related to the construction, classification and properties of sandwich panels are discussed. The problems and difficulties accompanying the machining of such materials are presented.

The research part evaluates the influence of cutting parameters, configuration of materials during machining and the type of tool on the quality of the surface after circumferential milling. The subjects of the research were II and III-layer sandwich structures consist of EN AW2024-T3 aluminum alloy and Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP).

The surface quality was defined by the material height deviation formed at the boundary of the layers, as well as surface roughness and surface topography. Cutting force components were also analyzed.

The surface quality of the workpiece was also evaluated by means of the uniformity of defect distribution. Based on the results, a surface quality coefficient (W_u) and a surface uniformity coefficient (W_R) were created. The proposed coefficients can be a tool for evaluating the surface quality of hybrid sandwich structures after milling process. The final part of the work summarizes the obtained results and formulates conclusions.

Keywords: circumferential milling, sandwich structure, aluminum alloy, Carbon Fiber Reinforced Plastic

Wykaz najważniejszych oznaczeń

- $6\sigma_U$ – kryterium 6σ dla uskoku,
- A – wydłużenie,
- a_e – szerokość skrawania,
- AFRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami aramidowymi
(ang. *Aramid Fiber Reinforced Plastic*),
- Al – stop aluminium EN AW-2024 w stanie T3,
- Al/CFRP – frezowanie konstrukcji II warstwowej rozpoczynając od stopu aluminium,
- Al/CFRP/Al – frezowanie konstrukcji III warstwowej,
- a_p – głębokość skrawania,
- CDC – powłoka krystalicznego diamentu (ang. *Crystalline Diamond Coating*),
- CFRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami węglowymi
(ang. *Carbon Fiber Reinforced Plastic*),
- CFRP/Al – frezowanie konstrukcji II warstwowej rozpoczynając od kompozytu epoksydowo-węglowego,
- CMC – kompozyt o osnowie ceramicznej (ang. *Ceramic Matrix Composite*),
- CVD – metoda chemicznego osadzania z fazy gazowej (ang. *Chemical Vapour Deposition*),
- d – średnica włókna,
- D_c – średnica części roboczej frezu,
- Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),
- DFC – powłoka filmu diamentowego (ang. *Diamond Film Coating*),
- DLC – powłoka diamentopodobna (ang. *Diamond-like Carbon*),
- E – moduł Younga,
- e_i – odchyłka graniczna dolna,
- e_s – odchyłka graniczna górna,
- F – statystyka testowa,
- FRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami (ang. *Fiber Reinforced Plastic*),
- F_x, F_y, F_z – składowe siły skrawania,
- f_z – posuw na ostrze,

- G – moduł Kirchhoffa,
- GFRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami szklanymi
(ang. *Glass Fiber Reinforced Plastic*),
- H – odległość dyszy tnącej od powierzchni przecinanej,
- HM – wysokomodułowe włókno węglowe
(ang. *High Modulus Carbon Fiber*),
- $h_{\max}$ – najmniejsza jednorodność powierzchni,
- $h_{\min}$ – największa jednorodność powierzchni,
- HS – wysokowytrzymałe włókno węglowe
(ang. *High Strength Carbon Fiber*),
- ILSS – pozorna wytrzymałość na ścinanie pomiędzy warstwami
kompozytu (ang. *Interlaminar Shear Strength*),
- k – moduł sprężystości przy zginaniu,
- $L_{\text{całk}}$ – długość całkowita frezu,
- l_{kr} – krytyczna długość włókna kompozytu,
- l_n – długość odcinka pomiarowego,
- l_r – długość odcinka elementarnego,
- L_s – długość części roboczej frezu,
- l_t – długość całkowita pomiaru chropowatości powierzchni,
- MMC – kompozyt o osnowie metalowej (ang. *Metal Matrix Composite*),
- MS – średnie kwadraty odchyleń (ang. *Mean Squares*),
- P – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*),
- P – ciśnienie strugi wodno-ściernej,
- PCD – polikrystaliczny diament (ang. *Polycrystalline Diamond*),
- PMC – kompozyt o osnowie polimerowej
(ang. *Polymer Matrix Composite*),
- ρ_s – gęstość materiału spienionego,
- PVD – powłoka fizycznego osadzania z fazy gazowej
(ang. *Physical Vapour Deposition*),
- Q – wydatek ścierniwa,
- $R_{0,2}$ – granica plastyczności,
- Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
- R_{eg} – wytrzymałość na zginanie,
- R_m – wytrzymałość na rozciąganie,
- Rmax – maksymalna wysokość profilu chropowatości,
- Rt – całkowita wysokość profilu chropowatości,
- R_t – wytrzymałość na ścinanie,
- Rz – największa wysokość profilu chropowatości,
- Sa – średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni,
- Sp – maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni,
- SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

- Sv – maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni,
- Sz – dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni,
- TiAlN – powłoka tytanowa z azotkiem aluminium,
- T_k – wytrzymałość wiązania między włóknem a osnową,
- T_w – tolerancja wykonania,
- U – uskok,
- U_{Al} – średnia wartość profilu powierzchni stopu aluminium,
- U_{CFRP} – średnia wartość profilu powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego,
- U_d – uskok dolny – uskok na powierzchni konstrukcji III warstwowej na granicy kompozyt polimerowy – metal,
- U_g – uskok górny – uskok na powierzchni konstrukcji III warstwowej na granicy metal – kompozyt polimerowy,
- UHM – ultrawysokomodułowe włókno węglowe
(ang. *Ultra High Modulus Carbon Fibre*),
- U_{max} – maksymalna wartość uskoku,
- v – liczba Poissona,
- v_c – prędkość skrawania,
- W_R – wskaźnik jednorodności powierzchni,
- W_U – wskaźnik jakości powierzchni,
- x₀ – punkt początkowy iteracyjnego przeszukiwania obszaru zmienności,
- x_{1,2,...,8} – sąsiedztwo obszaru zmienności,
- z – liczba ostrzy,
- Z – wytrzymałość zmęczeniowa,
- ZrN – azotek cyrkonu (ang. *Zirconium nitride*),
- γ – kąt natarcia,
- λ_s – kąt pochylenia krawędzi skrawającej frezu,
- η_p² – cząstkowa siła efektu,
- ρ – gęstość materiału.

Wprowadzenie

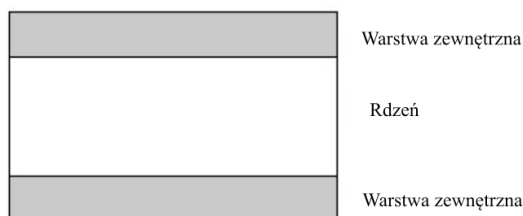
Stałe dążenie do stosowania lżejszych konstrukcji i szybszych środków transportu doprowadziło do dynamicznego rozwoju technologicznego. Rozpoczęto poszukiwanie nowych materiałów inżynierskich, które mogłyby sprostać stawianym im wymaganiom. Podjęto dążenia do opracowania konstrukcji, która cechowałaby się odpowiednimi właściwościami wytrzymałościowymi, a jednocześnie pozwalałaby na zmniejszenie masy konstrukcji. Jednym z takich materiałów są kompozyty warstwowe. Pierwsza oficjalna wzmianka o materiałach warstwowych pochodzi z Niemiec, gdzie w 1905 r. dokonano zgłoszenia patentowego rdzenia o strukturze plastra miodu [27, 102]. Pomysł zastosowania konstrukcji składającej się z kilku połączonych ze sobą warstw różnych materiałów znalazł zastosowanie podczas II wojny światowej do budowy samolotów wojennych. Pierwsze teoretyczne i eksperymentalne prace nad panelami typu sandwich zostały opublikowane pod koniec lat 40. XX wieku [92, 159]. Od tego czasu znaczenie tego typu materiałów stale rośnie. Stosowanie konstrukcji przekładkowych na skalę przemysłową było możliwe dzięki wprowadzeniu nowoczesnych technik łączenia materiałów (spawanie laserowe, spawanie hybrydowe, klejenie) oraz rozwoju inżynierii materiałowej pozwalającego na wytwarzanie nowych materiałów, dzięki czemu możliwe było uzyskanie lekkiej i sztywnej konstrukcji przy zachowaniu określonych właściwości wytrzymałościowych. Stosowanie paneli typu sandwich wprowadziło znaczne oszczędności, związanych z redukcją o 30–50% masy konstrukcji w porównaniu do klasycznych konstrukcji jednopowłokowych (przemysł stoczniowy) [57]. W Polsce do określania konstrukcji przekładkowych zwykle stosuje się pojęcia: panel typu sandwich, konstrukcja typu sandwich, konstrukcja warstwowa, przekładka, kompozyt warstwowy, materiał warstwowy [79]. W niniejszej pracy będą używane zamiennie wszystkie wymienione terminy.

Złożoność kompozytów warstwowych powoduje występowanie wielu trudności podczas ich obróbki. Przeprowadzony przegląd literatury skłania do podjęcia próby określenia warunków skrawania konstrukcji przekładkowych, w których można osiągać optymalne efekty ze względu na jakość powierzchni po obróbce definiowaną najmniejszymi wartościami uskoku i chropowatości powierzchni. W niniejszej pracy przedstawiono zatem analizę wybranych wskaźników jakości powierzchni hybrydowych konstrukcji przekładkowych typu metal – kompozyt polimerowy po frezowaniu.

1. Analiza stanu zagadnienia

1.1. Budowa konstrukcji przekładkowych

Konstrukcje przekładkowe są przykładem specjalnej grupy materiałów inżynierskich, które zyskują coraz większą popularność z uwagi na ich określone właściwości. Ich relatywnie mała masa sprawia, że znalazły one zastosowanie w wielu obszarach techniki. Konstrukcja typu *sandwich* składa się z dwóch podstawowych komponentów: cieńszej warstwy zewnętrznej (okładziny) wykonanej z materiału o większej sztywności i korzystniejszych właściwościach wytrzymałościowych oraz grubszej i lekkiej warstwy wewnętrznej (rdzenia) wykonanej z innego materiału (rys. 1.1). Tak połączone warstwy tworzą lekką, sztywną i wytrzymałą konstrukcję o bardziej pożądanym właściwościach wytrzymałościowych w porównaniu do analogicznych konstrukcji litych [3, 5].

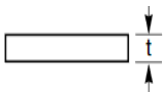
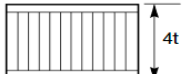


Rys. 1.1. Budowa typowej konstrukcji przekładkowej

Ideą materiału warstwowego jest założenie, że okładziny wykonywane są z materiałów o dużej wytrzymałości, a rdzeń z materiału o mniejszej sztywności. Wynika to z faktu, że okładziny przenoszą zwykle obciążenia zginające i ściskające, stąd wymaga się od nich dużej sztywności i wytrzymałości. Głównym zadaniem rdzenia jest przenoszenie obciążeń ścinających, co powoduje, że nie musi posiadać takich samych właściwości wytrzymałościowych jak okładki. Rdzeń ma stosunkowo małą gęstość, co zapewnia dużą wytrzymałość na zginanie oraz dużą sztywność w stosunku do ogólnej gęstości panelu. W związku z tym panele typu *sandwich* stosowane są zwykle jako konstrukcje przenoszące obciążenia zginające.

Kompozyty warstwowe zapewniają zmniejszenie poprzecznych deformacji konstrukcji oraz zwiększają jej odporność na wyboczenie [1, 152]. W tabeli 1.1 przedstawiono zmianę właściwości konstrukcji w zależności od grubości rdzenia, przyjmując założenie, że warstwy zewnętrzne stanowi materiał liniowo-sprężysty, a rdzeń wykonano z materiału jednorodnego.

Tabela 1.1. Porównanie wybranych właściwości konstrukcji o różnych grubościach rdzenia, t – grubość konstrukcji [55]

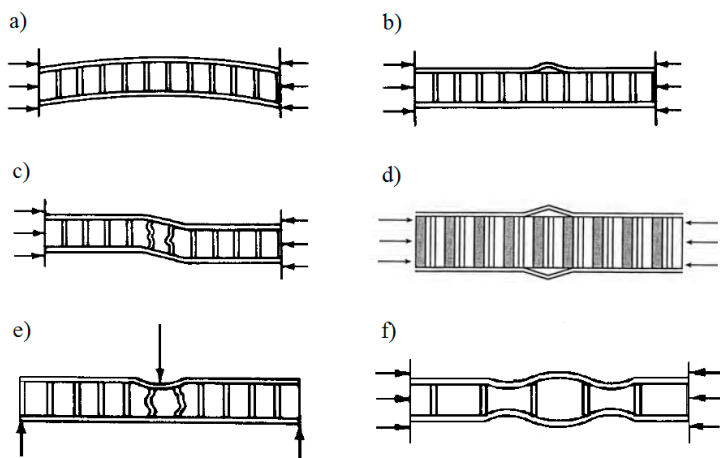
Parametr	Rodzaj konstrukcji		
	Konstrukcja lita	Konstrukcja przekładkowa	Konstrukcja przekładkowa o zwiększonej grubości rdzenia
			
Sztywność	1,00	7,00	37,00
Wytrzymałość na zginanie R_m	1,00	3,50	9,20
Masa	1,00	1,03	1,03

Wprowadzenie dodatkowego usztywnienia w postaci rdzenia w istotny sposób wpływa na zwiększenie wytrzymałości materiału warstwowego bez znacznego zwiększenia jej masy. Zwiększenie grubości rdzenia powoduje zwiększenie sztywności i wytrzymałości na zginanie konstrukcji przekładkowej. Właściwości konstrukcji przekładkowych, a więc również ich zalety i wady, zależą od właściwości materiałów tworzących przekładkę i elementów łączących. Projektując panele typu *sandwich* należy przestrzegać wielu zaleceń konstrukcyjnych, wśród których wyróżnić można [30, 94]:

- zachowanie odpowiedniej grubości okładzin pozwalającej na przenoszenie naprężeń rozciągających i ściskających,
- rdzeń powinien posiadać odpowiednią wytrzymałość zapewniającą przenoszenie naprężeń ścinających,
- w przypadku łączenia adhezyjnego warstw, klej powinien zapewniać przenoszenie naprężeń ścinających w kierunku rdzenia,

- rdzeń powinien posiadać odpowiednią grubość i odpowiedni moduł ścinania, aby zapobiec globalnemu wyboczeniu panelu,
- wartość modułu na ściskanie warstw zewnętrznych powinna być dobrana tak, aby zapobiegać występowaniu zjawiska *wrinklingu*, czyli marszczenia się okładek,
- w przypadku rdzeni siatkowych, ich komórki powinny być wystarczająco małe, aby nie doprowadzić do wgłębiania okładek pod wpływem działania obciążeń,
- rdzeń powinien posiadać wystarczającą wytrzymałość na ściskanie, aby zapobiec kruszeniu powodowanym przez naprężenia działające w kierunku normalnym do powierzchni okładek, bądź przez naprężenia ściskające wywołane przez zginanie,
- konstrukcja powinna posiadać wystarczającą elastyczność i sztywność na ścinanie, aby zapobiegać powstawaniu odkształceń.

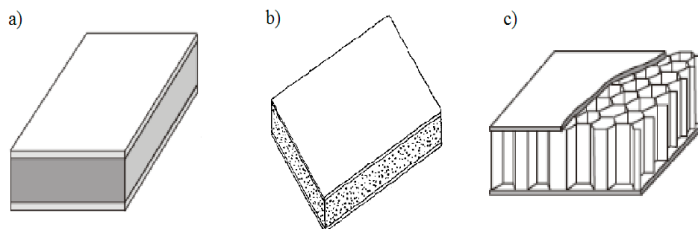
Do zalet kompozytów warstwowych zaliczyć można przede wszystkim dużą wytrzymałość i sztywność konstrukcji przy relatywnie małej masie, które wpływają na mniejsze zużycie paliwa, wzrost ładowności, osiąganie większych zasięgów, co jest bardzo istotne zwłaszcza w przemyśle lotniczym. Możliwość zredukowania, bądź zminimalizowania liczby elementów usztywniających dla wielkogabarytowych konstrukcji budowlanych jest również zaliczana do zalet kompozytów warstwowych [25, 30]. W zależności od materiałów, z których zostały utworzone, przekładki mogą również wykazywać odporność na korozję oraz silne działanie czynników zewnętrznych, takich jak woda morska (przemysł stoczniowy), promieniowanie UV czy podwyższona temperatura (przemysł budowlany) [52, 54, 88]. Zaletą konstrukcji typu *sandwich* może być również zdolność do pochłaniania energii i duża wytrzymałość na uderzenia, która ma szczególne znaczenie w przemyśle motoryzacyjnym. Dodatkowo konstrukcje te mogą charakteryzować się dobrą izolacją akustyczną i termiczną, dobrą szczelnością oraz długą żywotnością przy małych kosztach utrzymania [96, 150, 160, 165]. Do wad konstrukcji warstwowych zaliczyć należy przede wszystkim anizotropię i niejednorodność konstrukcji. Ponadto łączenie takich konstrukcji wiąże się z dużą pracochłonnością, a panele typu *sandwich* zaliczane są do materiałów trudnoobrabialnych. Kolejną negatywną cechą jest możliwość występowania różnorodnych form zniszczenia konstrukcji typu *sandwich* (rys. 1.2): globalnego wyboczenia konstrukcji, zjawiska marszczenia okładek, ścinania rdzenia, delaminacji z wyboczeniem warstw zewnętrznych, lokalnych wgłębień powierzchni lub wyboczenia pojedynczej komórki (rdzenie siatkowe). Wadą jest również małe doświadczenie produkcyjne w porównaniu do innych znanych materiałów inżynierskich [52, 98, 131, 165].



Rys. 1.2. Najczęstsze formy zniszczenia konstrukcji przekładkowych: a) globalne wyboczenie, b) marszczenie okładek, c) ścinanie rdzenia, d) delaminacja z wyboczeniem warstw zewnętrznych, e) lokalne wgłębienie, f) wyboczenie komórki rdzenia siatkowego [97, 98, 121]

Kompozyty warstwowe są zwykle projektowane z jednakowych okładzin (pod względem grubości i zastosowanych materiałów) i wówczas określa się je jako symetryczne panele typu *sandwich*. Panele symetryczne cechują się dużą odpornością na zginanie. W przypadku, gdy warstwy zewnętrzne różnią się grubością i zastosowanymi materiałami, określa się je jako asymetryczne konstrukcje przekładkowe [123]. Wybór konfiguracji konstrukcji zależy w głównej mierze od pożądanej nośności, zastosowanych obciążeń, możliwych do poniesienia kosztów czy warunków eksploatacyjnych [1, 152].

Rdzeń pełni bardzo ważną rolę w konstrukcji typu *sandwich*. Pozwala on osiągnąć pożądaną sztywność konstrukcji, poprawia jej właściwości tłumiące, oddziela warstwy zewnętrzne, zapewnia stały odstęp pomiędzy okładzinami, dzięki czemu utrzymana jest odpowiednia wytrzymałość i sztywność konstrukcji. Jego właściwości są uwarunkowane grubością oraz rodzajem materiału, z którego został wykonany [52, 91, 123]. Na rysunku 1.3 przedstawiono trzy podstawowe grupy rdzeni używanych w konstrukcjach przekładkowych.



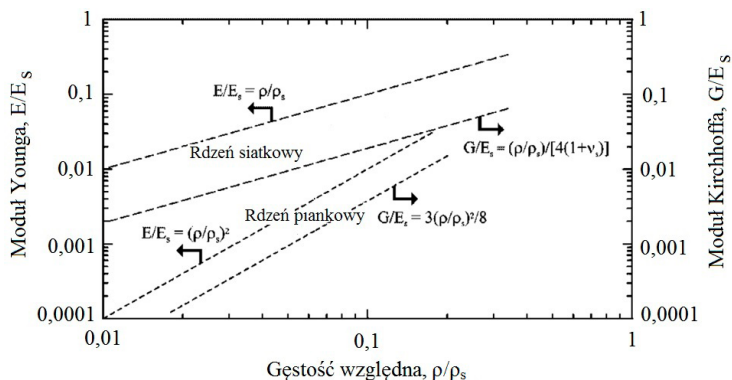
Rys. 1.3. Rodzaje rdzeni konstrukcji przekładkowych: a) rdzeń jednorodny, b) rdzeń niejednorodny, c) rdzeń siatkowy [57, 121]

Rdzenie jednorodne (rys.1. 3.a) to materiały izotropowe, które charakteryzują się stosunkowo łatwą obróbką, co umożliwia wykonywanie bardziej skomplikowanych kształtów niż w przypadku rdzeni siatkowych czy niejednorodnych [88]. Rdzenie jednorodne stanowią zwykle materiały w postaci płyt wytwarzanych w osobnym procesie niż materiały okładek. Stosowanie rdzeni jednorodnych wymaga wówczas odpowiedniego dopasowania kształtu i wymiarów materiałów tworzących konstrukcję przekładkową, ich wzajemnego zorientowania i ustalenia oraz wykonania odpowiedniego połączenia. Rdzenie jednorodne mogą być również bezpośrednio formowane we wnęce utworzonej przez krawędzie warstw zewnętrznych [30].

Rdzenie niejednorodne to grupa wypełniaczy w postaci pianek (rys. 1.3.b). Posiadają one inne właściwości wytrzymałościowe niż rdzenie jednorodne i siatkowe, ale są tańsze, lżejsze z uwagi na ich dużą porowatość, cechują się dużą izolacją cieplną i akustyczną oraz są łatwiejsze do łączenia. Charakteryzują się one jednorodną zależnością między obciążeniem a odkształceniem. Właściwości mechaniczne rdzeni niejednorodnych są silnie związane z gęstością tworzywa, z którego zostały wytworzone – moduł Kirchhoffa dla rdzeni piankowych wzrasta liniowo wraz ze wzrostem gęstości użytego materiału. Rdzenie porowate powstają w wyniku połączenia dwóch płynnych komponentów z substancjami aktywującymi. Podczas mieszania składników zachodzi reakcja chemiczna, na skutek której następuje spienianie powstającego polimeru oraz ostateczne jego utwardzenie. Etap spieniania pozwala na wytworzenie odpowiedniego wiązania oraz silnej adhezji rdzenia do powierzchni okładek. Lekkie rdzenie w postaci pianek są najczęściej wytwarzane w wysokociśnieniowym procesie spieniania. Jednym ze sposobów jest zastosowanie zamkniętej matrycy o kształcie i wymiarach wytwarzanego panelu typu *sandwich*. Dolna warstwa okładzin panelu znajduje się na dnie formy, górna zaś jest umieszczona na wsporniku. Proces polega na rozpyleniu piany o określonym składzie za pomocą dyszy od strony bocznej matrycy, aż do wypełnienia przestrzeni ograniczonej wielkością formy i okładkami. Rozpylanie trwa kilka sekund, jednak panel pozostaje w matrycy przez około 40 minut w celu utwardzenia się piany i połączenia warstw konstrukcji. Zaletą tego rozwiązania

jest możliwość otrzymania konstrukcji przekładkowej o skomplikowanym kształcie, który uzależniony jest tylko od geometrii matrycy. Niewątpliwą wadą jest czasochłonność procesu [16, 50, 98, 153]. Zwiększenie efektywności możliwe jest przez zastosowanie automatycznych linii produkcyjnych do wytwarzania paneli typu *sandwich*, których długość może wynosić nawet 30 m. Idea procesu jest dokładnie taka sama jak w przypadku formowania w matrycach, różnicą jest wprowadzenie dodatkowo przenośnika pełniącego funkcję matrycy. Okładki w postaci cienkich arkuszy metalu nawiniętych na zwoje są transportowane przez przenośnik i formowane przez rolki na pożądany kształt. Następnie są one podgrzewane do temperatury odpowiedniej dla danego metalu w celu umożliwienia wystąpienia odpowiednio silnej reakcji chemicznej podczas spieniania. Arkusze są transportowane za pomocą przenośnika, który zapewnia wymaganą odległość między warstwami zewnętrznymi. Do matrycy wprowadza się pianę, która pod działaniem ciśnienia łączy się z materiałem okładek. Ostatnim etapem jest chłodzenie i cięcie panelu na pożądaną długość [30, 162].

Rdzenie siatkowe (komórkowe) stosowane są w konstrukcjach najbardziej narażonych na obciążenia, ponieważ cechują się najlepszym spośród wszystkich rodzajów rdzeni stosunkiem gęstości względnej do sztywności i wytrzymałości [2]. Ponadto posiadają duże współczynniki tłumienia, absorpcji energii, dźwięku i drgań [3]. Wymagają jednak zapewnienia odpowiedniego przylegania i połączenia z okładzinami. Ponadto cechują się dużą anizotropią powodującą trudności w wykonywaniu skomplikowanych kształtów. Najczęściej używanym rdzeniem siatkowym jest rdzeń w postaci plastra miodu (ang. *honeycomb*), który składa się z dwóch cienkich warstw oddzielonych wypełniaczem, najczęściej o sześciokątnym, czworokątnym lub trójkątnym kształcie komórek (rys. 1.3.c) [38]. Zaletą rdzenia w postaci plastra miodu, oprócz cech charakterystycznych dla rdzeni siatkowych, jest możliwość stosowania szerokiego zakresu materiałów. Te i inne zalety spowodowały, że rdzenie o strukturze plastra miodu stosuje się w wielu gałęziach przemysłu, między innymi w lotnictwie (panele wewnętrzne, łopatkę śmigieł), transporcie kolejowym (drzwi wagonów, podłogi), przemyśle samochodowym (zderzaki, błotniki) oraz w przemyśle meblarskim. Jedną z barier stosowania tego typu rdzeni jest ich wysoka cena [65, 142]. Na rysunku 1.4 przedstawione zostały różnice we właściwościach rdzenia wykonanego z pianki i sześcienniej struktury plastra miodu.

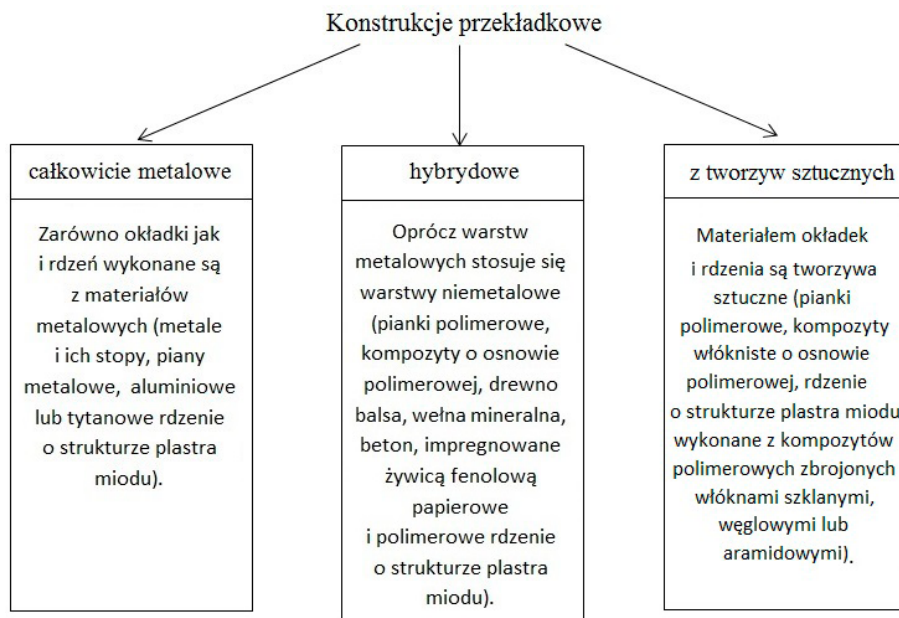


Rys. 1.4. Porównanie właściwości wytrzymałościowych rdzeni niejednorodnych z rdzeniami o strukturze plastra miodu [140]

Symbole E , G i ρ odnoszą się, odpowiednio, do modułu Younga, modułu Kirchhoffa i gęstości materiałów. W przypadku rdzeni piankowych moduł Younga i gęstość oznaczono odpowiednio jako E_s i ρ_s . Zależność gęstości względnej ρ/ρ_s służy do określenia zawartości materiału stałego w rdzeniu. Porowatość struktury wyrażona została jako zależność $1\rho/\rho_s$ [140]. Rdzenie komórkowe cechują się znacznie większą wartością modułu Younga niż rdzenie niejednorodne. Ponadto rdzenie porowate cechują się mniejszą wartością modułu sprężystości niż rdzenie o strukturze plastra miodu przy małej wartości gęstości względnej. Podobny wniosek można sformułować porównując granicę plastyczności obu rdzeni. Różnice te wpływają w znaczny sposób na właściwości rdzeni, a tym samym na ich zastosowanie [7].

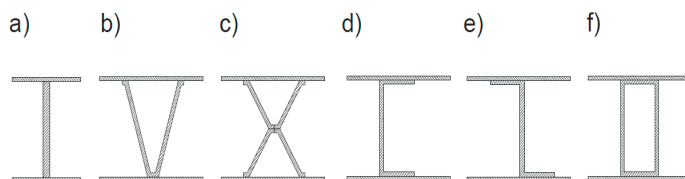
1.2. Podział konstrukcji przekładkowych

Konstrukcje przekładkowe, obok laminatów, zaliczane są do grupy materiałów określanej jako kompozyty warstwowe. W zależności od przeznaczenia, różnią się użytymi materiałami, geometrią i rodzajem usztywnienia oraz sposobem łączenia warstw. Ze względu na rodzaj materiałów tworzących przekładkę można podzielić je na konstrukcje całkowicie metalowe, konstrukcje hybrydowe oraz konstrukcje wykonane z tworzyw sztucznych [128]. Na rysunku 1.5 zaprezentowano schematyczny podział konstrukcji przekładkowych.



Rys. 1.5. Podział konstrukcji przekładkowych w zależności od materiałów tworzących konstrukcję [128, 150]

Całkowicie metalowe panele typu *sandwich* wykonywane są ze spawalnych gatunków stali, stopów aluminium i stopów tytanu. Warstwy łączy się za pomocą spawania, klejenia lub połączeń mechanicznych. Do standardowych paneli metalowych zalicza się typ I-core, V-core, X-core, C-core, Z-core i O-core (rys. 1.6). Różnią się one kształtem usztywnienia oraz przeznaczeniem, dla którego zostały zaprojektowane.



Rys. 1.6. Rodzaje usztywnień konstrukcji przekładkowych: a) I-core, b) V-core, c) X-core, d) C-core, e) Z-core, f) O-core [100]

Hybrydowe panele typu *sandwich* mogą występować w dwóch konfiguracjach:

- metalowe okładki i niemetalowy rdzeń,
- niemetalowe okładki i metalowy rdzeń.

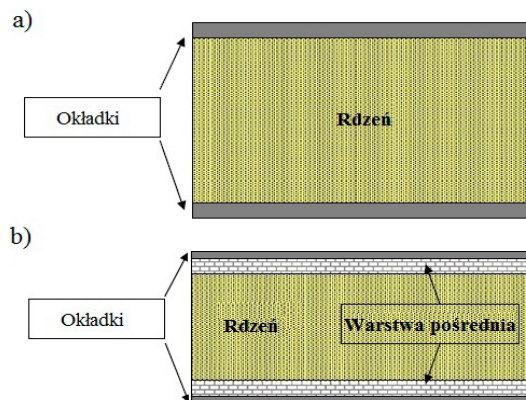
W porównaniu z całkowicie metalowymi panelami typu *sandwich*, konstrukcje hybrydowe nie wpływają w sposób znaczący na zmniejszenie masy konstrukcji, jednak poprawiają jej właściwości wytrzymałościowe i izolacyjne, zwiększają zdolność do pochłaniania energii oraz odporność na uderzenia.

Konstrukcje przekładkowe wykonane z tworzyw sztucznych w porównaniu do stali i stopów aluminium cechują się mniejszą masą, większą odpornością na korozję, dużą wytrzymałością zmęczeniową, zdolnością absorpcji energii oraz możliwością wykonywania różnych kształtów i rozmiarów. Do ich wad zaliczyć można anizotropowość konstrukcji, znaczny koszt pre-pregu oraz utrudniony recykling [100, 128].

1.3. Materiały stosowane w konstrukcjach przekładkowych

Zaprojektowanie i wytworzenie konstrukcji przekładkowej wymaga pokonania kilku trudności. Pierwszą z nich jest dobranie odpowiednich materiałów tworzących kompozyt warstwowy. Materiały, z których zostały wykonane poszczególne warstwy mają istotny wpływ na właściwości i zastosowanie panelu typu *sandwich*. Są one dobierane w oparciu o pożądane właściwości konstrukcji, możliwe do poniesienia koszty, masę konstrukcji oraz jej przeznaczenie. Warunkiem poprawnego funkcjonowania konstrukcji przekładkowej jest zapewnienie odpowiedniej przyczepności między materiałami warstw przekładki [30].

Różne właściwości materiałów tworzących konstrukcję przekładkową, ich anizotropia oraz nieliniowość znacznie utrudniają projektowanie tego typu materiałów. Jednym z aspektów, który należy brać pod uwagę jest odporność na uderzenia [157]. Materiały warstwowe są z reguły mało odporne na uderzenia. Spowodowane jest to oddzielaniem się warstw konstrukcji w wyniku występowania znacznych odkształceń między elastycznym rdzeniem a sztywniejszym materiałem okładek (ang. *debonding*). Ponadto panele typu *sandwich* powinny wykazywać odporność na działanie czynników chemicznych i oddziaływanie środowiska atmosferycznego oraz posiadać walory estetyczne dopasowane do ich zastosowania. Bardzo istotna jest również wytrzymałość zmęczeniowa materiałów poszczególnych warstw panelu. Najbardziej wrażliwym elementem jest materiał rdzenia oraz klej w przypadku konstrukcji łączonych adhezyjnie. Wśród rdzeni najbardziej wrażliwe pod tym względem są rdzenie piankowe, których wytrzymałość zmęczeniowa może zmniejszać się nawet o 50% po przepracowaniu stu lub większej liczby cykli. Aby przedłużyć żywotność rdzeni porowatych maksymalnie zmniejsza się ich obciążenie lub wprowadza się do konstrukcji dodatkową warstwę pośrednią [91]. Rozwiązanie to, przedstawione na rysunku 1.7, umożliwia stosowanie bardzo cienkich okładek i tańszych materiałów do formowania rdzenia konstrukcji kosztem niewielkiego zwiększenia jej masy.



Rys. 1.7. Porównanie budowy dwóch koncepcji konstrukcji przekładkowej: a) klasycznej, b) z warstwą pośrednią [91]

Warstwa pośrednia powinna być wykonana z lekkiego, sztywniejszego od rdzenia materiału, o grubości większej niż grubość warstw zewnętrznych. Jako warstwy dodatkowe najczęściej stosuje się kompozyty szklane, kompozyty węglowe, a także sklejkę. Naniesienie grubszej warstwy kleju o odpowiednich właściwościach w przypadku łączenia adhezyjnego może również stanowić warstwę pośrednią [30, 91].

1.3.1. Materiały stosowane na warstwy zewnętrzne

Okładki konstrukcji przekładkowych są wykonywane z różnych materiałów, które mogą być izotropowe lub anizotropowe [22]. Okładki wykonuje się z wytrzymałych materiałów, które zwykle występują w formie cienkich warstw. Materiały warstw zewnętrznych dobiera się tak, aby zapewniały dużą wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie oraz były odporne na warunki eksploatacji [146]. Materiały te powinny spełniać wiele wymagań. Przede wszystkim powinny zapewniać odpowiednią nośność oraz być podatne na obróbkę. Powinny posiadać także wszelkie cechy umożliwiające prawidłową eksploatację zgodnie z ich przeznaczeniem, tj. zapewniać szczelność, ochronę przed korozją, ogniem czy agresywnym środowiskiem wody morskiej. Oczywiście nie wszystkie warunki muszą być spełnione jednocześnie przez każdą konstrukcję przekładkową. Wymagania stawiane materiałom okładek zależą od zastosowania całej konstrukcji [157].

Z uwagi na fakt, że nośność materiału warstwowego jest zwykle określana przez możliwe formy zniszczenia paneli, granica plastyczności materiałów stanowiących okładziny nie jest czynnikiem determinującym wybór materiału. Jednak w przypadku okładek profilowanych i konstrukcji szczególnie narażonych na zniszczenia, wymaga się stosowania materiałów o większej granicy plastyczności. Odporność na korozję jest również bardzo ważnym aspektem. Istnieje kilka sposobów realizacji tego założenia, lecz żaden z nich nie zabezpiecza przed wszystkimi czynnikami atmosferycznymi, dlatego tak ważny jest dobór materiału zgodnie z zastosowaniem konstrukcji typu *sandwich*. Jednym ze sposobów zapewnienia ochrony antykorozyjnej jest stosowanie dodatkowych powłok. Warstwy ochronne mogą być metalowe (cynkowe, cynkowo-aluminiowe) lub organiczne. Jako powłoki z tworzyw polimerowych zwykle stosuje się poli(chlorek winylu), poli(fluorek winylidenu), poliester, rzadziej silikon i akryl [22, 30].

Warstwy zewnętrzne konstrukcji przekładkowych mogą być wykonywane z metali lub z tworzyw polimerowych. Okładziny metalowe występują zazwyczaj w postaci cienkich arkuszy i cechują się dużą sztywnością i wytrzymałością, odpornością na uderzenia, możliwością uzyskania powierzchni o małych parametrach chropowatości oraz relatywnie małym kosztem. Spośród okładzin metalowych najczęściej używa się stali (niskowęglowe, nierdzewne), stopy miedzi, stopy tytanu oraz stopy aluminium, w szczególności: EN AW-2024, EN AW-5052, EN AW-6061, EN AW-7075 [30, 38, 166].

Okładki stalowe są jednym z najczęściej używanych materiałów na warstwy zewnętrzne. Występują one zwykle w postaci cienkich arkuszy metalu nawiniętego na rolki. Zaleca się, aby grubość stalowych okładzin wynosiła od 0,5 mm do 1,5 mm, jednak uzależnione jest to od przeznaczenia przekładki [30].

Stal nierdzewna może być również stosowana jako materiał do formowania okładzin. Zwykle w tym celu stosuje się stal austenityczną z 18% zawartością chromu i około 8% zawartością niklu, które zapewniają przekładce odporność na korozję [30].

Aluminium to jeden z trzech najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków skorupy ziemskiej, stanowiący ok. 8,1% jej masy. Uzyskuje się go w procesie elektrolizy tlenku glinu otrzymywanego z rud boksytów [39]. W tabeli 1.2 przedstawiono podstawowe informacje charakteryzujące ten pierwiastek.

Tabela 1.2. Charakterystyka czystego aluminium [39]

Liczba atomowa	13
Masa atomowa	26,98
Układ krystalograficzny	RŚC {A1}
Wytrzymałość na rozciąganie	90–120 MPa
Gęstość względna	2,70 g/cm ³
Temperatura topnienia	660,52°C
Temperatura wrzenia	2467°C
Przewodność elektryczna w temperaturze 20°C	38 MS/m
Przewodność cieplna w temperaturze 0°C	237 W/mK

Aluminium zaliczane jest do metali lekkich, o dużej plastyczności i bardzo dobrej przewodności prądu elektrycznego. Posiada również bardzo dobrą kowalność, łatwo się odlewa i obrabia. Pierwiastek ten jest odporny na korozję i łatwo się utlenia. Posiada małą wytrzymałość na rozciąganie. Aluminium i jego stopy znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, szczególnie w przemyśle samochodowym, stoczniowym, lotniczym oraz w budownictwie. Ze względu na gorsze właściwości mechaniczne, aluminium w czystej postaci używane jest do produkcji przewodów elektrycznych, luster, folii, farb czy proszków. Wprowadzenie odpowiednich dodatków stopowych umożliwia poprawę właściwości tego materiału.

Aluminium i jego stopy dzielą się na:

- czyste aluminium – zawartość aluminium wynosi od 99,00 do 99,99%,
- stopy aluminium do obróbki plastycznej – stopy, które po nagrzeniu wykazują się jednofazową strukturą roztworu stałego, przez co są bardzo plastyczne,
- odlewnicze stopy aluminium – zawartość dodatków stopowych jest większa niż ich graniczna rozpuszczalność w aluminium, przez co nadają się tylko do odlewania.

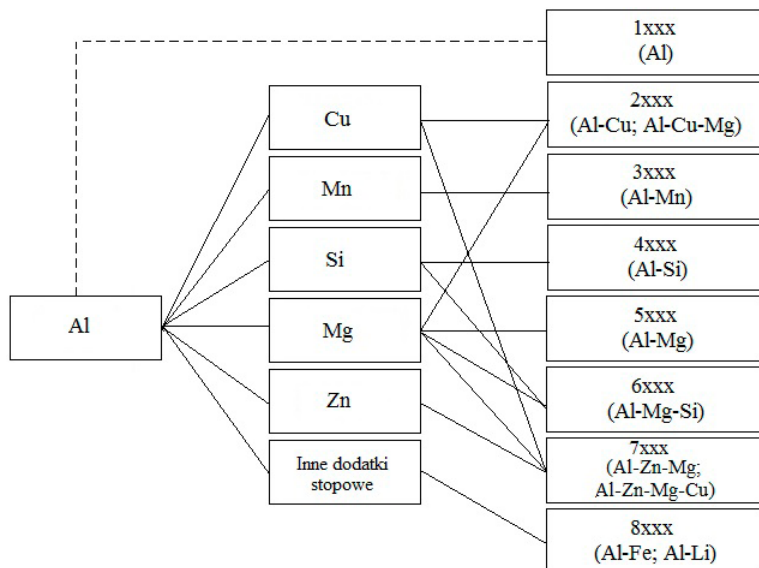
W tabeli 1.3 zamieszczono podział stopów aluminium ze względu na zawartość głównych składników stopowych wraz z przypisanymi kodami oraz ich ogólną charakterystyką [39].

Tabela 1.3. Podział stopów aluminium ze względu na skład chemiczny [39, 102]

Seria	Główny pierwiastek stopowy	Ogólna charakterystyka stopów
1XXX	Czyste aluminium (min. 9,00% Al)	Bardzo duża plastyczność, kowalność, mała wytrzymałość. Zastosowanie: puszki, folie, lustra, przewody elektryczne.
2XXX	Miedź	Duża wytrzymałość i twardość, mniejsza odporność na korozję, słaba spawalność. Zastosowanie: części maszyn przemysłowych, przemysł lotniczy.
3XXX	Mangan	Mała wytrzymałość, bardzo dobra odporność na korozję. Zastosowanie: przemysł chemiczny, przemysł spożywczy (puszki, pojemniki), przemysł samochodowy (wykończenie i drobne elementy).
4XXX	Krzem	Duża wytrzymałość i dobra odporność na korozję. Zastosowanie: przemysł samochodowy (felgi, silniki), narzędzia.
5XXX	Magnez	Przeciętna wytrzymałość, bardzo duża odporność na korozję, utrudniona obróbka cieplna. Zastosowanie: sprzęt AGD, aparatura chemiczna, przemysł spożywczy.
6XXX	Magnez + krzem	Ponadprzeciętna odporność na korozję i dobra plastyczność. Zastosowanie: elektronika, oświetlenie, budownictwo, górnictwo, elementy nośne środków transportu (ciężarówki, autobusy, dźwigi) oraz mostów i barier.
7XXX	Cynk + magnez	Poddane odpowiedniej obróbce cieplnej wykazują najlepsze właściwości wytrzymałościowe spośród wszystkich stopów aluminium. Średnia odporność na korozję, łatwo obrabialne. Zastosowanie: przemysł lotniczy (części samolotów), elementy maszyn przemysłowych, sprzęt sportowy.
8XXX	Pozostałe pierwiastki stopowe	Właściwości i zastosowanie stopów zależą od zawartości składników, którymi mogą być dodatki nieujęte we wcześniejszych seriach.

Stopy aluminium do obróbki plastycznej zawierają od 5% do 6% pierwiastków stopowych, głównie miedzi, manganu, krzemu, magnezu i cynku. W celu ujednolicenia oznaczania stopów aluminium do obróbki plastycznej wprowadzono Międzynarodowy System Oznaczania Aluminium IADS (ang. *The International Aluminium Designation System*), zgodnie z którym aluminium i jego stopy można podzielić na osiem grup materiałowych różniących się składem chemicznym. W systemie tym stosuje się czterocyfrowe kody kategoryzujące [39]. Na rysunku 1.8

przedstawiono schematyczny podział stopów aluminium do obróbki plastycznej zgodnie z normą PN-EN 573-3:2019-12 [109].



Rys. 1.8. Klasyfikacja stopów aluminium do obróbki plastycznej [102, 109]

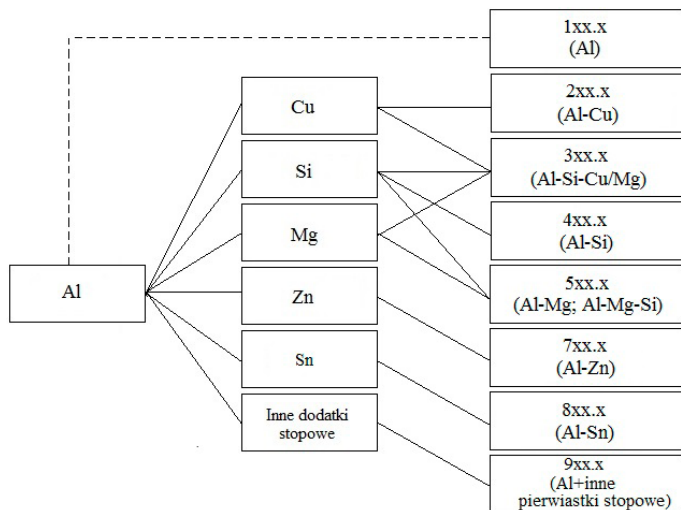
Zgodnie z zalecaniami normy [108] stopy aluminium do obróbki plastycznej oznaczane są za pomocą 4-cyfrowego systemu numerycznego EN AW-XXXX. Pierwsza cyfra kodu określa serię stopu, druga – jeśli jest różna od zera – jego modyfikację (0 – brak modyfikacji, 1–9 – modyfikacja według średniej zawartości dodatku stopowego w czystym aluminium), zaś 3 i 4 cyfry określają zawartość procentową aluminium w stopie [108].

Stopy aluminium do obróbki plastycznej dzielą się na stopy utwardzane wydzieleniowo oraz stopy nieutwardzane cieplnie. Stopy utwardzane wydzieleniowo poddawane są obróbce cieplnej polegającej na przesycaniu i naturalnemu (w temperaturze otoczenia) bądź sztucznemu (w podwyższonej temperaturze) starzeniu, wygrzewaniu materiału oraz szybkiemu chłodzeniu. Proces szybkiego chłodzenia zapobiega wydzieleniu się związków międzymetalicznych i powoduje zatrzymanie rozproszonych dodatków w przesyconym roztworze stałym. Stopy nieutwardzane wydzieleniowo są nieobrabialne cieplnie, dzięki czemu cechują się dobrą plastycznością. Ich właściwości wytrzymałościowe są uzależnione od rodzaju i zawartości dodatków stopowych i mogą być zwiększane poprzez zgniot na zimno [102]. W tabeli 1.4 przedstawiono system oznaczania stanów stopów aluminium.

Tabela 1.4. Oznaczenie stanów umocnienia i obróbki cieplnej stopów aluminium [102, 107]

Stan stopu	Symbol	Znaczenie
Surowy	F	Bez zastosowanie obróbki cieplnej i umocnienia zgniotem.
Wyżarzony	O	Stan pozwalający uzyskać strukturę zbliżoną do stanu równowagi, zapewniający poprawę właściwości plastycznych: O1 – wyżarzony w wysokiej temperaturze i powoli schładzany do temperatury otoczenia, O2 – obrobiony cieplno-chemicznie, O3 – ujednorodniony.
Umocniony	H	Stan umocniony poprzez odkształcenia plastyczne. Pierwsza cyfra po literze H wskazuje rodzaj obróbki: H1X – umocniony zgniotem, H2X – umocniony zgniotem, częściowo wyżarzony, H3X – umocniony zgniotem, częściowo stabilizowany, H4X – umocniony zgniotem, lakierowany. Druga cyfra po literze H wskazuje stopień umocnienia: HX2 – 1/4 twardy, HX4 – 2/4 twardy, HX6 – 3/4 twardy, HX8 – 4/4 twardy, HX9 – ekstra twardy.
Przesycony	W	Stan przesycony samoczynnie, starzony naturalnie. W – przesycony. Druga cyfra po literze W określa sposób odprężenia i wielkość odkształcenia trwałego: W5X – przesycony i odprężony.
Obrobiony cieplnie	T	Stan obrobiony cieplnie – do uzyskania innych stabilnych stanów niż F, O czy W. T1 – schłodzony z podwyższonej temperatury i naturalnie starzony, T2 – schłodzony z podwyższonej temperatury, odkształcony na zimno i naturalnie starzony, T3 – przesycony, odkształcony na zimno i naturalnie starzony, T4 – przesycony i starzony naturalnie, T5 – schłodzony z podwyższonej temperatury i sztucznie starzony, T6 – przesycony i sztucznie starzony, T7 – przesycony i stabilizowany, T8 – przesycony, odkształcony na zimno i sztucznie starzony, T9 – przesycony, sztucznie starzony i odkształcony na zimno, T10 – schłodzony z podwyższonej temperatury, odkształcony na zimno i sztucznie starzony.

Odlewnicze stopy aluminium to wieloskładnikowe stopy o zawartości od 5% do 25% dodatków stopowych, między innymi miedzi, krzemu, magnezu, cynku i cyny. Cechą charakterystyczną tych metali jest mały skurcz odlewniczy i bardzo dobra lejność, która umożliwia wykonywanie elementów o skomplikowanych kształtach i cienkich ściankach bez utraty właściwości wytrzymałościowych. Podział odlewniczych stopów aluminium przedstawiono na rysunku 1.9.



Rys. 1.9. Klasyfikacja odlewniczych stopów aluminium [102, 106]

Stopy odlewnicze według normy PN-EN 1706:2020-10 oznaczane są w 5-cyfrowej formie numerycznej EN AC-XXXX0. Podobnie jak w przypadku stopów do obróbki plastycznej, 1 cyfra wskazuje serię stopu, 2 jego modyfikację a cyfry 3 i 4 identyfikują stop w danej serii. Cyfra 5 określa sposób odlewania, który może być oznaczany jako model [106]:

- S – do form piaskowych,
- K – w kokilach,
- D – pod ciśnieniem,
- L – metodą wytapianych modeli.

Odlewnicze stopy aluminium z dodatkiem krzemu (od 2% do 30%) zwane są siluminami. Są to metale o dobrych właściwościach wytrzymałościowych i odlewniczych. Cechują się odpornością na zużycie ścierne i korozję, małym skurczem odlewniczym i odpornością na pękanie na gorąco. Znalazły one zastosowanie jako materiały na odlewy wysoko obciążonych tłoków silników spalinowych oraz wysoko obciążone elementy w przemyśle stoczniowym i elektrycznym.

Odlewnicze stopy aluminium z miedzią cechują się dobrą plastycznością i lejnością, odpornością na korozję oraz stosunkowo małą wytrzymałością i skłonnością do pękania na gorąco. Zastosowanie tych materiałów zależne jest od procentowej

zawartości miedzi w stopie, jednak najczęściej są one używane jako odlewy na części w przemyśle samochodowym.

Stopy z dodatkiem magnezu są najczęściej stosowanymi odlewniczymi stopami aluminium. Są one odporne na korozję, cechują się małą gęstością, dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i plastycznymi, mają jednak słabszą lejącość. Wykazują odporność na działanie wody morskiej. Stosuje się je do produkcji aparatury chemicznej i morskiej oraz elementów narażonych na uderzenia [39, 82, 102].

Okładki ze stopów aluminium znalazły zastosowanie w rozwiązaniach wymagających odporności na korozję oraz w systemach wymagających utrzymania higieny, np. w przemyśle spożywczym. Grubość zalecanej warstwy zewnętrznej z tego materiału waha się od 0,5–1,2 mm. Jako okładki stosuje się zwykle stopy aluminium do obróbki plastycznej z dodatkiem manganu (AlMn), magnezu (AlMg) i miedzi (AlCu). Użycie stopów aluminium na okładki kompozytu warstwowego wymaga przeprowadzenia odpowiedniego procesu przygotowania powierzchni podczas łączenia z materiałem rdzenia [39, 102].

Drugą grupą materiałów stosowanych na okładki są kompozyty. Stanowią one zbiór materiałów anizotropowych, które ze względu na bardzo dobre właściwości stanowią grupę materiałów często stosowanych na warstwy zewnętrzne paneli typu *sandwich* [46, 146]. Kompozyt to materiał, który został wytworzony w wyniku połączenia co najmniej dwóch różnych chemicznie faz, w taki sposób, aby posiadał on właściwości lepsze niż poszczególne komponenty osobno [17]. Każdy materiał kompozytowy składa się z osnowy i zbrojenia. Głównym zadaniem osnowy jest spajanie materiału zbrojenia, przenoszenie obciążeń zewnętrznych na zbrojenie, zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie oraz nadawanie odpowiedniego kształtu. Zbrojenie odpowiada za zwiększenie właściwości wytrzymałościowych kompozytu, zapewnienie odporności na ścieranie i szoki termiczne. Właściwości kompozytu zależą od właściwości materiałów osnowy i zbrojenia, udziału objętościowego poszczególnych faz oraz parametrów geometrycznych zbrojenia [147, 160].

Ze względu na rodzaj użytej osnowy wyróżnia się kompozyty z osnową metalową, ceramiczną i polimerową [10, 100].

Kompozyty o osnowie metalowej MMC (ang. *Metal Matrix Composite*) znalazły zastosowanie w warunkach podwyższonej temperatury. Cechują się one większym modułem sprężystości oraz większą wytrzymałością niż stal czy stopy aluminium [103]. Jako osnowę metalową stosuje się zwykle żelazo i jego stopy, stopy niklu, stopu aluminium, stopy magnezu, ale również stopy miedzi, srebra czy tytanu [10].

Kompozyty o osnowie ceramicznej CMC (ang. *Ceramic Matrix Composite*) to materiały, które zostały wprowadzone w celu zwiększenia odporności ceramiki na pękanie [103]. Jako osnowę stosuje się ceramikę techniczną (Al_2O_3), azotek krzemu (Si_3N_4) lub węgiel krzemu (SiC) [10, 46].

Kompozyty o osnowie polimerowej PMC (ang. *Polimer Matrix Composite*) stanowią najczęściej stosowaną grupę materiałów kompozytowych, w których jako osnowę używa się tworzywa termoplastyczne (polietylen, polistyren, polipropylen, poliamid), żywice chemoutwardzalne (epoksydowe, poliestrowe, silikonowe) oraz żywice termoutwardzalne (aminoplasty, fenoplasty) [10, 103].

Ze względu na rodzaj zbrojenia kompozyty można podzielić na zbrojone dyspersyjnie (cząstkami o większych rozmiarach i cząstkami o bardzo małych rozmiarach) oraz zbrojone włóknami [10, 146].

Kompozyty zbrojone cząstkami o większych rozmiarach są to materiały, w których fazę rozproszoną stanowią cząstki cechujące się większą sztywnością i twardością niż materiał osnowy. Na wzmocnienie stosuje się tlenki (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), węgliki (SiC , TiC), materiały supertwarde (BN, PCD, TiC , WC), materiały magnetyczne (Ag-CdO, Al- Al_2O_3 , Al-SiC), materiały dielektryczne (Pt- ThO_2) oraz grafit (C). Cząstki powinny posiadać jednakowe rozmiary oraz być równomiernie ułożone w materiale osnowy [51].

Kompozyty zbrojone cząstkami o bardzo małych rozmiarach to materiały, w których wzmocnienie w postaci węglików, tlenków czy azotków występuje w formie ceramicznych lub metalicznych cząstek na poziomie mikroskopowym (o średnicy około 0,01–0,1 μm). Właściwości kompozytów zbrojonych cząstkami o bardzo małych rozmiarach zależą w porównywalnym stopniu od osnowy i zbrojenia. Wzmacnianie kompozytu odbywa się poprzez blokowanie ruchu dyslokacji przez rozproszone mikrocząstki w osnowie. Obciążenia zewnętrzne przenoszone są głównie przez osnowę, dlatego zbrojenie w postaci mikrocząstek nie wpływa w umiarkowanych temperaturach znacząco na zwiększenie właściwości wytrzymałościowych kompozytu. Różnica występuje dla temperatury sięgającej 80% temperatury topnienia, w której dodatek mikrocząstek znacznie poprawia właściwości kompozytu, np. odporność materiału na pełzanie czy odporność na odkształcenia plastyczne. Zawartość zbrojenia nie powinna przekraczać 15% objętości całego kompozytu [42, 90].

Kompozyty zbrojone włóknami stanowią materiały, w których jako wzmocnienie stosuje się włókna wykonane z różnych materiałów i o różnych długościach. Zbrojenie może występować w formie włókna krótkiego (do około 0,3 mm) lub długiego (od 0,3 do 20 mm). Włókna można podzielić również ze względu na stosunek długości włókna do jego średnicy – włókna ciągłe i nieciągłe oraz ze względu na kierunek zorientowania w osnowie – włókna uporządkowane i nieuporządkowane. Włókna powinny cechować się dużą wytrzymałością na rozciąganie, odpowiednio dużą wartością modułu odkształcalności wzdłużnej, dostępnością i akceptowalną ceną [42, 51]. Wzmocnienie kompozytów włóknistych może występować w postaci mat, tkanin, *rovingu*, taśm, siatek lub rzadziej stosowanych tkanin trójwymiarowych [51]. Najczęściej stosowanym wzmocnieniem w tym przypadku są włókna szklane, węglowe i aramidowe, ale dostępne są

również kompozyty wzmacnianie włóknami borowymi, grafitowymi, tytanowymi, polietylenowymi czy wolframowymi. W tabeli 1.5 porównano wybrane właściwości włókien szklanych, węglowych i aramidowych [45].

Tabela 1.5. Wybrane właściwości włókien szklanych, węglowych i aramidowych [6, 44, 116]

Rodzaj włókna	Parametr			
	gęstość ρ [kg/m ³]	średnica włókna d [μ m]	moduł Younga E [GPa]	wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]
Szklane	2500–2600	10–15	72–90	1400–2500
Węglowe	1600–2000	7–8	230–250	2700
Aramidowe	1450–1470	12	17–179	70–3450

Włókna szklane to najczęściej używany materiał wzmacniający. Cechują się one dużą wytrzymałością na rozciąganie przy relatywnie małej wartości modułu Younga oraz dużą wartością modułu sprężystości poprzecznej przy ścinaniu. Ze względu na wartość modułu odkształcalności oraz wytrzymałości na rozciąganie włókna szklane można podzielić na dwie grupy:

- E, A, E-CR – włókna o module Younga do 70 GPa i wytrzymałości na rozciąganie 1000–2000 MPa.
- R, S, AR – włókna o module Younga do 85 GPa i wytrzymałości na rozciąganie 2000–3000 MPa.

Pierwsza grupa cechuje się mniej pożądanymi właściwościami niż druga, jednak ze względu na niższą cenę jest częściej stosowana. Włókna o większym module Younga i większej wartości R_m znalazły głównie zastosowanie w przemyśle wojskowym. Do zalet włókien szklanych, oprócz wyżej wymienionych, zaliczyć można łatwość kształtowania i obróbki, dobrą zwilżalność oraz małą podatność na pękanie. Niewątpliwą wadą jest wrażliwość na wilgoć, zwłaszcza w warunkach długotrwałego obciążenia [44, 51].

Włókna węglowe używane są do wzmacniania materiałów kompozytowych cechujących się dużą wytrzymałością i sztywnością przy małej gęstości własnej [43, 69]. Ze względu na wartość modułu sprężystości wzdłużnej włókna węglowe dzielą się na [124, 164]:

- wysokowytrzymałe – HS (ang. *High Strength*) – moduł Younga wynosi 100–350 GPa,
- wysokomodułowe – HM (ang. *High Modulus*) – moduł Younga wynosi 350–400 GPa,
- ultrawysokomodułowe – UHM (ang. *Ultra High Modulus*) – moduł Younga wynosi powyżej 450 GPa.

Ze względu na zawartość węgla włókna węglowe można podzielić na [124, 164]:

- karbonizowane – zawartość węgla we włóknie wynosi do 90%,
- karbonizowane i grafityzowane – zawartość węgla znajduje się w przedziale od 91% do 98%,
- grafityzowane – zawartość węgla wynosi 99% i więcej.

Włókna węglowe posiadają małą gęstość, dużą wartość modułu Younga, dużą wytrzymałość na rozciąganie i pełzanie. Są nietopliwe, odporne na ścieranie, środki chemiczne, nagłe zmiany temperatury i działanie środowiska atmosferycznego. Posiadają również dobre właściwości tłumiące. Mogą być używane jako zbrojenie materiałów stosowanych w podwyższonej temperaturze – w temperaturze 3500°C nie topią się, lecz ulegają sublimacji. Wadą włókien węglowych jest mała zwilżalność, co skutkuje słabymi zdolnościami wiązania z osnową polimerową i koniecznością przeprowadzenia odpowiedniego przygotowania powierzchni przed połączeniem z materiałem osnowy [44, 69].

Włókna aramidowe, znane również pod handlową nazwą Kevlar, uważane są za materiał przełomowy w inżynierii materiałowej. Podobnie jak włókna szklane i węglowe ze względu na wartość modułu odkształcalności można podzielić je na włókna:

- standardowe – włókna o module Younga 6–70 GPa,
- o zwiększonym module – włókna o module Younga 70–120 GPa.

Włókna aramidowe, w porównaniu do włókien szklanych i węglowych, cechują się najlepszymi właściwościami wytrzymałościowymi, ale również wyższą ceną. Włókna te charakteryzują się dużą sztywnością, odpornością na działanie kwasów i zasad w podwyższonej temperaturze, bardzo dobrą wytrzymałością właściwą (5-krotnie większą niż stal, 10-krotnie większą niż aluminium i około 3-krotnie większą niż włókna szklane), odpornością na ścieranie. Ponadto nie topią się one i nie palą – ulegają procesowi karbonizacji w temperaturze 430°C. Włókna aramidowe ze względu na wysoką cenę oraz gorszą wytrzymałość na ściskanie wymagają stosowania dodatkowego wzmocnienia (np. z włókna szklanego lub węglowego) [44, 51, 69].

Kompozyty zbrojone włóknami spośród wszystkich materiałów kompozytowych charakteryzują się najlepszymi właściwościami wytrzymałościowymi przy najmniejszej masie. Z reguły są one droższe niż kompozyty wzmacniane cząstkami dyspersyjnymi i cząstkami o większych rozmiarach [51]. Obecnie największe znaczenie mają kompozyty włókniste z osnową polimerową określane akronimem FRP (ang. *Fiber Reinforced Plastics*). Nazwy kompozytów o osnowie polimerowej wzmacnianych włóknami pochodzą od rodzaju użytego włókna. Kompozyty polimerowe zbrojone włóknem szklanym określane są jako GFRP (ang. *Glass Fiber Reinforced Plastics*), włóknem węglowym jako CFRP (ang. *Carbon Fiber Reinforced Plastics*), zaś włóknem aramidowym analogicznie jako ARFP (ang. *Aramid Fiber Reinforced Plastics*) [44, 132, 151]. Właściwości kompozytów włóknistych są zależne od [80, 147]:

- udziału objętościowego włókien – moduł Younga wzrasta wraz ze wzrostem zawartości objętościowej włókien; nie należy jednak przekraczać krytycznej objętości włókien, powyżej której osnowa traci zdolność wypełniania przestrzeni między włóknami, w wyniku czego następuje zniszczenie kompozytu,
- orientacji włókien – ułożenie włókien w materiale osnowy powinno być zgodne z kierunkiem obciążenia; włókna uporządkowane wykazują silne właściwości anizotropowe, zaś włókna nieuporządkowane – właściwości izotropowe,
- wiązań adhezyjnych na granicy włókno–osnowa – włókno powinno cechować się dobrą zwilżalnością, a osnowa jak najmniejszą ilością pęcherzy,
- długości włókna – wytrzymałość na rozciąganie wzrasta wraz ze wzrostem długości włókna; krytyczna długość włókna określana jest zależnością:

$$L_{kr} = \frac{R_m \times d}{T_k} \quad (1.1)$$

gdzie:

l_{kr} – krytyczna długość włókna kompozytu [μm],

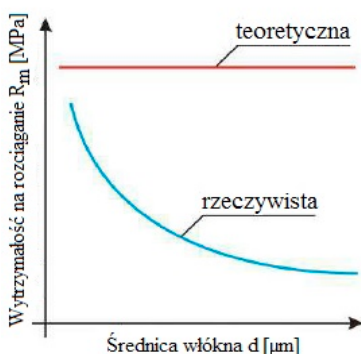
R_m – wytrzymałość na rozciąganie włókna [MPa],

d – średnica włókna [μm],

T_k – wytrzymałość wiązania między włóknem a osnową [MPa].

- współczynnika kształtu (ang. *aspect ratio*) – stosunku długości włókna do jego średnicy l/d .
- średnicy włókna – mniejsza średnica włókna to jego mniejsza powierzchnia i mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia wad powierzchniowych sprzyjających pękaniu włókien.

Im większa średnica włókna, tym mniejsza jest jego wytrzymałość, ponieważ wraz ze wzrostem pola powierzchni zewnętrznej włókna zwiększa się ilość defektów, w których dochodzi do koncentracji naprężeń, a w konsekwencji do zniszczenia włókna [51]. Na rysunku 1.10 przedstawiono zależność występującą między średnicą włókna a wytrzymałością na rozciąganie.



Rys. 1.10. Wpływ średnicy włókna d na wytrzymałość na rozciąganie R_m [145]

Linia czerwona zaznaczono teoretyczną wytrzymałość włókna na rozciąganie. Wartość ta jest stała i nie zależy od średnicy włókna. Jednak zakłócenia towarzyszące procesowi produkcji oraz temperatura chłodzenia włókna wpływają na wielkość średnicy, powodując jej zwiększanie, a tym samym zmniejszanie wytrzymałości na rozciąganie. Zaleca się więc stosowanie włókien o niewielkich średnicach [14].

Kolejnym materiałem stosowanym jako okładziny konstrukcji typu *sandwich* są laminaty. Jest to grupa materiałów kompozytowych zbudowanych z osnowy polimerowej oraz od kilku do kilkunastu cienkich warstw materiału stanowiącego konstrukcję, ułożonych jedna na drugiej. Terminem „lamina” określa się pojedynczą warstwę tworzącą laminat, której grubość zazwyczaj wynosi od 0,1 do 1,0 mm. Cechą charakterystyczną laminatów jest fakt, że każda z warstw może mieć inną strukturę i orientację zbrojenia [22, 101]. W zależności od struktury wyróżnia się laminaty symetryczne (warstwy laminatu znajdujące się powyżej i poniżej jego osi powinny być swoim odbiciem lustrzanym) i niesymetryczne. Ze względu na ułożenie wzmocnienia laminaty można podzielić na jednokierunkowe, poprzeczne (warstwy ułożone pod kątem 0° i 90°) oraz dowolne. Jako zbrojenie stosuje się włókna węglowe i szklane. Laminaty używane jako materiał na okładki konstrukcji przekładkowych, występują zwykle w postaci ułożonych w stos jednokierunkowych, wstępnie zaimpregnowanych warstw wykonanych z włókien szklanych bądź węglowych ułożonych jednokierunkowo i osadzonych w żywicy epoksydowej, poliestrowej lub winyloestrowej. Laminaty na konstrukcje przekładkowe są zazwyczaj wytwarzane w procesie ciśnieniowo-próżniowej impregnacji, która zapewnia odpowiednią jakość materiału. Laminaty stosowane jako warstwy zewnętrzne konstrukcji typu *sandwich* powinny być symetryczne oraz zrównoważone, co znaczy, że liczba warstw zorientowana pod kątem dodatnim powinna być zrównoważona przez liczbę warstw zorientowanych pod kątem ujemnym [22].

W tabeli 1.6 zestawiono właściwości mechaniczne wybranych materiałów stosowanych na okładki. Jako oznaczenia przyjęto: ρ – gęstość, E – moduł Younga, G – moduł Kirchhoffa, ν – liczba Poissona, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_C – wytrzymałość na ściskanie.

Tabela 1.6. Właściwości mechaniczne wybranych materiałów stosowanych na warstwy zewnętrzne konstrukcji przekładkowych [22]

Materiał	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	G [GPa]	ν	R_m [MPa]	R_C [MPa]
Stop aluminium EN AW-2024	2800,00	73,00	27,40	0,33	414,00	414,00
Stal konstrukcyjna S235JR	7800,00	207,00	80,00	0,30	394,00	394,00

Material	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	G [GPa]	ν	R _m [MPa]	R _C [MPa]
Stop tytanu R5070	4400,00	108,00	42,40	0,30	550,00	475,00
Kompozyt epoksydowo-szkłany typ E	1730,00	20,60	3,10	0,12	261,00	177,00
Kompozyt epoksydowo-szkłany typ S	2000,00	26,60	4,63	0,14	422,00	410,00
Kompozyt epoksydowo-węglowy	1630,00	59,50	4,96	0,05	584,00	491,00

Oprócz opisanych wcześniej i wymienionych w tabeli materiałów okładki mogą być wykonywane również z innych materiałów, jak na przykład z tworzywa polimerowego ABS (ang. *Akrylonitryle utadiene styrene*), płyty MDF (ang. *Medium-Density Fibreboard*) czy szkła akrylowego.

1.3.2. Materiały stosowane na rdzeń

Materiał rdzenia jest bardzo istotny z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania całej konstrukcji warstwowej. Herranen i inni [54] wykazali, że materiał, z którego został wykonany rdzeń oraz jego postać mają większy wpływ na właściwości mechaniczne konstrukcji niż jego grubość. Dlatego tak ważny jest odpowiedni dobór materiału warstwy wewnętrznej. Podstawową cechą materiałów stosowanych na rdzeń kompozytów warstwowych jest mała gęstość, dzięki której unika się nadmiernego zwiększania masy przekładki. Jednymi z pierwszych materiałów używanych jako rdzeń były drewno balsa i korek. Jednak ze względu na duży koszt pozyskiwania materiałów naturalnych zaczęto stosować materiały syntetyczne [98]. Dynamiczny rozwój inżynierii materiałowej pozwala na stosowanie coraz to nowszych, lepiej przystosowanych do stawianych im wymagań materiałów na rdzeń, które obejmują tworzywa polimerowe, metale i ich stopy, drewno, papier, wełnę mineralną, materiały spienione i inne. Poniżej omówiono najczęściej stosowane materiały z uwzględnieniem podziału na trzy podstawowe grupy: rdzeń jednorodny, rdzeń niejednorodny, rdzeń siatkowy.

W przypadku rdzeni jednorodnych stosuje się materiały lekkie, o małej gęstości i odpowiednio dużej odporności na ścinanie. Są to zazwyczaj te same materiały, które można stosować jako warstwy zewnętrzne, a więc stopy aluminium, stopy tytanu i kompozyty. Oprócz omówionych wcześniej materiałów jako materiał rdzenia można zastosować również drewno balsa czy wełnę mineralną. Balsa jest najczęściej używanym drewnem na rdzeń. Jest to pochodzący z Ameryki

Środkowej i Południowej lekki, miękki, sprężysty materiał o małej gęstości (do 140 kg/m^3). Zaletą balsy jest kompatybilność ze wszystkimi typami żywic. Ponadto materiał ten jest odporny na wahania temperatury oraz środki chemiczne. Wadą rdzeni z drewna balsa jest duża wrażliwość na wilgoć – wraz ze wzrostem zawartości wody materiał traci określone właściwości mechaniczne. Wełna mineralna zaś wykazuje bardzo dobre właściwości ognioodporne, zapewnia odpowiednią izolację akustyczną i ciepłą, dlatego znalazła zastosowanie jako rdzeń w panelach stosowanych głównie w budownictwie do wykonywania ścian w konstrukcjach szkieletowych [22, 30].

Rdzenie niejednorodne mogą być wykonywane z bardzo szerokiego asortymentu materiałów (polimery, metale, ceramika, szkło) o zróżnicowanej gamie gęstości i sprężystości. Cechami wspólnymi materiałów spienionych są niewielka masa oraz bardzo dobra szczelność, które zostały zastosowane w sposób szczególny w przemyśle okrętowym. Ponadto pianki znalazły zastosowanie również jako lekkie, izolacyjne konstrukcje warstwowe używane w budownictwie. Polimerowe rdzenie porowate mogą być otrzymywane za pomocą różnych metod, na przykład metodą in situ, z gotowych płyt lub podczas wycinania z bloków. Najczęściej stosowanymi rdzeniami niejednorodnymi wykonanymi z materiałów polimerowych są: poliuretan (PUR), polistyren ekstrudowany (PS), poli(chlorek winylu) (PVC) oraz poliamid (PA). W tabeli 1.7 zestawiono wybrane właściwości rdzeni piankowych wykonanych z tych materiałów.

Tabela 1.7. Wybrane właściwości materiałów polimerowych stosowanych na rdzenie piankowe [166]

Parametr	Rodzaj tworzywa polimerowego			
	PUR	PS	PVC	PA
Gęstość ρ [kg/m^3]	30–500	15–300	30–400	30–300
Moduł Younga E [MPa]	10–12	8–60	20–400	75–360
Moduł Kirchhoffa G [MPa]	3–4	4,50–20	13–108	19–290
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	0,30–0,40	0,50–1,20	0,90–8,8	1,60–10
Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]	0,20–0,35	0,30–0,90	0,30–5,80	0,80–16
Zakres termiczny [$^{\circ}\text{C}$]	do 250	do 80	do 100	od –195 do +180

Drugą grupą materiałów porowatych stosowanych jako rdzeń są spienione metale, ceramika oraz szkło. Właściwości tych materiałów zasadniczo różnią się od rdzeni wykonanych z odpowiadających im materiałów litych. Do ich zalet można zaliczyć małą gęstość, dużą wytrzymałość mechaniczną, zdolność do tłumienia drgań i dźwięków oraz zdolność do pochłaniania energii. Wadami tych materiałów są problemy wykonywania połączeń z warstwami zewnętrznymi oraz odmienny sposób przenoszenia sił i obciążeń niż analogiczne rdzenie jednorodne [22, 30]. Piany metalowe to materiały zbudowane z losowo rozmieszczonych porów w osnowie metalowej, które znalazły zastosowanie między innymi w produkcji barier energochłonnych, ekranów termicznych czy lekkich konstrukcji budowlanych. Stosuje się metale lekkie i ich stopy, zwykle aluminium. Wytwarzanie spienionych rdzeni metalowych odbywa się zazwyczaj za pomocą odlewania, bądź metalurgii proszków z dodaniem środków porotwórczych [78]. Piany aluminiowe posiadają bardzo małą gęstość ($0,08\text{--}0,85\text{ g/cm}^3$), małą przewodność elektryczną i cieplną oraz są podatne na obróbkę mechaniczną. Zazwyczaj do wytwarzania spienionego aluminium stosuje się stopy z krzemem, miedzią oraz magnezem i krzemem lub czyste aluminium [102]. Niszczenie rdzeni porowatych występuje zazwyczaj w postaci kruchego pęknięcia rdzenia, bądź odkształceń plastycznych i może wynikać z występowania lokalnych defektów konstrukcji lub z nieprawidłowego dobrania geometrii próbki. Zapobiega się temu poprzez zmniejszenie grubości okładek przy nieziennej grubości rdzenia piankowego [30].

Dobór optymalnego materiału rdzenia siatkowego jest bardziej skomplikowany niż w przypadku rdzeni jednorodnych i niejednorodnych. Wynika to z faktu, że rdzenie o strukturze plastra miodu są droższe niż pozostałe. Poniżej zamieszczono główne czynniki, które wpływają na wybór rdzenia siatkowego [30]:

- nośność,
- kształt i wymiary,
- gęstość,
- wytrzymałość mechaniczna,
- grubość ścianki komórki,
- wrażliwość na wilgoć,
- palność,
- przewodność cieplna i elektryczna,
- zakres temperatury roboczej,
- jakość wykonania (gładkość powierzchni ścianek),
- odporność na ścieranie,
- podatność na obróbkę,
- walory estetyczne.

Najczęściej stosowanymi materiałami na rdzenie o strukturze plastra miodu są stopy aluminium, impregnowane maty szklane, węglowe lub aramidowe, papier impregnowany żywicą fenolową i materiały polimerowe [65]. W tabeli 1.8 przed-

stawiono krótką charakterystykę wybranych materiałów stosowanych jako rdzenie siatkowe.

W celu zwiększenia sztywności i właściwości wytrzymałościowych rdzeni siatkowych można uzupełnić przestrzeń komórkową materiałem spienionym, który dodatkowo zwiększy powierzchnię przylegania okładek z materiałem rdzenia [30].

Rdzenie jednorodne wykonane ze stopów aluminium oraz rdzenie o strukturze plastra miodu są najczęściej stosowane w lotnictwie, zaś rdzenie niejednorodne w postaci pian znalazły zastosowanie głównie w przemyśle morskim i budowlanym [12].

Tabela 1.8. Wybrane właściwości materiałów siatkowych [122, 157, 166]

Materiał		Właściwości
Stopy aluminium		• stosunkowo mały koszt, • bardzo dobra absorpcja energii, • duża wytrzymałość właściwa, • duża jakość wykonania komórek, • podatność na obróbkę skrawaniem.
Maty	szklane	• dobre właściwości izolacyjne, • małe właściwości dielektryczne, • duża wytrzymałość mechaniczna.
	węglowe	• stabilność wymiarowo-kształtowa, • duża wydajność w podwyższonej temperaturze, • bardzo mały współczynnik rozszerzalności cieplnej, • możliwość regulowania przewodnictwa cieplnego, • stosunkowo duży moduł Kirchhoffa.
	aramidowe	• duża wytrzymałość właściwa, • ognioodporność, • szeroki wybór rozmiarów i kształtów, • podatność na formowanie, • małe właściwości dielektryczne.
Poliuretan		• duża wrażliwość na wilgoć, • zdolność przekazywania energii, • stosunkowo duża wytrzymałość zmęczeniowa, • możliwość wyboru koloru.

Z uwagi na fakt, że wybór materiałów tworzących konstrukcję przekładkową uzależniony jest między innymi od jej zastosowania, dostępności, kosztów i żywotności [12], dobór materiałów powinien być przeprowadzony ze szczególną starannością. Poniższy algorytm przedstawia zalecane etapy projektowania paneli typu *sandwich* [12, 30].

1. Określenie minimalnej masy konstrukcji.
2. Porównanie projektowanego panelu z analogiczną konstrukcją litą.
3. Porównanie właściwości dobranych materiałów z materiałami alternatywnymi.
4. Wybór odpowiedniego materiału na okładki.
5. Wybór odpowiedniej postaci i materiału rdzenia.
6. W przypadku okładek wykonanych z laminatów – wybór optymalnego ułożenia warstw.
7. Sprawdzenie, czy projektowana konstrukcja warstwowa posiada zdolność przenoszenia obciążeń docelowych.
8. Zbadanie, czy materiał warstwowy spełnia pozostałe wymagania (odporność na korozję, odporność na warunki eksploatacji, szczelność, ognioodporność i inne).

Tak przeprowadzona analiza pozwala dobrać materiał o optymalnych właściwościach oraz zapewnia prawidłową eksploatację konstrukcji typu *sandwich*.

1.4. Łączenie konstrukcji przekładkowych

Łączenie konstrukcji przekładkowych jest bardzo ważnym procesem, który ma istotny wpływ na funkcjonowanie panelu. Łączenie kompozytów warstwowych obejmuje dwie kwestie: sposób łączenia warstw tworzących panel typu *sandwich* oraz sposób łączenia przekładek ze sobą lub innymi konstrukcjami [102]. Jednym z najważniejszych aspektów prawidłowego funkcjonowania konstrukcji typu *sandwich* jest przyczepność materiału rdzenia z materiałem okładek, ponieważ jest to kryterium przenoszenia obciążeń oraz spójności konstrukcji. Dobór techniki łączenia konstrukcji warstwowych zależy od materiałów, z których zostały wykonane poszczególne warstwy. Do łączenia tego typu materiałów stosuje się połączenia [4, 39, 128, 155]:

- chemiczne – klejowe,
- termiczne – spawane, zgrzewane, lutowane,
- mechaniczne – nitowe, śrubowe,
- połączenia kombinowane – śrubowo-klejowe, nitowo-klejowe.

Tabela 1.9. *Zalety i wady połączeń stosowanych do łączenia konstrukcji przekładkowych [70, 105, 125, 131]*

Rodzaj połączenia	Zalety	Wady
Chemiczne (klejowe)	- nie powodują znacznego zwiększenia masy konstrukcji, - brak koncentracji naprężeń, - niewielka ingerencja w strukturę warstw, - odporność na uderzenia, - stosunkowo duża wytrzymałość zmęczeniowa.	- połączenia nierozdzielne, - długi i odmienny proces przygotowania powierzchni dla materiału okładek i rdzenia, - mała przewidywalność okresu trwałości połączenia, - zazwyczaj mała odporność na działanie czynników atmosferycznych.
Termiczne	- brak dodatkowych elementów zwiększających masę przekładki, - duża wytrzymałość i niezawodność połączeń, - łatwość wykonania, - stosunkowo mały koszt, - możliwość pełnej automatyzacji procesu.	- połączenia nierozdzielne, - możliwość występowania odkształceń spawalniczych, - połączenie nieodpowiednie dla wszystkich rodzajów materiałów, - niszczenie powłok galwanicznych, - stosunkowo niewielka wytrzymałość spoiny (lutowanie), - brak szczelności i koncentracja naprężeń (zgrzewanie).
Mechaniczne	- prostota wykonania, - prosty proces przygotowania powierzchni, - możliwość łączenia różnych materiałów, - zwykle możliwy jest łatwy demontaż, - odpowiednie do konstrukcji o zmiennym kształcie.	- wymagają zastosowania łączników zwiększających masę konstrukcji, - wymagają wykonania otworów montażowych powodujących utratę spójności materiałów kompozytowych i powstawanie lokalnych naprężeń, - mogą prowadzić do zmniejszenia wytrzymałości materiału i pęknięć zmęczeniowych, - brak szczelności.
Kombinowane	- zwiększona wytrzymałość na rozciąganie, - zwiększona sztywność konstrukcji, - występowanie dwuetapowego procesu pęknięcia przed całkowitym zniszczeniem połączenia.	- zmniejszona nośność konstrukcji, - zwiększona masa konstrukcji, - zwiększone koszty wykonania połączenia, - większa czasochłonność procesu.

Połączenia termiczne, z wyjątkiem zgrzewania, mogą być stosowane tylko dla całkowicie metalowych konstrukcji warstwowych. Do paneli hybrydowych i kompozytowych mogą być stosowane wszystkie wymienione rodzaje połączeń. W tabeli 1.9 zestawiono wady i zalety poszczególnych technik łączenia konstrukcji przekładkowych.

Podczas łączenia warstw konstrukcji przekładkowych najczęściej stosuje się klejenie, natomiast spawanie, połączenia mechaniczne i kombinowane są z reguły stosowane podczas łączenia paneli typu *sandwich* w wielkogabarytowe konstrukcje przekładkowe.

W dalszej części omówiony został proces klejenia ze względu na to, że właśnie ten rodzaj połączenia został zastosowany w części badawczej niniejszej pracy.

Głównym powodem stosowania procesu klejenia do łączenia kompozytów warstwowych jest oprócz nie zwiększania masy konstrukcji, możliwość łączenia zarówno konstrukcji całkowicie metalowych, jak i hybrydowych oraz kompozytowych. Klejenie konstrukcji przekładkowych składa się z typowych dla tego procesu operacji, a więc przygotowania łączonych powierzchni, sporządzenia i aplikacji kleju, składania elementów, utworzenia spoiny klejowej, operacji dodatkowych oraz kontroli połączenia [126, 127, 139]. Proces przygotowania powierzchni należy przeprowadzać zarówno dla materiału okładek, jak i rdzenia. Zwykle wymaga on obróbki mechanicznej i chemicznej oraz nakładania podkładów. Rdzeń z reguły jest trudniejszy do przygotowania ze względu na możliwe różne jego postacie, jednak każdy rdzeń wymaga usunięcia zanieczyszczeń, które mogłyby prowadzić do zmniejszenia wytrzymałości wiązania adhezyjnego. Rdzenie jednorodne nie wymagają szczególnych operacji, są zwykle przygotowywane podobnie jak materiały okładek. Problemem jest przygotowanie powierzchni rdzeni siatkowych i niejednorodnych. Rdzenie o strukturze plastra miodu przedmucha się sprężonym powietrzem i, jeśli to możliwe, oczyszcza się poprzez zanurzenie w cieczy, np. trichloroetylenie. W przypadku rdzeni piankowych najskuteczniejszym sposobem jest przeciwdziałanie narażeniu na oleje, smary i inne zanieczyszczenia. Inną możliwością jest usunięcie zanieczyszczonej warstwy powierzchniowej za pomocą metod mechanicznych. Nieprawidłowo przeprowadzony proces przygotowania powierzchni rdzenia podczas klejenia konstrukcji warstwowych skutkuje tworzeniem słabego wiązania adhezyjnego. Prawidłowe przyleganie warstw można zapewniać poprzez użycie środków aktywujących powierzchnie, tzw. primerów nanoszonych na łączone powierzchnie [22, 32, 166]. Ponadto ważne jest dobranie kleju zapewniającego odpowiednio trwałe połączenie, cechujące się pożądanymi właściwościami mechanicznymi, odpornością na starzenie i cykliczne obciążenia zmęczeniowe. Decydując się na dany rodzaj kleju należy rozważyć również rodzaj i charakter łączonych materiałów, metodę aplikacji i utwardzania kleju, a także warunki pracy połączenia [9, 127]. Do łączenia kompozytów warstwowych we współczesnym przemyśle stosuje się zwykle jedno- i dwuskładnikowe kleje epok-

sydowe, poliestrowe i metakrylowe. Ze względu na to, że warstwa kleju ma fundamentalne znaczenie w funkcjonowaniu konstrukcji przekładkowej, właściwości kleju nie powinny być gorsze niż właściwości najsłabszego ogniwa tworzącego przekładkę – rdzenia. Łącząc warstwy zewnętrzne z przepuszczalnym materiałem rdzenia stosuje się kleje pniące, które wnikając do materiału usztywnienia wypełniają puste przestrzenie między warstwami. Kleje niepniące się lub lekko pniące używane są do łączenia okładek z usztywnieniem o strukturze plastra miodu lub z rdzeniem wykonanym z nieprzepuszczalnego materiału.

Nanoszenie kleju może być przeprowadzane ręcznie lub za pomocą jednej z poniższych metod [74]:

- dozowanie w postaci wstęgi,
- nanoszenie natryskowe po wcześniejszym mieszaniu kleju w mieszadle pod dużym ciśnieniem,
- nanoszenie natryskowe po wcześniejszym mieszaniu kleju w mieszadle pod małym ciśnieniem,
- nanoszenie grawitacyjne, kurtynowe,
- aplikacja za pomocą walców.

Materiały warstwowe są często łączone w procesie ciśnieniowo-próżniowej impregnacji, ponieważ metoda ta pozwala na pozbycie się porów oraz utworzenie spoiny klejowej o jednakowej grubości. Należy zwrócić szczególną uwagę na dobranie odpowiedniej wartości ciśnienia, która nie doprowadzi do uszkodzenia materiału rdzenia w wyniku ściskającego oddziaływania ciśnienia [166].

Lepkość kleju jest szczególnie ważna w przypadku konstrukcji o rdzeniu siatkowym. Kleje stosowane do takich konstrukcji muszą cechować się odpowiednią zwilżalnością, kontrolowanym przepływem oraz lepkością uniemożliwiającą dostawianiu się kleju do komórek rdzenia. Dla pianek i materiałów jednorodnych lepkość powinna być odpowiednio mała, aby umożliwiać odpowiednie pokrycie powierzchni rdzenia.

Grubość warstwy kleju dobiera się tak, aby obie łączone powierzchnie były pokryte klejem bez pozostawiania obszarów suchych. Każdy materiał może wymagać innej ilości kleju, jednak zbyt gruba warstwa kleju prowadzi do niepotrzebnego zwiększania masy przekładki i zmniejsza wytrzymałość połączenia.

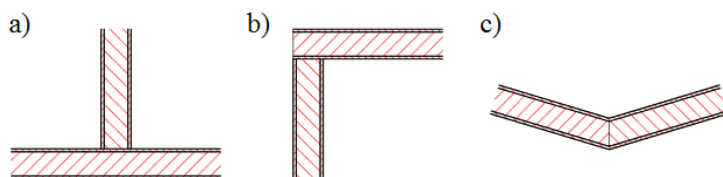
Połączenie musi również zapewniać przenoszenie zadanych obciążeń, a więc posiadać odpowiednią wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie w zakresie temperatury roboczej.

Ważnym czynnikiem wpływającym na prawidłowe funkcjonowanie konstrukcji jest również skurcz podczas utwardzania. Jest on szczególnie istotny przy łączeniu materiałów porowatych, w których skurcz powoduje powstawanie naprężeń ścinających znacznie zmniejszających wytrzymałość połączenia klejowego [9, 127].

Oddzielną kwestią jest łączenie paneli typu *sandwich*. Konstrukcje przekładkowe mogą być tworzone w następujących konfiguracjach montażowych:

- panel – usztywnienie ramowe,
- panel – panel,
- panel – płyta konstrukcyjna.

Każda z tych konfiguracji może wymagać innego sposobu łączenia oraz być wykonywana na innym etapie montażu. Oczywiście nie każda konfiguracja występuje w danej konstrukcji. Konfiguracja panel – usztywnienie ramowe (etap prefabrykacji) oraz panel – płyta konstrukcyjna (etap prefabrykacji i montażu) to połączenie konstrukcji innowacyjnych z konwencjonalnymi, zaś konfiguracja panel – panel (etap montażu) to połączenie konstrukcji innowacyjnych [150]. Najtrudniejszym do realizacji jest wykonanie połączenia panel – panel. Na rysunku 1.11 zobrazowano typowe rodzaje tego typu konfiguracji.



Rys. 1.11. Rodzaje typowych połączeń stosowanych do łączenia konstrukcji przekładkowych: a) typ T, b) typ L, c) typ V [166]

Połączenie typu T występuje wówczas, gdy jeden z paneli typu *sandwich* jest usztywniony przez drugi panel. Jest to jedno z najczęściej stosowanych połączeń w przemyśle stoczniovym do łączenia kadłuba statku z grodzią. Połączenie typu L stosowane jest zwykle do łączenia dachów i ścian lekkich konstrukcji, np. kontenerów i przyczep oraz do łączenia pokładu statków z kadłubem. Ten rodzaj połączenia wykazuje najlepsze efekty, gdy poddawany jest niewielkiemu ścisnaniu i zginaniu. Dla rozwiązań o dużym momencie zginającym należy dodatkowo zastosować wzmocnienie połączenia (za pomocą aluminiowego profilu, laminowanego profilu kratowego lub spawania prefabrykowanych paneli z aluminiowymi krawędziami), aby nie dopuścić do lokalnego lub globalnego zniszczenia jednego lub dwóch komponentów. Połączenie typu V ze względu na kształt stosuje się do produkcji dolnych części kadłubów łodzi i do montażu paneli symetrycznych, tzw. półskorup. Dodatkowe wzmocnienie połączenia odbywa się poprzez dołączenie elementu blaszanego, który zwiększa wytrzymałość na zginanie warstw zewnętrznych.

Łączenie kompozytów warstwowych w wielkogabarytowe konstrukcje jest bardzo trudnym procesem. Odbywa się za pomocą tych samych technik co podczas łączenia warstw panelu. Sposób łączenia dobierany jest przede wszystkim w oparciu o materiał okładzin, gdyż to właśnie one przylegają bezpośrednio do siebie lub innych konstrukcji. Materiał rdzenia odgrywa w tym przypadku pod-

rzędną rolę. Ważną kwestią są również rozmiary łączonych płyt, ich zastosowanie (dachy, podłogi, ściany) oraz warunki, w których będą pracować. Do łączenia konstrukcji przekładkowych w wielkogabarytowe konstrukcje najczęściej stosuje się spawanie laserowe i nitowanie. W przypadku paneli wykonanych w całości z materiałów niemetalowych, bądź hybrydowych, których okładziny wykonane zostały z materiałów innych niż metalowe, klejenie stanowi alternatywę wobec spawania i nitowania [150].

Spawanie jest najczęstszym sposobem łączenia przekładek w wielkogabarytowe konstrukcje. Podczas projektowania tego procesu należy uwzględnić rodzaj obciążenia panelu w odniesieniu do orientacji rdzenia (wzdłużnie lub poprzecznie), jego przeznaczenie, pożądaną nośność, wymagania dotyczące jakości wykonania powierzchni oraz rozkładu naprężeń, które wpływają na wytrzymałość zmęczeniową połączenia. Panel usztywniony poprzecznie wykazuje nieznaczne problemy z wytrzymałością zmęczeniową spoiny i może być łączony zgodnie z ogólnymi wymaganiami wytrzymałościowymi. Panele usztywnione wzdłużnie mogą być łączone za pomocą spoin jedno- i dwustronnych. Spoiny obustronne (symetryczne) pozwalają uniknąć spiętrzenia naprężeń, zapewniają również odpowiednio dużą nośność, jednak w przeciwieństwie do spoin jednostronnych (asymetrycznych), które posiadają gorsze właściwości wytrzymałościowe, znacznie utrudniają proces łączenia w rozwiązaniach z ograniczonym dostępem montażowym [128].

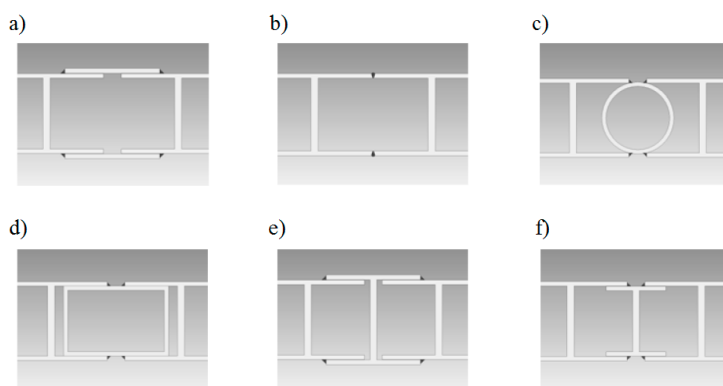
Spawanie laserowe jest sposobem łączenia o relatywnie małym nakładzie ciepła i dlatego jest najczęściej stosowane podczas termicznego łączenia kompozytów warstwowych. Proces polega na zastosowaniu bardzo wąskiej i głębokiej spoiny z minimalną strefą wpływu ciepła, która powstaje za pomocą skoncentrowanej wiązki lasera o bardzo dużej mocy. W porównaniu do spawania łukowego, technika ta cechuje się występowaniem małych odkształceń spawalniczych, które nie generują przeprowadzania dodatkowej operacji prostowania. Dodatkowo spawanie laserowe umożliwia łączenie konstrukcji przekładkowych o małej grubości okładek. Kolejną cechą przemawiającą za słuszością stosowania tej techniki łączenia jest możliwość pełnej automatyzacji procesu oraz możliwość wykonywania spoiny jednostronnej. Z drugiej jednak strony koszty zakupu technologii i jej eksploatacji są duże, a jakość spoin jest silnie uzależniona od parametrów technologicznych procesu – parametrów wiązki laserowej (zmieniając długość ogniskowej i średnicę wiązki można sterować właściwościami spoiny). Ponadto przed przystąpieniem do spawania krawędzie łączonych paneli powinny być poddane obróbce wstępnej. Należy również zapewnić dokładne prowadzenie wiązki wzdłuż wewnętrznych usztywnień na całej długości panelu, poprzez np. zastosowanie prowadnic [128].

Poniżej wymieniono podstawowe czynniki, które decydują o prawidłowo przeprowadzonym procesie spawania [100, 128]:

- skład chemiczny łączonych materiałów powinien zapewniać możliwość wykonania połączenia,

- powierzchnie łączone powinny być wolne od zanieczyszczeń,
- rdzenie w postaci płaskowników powinny posiadać krawędzie prostokątne lub lekko zaokrąglone w celu zapobiegania powstawania szczelin w warstwach wierzchnich podczas łączenia,
- elementy usztywniające (zakrzywione, L-core, Z-core) muszą być stabilne i wykonane z odpowiednią dokładnością wymiarową, aby zminimalizować występowanie przerw podczas procesu łączenia.

Na rysunku 1.12 przedstawiono typowe rodzaje połączeń stosowanych podczas spawania całkowicie metalowych konstrukcji przekładkowych w układzie wzdłużnym.



Rys. 1.12. Połączenia panel – panel w układzie wzdłużnym: a) łączenie za pomocą nakładek, b) połączenie doczołowe, c) łączenie za pomocą profilu rurowego, d) łączenie za pomocą profilu prostokątnego, e) łączenie za pomocą dwuteownika z mocnikami na zewnątrz panelu, f) łączenie za pomocą dwuteownika z mocnikami wewnątrz panelu [100]

Oprócz samego łączenia należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiednie transportowanie i przeładunek paneli typu *sandwich*, które ze względu na swą budowę, wymiary i masę mogą ulec zdeformowaniu [128, 166].

1.5. Obróbka hybrydowych konstrukcji przekładkowych

Obróbka ubytkowa hybrydowych kompozytów warstwowych w porównaniu do obróbki przedmiotów metalowych jest utrudniona ze względu na niejednorodność i anizotropię konstrukcji powstałej w wyniku połączenia materiałów o różnych właściwościach mechanicznych i fizycznych. Im bardziej zróżnicowane są materiały warstw, tym obróbka jest trudniejsza w realizacji. Zmiana właściwości materiałów tworzących konstrukcji w krótkim odstępie czasu prowadzi

do niejednorodnej jakości wykonania kompozytu warstwowego. W związku z tym dużym wyzwaniem jest dobór narzędzia i parametrów technologicznych procesu skrawania, które umożliwiałyby efektywną i wydajną obróbkę tego typu materiałów. Obecnie wśród producentów narzędzi skrawających istnieje trend do dedykowania narzędzi do obróbki określonego rodzaju materiału. Dlatego tak trudnym jest znalezienie narzędzi i parametrów procesu obróbki zarówno dla materiałów okładek, jak i rdzenia. Konstrukcje typu *sandwich* są wykonywane zwykle w kształcie zbliżonym do ostatecznego, dlatego też ich obróbka służy głównie wyrównaniu krawędzi, bądź wykonywaniu otworów montażowych. Wśród stosowanych sposobów obróbki skrawaniem konstrukcji typu *sandwich* wymienia się frezowanie, wiercenie oraz cięcie wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną [13, 64, 95, 103].

Obróbka konstrukcji przekładkowej stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy (Al/CFRP) jest dość problematyczna ze względu na to, że właściwości materiałów poszczególnych warstw są bardzo zróżnicowane [81, 83, 121]. O ile stopy aluminium z reguły należą do materiałów podatnych na obróbkę skrawaniem, o tyle kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami węglowymi (CFRP) zostały zakwalifikowane przez Feito i współautorów [43] jako materiały trudnoobrabialne.

Anizotropia kompozytów pozytywnie wpływa na właściwości wytrzymałościowe materiału, jednocześnie utrudniając jego obróbkę ubytkową ze względu na [85]:

- intensywne zużywanie się narzędzi skrawających,
- powstawanie licznych form uszkodzenia po obróbce,
- trudności w utrzymaniu dokładności wymiarowo-kształtowej i powtarzalnej jakości powierzchni obrobionej.

Obróbka ubytkowa kompozytów CFRP wymaga częstej wymiany narzędzia skrawającego ze względu na jego przyspieszone zużywanie się, które jest następstwem właściwości ściernych włókien węglowych. Ponadto podczas obróbki kompozytów narzędzie skrawa twarde włókna na przemian z miękkim materiałem osnowy, w wyniku czego następuje intensyfikacja zużycia ostrza skrawającego [67, 104].

Wysokowytrzymałe włókna węglowe stosowane do budowy kompozytów trudno się łamią i mają tendencję do ciągnięcia, co bardzo często jest powodem powstawania mikropęknięć i delaminacji wzdłuż kierunku pracy narzędzia. Puste przestrzenie oraz pęcherze znajdujące się między osnową i wzmocnieniem powstałe na etapie wytwarzania kompozytu oraz topnienie żywicy podczas obróbki również przyczyniają się do procesu rozwarstwiania. Wzrost siły skrawania związany ze wzrostem zużycia narzędzia prowadzi do delaminacji i powstawania zadziórów. Typowymi uszkodzeniami kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami węglowymi po skrawaniu są [21, 35, 86, 97]:

- rozwarstwienie materiału (delaminacja),
- pęknięcie warstwy granicznej włókno-osnowa (ang. *debonding*),
- uszkodzenia termiczne,

- pękanie osnowy,
- strzępienie,
- przerywanie i wyciąganie włókien, odpryski, wykruszenia i zadziory.

Trudność utrzymania dokładności wymiarowej i powtarzalności jakości materiału kompozytowego spowodowana jest głównie tym, że osnowa i wzmocnienie kompozytu posiadają inne współczynniki rozszerzalności cieplnej [19, 71].

Podczas obróbki kompozytów CFRP problemem jest również pył i proszek węglowy, które wydzielając się podczas skrawania, mogą być niebezpieczne dla operatora. Niezbędne jest zatem zadbanie o odpowiedni system wentylacyjny i odprowadzający zanieczyszczenia [13, 68, 86].

Kopler i inni [76, 77] badali skrawalność kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi. Zauważyli, że wielkość i kształt wióra zależne są od wielkości, splotu, rozmieszczenia i orientacji (względem kierunku obróbki) włókna. Zauważyli również, że dokładność wykonania oraz występowanie delaminacji były uzależnione od sił skrawania i geometrii narzędzia skrawającego.

Konstrukcje przekładkowe są jeszcze mniej podatne na obróbkę skrawaniem niż kompozyty polimerowe. Oprócz problemów typowych dla skrawania kompozytów, obrabiając materiał warstwowy stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy, należy dodatkowo pokonać trudności związane z [168]:

- deformacją górnej i dolnej warstwy przekładki,
- zmniejszoną dokładnością wykonania na skutek ingerencji metalowych wiórów z materiałem kompozytowym,
- możliwością gromadzenia się wiórów aluminiowych lub pyłu węglowego w przestrzeniach między warstwami materiału w przypadku rozwarstwienia konstrukcji,
- szczepianiem w obrębie skrawanego materiału i krawędzi narzędzia, w wyniku którego powstaje narost i pogorszenie jakości powierzchni obrabianej.

Różne właściwości materiałów tworzących kompozyt warstwowy powodują także zmniejszenie wydajności procesu, problemy z formowaniem odpowiedniego kształtu i wymiarów wióra oraz jego odprowadzeniem. Istotnym etapem jest prze-myślany dobór narzędzia, jego geometrii i parametrów technologicznych procesu.

Obróbka konstrukcji hybrydowych za pomocą konwencjonalnych narzędzi skrawających jest bardzo trudna ze względu na gorszą skrawalność materiału niemetalowego [104, 154-168]. Optymalizacja parametrów skrawania jest uważana za najskuteczniejszy sposób poprawy jakości powierzchni obrabianej. Dobór parametrów technologicznych jest uzależniony od materiałów tworzących przekładkę. Podczas obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych, oprócz rodzaju użytych materiałów, na efekt końcowy mają wpływ również grubość kompozytu czy sposób ułożenia warstw [13, 89]. Dobierając narzędzie należy uwzględnić fakt obróbki wielu warstw o różnych, czasami skrajnych, właściwościach w tym samym czasie. Najlepszym rozwiązaniem byłoby dostosowywanie parametrów skrawania

do materiału aktualnie obrabianej warstwy. Niestety nie jest to możliwe, dlatego najczęściej narzędzie oraz parametry dobierane są do jednego z materiałów stanowiącego kompozyt warstwowy. Takie rozwiązanie prowadzi do powstawania różnic w jakości wykonania na powierzchniach poszczególnych warstw. Brak odpowiednio dobranych parametrów technologicznych może prowadzić też do nieodwracalnego rozwarstwienia kompozytu przy jednoczesnym powstawaniu zadziorów w warstwie metalicznej. Ghidossi i inni [49] zauważyli, że wielkość zadzioru powstającego po obróbce skrawaniem kompozytów CFRP zależy od zużycia narzędzia skrawającego. Chibane i inni [27] udowodnili, że wzrost posuwu na ostrze powoduje zwiększenie długości zadzioru, zaś zwiększenie prędkości skrawania zmniejsza jego długość. Boudelier i inni [15] zaproponowali algorytm służący do optymalizacji parametrów procesu skrawania kompozytów CFRP. Odkryli, że dla uzyskania jednorodnej chropowatości na całej powierzchni konstrukcji oraz odpowiedniej wydajności procesu kluczowe znaczenie ma wartość posuwu. Wszystkie uszkodzenia powstające w trakcie obróbki skrawaniem materiałów kompozytowych powodują wzrost czasochłonności procesu ze względu na konieczność wprowadzenia obróbki dodatkowej. Na bezpieczeństwo eksploatacji charakteryzowanej konstrukcji negatywnie wpływają również mikropęknięcia, lokalna delaminacja czy zadziory. Uhlmann i pozostali [149] wykazali, że w porównaniu do obróbki konwencjonalnej – prędkość skrawania podczas obróbki kompozytów zawierających włókna węglowe wpływa na mechanizm powstawania wióra. Udowodnili również, że zwiększenie tego parametru prowadzi do spadku sił skrawania i wydłużenia okresu trwałości narzędzia. Dlatego też podczas obróbki ubytkowej hybrydowych konstrukcji typu *sandwich* zaleca się stosowanie większych prędkości skrawania z jednoczesnym stałym monitorowaniem temperatury w strefie obróbki, ponieważ jej wzrost może prowadzić do przegrzania lub utwardzenia żywicy i tym samym do uszkodzenia materiału kompozytowego. W celu zmniejszenia temperatury coraz częściej stosowane są narzędzia wyposażone w systemy wewnętrznego chłodzenia, zwykle w postaci kanałów doprowadzających zimne powietrze i ewentualnie odprowadzających pyły ze strefy skrawania [104].

Obróbka ubytkowa hybrydowych konstrukcji przekładkowych wymaga stosowania specjalnie skonstruowanych narzędzi. Dobór materiału narzędziowego jest zależny od materiałów tworzących konstrukcję warstwową. Materiał narzędziowy powinien cechować się odpowiednią twardością oraz dużą przewodnością cieplną. Najczęściej do obróbki tego typu materiałów stosuje się narzędzia z węglików spiekanych. Pełnowęglkowy rdzeń zapewnia odpowiednią sztywność i dokładność wymiarowo-kształtową narzędzia, dzięki czemu możliwe jest utrzymanie wąskiego zakresu tolerancji wymiarów. Optymalna geometria narzędzia zapewnia odpowiedni spływ wióra oraz mniejsze siły skrawania, co przyczynia się do zmniejszenia temperatury w strefie obróbki i tym samym zmniejszenia powstawania

uszkodzeń materiału [19, 103, 104]. Narzędzia do obróbki konstrukcji metalowo-polimerowych charakteryzują się ostrymi krawędziami oraz stosowaniem powłok właściwych dla danego układu materiałów. Do najczęściej używanych narzędzi do obróbki konstrukcji przekładkowych zalicza się [19, 104]:

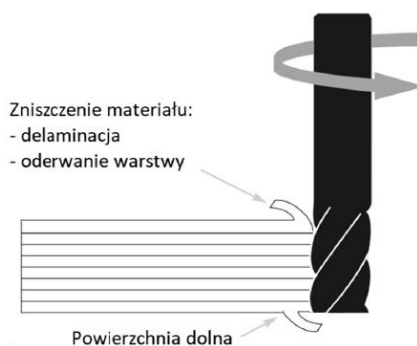
- narzędzia z wkładką z polikrystalicznego diamentu (PKD),
- narzędzia z powłoką diamentopodobną (DLC),
- narzędzia z powłoką filmu diamentowego (DFC),
- narzędzia z powłoką azotku cyrkonu (ZrN),
- narzędzia z powłoką z krystalicznego diamentu (CDC).

Powłoki diamentowe są stosowane ze względu na ich właściwości, to jest: dobry współczynnik przewodzenia ciepła, chemiczną obojętność w stosunku do żywic w podwyższonej temperaturze i mały współczynnik tarcia. Rodzaj, grubość oraz sposób nanoszenia powłoki wpływa na dokładność geometryczną narzędzi oraz ich trwałość [19, 104].

Frezowanie hybrydowych konstrukcji warstwowych jest obróbką prowadzoną z niewielkimi naddatkami obróbkowymi, której celem jest wyrównanie krawędzi materiału. Ze względu na uderowy charakter pracy frezu, proces ten wiąże się z koniecznością rozwiązywania wielu problemów związanych między innymi z:

- intensywnym zużywaniem się narzędzi,
- możliwością wystąpienia procesu delaminacji,
- dużą chropowatością obrobionej powierzchni,
- ograniczonym rodzajem narzędzi do obróbki tego typu konstrukcji.

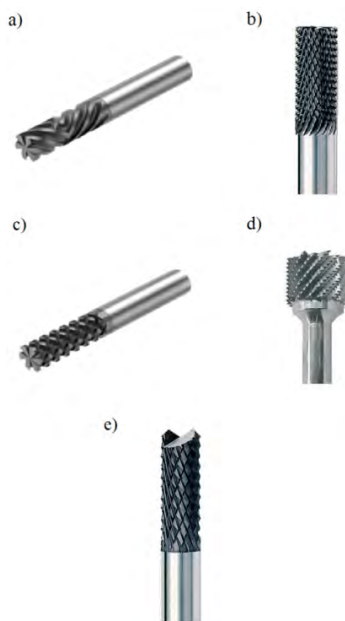
Występowanie procesu delaminacji podczas frezowania kompozytów warstwowych jest spowodowane działaniem siły osiowej w kierunku normalnym do płaszczyzny przedmiotu obrabianego, w wyniku czego może dochodzić do rozwarstwiania zarówno kompozytu węglowego, jak i całej konstrukcji przekładkowej [19, 104]. Najbardziej narażone na zniszczenie są górne i dolne warstwy konstrukcji (rys. 1.13).



Rys. 1.13. Zniszczenie górnej i dolnej powierzchni kompozytu warstwowego podczas procesu frezowania [19]

Proces obróbki jest utrudniony również ze względu na ograniczony rodzaj narzędzi do obróbki konstrukcji typu *sandwich*. Frezowanie konstrukcji przekładkowych metal – kompozyt polimerowy odbywa się zwykle za pomocą specjalnie skonstruowanych narzędzi dedykowanych do obróbki metali i kompozytów. Narzędzia te, w zależności od rodzaju obrabianego materiału, różnią się geometrią, zastosowanymi powłokami oraz zalecanymi parametrami skrawania. Te i wiele innych aspektów powodują trudność w utrzymaniu jednorodnej i akceptowalnej jakości powierzchni paneli typu *sandwich* po obróbce.

Frezy stosowane podczas skrawania kompozytów warstwowych zbudowanych z metali i materiałów kompozytowych różnią od narzędzi konwencjonalnych przede wszystkim geometrią. Liczba i kształt rowków wiórowych oraz kąt pochylenia linii śrubowej wpływają na odprowadzanie wiórów ze strefy skrawania, a więc również na temperaturę i jakość przedmiotu obrabianego. Kąt wierzchołkowy oraz sposób ukształtowania powierzchni natarcia wpływają natomiast na możliwość rozwarstwiania się materiałów [19, 103]. Duże zainteresowanie materiałami kompozytowymi spowodowało, że producenci narzędzi skrawających poświęcają coraz więcej uwagi narzędziom usprawniającym proces frezowania kompozytów, w tym również konstrukcji przekładkowych.



Rys. 1.14. Narzędzia do frezowania hybrydowych konstrukcji przekładkowych: a) frez kompresyjny z przeciwstawnymi ostrzami firmy Sandvik [129], b) pełnowęglkowy frez piramidalny firmy HAM [53], c) frez z ząbkowanym ostrzem firmy Sandvik [129], d) frez do obróbki konstrukcji z rdzeniem o strukturze plastra miodu firmy SPPW GmbH [137], e) pełnowęglkowy frez konturowy z powłoką diamentową firmy HAM [53]

Podstawowym narzędziem oferowanym przez producentów do frezowania hybrydowych konstrukcji przekładkowych są frezy kompresyjne (rys. 1.14 a). Narzędzia te posiadają przeciwstawne ostrza skrawające oraz przeciwbieżne rowki wiórowe. Podczas obróbki frez „ściska” materiał z góry i dołu, dzięki czemu występuje mniejsze prawdopodobieństwo delaminacji [19]. Kolejnym przykładem geometrii są frezy trzpieniowe z piramidalnymi ostrzami i wypolerowanymi rowkami wiórowymi (rys. 1.14 b). Narzędzia te cechują się bardzo ostrymi krawędziami skrawającymi oraz rowkami niezatrzymującymi wióry, dzięki czemu posiadają zwiększoną żywotność oraz skuteczniejszy system odprowadzania wiórów [68]. Frezy o profilu drobnozwojnym są przystosowane do obróbki kompozytów włóknistych o dużej zawartości objętościowej włókien. Narzędzia o profilu grubym znalazły zastosowanie do obróbki kompozytów warstwowych z rdzeniem niejednorodnym [104]. Frezy z ząbkowanymi ostrzami (rys. 1.14 c i 1.14 d) są dobrym rozwiązaniem do obróbki przekładek z rdzeniem o strukturze plastra miodu [101]. Frezy konturowe (rys. 1.14 e) najczęściej stosowane są do krawędziowania materiału, jednak wierzchołek w kształcie litery G pozwala również na wykonywanie kieszeni i rowków [68].

Mimo, iż producenci oferują podobne rozwiązania – powłoki, geometrie, przeciwstawne ostrza czy kompresję – nawet niewielka zmiana jednego z parametrów może powodować osiąganie lepszych efektów frezowania hybrydowych konstrukcji warstwowych.

1.6. Wnioski z analizy stanu zagadnienia

Konstrukcje typu *sandwich* zaliczane są do innowacyjnych materiałów inżynierskich. Konstrukcje te są przedmiotem badań wielu naukowców pod względem możliwych form zniszczenia, mechanizmów przenoszenia obciążeń, właściwości mechanicznych czy sposobu łączenia wraz z oceną ich wytrzymałości.

Przeprowadzony przegląd literatury pozwolił usystematyzować wiedzę odnośnie konstrukcji przekładkowych. Dzięki bardzo dobrym właściwościom konstrukcje warstwowe znalazły zastosowanie między innymi w przemyśle lotniczym, samochodowym, stoczniowym, kolejowym i budownictwie. Ich właściwości są zależne od materiałów tworzących przekładkę. Warstwy zewnętrzne występują zwykle w postaci cienkich okładzin wykonywanych głównie ze stali, stopów miedzi, stopów aluminium i stopów tytanu. Mogą być wykonywane również z kompozytów. Dobór materiału rdzenia jest uzależniony od jego postaci. Wyróżnia się rdzenie jednorodne, spienione i siatkowe.

Łączenie konstrukcji typu *sandwich* można podzielić na dwa etapy: łączenie warstw w konstrukcję przekładkową i łączenie przekładek w konstrukcje wielkogabarytowe. Pierwszy etap realizowany jest zazwyczaj za pomocą połączeń

klejowych i mechanicznych, drugi zaś z zastosowaniem połączeń mechanicznych i spawanych.

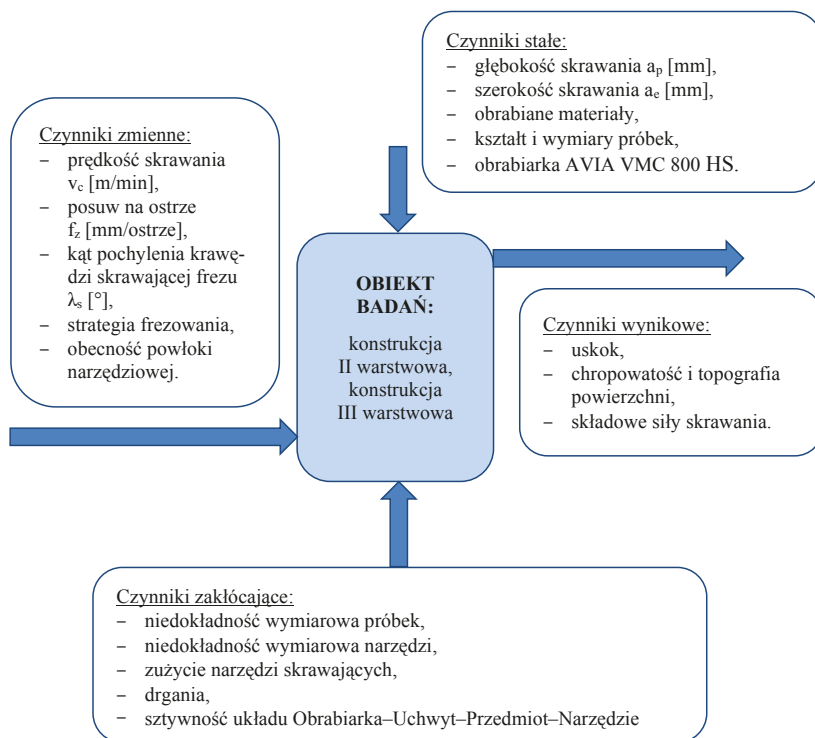
Jednym z głównych wyzwań związanych ze stosowaniem konstrukcji typu *sandwich* jest ich obróbka. Frezowanie jest jedną z form obróbki stosowaną dla tego typu materiałów. Główną trudnością, obok intensywnego zużywania się narzędzia skrawającego, jest występowanie niejednorodnej jakości powierzchni dla poszczególnych warstw. Bardzo istotną kwestią z punktu widzenia dalszego funkcjonowania konstrukcji warstwowej jest zatem odpowiedni wybór narzędzi i parametrów obróbki. Parametry skrawania powinny być dobrane na poziomie zapewniającym oczekiwane efekty obróbki zarówno dla materiału rdzenia, jak i okładek. Bardzo często jednak wartości parametrów odpowiednich dla obróbki warstwy metalowej są zbyt małe dla warstwy kompozytowej. Najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby dostosowanie ich wartości do materiału aktualnie obrabianej warstwy, co niestety nie zawsze jest możliwe. Warunki obróbki dla konstrukcji typu *sandwich* są obecnie dobierane w oparciu o zalecenia dla materiału kompozytowego, a narzędzia skrawające są dedykowane do konkretnej grupy rdzeni.

Rodzaj narzędzia, jego geometria, parametry skrawania, rodzaj i sposób ułożenia materiałów tworzących konstrukcję przekładkową to główne czynniki, które mają wpływ na efektywność obróbki przekładek. Analiza literatury wykazała, że brak jest kompleksowych badań dotyczących jakości powierzchni po obróbce kompozytów warstwowych. Ponadto do tej pory nie utworzono norm i zaleceń określających akceptowalną wartość lub poziom niejednorodności wady po skrawaniu. Mając na uwadze przedstawione powyżej zagadnienia, zasadnym wydaje się przeprowadzenie badań eksperymentalnych, których celem byłoby określenie najkorzystniejszych warunków frezowania i sprawdzenie, czy za pomocą ogólnodostępnych, stosowanych w przemyśle narzędzi można efektywnie obrabiać hybrydowe konstrukcje przekładkowe.

2. Metodyka badań

W rozdziale omówiono argumenty, jakimi kierowano się podczas doboru materiałów do badań, ich sposobu łączenia, geometrii próbek, wyboru metody obróbki, a także doboru narzędzi i parametrów technologicznych obróbki skrawaniem. Scharakteryzowano stanowiska badawcze i pomiarowe. Przedstawiono algorytm postępowania podczas statystycznego opracowywania wyników.

Obiektem badań były II i III warstwowe konstrukcje przekładkowe typu metal – kompozyt polimerowy i metal – kompozyt polimerowy – metal. Na rysunku 2.1 przedstawiono model obiektu badań wraz z oddziałującymi na niego czynnikami oraz rozpatrywanymi danymi wyjściowymi.



Rys. 2.1. Model obiektu badań

Na podstawie badań wstępnych określone zostały następujące czynniki oddziałujące na badany model:

1. Zbiór czynników stałych:

- głębokość skrawania $a_p = 12$ mm,
- szerokość skrawania $a_e = 4$ mm,
- obrabiane materiały: stop aluminium EN AW-2024 w stanie T3 oraz kompozyt epoksydowo-węglowy,
- kształt i wymiary próbki,
- obrabiarka AVIA VMC 800 HS.

2. Zbiór czynników zmiennych:

- prędkość skrawania v_c [m/min],
- posuw na ostrze f_z [mm/ostrze],
- kąt pochylenia krawędzi skrawającej frezu λ_s [°],
- strategia frezowania: Al/CFRP i CFRP/Al,
- obecność powłoki narzędziowej: narzędzie bez powłoki i z powłoką TiAlN.

3. Zbiór czynników zakłócających:

- niedokładność wymiarowa próbek,
- niedokładność wymiarowa narzędzi,
- zużycie narzędzi skrawających,
- drgania,
- sztywność układu OUPN (Obrabiarka–Uchwyt–Przedmiot–Narzędzie).

4. Zbiór czynników wynikowych:

- uskok,
- chropowatość i topografia powierzchni,
- składowe siły skrawania F_x , F_y i F_z .

W eksperymencie zbadano wpływ parametrów technologicznych, geometrii narzędzia, strategii obróbki i obecności powłoki narzędziowej na jakość powierzchni konstrukcji przekładkowych po frezowaniu.

Jakość powierzchni po obróbce skrawaniem zależy głównie od właściwości obrabianego materiału, geometrii ostrza skrawającego, przyjętych parametrów skrawania, warunków chłodzenia, stopnia zużycia ostrza narzędzia skrawającego i sztywności układu OUPN (Obrabiarka–Uchwyt–Przedmiot–Narzędzie). Niejednorodność i anizotropia materiałów mają negatywny wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową obrabianych elementów oraz efektywność obróbki. W przypadku hybrydowych paneli typu *sandwich* trudności pojawiają się już na etapie skrawania warstwy kompozytowej. Obróbka hybrydowych konstrukcji przekładkowych powinna zatem łączyć cechy obróbki metalu i materiałów kompozytowych. Bardzo ważnym aspektem jest dobór optymalnych parametrów skrawania oraz geometrii narzędzia pozwalających na efektywne skrawanie materiałów tworzących przekładkę. Dlatego w pierwszej kolejności skupiono się na

wytypowaniu optymalnych parametrów technologicznych i geometrii frezu, które pozwoliłyby otrzymać najmniejszą wartość uskoku.

Konfiguracja materiałów w trakcie obróbki może prowadzić do występowania różnej jakości powierzchni konstrukcji warstwowej po frezowaniu. Jest to spowodowane różnymi właściwościami materiałów tworzących przekładkę. W przypadku konstrukcji III warstwowej konfiguracja w trakcie obróbki nie powinna znacząco wpływać na występowanie wad – materiał o mniejszej gęstości (CFRP) jest ograniczony z dwóch stron przez okładki o większej gęstości (Al). Różnica może występować podczas frezowania konstrukcji II-warstwowej. W niniejszej pracy zastosowano trzy strategie obróbkowe:

- frezowanie II warstwowej konstrukcji przekładkowej typu stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy, rozpoczynając od warstwy metalowej (Al/CFRP) (rys. 2.2 a),
- frezowanie II warstwowej konstrukcji przekładkowej typu kompozyt epoksydowo-węglowy – stop aluminium, rozpoczynając od warstwy kompozytowej (CFRP/Al) (rys. 2.2 b),
- frezowanie III warstwowej konstrukcji przekładkowej typu stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy – stop aluminium (Al/CFRP/Al).

a)



b)



Rys. 2.2. Rozpatrywane konfiguracje frezowania dla struktury II warstwowej: a) Al/CFRP, b) CFRP/Al

Obecność powłoki narzędziowej wydaje się mieć również wpływ na jakość obrabianych powierzchni. Powłoka narzędziowa wpływa na zmniejszenie zużycia narzędzia, a tym samym powinna zwiększać jakość powierzchni obrabianych elementów. Z drugiej jednak strony, stanowi dodatkową warstwę powodującą zaokrąglenie krawędzi skrawającej, co może negatywnie oddziaływać na jakość powierzchni po obróbce.

Jedną ze strategii frezowania konstrukcji przekładkowych jest zmniejszenie składowych siły skrawania. Prowadzi to do ograniczenia występowania typowych form zniszczenia tego typu konstrukcji (delaminacji, wrywania włókien, pęknięcia osnowy etc.), jednakże może powodować także spadek efektywności obróbki. Dlatego w pracy podjęto próbę porównania maksymalnych wartości składowych siły skrawania zarejestrowanych podczas obróbki konstrukcji II warstwowej narzędziem niepowlekanym i narzędziem z powłoką TiAlN w dwóch rozpatrywanych konfiguracjach (Al/CFRP i CFRP/Al).

Jakość powierzchni materiałów warstwowych po obróbce skrawaniem jest definiowana za pomocą wad powstających na powierzchni obrabianej. Dokładność wykonania może być również określana za pomocą poziomu jednorodności tych wad na przekroju konstrukcji – różnicą między wartością wady na powierzchni metalu a wartością wady na powierzchni kompozytu polimerowego.

Do oceny jakości powierzchni po frezowaniu rozpatrywanej konstrukcji przekładkowej zastosowano uskok oraz chropowatość i topografię powierzchni.

Uskok powstający po frezowaniu hybrydowych konstrukcji przekładkowych można zdefiniować jako różnicę między średnimi wartościami profilu powierzchni materiałów tworzących konstrukcję typu *sandwich* (rys. 2.11). Uskok jest skutkiem nadawania przedmiotowi obrabianemu geometrii przez frez w wyniku jego przemieszczania się ruchem posuwowym. W związku z tym, że poszczególne warstwy konstrukcji mają różne właściwości, narzędzie podczas obróbki napotyka różne opory skrawania. Podczas frezowania materiału okładek, narzędzie jest „odpychane” od przedmiotu obrabianego. Jednocześnie narzędzie obrabia materiał rdzenia posiadającego mniejszą gęstość w porównaniu do materiału okładek, co prowadzi do nagłej zmiany oporów skrawania i „wciągania” narzędzia w głąb obrabianego materiału. Efektem tego jest powstawanie niejednorodnej jakości na powierzchni konstrukcji, co negatywnie wpływa na jej dalszą eksploatację. Uskok jest także skutkiem różnicy sztywności na rozciąganie okładek i rdzenia.

2.1. Dobór materiałów do badań

W eksperymencie badaniom poddano hybrydową konstrukcję przekładkową. Ideą tego typu materiału jest uzyskanie lekkiej i sztywnej konstrukcji o bardziej pożądanych właściwościach niż analogiczna konstrukcja lita. Cel ten

jest realizowany poprzez użycie warstw zewnętrznych z materiałów o dużych wartościach wytrzymałości na rozciąganie i sztywności oraz rdzenia wykonanego z lekkich materiałów. Na podstawie analizy stanu wiedzy i własnych doświadczeń wytypowano dwa rodzaje materiałów tworzących przekładkę: stop aluminium EN AW-2024 w stanie T3 [107] oraz kompozyt epoksydowo-węglowy (CFRP). Każdy z użytych materiałów występował w postaci płyty o wymiarach 500x500 mm i grubości 6 mm. W badaniu użyto łącznie 5 płyt – 3 płyty ze stopu aluminium oraz 2 płyty wykonane z kompozytu epoksydowo-węglowego. Materiały te zostały dobrane z uwagi na ich coraz częstsze zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza w przemyśle lotniczym.

Stop aluminium EN AW-2024 należy do grupy materiałów, których głównym składnikiem stopowym jest miedź, dzięki czemu cechuje się małą gęstością i zwiększoną granicą plastyczności [75]. Stop ten posiada małą odporność na utlenianie, dlatego też nie nadaje się do rozwiązań, gdzie występuje ryzyko korozji. Materiał ten jest obrabialny, ale nie nadaje się do anodowania i spawania. Jednym z obszarów jego stosowania jest przemysł lotniczy – kadłuby samolotów, elementy napinające skrzydła, poszycia samolotów, przegrody, nośniki, barierki ochronne, mechanizmy zwrotnicze. Oprócz tego materiał ten znalazł zastosowanie w przemyśle samochodowym, kolejowym i budownictwie. Zastosowany w badaniach stop wystąpił w stanie T3 – przesyciony, odkształcony na zimno i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu. W tabeli 2.1 przedstawiono wybrane właściwości zastosowanego stopu aluminium.

Tabela 2.1. Wybrane właściwości mechaniczne stopu aluminium EN AW 2024 w stanie T3 [108]

Granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]	345
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	485
Wydłużenie A_{50} [%]	18
Twardość HB	120
Wytrzymałość na ścinanie R_t [MPa]	285
Wytrzymałość zmęczeniowa Z [MPa]	140
Moduł Younga E [GPa]	73

Drugim materiałem tworzącym badaną konstrukcję warstwową był kompozyt epoksydowo-węglowy. Jako osnowę w kompozycie użyto termoutwardzalną żywicę epoksydową CP006 firmy C-M-P gmbh (Heinsberg, Niemcy) o minimalnym

współczynnika lepkości 1050 mPas. Jako wzmocnienie użyto wysokowytrzymałe włókna węglowe w postaci tkaniny o naprzemiennym ułożeniu włókien. W tabeli 2.2 przedstawiono charakterystykę użytego pre-pregu.

Tabela 2.2. Charakterystyka wzmocnienia materiału kompozytowego [72]

Gramatura włókna [g/m ²]	20
Zawartość żywicy [%]	90
Gramatura pre-pregu [g/m ²]	245
Szerokość [mm]	1
Splot	skośny 2/2

Kompozyt został wytworzony w procesie próżniowo-ciśnieniowej impregnacji za pomocą autoklawu firmy Scholz (Coesfeld, Niemcy). Udział objętościowy włókien węglowych w utwardzonym kompozycie wyniósł około 60%. W tabeli 2.3 przedstawiono wybrane właściwości zastosowanego kompozytu epoksydowo-węglowego.

Tabela 2.3. Wybrane właściwości kompozytu epoksydowo-węglowego [36, 37]

Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	1900
Moduł Younga E [GPa]	135
Wytrzymałość na zginanie R_{eg} [MPa]	2050
Moduł sprężystości przy zginaniu k [GPa]	130
Pozorna wytrzymałość na ścinanie pomiędzy warstwami ILSS [MPa]	85

Utwardzanie kompozytu odbywało się w temperaturze 130°C przez 60 minut z zastosowaniem ciśnienia 0,4 MPa oraz podciśnienia 0,09 MPa. Gradient nagrzewania i chłodzenia płyty kompozytowej wynosił 2°C/min. Na powierzchniach zewnętrznych płyt naniesiono tkaninę delaminażową z myślą o usprawnieniu procesu klejenia. Po wyznaczonym okresie utwardzania, z krawędzi płyt usunięto ręcznie pozostałości żywicy i pojedynczych włókien.

2.2. Klejenie materiałów

Przed przystąpieniem do łączenia materiałów przeprowadzono procesy przygotowania powierzchni właściwe dla każdego z materiałów tworzącego konstrukcję typu *sandwich*. Oba materiały zostały przygotowane w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 231°C i wilgotności 362%. W przypadku płyt wykonanych ze stopu aluminium powierzchnie zostały przygotowane za pomocą następujących operacji:

1. Wstępne odtłuszczenie powierzchni acetonem przy użyciu bezpyłowego czyszciva Sunatra.
2. Ręczne szlifowanie powierzchni włókniną ścierną Scotch-Brite 07447+ w kierunku prostopadłym, aż do momentu uzyskania jednorodnych rys na powierzchni.
3. Ponowne odtłuszczenie acetonem z użyciem bezpyłowego czyszciva Sunatra.
4. *Waterbreak test* – naniesienie na przygotowywane powierzchnie wody destylowanej za pomocą bezpyłowego czyszciva Sunatra i sprawdzanie obecności filmu wody.
5. Oczekiwanie do wyschnięcia – 30 minut.
6. Naniesienie na oczyszczone powierzchnie substancji typu zol-żel (AC-130-2 firmy 3M) za pomocą zamoczonej bezpyłowej tkaniny Sunatra – równomierna warstwa nanoszona pasami w kierunku poprzecznym, a następnie w kierunku wzdłużnym oraz ciągle zwilżanie powierzchni przez okres 1 minuty.
7. Sprawdzenie występowania zacieków i plam na przygotowywanych powierzchniach.
8. Oczekiwanie do wyschnięcia – 1 godzina.
9. Wykonanie połączenia klejowego – po 4 godzinach od naniesienia warstwy zol-żel.

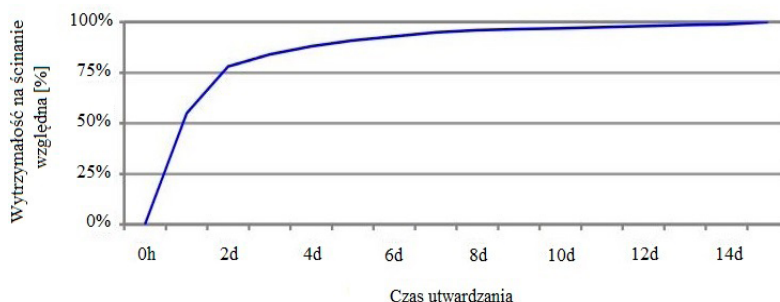
Proces przygotowania powierzchni płyt kompozytowych polegał na usunięciu bezpośrednio przed procesem łączenia tkaniny delaminazowej z powierzchni płyt, a następnie usunięcie zabrudzeń z łączonych powierzchni za pomocą sprężonego powietrza o ciśnieniu 0,5 MPa przez około 1 minutę z każdej strony.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury zdecydowano się na łączenie płyt za pomocą klejenia z zastosowaniem strukturalnego kleju epoksydowego 3M Scotch-Weld EC-9323 B/A (3M, Minnesota, USA). Jest to dwuskładnikowy, przemysłowy klej wiążący w temperaturze pokojowej lub pod działaniem podwyższonej temperatury. Ogólne właściwości komponentów kleju zamieszczono w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Wybrane właściwości składników kleju 3M Scotch-Weld EC-9323 B/A [59]

Cecha	Część B	Część A
Stan fizyczny	ciało stałe	ciało stałe
Postać	czerwona, gęsta pasta	białawy, lekki żel
Gęstość	1,18 g/cm ³	1,06 g/cm ³
Lepkość	700 Pas	18 Pas
Temperatura wrzenia	100°C	brak danych
Temperatura zapłonu	100°C	150°C
Rozpuszczalność w wodzie	nieznaczna	nierozpuszczalny

Pełny czas utwardzania użytej kompozycji klejowej wynosi 14 dni w temperaturze 232°C (rys. 2.3). Produkt dedykowany jest do adhezji szerokiego spektrum materiałów: metalu, ceramiki, szkła i tworzyw sztucznych, w tym kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami węglowymi i szklanymi. Klej charakteryzuje się dużą odpornością na ścinanie i zrywanie w pokojowej lub podwyższonej temperaturze oraz odpornością na działanie środków chemicznych i warunków środowiskowych, stąd też może być używany do łączenia komponentów w przemyśle lotniczym.

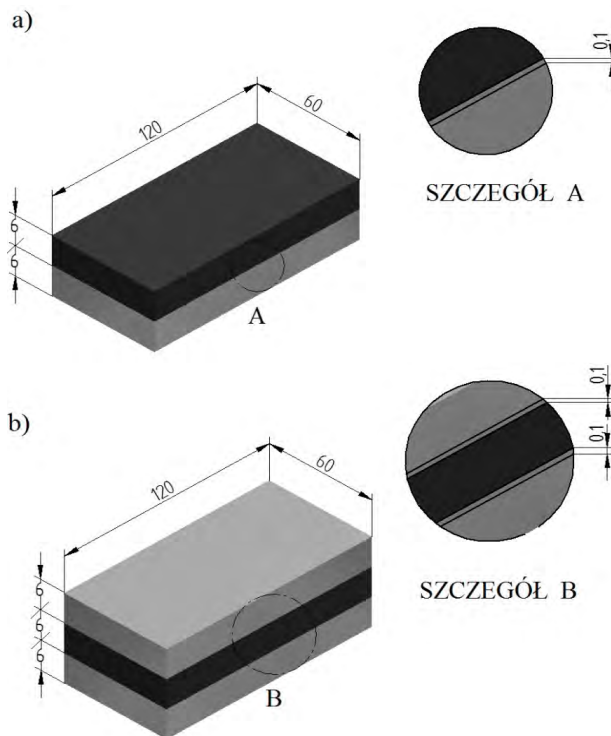
**Rys. 2.3.** Wzrost wytrzymałości połączenia adhezyjnego podczas utwardzania kleju 3M Scotch-Weld EC-9323 B/A [59]

Składniki kleju zostały zmieszane tuż przed aplikacją w stosunku wagowym 100:27. Następnie zostały ręcznie mieszane, aż do uzyskania jednolitego koloru. Tak powstałą kompozycję klejową naniesiono ruchem jednostajnym równomierną warstwą o grubości 0,10,02 mm na obie łączone powierzchnie za pomocą szpachelki o szerokości 100 mm. W dalszej kolejności jedną z płyt umieszczono na folii ciągłej znajdującej się na blacie stołu roboczego, następnie zorientowano pozostałe płyty, doprowadzono do ich styku i równomiernie dociśnięto. Na tak ustalone elementy nałożona została folia perforowana i włóknina umożliwiająca odsysanie powietrza podczas utwardzania. Całość przykryto folią przeponową, którą przyklejono bezpośrednio do blatu stołu i uszczelniono taśmą butylową. Płyty umieszczono w worku próżniowym pod ciśnieniem 0,1 MPa, gdzie były przetrzymywane przez 24 godziny, a następnie sezonowane 14 dni na powietrzu. Procesy polimeryzacji w worku próżniowym i sezonowania przeprowadzone zostały w temperaturze 231°C i wilgotności 35%2%.

2.3. Model przedmiotu obrabianego

W pracy użyto próbki, których geometrie stanowią uproszczenie rzeczywistych konstrukcji stosowanych w przemyśle. Badano dwie grubości przekładek: konstrukcje składające się z dwóch i trzech warstw materiałów, tzw. konstrukcje II i III warstwowe. Panele typu *sandwich* stosowane w przemyśle zbudowane są zwykle z warstw zewnętrznych w postaci cienkich okładzin oraz grubszego rdzenia wykonanego z innego materiału. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać dużą sztywność konstrukcji bez nadmiernego jej obciążania. W niniejszej pracy, ze względu na możliwości badawcze, przyjęto jednakową grubość warstw równą 6 mm.

W celu uzyskania założonej geometrii próbek, sklejone płyty zostały pocięte wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną za pomocą przecinarki portalowej COMBO firmy Eckert AS (Legnica, Polska) z zastosowaniem następujących parametrów technologicznych: prędkość przecinania $v_c = 200$ m/min, odległość dyszy tnącej od przedmiotu obrabianego $H = 3$ mm, ciśnienie strugi wodno-ścierniej $P = 300$ MPa, wydatek ścierniwa $Q = 0,5$ kg/min. Kształt i wymiary próbek będących przedmiotem badań przedstawiono na rysunku 2.4. Grubość warstwy kleju z uwagi na jej niewielką wartość (0,10,02 mm), nie była brana pod uwagę przy określaniu całkowitej grubości konstrukcji.

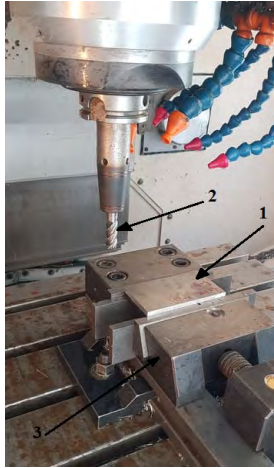


Rys. 2.4. Kształt i wymiary próbek: a) konstrukcja II warstwowa, b) konstrukcja III warstwowa

W celu usunięcia zadziorów i nierówności po cięciu, próbki wstępnie obrobiono frezując je na wymiar 60x120x12 mm i 60x120x18 mm (IT14) (rys. 2.4).

2.4. Dobór narzędzi i parametrów obróbki

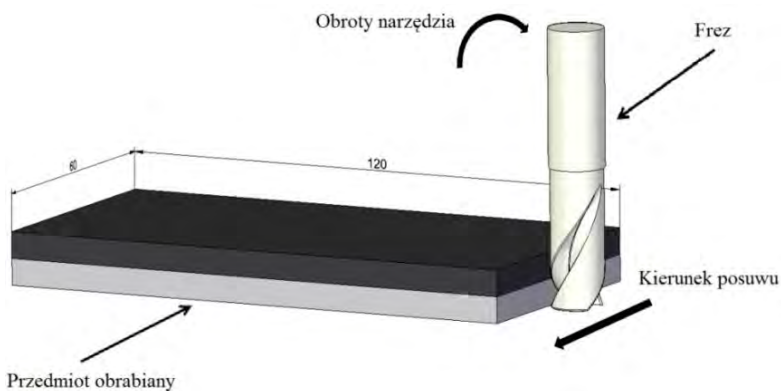
Z uwagi na fakt, że konstrukcje przekładkowe są zwykle wytwarzane w kształcie zbliżonym do ostatecznego, do obróbki przyjętego elementu zdecydowano się zastosować proces frezowania obwodowego współbieżnego. Obróbkę przeprowadzono na pionowym centrum obróbkowym AVIA VMC 800 HS (Warszawa, Polska). Schemat zamocowania próbki podczas frezowania przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Zamocowanie próbki w trakcie frezowania: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – narzędzie, 3 – imadło maszynowe

Na rysunku 2.6 przedstawiono schematyczny przebieg obróbki, który oprócz zorientowania próbki, był jednakowy dla wszystkich przyjętych konfiguracji.

Obróbkę przeprowadzono ze stałą głębokością skrawania $a_p = 12$ mm oraz stałą szerokością skrawania $a_e = 4$ mm. Wartość parametru a_p została dobrana tak, aby umożliwić jednoczesne skrawanie warstw konstrukcji. Każda próbka została obrobiona trzykrotnie – analizowane wyniki były średnią arytmetyczną z pomiarów trzech próbek, a wynik każdej z próbek był średnią arytmetyczną z odczytów w trzech punktach pomiarowych.



Rys. 2.6. Schemat obróbki

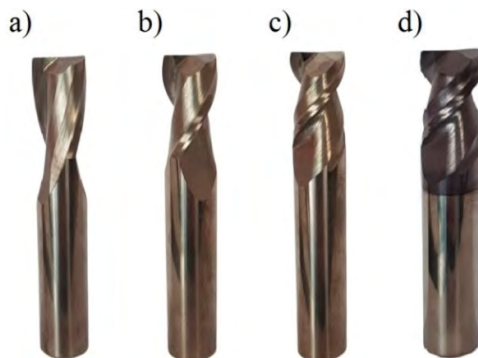
W celu ograniczenia wpływu temperatury na otrzymane wyniki, frezowanie przeprowadzono z zastosowaniem chłodzenia za pomocą emulsji Emulgol ES-12 (Orlen, Łódź, Polska).

Narzędzia skrawające, ze względu na specyfikę przedmiotu obrabianego, zostały dobrane w oparciu o możliwość obróbki stopów aluminium i kompozytów włóknistych. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury, w badaniach wstępnych i zasadniczych zdecydowano się użyć dwuostrzowe, trzpieniowe frezy marki Garant firmy Hoffman Group (Monachium, Niemcy) o średnicy części roboczej $D_c = 12$ mm, kącie natarcia $\gamma = 16^\circ$, fazie w narożu 45° i długości fazy równej 0,12 mm (tabela 2.5). Materiałem narzędzi jest drobnoziarnisty węgiel spiekany K10F (90% WC, 10% Co). Wytypowane narzędzia są dedykowane do obróbki odlewniczych stopów aluminium, stopów aluminium do obróbki plastycznej oraz materiałów polimerowych [56].

Tabela 2.5. Charakterystyka użytych narzędzi [56]

Symbol	Liczba ostrzy z	Średnica części roboczej D_c [mm]	Kąt pochylenia krawędzi skrawającej frezu λ_s [°]	Długość części roboczej L_s [mm]	Długość całkowita $L_{\text{całk.}}$ [mm]	Powłoka
20644	2	12	20	20	70	Nie
20645	2	12	35	20	70	Nie
20646	2	12	45	20	70	Nie
20646 891/9	2	12	45	20	70	TiAlN

Badania wstępne obejmowały frezowanie II warstwowej konstrukcji przekładkowej w konfiguracji Al/CFRP. Na tym etapie eksperymentu określono wpływ geometrii narzędzia na wartość uskoku. Obróbkę wykonano trzema niepowlekanymi frezami, różniącymi się kątem pochylenia krawędzi skrawającej λ_s , którego wartości wynosiły odpowiednio 20° , 35° i 45° (rys. 2.7 a, b, c).



Rys. 2.7. Narzędzia użyte w badaniach: a) frez niepowlekany o kącie $\lambda_s = 20^\circ$, b) frez niepowlekany o kącie $\lambda_s = 35^\circ$, c) frez niepowlekany o kącie $\lambda_s = 45^\circ$, d) frez z powłoką TiAlN o kącie $\lambda_s = 45^\circ$ [53]

Na etapie badań wstępnych, oprócz wpływu geometrii narzędzia na jakość powierzchni, sprawdzono również wpływ prędkości skrawania v_c [m/min] i posuwu na ostrze f_z [mm/ostrze]. Przyjęto po pięć wartości dla każdego z badanych parametrów (tabela 2.6). Dobierając wartości parametrów uwzględniono wartości zalecane przez producenta, to jest maksymalną i minimalną wartość danego parametru dla skrawania stopów aluminium, maksymalną i minimalną wartość danego parametru dla skrawania kompozytów polimerowych oraz wartość pośrednią dla obu materiałów.

Tabela 2.6. Plan badań wstępnych

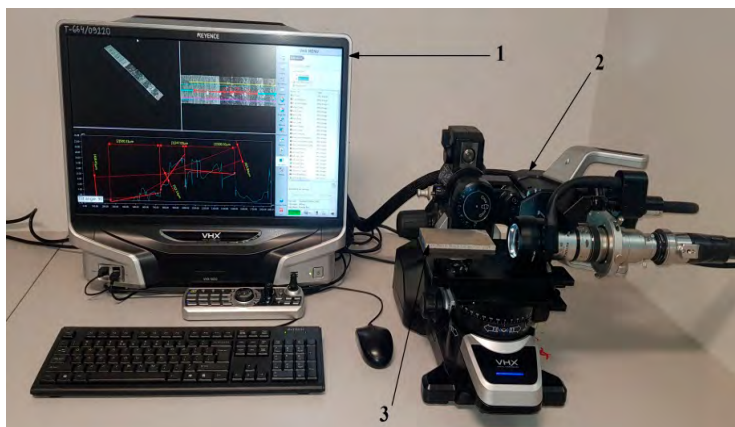
Lp.	Parametr	
	v_c [m/min]	f_z [mm/ostrze]
1	80	0,08
2	200	
3	300	
4	400	
5	500	
6	300	0,04
7		0,06
8		0,08
9		0,10
10		0,12

Po zakończeniu badań wstępnych dokonano analizy rezultatów pod względem wytypowania najkorzystniejszej geometrii narzędzia oraz najkorzystniejszego zestawu parametrów skrawania. Kryterium oceny była najmniejsza wartość uskoku. W badaniach zasadniczych użyto niepowlekany frez o kącie pochylenia krawędzi skrawającej $\lambda_s = 45^\circ$ (rys. 2.6 c) oraz frez o kącie $\lambda_s = 45^\circ$ pokryty tytanowo-aluminiową powłoką TiAlN o grubości $5\ \mu\text{m}$, nakładaną metodą PVD (ang. *Physical Vapour Deposition*) (rys. 2.7 d). Metoda ta polega na fizycznym osadzaniu cienkich warstw z fazy gazowej w warunkach zmniejszonego ciśnienia ($0,1\ \text{Pa}$ – $1\ \text{Pa}$) i podwyższonej temperatury (300°C – 700°C) [144]. Powłoka TiAlN należy do grupy przeciwzużyciowych powłok nanowarstwowych, których głównym zadaniem jest ograniczenie przepływu ciepła w miejscu styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, co skutkuje poprawą wydajności procesu skrawania i wydłużeniem okresu żywotności narzędzia. Jest to szczególnie ważne podczas frezowania kompozytów CFRP. Powłoka TiAlN cechuje się dużą twardością i odpornością na utlenianie. Jest ona stosowana do powlekania ostrzy narzędzi skrawających wykonanych ze stali szybko tnących i węglików spiekanych do toczenia, frezowania, wiercenia i gwintowania stali węglowych i stopowych (do 52 HRC), stali nierdzewnych, stopów aluminium, stopów tytanu, stopów niklu, żeliwa i innych materiałów [29].

Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach wstępnych, badania zasadnicze przeprowadzono stosując następujące parametry skrawania: $v_c = 300\ \text{m/min}$, $f_z = 0,08\ \text{mm/ostre}$.

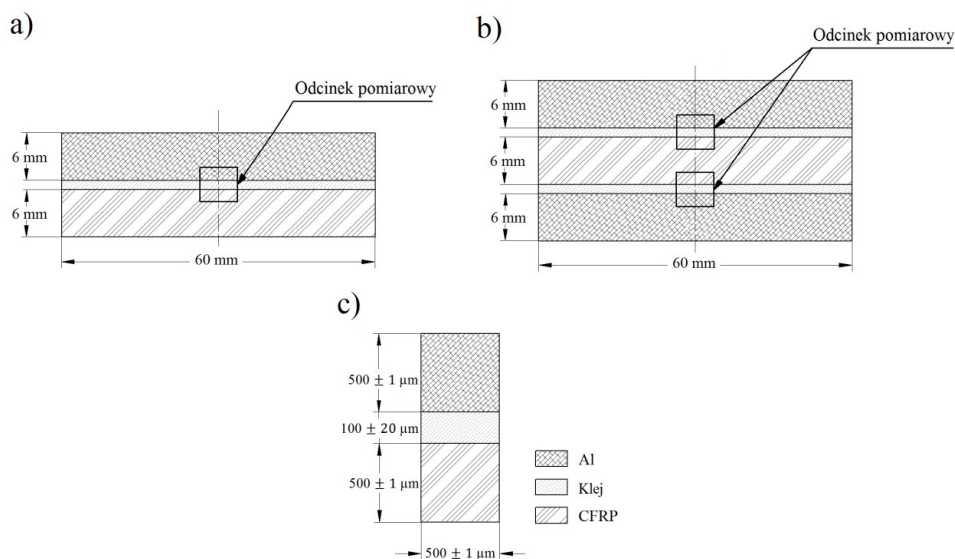
2.5. Metodyka pomiarów analizowanych wielkości

Pomiary uskoku II i III warstwowych próbek dokonano za pomocą mikroskopu cyfrowego VHX-500 firmy Keyence (Osaka, Japonia). Urządzenie pomiarowe umożliwiało rejestrację obrazu z dużą rozdzielczością pomiarową (0,01). Pomiary dokonywano przy powiększeniu 500-krotnym. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.8.



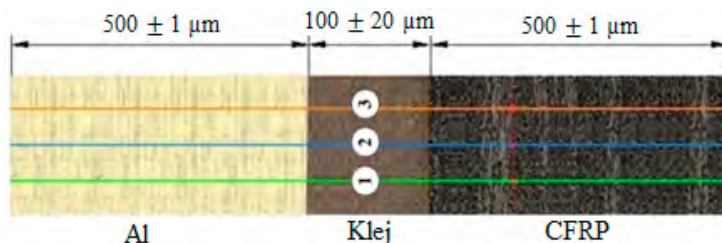
Rys. 2.8. Schemat stanowiska do pomiaru uskoku: 1 – jednostka centralna, 2 – mikroskop cyfrowy VHX-500, 3 – badana próbka

Pomiary uskoku zostały wykonane na wyodrębnionym odcinku pomiarowym, którego wymiary przedstawiono na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Schemat odcinka pomiarowego: a) umiejscowienie względem konstrukcji II warstwowej, b) umiejscowienie względem konstrukcji III warstwowej, c) wymiary

W obrębie odcinka pomiarowego wyróżniono 3 punkty pomiarowe (rys. 2.10). Odległość między punktami pomiarowymi wynosiła 125 μm . Otrzymana wartość uskoku dla każdej z próbek była średnią z odczytów w 3 punktach pomiarowych.



Rys. 2.10. Odcinek pomiarowy z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

W każdym punkcie pomiarowym wyznaczono profil powierzchni (profil powstający przez przecięcie powierzchni płaszczyzną prostopadłą do powierzchni rzeczywistej) rozpatrywanej konstrukcji przekładowej (rys. 2.11 – linia w kolorze zielonym). Następnie wyznaczono średnie wartości profilu powierzchni dla stopu aluminium (U_{Al}) i kompozytu epoksydowo-węglowego (U_{CFRP}) (rys. 2.11 – linie w kolorze czerwonym) i zmierzono odległość między nimi. Wartość uskoku w danym punkcie pomiarowym była różnicą między średnią wartością profilu powierzchni stopu aluminium a średnią wartością profilu powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego po frezowaniu i wyrażona została jako:

$$U = |U_{Al} - U_{CFRP}| \quad (2.1)$$

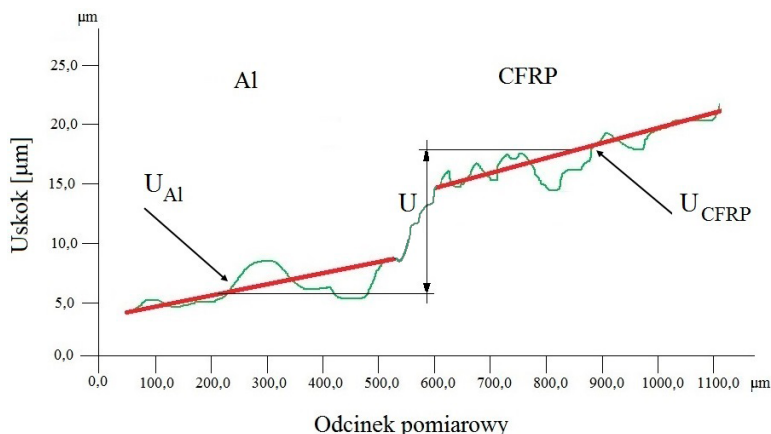
gdzie:

U – wartość uskoku [μm],

U_{Al} – średnia wartość profilu powierzchni stopu aluminium [μm],

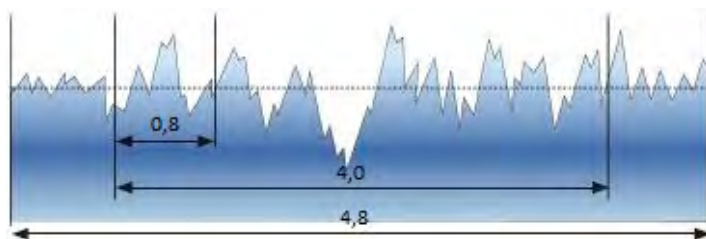
U_{CFRP} – średnia wartość profilu powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego [μm].

W przypadku konstrukcji III warstwowej przyjęto analogiczny algorytm dokonywania pomiarów. Różnicą w stosunku do konstrukcji II warstwowej było zwiększenie grubości próbki o dodatkową warstwę stopu aluminium (rys. 2.8 b). Ze względu na ograniczony zakres pomiarowy mikroskopu, pomiary dla konstrukcji III warstwowej zostały podzielone na pomiary uskoku górnego (U_g) i uskoku dolnego (U_d).



Rys. 2.11. Wyznaczanie uskoku po frezowaniu

Chropowość i topografię powierzchni zbadano za pomocą urządzenia do pomiaru chropowości, falistości oraz topografii powierzchni 3D T8000 RC120-400 firmy Hommel-Etamic (Jena, Niemcy). Pomiary chropowości wykonano wyłącznie dla konstrukcji II warstwowej w odległości $\frac{1}{2}$ grubości od krawędzi próbki, tak aby odcinek pomiarowy znajdował się na środku badanej warstwy. Pomiary wykonano dla próbek frezowanych w dwóch rozpatrywanych konfiguracjach z użyciem narzędzia niepowlekanego i narzędzia z powłoką TiAlN. Chropowość i topografię powierzchni zmierzono osobno dla każdej z warstw tworzących konstrukcję w kierunku wzdłużnym do kierunku posuwu. Długość całkowita pomiaru l_t , długość odcinka pomiarowego l_n i długość odcinka elementarnego l_r wynosiły, odpowiednio: $l_t = 4,8$ mm, $l_n = 4,0$ mm, $l_r = 0,8$ mm (rys. 2.12) [112].

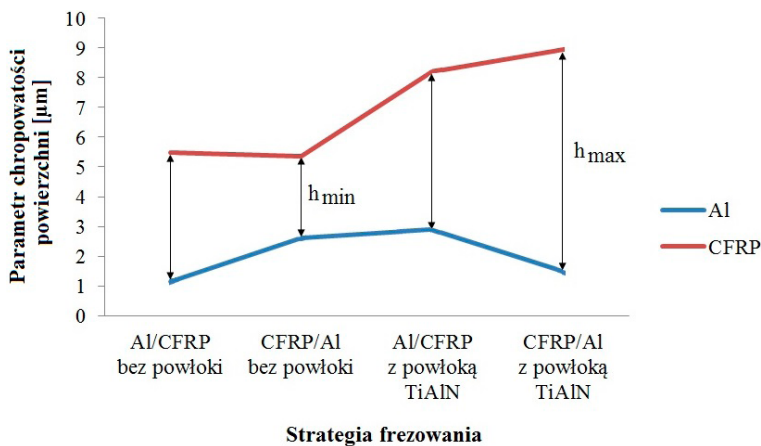


Rys. 2.12. Pomiary chropowości i topografii powierzchni [61, 158]

Na podstawie analizy literatury [114, 141] stwierdzono, że do badań chropowości powierzchni kompozytów włóknistych najbardziej odpowiednimi są parametry R_t , R_{max} i R_z . Wynika to z faktu, że uwzględniają one efekty rozwarstwiania i odrywania włókien. Ze względu na warstwę metalową analizowano również parametr R_a . Do pełnej oceny jakości po obróbce skrawaniem określono

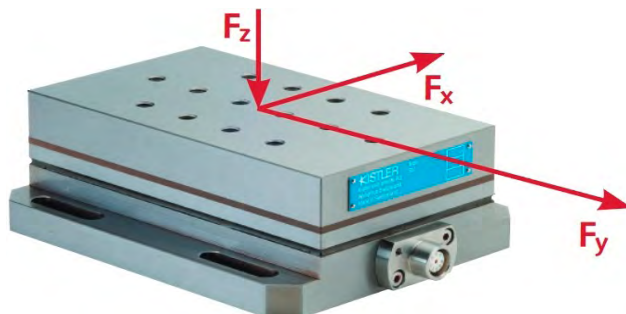
i porównano także topografie powierzchni próbek. Podczas badań rejestrowano i rozpatrywano następujące parametry chropowatości 2D i 3D [111]: R_a – (średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości, R_t – całkowita wysokość profilu chropowatości, R_{max} – maksymalna wysokość profilu chropowatości), R_z (największa wysokość profilu chropowatości, S_a – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni, S_z – maksymalna wysokość powierzchni, S_p – maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni, S_v – maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni) [110]. Przeprowadzone pomiary parametrów 2D i 3D chropowatości powierzchni rozpatrywanych próbek, obejmowały wykonanie 320 pomiarów na powierzchni każdej próbki.

Oprócz uskuoku i chropowatości powierzchni jakość po frezowaniu hybrydowych konstrukcji przekładkowych może być definiowana również jednorodnością lub równomiernością rozłożenia wady na powierzchni obrobionej. Wynika to z faktu, że warstwa metalowa może cechować się odmienną jakością powierzchni w stosunku do warstwy kompozytowej [135]. W związku z tym, na podstawie parametrów chropowatości powierzchni określono jednorodność konstrukcji II warstwowej w zależności od przyjętej strategii frezowania i zastosowanego narzędzia. Przyjęto, że najbardziej jednorodną powierzchnię uzyskano dla najmniejszej różnicy wartości danego parametru chropowatości między warstwami (h_{min}), zaś najmniej jednorodną dla różnicy największej (h_{max}) (rys. 2.13).



Rys. 2.13. Wyznaczanie jednorodności powierzchni konstrukcji II warstwowej

Składowe siły skrawania mierzono przy użyciu siłomierza Kistler 9257B (Kistler, Winterthur, Szwajcaria) podłączonego do wzmacniacza 5017B. Na rysunku 2.14 przedstawiono schemat urządzenia wraz z zaznaczonymi składowymi siłami skrawania.



Rys. 2.14. Siłomierz Kistler 9257B [60]

Za pomocą specjalistycznego oprogramowania oraz karty akwizycji danych rejestrowano wartości składowych siły skrawania F_x , F_y i F_z . Częstotliwość próbkowania wynosiła 5 kHz. Przyjęte wartości składowych siły skrawania były średnią arytmetyczną z odczytów z 3 próbek. Wartości składowych siły skrawania F_x , F_y i F_z w obrębie każdej próbki były średnią arytmetyczną z 30 największych wskazań siłomierza.

2.6. Statystyczne opracowanie wyników

Do statystycznego opracowania wyników zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji ANOVA (ang. *analysis of variance*). Jest to rozszerzenie jednoczynnikowej analizy wariancji służące do oceny istotności różnic między średnimi przez porównania wyników zmiennej zależnej w grupach wydzielonych ze względu na wartości zmiennych niezależnych (czynniki klasyfikujących). Metoda ta opiera się na podziale całkowitej sumy kwadratów ($SS_{\text{cała}}$) odchyleń wszystkich pomiarów od średniej na sumę kwadratów będącą efektem błędów doświadczalnych (SS_{reszta}) oraz sumę kwadratów będącą efektem wprowadzenia czynnika doświadczalnego (SS_{efekt}). Analiza dla układów czynnikowych pozwala dodatkowo na określenie efektu interakcji czynników – wpływu czynnika A na wartości przyjmowane przez czynnik B. Gdy wpływ ten ulega zmianie – zachodzi interakcja, gdy pozostaje niezmienny – interakcja między czynnikami nie występuje. Analiza wariancji zakłada, że:

1. zmienna zależna jest niezależna w rozważanych grupach,
2. zmienna zależna jest mierzalna,
3. zmienna zależna ma rozkład normalny w każdej grupie,
4. zmienna zależna wykazuje jednorodność wariancji we wszystkich grupach.

W przypadku wieloczynnikowej analizy wariancji ANOVA złamanie powyższych założeń nie skutkuje jednak koniecznością stosowania testów nieparametrycznych. Mimo, iż założenie o równoliczności obserwacji w poszczególnych grupach nie jest wymagane, to dla grup równolicznych dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA jest odporna na niespełnienie założeń o normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

W niniejszej pracy zastosowano projekt złożony z dwóch czynników, każdy z nich występował na dwóch poziomach. Zmiennymi zależnymi były wyniki uskoku i chropowatości powierzchni. Jako czynniki klasyfikujące (zmienne niezależne) przyjęto strategię frezowania (S) oraz obecność powłoki narzędziowej (P). Podczas analizy statystycznej testowano następujące hipotezy zerowe:

$H_{0S} = \mu_{S1} = \mu_{S2} = \dots = \mu_{Ak}$ – strategia frezowania nie różnicuje wyników eksperymentu,

$H_{0P} = \mu_{P1} = \mu_{P2} = \dots = \mu_{Pk}$ – obecność powłoki narzędziowej nie różnicuje wyników eksperymentu,

$H_{0SP} = \mu_{SP1} = \dots = \mu_{SPk}$ – między czynnikami S i P nie występuje interakcja,

wobec hipotez alternatywnych:

$H_{1S}: \sim H_{0S}$

$H_{1P}: \sim H_{0P}$

$H_{1SP}: \sim H_{0SP}$

Na rysunku 2.15 zamieszczono schemat blokowy przeprowadzonej analizy statystycznej.

Analizę statystyczną rozpoczęto od określenia normalności rozkładów badanych zmiennych. W tym celu wykonano test Shapiro-Wilka sprawdzający zgodność rozkładów z krzywą Gaussa. Obliczoną wartość statystyki testowej W porównano z krytyczną wartością statystyki W_{kr} odczytaną z odpowiednich tablic dla zadanej liczby pomiarów n . W przypadku, gdy WW_{kr} przyjęto, że badana zmienna ma rozkład normalny lub zbliżony do normalnego. Jeżeli statystyka testowa osiąga istotność statystyczną ($W > W_{kr}$ i $p < 0,05$) rozkład badanej zmiennej jest oddalony od krzywej Gaussa. Następnie badano jednorodność wariancji w porównywanych grupach. W tym celu zastosowano test Levene'a. W związku z równolicznością obserwacji w grupach ($n_{grupa} = 9$), dopuszczono niespełnienie założenia o jednorodności wariancji. Jednakże, aby uzyskać pewność odnośnie otrzymanego rezultatu, wykonano również analizę wariancji z poprawką Welcha i porównano jej efekty z rezultatami uzyskanymi dla testu Levene'a. Jeśli test Welcha, podobnie jak test jednorodności wariancji, wykazywał różnice istotne statystycznie, w kolejnym etapie zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji ANOVA. Ze względu

```

graph TD
    A[Rozkład normalny] -- TAK --> B[Jednorodność wariancji]
    A -- NIE --> C[Równoliczność obserwacji w grupach]
    B -- TAK --> D[Interakcja istotna statystycznie]
    B -- NIE --> C
    C -- TAK --> D
    C -- NIE --> E[ANOVA z poprawką Welch]
    D -- TAK --> F[ANOVA efektów prostych]
    D -- NIE --> G[Efekty główne istotne statystycznie]
    E -- TAK --> G
    E -- NIE --> H[Efekty główne istotne statystycznie]
    G -- TAK --> I[Testy post-hoc]
    G -- NIE --> J[Wynik analizy]
    H -- TAK --> I
    H -- NIE --> J
    I --> J
    K[test Kruskala-Wallisa] --> L[Efekty główne istotne statystycznie]
    L -- TAK --> M[Testy post-hoc]
    L -- NIE --> J
    M --> J
  
```

W pierwszej kolejności testowano hipotezę H_{0AB} (efekt interakcji). Jeśli wynik testu wykazał występowanie interakcji między grupami, hipoteza H_{0AB} była odrzucana na rzecz hipotezy H_{1AB} . W przypadku, gdy brak było podstaw do odrzucenia hipotezy H_{0AB} , badano hipotezy szczegółowe oddzielnie dla czynnika A i B (efekty główne). W przypadku wyników istotnych statystycznie przeprowadzono analizę efektów prostych (testy post-hoc).

$$\eta_p^2 = \frac{SS(S)}{SS(S) + SS_{reszta}} \quad (2.2)$$

$$\eta_p^2 = \frac{SS(P)}{SS(P) + SS_{reszta}} \quad (2.3)$$

$$\eta_p^2 = \frac{SS(S \times P)}{SS(S \times P) + SS_{reszta}} \quad (2.4)$$

gdzie:

- η_p^2 – cząstkowa siła efektu,
- SS(S) – suma efektów między grupami czynnika S,
- SS(P) – suma efektów między grupami czynnika P,
- SS(SP) – suma efektów między grupami interakcji czynników S i P,
- SS_{reszta} – suma kwadratów wewnątrz grup.

Miara siły efektu wyrażona w procentach ($\eta_p^2 \times 100$) wskazywała procent wyjaśnionej wariancji na tle wariancji niewyjaśnionej i wyjaśnionej przez dany czynnik klasyfikujący, przy pominięciu pozostałych źródeł zmienności, której nie wyjaśniają pozostałe czynniki. Otrzymane rezultaty porównano z wartościami określającymi siłę efektu. Miara η_p^2 może przybierać wartości z przedziału 0–1, przy czym [18, 73]:

- 0,01–0,05 – mała wielkość efektu,
- 0,06–0,13 – przeciętna wielkość efektu,
- od 0,14 – duża wielkość efektu.

Testowanie hipotez badawczych przeprowadzono na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Analizę statystyczną przeprowadzono za pomocą programu Statistica 13.3 firmy Dell, (Round Rock, USA). Istotny statystycznie wynik uznawano, gdy poziom istotności p (ang. *p-value*) osiągał wartość mniejszą niż 0,05.

3. Badania wstępne

Celem pracy było określenie warunków skrawania pozwalających na efektywną obróbkę konstrukcji przekładkowej metal – kompozyt polimerowy. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania wstępne, których zadaniem było wytypowanie zestawu parametrów technologicznych (prędkości skrawania v_c i posuwu na ostrze f_z) oraz geometrii narzędzia (kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu λ_s) do badań zasadniczych. Wartości przyjętych parametrów technologicznych opisano w rozdziale 2.4. W badaniach wstępnych frezowano wyłącznie próbki II warstwowe w konfiguracji Al/CFRP.

Hybrydowe konstrukcje przekładkowe, podobnie jak kompozyty epoksydowo-węglowe, zostały zakwalifikowane jako materiały trudnoobrabialne [43]. Efektywna obróbka konstrukcji Al/CFRP powinna łączyć cechy obróbki metalu i kompozytu polimerowego. W praktyce warunki skrawania dobierane są najczęściej w oparciu o warstwę kompozytową. W artykule [130] wykazano, że parametry obróbki (v_c , f_z i a_e) wpływają na jakość po frezowaniu kompozytu CFRP. W pracach [8, 15] ustalono, że posuw ma największy wpływ na jakość powierzchni po frezowaniu tego typu materiału. W pracy [134] ustalono, że na jakość powierzchni kompozytów epoksydowo-węglowych po obróbce oddziałuje również geometria i materiał narzędzia, natomiast nie wpływa szerokość skrawania. Do podobnych wniosków doszli Liu i inni [87]. Zauważyli oni również, że wzrost prędkości skrawania powodował spadek chropowatości powierzchni kompozytu CFRP. W publikacji [93] zauważono, oprócz wzrostu jakości powierzchni powodowanej wzrostem prędkości skrawania, także spadek chropowatości powierzchni wraz ze zwiększaniem głębokości skrawania.

W badaniach wstępnych, oprócz zmiennych parametrów skrawania, określono także wpływ kąta pochylenia krawędzi skrawającej λ_s na jakość powierzchni konstrukcji przekładkowej. Wartość kąta λ_s wpływa na okresową zmianę przekroju warstwy skrawanej [163]. Oprócz tego, większa wartość kąta λ_s usprawnia odprowadzanie wiórów ze strefy skrawania, powoduje spadek sił skrawania i poprawę jakości powierzchni przedmiotu obrabianego. Większa wartość kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu ma znaczenie zwłaszcza podczas obróbki kompozytów polimerowych, które mają tendencję do zalepiania rowków wiórowych. Kąt ten wpływa również na postać wiórów. Zalecany zakres kąta λ_s dla stopów aluminium

wynosi 25° – 45° [20] oraz 5° – 40° dla tworzyw polimerowych [62]. Biorąc pod uwagę powyższe zakresy, frezowanie wstępne przeprowadzono trzema frezami węglukowymi o kątach λ_s równych 20° , 35° i 45° .

3.1. Badania uskoku

Kryterium oceny najkorzystniejszych warunków frezowania było uzyskanie najmniejszej wartości uskoku. Kryterium to zostało dobrane ze względu na fakt, iż materiały warstwowe znalazły szerokie zastosowanie w lotnictwie jako elementy konstrukcyjne oraz elementy wyposażenia statków powietrznych. Jednym z wymagań obowiązującym w przemyśle lotniczym jest duża jakość komponentów związana z wąskimi zakresami tolerancji stawianym tym konstrukcjom. Ponadto na elementy lotnicze są często nanoszone powłoki ochronne, techniczne i dekoracyjne. Duża wartość uskoku może skutkować niedostateczną przyczepnością powłoki i tym samym zmniejszyć jej trwałość. W przypadku powłok dekoracyjnych duża wartość uskoku może znacznie zmniejszać efekt wizualny komponentów. Minimalna wartość uskoku jest ważna również z punktu widzenia uzyskania prawidłowego pasowania elementów. Oprócz tego, przekładki mogą być łączone w wielkogabarytowe konstrukcje, dla których duża wartość uskoku może prowadzić do trudności lub uniemożliwienia montażu.

Do wyboru optymalnych warunków skrawania zastosowano algorytm iteracyjnego przeszukiwania obszaru zmienności. Jest to metoda polegająca na generacji obszaru przeszukiwanego i poszukiwaniu w tym obszarze punktu pozwalającego uzyskać rozwiązanie optymalne. Przeszukiwanie iteracyjne polega na ustaleniu punktu początkowego i przemieszczaniu się po wyznaczonym obszarze w celu znalezienia rozwiązania, dla którego funkcja celu jest najmniejsza. Po znalezieniu optimum lokalnego w punkcie początkowym, wykonywana jest procedura przeszukiwania w kolejnym, niezależnym punkcie. Przeszukiwanie jest powtarzane, aż do spełnienia określonego warunku. Punkt początkowy może być wybrany na podstawie wiedzy o zachowaniu funkcji celu lub dobrany w sposób losowy. Każdy kolejny punkt wybierany jest ze zbioru wcześniej zdefiniowanych punktów (sąsiedztwa).

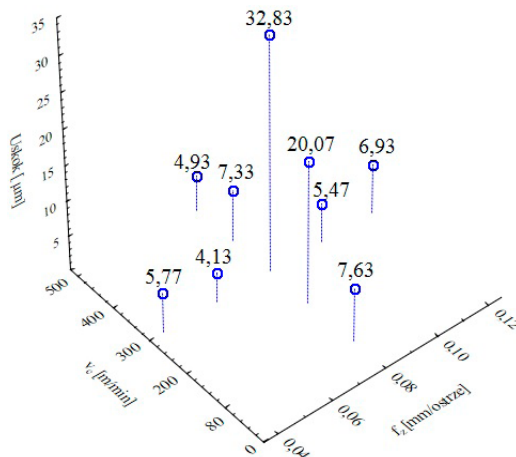
W niniejszej pracy funkcją celu $f(X)$ była wartość uskoku. Obszarem przeszukiwania był zbiór wartości uskoku uzyskanych przy zmiennych parametrach technologicznych oraz zmiennej geometrii narzędzia (rys. 3.1). Obszar zmienności został dobrany tak, aby uwzględnił pośrednie parametry skrawania zarówno dla stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego. Rozwiązaniem optymalnym była minimalna wartość uskoku ($f(X)$ min).

X₈: v_c = 80 m/min, f_z = 0,08 mm/ostrze				
X₇: v_c = 200 m/min, f_z = 0,08 mm/ostrze				
X₂: v_c = 300 m/min, f_z = 0,04 mm/ostrze	X₁: v_c = 300 m/min, f_z = 0,06 mm/ostrze	X₀: v_c = 300 m/min, f_z = 0,08 mm/ostrze	X₃: v_c = 300 m/min, f_z = 0,10 mm/ostrze	X₄: v_c = 300 m/min, f_z = 0,12 mm/ostrze
X₅: v_c = 400 m/min, f_z = 0,08 mm/ostrze				
X₆: v_c = 500 m/min, f_z = 0,08 mm/ostrze				

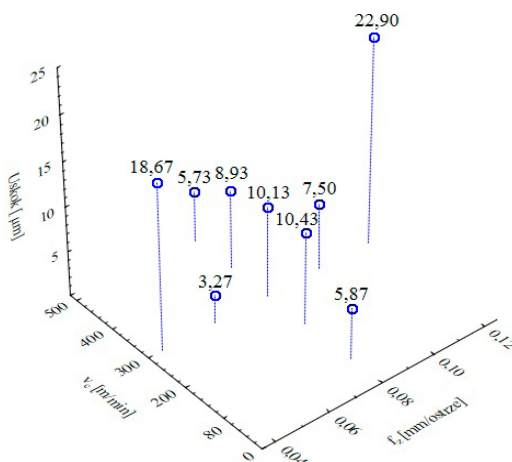
Rys. 3.1. Obszar przeszukiwania iteracyjnego

Przeszukiwanie rozpoczęto w punkcie x_0 (rys. 3.1). Następnie sprawdzano zachowanie funkcji celu w sąsiedztwie punktu początkowego – przeszukiwanie powtarzano dla $x_{1,2,...,8}$. Procedurę przeszukiwania wykonano dla trzech badanych geometrii narzędzia.

Na rysunkach 3.2–3.4. przedstawiono obszary zmienności średnich wartości uskoku otrzymane w zależności od użytych parametrów technologicznych i geometrii narzędzia.

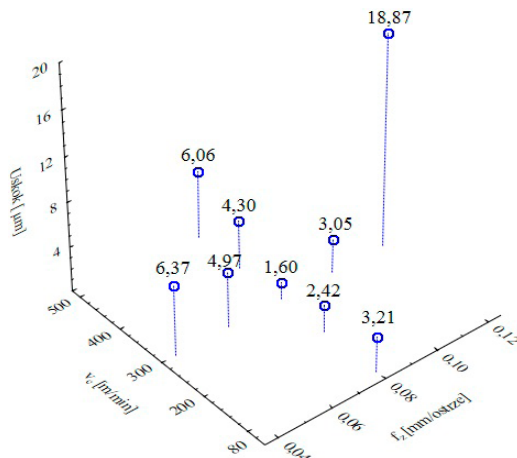


Rys. 3.2. Obszar zmienności średnich wartości uskoku po frezowaniu narzędziem o kącie $\lambda_s = 20^\circ$



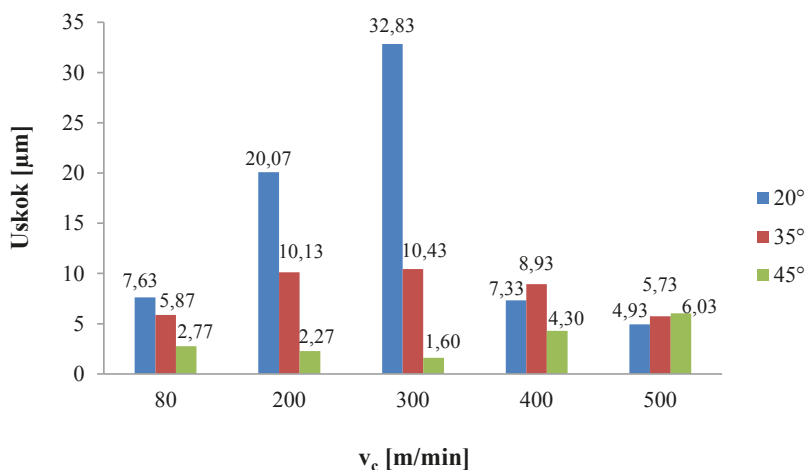
Rys. 3.3. Obszar zmienności średnich wartości uskoku po frezowaniu narzędziem o kącie $\lambda_s = 35^\circ$

Największą wartość uskoku (32,83 μm) otrzymaną po obróbce narzędziem o kącie $\lambda_s = 20^\circ$ uzyskano w punkcie x_0 ($v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/ostre), a najmniejszą (4,13 μm) w punkcie x_1 ($v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/ostre) (rys. 3.2). W przypadku frezu o kącie $\lambda_s = 35^\circ$ największą wartość uskoku (22,90 μm) zaobserwowano w punkcie x_4 ($v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,12$ mm/ostre), zaś najmniejszą (3,27 μm) w punkcie x_1 ($v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/ostre) (rys. 3.3). Frezowanie narzędziem o kącie $\lambda_s = 45^\circ$ skutkowało osiągnięciem największej wartości uskoku (18,87 μm) w punkcie x_4 ($v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,12$ mm/ostre) oraz wartości najmniejszej (1,60 μm) w punkcie początkowym x_0 ($v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/ostre) (rys. 3.4).



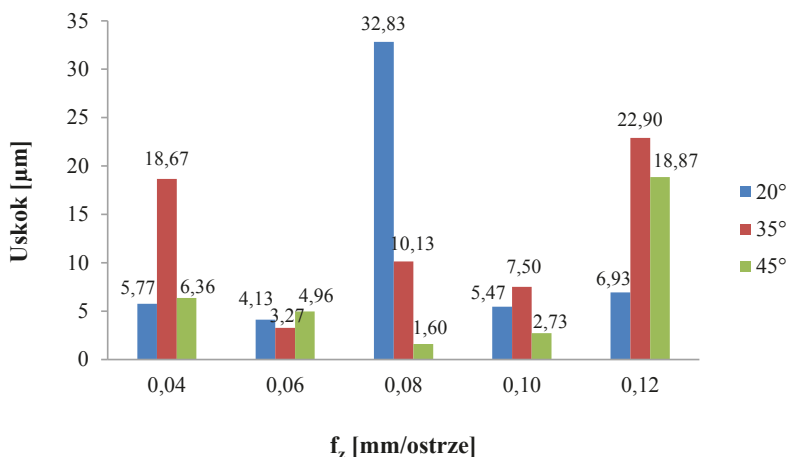
Rys. 3.4. Obszar zmienności średnich wartości uskoku po frezowaniu narzędziem o kącie $\lambda_s = 45^\circ$

Analizując wpływ prędkości skrawania na wartości uskoku (rys. 3.5), zaobserwowano, że po obróbce frezami o kątach $\lambda_s = 20^\circ$ i $\lambda_s = 35^\circ$, wartości uskoku wykazywały podobne wartości w zależności od zastosowanej prędkości skrawania. W zakresie prędkości skrawania $v_c = 80\text{--}300$ m/min dla tych narzędzi widoczny jest wzrost wartości uskoku wraz ze wzrostem parametru v_c . Dla większych wartości ($v_c = 400$ m/min i $v_c = 500$ m/min) uskok maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Wyniki uzyskane po frezowaniu narzędziem o kącie $\lambda_s = 45^\circ$ wykazują odwrotny trend – dla pierwszych trzech prędkości skrawania uskok maleje wraz ze wzrostem parametru v_c , a następnie rośnie dla parametrów $v_c = 400$ m/min i $v_c = 500$ m/min.



Rys. 3.5. Wpływ prędkości skrawania v_c i kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu $\lambda_s = 20^\circ$, $\lambda_s = 35^\circ$ i $\lambda_s = 45^\circ$ na wartości uskoku

W przypadku wpływu parametru f_z na wartości uskoku (rys. 3.6) trudno jest określić jednoznaczny trend. Dla frezów o kątach $\lambda_s = 20^\circ$ i $\lambda_s = 35^\circ$ wartości uskoku naprzemiennie wzrastają i maleją wraz ze zmianą posuwu. Wartości uskoku otrzymane po skrawaniu narzędziem o kacie $\lambda_s = 45^\circ$ maleją w zakresie $f_z = 0,04$ – $0,08$ mm/ostrze oraz rosną dla $f_z = 0,10$ mm/ostrze i $f_z = 0,12$ mm/ostrze (rys. 3.6).



Rys. 3.6. Wpływ posuwu f_z i kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu $\lambda_s = 20^\circ$, $\lambda_s = 35^\circ$ i $\lambda_s = 45^\circ$ na wartości uskoku

Z punktu widzenia przyjętego kryterium optymalizacji najkorzystniejszymi warunkami skrawania dla rozpatrywanej konstrukcji przekładkowej były następujące wartości parametrów skrawania: $v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/ostrze, $\lambda_s = 45^\circ$. Na tej podstawie powyższe warunki skrawania zostały wytypowane do badań zasadniczych.

3.2. Wyznaczenie liczebności próby do badań uskoku

Do wyznaczenia liczebności próby w badaniach uskoku zastosowano metodę *a posteriori* – liczebność została określona po zebraniu danych właściwych na podstawie przyjętego planu eksperymentu. Ustalono, że do weryfikacji statystycznej zastosowana zostanie dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA. W analizie wariancji rozpatrywano 3 kolumny: zmienną zależną (uskok) oraz dwa czynniki klasyfikujące (strategia obróbki i obecność powłoki narzędziowej) występujące na 2 poziomach (tabela 3.1). Założono, że moc testu nie może być mniejsza niż 80%, tj. błąd II rodzaju nie może przekroczyć 20%. Do badań zasadniczych wstępnie przyjęto licznosc próby na poziomie $n_{\text{grupa}} = 9$ dla każdej z 4 grup (liczba wierszy). W kolejnym kroku wykonano analizę mocy dwuczynnikowej analizy wariancji ANOVA dla przyjętej liczby prób. Efekt RMSSE (*ang. Root Mean Square Standardized Effect*), który jest standaryzowaną miarą stosowaną w ANOVA do opisywania ogólnego efektu w populacji, został przyjęty na poziomie 0,25 dla wszystkich efektów.

Tabela 3.1. Analiza mocy testu badań uskoku

Parametr	Wartość
Liczba wierszy	36
Liczba kolumn	3
Licznosc próby (n_{grupa})	9
Prawdop. bł. I rodzaju (α)	0,05
Efekt dla wierszy	
RMSSE	0,25
Df efektu	35
Df błędu	864
Wartość krytyczna F	1,44
Moc	0,99

Parametr	Wartość
Efekt dla kolumn	
RMSSE	0,25
Df efektu	2
Df błędu	864
Wartość krytyczna F	3,01
Moc	0,99
Efekt dla interakcji	
RMSSE	0,25
Df efektu	4
Df błędu	864
Wartość krytyczna F	1,31
Moc	0,84

RMSSE – standaryzowana miara efektu,

Df efektu – stopnie swobody między grupami,

Df błędu – stopnie swobody wewnątrz grup.

Biorąc pod uwagę wyniki zamieszczone w tabeli 3.1 można zauważyć, że moce testów dla $n_{\text{grupa}} = 9$ dla wszystkich trzech efektów (wierszy, kolumn i interakcji) są większe niż założona wartość 80%. Można zatem stwierdzić, że przyjęta liczebność próby jest wystarczająca do wykazania istotności statystycznej na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

4. Badania zasadnicze

Efektywna obróbka hybrydowych kompozytów warstwowych powinna łączyć cechy obróbki materiałów tworzących przekładkę. Nieprawidłowo dobrane warunki skrawania skutkują zmniejszeniem jakości produktu oraz mogą prowadzić do odsłaniania włókien kompozytowych, co zwiększa podatność konstrukcji na działanie środowiska zewnętrznego [167, 99]. Powodem tego są różne właściwości materiałów tworzących przekładkę, różna ich skrawalność, odmienny mechanizm tworzenia się wióra, zmienna stabilność obróbki oraz występowanie interakcji między warstwami [33]. Mimo, że hybrydowe konstrukcje warstwowe są często stosowane w wielu gałęziach przemysłu, warunki skrawania tego typu materiałów nie zostały do tej pory dostatecznie określone. Większość prac skupia się na uszkodzeniach i właściwościach konstrukcji przekładkowych [5], porównuje ich właściwości z właściwościami analogicznych konstrukcji litych [98] lub dokonuje przeglądu aktualnych trendów w zastosowaniu tego typu materiałów [97, 162]. Ponadto zalecenia dotyczące skrawania hybrydowych materiałów warstwowych bazują zwykle na wynikach uzyskanych podczas obróbki kompozytów CFRP.

W niniejszym rozdziale podjęto próbę oceny przyjętych na podstawie badań wstępnych warunków skrawania hybrydowej konstrukcji przekładkowej, pozwalających uzyskać jak największą jakość powierzchni konstrukcji. Eksperyment przeprowadzono z zastosowaniem metodyki badań przedstawionej w rozdziale 2.

4.1. Badania uskoku

Przeprowadzono wiele badań dotyczących oceny jakości powierzchni hybrydowych konstrukcji przekładkowych po obróbce. Większość prac skupia się jednak na badaniu chropowatości powierzchni kompozytów polimerowych [47], wierceniu konstrukcji przekładkowych [133] lub występowaniu procesu delaminacji [84]. Niewiele prac dotyczy błędów kształtu i przyczyn ich powstania. W pracy [34] wyróżniono trzy rodzaje odchyłek kształtu, które mogą służyć do oceny jakości powierzchni konstrukcji warstwowych: uskok, błąd przejścia w miejscu łączenia warstw i chropowatość powierzchni. W publikacji [33] skupiono się na błędach kształtu (w tym uskoku) po frezowaniu czołowym. Nie zbadano jednak wpływu

warunków skrawania na wartości opisanych błędów. Skupiono się jedynie na próbie przewidzenia i wyjaśnienia powstawania wad na powierzchni kompozytów warstwowych po frezowaniu.

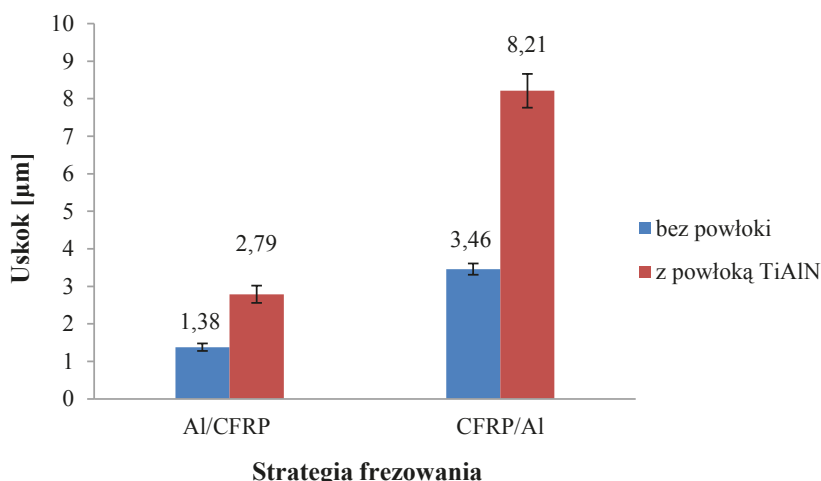
Konstrukcje typu stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy są często stosowane w lotnictwie jako elementy konstrukcyjne (elementy skrzydeł czy ogona samolotu). Zastosowanie w przemyśle lotniczym wymaga zwykle, aby na konstrukcje warstwowe były nakładane powłoki (ochronne, dekoracyjne, techniczne). W inżynierii powierzchni nawet niewielka wartość uskoku może mieć istotny wpływ na eksploatację konstrukcji. Może skutkować niedostateczną przyczepnością powłoki, a tym samym zmniejszać jej trwałość. Mała wartość uskoku jest również ważna z punktu widzenia uzyskania prawidłowego pasowania elementów. Ponadto w przypadku konstrukcji warstwowych łączonych z innymi materiałami za pomocą klejenia, uskok może wpływać na wytrzymałość połączenia adhezyjnego.

Obróbka tego typu materiałów związana jest z intensywnym zużywaniem się narzędzi skrawających. Wpływa to na pogorszenie jakości obrobionej powierzchni. Jednym ze sposobów uzyskania dobrej jakości powierzchni po procesie frezowania jest zastosowanie narzędzi powlekanych. Odpowiednio dobrana powłoka narzędziowa zwiększa trwałość ostrza skrawającego, co skutkuje wydłużeniem żywotności narzędzia i zapewnieniem wymaganej dokładności wymiarowej [148, 113]. W pracy [156] badano zużycie narzędzia podczas wiercenia konstrukcji CFRP/Ti. Porównano zużycie ostrza skrawającego po obróbce konstrukcji przekładkowej z próbkami referencyjnymi (osobno warstwę kompozytową i metalową). Zauważono, że zużycie narzędzia od strony metalu było dziewięciokrotnie mniejsze w porównaniu ze zużyciem od strony kompozytu CFRP. Zaobserwowano również występowanie innego rodzaju zużycia dla obu materiałów. Hosokawa i inni [58] przedstawili wyniki frezowania kompozytów epoksydowo-węglowych narzędziami z powłoką diamentową o zmiennym kącie pochylenia krawędzi skrawającej. Wykazali oni, że występowanie wad na powierzchni obrabianego materiału zależy od sił skrawania, a zużycie narzędzia – od orientacji włókien.

Z drugiej strony, obecność powłoki narzędziowej wiąże się ze wzrostem grubości warstwy materiału ostrza i zaokrągleniem krawędzi skrawającej. W artykule [143] zaleca się, aby promień ostrza był jak najmniejszy. Janardhan i inni [66] wykazali, że promień ostrza narzędzia ma wpływ na jakość obróbki. Biorąc powyższe pod uwagę, należy uwzględnić również wpływ powłoki na jakość powierzchni po obróbce hybrydowej konstrukcji warstwowej typu stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy.

4.1.1. Uskok po frezowaniu konstrukcji II warstwowej

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki badań uskoku otrzymane w zależności od przyjętego wariantu obróbki. Analizowano dwie strategie frezowania: rozpoczęcie obróbki od warstwy metalowej (Al/CFRP) oraz obróbkę od strony kompozytu polimerowego (CFRP/Al). Badaniom uskoku poddana została również konstrukcja III warstwowa (Al/CFRP/Al). Obróbkę przeprowadzono za pomocą dwóch narzędzi: niepowlekanego frezu węglkowego o kącie $\lambda_s = 45^\circ$ oraz analogicznego narzędzia z naniesioną powłoką TiAlN. Jakość powierzchni konstrukcji II warstwowej porównano z jakością powierzchni próbek referencyjnych (oddzielnie dla stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego).



Rys. 4.1. Uskok po frezowaniu konstrukcji II warstwowej

Na rysunku 4.1 przedstawiono kształtowanie się uskoku konstrukcji II warstwowej. Minimalną wartość uskoku (1,38 µm) uzyskano w konfiguracji Al/CFRP stosując frez niepowlekany, a wartość maksymalną (8,21 µm) po frezowaniu w konfiguracji CFRP/Al narzędziem z powłoką TiAlN. Porównując otrzymane rezultaty można zauważyć, że dla obu narzędzi mniejsze wartości uskoku uzyskano podczas frezowania w konfiguracji Al/CFRP. Dla rozważanych przypadków wartości uskoku uzyskane podczas frezowania z użyciem strategii Al/CFRP były blisko o 60% (narzędzie bez powłoki) i 66% (narzędzie z powłoką TiAlN) mniejsze od wartości uskoku otrzymanych podczas obróbki w konfiguracji CFRP/Al. Analizując wpływ powłoki narzędziowej można zauważyć, że wartości otrzymane podczas obróbki z zastosowaniem narzędzia niepowlekanego dla strategii Al/CFRP i CFRP/Al były odpowiednio o 51% i 58% mniejsze niż w przypadku frezowania

narzędziem z powłoką. Najkorzystniejszym wyborem strategii skrawania i narzędzia do obróbki badanej konstrukcji jest zastosowanie konfiguracji Al/CFRP i narzędzia bez powłoki, zaś najmniej wskazanym – obróbka w konfiguracji CFRP/Al narzędziem z powłoką TiAlN.

Analizę statystyczną wyników konstrukcji II warstwowej rozpoczęto od określenia normalności rozkładu wyników w rozpatrywanych grupach. W tym celu wykonano test Shapiro-Wilka (tabela 4.1), na podstawie którego stwierdzono, że dla przyjętego poziomu prawdopodobieństwa ($\alpha = 0,05$), badana zmienna wykazywała rozkład normalny ($W > W_{kr}$ i $p > 0,05$) we wszystkich rozpatrywanych podgrupach.

Tabela 4.1. Wyniki badań normalności rozkładu wyników uskoju konstrukcji II warstwowej

Wariant obróbki	W	W_{kr}	P
Al/CFRP bez powłoki	0,95	0,83	0,69
CFRP/Al bez powłoki	0,92	0,83	0,42
Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,87	0,83	0,13
CFRP/Al z powłoką TiAlN	0,94	0,83	0,55

W – statystyka testu Shapiro-Wilka,

W_{kr} – statystyka krytyczna testu Shapiro-Wilka,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

W następnym etapie zbadano homogeniczność wariancji (test Levene’a), którego wynik wskazał brak jednorodności wariancji dla badanej zmiennej zależnej ($F_{3,32} = 5,77$; $p < 0,01$). Wykonano zatem test Welcha, którego wyniki potwierdziły brak homogeniczności wariancji. W związku z tym, że wieloczynnikowa analiza wariancji ANOVA jest odporna na złamanie założenia o jednorodności wariancji w przypadku grup równolicznych ($n_{grupa} = 9$) oraz biorąc pod uwagę fakt, że oba testy badające homogeniczność wariancji wskazały występowanie różnic istotnych statystycznie, dalszą analizę przeprowadzono za pomocą dwuczynnikowej analizy wariancji, której wyniki przedstawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla uskoku konstrukcji II warstwowej

Efekt	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	126,41	1	126,41	20,52	< 0,01	0,39
P: Obecność powłoki narzędziowej	85,38	1	85,38	13,86	< 0,01	0,30
Interakcja S×P	25,13	1	25,13	4,08	0,05	0,11
Błąd	197,12	32	6,16			
Całość	434,04	35				

SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),

MS – średnie kwadraty odchyłeń (ang. *Mean Squares*),

F – statystyka testowa,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

η_p^2 – cząstkowa siła efektu.

Na podstawie powyższych rezultatów ustalono, że efekt interakcji (S×P) był nieistotny statystycznie – $F_{1, 32} = 4,08$; $p = 0,05$. Wysoko istotny statystycznie wynik uzyskano dla strategii frezowania ($F_{1, 32} = 20,05$; $p < 0,01$) oraz dla obecności powłoki narzędziowej ($F_{1, 32} = 13,86$; $p < 0,01$). Spośród badanych czynników klasyfikujących strategię obróbki (S) miała większy wpływ na uskok niż obecność powłoki narzędziowej (P). Obserwowane efekty wyjaśniały, odpowiednio, 39% i 30% zmienności w zakresie badanej zmiennej zależnej niewyjaśnionej przez pozostałe czynniki. W kolejnym kroku wykonano porównania wielokrotne za pomocą testów HSD Tukeya (jednorodności grup i istotności różnic). Otrzymano 2 grupy jednorodne, między którymi występowały różnice istotne statystycznie. Do pierwszej grupy należały warianty: Al/CFRP bez powłoki, Al/CFRP z powłoką TiAlN oraz CFRP/Al bez powłoki. Druga grupa obejmowała wyniki uskoków uzyskane podczas frezowania w konfiguracji CFRP/Al z użyciem narzędzia powlekanego.

Tabela 4.3. Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya dla uskoków konstrukcji II warstwowej

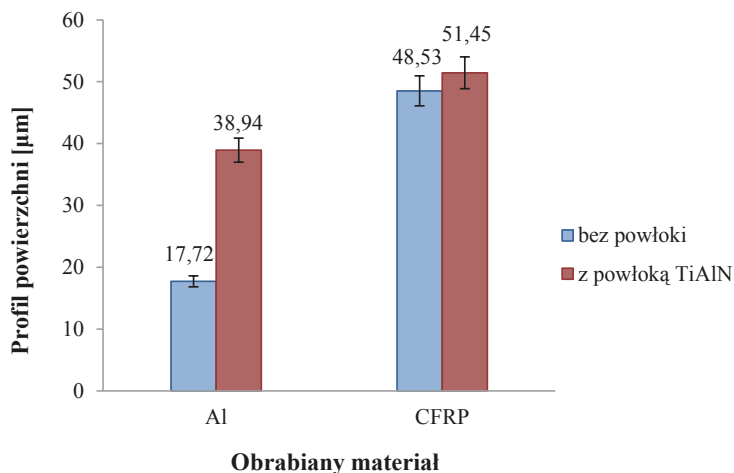
Lp.	Wariant obróbki	{1}	{3}	{3}	{4}
1	Al/CFRP bez powłoki	–	0,63	0,30	< 0,01
2	CFRP/Al bez powłoki	0,63	–	0,94	< 0,01
3	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,30	0,94	–	< 0,01
4	CFRP/Al z powłoką TiAlN	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–

W tabeli 4.3 zestawiono przybliżone wartości prawdopodobieństwa dla wykonanego testu post-hoc. Analizując powyższe rezultaty można zauważyć, że istotne statystycznie różnice występowały między wariantami:

- Al/CFRP bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN,
- CFRP/Al bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN,
- Al/CFRP z powłoką TiAlN i CFRP/Al z powłoką TiAlN.

W pozostałych przypadkach nie zaobserwowano różnic istotnych statystycznie.

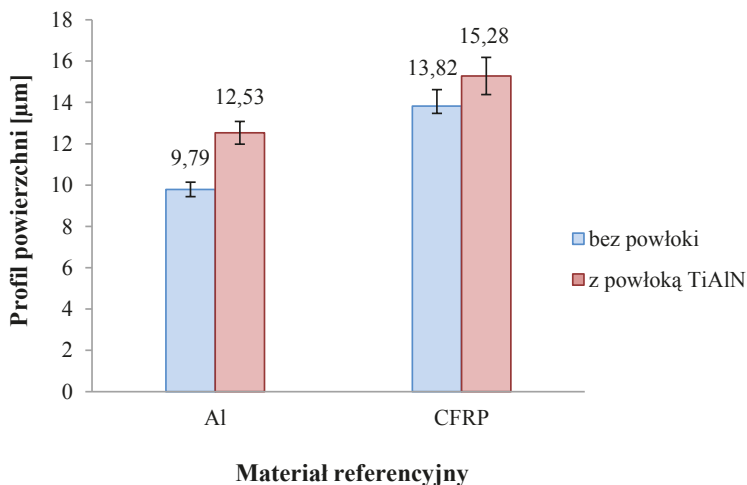
W celu porównania jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych i pojedynczych materiałów po obróbce, przeprowadzono badania referencyjne. Wykonano je w ustalonych dla frezowania konstrukcji II warstwowej warunkach skrawania. Z uwagi na fakt, że uskok zdefiniowany został jako różnica między średnią wartością profilu powierzchni stopu aluminium i średnią wartością profilu powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego (rys. 2.11), na powierzchniach próbek referencyjnych nie można było dokonać pomiarów uskoku. Porównano więc średnie wartości profilu powierzchni otrzymane podczas obróbki konstrukcji warstwowej i pojedynczych materiałów. W przypadku obróbki konstrukcji przekładkowej, rozpatrywano średnią wartość profilu powierzchni stopu aluminium otrzymaną w konfiguracji Al/CFRP oraz średnią wartość profilu powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego otrzymaną w konfiguracji CFRP/Al. Na rysunkach 4.2 i 4.3 zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań.



Rys. 4.2. Średnia wartość profilu powierzchni stopu aluminium (U_{Al}) i kompozytu epoksydowo-węglowego (U_{CFRP}) po obróbce konstrukcji II warstwowej

Analizując wyniki otrzymane po skrawaniu konstrukcji II warstwowej zaobserwowano, że największą wartość profilu powierzchni (51,45 µm) otrzymano dla

materiału kompozytowego po frezowaniu narzędziem z powłoką TiAlN, a najmniejszą ($17,72\ \mu\text{m}$) dla stopu aluminium po obróbce narzędziem niepowlekanym (rys. 4.2). Różnica między wartością największą i najmniejszą wynosiła blisko 66%.



Rys. 4.3. Średnia wartość profilu powierzchni stopu aluminium (U_{Al}) i kompozytu epoksydowo-węglowego (U_{CFRP}) po obróbce pojedynczych materiałów

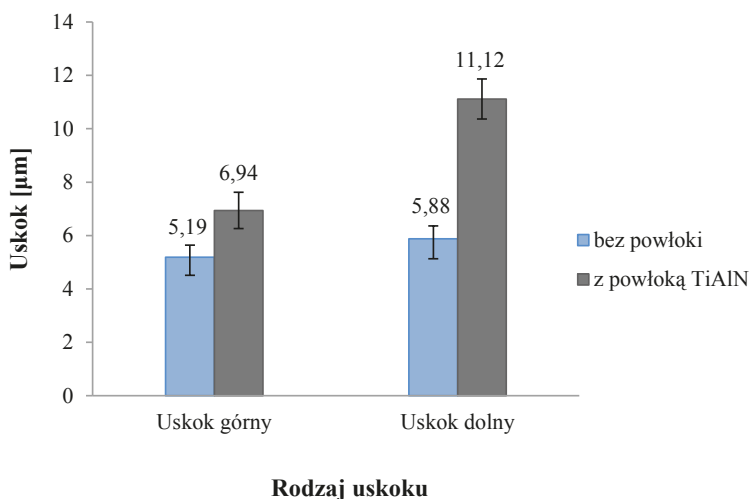
Maksymalna ($15,28\ \mu\text{m}$) i minimalna ($9,79\ \mu\text{m}$) wartość profilu powierzchni próbek referencyjnych wystąpiły dla tych samych materiałów i po zastosowaniu tych samych narzędzi, co w przypadku konstrukcji przekładkowej. Różnica między ekstremami wyniosła około 36%. Dla obu materiałów obecność powłoki powodowała uzyskanie większych wartości profilu powierzchni. Ponadto na powierzchni stopu aluminium, dla obu rodzajów narzędzi, uzyskano mniejsze wartości badanej wielkości niż na powierzchni kompozytu.

Badania wykazały, że frezowanie konstrukcji przekładkowej prowadziło do otrzymania gorszej jakości powierzchni w porównaniu do skrawania pojedynczych materiałów. Średnie wartości profilu powierzchni uzyskane dla próbek referencyjnych były o 42% (obróbka stopu aluminium frezem bez powłoki narzędziowej), 73% (obróbka kompozytu epoksydowo-węglowego frezem bez powłoki narzędziowej), 68% (obróbka stopu aluminium frezem z powłoką TiAlN) oraz 74% (obróbka kompozytu epoksydowo-węglowego frezem z powłoką TiAlN) mniejsze niż dla konstrukcji typu *sandwich*. Na tej podstawie można wnioskować, że jakość powierzchni po frezowaniu konstrukcji II warstwowej jest mniejsza w porównaniu do analogicznej obróbki pojedynczych materiałów.

4.1.2. Uskok po frezowaniu konstrukcji III warstwowej

W kolejnym etapie zbadano uskok po skrawaniu konstrukcji III warstwowej. Pomiary podzielono na uskok górny – uskok tworzący się na granicy metal – kompozyt polimerowy (U_g) oraz na uskok dolny – uskok tworzący się na granicy kompozyt polimerowy – metal (U_d). Schemat odcinka pomiarowego przyjętego do badań uskoku konstrukcji III warstwowej zamieszczono w rozdziale 2.5 (rys. 2.9 b).

Na rysunku 4.4 zaprezentowano kształtowanie się uskoku po frezowaniu konstrukcji III warstwowej. Maksymalna wartość uskoku otrzymana (11,12 μm) wystąpiła po frezowaniu narzędziem z powłoką TiAlN (uskok dolny), a minimalna (5,19 μm) po obróbce frezem niepowlkanym (uskok górny). Różnica między największą i najmniejszą wartością wynosiła ponad 53%.



Rys. 4.4. Uskok po frezowaniu konstrukcji III warstwowej

Analizując powyższe rezultaty można zaobserwować, że podobnie jak w przypadku konstrukcji II warstwowej, powłoka narzędziowa powodowała uzyskanie większych wartości uskoku. Wartości uzyskane po obróbce frezem niepowlkanym były o 25% (uskok górny) i 47% (uskok dolny) mniejsze niż po frezowaniu narzędziem z powłoką TiAlN. Porównując wartości uskoku górnego i dolnego można zauważyć, że dla obu narzędzi większe wartości uzyskano dla uskoku dolnego. Różnica między uskokiem górnym i dolnym zarejestrowana po obróbce frezem niepowlkanym wynosiła 12%. Wartość uskoku górnego otrzymana po frezowaniu narzędziem z powłoką była blisko o 38% mniejsza niż wartość uskoku dolnego. Na tej podstawie można sformułować wniosek, że uskok na granicy metal – kompozyt polimerowy był mniejszy niż uskok na granicy kompozyt polimerowy – metal.

Jest to zgodne z wynikami otrzymanymi dla konstrukcji II warstwowej (mniejsza wartość uskołu w konfiguracji Al/CFRP wobec konfiguracji CFRP/Al). Takie różnice były spowodowane odmiennymi właściwościami materiałów tworzących przekładkę. Kompozyt CFRP cechuje się mniejszą sztywnością w porównaniu do stopu aluminium, co prowadzi do powstawania zmiennych oporów skrawania. Warstwa metalowa znajdując się nad warstwą kompozytową powoduje dociskanie elementu, dlatego też rozpoczęcie frezowania od stopu aluminium generuje mniejsze wartości uskołu. Uzyskanie mniejszych wartości uskołu na granicy metal – kompozyt polimerowy mogło być spowodowane także usztywniającym działaniem okładki aluminiowej – warstwa metalowa usztywniała narzędzie czyniąc obróbkę bardziej stabilną. Mniejsze wartości uskołu otrzymane na granicy metal – kompozyt epoksydowo-węglowy były również skutkiem różnicy sprężystości materiałów – odkształcenie sprężyste kompozytu CFRP było większe niż dla stopu aluminium, w wyniku czego materiał kompozytowy uginał się bardziej w trakcie obróbki powodując większą wartość uskołu.

Weryfikację statystyczną otrzymanych wartości uskołu dla konstrukcji III warstwowej rozpoczęto od określenia normalności rozkładu za pomocą testu Shapiro-Wilka (tabela 4.4). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że we wszystkich rozpatrywanych podgrupach wyniki uskołu miały rozkład normalny.

Tabela 4.4. Wyniki badań normalności rozkładu wyników uskołu konstrukcji III warstwowej

Wariant obróbki	W	W _{kr}	p
Uskok górny bez powłoki	0,86	0,83	0,09
Uskok dolny bez powłoki	0,87	0,83	0,11
Uskok górny z powłoką TiAlN	0,89	0,83	0,22
Uskok dolny z powłoką TiAlN	0,94	0,83	0,56

W – statystyka testu Shapiro-Wilka,

W_{kr} – statystyka krytyczna testu Shapiro-Wilka,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

Wynik testu Levene’a wskazał, że badana zmienna zależna spełniała założenie o jednorodności wariancji ($F_{3, 32} = 0,24$; $p = 0,87$). W kolejnym kroku wykonano więc dwuczynnikową analizę ANOVA, której wyniki zamieszczono w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla uskoku konstrukcji III warstwowej

Efekt	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Rodzaj uskoku	26,28	1	26,28	1,40	0,25	0,04
P: Obecność powłoki narzędziowej	107,95	1	107,95	5,75	0,02	0,15
Interakcja S×P	54,71	1	54,71	2,92	0,10	0,08
Błąd	600,59	32	18,77			
Całość	789,53	35				

SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),

MS – średnie kwadraty odchyleń (ang. *Mean Squares*),

F – statystyka testowa,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

η_p^2 – cząstkowa siła efektu.

Wyniki analizy statystycznej pokazują, że nieistotne statystycznie rezultaty otrzymano dla efektu interakcji (S×P) – $F_{1,32} = 2,92$; $p = 0,10$ oraz rodzaju uskoku – $F_{1,32} = 1,40$; $p = 0,25$. Wynik istotny statystycznie uzyskano tylko dla obecności powłoki narzędziowej ($F_{1,32} = 5,75$; $p = 0,02$), która wyjaśniała 15% zmienności uskoku niewyjaśnionej przez inne czynniki klasyfikujące. Na podstawie testu jednorodności HSD Tukeya wyodrębniono 2 grupy jednorodne. Pierwsza grupa obejmowała wyniki otrzymane dla uskoku dolnego i narzędzia niepowlekanego, uskoku górnego i narzędzia z powłoką TiAlN oraz uskoku górnego i frezu bez powłoki. Do drugiej grupy należały wyniki uskoku górnego otrzymane po frezowaniu narzędziem bez powłoki i uskoku dolnego uzyskane narzędziem powlekanym.

Tabela 4.6. Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya dla uskoku konstrukcji III warstwowej

Lp.	Wariant obróbki	{1}	{2}	{3}	{4}
1	Uskok górny bez powłoki	–	0,98	0,96	0,07
2	Uskok dolny bez powłoki	0,98	–	0,83	0,03
3	Uskok górny z powłoką TiAlN	0,96	0,83	–	0,19
4	Uskok dolny z powłoką TiAlN	0,07	0,03	0,19	–

Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya (tabela 4.6) pokazują, że różnice istotne statystycznie występują pomiędzy wartościami uskoku dolnego otrzymanego po frezowaniu narzędziem bez powłoki i uskoku dolnego po obróbce narzędziem powlekany. W pozostałych wariantach należy przyjąć, że wartości uskoku były nieistotne statystycznie.

4.1.3. Wskaźnik jakości powierzchni

Zapewnienie pożądanej jakości po obróbce w przemyśle jest jednym z aspektów, na który zwraca się szczególną uwagę, gdyż jakość powierzchni wpływa na funkcjonalność elementu i koszty produkcji. Dlatego tak ważne jest przewidywanie i monitorowanie wpływu warunków skrawania na dokładność wymiarowo-kształtową. W przypadku konstrukcji typu *sandwich* brak jest norm i zaleceń, które umożliwiałyby ocenę jakości powierzchni określaną za pomocą uskoku na powierzchni przekładki. W niniejszej pracy podjęto próbę zdefiniowania wskaźnika, który mógłby posłużyć do określania powtarzalności jakości powierzchni po obróbce hybrydowych materiałów warstwowych.

Wskaźnik utworzono na podstawie kryterium 6σ . Jest to podejście do zarządzania jakością bazujące na metodach statystycznych. Kryterium to zakłada ustalenie wadliwości na podstawie 6 odchyłeń od wartości centralnej rozkładu – w polu tolerancji populacji generalnej powinno zawierać się około 97% zmienności serii. Ogranicza to prawdopodobieństwo wykonania elementu nie mieszającego się w tolerancji wymiaru. Prawdopodobieństwo wystąpienia braku produkcyjnego wynosi 3,4 na 1 000 000 możliwości. Podejście to prowadzi do zwiększenia powtarzalności obróbki.

Na podstawie powyższych informacji oraz własnych doświadczeń, utworzono wskaźnik jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych w postaci:

$$W_U = \frac{6\sigma_U}{T_w} < 1 \wedge U_{\max} \in [e_s, e_i] \quad (4.1)$$

gdzie:

W_U – wskaźnik jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych,

$6\sigma_U$ – kryterium 6σ dla uskoku,

T_w – tolerancja wykonania,

$U_{\max}$ – maksymalna wartość uskoku,

e_s – odchyłka graniczna górna dla rozpatrywanego wymiaru,

e_i – odchyłka graniczna dolna dla rozpatrywanego wymiaru.

Uwzględniona w mianowniku powyższego równania tolerancja wykonania T_w jest zależna od wymiaru gabarytowego obrabianego elementu. Zatem wskaźnik W_U może służyć zarówno do oceny jakości konstrukcji o niewielkich wymiarach, jak i wielkogabarytowych paneli typu *sandwich*.

Na podstawie wskaźnika W_U można określić obszar powtarzalności procesu mieszczącej się w granicach tolerancji. Zakres ten można zmniejszyć o pewną ustaloną wartość tworząc obszar ostrzegawczy, na poziomie którego należałoby przystąpić do modyfikowania procesu, poprzez np. korekcję narzędzia.

4.1.4. Podsumowanie badań uskoku

Na podstawie przeprowadzonych badań uskoku można stwierdzić, że po frezowaniu obwodowym II i III warstwowych konstrukcji przekładkowych występują różnice w jakości powierzchni materiałów tworzących daną konstrukcję. Dla rozpatrywanych konstrukcji najmniejsze wartości badanej wielkości uzyskano rozpoczynając frezowanie od warstwy metalowej (Al/CFRP dla konstrukcji II warstwowej i uskok górny U_g dla konstrukcji III warstwowej). Wzrost zaokrąglenia ostrza skrawającego prowadził do spadku dokładności wykonania – większe wartości uskoku otrzymano na powierzchniach obrabianych narzędziem z powłoką TiAlN w porównaniu do rezultatów uzyskanych z użyciem narzędzia niepowlekanego.

Dobierając model badań w postaci konstrukcji II i III warstwowej spodziewano się, że ograniczenie kompozytowego rdzenia przez metalowe okładki spowoduje dociskanie materiału o mniejszej gęstości przez materiał o większej gęstości, a tym samym zmniejszy opory skrawania i przyczyni się do uzyskania większej jakości powierzchni. Jednak rezultaty otrzymane dla konstrukcji II i III warstwowych pokazują, że wbrew oczekiwaniom, mniejsza jakość powierzchni wystąpiła właśnie po obróbce konstrukcji III warstwowej. Porównując wyniki uzyskane dla tych konfiguracji obróbki i użytych frezów zauważono, że dla konstrukcji II warstwowej otrzymano o 73% (rozpoczęcie frezowania od warstwy metalowej z zastosowaniem narzędzia niepowlekanego), 36% (rozpoczęcie frezowania od warstwy kompozytowej z użyciem narzędzia niepowlekanego), 60% (rozpoczęcie frezowania od warstwy metalowej z zastosowaniem narzędzia powlekanego) i 26% (rozpoczęcie frezowania od warstwy kompozytowej z użyciem narzędzia powlekanego) mniejsze wartości uskoku niż po skrawaniu konstrukcji III warstwowej.

Przeprowadzone badania referencyjne wykazały, że jakość powierzchni po obróbce przekładek jest mniejsza w porównaniu do jakości powierzchni po skrawaniu analogicznych konstrukcji litych. Zaobserwowane duże różnice między jakością powierzchni po obróbce konstrukcji warstwowych a jakością powierzchni po frezowaniu próbek referencyjnych były prawdopodobnie rezultatem drgań

powstających w wyniku mniej stabilnej obróbki w przypadku kompozytów warstwowych. Zmienna sztywność materiałów tworzących konstrukcję przekładkową prowadziła do zwiększenia niestabilności narzędzia i występowania drgań. Ponadto osiąganie większych średnich wartości profilu powierzchni rozpatrywanych materiałów po obróbce konstrukcji II warstwowej w porównaniu do średnich wartości profilu powierzchni próbek referencyjnych mogło być związane także z ocieraniem i osadzaniem się na powierzchniach obrobionych wiórów pochodzących z warstwy metalowej i kompozytowej. Mimo widocznych różnic, w obu przypadkach zaobserwowano podobny wpływ ułożenia warstw i powłoki narzędziowej na uskok – na powierzchniach kompozytu CFRP po frezowaniu próbek referencyjnych i konstrukcji typu *sandwich* uzyskano mniejszą jakość powierzchni. Jest to spowodowane niejednorodnością i anizotropią materiału kompozytowego. Konstrukcja warstwowa potęguje tę niejednorodność powodując jeszcze większe trudności związane z obróbką skrawaniem.

Zaproponowany wskaźnik W_U może być stosowany do ustalenia powtarzalności jakości powierzchni po obróbce materiałów warstwowych. W kolejnych pracach na podstawie wskaźnika W_U podjęta zostanie próba określenia akceptowalnego poziomu uskoku po obróbce.

4.2. Badania chropowatości i topografii powierzchni

Chropowatość powierzchni jest jedną z najważniejszych i najczęściej stosowanych wielkości charakteryzujących jakość powierzchni po obróbce skrawaniem. Wpływa ona na dokładność wymiarowo-kształtową, pasowanie i prawidłową eksploatację części maszyn i urządzeń. Na chropowatość powierzchni oddziałuje wiele czynników, takich jak zużycie narzędzia skrawającego, drgania, stabilność obróbki, zastosowane parametry skrawania. Oprócz tego bardzo duży wpływ ma również niejednorodność i anizotropia obrabianego materiału [130].

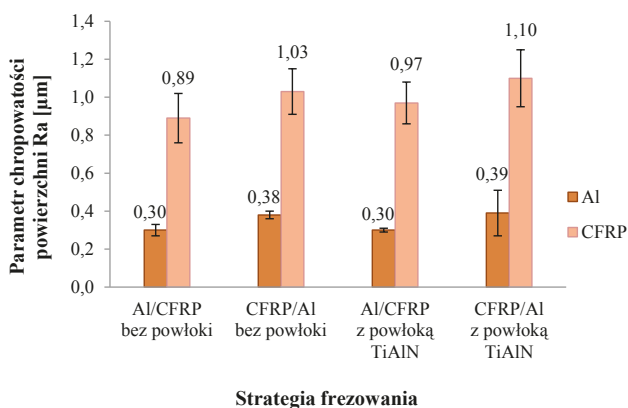
Wielu naukowców analizowało chropowatość i strukturę geometryczną powierzchni po obróbce kompozytów włóknistych. Brak jest jednak prac poświęconych badaniom chropowatości powierzchni hybrydowych konstrukcji przekładkowych po frezowaniu. W pracach [31, 136] stwierdzono, że siła skrawania i chropowatość powierzchni podczas obróbki kompozytów CFRP zależą od parametrów skrawania, przy czym posuw jest dominującym czynnikiem wpływającym na jakość powierzchni po obróbce. Podobne wnioski zawarto w [117, 138]. W publikacji [120] badano skrawalność kompozytu epoksydowo-węglowego. Zauważono, że wzrost prędkości skrawania powoduje zmniejszenie chropowatości powierzchni, co ma odzwierciedlenie również w innych pracach [28]. Channrasekaran i Devarasiddappa [23] zauważyli, że chropowatość powierzchni po obróbce kompozytów włóknistych jest związana liniową zależnością

z posuwem na ostrze i odwrotną zależnością z prędkością skrawania [23]. Bayraktar i inni [11] określili wpływ narzędzia skrawającego (materiał, geometria, obecność powłoki narzędziowej) oraz parametrów technologicznych (prędkość skrawania i posuw) na siłę skrawania i chropowatość powierzchni po frezowaniu kompozytu CFRP. Autorzy zaobserwowali, że spośród badanych czynników, posuw najbardziej wpływał na jakość obrabianej powierzchni. Frez niepowlekany pozwolił uzyskać najmniejsze siły skrawania i chropowatość powierzchni, które wzrastały wraz ze wzrostem liczby rowków wiórowych i kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu. Ramirez i inni [119] badali zużycie narzędzia skrawającego i chropowatość powierzchni po wierceniu kompozytu epoksydowo-węglowego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że ze względu na anizotropię i niejednorodność obrabianego materiału, do oceny topografii powierzchni po obróbce niezbędne jest zdefiniowanie nowych kryteriów.

4.2.1. Chropowatość powierzchni konstrukcji II warstwowej

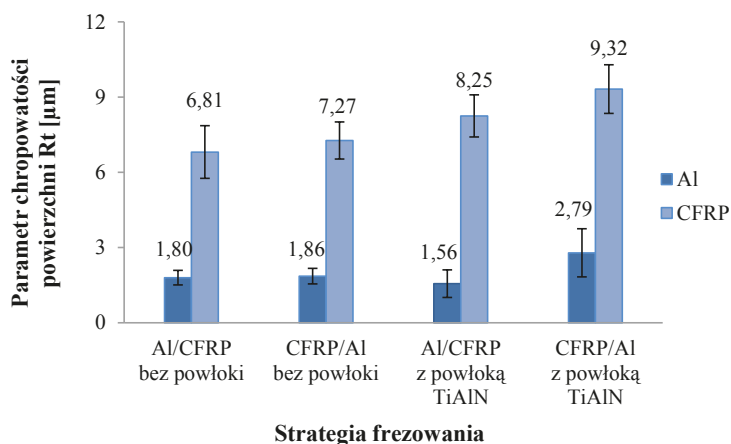
W niniejszym rozdziale określono wpływ strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej na chropowatość powierzchni i strukturę geometryczną II warstwowej konstrukcji typu *sandwich*. Na podstawie wartości parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_t , R_{max} i R_z uzyskanych na powierzchniach materiałów tworzących przekładkę dokonano oceny jednorodności powierzchni oraz zaproponowano wskaźnik służący do oceny jednorodności chropowatości powierzchni po obróbce tego typu materiałów.

Na rysunkach 4.5–4.8 przedstawione zostały wyniki pomiarów chropowatości powierzchni.

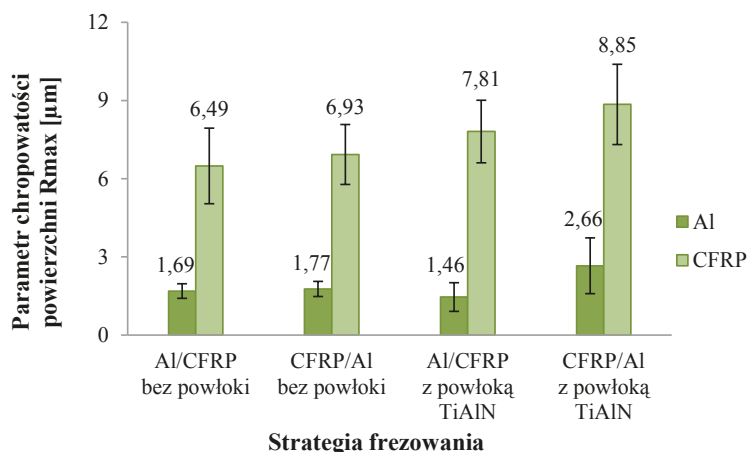


Rys. 4.5. Parametr chropowatości powierzchni R_a w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej

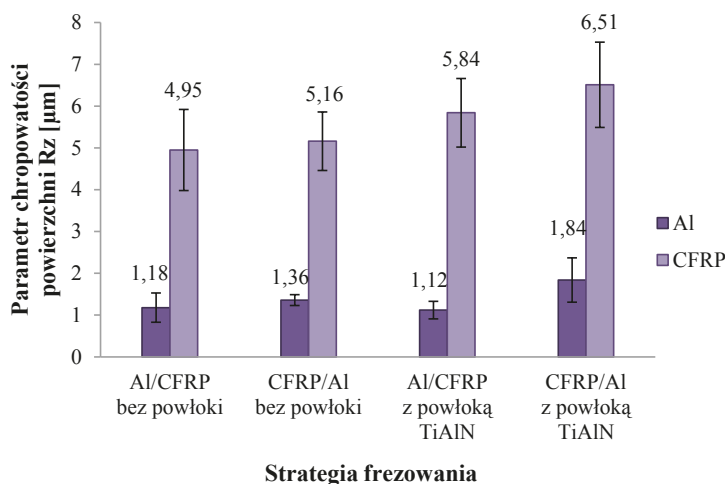
W przypadku parametru Ra minimalną wartość chropowatości powierzchni stopu aluminium zaobserwowano w dwóch konfiguracjach: Al/CFRP bez powłoki i Al/CFRP z powłoką TiAlN ($0,30\text{ }\mu\text{m}$). Minimalna wartość tego parametru dla warstwy kompozytowej wystąpiła po zastosowaniu strategii frezowania Al/CFRP i narzędzia niepowlekanego. Wartości maksymalne parametru Ra dla obu warstw uzyskano w konfiguracji CFRP/Al z użyciem narzędzia z powłoką TiAlN.



Rys. 4.6. Parametr chropowatości powierzchni Rt w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej



Rys. 4.7. Parametr chropowatości powierzchni Rmax w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej



Rys. 4.8. Parametr chropowatości powierzchni Rz w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej

Na podstawie wykresów 4.6–4.8 można zauważyć, że dla parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z otrzymano podobne rezultaty – minimalną wartość chropowatości powierzchni warstwy metalowej zaobserwowano po obróbce w konfiguracji Al/CFRP z użyciem narzędzia powlekanego, a warstwy kompozytowej w konfiguracji Al/CFRP i frezu bez powłoki. Maksymalne wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z dla obu materiałów odnotowano po obróbce w konfiguracji CFRP/Al z powłoką TiAlN. Chropowatość powierzchni kompozytu CFRP dla obu strategii frezowania i dla obu narzędzi była większa niż chropowatość powierzchni stopu aluminium. Było to związane z niejednorodnością i ściernym charakterem materiału kompozytowego oraz występowaniem typowych wad na jego powierzchni (wyciąganiem włókien i pękaniem osnowy). Ponadto wartości wszystkich rozpatrywanych parametrów chropowatości zarówno dla stopu aluminium, jak i kompozytu epoksydowo-węglowego były większe w konfiguracji CFRP/Al w porównaniu do konfiguracji Al/CFRP. Podobne rezultaty zaobserwowano w badaniach uskoju. Zastosowanie narzędzia powlekanego w konfiguracji Al/CFRP zmniejszało, natomiast w konfiguracji CFRP/Al zwiększało chropowatość powierzchni stopu aluminium. W przypadku warstwy kompozytowej w obu konfiguracjach obecność powłoki narzędziowej powodowała uzyskanie większych wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z .

W celu określenia istotności wpływu strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej na analizowane parametry chropowatości powierzchni przeprowadzono analizę statystyczną, którą rozpoczęto od zbadania rozkładów zmiennych ilościowych. W tym celu obliczono podstawowe statystyki opisowe i zbadano normalność rozkładów. W tabelach 4.7–4.10 zamieszczono efekty przeprowadzonych obliczeń.

Tabela 4.7. Wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni Ra

Warstwa	Wariant obróbki	Parametr chropowatości powierzchni Ra [μm]						
		Średnia	Mediana	Odch. std.	Skośność	Kurtoza	W	P
Al	Al/CFRP bez powłoki	0,30	0,30	0,03	0,45	0,19	0,98	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	0,38	0,38	0,02	0,31	-0,13	0,97	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,30	0,30	0,01	0,39	0,19	0,94	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	0,39	0,28	0,32	3,03	8,18	0,43	< 0,01
CFRP	Al/CFRP bez powłoki	0,89	0,89	0,17	0,26	-0,64	0,98	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	1,03	1,04	0,15	1,04	6,90	0,93	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,97	0,96	0,14	0,41	0,04	0,98	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	1,10	1,09	0,20	0,76	0,86	0,96	< 0,01

W – statystyka testu Shapiro-Wilka,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

Tabela 4.8. Wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni Rt

Warstwa	Wariant obróbki	Parametr chropowatości powierzchni Rt [μm]						
		Średnia	Mediana	Odch. std.	Skośność	Kurtoza	W	P
Al	Al/CFRP bez powłoki	1,80	1,79	0,29	2,21	16,91	0,88	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	1,86	1,80	0,31	2,93	12,73	0,75	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	1,56	1,40	0,55	3,26	14,25	0,67	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	2,79	1,57	3,44	2,73	6,09	0,46	< 0,01
CFRP	Al/CFRP bez powłoki	6,81	6,56	2,15	6,97	72,18	0,53	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	7,27	7,12	1,64	2,85	22,22	0,84	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	8,25	8,08	1,58	0,93	1,26	0,95	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	9,32	9,06	2,05	0,69	0,19	0,97	< 0,01

W – statystyka testu Shapiro-Wilka,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

Tabela 4.9. Wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni R_{max}

Warstwa	Wariant obróbki	Parametr chropowatości powierzchni R_{max} [μm]						
		Średnia	Mediana	Odch. std.	Skośność	Kurtoza	W	p
Al	Al/CFRP bez powłoki	1,69	1,68	0,28	2,59	21,20	0,86	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	1,77	1,73	0,29	2,63	12,65	0,80	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	1,46	1,28	0,55	3,46	15,82	0,64	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	2,66	1,51	1,27	2,71	5,97	0,47	< 0,01
CFRP	Al/CFRP bez powłoki	6,49	6,30	1,75	7,26	75,89	0,50	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	6,93	6,83	1,45	3,12	24,25	0,82	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	7,81	7,59	1,50	1,03	1,93	0,95	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	8,85	8,49	1,84	0,87	0,63	0,95	< 0,01

W – statystyka testu Shapiro-Wilka,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

Tabela 4.10. Wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni R_z

Warstwa	Wariant obróbki	Parametr chropowatości powierzchni R_z [μm]						
		Średnia	Mediana	Odch. std.	Skośność	Kurtoza	W	p
Al	Al/CFRP bez powłoki	1,18	1,12	0,35	1,40	2,10	0,88	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	1,36	1,35	0,13	1,61	4,36	0,89	< 0,01
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	1,12	1,07	0,21	2,37	7,94	0,79	< 0,01
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	1,84	1,20	0,83	2,89	7,39	0,45	< 0,01
CFRP	Al/CFRP bez powłoki	4,95	5,02	0,97	1,78	13,87	0,84	< 0,01
	CFRP/Al bez powłoki	5,16	5,15	0,70	0,17	-0,30	0,99	0,20
	Al/CFRP z powłoką TiAlN	5,84	5,85	0,82	0,28	-0,06	0,99	0,06
	CFRP/Al z powłoką TiAlN	6,51	6,42	1,02	0,42	0,41	0,98	< 0,01

W – statystyka testu Shapiro-Wilka,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

Na podstawie wyników testu Shapiro-Wilka zawartych w tabelach 4.7–4.10 można zauważyć, że wartości parametrów R_a , R_t , R_{max} i R_z nie wykazywały rozkładu normalnego dla żadnego z rozpatrywanych wariantów obróbki.

Tabela 4.11. Wyniki testu Levene'a i testu Welcha

Warstwa	Parametr	Df	F Levene'a	F Welcha	P
Al	Ra	3	140,60	1289,98	< 0,01
	Rt	3	146,08	32,82	< 0,01
	Rmax	3	146,32	36,94	< 0,01
	Rz	3	132,48	119,53	< 0,01
CFRP	Ra	3	15,17	72,73	< 0,01
	Rt	3	10,78	99,22	< 0,01
	Rmax	3	11,38	86,88	< 0,01
	Rz	3	4,30	190,80	< 0,01

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of Freedom*),

F Levene'a – statystyka testu Levene'a,

F Welcha – statystyka testu Welcha,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*).

Wyniki testu Levene'a wskazały, że nie zostało również spełnione założenie o jednorodności wariancji. W celu sprawdzenia niespełnienia założenia o jednorodności wariancji wykonano dodatkowo test Welcha, którego rezultaty potwierdziły wyniki testu Levene'a (tabela 4.11).

Biorąc pod uwagę, że wieloczynnikowa analiza wariancji przy zachowaniu równoliczności próby jest odporna na niespełnienie założeń o rozkładzie normalnym i jednorodności wariancji, w kolejnym etapie dla rozpatrywanych parametrów chropowatości powierzchni wykonano dwuczynnikową analizę wariancji ANOVA.

Tabela 4.12. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla parametru chropowatości powierzchni Ra

Efekt	Al					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	2,18	1	2,18	83,37	< 0,01	0,06
P: Obecność powłoki narzędziowej	< 0,01	1	< 0,01	0,13	0,72	< 0,01
Interakcja S×P	< 0,01	1	< 0,01	0,12	0,73	< 0,01
Błąd	33,42	1276	0,03			
Całość	35,61	1279				

cd. Tabela 4.12. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla parametru chropowatości powierzchni Ra

Efekt	CFRP					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	5,51	1	5,51	190,52	< 0,01	0,13
P: Obecność powłoki narzędziowej	1,72	1	1,72	59,51	< 0,01	0,04
Interakcja S×P	0,02	1	0,02	0,70	0,40	< 0,01
Błąd	36,89	1276	0,03			
Całość	44,14	1279				

SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),

MS – średnie kwadraty odchyłeń (ang. *Mean Squares*),

F – statystyka testowa,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

η_p^2 – cząstkowa siła efektu.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 4.12 można zaobserwować, że dla parametru Ra zmierzonego na powierzchni stopu aluminium wysoko istotny statystycznie rezultat uzyskano wyłącznie dla strategii frezowania ($F_{1, 1276} = 83,37$; $p < 0,01$). Obecność powłoki narzędziowej i interakcja S×P osiągnęły zbliżoną wartość statystyki testowej i z punktu widzenia analizy statystycznej nie miały istotnego wpływu na parametr chropowatości powierzchni Ra. Strategia frezowania osiągnęła przeciętną wielkość efektu ($\eta_p^2 = 0,06$). W przypadku parametru Ra uzyskanego na powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego wysoko istotne statystycznie rezultaty otrzymano dla strategii frezowania ($F_{1, 1276} = 190,52$; $p < 0,01$) i obecności powłoki narzędziowej ($F_{1, 1276} = 59,51$; $p < 0,01$). Również i w tym przypadku wpływ interakcji obu czynników był nieistotny statystycznie. Strategia frezowania miała największy wpływ na parametr chropowatość powierzchni Ra i wyjaśniała 13% zmienności w zakresie badanej zmiennej zależnej. Obecność powłoki narzędziowej wyjaśniała zaledwie 4% zmienności parametru Ra niewyjaśnionej przez pozostałe czynniki grupujące.

Tabela 4.13. Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya dla parametru chropowatości powierzchni Ra

Lp.	Wariant obróbki	Al				CFRP			
		{1}	{2}	{3}	{4}	{1}	{2}	{3}	{4}
1	Al/CFRP bez powłoki	–	< 0,01	0,99	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2	CFRP/Al bez powłoki	< 0,01	–	< 0,01	0,96	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01
3	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,99	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01
4	CFRP/Al z powłoką TiAlN	< 0,01	0,96	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–

W kolejnym etapie, w celu wyodrębnienia grup jednorodnych i określenia różnic istotnych statystycznie między poszczególnymi wariantami obróbki, wykonano testy HSD Tukeya.

Test jednorodności różnic HSD Tukeya wykazał istnienie dwóch grup jednorodnych dla wartości parametru Ra otrzymanych na powierzchni stopu aluminium i czterech grup dla wartości tego parametru uzyskanych na powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego. W tabeli 4.13 zestawiono wyniki testu istotności przeprowadzonego dla parametru chropowatości powierzchni Ra dla obu warstw tworzących rozpatrywaną konstrukcję przekładkową. Analizując otrzymane rezultaty można zauważyć, że istotne statystycznie różnice dla wartości parametru chropowatości powierzchni Ra uzyskanego na powierzchni stopu aluminium występowały między wariantami:

- Al/CFRP bez powłoki i CFRP/Al bez powłoki,
- Al/CFRP bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN,
- CFRP/Al bez powłoki i Al/CFRP z powłoką TiAlN,
- Al/CFRP z powłoką TiAlN i CFRP/Al z powłoką TiAlN.

Dla pozostałych wariantów nie zaobserwowano różnic istotnych statystycznie.

W przypadku wartości parametru chropowatości powierzchni Ra uzyskanych dla warstwy kompozytowej istotne statystycznie różnice wystąpiły między wszystkimi rozpatrywanymi wariantami obróbki.

Tabela 4.14. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla parametru chropowatości powierzchni Rt

Efekt	Al					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	134,06	1	134,06	43,50	< 0,01	0,03
P: Obecność powłoki narzędziowej	39,10	1	39,10	12,69	< 0,01	0,01
Interakcja S×P	109,72	1	109,72	35,60	< 0,01	0,03
Błąd	3932,33	1276	3,08			
Całość	4215,21	1279				
Efekt	CFRP					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	185,68	1	185,68	53,07	< 0,01	0,04
P: Obecność powłoki narzędziowej	972,21	1	972,21	277,88	< 0,01	0,18
Interakcja S×P	29,17	1	29,17	8,34	< 0,01	0,01
Błąd	4464,30	1276	3,50			
Całość	5351,36	1279				

SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),

MS – średnie kwadraty odchyłeń (ang. *Mean Squares*),

F – statystyka testowa,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

η_p^2 – cząstkowa siła efektu.

W tabeli 4.14 zamieszczono wyniki analizy wariancji otrzymane dla parametru chropowatości powierzchni Rt. Analizując powyższe rezultaty można zauważyć, że dla obu materiałów tworzących przekładkę, wszystkie rozpatrywane zmienne niezależne uzyskały wysoko istotny statystycznie wpływ na wartości tego parametru. Najsilniejszy wpływ na wartości parametru Rt uzyskane na powierzchni stopu aluminium miała strategia frezowania ($F_{1, 1276} = 43,50$; $p < 0,01$), następnie interakcja S×P ($F_{1, 1276} = 36,50$; $p < 0,01$), a najmniejszy – obecność powłoki narzędziowej ($F_{1, 1276} = 12,69$; $p < 0,01$). Obserwowane siły efektów były małe, gdyż wyjaśniały, odpowiednio, 3%, 1% i 3% zmienności parametru chropowatości powierzchni Rt

niewyjaśnionej przez inne czynniki. Największy wpływ na parametr chropowatości powierzchni R_t otrzymany na powierzchni materiału kompozytowego miała obecność powłoki narzędziowej – $F_{1, 1276} = 277,88$; $p < 0,01$, następnie strategia frezowania – $F_{1, 1276} = 53,03$; $p < 0,01$, zaś najmniejszy wpływ miała interakcja $S \times P$ – $F_{1, 1276} = 8,34$; $p < 0,01$ (tabela 4.14). Siły efektów wyjaśniały, odpowiednio 18%, 4% i 1% zmienności w zakresie parametru R_t niewyjaśnionej przez inne źródła zmienności.

Tabela 4.15. Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya dla parametru chropowatości powierzchni R_t

Lp.	Wariant obróbki	Al				CFRP			
		{1}	{2}	{3}	{4}	{1}	{2}	{3}	{4}
1	Al/CFRP bez powłoki	–	0,97	0,32	< 0,01	–	0,01	< 0,01	< 0,01
2	CFRP/Al bez powłoki	0,97	–	0,14	< 0,01	0,01	–	< 0,01	< 0,01
3	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,32	0,14	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01
4	CFRP/Al z powłoką TiAlN	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–

Testy post-hoc przeprowadzone dla wartości parametru chropowatości powierzchni R_t pozwoliły utworzyć 2 grupy jednorodne w przypadku warstwy metalowej oraz 4 grupy jednorodne dla warstwy kompozytowej. Wyniki prawdopodobieństwa występowania różnic istotnych statystycznie dla parametru R_t przedstawiono w tabeli 4.15. Istotne statystycznie różnice dla wartości parametru R_t uzyskanego na powierzchni stopu aluminium występowały między wariantami:

- Al/CFRP bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN,
- CFRP/Al bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN
- Al/CFRP z powłoką TiAlN i CFRP/Al z powłoką TiAlN.

W przypadku kompozytu epoksydowo-węglowego utworzone zostały 4 grupy jednorodne, co oznacza, że średnie wartości parametru chropowatości powierzchni R_t dla wszystkich rozpatrywanych wariantów obróbki różnią się istotnie statystycznie.

W tabeli 4.16 przedstawiono wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji wykonanej dla wyników parametru chropowatości powierzchni R_{max} .

Tabela 4.16. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla parametru chropowatości powierzchni Rmax

Efekt	Al					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	132,08	1	132,08	47,22	< 0,01	0,04
P: Obecność powłoki narzędziowej	34,01	1	34,01	12,16	< 0,01	0,01
Interakcja S×P	101,44	1	101,44	36,27	< 0,01	0,03
Błąd	3569,08	1276	2,80			
Całość	3836,61	1279				
Efekt	CFRP					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	172,20	1	172,20	50,08	< 0,01	0,04
P: Obecność powłoki narzędziowej	836,96	1	836,96	243,40	< 0,01	0,16
Interakcja S×P	29,24	1	29,24	8,50	< 0,01	0,01
Błąd	4387,60	1276	3,44			
Całość	5426	1279				

SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),

MS – średnie kwadraty odchyłeń (ang. *Mean Squares*),

F – statystyka testowa,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

η_p^2 – cząstkowa siła efektu.

Wyniki analizy statystycznej pokazują, że dla parametru chropowatości powierzchni Rmax otrzymanego na powierzchni stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego dla wszystkich rozpatrywanych źródeł zmienności otrzymano wysoko istotne statystycznie rezultaty (tabela 4.16). Największy wpływ na wartości parametru Rmax otrzymanego na powierzchni stopu aluminium miała strategia frezowania ($F_{1, 32} = 47,222$; $p < 0,01$), a najmniejszy obecność powłoki narzędziowej ($F_{1, 32} = 12,16$; $p < 0,01$). Siły efektów głównych były małe, gdyż wynosiły 4% (strategia frezowania), 1% (obecność powłoki narzędziowej) i 3% (interakcja S×P). Analizując rezultaty parametru Rmax uzyskane dla warstwy

kompozytowej można zauważyć, że obecność powłoki narzędziowej w największym stopniu różnicowała parametr R_{max} ($F_{1, 32} = 277,88$; $p < 0,01$) i wyjaśniała 16% zmienności w zakresie tego parametru, której nie wyjaśniają inne czynniki. Interakcja $S \times P$ najmniej wpływała na parametr R_{max} ($F_{1, 32} = 29,24$; $p < 0,01$). Otrzymane siły efektów były małe i wskazywały, że 1% i 4% zmienności parametru R_{max} , której nie wyjaśniały inne czynniki, mogły być wyjaśnione strategią frezowania i interakcją $S \times P$.

Tabela 4.17. Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya dla parametru chropowatości powierzchni R_{max}

Lp.	Wariant obróbki	Al				CFRP			
		{1}	{2}	{3}	{4}	{1}	{2}	{3}	{4}
1	Al/CFRP bez powłoki	–	0,93	0,28	< 0,01	–	0,02	< 0,01	< 0,01
2	CFRP/Al bez powłoki	0,93	–	0,08	< 0,01	0,02	–	< 0,01	< 0,01
3	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,93	0,28	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01
4	CFRP/Al z powłoką TiAlN	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–

W tabeli 4.17 przedstawiono wyniki testu HSD Tukeya otrzymane dla parametru chropowatości powierzchni R_{max} . Rezultaty uzyskane dla warstwy metalowej zostały podzielone na 2 grupy jednorodne, analogiczne jak w przypadku parametru R_t . Podobna sytuacja wystąpiła dla wyników uzyskanych na warstwie kompozytowej – otrzymano 4 grupy jednorodne, między którymi występują wysoko istotne statystycznie różnice.

Tabela 4.18. Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA dla parametru chropowatości powierzchni Rz

Efekt	Al					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	65,12	1	65,12	66,42	< 0,01	0,05
P: Obecność powłoki narzędziowej	14,04	1	14,04	14,32	< 0,01	0,01
Interakcja S×P	23,05	1	23,05	23,51	< 0,01	0,02
Błąd	1250,55	1276	0,98			
Całość	1352,76	1279				
Efekt	CFRP					
	SS	Df	MS	F	p	η_p^2
S: Strategia frezowania	61,03	1	61,03	64,28	< 0,01	0,05
P: Obecność powłoki narzędziowej	404,22	1	404,22	425,74	< 0,01	0,25
Interakcja S×P	17,20	1	17,20	18,12	< 0,01	0,01
Błąd	1211,51	1276	0,95			
Całość	1693,96	1279				

SS – suma kwadratów (ang. *Sum of Squares*),

Df – stopnie swobody (ang. *Degrees of freedom*),

MS – średnie kwadraty odchyłeń (ang. *Mean Squares*),

F – statystyka testowa,

p – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

η_p^2 – cząstkowa siła efektu.

W tabeli 4.18 zestawiono wyniki analizy wariancji przeprowadzonej dla parametru chropowatości powierzchni Rz. Analizując powyższe rezultaty można zauważyć, że strategia frezowania, obecność powłoki narzędziowej i ich interakcja wysoko istotnie statystycznie oddziaływały na największą wysokość profilu chropowatości stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego. W przypadku stopu aluminium, podobnie jak dla parametrów Rt i Rmax, największy wpływ na parametr Rz miała strategia frezowania ($F_{1, 32} = 66,42$; $p < 0,01$), która osiągnęła przeciętną siłę efektu ($\eta_p^2 = 0,05$). Najmniejszy wpływ na wartości parametru Rz

miała obecność powłoki narzędziowej ($F_{1, 32} = 66,42$; $p < 0,01$), która wyjaśniała zaledwie 1% zmienności badanej zmiennej zależnej, niewyjaśnionej przez inne czynniki klasyfikujące. Analiza wariancji wykazała, że na parametr chropowatości powierzchni Rz kompozytu epoksydowo-węglowego najsilniej wpływała obecność powłoki narzędziowej ($F_{1, 1276} = 425,74$; $p < 0,01$), która wyjaśniała 25% zmienności parametru Rz niewyjaśnionej przez inne czynniki. Najmniejszy wpływ miała natomiast interakcja S×P ($F_{1, 1276} = 17,20$; $p < 0,01$), która wyjaśniała zaledwie 1% zmienności badanej zmiennej zależnej niewyjaśnionej przez inne źródła zmienności (tabela 4.18).

Tabela 4.19. Wyniki testu istotności różnic HSD Tukeya dla parametru chropowatości powierzchni Rz

Lp.	Wariant obróbki	Al				CFRP			
		{1}	{2}	{3}	{4}	{1}	{2}	{3}	{4}
1	Al/CFRP bez powłoki	–	0,09	0,88	< 0,01	–	0,04	< 0,01	< 0,01
2	CFRP/Al bez powłoki	0,09	–	0,01	< 0,01	0,04	–	< 0,01	< 0,01
3	Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,88	0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01
4	CFRP/Al z powłoką TiAlN	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–

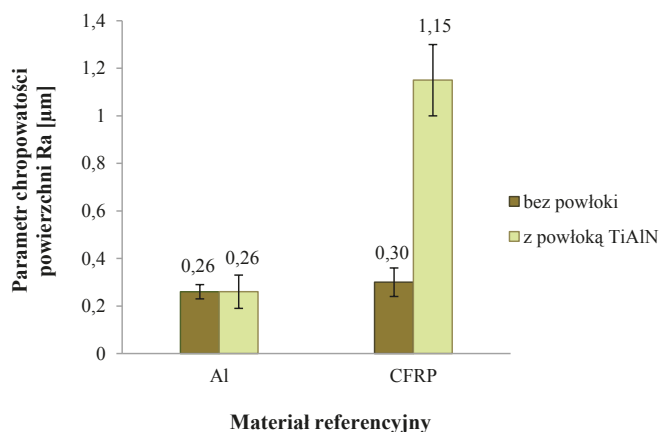
W związku z tym, że analiza wariancji wykonana na podstawie rezultatów parametru Rz wykazała występowanie różnic istotnych statystycznie, w kolejnym kroku wykonano testy post-hoc HSD Tukeya (tabela 4.19). Wyniki otrzymane dla stopu aluminium zostały podzielone na 3 grupy jednorodne. Różnice wysoko istotne statystycznie występowały między następującymi wariantami obróbki:

- Al/CFRP bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN,
- CFRP/Al bez powłoki i Al/CFRP z powłoką TiAlN,
- CFRP/Al bez powłoki i CFRP/Al z powłoką TiAlN,
- Al/CFRP z powłoką TiAlN i CFRP/Al z powłoką TiAlN.

W przypadku kompozytu epoksydowo-węglowego test jednorodności grup Tukeya wskazał występowanie 4 niezależnych grupy, co oznacza, że średnie wartości parametru Rz otrzymane dla rozpatrywanych wariantów obróbki różniły się istotnie statystycznie (tabela 4.19).

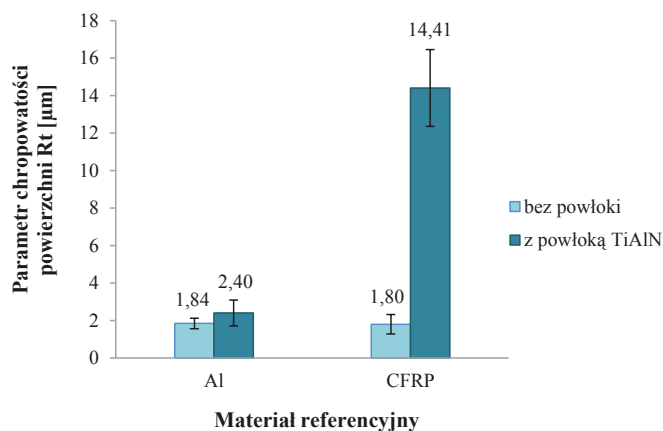
Pomiary parametrów chropowatości powierzchni wykonano również dla próbek referencyjnych, tj. zmierzono parametry chropowatości powierzchni dla analogicznych pojedynczych materiałów obrabianych frezem bez powłoki i z powłoką TiAlN (rys. 4.9–4.12).

Porównując otrzymane wartości parametru chropowatości powierzchni Ra dla próbek referencyjnych można również zauważyć, że większe wartości tego parametru wystąpiły na powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego (rys. 4.9). Analiza wpływu obecności powłoki narzędziowej na wartość parametru Ra próbek referencyjnych wykazała, że na powierzchni stopu aluminium dla obu narzędzi otrzymano jednakowe wartości ($0,26\text{ }\mu\text{m}$).

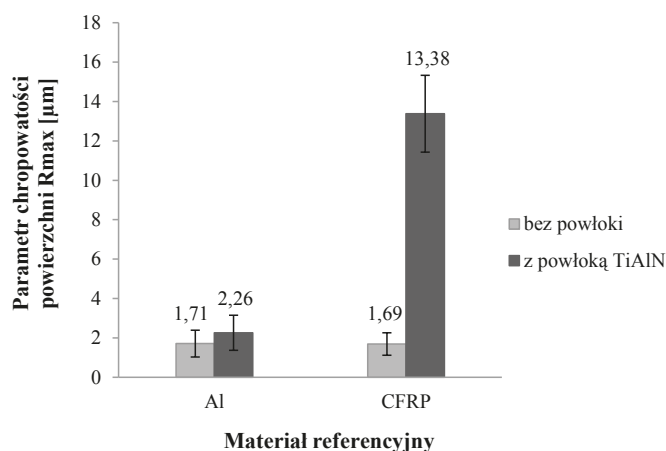


Rys. 4.9. Parametr chropowatości powierzchni Ra w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej po frezowaniu próbek referencyjnych

Wykresy parametrów chropowatości powierzchni Rt i Rmax otrzymane dla próbek referencyjnych (rys. 4.10 i 4.11) kształtowały się w podobny sposób. Maksymalne wartości tych parametrów chropowatości powierzchni osiągnięto na powierzchniach kompozytu epoksydowo-węglowego po obróbce frezem z naniesioną powłoką TiAlN (Rt – $14,41\text{ }\mu\text{m}$, Rmax – $13,38\text{ }\mu\text{m}$), a minimalne również na warstwach kompozytowych frezowanych jednak narzędziem bez powłoki (Rt – $1,80\text{ }\mu\text{m}$, Rmax – $1,69\text{ }\mu\text{m}$).

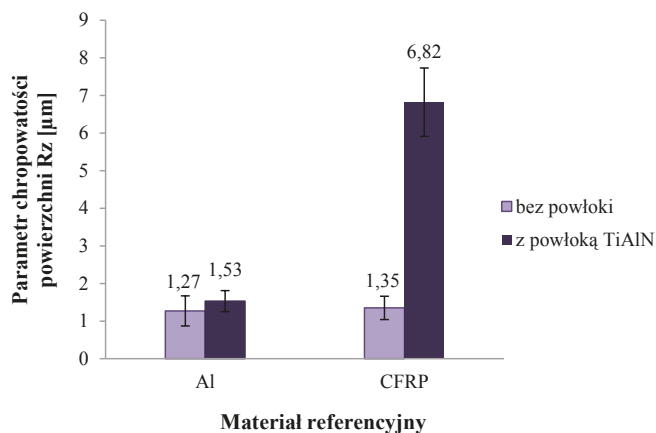


Rys. 4.10. Parametr chropowatości powierzchni R_t w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej po frezowaniu próbek referencyjnych



Rys. 4.11. Parametr chropowatości powierzchni R_{max} w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej po frezowaniu próbek referencyjnych

Na podstawie otrzymanych wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t i R_{max} można zauważyć, że dla obu badanych materiałów obecność powłoki narzędziowej prowadziła do uzyskania większych wartości parametrów R_t i R_{max} (rys. 4.10 i rys. 4.11).



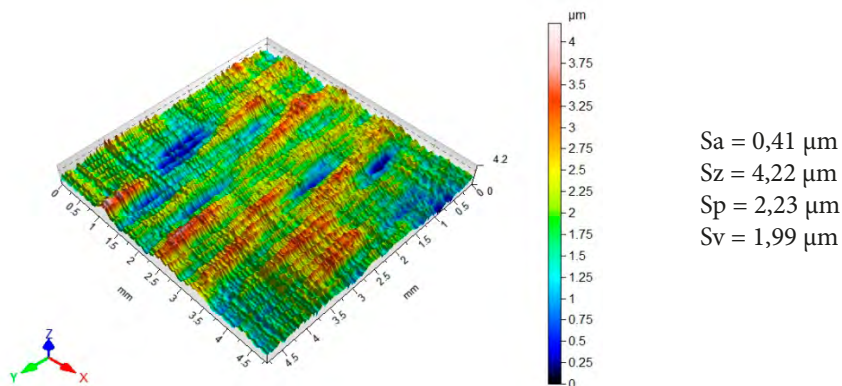
Rys. 4.12. Parametr chropowatości powierzchni Rz w zależności od strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej po frezowaniu próbek referencyjnych

Na rysunku 4.12 przedstawiono wyniki parametru chropowatości powierzchni Rz. Maksymalną wartość, podobnie jak w przypadku parametrów Ra, Rt i Rmax, osiągnięto na powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego po obróbce narzędziem powlekanym (6,82 μm). Wartość minimalną zaobserwowano na powierzchni stopu aluminium po frezowaniu narzędziem bez powłoki (1,27 μm). Różnica między ekstremami wynosiła 81%. Dla obu badanych materiałów powłoka narzędziowa powodowała wzrost określonego parametru chropowatości powierzchni.

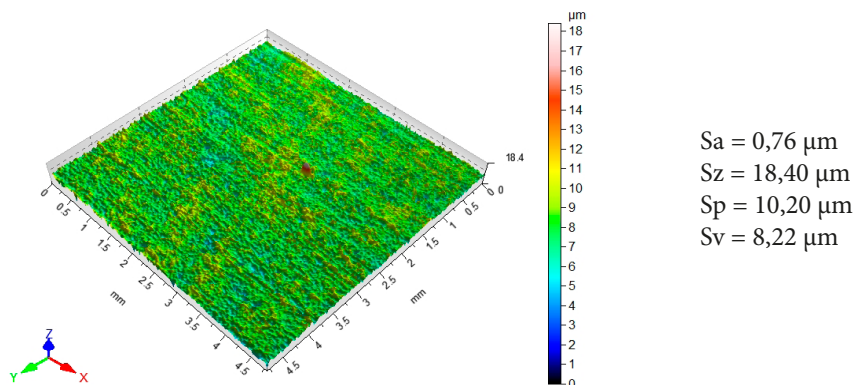
4.2.2. Topografia powierzchni

Na rysunkach 4.13–4.16 zaprezentowane zostały mapy 3D obrazujące topografię powierzchni próbek po obróbce frezowaniem. Przedstawiono topografię powierzchni każdej z warstw tworzących konstrukcję typu *sandwich* w zależności od strategii frezowania i użytego narzędzia.

a)



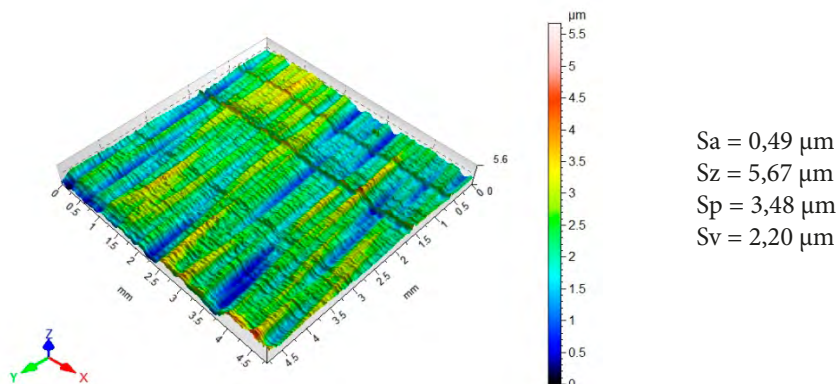
b)



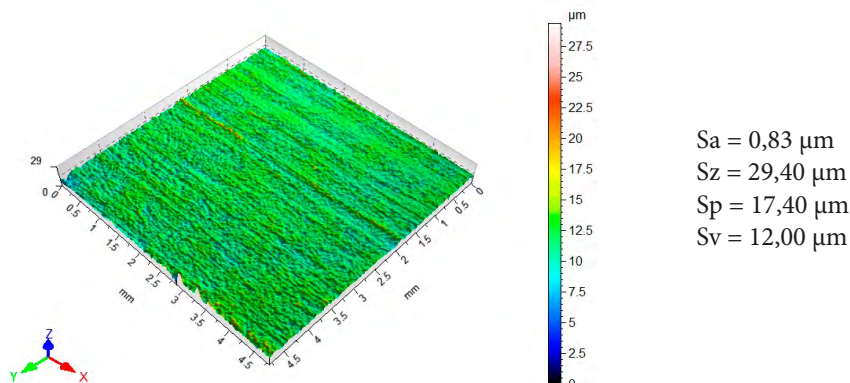
Rys. 4.13. Topografia powierzchni stopu aluminium (a) i kompozytu epoksydowo-węglowego (b) po frezowaniu w konfiguracji Al/CFRP i zastosowaniu narzędzia bez powłoki

Topografia powierzchni warstwy metalowej próbki frezowanej w strategii Al/CFRP z użyciem narzędzia bez powłoki (rys. 4.13 a) charakteryzuje się ukierunkowanym układem nierówności. Wzniesienia i zagłębienia mają charakter mieszany – występują zarówno w sposób okresowy, jaki i losowy. Widoczne są również liczne rowki i grzbiety, które różnicują stan chropowatości powierzchni. W przypadku kompozytu epoksydowo-węglowego (rys. 4.13 b) uzyskano powierzchnię jednokierunkową o losowym rozmieszczeniu nierówności. Parametry Sa , Sz , Sp i Sv chropowatości powierzchni 3D otrzymane na powierzchni stopu aluminium były o 46%, 71%, 78% i 76% mniejsze niż na powierzchni warstwy kompozytowej.

a)



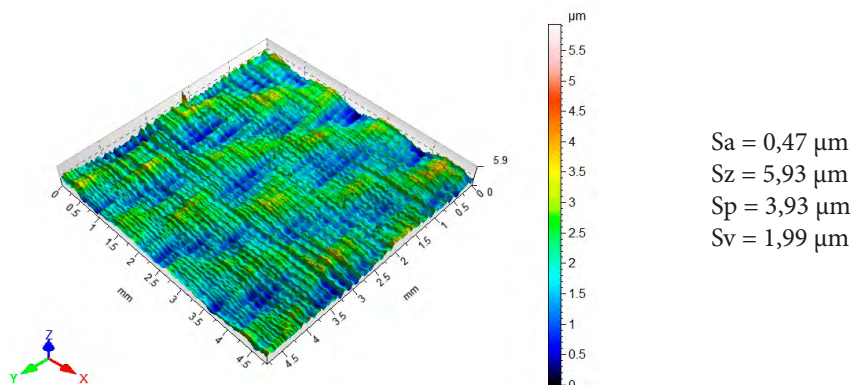
b)



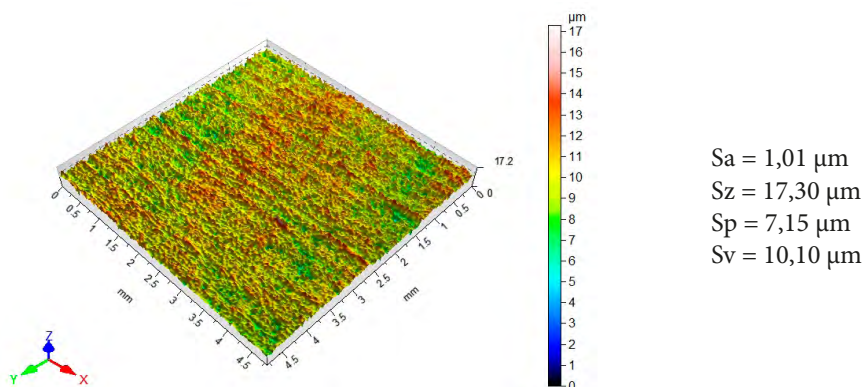
Rys. 4.14. Topografia powierzchni stopu aluminium (a) i kompozytu epoksydowo-węglowego (b) po frezowaniu w konfiguracji CFRP/Al i zastosowaniu narzędzia bez powłoki

Po obróbce stopu aluminium w konfiguracji CFRP/Al bez powłoki narzędziowej otrzymano powierzchnię ukierunkowaną o strukturze mieszanej (rys. 4.14 a). Topografia charakteryzuje się zróżnicowanym układem nierówności. Powierzchnia kompozytu epoksydowo-węglowego jest jednokierunkowa o losowym, równomiernym rozkładzie nierówności. Parametry S_a , S_z , S_p i S_v chropowatości powierzchni 3D zmierzone na warstwie metalowej były mniejsze o blisko 41%, 81%, 80% i 82% od parametrów uzyskanych na warstwie kompozytowej.

a)



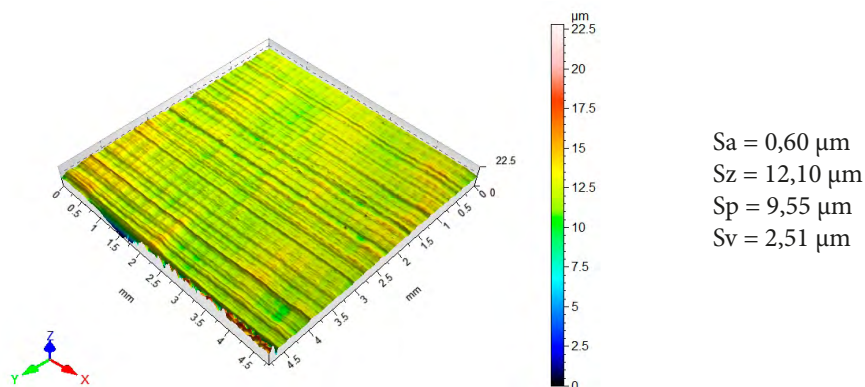
b)



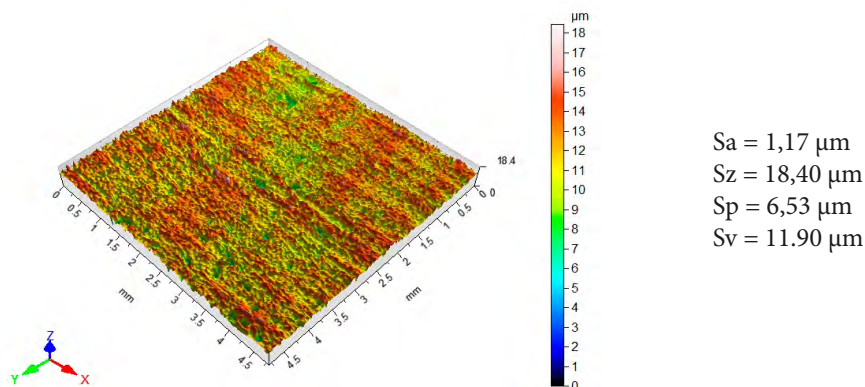
Rys. 4.15. Topografia powierzchni stopu aluminium (a) i kompozytu epoksydowo-węglowego (b) po frezowaniu w konfiguracji Al/CFRP i zastosowaniu narzędzia z powłoką TiAlN

Po obróbce z zastosowaniem strategii Al/CFRP i narzędzia z powłoką TiAlN na powierzchni stopu aluminium otrzymano strukturę ukierunkowaną o zdeteminowanym rozkładzie nierówności (rys. 4.15 a). Nierówności są równomierne i występują w stałych odstępach. W przypadku kompozytu epoksydowo-węglowego (rys. 4.15 b) otrzymano powierzchnię jednokierunkową o losowym rozmieszczeniu nierówności. Mikrogeometria charakteryzuje się niewielką różnicą poziomów elementów topografii. Parametry S_a , S_z , S_p i S_v chropowatości powierzchni 3D otrzymane na powierzchni stopu aluminium były o 53%, 66%, 45% i 80% mniejsze niż dla warstwy kompozytowej.

a)



b)



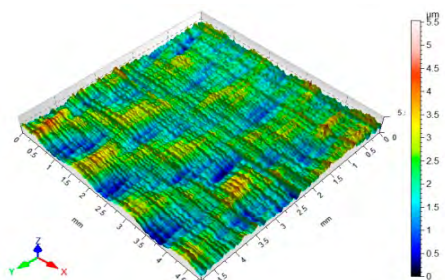
Rys. 4.16. Topografia powierzchni stopu aluminium (a) i kompozytu epoksydowo-węglowego (b) po frezowaniu w konfiguracji CFRP/Al i zastosowaniu narzędzia z powłoką TiAlN

Po frezowaniu z zastosowaniem strategii CFRP/Al i narzędzia powlekanego na warstwie metalowej otrzymano topografię jednokierunkową o okresowym występowaniu nierówności. Na powierzchni można zauważyć równomierne zdeformowanie powierzchni – prostoliniowe ślady występują w zbliżonych odstępach (rys. 4.16 a). Topografia powierzchni kompozytu charakteryzuje się jednokierunkowym układem nierówności. Widoczne są liczne wgłębienia i wzniesienia występujące w sposób losowy (rys. 4.16 b). W rozpatrywanym przypadku parametry S_a i S_z chropowatości powierzchni 3D były o 95% i 52 % większe niż na powierzchni stopu aluminium. W przypadku parametru S_p uzyskanego dla warstwy kompozytowej nastąpiło spłaszczenie wierzchołków mikronierówności – parametr S_p uległ zmniejszeniu z wartości $9,55 \text{ } \mu\text{m}$ do wartości $6,53 \text{ } \mu\text{m}$ (32%). Wartość najmniejszego wgłębienia profilu 3D (S_v) wzrosła ponad czterokrotnie.

W tabeli 4.20 zamieszczono mapy wraz z wartościami parametrów 3D zarejestrowane po obróbce próbek referencyjnych.

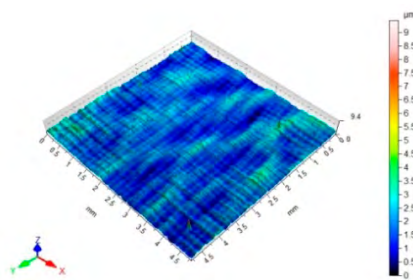
Tabela 4.20. Topografia powierzchni po frezowaniu próbek referencyjnych: a) stopu aluminium narzędziem bez powłoki, b) stopu aluminium narzędziem z powłoką TiAlN, c) kompozytu narzędziem bez powłoki, d) kompozytu narzędziem z powłoką TiAlN

a)



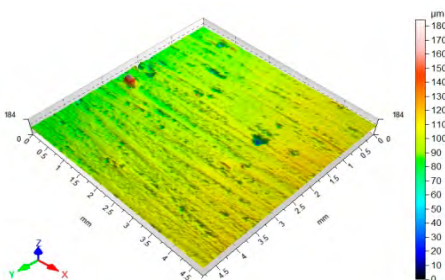
Sa = 0,50 μm ; Sz = 5,53 μm Sp = 3,39 μm ;
Sv = 2,13 μm

b)



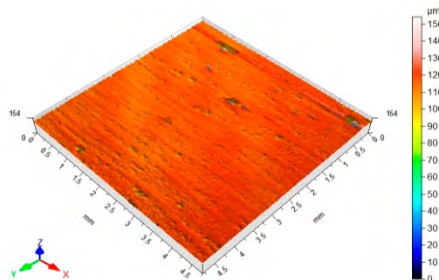
Sa = 0,44 μm ; Sz = 9,44 μm Sp = 7,60 μm ;
Sv = 1,84 μm

c)



Sa = 7,36 μm ; Sz = 18,40 μm Sp = 8,72 μm ;
Sv = 9,72 μm

d)



Sa = 2,59 μm ; Sz = 15,40 μm Sp = 8,83 μm ;
Sv = 11,60 μm

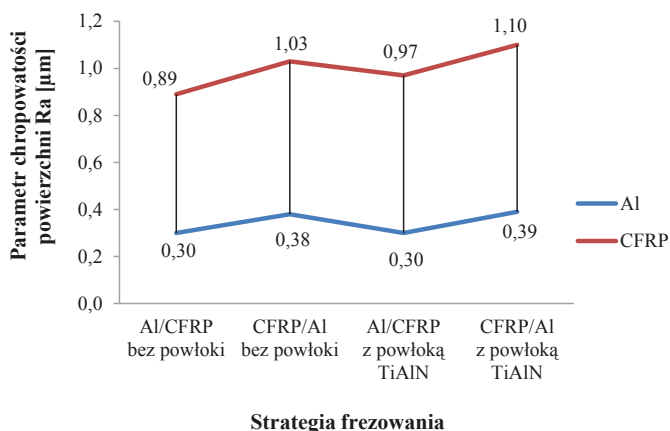
Topografia powierzchni stopu aluminium frezowanego narzędziem niepowlekanym charakteryzuje się ukierunkowanym układem mikronierówności. Widoczne są liczne rowki i grzbiety różnicujące jakość powierzchni. Analizując mapę 3D stopu aluminium po obróbce frezem z powłoką narzędziową można zauważyć podobny układ mikronierówności. Dla próbki skrawanej narzędziem powlekanym wartość parametru Sa chropowatości powierzchni 3D zmniejszyła się z 0,50 μm do 0,44 μm (12%). Podobna zmiana miała miejsce w przypadku parametru Sv – maksymalna

głębokość wgłębienia zmniejszyła się z 2,13 μm do 1,84 μm (różnica 14%). Użycie narzędzia powlekanego spowodowało zwiększenie wysokości wierzchołków mikronierówności – wartości parametrów Sz i Sp zwiększyły się, odpowiednio, z 5,53 μm do 9,44 (41%) μm oraz z 3,39 μm do 7,60 μm (55%).

Po frezowaniu materiału kompozytowego otrzymano zbliżoną strukturę geometryczną. Zastosowanie narzędzia powlekanego skutkowało występowaniem znacznego udziału obszarów w kolorze czerwonym, świadczących o większych wartościach chropowatości powierzchni. Dla obu próbek widoczne są pojedyncze wgłębienia i rowki położone głównie wzdłuż włókien węglowych. Obecność powłoki narzędziowej powodowała spłaszczenie wierzchołków mikronierówności – zmniejszenie wartości parametru Sa chropowatości powierzchni 3D z 7,36 μm do 2,59 (65%) μm i parametru Sz z 18,40 μm do 14,40 μm (22%). W przypadku pozostałych analizowanych parametrów użycie narzędzia powlekanego prowadziło do niewielkiego wzrostu parametru Sv (z 8,72 μm do 8,83 μm – różnica 1%) i parametru Sp (z 9,72 μm do 11,60 μm – różnica 16%).

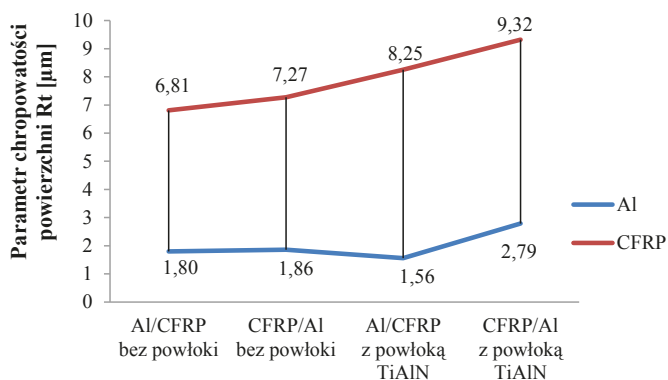
4.2.3. Ocena jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych za pomocą równomierności rozłożenia wady

Jakość konstrukcji przekładkowych może być również definiowana za pomocą równomiernego rozłożenia wady na powierzchni obrabianej. Na rysunkach 4.17–4.20 przedstawiono propozycję oceny jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych za pomocą równomierności rozłożenia wady na powierzchni obrabianej na podstawie wartości parametrów chropowatości powierzchni Ra, Rt, Rmax i Rz.



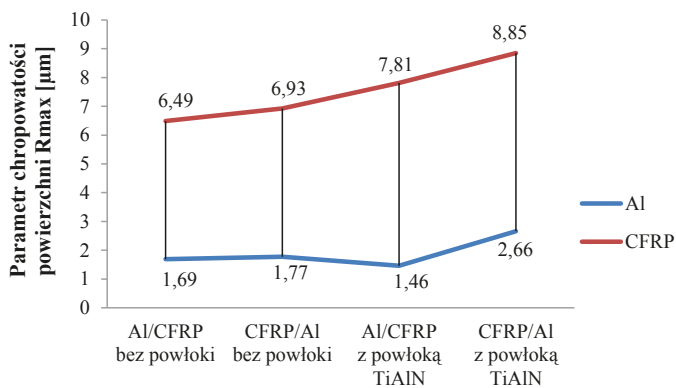
Rys. 4.17. Ocena jakości powierzchni konstrukcji II warstwowej za pomocą równomierności rozłożenia wady na powierzchni obrabianej na podstawie wartości parametru chropowatości powierzchni Ra

W przypadku parametru chropowatości powierzchni Ra najmniejszą rozbieżność między warstwami zaobserwowano po zastosowaniu strategii Al/CFRP i frezu bez powłoki narzędziowej, a największą rozbieżność w konfiguracji CFRP/Al z użyciem narzędzia z powłoką TiAlN.



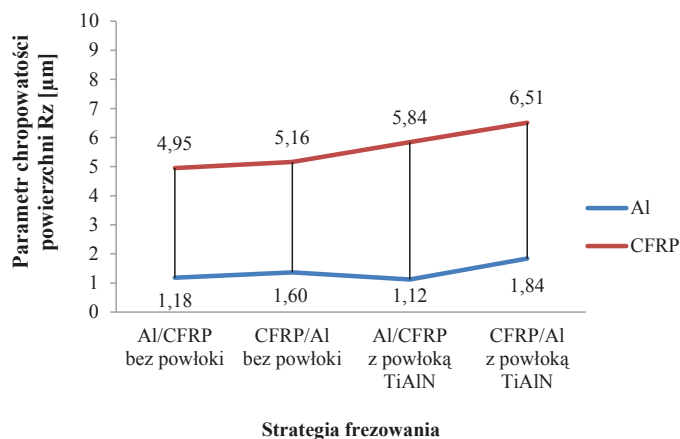
Strategia frezowania

Rys. 4.18. Ocena jakości powierzchni konstrukcji II warstwowej za pomocą równomierności rozłożenia wady na powierzchni obrabianej na podstawie wartości parametru chropowatości powierzchni Rt



Strategia frezowania

Rys. 4.19. Ocena jakości powierzchni konstrukcji II warstwowej za pomocą równomierności rozłożenia wady na powierzchni obrabianej na podstawie wartości parametru chropowatości powierzchni Rmax



Rys. 4.20. Ocena jakości powierzchni konstrukcji II warstwowej za pomocą równomierności rozłożenia wady na powierzchni obrabianej na podstawie wartości parametru chropowatości powierzchni Rz

Na podstawie wartości parametrów chropowatości powierzchni Rt, Rmax i Rz można ocenić, że zastosowanie konfiguracji Al/CFRP i narzędzia bez powłoki pozwoliło uzyskać największą jednorodność (najmniejszą różnicę między wartościami parametrów uzyskanymi na obu warstwach tworzących przekładkę), zaś konfiguracja Al/CFRP i narzędzie powlekane charakteryzowała się najmniejszą jednorodnością.

4.2.4. Wskaźnik jednorodności powierzchni

Obecnie obecnej brak jest norm i przepisów regulujących akceptowalną jakość powierzchni konstrukcji typu *sandwich* po obróbce. Wielu naukowców starało się przewidzieć chropowatość powierzchni tworząc modele teoretyczne i konfrontując je z wynikami badań doświadczalnych [24, 118, 139]. Jednak brak jest norm i publikacji, których przedmiotem byłyby hybrydowe konstrukcje warstwowe. Zasadnym wydaje się więc podjęcie próby utworzenia wskaźnika określającego poziom jednorodności chropowatości powierzchni po obróbce tego typu materiałów. Wskaźnik ten oznaczono jako W_R i sformułowano w następujący sposób:

$$W_R = \frac{|R_{Al} - R_{CFRP}|}{|R_{Al} + R_{CFRP}|} \quad (4.2)$$

gdzie:

W_R – wskaźnik jednorodności powierzchni,

R_{Al} – wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni stopu aluminium,

R_{CFRP} – wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego.

Różnica wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni warstw została odniesiona do całkowitej chropowatości powierzchni przekładki. Dzięki temu wskaźnik W_R może służyć do oceny jednorodności powierzchni konstrukcji przekładkowych.

W tabeli 4.21 zamieszczono obliczone wartości wskaźnika W_R dla analizowanych parametrów chropowatości powierzchni uzyskanych dla przyjętych wariantów obróbki.

Tabela 4.21. Wartości wskaźnika W_R

Wariant obróbki	Parametr			
	Ra	Rt	Rmax	Rz
Al/CFRP bez powłoki	0,50	0,58	0,58	0,61
CFRP/Al bez powłoki	0,46	0,59	0,59	0,53
Al/CFRP z powłoką TiAlN	0,53	0,69	0,69	0,68
CFRP/Al z powłoką TiAlN	0,48	0,54	0,54	0,58

Analizując wyniki zawarte w tabeli można zauważyć, że największe wartości wskaźnika W_R dla rozpatrywanych parametrów chropowatości powierzchni otrzymano po frezowaniu w konfiguracji Al/CFRP z zastosowaniem narzędzia powlekanego. Najmniej jednorodną powierzchnię otrzymaną dla parametrów Rt, Rmax i Rz uzyskano dla tej samej konfiguracji frezowania i użytego narzędzia. Minimalne wartości wskaźnika W_R i największa jednorodność powierzchni nie zostały jednak uzyskane dla tych samych wariantów obróbki.

Podstawiając do wzoru (4.2) dowolne wartości danego parametru chropowatości powierzchni można zaobserwować, że większa różnica między wartościami danego parametru chropowatości powierzchni otrzymana dla stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego prowadzi do mniejszej jednorodności

powierzchni przekładki ($h_{\max}$) i większej wartości wskaźnika W_R . Dlatego też, do prognozowania jednorodności powierzchni konstrukcji typu *sandwich* po obróbce należy założyć, że minimalna wartość wskaźnika W_R ($W_R \rightarrow \min$) wyznacza największą jednorodność powierzchni materiału przekładkowego ($h_{\min}$).

4.2.5. Podsumowanie pomiarów chropowatości powierzchni

W niniejszym podrozdziale zbadano wpływ strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej na chropowatość powierzchni hybrydowych konstrukcji II warstwowych.

Wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego pokazują, że w przypadku parametrów chropowatości powierzchni R_t , $R_{\max}$ i R_z uzyskano podobne rezultaty. Minimalne i maksymalne wartości parametru R_a nie występowały dla tych samych wariantów obróbki, tak jak w przypadku pozostałych parametrów. Może wynikać to z faktu, że parametr chropowatości powierzchni R_a nie uwzględnia występowania defektów typowych dla kompozytów zbrojonych włóknami.

Badania potwierdziły gorszą skrawalność materiału kompozytowego w porównaniu do stopu aluminium – dla wszystkich rozpatrywanych wariantów obróbki mniejsze wartości badanych parametrów chropowatości powierzchni uzyskano na powierzchni warstwy metalowej. Dla kompozytu epoksydowo-węglowego zaobserwowano mniejszą powtarzalność wyników. W przypadku parametru chropowatości powierzchni R_a strategia frezowania i obecność powłoki narzędziowej miały istotny statystycznie wpływ na wartości tego parametru uzyskanego na powierzchni stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego, zaś ich interakcja była nieistotna statystycznie. Na wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t , $R_{\max}$ i R_z uzyskanych na powierzchni warstwy metalowej największy wpływ miała strategia frezowania, następnie interakcja strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej $S \times P$, a najmniejszy obecność powłoki narzędziowej. W przypadku warstwy kompozytowej to obecność powłoki narzędziowej, przed strategią i interakcją strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej $S \times P$, miała największy wpływ na wartości badanych parametrów chropowatości powierzchni.

Analiza topografii powierzchni wykazała, że w większości przypadków większe wartości parametrów 3D chropowatości powierzchni uzyskano dla warstwy kompozytowej, co świadczy o większej chropowatości powierzchni w stosunku do warstwy metalowej. Ponadto topografie powierzchni stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego posiadały odmienny układ mikronierówności.

Wartości poszczególnych parametrów chropowatości powierzchni próbek referencyjnych wykazywały podobny trend jak dla konstrukcji przekładkowych, tj. mniejsze wartości chropowatości powierzchni uzyskano dla stopu aluminium oraz po frezowaniu narzędziem niepowlekanym. Wartość parametru chropowatości powierzchni R_a otrzymana na powierzchni stopu aluminium próbki referencyjnej po obróbce frezem bez powłoki i z powłoką narzędziową była mniejsza niż wartość parametru R_a uzyskana dla konstrukcji przekładkowej.

Obróbka próbki referencyjnej kompozytu epoksydowo-węglowego z zastosowaniem narzędzia bez powłoki pozwoliła uzyskać mniejszą, a frezu z powłoką narzędziową większą wartość parametru R_a w porównaniu do konstrukcji przekładkowej. Zauważono podobny trend w uzyskanych wartościach parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z . Wartości tych parametrów otrzymane po referencyjnej obróbce stopu aluminium dla obu narzędzi były nieznacznie większe od wartości uzyskanych dla tego samego materiału w konfiguracji Al/CFRP oraz mniejsze od wartości uzyskanych w konfiguracji CFRP/Al. Wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z próbek referencyjnych uzyskane po obróbce kompozytu epoksydowo-węglowego narzędziem bez powłoki były mniejsze niż wartości uzyskane dla powlekanego powodowało w tym przypadku otrzymanie większych wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z dla próbek referencyjnych.

W podrozdziale podjęto próbę utworzenia wskaźnika służącego do oceny jednorodności powierzchni konstrukcji typu *sandwich*. Na podstawie otrzymanych wyników chropowatości powierzchni obliczono dla danych wariantów obróbki różnice jakości między warstwami tworzącymi konstrukcję przekładkową. Porównano je z obliczonymi wartościami utworzonego wskaźnika W_R . Na podstawie wyników jednorodności powierzchni i zaproponowanego wskaźnika założono, że minimalna wartość W_R określa najbardziej jednorodną konstrukcję warstwową.

4.3. Siły skrawania

Jednym ze sposobów uzyskania dużej jakości powierzchni po obróbce jest zmniejszenie sił skrawania. Pozwala to zminimalizować występowanie wad na powierzchni materiału, z drugiej jednak strony prowadzi do spadku wydajności procesu ze względu na zmniejszenie posuwu. Występowanie wad na powierzchni konstrukcji typu *sandwich* po obróbce jest skutkiem zmiennych właściwości materiałów tworzących przekładkę – w trakcie skrawania dochodzi do dużej zmienności sił skrawania. Większe wartości sił skrawania prowadzą do uzyskania mniejszej jakości powierzchni obrabianej [33].

Do tej pory wiele uwagi poświęcono opracowaniu modelu sił skrawania mającego służyć poprawie wydajności obróbki i zmniejszeniu kosztów produkcji poprzez optymalizację warunków skrawania. Qi i inni [115] opracowali model teoretyczny służący do przewidywania sił skrawania podczas obróbki kompozytów CFRP. Wyznaczyli wartość siły krytycznej, której przekroczenie powodowało zniszczenie materiału kompozytowego (pękanie osnowy).

W publikacji [48] zastosowano metodę elementów skończonych do stworzenia modelu badającego siły skrawania występujące podczas obróbki jednokierunkowych kompozytów polimerowych. Model skonfrontowano z wynikami uzyskanymi w sposób doświadczalny (pomiar sił skrawania i analiza obrazów SEM). Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że jednym z głównych czynników wpływających na siły skrawania podczas obróbki kompozytu CFRP jest kąt orientacji włókien węglowych.

W artykule [161] modelowano siły skrawania dla wielokierunkowych kompozytów polimerowych. Zauważono, że były one skorelowane z chropowatością powierzchni i zużyciem narzędzia. Denkena i inni [34] zaproponowali model siły mający służyć do prognozowania jakości powierzchni konstrukcji warstwowej.

Wiele prac skupia się również na badaniu czynników determinujących siły skrawania. Sheikh-Ahmad [135] określił wpływ orientacji zbrojenia kompozytu na siły skrawania i mechanizm tworzenia się wiórów. W pracy [169] dokonano oceny siły skrawania podczas wiercenia konstrukcji CFRP/Al narzędziami powlekanymi i niepowlekanymi. Odnotowano, że zastosowanie powłoki narzędziowej powodowało nawet dwukrotny spadek sił skrawania podczas obróbki.

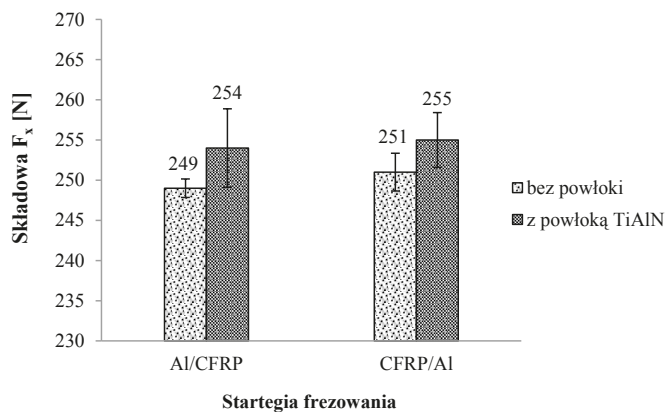
W pracy [136] badano składowe siły skrawania i chropowatość powierzchni po frezowaniu kompozytu CFRP. Zauważono, że największy wpływ na siłę skrawania mają posuw, głębokość skrawania i wielkość wióra. Natomiast w opracowaniu [26] wykazano, że głównymi czynnikami oddziałującymi na siły skrawania podczas obróbki kompozytów CFRP są orientacja włókna węglowego oraz głębokość skrawania i kąt natarcia.

W związku z niewielką liczbą opracowań naukowych dotyczących sił skrawania występujących podczas obróbki materiałów warstwowych, w niniejszym podrozdziale przedstawiono wpływ przyjętej strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej na maksymalną siłę skrawania w procesie frezowaniu rozpatrywanej konstrukcji II warstwowej.

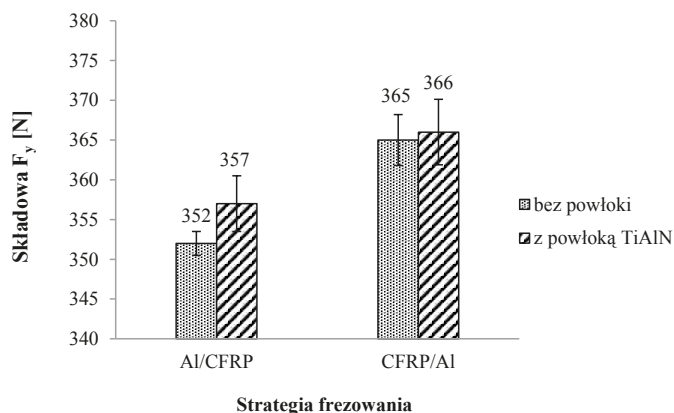
4.3.1. Siły skrawania podczas frezowania konstrukcji II warstwowej

Na rysunkach 4.21–4.23 przedstawiono kształtowanie się maksymalnych wartości składowych siły skrawania F_x , F_y i F_z w zależności od przyjętego wariantu obróbki.

Analizując otrzymane rezultaty można zauważyć, że największe wartości siły skrawania uzyskano dla składowej F_z , najmniejsze zaś dla składowej F_x . Było to związane z warunkami w jakich odbywała się obróbka. Przy dużych głębokościach skrawania ($a_p = 12$ mm) i stosunkowo małej szerokości skrawania ($a_e = 4$ mm) maksymalna siła skrawania może występować w kierunku innym niż kierunek posuwu. Dodatkowo duża wartość kąta pochylenia linii śrubowej frezu ($\lambda_s = 45^\circ$) powodowała w trakcie obróbki „ciągnięcie” narzędzia w osi Z, co przyczyniło się do uzyskania maksymalnych wartości siły skrawania dla składowej F_z .

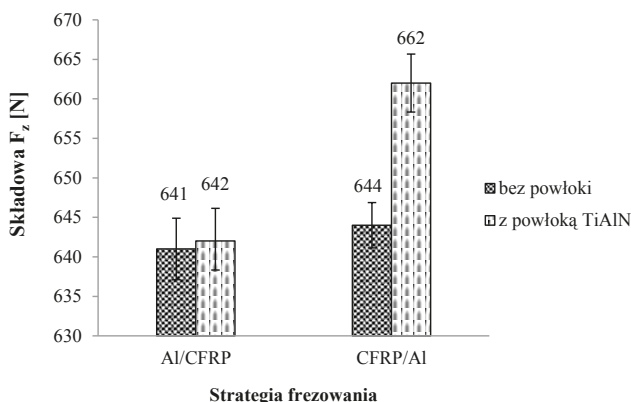


Rys. 4.21. Maksymalne wartości składowej siły skrawania F_x po obróbce II warstwowej konstrukcji przekładkowej



Rys. 4.22. Maksymalne wartości składowej siły skrawania F_y po obróbce II warstwowej konstrukcji przekładkowej

Największe wartości siły skrawania dla składowych F_x (255 N), F_y (366 N) oraz F_z (662 N) uzyskano po obróbce w konfiguracji CFRP/Al frezem z powłoką TiAlN. Wartości najmniejsze dla składowych F_x (249 N), F_y (352 N) i F_z (641 N) zaobserwowano w konfiguracji Al/CFRP z użyciem narzędzia bez powłoki. Różnice między rozpatrywanymi wariantami obróbki dla poszczególnych składowych sił skrawania były niewielkie. Największą różnicę wynoszącą niespełna 4% odnotowano dla składowej F_y między konfiguracjami Al/CFRP bez powłoki a CFRP/Al bez powłoki. Dla pozostałych składowych sił skrawania różnice nie przekroczyły 3%.

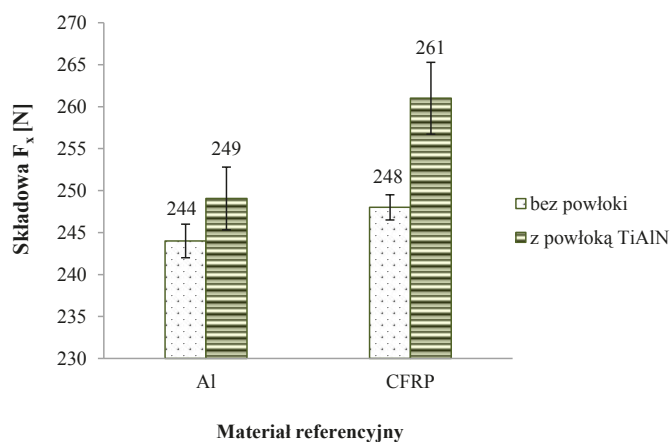


Rys. 4.23. Maksymalne wartości składowej siły skrawania F_z po obróbce II warstwowej konstrukcji przekładkowej

Analizując otrzymane rezultaty można zauważyć, że wartości składowych F_x , F_y i F_z są powiązane z uskokiem – wykresy uskoku wykonane dla konstrukcji II warstwowej (rys. 4.1) mają podobny przebieg jak wykresy składowych sił skrawania. Można zatem wnioskować, że siły skrawania mogą służyć do prognozowania wartości uskoku tworzącego się na granicy warstw kompozytu typu *sandwich*.

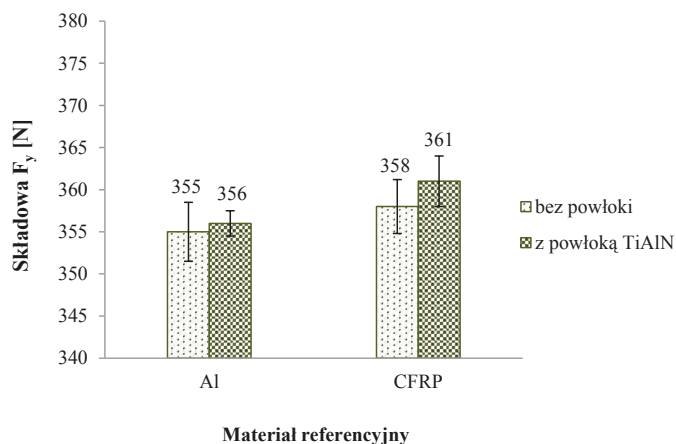
4.3.2. Siły skrawania podczas frezowania próbek referencyjnych

Na rysunkach 4.24–4.26 przedstawiono maksymalne wartości składowych F_x , F_y i F_z zarejestrowanych podczas obróbki próbek referencyjnych.

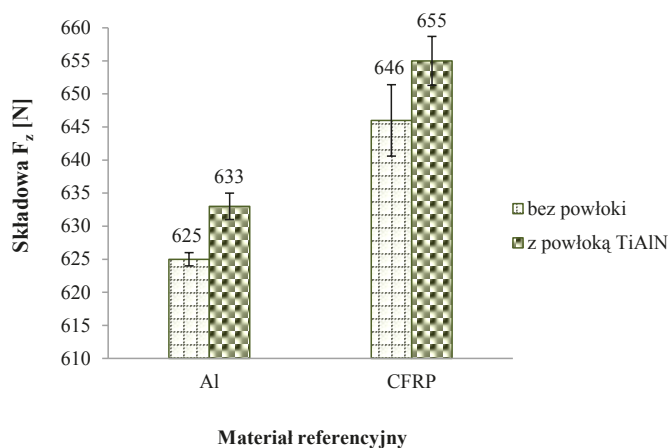


Rys. 4.24. Maksymalne wartości składowej siły skrawania F_x po obróbce próbek referencyjnych

Analizując maksymalne wartości składowych sił skrawania otrzymanych po frezowaniu próbek referencyjnych można zauważyć, że podobnie jak w przypadku przekładek, największe wartości uzyskano dla składowej F_z . Ponadto wartości maksymalne i minimalne dla składowych F_x , F_y i F_z uzyskano dla tych samych wariantów obróbki, jak w przypadku konstrukcji przekładkowej.



Rys. 4.25. Maksymalne wartości składowej siły skrawania F_y po obróbce próbek referencyjnych



Rys. 4.26. Maksymalne wartości składowej siły skrawania F_z po obróbce próbek referencyjnych

Otrzymane wartości dla poszczególnych składowych sił skrawania zmieniały się w niewielkim zakresie (rys. 4.24–4.26). Największa różnica (blisko 5%) wystąpiła dla składowej F_x między wartością uzyskaną po frezowaniu stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego narzędziem z powłoką TiAlN. Pozostałe wartości różniły się o mniej niż 4%.

Porównując otrzymane rezultaty z wykresami średnich wartości profilu powierzchni powstałych po obróbce pojedynczych materiałów (rys. 4.3) zaobserwowano, że siły skrawania towarzyszące obróbce próbek referencyjnych są skorelowane ze średnią wartością profilu powierzchni na tych próbkach – obecność powłoki narzędziowej zmniejszała jakość powierzchni obrabianego materiału i zwiększała składowe siły skrawania. Większe wartości składowych F_x , F_y i F_z otrzymano po frezowaniu materiału kompozytowego (rys. 4.24–4.26). Wyjątkiem była wartość składowej F_x otrzymana po frezowaniu narzędziem bez powłoki, która była nieznacznie mniejsza niż wartość uzyskana dla tej składowej po obróbce stopu aluminium frezem z powłoką narzędziową (rys. 4.24).

4.3.3. Podsumowanie pomiarów składowych siły skrawania

W niniejszym podrozdziale dokonano oceny wpływu strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej na siły skrawania towarzyszące frezowaniu konstrukcji II warstwowej typu stop aluminium – kompozyt epoksydowo-węglowy.

Na podstawie otrzymanych rezultatów zauważono, że maksymalne siły skrawania towarzyszące frezowaniu konstrukcji II warstwowej oraz próbek referencyjnych wystąpiły dla składowej F_z . Najmniejsze wartości sił skrawania dla

składowych F_x , F_y i F_z zaobserwowane podczas obróbki materiału II warstwowego wystąpiły po zastosowaniu strategii frezowania Al/CFRP i narzędzia bez powłoki, zaś największe po zastosowaniu konfiguracji CFRP/Al i narzędzia z powłoką TiAlN. Uzyskanie większych wartości składowych siły skrawania po obróbce frezem z powłoką TiAlN, w porównaniu do narzędzia niepowlekanego, wynikało prawdopodobnie ze zwiększenia grubości warstwy materiału ostrza i zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Bardzo istotną rolę odgrywa także stan powierzchni ostrza skrawającego. Gładka powierzchnia natarcia usprawnia proces formowania wióra oraz jego odprowadzanie ze strefy skrawania, co wpływa na zmniejszenie wartości składowych siły skrawania. Uzyskanie lepszej jakości powierzchni i mniejszych wartości składowych siły skrawania po zastosowaniu narzędzia niepowlekanego mogło świadczyć o większej gładkości powierzchni natarcia tego narzędzia w porównaniu do frezu z powłoką TiAlN.

Największe i najmniejsze wartości sił skrawania zaobserwowane podczas frezowania próbek referencyjnych odnotowano dla tych samych wariantów obróbki jak w przypadku konstrukcji II warstwowej. W większości przypadków większe wartości rozpatrywanych składowych sił skrawania uzyskano podczas frezowania kompozytu warstwowego. Otrzymane różnice były jednak niewielkie, gdyż nie przekraczały 2%.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej pracy analizowano problematykę jakości hybrydowych konstrukcji przekładkowych po obróbce skrawaniem. Celem przeprowadzonych badań była ocena efektów skrawania II i III warstwowych konstrukcji typu metal – kompozyt polimerowy. Celem pracy było także określenie najodpowiedniejszych warunków skrawania dla tego typu materiałów. W pracy przedstawiono wpływ parametrów skrawania, rodzaju narzędzia i konfiguracji na jakość powierzchni konstrukcji typu *sandwich* po frezowaniu.

5.1. Wnioski poznawcze

1. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że frezowanie obwodowe konstrukcji przekładkowej powoduje powstawanie uskoku na granicy łączonych materiałów, który negatywnie wpływa na jakość powierzchni obrabianej konstrukcji.
2. Wykazano również, że frezowanie obwodowe II i III warstwowych konstrukcji przekładkowych typu metal – kompozyt polimerowy i metal – kompozyt polimerowy – metal skutkuje uzyskaniem różnej jakości powierzchni.
3. Na podstawie badań wstępnych ustalono, że parametry skrawania (v_c i f_z) oraz geometria narzędzia (λ_s) mają wpływ na uskok – otrzymano różne wartości uskoku w zależności od przyjętych warunków skrawania.
4. Parametry v_c i f_z w różnym stopniu zmieniały wartości uskoku uzyskane po obróbce narzędziem o danym kącie pochylenia krawędzi skrawającej frezu. Na tej podstawie stwierdzono, że nie należy rozpatrywać tylko jednego parametru skrawania, a poszukiwać optymalnego zestawu warunków skrawania uwzględniając określone kryteria.
5. Badania wstępne wykazały, że spośród rozpatrywanych parametrów skrawania i geometrii narzędzia, najmniejszą wartość uskoku uzyskano dla następujących warunków skrawania: $v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/ostrze i $\lambda_s = 45^\circ$.
6. Wyniki badań zasadniczych dowiodły, że strategia frezowania i obecność powłoki narzędziowej miały istotny wpływ na wartości uskoku otrzymane po

obróbce II warstwowej konstrukcji typu *sandwich*, przy czym strategia frezowania silniej oddziaływała na wartości uskoku. Zastosowanie strategii CFRP/Al oraz narzędzia z powłoką TiAlN pozwoliło osiągnąć większe wartości uskoku w stosunku do strategii Al/CFRP i narzędzia niepowlekanego.

7. W przypadku przekładki III warstwowej zaobserwowano podobne kształtowanie się uskoku jak dla konstrukcji II warstwowej, jednak analiza statystyczna wykazała, że istotny statystycznie wpływ miała wyłącznie obecność powłoki narzędziowej, która zwiększała wartości uskoku.
8. Najbardziej odpowiednimi warunkami skrawania (prowadzącymi do uzyskania najmniejszej wartości uskoku) dla konstrukcji II i III warstwowych było zastosowanie strategii Al/CFRP i narzędzia niepowlekanego, a najmniej właściwymi konfiguracja CFRP/Al i użycie narzędzia z powłoką TiAlN.
9. Na podstawie badań referencyjnych potwierdzono gorszą jakość powierzchni konstrukcji przekładkowych po obróbce w porównaniu do jakości powierzchni pojedynczych materiałów.
10. Pomiary parametrów chropowatości powierzchni konstrukcji II warstwowej wykazały, że na powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego dla wszystkich rozpatrywanych wariantów obróbki otrzymano większe wartości parametrów chropowatości powierzchni R_a , R_t , R_{max} i R_z niż na powierzchni stopu aluminium.

5.2. Wnioski uytylitarne

1. Największe i najmniejsze wartości parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z osiągnięto dla innych wariantów obróbki niż w przypadku parametru chropowatości powierzchni R_a . Wynika to z faktu, że parametr R_a nie uwzględnia typowych form niszczenia kompozytów polimerowych. Na tej podstawie można wnioskować, że spośród analizowanych parametrów chropowatości powierzchni, parametr R_a jest najmniej odpowiedni do oceny jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych po skrawaniu.
2. Zastosowanie strategii frezowania CFRP/Al i narzędzia powlekanego w przypadku parametru R_a powodowało wzrost chropowatości powierzchni stopu aluminium i kompozytu epoksydowo-węglowego. Analiza statystyczna wykazała jednak, że istotny statystycznie wpływ na parametr chropowatości powierzchni R_a uzyskany dla warstwy metalowej miała jedynie strategia frezowania, zaś dla warstwy kompozytowej strategia frezowania i obecność powłoki narzędziowej. Jednoczesny wpływ analizowanych czynników był nieistotny statystycznie dla obu powierzchni.

3. W przypadku parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z konfiguracja CFRP/Al i frez z powłoką TiAlN powodowały wzrost parametrów chropowatości powierzchni dla obu materiałów. Wyjątkiem były rezultaty uzyskane dla stopu aluminium po obróbce w konfiguracji Al/CFRP, gdzie powłoka narzędziowa prowadziła do spadku wartości rozpatrywanych parametrów. Na wartość parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z uzyskanych na powierzchni stopu aluminium najsilniej wpływała strategia frezowania, zaś na powierzchni kompozytu epoksydowo-węglowego – obecność powłoki narzędziowej.
4. Analiza topografii powierzchni pozwoliła zaobserwować odmienny układ mikronierówności pomiędzy warstwami materiału przekładkowego. Strategia CFRP/Al oraz narzędzie powlekane w większości przypadków prowadziły do zwiększenia wartości parametrów S_a , S_z , S_p i S_v chropowatości powierzchni 3D.
5. Na podstawie parametrów chropowatości powierzchni R_t , R_{max} i R_z ustalono, że najbardziej jednorodną powierzchnię przekładki uzyskano po zastosowaniu strategii Al/CFRP i narzędzia bez powłoki. Najmniejszą jednorodność zaobserwowano po frezowaniu w konfiguracji Al/CFRP i użyciu frezu z powłoką TiAlN.
6. Maksymalne wartości sił skrawania po frezowaniu II warstwowej konstrukcji przekładkowej uzyskano dla składowej F_z . Największą i najmniejszą wartość zaobserwowano dla tych samych wariantów obróbki jak w przypadku uskoku.
7. Siły skrawania po frezowaniu próbek referencyjnych kształtowały się podobnie jak siły skrawania po obróbce konstrukcji II warstwowej. W przypadku próbek referencyjnych uzyskano nieznacznie mniejsze wartości.
8. Zaproponowane wskaźniki W_U i WR mogą być zastosowane do oceny powtarzalności jakości i jednorodności powierzchni hybrydowych konstrukcji przekładkowych po frezowaniu.

5.3. Charakterystyka kierunków dalszych badań

Przedstawione wyniki badań wskazują na celowość wykonania pełniejszej analizy w zakresie jakości powierzchni hybrydowych konstrukcji warstwowych po obróbce skrawaniem. Jedną z ważniejszych kwestii jest określenie akceptowalnej wartości uskoku po obróbce na podstawie utworzonego wskaźnika W_U . Kolejnym etapem badań może być przeprowadzenie eksperymentu dla innych rodzajów kompozytów polimerowych, zwłaszcza kompozytów GFRP. Rozważając kierunki dalszych prac należałoby wykonać analizę porównawczą otrzymanych rezultatów

z efektami uzyskanymi po frezowaniu za pomocą narzędzia diamentowego (frezu z ostrzem PKD). Przedmiotem dalszych badań i analiz może być również ocena wpływu pozostałych cech geometrycznych narzędzia, takich jak kąt natarcia i kąt ostrza, na jakość konstrukcji przekładkowej po obróbce.

Literatura

- [1] Adams D.F., Sandwich panel test method, „High Performance Composites”, 2006, 5, s. 4–6.
- [2] Alderson A.A.K., Auxetix materials, „International Journal for Trends in Engineering and Technology”, 2007, 5, s. 156–160.
- [3] Alkhoder M., Iyer S., Shi W., Venkalesh T.A., Low frequency acoustic characteristics of periodic honeycomb cellular cores: The effect of relative density and strain fields, „Composite Structures”, 2015, 133, s. 77–84.
- [4] Amancio-Filho S.T., dos Santos F.F., Joining of polymers and polymer–metal hybrid structures: recent developments and trends, „Polymer Engineering and Science”, 2009, 49, s. 1461–1476.
- [5] Arbaoui J., Schmitt Y., Pierrot J-L., Royer F-X., Numerical simulation and experimental bending behaviour of multi-layer sandwich structures, „Journal of Theoretical and Applied Mechanics”, 2014, 52, s. 431–442.
- [6] Artamenko S.E., Polymer composite materials made from carbon, basalt and glass fibres, „Fibre Chemistry”, 2003, 35, s. 226–229.
- [7] Ashby F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., Metal Foams: A Design Guide, Boston, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [8] Azmi A.J.; 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, 64, 247–26.
- [9] Baldan A., Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials, „American Journal of Materials Science”, 2004, 39, s. 1–4.
- [10] Barton J., Niemczyk A., Czaja K., Korach Ł., Sacher-Majewska B., Kompozyty, biokompozyty i nanokompozyty polimerowe. Otrzymywanie, skład, właściwości i kierunki zastosowań, „CHEMIK”, 2014, 68, s. 280–287.
- [11] Bayraktar S., Turgut Y., Investigation of the Cutting Forces and Surface Roughness in Milling Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Material, „Materiali in Tehnologije”, 2016, 50, s. 591–600.
- [12] Birman V., Kardomateas G.A., Review of current trends in research and applications of sandwich structures, „Composites Part B”, 2018, 142, s. 221–240.

- [13] Bivolaru C., Opra C., Murar D., Research regarding modeling machinability by milling of polymeric composite sandwich products, „3rd International Conference Advanced Composite Materials Engineering COMAT”, 2010, 27–29 October, Brasov, Romania.
- [14] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [15] Boudelier A., Ritou M., Garner S., Furet B., Optimization of proces parameters in CFRP machining with diamond abrasive cutters, „Advanced Materials Research”, 2011, 223, s.774–784.
- [16] Bozhevolnaya E., Lyckegaard A., Structurally graded core inserts in sandwich panels, „Composite Structures”, 2005, 68, s. 23–29.
- [17] Brautman L.J., Krock R.H., Composite materials, New York, Academic Press, 1975.
- [18] Brzeziński J., Metodologia badań psychologicznych, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004.
- [19] Burek J., Lisowicz J., Rydzak T., Szajna A., Problemy kształtowania użytkowego materiałów kompozytowych – rozwiązania oferowane przez firmy narzędziowe, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika”, 2017, t. XXXIV, z. 89, vol. 4, s. 435–447.
- [20] Burek J., Żyłka Ł., Płodzień M., Sułkiewicz P., Buk J., Wpływ kąta pochylenia krawędzi skrawającej frezu na proces odprowadzania wiórów ze strefy skrawania, „Mechanik”, 2007, 11, s. 962–964.
- [21] Caggiano A., Improta I., Nele L., Characterization of a new dry drill–milling process of carbon fibre reinforced polymer laminates, „Materials”, 2018, 11, s. 1470–1485.
- [22] Carlsson L.A., Kardomateas G.A., Structural and Failure mechanics of sandwich composites, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2011.
- [23] Chandrasekaran M., D Devarasiddappa D., Development of Predictive Model for Surface Roughness in End Milling of Al-SiCp Metal Matrix Composites using Fuzzy Logic, „World Academy of Science, Engineering and Technology”, 2012, 6, s. 7–25.
- [24] Che-Haron C.H., Jawaid A., The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V, „Journal of Materials Processing Technology”, 2005, 166, s. 188–192
- [25] Chen A., Norris T.G., Hopkins P.M., Yossef M.Y., Experimental investigation and finite element analysis of flexural behaviour of insulated concrete sandwich panels with FRP plate shear connectors, „Engineering Structures”, 2015, 98, s. 95–108.

- [26] Chen, L.; Zhang, K.; Cheng, H.; Qi, Z.; Meng, Q., A cutting force predicting model in orthogonal machining of unidirectional CFRP for entire range of fibre orientation, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2017, 89, s. 833–846.
- [27] Chibane H., Morandau A., Serra R., Bouchou A., Leroy R., Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2013, 68, s. 1111–1121.
- [28] Çolak, O.; Sunar, T., Cutting forces and 3D surface analysis of CFRP milling with PCD cutting tools, „Procedia CIRP”, 2016, 45, s. 75–78.
- [29] Czechowski K., Wpływ monostrukturalnych powłok wielowarstwowych na właściwości użytkowe narzędzi, „Mechanik”, 2017, 5, s. 28–33.
- [30] Davies, J.M., Lightweight Sandwich Construction, Chicester, John Wiley & Sons, 2020.
- [31] Davim, J.P.; Reis, P., Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, „Journal of Materials Processing Technology”, 2005, 160, s. 160–167.
- [32] Davis G.Y., Venables J.D., Surface treatments of metal adherends, „Adhesion Science and Engineering”, 2002, 2, s. 947–1008.
- [33] Denkena, B., Grove, T., Hasselberg, E., Workpiece Shape Deviations in Face Milling of Hybrid Structures, „Materials Science Forum”, 2015, 825–826, s. 336–343.
- [34] Denkena, B.; Köhler, J.; Hasselberg, E., Modeling of workpiece shape deviations in face milling of parallel workpiece compounds, „Procedia CIRP”, 2013, 8, s. 176–181.
- [35] Devadula S., Nicolescu M., Issues in machining of hollow core honeycomb sandwich structures by abrasive waterjet machining, „Journal of Machine Engineering”, 2013, 13, s. 117–124.
- [36] DIN EN ISO 14125:2011-05: Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften; 2011.
- [37] DIN EN ISO 527-1:2019-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze; 2019.
- [38] Dipak G., Tejan G. G., Experimental test on sandwich panel composite material, „International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology”, 2013, 2, s. 3047–3054.
- [39] Dobrzański L.A., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2007.
- [40] Dolata-Grosz A., Dyzia M., Ślężiona J., Wytwarzanie i struktura nasyconych kompozytów Al-włókno węglowe, „Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji”, 2010, 30, s. 11–18.

- [41] Doluk E., Kuczmazewski J., Pieśko P., Wpływ zmiany parametrów cięcia wodno-ściernego na jakość przecinania kompozytowych struktur przekładkowych, „Mechanik”, 2018, 7, s. 476–478.
- [42] Dżianok D., Postawa, P., Zastosowanie nowoczesnych materiałów kompozytowych w przemyśle, „Przetwórstwo tworzyw”, 2015, 21, s. 389–398.
- [43] Feito N., Diaz-Alvarez J., Lopez-Puente J., Miguelez M.H., Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs, „Composite Structures”, 2016, 138, s. 258–294.
- [44] Fejdyś M., Łajdwiłt M., Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe, „Techniczne Wyroby Włókiennicze”, 2010, 1–2, s. 12–22.
- [45] Fleischer J., Teti R., Lanza G., Mativenga P., Möhring H.Ch., Caggiano A., Composite materials parts manufacturing, „CIRP Annals – Manufacturing Technology”, 2018, 67, s. 603–626.
- [46] Gawdzińska K., Szymański P., Bryll K., Pawłowska P., Pijanowski M., Flexural strength of hybrid epoxy composites with carbon fiber, „Composites Theory and Practice”, 2017, 17, s. 47–50.
- [47] Geier, N., Pereszlai, C., Analysis of Characteristics of Surface Roughness of Machined CFRP Composite, „Periodica Polytechnica Mechanica Engineering”, 2020, 64, s. 67–80.
- [48] Ghafarizadeh, S.; Chatelain, J.F.; Lebrun, G., Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2016, 87, s. 399–409.
- [49] Ghidossi P., El Mansori M., Pierron F., Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons, „Composites Part A – applied Science and Manufacturing”, 2004, 35, s. 989–999.
- [50] Gibson, Ashby. F., Cellular solids: Structure and properties, Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [51] Górski M., Kotala B., Białozor R., Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego, „XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji”, 2018, 6–9 marca, Szczyrk, Polska.
- [52] Greń, K., Szatkowski, P., Chłopek, J., Characteristics of failure mechanisms and shear strength of sandwich composites, „Composites Theory and Practice”, 2016, 16, s. 255–259.
- [53] HAM: Machining of advanced materials, Katalog HAM/2015.
- [54] Herranen H., Pabut O., Eerme M., Majak J., Pohlak M., Kers J., Saarna M., Allikas G., Aruniit A., Design and testing of sandwich structures with different core materials, „Materials Science”, 2012, 18, s. 45–50.
- [55] HEXCEL Composites: Honeycomb attributes and properties. A comprehensive guide to standard Hexcel honeycomb materials, configurations, and mechanical properties, Katalog HEXCEL Composites/1999.

- [56] Hoffman Group Perschman: Narzędzia skrawające/ uchwyty i oprawki, Katalog Hoffman Group/2020/2021.
- [57] Hop T., Konstrukcje warstwowe, Warszawa, Arkady, 1980.
- [58] Hosokawa A., Hirose N., Ueda T., Furumoto T., High-quality machining of CFRP with high helix end mill, „CIRP Annals”, 2014, 63, s. 89–92.
- [59] <https://3mpolska.pl/3M/pl> (20.01.2018 r.).
- [60] <https://kistler.com> (04.06.2019 r.).
- [61] <https://sandvik.coromant.com/pl/knowledge/materials/pages/work-piece-surface-measurement.aspx> (20.03.2020 r.)
- [62] <https://sandvik.coromant.com/pl-pl/products/composite-solutions/pages/edge-milling.aspx> (21.02.2019 r.)
- [63] <https://spss-tutorial.com/spss-two-way-anova-interaction-significant.com> (25.05.2019 r.)
- [64] ISCAR, Nowe rozwiązania w obróbce kompozytów, „Obróbka metalu”, 2011, 2, s. 12–14.
- [65] Jaafara M., Atlatia S., Makicha H., Nouaria M., Moufkia A., Julliereb B., A 3D FE modeling of machining process of Nomex® honeycomb core: influence of the cell structure behaviour and specific tool geometry, „Procedia CIRP”, 2017, 58, s. 505–510.
- [66] Janardhan, P.; Sheikh–Ahmad, J.; Cheraghi, H., Edge Trimming of CFRP with Diamond Interlocking Tools, „SAE International”, 2006, 12.
- [67] Jaśkiewicz R., Analiza wpływu parametrów procesu wiercenia na jakość uzyskiwanych otwór i właściwości mechaniczne kompozytów węglowych, „Prace i Instytutu Lotnictwa”, 2016, 3, s. 65–73.
- [68] Józwik J., Tofil A., Banaszek M., Kuric I., Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów włóknistych i oceny chropowatości powierzchni, „Postępy Nauki i Techniki”, 2012, 15, s. 205–220.
- [69] Kaczmar J.W., Właściwości i zastosowanie włókien węglowych i szklanych, „Tworzywa Sztuczne i Chemia”, 2008, 6, s. 52–56.
- [70] Karny M., Połączenia klejone w strukturach kompozytowych – metodyka badań, „Prace Instytutu Lotnictwa”, 2016, 3, s. 97–108.
- [71] Karpát Y., Bahtiyar O., Değer B., Mechanistic force modelling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates, „International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 2012, 56, s. 79–93.
- [72] Karta Techniczna Materiału, c-m-p gmbh, Heinsberg, Niemcy.
- [73] King, B., Minium, E., Statystyka dla psychologów i pedagogów, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009.
- [74] Kleiberit: Innowacyjne Systemy Klejowe do produkcji elementów typu sandwich, Katalog Kleiberit/2019.
- [75] Kłysz S., Charakterystyki wybranych materiałów – materiały lotnicze, „Podstawy wytrzymałości materiałów”, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 2015.

- [76] Kopler A, Lystrup A., Vonu T., The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP, „Composites”, 1983, 14, s. 371–376.
- [77] Kopler A., Cutting of CFRP with single edge tools, „Proceedings of the third International Conference on Composite Materials”, 1980, 2, s. 1597–1605.
- [78] Koza E., Leonowicz M., Wojciechowski S., Analiza strukturalna pian aluminiowych, „Composites”, 2002, 2, s. 229–232.
- [79] Kozak J., Stalowe panele sandwich w konstrukcjach okrętowych, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2018.
- [80] Królikowski W., Polimerowe kompozyty konstrukcyjne, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [81] Kuczmazewski J., Pieško P., Zawada-Michałowska M., Analiza wpływu prędkości skrawania na odkształcenia po frezowaniu elementów cienkościennych wykonanych ze stopu EN AW-2024, „Mechanik”, 2016, 8–9, s. 1066–1067.
- [82] Kuczmazewski J., Zaleski K., Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2015.
- [83] Kujala P., Romanoff J., Salminen A., Vatsia J., Design and production of all steel sandwich panels, „7th Nordic Conference on Laser Processing and Materials”, 1999, s. 81–92.
- [84] Kumar D., Singh K.K., An approach towards damage free machining of CFRP and GFRP composite material: a review, „Advanced Composite Materials”, 2015, 24, s. 49–63.
- [85] Leppert T., Paczkowski T., Polasik R., Serwacki D., Delaminacja materiału kompozytowego włóknistego podczas wykonywania otworów, „Mechanik”, 2016, 10, s. 1422–1423.
- [86] Liang X., Wu D., Gao Y., Chen K., Investigation on the non-coaxially in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic and aluminium stacks, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2018, 125, s. 1–10.
- [87] Liu, G.; Chen, H.; Huang, Z.; Gao, F.; Chen, T., Surface Quality of Staggered PCD End Mill in Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics, „Applied Sciences”, 2017, 7, s. 199.
- [88] Longdon G.S., Klemperer C.J., Rowland B.K., Nurick G.N., The response of sandwich structures with composite facesheet and polymer foam cores to air-blast loading preliminary experiments, „Engineering Structures”, 2012, 36, s. 104–112.
- [89] Maegawa S., Morikawa Y., Hayakawa S., Itoigawa F., Nakamura T., Mechanism for changes in cutting forces for down-milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates: Modelling and experimentation, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2016, 100, s. 7–13.

- [90] Major M., Major I., Kompozyty w budownictwie zrównoważonym – przegląd rozwiązań i przykłady zastosowań, „Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym”, 2015, 1, s. 126–133.
- [91] Mamalis A.G., Spentzas K.N., Pantelelis N.G., Manolakos D.E., Ioannidis M.B., A new hybrid concept for sandwich structures, „Composite Structures”, 2008, 83, s. 335–340.
- [92] March H.W., Effects of shear deformation in the core of a flat rectangular sandwich panel-1. Buckling under compressive end loads, 2. Deflection under uniform transverse load, Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1948.
- [93] Marcos M.; Gomez-Lopez A.J.; Batista Ponce M.; Salguero A.J., Roughness based study of milled composite surfaces, „Annals and Proceedings of International”, 2011, 22, s. 153–154.
- [94] Miracle D.B., Donaldson S.L., ASM Handbook Volume 21: Composites, Ohio, ASM International Metals Park, 2001.
- [95] Mohamed S., Gauthier S., Chatelain J.F., Analysis of trajectory deviation during high speed robotic trimming of carbon–fiber reinforced polymers, „Robotics and Computer Integrated Manufacturing”, 2014, 30, s. 546–555.
- [96] Mostafa A., Numerical analysis on the effect of shear keys pitch on the shear performance of foamed sandwich panels, „Engineering Structures”, 2015, 101, s. 216–232.
- [97] Mousa M.A., Uddin N., Debonding of composites structural insulated sandwich panels, „Journal of Reinforced Plastics and Composites”, 2010, 28, s. 3380–3391.
- [98] Muc A., Nogowczyk R., Formy zniszczenia konstrukcji sandwiczowych z okładzinami wykonanymi z kompozytów, „Composites”, 2005, 5, s. 31–35.
- [99] Nataraj M.; Balasubramanian K., Parametric optimization of CNC turning process for hybrid metal matrix composite, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2017, 93, s. 1–4.
- [100] Niklas K., Zastosowanie naprężeń lokalnych do oceny trwałości zmęczeniowej spoin laserowych w złączu teowym paneli stalowych typu sandwich, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, 2013, kps, przechowywany w Bibliotece Politechniki Gdańskiej.
- [101] Nowak T., Closed-form solution for elastic-plastic analysis of selected fiber metal laminates during loading-unloading cycle, „Composites Theory and Practice”, 2017, 17, s. 97–102.
- [102] Oczko K.E., Kawalec A., Kształtowanie metali lekkich, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [103] Oczko K.E., Kompozyty włókniste właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa, „Mechanik”, 2018, 7, s. 579–592.

- [104] Oczoś K.E., Problemy kształtowania ubytkowego kompozytów włóknistych z osnową polimerową i ceramiczną, „Mechanik”, 2011, 1, s. 5–10.
- [105] Omidali M., Khedmati M.R., Numerical investigation on novel geometrical configuration for adhesively bonded T-joint between aluminum and sandwich panel, „Thin-Walled Structures”, 2018, 131, s. 122–134.
- [106] PN-EN 1706:2020-10 – Aluminium i stopy aluminium – Odlewy – Skład chemiczny i własności mechaniczne, 2020.
- [107] PN-EN 515:2017-5 – Aluminium i stopy aluminium – Wyroby przerobione plastycznie – Oznaczenia stanów, 2017.
- [108] PN-EN 573-1:2006 – Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 1: System oznaczeń numerycznych, 2006.
- [109] PN-EN 573-3:2019-12 – Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 3: Skład chemiczny, 2010.
- [110] PN-EN ISO 25178-2:2012 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni, 2012.
- [111] PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010 – Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni, 2010.
- [112] PN-EN ISO 4288:2011 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa – Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni, 2011.
- [113] Podgornik B., Hogmark S., Sandberg O., Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel, „Surface and Coatings Technology”, 2004, 184, s. 338–348.
- [114] Puw H. Y., Hocheng H., Machinability test of carbon fiber-reinforced plastics in milling, „Materials and Manufacturing Processes”, 1993, 8, s. 717–729.
- [115] Qi Z., Zhang K., Cheng H., Wang D., Meng Q., Microscopic mechanism based force prediction in orthogonal cutting of unidirectional CFRP, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2015, 79, s. 1209–1219.
- [116] Quinn J.A., Composites – Design Manual, Liverpool, James Quinn Associates Ltd, 2002.
- [117] Rajasekaran T., Vinayagam B.K., Palanikumar K., Prakash S., Influence of machining parameters on surface roughness and material removal rate in machining carbon fiber reinforced polymer material, „Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering”, 2010, s. 75–80.
- [118] Ramesh S., Karunamoorthy L., Palanikumar K., Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5), „Measurement”, 2012, 45, s. 1266–1276

- [119] Ramirez Ch., Poulachon G., Rossi F., M'Saoubi R., Tool Wear Monitoring and Hole Surface Quality During CFRP Drilling, „Procedia CIRP”, 2014, 13, s. 163–168
- [120] Ramulu M., Arola D., Colligan K., Preliminary investigation of effects on the surface integrity of fibre reinforced plastics, „ESDA”, 1994, 64, s. 93–101.
- [121] Ratwani M.M., Composite Materials and Sandwich Structures – A Primer, USA, 2010.
- [122] Rayjade G.R., Seshagiri Rao G.V.R., Study of composite sandwich structure and bending characteristics – a review, „International Journal of Current Engineering and Technology”, 2015, 5, s. 797–802.
- [123] Rocca S.V., Nanni A., Mechanical characterization of sandwich structure comprised of glass fiber reinforced core: Part 2, „Composites in Construction 2005 – Third International Conference”, 2005, 11–13 July, Lyon, France.
- [124] Rohaman M.S.A., Ismail A.F., Mustafa A., A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber, „Polymer degradation and stability”, 2007, 92, s. 1421–1432.
- [125] Rudawska A., Błaziak M., Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopu tytanu, „Technologia i Automatyzacja Montażu”, 2011, 4, s. 40–44.
- [126] Rudawska A., Comparison of the adhesive joints' strength of the similar and dissimilar systems of metal alloy/polymer composite, „Applied Adhesion Science”, 2019, 7, s. 1–17.
- [127] Rudawska A., Surface Treatment in Bonding Technology, London; San Diego, Academic Press, 2019.
- [128] Sandcore: Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications, Edited by New Rail, University of Newcastle upon Tyne, 2013.
- [129] Sandvik: Coromil Plura, Frezy trzpieniowe zoptymalizowane pod kątem obróbki materiałów kompozytowych, Katalog Sandvik/2017.
- [130] Santhanakrishnan, G.; Krishnamurthy, R.; Malhotra, S.K., Machinability characteristics of fibre reinforced plastics composites, „Journal of Mechanical Working Technology”, 1988, 17, s. 195–204.
- [131] Sarlin E., Heinonen E., Vuorinen J., Vippola M., Lepistö, T., Adhesion properties of novel corrosion resistant hybrid structures, „International Journal of Adhesion and Adhesives”, 2014, 49, s. 51–57.
- [132] Sen T., Paul A., Confining concrete with sisal and jute FRP as alternatives for CFRP and GFRP, „International Journal of Sustainable Built Environment”, 2015, 12, s. 248–264.
- [133] Shahabaz S.M., Shetty N., Shetty S.D., Sharma S.S., Surface roughness analysis in the drilling of carbon fiber/epoxy composite laminates using hybrid Taguchi – Response experimental design, „Materials Research Express”, 2020, 7.

- [134] Shahrajabian H., Farahnakian M., Multi-constrained optimization in ball-end machining of carbon fiber-reinforced epoxy composites by PS, „Cogent Engineering”, 2015, 2, 993157.
- [135] Sheikh-Ahmad J.Y., Machining of Polymer Composites, The Petroleum Institute, Department of Mechanical Engineering, Berlin, Springer, 2009.
- [136] Sorrentino L., Turchetta S., Cutting forces in milling of carbon fibre reinforced plastics, „International Journal of Manufacturing Engineering”, 2014, 2014, s. 1–8.
- [137] SPPW GmbH: Spanabhebende Präzisionswerkzeuge, SPPW GmbH/2016.
- [138] Suresh P.V.S., Venkateswara Rao P., Deshmukh S.G., A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 2006, 42, s. 675–680.
- [139] Synaszko P., Łukasik M., Orzechowski P., Lisiecki J., Nowakowski D., Influence of surface preparation in composite bonded joints, „Composites Theory and Practice”, 2016, 16, s. 234–237.
- [140] Sypeck D.J., Wadley H.N.G., Cellular metal truss core sandwich structures, „Advanced Engineering Materials”, 2002, 4, s. 759–764.
- [141] Teicher U., Müller S., Münzner J., Nestler A., Micro-EDM of Carbon Fibre-Reinforced Plastics, „Procedia CIRP”, 2013, 6, 2013, s. 320–325.
- [142] Teischinger A., Muller A., Wood and natural fibre-based light weight panels: opportunities and limitation, „8th European Wood-based Panel Symposium”, 2012, 11–12 October, Hannover, Germany.
- [143] Teti, R., Machining of Composite Materials, „CIRP Annals”, 2002, 51, s. 611–634.
- [144] Tomaszewski Ł., Urbanowicz A., Suczko T., Gulbiński W., Przeciwwzyciowe powłoki TiAlN modyfikowane wanadem, „Inżynieria Materiałowa” 2015, 5, s. 310–313.
- [145] Trapko T., Michałek J., Zastosowanie materiałów kompozytowych do wzmacniania żerdzi elektroenergetycznych z betonu wirowanego, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2012, 88, s. 267–273.
- [146] Trombeva-Gavriloska A., Lazarevska M., Cvetkovska M., Experimental testing of composite sandwich panels with different face sheets, „Journal of Applied Engineering Science”, 2016, 14, s. 163–168.
- [147] Tsai S.W., Wu E.M., A general theory of strength for anisotropic materials, „Journal of Composite Materials”, 1971, 5, s. 58–80.
- [148] Ucin I., Aslantas K., Bedir F., An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy, „Wear”, 2013, 300, s. 8–19.
- [149] Uhlmann E., Richarz S., Sammler F., Hufschmied R., High Speed Cutting of Carbon Fibre Reinforced Plastics, „Procedia Manufacturing”, 2016, 6, s. 113–123.

- [150] Urbański T., Panele sandwich w wielkogabarytowych konstrukcjach stalowych – charakterystyka problemu łączenia, „Postęp Nauki i Techniki”, 2010, 5, s. 32–44.
- [151] Vinayagamoorthy R., A review on the machining of fiber-reinforced polymeric laminates, „Journal of Reinforced Plastics and Composites”, 2018, 37, s. 49–59.
- [152] Vinson J.R., The behaviour of sandwich Structures of Isotropic and Composite materials, Lancaster, Technomic Publishing Company, Inc, 1999.
- [153] Vinson J.R., The Behaviour of Shells Composed of Isotropic and Composite Materials, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [154] Vobrouček J., The influence of milling tool geometry on the quality of the machined surface, „Procedia Engineering”, 2015, 100, s. 1556–1561.
- [155] Wang X., Ahn J., Kaboglu C., Yu L., Blackman B.R.K., Characterisation of composite-titanium alloy hybrid joints using digital image correlation, „Composite Structures”, 2016, 4, s. 702–711.
- [156] Wang X., Kwon P.Y., Sturtevant C., Kim, D., Lantrip, J., Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers, „Wear”, 2014, 317, s. 265–276.
- [157] Wei S., Aijuan G., Guozheng L., Li Y., Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites, „Applied Surface Science”, 2011, 257, s. 4069–4074.
- [158] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko, Poznań, Zakład Poligraficzno-Wydawniczy M-Druk, 2003.
- [159] Williams D., Leggett D.M.A., Hopkins H. G., Flat Sandwich Panels under Compressive End Loads, Report No. A.D. 3174, Royal Aircraft Establishment, 1941.
- [160] Woźniak D., Kukielka L., Kompozyty w technice w aspektach materiałów nowej generacji, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, 2014, 6, s. 292–296.
- [161] Xiao J., Gao C.Y., Ke Y., An analytical approach to cutting force prediction in milling of carbon fiber reinforced polymer laminates, „Machining Science and Technology”, 2018, 22, s. 1–17.
- [162] Yalkin H.E., Icten B.M., Alpyildiz T., Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core, „Composites Part B”, 2015, 79, s. 383–391.
- [163] Zaleski K., Pałka T., Wpływ geometrii ostrza na siły skrawania podczas frezowania stopów aluminium, „Mechanik”, 2014, 8–9, s. 639–646.
- [164] Zawora J., Podstawy technologiczne wielokryterialnej optymalizacji procesów toczenia złożonych powierzchni narzędziami punktowymi, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.

- [165] Zenkert D., Damage Tolerance of Naval Sandwich Panels. Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures: An Anthology of ONR Sponsored Research, Dordrecht, Springer, 2010.
- [166] Zenkert D., The Handbook of Sandwich Construction, Oslo, Engineering Materials Advisory Service Ltd, 1997.
- [167] Zhang L., Liu Z., Tian W., Liao W., Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2015, 81, s. 241–251.
- [168] Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F., Le Roux S., Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks, „Composite Structures”, 2016, 46, s. 148–158.
- [169] Zitoun R., Krishnaraj V., Almagouacif B.S., Collombe F., Sima M., Jolin A., Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich, „Composites Part B: Engineering”, 2012, 43, s. 1480–1488.