# POLITECHNIKA ŚLĄSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Katedra Technologii Materiałowych Studia doktoranckie w ramach programu "Doktorat wdrożeniowy" Partner przemysłowy: Śląskie Centrum Naukowo-Technologiczne Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o.

Dyscyplina: inżynieria materiałowa

Rozprawa doktorska

## **BARBARA HELIZANOWICZ**

# Użycie preimpregnatów o niskiej gramaturze do wytwarzania metodą autoklawową płyt z kompozytu polimer-włókno węglowe zawierających krzywizny o małym promieniu

# The use of thin-ply prepregs for the fiber reinforced polymer composites with small radius curvatures manufactured in the autoclave technology

Promotor:

Dr hab. inż. Mateusz Kozioł, Prof. Pol. Śl.

Promotor pomocniczy: Dr inż. Aleksandra Bogdan-Włodek

Katowice, wrzesień 2023r.

#### Podziękowania

Pragnę z całego serca podziękować mojemu Promotorowi, dr hab. inż. Mateuszowi Koziołowi, Profesorowi Politechniki Śląskiej, za kierownictwo przy tworzeniu niniejszej pracy i wszelki włożony trud, a także za cierpliwość i zaufanie. Dziękuję też za cenną inspirację i motywację, bez których ta praca z całą pewnością by nie powstała.

Dziękuję również Promotor Pomocniczej, dr inż. Aleksandrze Bogdan-Włodek, Dyrektor Laboratorium Badań Materiałów Śląskiego Centrum Naukowo-Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o., za wsparcie i pomoc przy realizacji badań, a także za zawsze celne i konkretne rady.

Dziękuję panu Bartłomiejowi Płonce, Prezesowi Zarządu Śląskiego Centrum Naukowo-Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o., za zaufanie i możliwość realizacji niniejszej pracy, a także za udostępnienie infrastruktury i materiałów do badań.

Serdeczne podziękowania składam wszystkim pracownikom Śląskiego Centrum Naukowo-Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o., na czele z Dyrektorem Zakładu Struktur Kompozytowych, Tomaszem Adadyńskim, za każdą pomoc, otwartość i wszystkie wspólne wysiłki. Dziękuję pracownikom Laboratorium Badań Materiałów za wsparcie w prowadzonych badaniach. Szczególne podziękowania składam również konstruktorowi, Mateuszowi Góreckiemu, za pomoc w zagadnieniach związanych z mechaniką kompozytów, a także za ciekawość świata.

Gorąco dziękuję mojemu najukochańszemu Mężowi Damianowi, za nieustanną miłość i wsparcie w każdej możliwej płaszczyźnie, zarówno w naszym życiu osobistym i domowym, jak i na polu naukowym oraz zawodowym.

Dziękuję moim Rodzicom za wychowanie, wiarę i miłość oraz za ciągłą gotowość do pomocy. Dziękuję również Teściom i Rodzeństwu za wsparcie, motywację i każde dobre słowo.

# **SPIS TREŚCI**

SPI	S TH	REŚC	CI	5		
WY	KA.	Z SK	RÓTÓW I SYMBOLI	8		
1.	WĮ	orowa	adzenie	9		
2. Wytwarzanie kompozytów z wykorzystaniem prepregów						
2	2.1.	Prze	etwarzanie i kształtowanie prepregów	12		
2.2.		Metoda utwardzania w autoklawie				
2	2.3.	Inne	e metody wytwarzania wyrobów kompozytowych z prepregów	20		
3.	Pre	i o niskiej gramaturze	23			
3	.1.	Cha	rakterystyka preregów o niskiej gramaturze	23		
3	5.2.	Wy	twarzanie prepregów o niskiej gramaturze	24		
3.3. Korzyści i problemy wynikające z zastosowania prepregów o niskiej						
g	grama	aturz	2	26		
4.	Wy	roby	kompozytowe zawierające krzywizny	32		
4	.1.	Wy	trzymałość kompozytów zawierających krzywizny	32		
4	.2.	Def	ekty obszaru krzywizny, powstające podczas wytwarzania kompozytów	W 25		
V	v tec	nnolo				
4	+.3.	W ła	isciwosci prepregow wpływające na procesy formowania krzywizny	40		
	4.3	.1.	Scinanie w płaszczyznie	40		
	4.3	.2.	Dwuosiowe rozciąganie w płaszczyźnie	43		
	4.3	.3.	Scinanie międzywarstwowe	43		
	4.3	.4.	Sztywność przy zginaniu	44		
	4.3	.5.	Współczynnik zagęszczenia	45		
5.	Mo	otywa	cja do podjęcia badań	47		
6.	Ce	le i z	akres pracy	48		
6	5.1.	Tez	a i cele pracy	48		
6	5.2.	Zak	res pracy	48		
7.	Materiały do badań					
8.	Metodyka badań i wyniki					
8	8.1.	Bad	ania właściwości prepregów nieutwardzonych	54		
	8.1	.1.	Współczynnik zagęszczenia	54		
	8.1	.2.	Sztywność przy zginaniu	59		

8.1.3.	Ścinanie w płaszczyźnie	63
8.2. Bao	dania właściwości mechanicznych próbek płaskich	79
8.2.1.	Próbki do badań	
8.2.2.	Wyznaczenie udziału objętościowego włókien	81
8.2.3.	Badanie wytrzymałości na rozciąganie	83
8.2.4.	Badanie właściwości przy zginaniu	87
8.2.5.	Badanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe.	89
8.2.6.	Badanie właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie	91
8.3. Bac	dania próbek zawierających krzywizny	94
8.3.1.	Geometria i struktura próbek zawierających krzywizny	
8.3.2.	Wytworzenie próbek	
8.3.3.	Kontrola wizualna i wymiarowa wytworzonych próbek	102
8.3.4.	Wyznaczenie gęstości	111
8.3.5.	Wyznaczenie udziałów objętościowych zbrojenia i osnowy	113
8.3.6.	Badania nieniszczące – aktywna termografia w podczerwieni	114
8.3.7.	Tomografia komputerowa	119
8.3.8.	Badanie wytrzymałości CBS belek zawierających krzywizny	127
9. Zbiorcz	za analiza otrzymanych wyników	140
9.1. Wł	aściwości prepregów nieutwardzonych	140
9.2. Wł	aściwości mechaniczne kompozytów	141
9.3. Wł	aściwości zakrzywionych próbek kompozytowych	144
9.3.1.	Ocena procesu wytwarzania	144
9.3.2.	Ocena jakości wytworzonych próbek	145
9.3.3.	Badania strukturalne	147
9.3.4.	Ocena wytrzymałości CBS	149
10. Podsu	umowanie	154
BIBLIOGRA	AFIA	158
SPIS RYSU	NKÓW	174
SPIS TABE	L	181
ZAŁĄCZNI	K NR 1	184
ZAŁĄCZNI	K NR 2	189
ZAŁĄCZNI	K NR 3	196

ZAŁĄCZNIK NR 4	
ZAŁĄCZNIK NR 5	
STRESZCZENIE	
ABSTRACT	

## WYKAZ SKRÓTÓW I SYMBOLI

- AFP-Automated Fiber Placement
- ATL Automated Tape Laying
- CAI Compression After Impact
- CBS Curved Beam Strength
- CFRP Carbon Fiber Reinforced Polymer
- CNTs Carbon Nanotubes
- CT Computed Tomography
- CTE Coefficient of Thermal Expansion
- ILFT Interlaminar Fracture Toughness
- ILSS -- Interlaminar Shear Strength
- ILTS Interlaminar Tensile Strength
- IPS -- In-Plane Shear
- IrNDT badanie nieniszczące metodą termografii w podczerwieni
- NCF Non-Crimp Fabric
- OHC Open Hole Compression
- OHT Open Hole Tension
- OOA Out of Autoclave
- PCM Press Compression Moulding
- PJN Pin Jointed Net
- ŚCNTPL Śląskie Centrum Naukowo Technologiczne Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o.
- TAI Tension After Impact
- VBO Vacuum Bag/Oven (lub Vacuum Bag Only)

#### 1. Wprowadzenie

W obecnych czasach, rozwój nowoczesnych technologii oraz materiałów jest kluczowy dla przemysłu i gospodarki. Szczególną dynamikę rozwoju wykazują w ostatnich latach materiały kompozytowe, które odgrywają znaczącą rolę w wielu branżach, takich jak lotnictwo, motoryzacja, przemysł sportowy czy energetyka. Kompozyty polimerowe umacniane włóknami składają się z organicznej osnowy termoplastycznej lub duroplastycznej i włókien, stanowiących zbrojenie. Do zastosowań konstrukcyjnych najczęściej wykorzystuje się kompozyty warstwowe (laminaty) umacniane włóknami ciągłymi, które odpowiadają za przenoszenie obciążeń. Rolą osnowy jest zabezpieczenie włókien, utrzymanie spójności układu oraz przenoszenie (określane też czasami jako "przekazywanie") obciążeń na włókna. Spośród tworzyw duroplastycznych, do najczęściej stosowanych materiałów osnowy należą obecnie żywice poliestrowe fenolowo-formaldehydowe, i winyloestrowe, epoksydowe czy cyjanoestrowe. W przemyśle lotniczym i kosmicznym wykorzystywane są żywice epoksydowe, które mają większą wytrzymałość, odporność na korozję i lepszą adhezję do włókien zbrojacych niż żywice poliestrowe i winyloestrowe. Jednakże, coraz wiekszym zainteresowaniem cieszą się również żywice cyjanoestrowe, które cechują się wyższą stabilnościa termiczna, wytrzymałościa i odpornościa na powstawanie mikropeknieć. Jako materiał zbrojenia w polimerowych kompozytach konstrukcyjnych, umacnianych włóknami, najczęściej wykorzystuje się włóka szklane, węglowe i poliaramidowe. Największy udział w światowej produkcji kompozytów mają włókna szklane, ze względu na ich niską cenę i dużą dostępność, jednak to włókna weglowe pozwalają osiągnąć największą wytrzymałość i sztywność konstrukcji. Z tych powodów, to kompozyty na osnowach epoksydowych, zbrojone włóknami weglowymi (ang. CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer) są jednymi z najczęściej wybieranych materiałów na wymagające i wysokoobciążone elementy konstrukcyjne. Ze względu na wymogi i standardy, obowiązujące w przemysłach lotniczym, zbrojeniowym i kosmicznym, należą też do jednych z najlepiej przebadanych i poznanych materiałów kompozytowych [1-8].

Wynalezienie i zastosowanie polimerowych materiałów kompozytowych jest związane z opracowaniem przemysłowych metod wytwarzania syntetycznych żywic i włókien szklanych. W praktyce przemysłowej, kompozyty polimerowe po raz pierwszy zostały użyte w 1953 roku, kiedy to ukazał się pierwszy Chevrolet Corvette. Od tego czasu, sektor kompozytów nieustannie się rozwija, a globalna produkcja ciągle wzrasta. Opracowanie kolejnych rodzajów włókien i materiałów osnowy pociągnęło za sobą zainteresowanie przemysłu lotniczego i zbrojeniowego oraz rozwój technologii wytwarzania. Wysokie zainteresowanie polimerowymi kompozytami konstrukcyjnymi jest wynikiem ich wyjątkowych właściwości, które odróżniają je od tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych. Najważniejsze z nich to niska gęstość, przekładająca się na wysoką wytrzymałość właściwą i wysoką sztywność właściwą. Dzięki temu, możliwe jest uzyskanie lekkich konstrukcji o dużej wytrzymałości. Niski współczynnik rozszerzalności cieplnej sprawia, że kompozyty gwarantują stabilność wymiarową w szerokim zakresie temperatur. Dodatkowo, cechuje je dobra odporność zmęczeniowa, odporność na korozję, zdolność do tłumienia drgań, stopniowa propagacja zniszczenia. Kolejną ważną cechą jest anizotropia materiałów kompozytowych. Ponieważ właściwości kompozytu zależą od kierunku, poprzez odpowiednie zaprojektowanie orientacji i ułożenia włókien zbrojących, a także poprzez wprowadzenie lokalnych wzmocnień czy zastosowanie dodatkowych materiałów przekładkowych o bardzo dużej sztywności i niskiej gęstości, można osiągnąć niezwykle funkcjonalne struktury, ściśle dopasowane do warunków pracy i występujących obciążeń [1, 4, 5, 9-13].

Ze względu na powyższe właściwości, materiały kompozytowe są stosowane wszędzie tam, gdzie można osiągnąć wymierne korzyści wynikające ze zmniejszenia masy wyrobu. Przykładowo, obniżenie masy konstrukcji pojazdu lub statku powietrznego pozwala na zmniejszenie zużycia paliwa, poprawę wydajności, zwiększenie szybkości czy ładowności. Zastosowanie materiałów kompozytowych może więc przynieść duże korzyści ekonomiczne, co przekłada się na ciągły rozwój i poszukiwanie nowych technologii i rozwiązań [1,5,14,15].

Jednym z najpewniejszych i najbardziej zaawansowanych procesów wytwarzania kompozytów jest metoda autoklawowa, w której wykorzystuje się preimpregnaty włókniste (prepregi). Prepregi stanowią półprodukt do wytwarzania materiałów kompozytowych, w których włókna zbrojące są już wstępnie połączone z osnową (wstępnie impregnowane). Obszarem, który w ostatnich latach przeżywa intensywny rozwój, jest wytwarzanie ultralekkich kompozytów z wykorzystaniem prepregów o niskiej gramaturze (inaczej też prepregów lekkich lub cienkowarstwowych). Gramatura jest cechą charakterystyczną danego prepregu i stanowi masę włókien zbrojących (bez uwzględnienia masy osnowy), przypadającą na 1 m<sup>2</sup> powierzchni materiału.

Niniejszy doktorat wdrożeniowy, zrealizowany we współpracy z Śląskim Centrum Naukowo-Technologicznym Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o., skupia się na wykorzystaniu prepregów węglowo-epoksydowych o niskiej gramaturze w procesie wytwarzania wielowarstwowych struktur zawierających krzywizny w technologii autoklawowej.

ŚCNTPL rozwija technologie wykorzystywania lekkich preimpregantów włóknistych (30÷75 g/m<sup>2</sup>) do wytwarzania wyrobów CFRP o dużych gabarytach i złożonych kształtach dla przemysłu lotniczego, szkutniczego oraz kosmicznego. Proces ten obejmuje wszystkie etapy wykorzystania prepregów, począwszy od opracowania technologii wytwarzania półproduktów, jakim są preimpregnaty włókniste, poprzez zastosowanie zautomatyzowanych systemów laminowania oraz formowania wyrobów, po produkcję wysoko zaawansowanych struktur 3D, zawierających krzywizny o różnej geometrii.

Podczas formowania i utwardzania wyrobów zawierających krzywizny pojawiają się problemy, które nie występują w przypadku struktur płaskich. Należą do nich między innymi zaburzenia ułożenia włókien czy powstające w obszarach krzywizn defekty, takie jak zmarszczki lub obszary bogate w żywicę. Czynniki te mogą powodować lokalne pogorszenie właściwości wytrzymałościowych wyrobów. Dodatkowe wyzwanie przy zastosowaniu prepregów o niskiej gramaturze stanowi zmniejszona grubość warstwy, która przekłada się na zachowanie materiału podczas kształtowania oraz utwardzania. Zastosowanie cienkich warstw do budowy laminatów wpływa też na ich właściwości.

Potrzeba opracowania i optymalizacji technologii wytwarzania kompozytowych struktur zakrzywionych o jak najlepszej jakości i właściwościach oraz praktyczne zbadanie możliwości i potencjału zastosowania w tym celu prepregów o niskiej gramaturze, z uwzględnieniem wymagań procesu technologicznego i wytrzymałości wytworzonych wyrobów, stały się motywacją do podjęcia projektu doktorskiego.

Pierwsza część pracy stanowi przegląd literatury na temat metod wytwarzania zaawansowanych wyrobów kompozytowych z wykorzystaniem prepregów, charakterystyki preimpregnatów o niskiej gramaturze oraz wytworzonych z nich laminatów, a także problematyki wytwarzania wyrobów kompozytowych zawierających krzywizny. Przedstawienie przeglądu badań pozwoli na zrozumienie dotychczasowych osiągnięć w dziedzinie zastosowania cienkowarstwowych prepregów oraz specyfiki zaawansowanych struktur kompozytowych, zawierających krzywizny.

W drugiej części przedstawiono cel i zakres pracy. Poprzez zdefiniowanie celu naukowego i wdrożeniowego, wyznaczono kierunek dalszych działań badawczych i przygotowano plan badań. Opisano także wybór i pozyskanie materiałów do badań.

Trzecią część pracy poświęcono szczegółom przeprowadzonych badań oraz procesów technologicznych, z uwzględnieniem zaobserwowanych zależności. Zaprezentowano otrzymane wyniki i przeprowadzono ich analizę. Opracowano wnioski dotyczące zależności technologiczno-materiałowych oraz możliwości zastosowania badanych materiałów. Na tej podstawie omówiono też potencjalne kierunki rozwoju i dalszych badań.

W ostatnim, podsumowującym rozdziale rozprawy przedstawiono wnioski i zalecenia wynikające z przeprowadzonych badań. Określono możliwości zastosowania prepregów o niskiej gramaturze do wytwarzania struktur kompozytowych zawierających krzywizny, a także zidentyfikowano ewentualne ograniczenia, mające służyć wskazaniu potencjalnych obszarów dalszego rozwoju technologii cienkowarstwowych laminatów.

## 2. Wytwarzanie kompozytów z wykorzystaniem prepregów

#### 2.1. Przetwarzanie i kształtowanie prepregów

Właściwości kompozytów sprawiają, że materiały te cieszą się niesłabnącą popularnością w wielu gałęziach przemysłu. Opracowano wiele metod wytwarzania polimerowych kompozytów włóknistych, których wybór jest zależny od geometrii wyrobu, wymagań jakościowych, wielkości produkcji oraz czynników ekonomicznych. Metody wytwarzania kompozytów polimerowych na osnowach duroplastycznych, wzmacnianych włóknem ciągłym, można podzielić na dwie główne grupy:

- metody z ciekłą osnową,
- metody z wykorzystaniem prepregów.

Metody z ciekłą osnową (inaczej nazywane też metodami tradycyjnymi lub metodami "na mokro"), polegają na przesączeniu suchych włókien zbrojących ciekłą osnową. Proces ten może przebiegać swobodnie, lub z wykorzystaniem dodatkowych czynników wymuszających, takich jak np. podciśnienie. Spośród metod z ciekłą osnową wymienić można między innymi metodę ręczną (kontaktową), metodę worka próżniowego, metodę infuzji próżniowej, metodę ciśnieniowo-próżniową RTM (Resin Transfer Molding), metodę nawijania, wtrysk reaktywny S-RIM (Structural Reaction Injection Molding) czy pultruzję [2,4,16-18].

Druga grupa metod polega na wykorzystaniu prepregów, w których wysokowytrzymałe włókna umacniające są przesycone żywicą w stanie wstępnego usieciowania (stan B, inaczej też rezitol). Podczas procesu wytwarzania wyrobów kompozytowych nie ma już konieczności przesycania zbrojenia osnową. Kształtowanie zatem wyrobu kompozytowego z wykorzystaniem prepregu polega na układaniu na formie materiału warstwa po warstwie, zgodnie z zaprojektowaną strukturą i orientacją. W celu usunięcia powietrza spomiędzy warstw oraz zapewnienia jak najwyższej jakości wyrobu, w trakcie laminowania stosuje się proces konsolidacji, polegający na zamknięciu stosu prepregu w worku próżniowym. Pełne sieciowanie żywicy następuje w warunkach podwyższonej temperatury podczas procesu utwardzania. Prepregi mogą występować w postaci rovingu, tkanin i taśm jednokierunkowych. Wśród metod wytwarzania wyrobów kompozytowych z wykorzystaniem prepregów należy wymienić [6,19-23]:

- Metodę Out of Autoclave (OOA)
- Metodę prasowania,
- Metodę utwardzania w autoklawie.

Stosowanie prepregów do otrzymywania zaawansowanych kompozytów polimerowych, w tym CFRP, ma wiele zalet w stosunku do konwencjonalnych metod wytwarzania, w których konieczne jest przesycenie włókien zbrojących ciekłą żywicą. Korzyści te osiągane są nie tylko w obszarze jakości i powtarzalności wyrobów, ale także finansów, wydajności i bezpieczeństwa pracy. Użycie materiału preimpregnowanego gwarantuje stały, optymalny udział objętościowy żywicy i włókien, pozwalający na osiągnięcie najlepszych właściwości wytrzymałościowych materiału. Wykorzystanie tego samego prepregu jako surowca do wytwarzania kompozytów pozwala uzyskać dużą powtarzalność produkowanych elementów. Stały udział żywicy i wstępna maszynowa infiltracja włókien pozwala też uniknąć problemów z prawidłowym zwilżeniem włókien i wynikających z tego defektów. Kolejną zaletą wynikającą z zastosowania prepregów jest łatwość precyzyjnego układania na formie. Materiały te cechuje lekko klejąca powierzchnia (ang. tack), wynikająca ze stanu wstępnego usieciowania żywicy. Tack może być rozumiany jako naturalna "kleistość", występująca bez udziału reakcji chemicznych lub odparowania rozpuszczalników. Jest to złożone zjawisko, które ze względu na postać i charakter prepregu wynika z mechanizmów adhezji i kohezji, a jego miarą jest siła, jakiej należy użyć, aby oddzielić prepreg od podłoża. Dzięki tej kleistości, włókna zbrojące mogą być łatwo układane w pożądanej orientacji, co daje możliwość precyzyjnego zaprojektowania i wykonania struktury zgodnie z kierunkiem występujących obciążeń. Łatwość stosowania włókien jednokierunkowych w formie prepregów pozwala maksymalnie wykorzystać anizotropowe właściwości kompozytów. Ponadto, dobre przyleganie prepregu do formy usprawnia odwzorowywanie nawet bardzo skomplikowanych kształtów. Ułatwia to także wprowadzenie lokalnych wzmocnień w pożądanych miejscach. Materiały preimpregnowane mogą być też wykorzystywane w procesach zautomatyzowanych, takich jak nawijanie czy układanie z taśm jednokierunkowych przy wykorzystaniu ploterów AFP (ang. Automated Fiber Placement) i ATL (ang. Automated Tape Laying). Prepregi występują w formie tkanin i taśm jednokierunkowych, nawijanych na rolki i zabezpieczanych materiałem protektorowym – folią lub papierem silikonowanym. Pozwala to wycinać z nich kształty (tzw. preformy) o złożonej geometrii przy wykorzystaniu ploterów tnacych. Każdy prepreg charakteryzuje się także ściśle określoną grubością warstwy po utwardzeniu, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne zaprojektowanie grubości elementu i uzyskanie większej niż w przypadku konwencjonalnych kompozytów dokładności wymiarowej. Wszystko to sprawia, że wyroby kompozytowe wytwarzane z prepregów mają bardzo wysoką jakość, dlatego znajdują zastosowanie w zaawansowanych gałęziach przemysłu, w tym w lotnictwie, przemyśle kosmicznym, do produkcji sprzetu sportowego czy samochodów i motocykli wyścigowych. Dodatkowo, zastosowanie prepregów niesie szereg korzyści dla przedsiębiorstwa: przede wszystkim eliminuje etap, jakim jest przesycanie zbrojenia ciekłą żywicą. Pozwala to przyspieszyć i uprościć proces produkcji, a także wyeliminować ryzyko wynikające z niewłaściwego przygotowania odpowiedniej mieszaniny żywicy z utwardzaczem oraz problemy wynikające z ograniczonego czasu przetwórstwa przed rozpoczęciem procesu utwardzania. Nie powstaja też odpady zawierające resztki utwardzonych żywic, a sam proces produkcji jest bardzo czysty. Dzięki temu wykorzystanie prepregów pozwala zwiększyć efektywność i wydajność produkcji. Postępowanie z prepregami jest też bezpieczniejsze

dla pracowników, ponieważ pomaga ograniczyć kontakt z żywicami oraz emisję substancji lotnych [19,24-26].

Kleistość prepregów umożliwia ich zastosowanie w procesach zautomatyzowanego układania z wykorzystaniem urządzeń AFP i ATL. Proces ATL polega na układaniu jednokierunkowych taśm prepregu zgodnie z zaprojektowaną orientacją. Urządzenia ATL wykorzystują taśmę prepregu nawiniętą na rolkę o szerokości 75, 150 lub 300 mm, zabezpieczoną papierem protektorowym. Taśma prepregu jest rozwijana i dociskana przez specjalną głowicę na formie lub stole podciśnieniowym, a następnie docinana przez nóż do pożądanej długości. Papier protektorowy jest odbierany i nawijany na specjalną rolkę. Schemat głowicy urządzenia ATL przedstawiono na Rys. 1. Przykład urządzenia ATL przedstawiono na Rys. 2. Taśmy prepregu są układane równolegle do siebie, z wykonaniem zaprojektowanej zakładki bądź szczeliny. Materiał nakładany jest na siebie warstwa po warstwie, zgodnie zaplanowaną orientacją i strukturą [23,27-29].



Rys. 1. Schemat głowicy urządzenia ATL [28]



**Rys. 2.** Urządzenie ATL znajdujące się na wyposażeniu Śląskiego Centrum Naukowo-Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o.

Proces AFP polega na układaniu węższych pasków materiału, który jest pobierany w postaci pojedynczych wiązek z kilku szpuli rovingu lub wąskiej taśmy. Pojedyncze wiązki prepregu są następnie odpowiednio wyrównywane i naciągane oraz układane i dociskane przez odpowiednie rolki. Schemat głowicy urządzenia AFP przedstawiono na Rys. 3, a przykład urządzenia na Rys. 4. Szerokość układanego materiału oraz ilość pobieranych wiązek zależy od konstrukcji głowicy. Proces układania stosu prepregu odbywa się na takiej samej zasadzie, jak w przypadku urządzeń ATL. Wykorzystanie węższych pasów materiału pozwala na precyzyjne układanie lokalnych wzmocnień i większą oszczędność materiału, jednakże proces AFP jest mniej wydajny niż proces ATL. Proces AFP jest zatem bardziej przydatny do formowania mniejszych powierzchni, ale o bardziej skomplikowanych kształtach i orientacji [23,29-32].



Rys. 3. Schemat głowicy urządzenia AFP [30]



**Rys. 4.** Wytwarzanie części kadłuba Boeinga 787 Dreamliner przy użyciu urządzenia AFP [33 - Boeing Company]

Zarówno w urządzeniach ATL, jak i AFP, głowica może być umieszczona na suwnicy, co umożliwia układanie preform płaskich lub o bardzo małych krzywiznach, bądź też na zautomatyzowanym ramieniu, umożliwiającym odwzorowywanie pionowych lub bardziej skomplikowanych powierzchni. Głowice moga być też wyposażone w systemy grzejne, powodujące zmniejszenie lepkości żywicy, a co za tym idzie, układanych Wykorzystanie zwiększenie przyczepności warstw. ploterów do automatyzacji procesu laminowania pozwala na przyspieszenie etapu kształtowania, a także na wytwarzanie elementów o dużych powierzchniach, trudnych do ułożenia w sposób ręczny z zachowaniem ciągłości włókien. Umożliwia osiągnięcie i utrzymanie bardzo dużej dokładności na dużej powierzchni, a także dobranie dowolnej orientacji kątowej układanych włókien. Skrócenie czasu laminowania ułatwia dotrzymanie czasu przydatności do użycia w temperaturze pokojowej materiałów typu prepreg, co stanowi wyzwanie przy wytwarzaniu wyrobów o bardzo dużych gabarytach. Automatyzacja procesu gwarantuje powtarzalność produkowanych wyrobów. Zautomatyzowanie procesu laminowania może przynieść duże korzyści finansowe. Istnieją jednak ograniczenia związane z geometrią wytwarzanych wyrobów, które wynikają zarówno z wymiarów urządzeń, jak i specyfiki układania włókien zbrojących wokół krzywizn o małych promieniach. Z tego powodu do wytwarzania skomplikowanych struktur wielowarstwowych stosuje się raczej procesy laminowania ręcznego. Wszystkie wyroby kształtowane za pomocą urządzeń ATL i AFP z prepregów termoutwardzalnych, wymagają następnie przeprowadzenia procesu utwardzania, który zwykle odbywa się w autoklawie [23,29-31].

Pomimo opisanych powyżej korzyści, produkcja kompozytów polimerowych z prepregów pociąga za sobą także dużą ilość wyzwań i wymagań. Do największych z nich należy zaliczyć duże nakłady finansowe, związane z dużymi kosztami infrastruktury niezbędnej do przetwarzania prepregów. Ich zakup wiąże się z długim czasem oczekiwania i wysoką ceną, najczęściej też należy uwzględnić duże minimum zakupowe, co generuje duże koszty surowców w stosunku do metod bazujących na suchych włóknach zbrojących i ciekłych żywicach. Przechowywanie prepregów podlega ściśle określonym warunkom środowiskowym. Utrzymanie stanu B żywicy, tj. stanu pośredniego pomiędzy ciekłym oligomerem a polimerem utwardzonym, jest możliwe tylko przez określony czas. Później następuje samoistne sieciowanie żywicy. Czas przydatności do użycia określany jest przez producentów poszczególnych prepregów i najcześciej wynosi około miesiaca w temperaturze pokojowej, chociaż dla niektórych materiałów o specjalnych zastosowaniach może wynosić zaledwie 3 dni. Aby wydłużyć czas życia prepregów, konieczne jest przechowywanie ich w komorach mroźnych, w temperaturze -18°C, w której następuje spowolnienie procesów sieciowania, a czas przydatności do użycia zwiększa się zwykle do około 1 roku. Wymaga to posiadania odpowiednich komór do magazynowania prepregów oraz uwzględnienia w procesie produkcyjnym odpowiedniego czasu potrzebnego na rozmrożenie materiału przed użyciem. Dodatkowo, w przemyśle lotniczym czy kosmicznym wymaga

się pełnego śledzenia czasu życia oraz rejestru warunków przechowywania i transportowania prepregu [19,34-36].

Wdrożenie produkcji kompozytów z prepregów wymaga dokładnej analizy rynku i potrzeb klienta. Z jednej strony, umożliwiają one otrzymanie wysokowytrzymałych wyrobów kompozytowych, spełniających surowe kryteria jakościowe, z drugiej jednak koszty wdrożeniowe oraz materiałowe są dość wysokie. Mimo dużej wydajności i efektywności pracy, cena wyrobów wytwarzanych z prepregów jest istotnie wyższa niż kompozytów wytwarzanych metodami konwencjonalnymi, w których suche zbrojenie przesycane jest ciekłą żywicą. To wszystko sprawia, że prepregi są używane zwykle tam, gdzie ich właściwości rekompensują wysokie koszty produkcji. Przykłady wykorzystania prepregów to między innymi kadłuby i skrzydła samolotów czy panele strukturalne satelitów okołoziemskich, w których zastosowanie zaawansowanych materiałów kompozytowych przyczynia się do obniżenia masy przy zachowaniu bardzo wysokiej wytrzymałości. Pozwala to zmniejszyć koszty eksploatacji, a wysoka jakość produktów jest niezbędna do zachowania odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji. Kolejnym przykładem zastosowania prepregów są między innymi karoserie samochodów wyścigowych, kadłuby i maszty jachtów wyczynowych i regatowych czy elementy profesjonalnych sprzętów sportowych, gdzie zastosowanie zaawansowanych materiałów ma bezpośrednie przełożenie na zwiększenie osiągów [19,26].

#### 2.2. Metoda utwardzania w autoklawie

Najczęściej wykorzystywaną metodą wytwarzania wyrobów kompozytowych na bazie prepregów jest metoda utwardzania w autoklawie. Autoklaw jest komorą ciśnieniową, umożliwiającą wytwarzanie wyrobów z zastosowaniem wysokiego ciśnienia i temperatury, z jednoczesnym wykorzystaniem podciśnienia wewnątrz formowanego pakietu. Systemy sterowania autoklawu pozwalają na kontrolowanie warunków procesu, do których należą ciśnienie, temperatura, podciśnienie, prędkości nagrzewania i chłodzenia oraz czas wygrzewania elementów. Autoklawy znajdujące się na wyposażeniu ŚCNTPL przedstawiono na Rys. 5 [23,37].



**Rys. 5.** Autoklawy znajdujące się na wyposażeniu Śląskiego Centrum Naukowo-Technologicznego Sp. z o.o. [38]

Proces utwardzania w autoklawie wymaga odpowiedniego przygotowania wyrobu. Formę razem z odpowiednio ukształtowanym stosem prepregu należy zamknąć wewnątrz szczelnego pakietu próżniowego. Pakiet próżniowy składa się z kilku warstw materiałów pomocniczych i funkcyjnych, których wybór uzależniony jest między innymi od grubości wyrobu oraz pożądanej jakości powierzchni. Schemat przykładowego pakietu podciśnieniowego przedstawiono na Rys. 6. Bezpośrednio na prepreg nakładana jest zwykle tkanina delaminacyjna, bądź inna tkanina, zapewniająca pożądaną chropowatość lub gładkość powierzchni. Folie oddzielające odpowiadają za ograniczenie przepływu żywicy do pozostałych warstw pakietu i utrzymanie jej wewnątrz układu. Tkanina absorbująca służy do odbierania nadmiaru żywicy w przypadku wytwarzania wyrobów o dużej grubości. Włóknina typu breather umożliwia swobodny przepływ powietrza i innych substancji lotnych wewnątrz pakietu podciśnieniowego, a folia przeponowa i taśma uszczelniająca zapewniają szczelność pakietu. Właściwe przygotowanie pakietu ma istotne znaczenie dla zapewnienia pożądanej jakości wyrobu [1,16,37].



Rys. 6. Przykładowy schemat pakietu próżniowego do procesu utwardzania w autoklawie

Pakiet z reguły jeszcze poza autoklawem poddaje się odpowietrzeniu (wytwarza się w jego wnętrzu podciśnienie) i uszczelnia zaworem. Dostosowuje się on wtedy do finalnego kształtu wyrobu, dociskając warstwy prepregu do formy. Tak przygotowany pakiet podciśnieniowy umieszczany jest w autoklawie i podpinany do jego własnego układu próżniowego. Dzięki temu, w trakcie trwania całego procesu utwardzania wewnątrz pakietu utrzymywane jest odpowiednie podciśnienie. Podciśnienie umożliwia odprowadzenie powietrza oraz substancji lotnych powstających podczas sieciowania żywicy, zapewnia także odpowiednią infiltrację włókien przez osnowę. Wraz ze wzrostem temperatury, w pierwszej kolejności następuje spadek lepkości żywicy. Na tym etapie następuje zwilżanie włókien, zagęszczenie struktury i usuwanie powietrza. Działanie zewnętrznego ciśnienia powoduje konsolidację warstw. Dalszy wzrost temperatury powoduje szybki wzrost lepkości, wynikający z rozpoczęcia procesu sieciowania żywicy, który trwa aż do pełnego utwardzenia wyrobu. Schemat przebiegu procesu utwardzania w autoklawie przedstawiono na Rys. 7. Parametry procesu utwardzania mają duży wpływ na jakość otrzymanych wyrobów. Temperatura i czas utwardzania mają bezpośredni wpływ na właściwości mechaniczne, a ciśnienie i podciśnienie na zawartość pustek, która również przekłada się na wytrzymałość kompozytów. Parametry procesu zwykle są dobierane na podstawie zaleceń producenta prepregu, wymagają jednak uwzględnienia również kształtu i grubości wyrobu oraz formy [1,37,39-41].



Rys. 7. Schemat procesu utwardzania w autoklawie

Proces wytwarzania w technologii autoklawowej pozwala uzyskać najwyższą jakość wyrobów kompozytowych. Wysokie udziały objętościowe włókien oraz niski udział pustek (<1%) przekładają się na wysokie właściwości wytrzymałościowe. Wyroby wytwarzane tą metodą cechują się także dużą powtarzalnością i stabilnością wymiarową. Zastosowanie wysokiego ciśnienia pozwala utwardzać elementy o dużej grubości i złożonej geometrii. W technologii autoklawowej można też wytwarzać struktury przekładkowe. Większość struktur kompozytowych dla przemysłu lotniczego oraz kosmicznego wytwarza się metodą utwardzania w autoklawie [1,2,6,37].

Technologia autoklawowa wiąże się z dużymi kosztami. Infrastruktura, której głównym i najdroższym elementem są same autoklawy, stanowi duży wydatek inwestycyjny, zwłaszcza w przypadku urządzeń o dużych gabarytach. Wysokie są także koszty samego procesu, związane z dużym zużyciem energii. Droższe są także materiały pomocnicze i funkcyjne do tworzenia pakietów podciśnieniowych, które muszą być odporne na działanie ciśnienia i wysokiej temperatury. Potencjalne rozszczelnienie pakietu próżniowego w trakcie procesu utwardzania jest często niemożliwe do naprawienia w zamkniętym autoklawie, co prowadzi do otrzymania wadliwych wyrobów, zniszczenia materiału i powstania dużych strat. Metoda autoklawowa wymaga również odpowiedniego oprzyrządowania: formy do wykonywania wyrobów kompozytowych z prepregów metodą autoklawową są droższe w stosunku do form do wytwarzania wyrobów metodami konwencjonalnymi, gdyż muszą być wykonane z materiałów o odpowiedniej odporności termicznej oraz wytrzymałości i sztywności, aby nie ulec zniszczeniu lub deformacji w warunkach panujących w autoklawie. Wyroby kompozytowe wytwarzane metodą utwardzania w autoklawie są więc bardzo drogie,

ale ich jakość sprawia, że sprawdzają się w najbardziej wymagających aplikacjach [6,35,37].

### 2.3. Inne metody wytwarzania wyrobów kompozytowych z prepregów

Inną metodą, wykorzystującą prepregi do wytwarzania wyrobów kompozytowych, jest metoda Out of Autovlave (OOA), czasami nazywana też Vacuum-bag-only lub Vacuum Bag/Oven (VBO). Polega ona na zamknięciu odpowiednio ułożonego na formie stosu prepregów w pakiecie próżniowym i utwardzeniu w komorze grzejnej przy zastosowaniu jedynie podciśnienia i temperatury. Niekiedy zamiast komór grzejnych, do osiągnięcia wymaganej temperatury wykorzystywane są specjalne, ogrzewane formy lub maty grzejne [37,42,43].

Podczas utwardzania wyrobów kompozytowych metoda OOA nie występuje wysokie ciśnienie, oddziałujące na stos prepregu, pojawiają się więc problemy z odprowadzeniem powietrza i innych substancji lotnych spomiędzy włókien, skutkujące wysokim udziałem pustek w wyrobach. Aby uniknąć tych problemów, metoda OOA wymaga zastosowania specjalnych prepregów, przystosowanych do tego rodzaju procesów. Prepregi przystosowane do utwardzania poza autoklawem zawierają częściowo przesycone włókna, tworzące obszary bogate w żywice oraz obszary suche (Rys. 8) lub też przeplatające się ze sobą pojedyncze suche włókna (Rys. 9), które służą do odprowadzania powietrza w trakcie konsolidacji i we wstępnej fazie procesu utwardzania. Żywice wykorzystywane do procesów VBO powinny posiadać specjalne właściwości reologiczne, do których należy duża lepkość w pierwszej fazie procesu, umożliwiająca efektywne odprowadzanie powietrza wzdłuż nieprzesyconych włókien oraz niska lepkość w podwyższonej temperaturze, przed rozpoczęciem procesu utwardzania, umożliwiająca zwilżenie suchych włókien. Proces sieciowania powinien przebiegać bez wydzielania dodatkowych substancji lotnych. Żywice przystosowane do procesów VBO często utwardzają się także w niższych temperaturach, z wykorzystaniem dodatkowych procesów wygrzewania po wstępnym utwardzeniu, aby ograniczyć koszty oprzyrządowania [42-45].



**Rys. 8.** Prepreg do utwardzania poza autoklawem, składający się z obszarów przesyconych (impregnated fibers) i nieprzesyconych żywicą (dry fibers) [43]



**Rys. 9.** Prepreg do utwardzania poza autoklawem, zawierający sieć suchych włókien, służących do odprowadzania powietrza [44]

Procesy VBO wymagają też specjalnej konstrukcji pakietu próżniowego, ułatwiającej odprowadzanie gazów. Ze względu na małą przepuszczalność prepregów w kierunku poprzecznym, odprowadzanie powietrza odbywa się wzdłuż suchych włókien, zawartych w materiale, dlatego też wokół stosu prepregu należy wykonać obramowanie z przepuszczalnych materiałów, zapewniających krawędziowe odprowadzanie powietrza. Ponadto, metoda OOA wymaga dłuższych czasów procesu, a niekiedy zastosowania podwyższonej temperatury w trakcie konsolidacji warstw prepregu przed rozpoczęciem właściwego utwardzania [44-46].

Poprawnie przeprowadzone procesy OOA pozwalają uzyskać wyroby kompozytowe wysokiej jakości, zbliżonej do wyrobów wytwarzanych w autoklawie. Jest to jednak metoda wrażliwa na wiele zmiennych, wymagająca dużej wiedzy i doświadczenia. Ze względu na problemy z prawidłowym odprowadzaniem powietrza, wyroby wytwarzane metodą OOA bardzo często cechują się większym udziałem pustek, niż wyroby wytwarzane w autoklawie, co z kolei przekłada się na gorsze właściwości mechaniczne. Istotne znaczenie mają także warunki pracy z prepregami OOA: absorpcja wilgoci oraz czas przebywania w temperaturze pokojowej mają wpływ na zwiększoną porowatość kompozytów. Metoda ta pozwala jednak w istotny sposób zmniejszyć koszty produkcji. Wpływają na to niższe koszty oprzyrządowania i zużycia energii. Metoda ta jest pożądana zwłaszcza dla produktów o bardzo dużych gabarytach, które przekraczają wymiary dostępnych autoklawów, a także dla wyrobów jednostkowych. Technologia autoklawowa zapewnia większą powtarzalność, zatem wybór pomiędzy utwardzaniem w autoklawie a metodą VBO powinien być poprzedzony dokładną analizą ryzyka i kosztów [43-48].

Prepregi mogą być także wykorzystywane do wytwarzania kompozytów metodą utwardzania na prasach (*ang. Prepreg Compression Molding – PCM*). W przeszłości metodę prasowania stosowano dla kompozytów termoplastycznych lub tłoczyw zbrojonych włóknem krótkim do wytwarzania raczej tanich, niewymagających wyrobów wielkotonażowych. Procesy wykorzystujące żywice termoutwardzalne cechują długie czasy sieciowania. Jednakże, w ostatnich latach opracowano prepregi na osnowach żywic termoutwardzalnych o skróconych czasach sieciowania, wynoszących nawet dwie minuty. Prepregi o skróconym czasie utwardzania umożliwiają wytwarzanie

kompozytów umacnianych włóknem ciągłym, o bardzo dobrej jakości i właściwościach mechanicznych, w krótkich cyklach produkcyjnych. W metodzie tej prepreg jest wycinany do odpowiednich kształtów i układany w stos w sposób ręczny lub zautomatyzowany. Tak przygotowany stos jest wstępnie podgrzewany, układany na formie i prasowany. Schemat procesu przedstawiono na Rys. 10. Metoda PCM umożliwia wykorzystanie prepregów do wytwarzania kompozytów na osnowach termoutwardzalnych, umacnianych włóknem ciągłym w produkcji seryjnej, dlatego też jest stosowana głównie w motoryzacji oraz do wytwarzania sprzętu sportowego [49-52].



**Rys. 10.** Schemat procesu Prepreg Compression Moulding: 1 – wycinanie i układanie prepregu, 2 – wstępne podgrzewanie, 3 – układanie na formie, 4 – prasowanie, 5 – otwarcie formy i wyjęcie gotowego wyrobu [49]

Ze względu na wysokie koszty infrastruktury, oprzyrządowania i energii w technologii autoklawowej, na świecie testowane i rozwijane są także inne metody wytwarzania z wykorzystaniem prepregów. Jedną z takich metod jest Heat Transfer Fuid (HFT), wykorzystująca ciecz do ogrzewania i chłodzenia wyrobu. Kolejna metoda to SQRTM (Same Qualified Resin Transfer Molding), w której do zamkniętej formy z prepregiem wtłacza się wzdłuż krawędzi elementu dodatkową żywicę. Inna metoda to Microwave Curing Process (MCP), wykorzystująca promieniowanie elektromagnetyczne dla zmniejszenia zużycia energii i skrócenia czasu procesu. Póki co, metody te są wykorzystywane jedynie w badaniach laboratoryjnych i testach lub w pojedynczych zastosowaniach przemysłowych, a technologia autoklawowa stanowi najpewniejszą i najbardziej powtarzalna metode wytwarzania zaawansowanych wyrobów kompozytowych z wykorzystaniem materiałów preimpregnowanych [53-58].

### 3. Prepregi o niskiej gramaturze

#### 3.1. Charakterystyka preregów o niskiej gramaturze

Zgodnie z definicją, prepregi o niskiej gramaturze (inaczej cienkowarstwowe) mają odpowiednio małą grubość pojedynczej warstwy po utwardzeniu oraz odpowiednio niską gramaturę. Do tej pory nie określono jednoznacznie wartości granicznej, pozwalającej uznać prepreg za cienkowarstwowy. Niektóre źródła podają, że jest to możliwe gdy grubość pojedynczej warstwy jest mniejsza niż 0,1 mm, a gramatura jest mniejsza niż 100 g/m<sup>2</sup>. Inne źródła mówią o grubości jednej warstwy mniejszej lub równej około 0,07 mm. W praktyce przemysłowej przyjmuje się, że prepregi o niskiej gramaturze to takie, których gramatura jest mniejsza od 100 g/m<sup>2</sup> i takie rozgraniczenie przyjęto na potrzeby niniejszej pracy. Prepregi o gramaturze równej lub wyższej niż 100 g/m<sup>2</sup> określa się mianem standardowych lub konwencjonalnych [59,60].

Prepregi o niskiej gramaturze wytwarzane są z takich samych włókien, jak prepregi klasyczne. Można w tym celu wykorzystać dowolny typ nieskręconych włókien. Największą popularnością cieszą się prepregi o niskiej gramaturze na bazie włókien węglowych, ale na rynku występują także prepregi z włóknami szklanymi, poliaramidowymi czy materiały hybrydowe. Lekkie prepregi różnią się strukturą od prepregów konwencjonalnych, co jest skutkiem technologii wytwarzania polegającej na poszerzeniu standardowej wiązki włókien. Klasycznie, wiązka włókien składa się z określonej liczby pojedynczych włókien o bardzo małej średnicy (dla włókien węglowych wytworzonych z poliakrylonitrylu średnica ta wynosi ok 7 µm). Ilość pojedvnczych włókien wchodzacych w skład wiazki (pojedvnczego pasma rovingu) podawana jest w oznaczeniu każdego materiału z symbolem "K". Przykładowo, 3K oznacza, że wiązkę materiału tworzy 3000 pojedynczych włókien, a 24K oznacza, że wiązkę materiału tworzy 24 000 pojedynczych włókien. Podczas wytwarzania prepregów o niskiej gramaturze, podstawowa wiązka jest rozszerzana tak, że pojedyncze włókna są równomiernie rozprowadzane, co skutkuje powstaniem warstwy złożonej ze znacznie mniejszej ilości pojedynczych włókien, niż w przypadku standardowych prepregów. Zostało to przedstawione na Rys. 11. Ma to przełożenie zarówno na właściwości, jak i na strukturę i jednorodność kompozytów wytwarzanych z prepregów o niskiej gramaturze. Cienkowarstwowe preimpregnaty występuja najczęściej w postaci jednokierunkowych taśm z włókien ciągłych, chociaż spotyka się także tkaniny o niskiej gramaturze wytworzone z uprzednio rozszerzonych włókien. Tkaniny takie cechują się mniejszymi zaburzeniami ułożenia włókien, spowodowanymi splotem, w stosunku do tkanin konwencjonalnych. Ich zastosowanie pozwala osiągnąć większą jednorodność i zmniejszyć obszary żywicy pomiędzy pasmami włókien. Schemat tkaniny o niskiej gramaturze przedstawiono na Rys. 12. Materiały jednokierunkowe cechują się jednak wyższymi właściwościami mechanicznymi i pozwalają na bardziej efektywne umocnienie w obciążonych kierunkach, dlatego też

do zastosowań konstrukcyjnych częściej wykorzystuje się niskogramaturowe prepregi jednokierunkowe. Spotykane są także prepregi o niskiej gramaturze w postaci bezsplotowych tkanin (*ang. NCF – Non Crimp Fabric*), składające się z kilku warstw rozszerzonych włókien o różnej orientacji, zszywanych ze sobą za pomocą cienkiej nici. Gramatura dostępnych prepregów zależy od rodzaju włókien zbrojących. Obecnie najcieńsze dostępne prepregi wykonane są z włókien węglowych, a ich gramatura wynosi 15 g/m<sup>2</sup> [35,59-64].



**Rys. 11.** Pierwotna wiązka, złożona z dużej ilości pojedynczych włókien (po lewej) i wiązka po rozszerzeniu w celu uzyskania materiału o niskiej gramaturze (po prawej) [61]



*Rys. 12.* Schemat tkaniny wykonanej ze standardowej wiązki (po lewej) i z włókien po rozszerzeniu (po prawej) [59]

#### 3.2. Wytwarzanie prepregów o niskiej gramaturze

Komercyjne wytwarzanie niskogramaturowych prepregów stało się możliwe dzięki wynalezieniu technologii rozszerzania wiązki włókien (*ang. spread tow technology*). Istnieje kilka metod rozszerzania włókien w celu zmniejszenia grubości i gramatury. Jedna z metod wykorzystuje fale ultradźwiękowe, inna bazuje na rozszerzeniu wiązki włókien na obracających się wałkach z kołkami o różnym rozstawie. Najefektywniejszą i najpopularniejszą metodą, stosowaną w przemyśle, jest rozszerzanie włókien z wykorzystaniem przepływu powietrza [59,61,65].

Technologia wykorzystująca przepływ powietrza została wynaleziona w Japonii w Industrial Technology Center w Fukui. Metoda ta wykorzystuje wiązki włókien o standardowej grubości, które przechodzą przez specjalny kanał, znajdujący się pomiędzy rolkami, po których przesuwają się wiązki. Różnica ciśnienia powoduje ruch powietrza w kanale. Gdy włókna znajdują się w kanale, opadają i tracą naprężenie. Przepływające przez wiązkę powietrze powoduje ciągłe i stabilne rozszerzanie

swobodnie zawieszonej wiązki. Schemat dwuetapowego rozszerzania wiązki włókien przedstawiono na Rys. 13 [61,66].



*Rys. 13.* Schemat rozszerzania wiązki włókien z wykorzystaniem przepływu powietrza, na linii złożonej z dwóch modułów rozszerzających [66]

Prędkości przepływu powietrza są stosunkowo małe, a rozszerzanie odbywa się w stanie swobodnym, bez mechanicznej ingerencji, dlatego też metoda ta nie uszkadza włókien i cechuje się dobrą jakością otrzymanych taśm. Rozszerzone w ten sposób włókna mogą być wykorzystywane w postaci suchej, np. do tworzenia tkanin o niskiej gramaturze, lub też połączone z system impregnowania, służącym do wytwarzania niskogramaturowych prepregów [59,61,66].

Dalsze wytwarzanie prepregu polega na połączeniu rozszerzonych włókien z osnową i przeprowadzeniu jej w stan B. Jednym ze sposobów przesycania włókien jest metoda rozpuszczalnikowa, polegająca na zanurzeniu włókien w wannie z żywicą. Aby umożliwić pełną infiltrację włókien i zmniejszyć lepkość żywicy, jest ona wymieszana z rozpuszczalnikami, takimi jak alkohol czy aceton, które następnie odparowują, przechodząc przez kolejne komory grzewcze. Wadą tej metody jest obecność rozpuszczalników, która jest niekorzystna zarówno ze względu na gorsze właściwości wytworzonego prepregu, jak i aspekty środowiskowe. Obecnie wprowadzane i rozwijane są też metody wytwarzania preimpregnatów z wykorzystaniem sproszkowanych żywic. Prepregi do zastosowań w przemyśle lotniczym oraz kosmicznym, w tym prepregi o niskiej gramaturze, wytwarzane są raczej z wykorzystaniem metody hot melt, W metodzie tej żywica jest ogrzewana w celu obniżenia lepkości i rozprowadzana na materiale oddzielającym, który następnie łączy się z włóknami i przechodzi przez

system ogrzewanych wałków kalandrujących, gdzie na skutek nacisku i temperatury następuje przesycanie włókien. Po osiągnięciu odpowiedniego stanu, prepreg jest docinany i nawijany na rolki [67-70].

# 3.3. Korzyści i problemy wynikające z zastosowania prepregów o niskiej gramaturze

Największą korzyścią płynącą z zastosowania prepregów o niskiej gramaturze jest zmniejszenie masy wyrobów oraz rozszerzenie możliwości konstrukcyjnych. Po pierwsze, przy zachowaniu takiej samej grubości kompozytu, wykorzystanie prepregu o niskiej gramaturze pozwala na ułożenie większej ilości warstw. Na przykład, do wykonania laminatu o grubości wynoszącej około 0,6 mm należy wykorzystać 3 warstwy jednokierunkowego prepregu o gramaturze 200 g/m<sup>2</sup>. Jeśli do wykonania laminatu o zbliżonej grubości użyć prepregu o gramaturze 50 g/m<sup>2</sup>, struktura będzie składać się już z 12 warstw. Zmniejszenie gramatury pozwala zatem uzyskać większą swobodę przy projektowaniu wyrobów kompozytowych poprzez wprowadzenie dodatkowych orientacji i optymalizację ułożenia w zależności od przewidywanych obciążeń. Jednocześnie możliwe jest uzyskanie lżejszych i cieńszych kompozytów o strukturze quasi-izotropowej niż w przypadku standardowych prepregów. Większa swoboda przy projektowaniu jest istotna również z punktu widzenia wymagań wytyczonych między innymi dla przemysłu lotniczego czy obronnego, zgodnie z którymi w strukturze należy zapewnić przynajmniej 10% warstw dla każdego z kierunków. Do zalet prepregów o niskiej gramaturze można również zaliczyć pozytywny wpływ na mikrostrukturę, wynikający ze zmniejszenia grubości warstwy, co przy większym rozproszeniu włókien pozwala osiągnąć większą jednorodność wyrobu. Wiąże się to ze zmniejszeniem obszarów bogatych w żywicę i obniżeniem udziału pustek, co prowadzi do poprawy wielu właściwości mechanicznych w odniesieniu do kompozytów wykonanych z prepregów o większej grubości. Zmniejszenie grubości warstwy ogranicza też powstawanie i rozwój defektów, takich jak mikropęknięcia czy delaminacje. Na rozwój defektów wpływa m.in. efekt skali: rozproszenie warstw o tej samej orientacji wewnątrz struktury ogranicza powstawanie zniszczeń w stosunku do struktury, w której warstwy są grupowane. Zastosowanie prepregów o niskiej gramaturze i zróżnicowanej orientacji może więc przyczynić się do zmiany wytrzymałości kompozytu i mechanizmu zniszczenia poprzez ograniczenie rozwoju delaminacji i mikropęknięć [59,61,71-74].

W statycznych badaniach mechanicznych wykazano, że wykorzystanie prepregów o niskiej gramaturze pozwala osiągnąć porównywalne lub lepsze właściwości w stosunku do konwencjonalnych prepregów. Podczas statycznej próby rozciągania kompozytów jednokierunkowych, wytrzymałość w kierunku 0° próbek wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze jest porównywalna dla obu rodzajów materiałów, jednakże w przypadku próbek quasi-izotropowych, zastosowanie materiałów o niskiej gramaturze

przekłada się na poprawę całkowitej wytrzymałości oraz zwiększenie napreżeń, przy których rozpoczyna się zniszczenie. Kompozyty wykonane z prepregów o niskiej gramaturze wykazują też wyższą wytrzymałość na ściskanie w stosunku do kompozytów o standardowej grubości warstwy, zarówno dla próbek jednokierunkowych, jak i quasiizotropowych. Zastosowanie lekkich prepregów pozwala też osiągnąć bardziej jednorodną mikrostrukturę, a co za tym idzie, wyższe właściwości w kierunkach poprzecznych, między innymi wytrzymałość na ścinanie miedzywarstwowe [59,60,71,75-78].

Dla próbek wykonanych z cienkowarstwowych prepregów zaobserwowano też inne modele zniszczenia, niż dla próbek wykonanych z prepregów o standardowych gramaturach. Przy rozciąganiu laminatów zbudowanych z warstw o standardowej grubości, po pojawieniu się pierwszych pęknięć osnowy i włókien, rozpoczyna się delaminacja próbki, która propaguje w ustabilizowany sposób. Laminaty zbudowane z cienkich warstw ulegają zniszczeniu w sposób kruchy, poprzez nagłe pękanie włókien, nie wykazując żadnych wcześniejszych oznak zniszczenia. Jest to wynikiem ograniczenia rozwoju delaminacji i mikropęknięć. Znacznie późniejsza inicjacja zniszczenia pozwala myśleć o zastosowaniu wyższych współczynników bezpieczeństwa, niż w przypadku kompozytów wykonanych ze standardowych prepregów [71,72,75,79-81].

Kompozyty wykonane z prepregów o niskiej gramaturze wykazują wyższą wytrzymałość zmęczeniową niż kompozyty o standardowej grubości warstwy. Wyższa wytrzymałość przy obciążeniach cyklicznych jest przypisywana blokowaniu powstających w osnowie mikropęknięć i ograniczeniu powstawania delaminacji przy swobodnych krawędziach. Podobne zachowanie zaobserwowano w przypadku cienkowarstwowych laminatów wytworzonych zarówno z prepregów jednokierunkowych, jak i tkanin [71,82,83].

Zastosowanie preimpregnatów niskogramaturowych pozwala również poprawić wytrzymałość na naciski wywierane przez połączenia sworzniowe. W badaniach wytrzymałości na ścinanie połączenia sworzniowego laminatów cienkowarstwowych oraz tych o standardowej grubości warstwy, wyższą wytrzymałość uzyskano w przypadku prepregów o niskiej gramaturze, co przypisuje się ich zdolności do ograniczenia powstawania delaminacji i skuteczniejszego blokowania mikropęknięć. Poprawę wytrzymałości zaobserwowano również podczas badań prowadzonych w warunkach podwyższonej temperatury i wilgotności [71,84].

CFRP charakteryzują się sprężystym odkształceniem aż do zniszczenia, które najczęściej przebiega w sposób nagły. Z wykorzystaniem prepregów o niskiej gramaturze opracowano jednak kompozyty wykazujące pseudoplastyczność. Jednym ze sposobów osiągnięcia takiej charakterystyki są materiały hybrydowe, złożone z warstw prepregu węglowo-epoksydowego o niskiej gramaturze oraz prepregu szklano-epoksydowego o standardowej gramaturze. Taki układ pozwala osiągnąć stabilny model zniszczenia, któremu towarzyszą duże odkształcenia. Odbywa się to poprzez stopniowe oddzielanie i wyciąganie warstw kompozytu węglowego o niskiej grubości, co objawia się jako

obszar dużego odkształcenia bez przyrostu naprężenia na krzywych rozciągania. Charakterystyka ta jest podobna do odkształcenia plastycznego, obserwowanego dla metali. Zbliżony efekt osiągnięto także dla laminatów węglowo-epoksydowych, zbudowanych z jednokierunkowego prepregu o niskiej gramaturze o odpowiedniej orientacji kątowej. Dzięki ograniczeniu rozwoju delaminacji, podczas rozciągania zaobserwowano stabilną rotację włókien, objawiającą się znacznym odkształceniem przy stałym naprężeniu. Ponadto, oba opisane powyżej mechanizmy można połączyć, osiągając znaczne odkształcenie pseudoplastyczne [59,81,85-91].

Wykorzystując prepregi o niskiej gramaturze, osiągnięto także poprawę charakterystyki elementów strukturalnych przy wybaczaniu. Wykazano również, że zastosowanie prepregów o niskiej gramaturze może poprawić wytrzymałość kompozytów w wymagających warunkach środowiskowych, takich jak wysoka temperatura i wilgotność, a nawet w warunkach niskich orbit okołoziemskich, gdzie materiały kompozytowe narażone są między innymi na działanie próżni, promieniowania elektromagnetycznego, tlenu atomowego, dużych, cyklicznych zmian temperatury oraz uderzeń różnego rodzaju cząstek, odpadów i zanieczyszczeń. Zastosowanie prepregów o niskiej gramaturze pozwala także zmieniać właściwości elektryczne laminatu: wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy następuje zmniejszenie rezystywności laminatu, a także poprawa stabilności właściwości elektrycznych pod obciążeniem [59,71,92-95].

Prepregi o niskiej gramaturze umożliwiają również wytwarzanie struktur kompozytowych o dużej wytrzymałości, a jednocześnie bardzo małej grubości, pozwalającej na dużą zmianę kształtu bez zniszczenia. Przy zastosowaniu odpowiedniej orientacji, możliwe jest uzyskanie struktur bi-stabilnych, które można między innymi rolować i rozwijać (Rys. 14). Takie właściwości mogą być wykorzystywane w sektorze kosmicznym, między innymi do wytwarzania kompozytowych rolowanych masztów lub paneli, które mogą być wysyłane w przestrzeń kosmiczną w stanie złożonym i rozkładane na orbicie, tworząc podpory i wysięgniki pod anteny czy żagle solarne [96-98].



**Rys. 14.** Przykład bi-stabilnego masztu kompozytowego, który można zrolować bez utraty właściwości czy zniszczenia włókien [97, NASA]

Technologia wytwarzania prepregów o niskiej gramaturze została opracowana i wdrożona w komercyjnej produkcji stosunkowo niedawno. Od tego czasu przeprowadzono wiele różnych badań, mających na celu poznanie ich charakterystyki oraz wpływu grubości warstwy na właściwości kompozytów. Część przeprowadzonych badań dotyczyła jednak efektu skali uzyskanego poprzez grupowanie warstw tej samej grubości, a nie bezpośredniego porównania tych samych prepregów, różniacych się gramaturą. Wciąż pozostaje też wiele niezbadanych aspektów wykorzystania prepregów o niskiej gramaturze. W niektórych przypadkach, dane dostępne w literaturze cechuje rozbieżność wyników oraz sprzeczne wnioski. Dotyczy to na przykład wpływu gramatury na odporność kompozytów na uderzenia. Jednym z problemów, jaki występuje przy zastosowaniu materiałów kompozytowych na elementy konstrukcyjne, jest powstawanie pod wpływem uderzeń niewidocznych na zewnątrz uszkodzeń struktury, takich jak delaminacje czy mikropęknięcia. Powstanie takich defektów może skutkować ich późniejszym rozwojem i zniszczeniem pod wpływem obciążeń, zwłaszcza podczas ściskania. Istotna dla struktur kompozytowych, zwłaszcza wykorzystywanych w przemyśle lotniczym jest wytrzymałość resztkowa przy ściskaniu oraz przy rozciąganiu po uderzeniu (ang. CAI – Compression After Impact, TAI – Tension After Impact). W niektórych z przeprowadzonych do tej pory badań uzyskano wyższą wytrzymałość resztkową CAI w przypadku zastosowania cienkich warstw, dla innych z kolei niższą. Niższą odporność na zniszczenia kompozytów wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze tłumaczy się przedwczesnym złamaniem włókien, będącym efektem ograniczenia rozwoju delaminacji i mikropęknięć, które tworzą się w kompozytach wykonanych z warstw o standardowej grubości. Wpływ grubości warstwy laminatu nie jest więc w tym przypadku oczywisty, a rezultaty są też zależne od właściwości osnowy, orientacji oraz połączenia pomiędzy warstwami. Jednym z możliwych sposobów poprawy nośności przy uderzeniach kompozytów wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze jest też tworzenie laminatów hybrydowych, złożonych z warstw o niskiej oraz o standardowej grubości, w asymetrycznym układzie [59,71,75,83,99-108].

Laminaty cienkowarstwowe wykazują wyższą wrażliwość na obecność karbu w stosunku do laminatów konwencjonalnych. W badaniach wytrzymałości na rozciąganie próbek z otworem (*ang. OHT – Open Hole Tension*), niższe wyniki otrzymano dla kompozytów wykonanych z niskogramaturowych prepregów, niż z materiałów o standardowej grubości. Obecność otworu powoduje koncentrację naprężeń oraz zmniejszenie rzeczywistej powierzchni przekroju. Podczas projektowania należy uwzględnić występowanie różnego rodzaju karbów w rzeczywistych strukturach, takich jak otwory montażowe, wolne krawędzie, możliwe charakterystyczne defekty itp. W przypadku cienkowarstwowych laminatów, ograniczenie rozwoju mikropęknięć i delaminacji prowadzi do silnej koncentracji naprężeń, co skutkuje przedwczesnym i nagłym zniszczeniem. Laminaty o standardowej grubości warstwy ulegają zniszczeniu poprzez stały rozwój delaminacji i wyciąganie włókien, osiągając wyższą wytrzymałość całkowitą. W przypadku wytrzymałości na ściskanie próbek z centralnie umieszczonym otworem (*ang. OHC – Open Hole Compression*), dostępne dane literaturowe prezentują

rozbieżne wyniki. W niektórych badaniach uzyskano wyższą wytrzymałość w przypadku laminatów cienkowarstwowych, co uzasadniono ograniczeniem rozwoju delaminacji i większą wytrzymałością na ściskanie kompozytów zbudowanych z cienkich warstw. Inne źródła mówią o wyższej wytrzymałości przy zastosowaniu warstw o standardowej grubości, przy której powstawanie lokalnych defektów wokół otworu zmniejsza koncentrację naprężeń, prowadząc do zwiększenia całkowitej wytrzymałości. Uzyskanie jednoznacznej odpowiedzi jak kształtuje się wytrzymałość elementów z karbem wytworzonych na bazie prepregów cienkościennych wymaga dalszych prac badawczych [71,75,84,100,109-111].

Dla kompozytów wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze zaobserwowano również obniżenie odporności na pękanie międzywarstwowe (ang. ILFT – Interlaminar Fracture Toughness). W przeprowadzonych badaniach stwierdzono obniżenie ILFT typu jednokierunkowych laminatów cienkowarstwowych. I dla W przypadku jednokierunkowych kompozytów, wraz z rozprzestrzenianiem się pęknięcia dochodzi do rozszczepiania wiązek włókien i mostkowania, które zwiększa energię potrzebną do rozwoju pęknięcia i podnosi ILFT. Chociaż grubość warstwy nie ma wpływu na początkową energię, potrzebną do zainicjowania pęknięcia, to energia potrzebna do jego rozwoju jest zdecydowanie niższa w przypadku kompozytów wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze. Wynika to z jednorodnej struktury i płaskiego postępowania pęknięcia, bez naruszania i mostkowania włókien. Całkowita ILFT typu I jest więc niższa w przypadku kompozytów złożonych z cienkich warstw niż dla standardowej grubości warstwy [59,75,112,113].

Dla laminatów wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze zaobserwowano również defekty i odkształcenia geometrii po procesie utwardzania. Do najpoważniejszych, mogących mieć istotny wpływ na zachowanie kompozytów, należą poprzeczne zaburzenia kształtu. Są one wynikiem różnic grubości warstwy, istotnych w odniesieniu do bardzo małej grubości pojedynczej warstwy. Dla elementów zakrzywionych, wykonanych z prepregów o niskiej gramaturze zaobserwowano również odkształcenia geometrii będące wynikiem naprężeń resztkowych po procesie utwardzania. Zaobserwowanych zaburzeń nie odniesiono jednak do tych, występujących w przypadku standardowej grubości warstwy [115,116].

Prepregi o niskiej gramaturze zawierają też więcej defektów wewnętrznych, niż standardowe prepregi. Im niższa gramatura, tym bardziej trzeba rozszerzyć wiązkę włókien, co może skutkować niedoskonałościami takimi jak nieliniowo ułożone lub poprzerywane włókna czy drobne szczeliny. Prepregi o różnej gramaturze, z widoczną zmianą jakości taśmy, przedstawiono na Rys. 15 [60].



**Rys. 15.** Niedoskonałości prepregów, zależne od gramatury: od lewej kolejno prepregi o gramaturach  $30 \text{ g/m}^2$ , 75 g/m² i 150 g/m²

Prepregi o niskiej gramaturze mają bardzo dużo zalet, mogą w istotny sposób przyczynić się do poprawy wytrzymałości elementów lub obniżenia masy i otwierają zupełnie nowe, rewolucyjne obszary zastosowań dla CFRP. Mają też jednak ograniczenia, które sprawiają że potrzebna jest dokładna analiza, kiedy ich zastosowanie pozwoli zoptymalizować właściwości mechaniczne. Jedną z propozycji, która ma na celu zniwelować problemy wynikające z obniżonej grubości warstwy są laminaty hybrydowe, złożone z warstw prepregów o niskiej oraz o standardowej gramaturze. Nadal jednak wiele aspektów zastosowania i mechanizmów obciążania wymaga sprawdzenia wpływu grubości warstwy. Niewystarczające są między innymi dane dotyczące obciążeń oddziałujących poza płaszczyzna. Nie znaleziono również danych dotyczących wpływu gramatury i grubości warstwy na przebieg procesu technologicznego oraz ewentualnych defektów i zaburzeń powstałych w trakcie utwardzania. Jednym z nieprzebadanych obszarów dotyczących laminatów niskogramaturowych, zawierającym się w dość powszechnej problematyce dotyczącej laminatów w ogóle, jest określenie struktury i właściwości takich laminatów w zakrzywionych obszarach wyrobów. Tematyka ta jest przedmiotem dalszej części pracy.

## 4. Wyroby kompozytowe zawierające krzywizny

#### 4.1. Wytrzymałość kompozytów zawierających krzywizny

Kompozyty polimerowe do zastosowań konstrukcyjnych mogą być wytwarzane jako płaskie płyty o strukturze monolitycznej lub przekładkowej. W takiej formie znajdują zastosowanie między innymi jako panele strukturalne do budowy satelitów lub zbiorników, albo jako elementy usztywniające, np. jako żebra w budowie skrzydeł lub grodzie w budowie jachtów i łodzi. Większe zastosowanie praktyczne mają jednak kompozyty posiadające różnego rodzaju krzywizny, wynikające z kształtu elementów, które tworzą. Przykłady takich struktur to między innymi kadłuby samolotów i łodzi, powłoki skrzydeł samolotów i szybowców, łopaty turbin wiatrowych, zbiorniki ciśnieniowe, rury, obudowy, kątowniki, ceowniki i wiele innych [117,118].

Obszary zakrzywione w kompozytach stanowią znaczący problem, począwszy od procesów projektowania i analizy, poprzez technologię wytwarzania, aż po badania właściwości materiału w obszarze krzywizny. Analizy numeryczne kompozytowych struktur zakrzywionych są trudne, ponieważ w obszarach krzywizn pod wpływem obciążeń występuje złożony stan naprężeń, w tym naprężenia poza płaszczyzną, oddziałujące w najsłabszych kierunkach laminatów. Należy do nich przede wszystkim ścinanie i rozciąganie pomiędzy warstwami. Co więcej, w wyrobach o złożonych kształtach naprężenia te nie są jednorodne, a wartości krytyczne osiągane są zwykle w bardzo małym obszarze. Ponadto, w strukturach kompozytowych pod wpływem złożonego stanu napreżeń mogą wystąpić różne modele zniszczenia. Każdy materiał kompozytowy ma także indywidualne właściwości, w zależności od rodzaju osnowy i włókien. Dokładna analiza wymaga więc często przeprowadzenia serii testów dla zbadania danego materiału w izolowanym stanie naprężenia, dlatego też analizy i projektowanie kompozytowych struktur zawierających krzywizny stanowią długi i złożony proces [23,119,120].

Ze względu na naprężenia występujące w kierunku poprzecznym do płaszczyzny, będącym najsłabszym kierunkiem kompozytu, do zniszczenia wyrobów zawierających krzywizny może dojść przy obciążeniach nawet kilkunastokrotnie mniejszych, niż wynikałoby to z właściwości w płaszczyźnie ułożenia włókien. Obszary zakrzywione i narożniki często ulegają przedwczesnemu uszkodzeniu, a jednym z najczęstszych mechanizmów zniszczenia jest delaminacja, czyli utrata spójności pomiędzy warstwami laminatu. Rozwój delaminacji w obszarze krzywizny prowadzi do gwałtownego spadku nośności elementu. Wśród kompozytowych wyrobów zakrzywionych, narażonych na zniszczenie poprzez delaminację, wymienić można między innymi rury, zakrzywione belki, narożniki kątowników lub elementy posiadające kołnierz. Przykład zniszczenia kompozytowego kątownika w obszarze krzywizny przedstawiono na Rys. 16. Delaminacje w zakrzywionych laminatach mogą powstawać zarówno na skutek oddziaływania naprężeń, defektów materiałowych, jak i zaburzeń geometrii. Wśród

mechanizmów powstawania delaminacji na krzywiznach zaobserwowano między innymi naprężenia na swobodnych krawędziach powstałe pomiędzy warstwami o różnej orientacji, poprzeczne pękanie pomiędzy włóknami na skutek nieosiowych naprężeń rozciągających, pęknięcia osnowy pomiędzy warstwami, a także promieniowe naprężenia rozciągające pomiędzy warstwami. Dodatkowo, narastające naprężenia międzywarstwowe w obszarze krzywizny przyspieszają także rozwój zniszczenia w płaszczyźnie na przylegających powierzchniach [120,121-123].



Rys. 16. Przykład zniszczenia kompozytowego kątownika w obszarze krzywizny [120]

Naprężenia pomiędzy warstwami, które prowadzą do powstawania i rozwoju delaminacji, zależą od stanu obciążenia krzywizny. W przypadku obciążenia czystym momentem gnącym, pomiędzy warstwami powstają tylko poprzecze naprężenia rozciągające. Kiedy obciążenie nie jest czystym zginaniem lub zwiększa się promień krzywizny, pomiędzy warstwami powstają również naprężenia ścinające, a typ powstałej delaminacji zależy od tego, czy najpierw przekroczona zostanie wytrzymałość na rozciąganie, czy na ścinanie międzywarstwowe. Powstawanie i rozwój delaminacji zależy więc przede wszystkim od wytrzymałości na rozciąganie międzywarstwowe kompozytu (ang. ILTS - Interlaminar Tensile Strength), wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe (ang. ILSS – Interlaminar Shear Strength) oraz odporności na pękanie międzywarstwowe ILFT. Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe elementów zawierających krzywizny jest największym naprężeniem normalnym do krzywizny (promieniowym - działającym w kierunku promienia krzywizny), które może przenieść materiał, zanim zostanie zerwana jego spójność i powstanie delaminacja. Analogicznie, wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe jest największym naprężeniem pomiędzy warstwami kompozytu, równoległym do tych warstw, zanim w materiale powstanie delaminacja [120,121,124,125].

Wiele czynników warunkuje wytrzymałość międzywarstwową kompozytów, wpływając także na zachowanie struktur zakrzywionych w warunkach obciążenia. Wytrzymałość zależy między innymi od geometrii krzywizny. Z przeprowadzonych do tej pory badań wynika, że zmiana promienia krzywizny ma wpływ na wytrzymałość przy zginaniu zakrzywionych belek (*ang. CBS – Curved Beam Strength -* moment powodujący zniszczenie, przypadający na jednostkę szerokości zakrzywionej belki), obciążonych

momentem gnącym, jak i na wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe. Przy identycznej grubości próbki, wraz ze zwiększeniem promienia zaobserwowano wzrost wytrzymałości zakrzywionej belki, obciążonej momentem gnącym, a jednocześnie zmniejszenie maksymalnych naprężeń promieniowych, odpowiadających wytrzymałości na rozciąganie międzywarstwowe. Przyczyną tego jest wydłużenie obszaru krzywizny oraz pojawianie się naprężeń ścinających wraz ze wzrostem promienia. Na wytrzymałość wyrobów zakrzywionych wpływa także grubość obszaru krzywizny – wraz ze wzrostem grubości rośnie CBS, ale maleje ILTS [123,126-128].

Aby zwiększyć wytrzymałość międzywarstwową i poprawić właściwości zakrzywionych kompozytów, próbowano na różne sposoby oddziaływać na połączenie pomiędzy warstwami. Jedną z testowanych metod poprawy właściwości międzywarstwowych było wykorzystanie nanorurek węglowych (*ang. CNTs – Carbon Nanotubes*). CNTs mają bardzo dobre właściwości mechaniczne, dlatego też są przedmiotem badań pod kątem poprawy właściwości CFRP poprzez wykorzystanie ich jako dodatek do osnowy. W przeprowadzonych badaniach, osiągnięto różne rezultaty, jednak w większości przypadków dodatek CNTs spowodował poprawę ILFT typu I i typu II, wpłynął jednak negatywnie na wytrzymałość zakrzywionych belek CBS. Zaobserwowano również pozytywny wpływ CNTs na ILSS. Różnice pomiędzy wynikami poszczególnych badań wskazują na zależność efektu umocnienia od rodzaju oraz orientacji użytych nanorurek [129-134].

Kolejną metodą, pozwalającą poprawić właściwości kompozytów w obszarach krzywizn, jest zszywanie. Zszywanie polega na połączeniu warstw laminatu przy pomocy cienkiej nici. Wprowadzone w ten sposób umocnienie w kierunku poprzecznym zwiększa odporność na powstawanie delaminacji, ale też negatywnie wpływa na właściwości kompozytu w płaszczyźnie. W większości przypadków, dla kompozytów zszywanych odnotowano istotne podwyższenie ILTS. W jednym z przeprowadzonych badań, osiągnięto niższą wytrzymałość laminatów zszywanych przy pierwszej delaminacji, ale za to większą wytrzymałość resztkową i zdolność do przenoszenia obciążeń po zainicjowaniu zniszczenia. Zwiększoną CBS oraz ILTS otrzymano również dla zakrzywionych laminatów, wykonanych z cienkowarstwowych NCFs, w których również występuje efekt zszywania. Ponadto, dla zszywanych laminatów, zawierających krzywizny, zaobserwowano znacznie mniejszą podatność do utraty wytrzymałości spowodowanej deformacjami powstałymi podczas wytwarzania [117,130,135-137].

W przypadku materiałów kompozytowych, problemem bardzo często pojawiającym się w obszarach krzywizn są deformacje zbrojenia oraz defekty o podłożu technologicznym. Defekty te mają bardzo duży wpływ na wytrzymałość w warunkach obciążenia poza płaszczyzną. W przeprowadzonych badaniach właściwości międzywarstwowych wykazano zależność ILTS, ILSS oraz ILFT od jakości próbek. Ponadto, obecność pustek i innych defektów w znaczący sposób wpływa na rozrzut uzyskiwanych wyników. Duży wpływ na obniżenie wytrzymałości obszaru krzywizny mają też zaburzenia ułożenia włókien. Wytrzymałość międzywarstwowa laminatów jest

też zależna od udziału objętościowego zbrojenia w badanej próbce oraz od jego ewentualnych lokalnych zaburzeń [117,120,123,127,138-142].

# 4.2. Defekty obszaru krzywizny, powstające podczas wytwarzania kompozytów w technologii autoklawowej

Wytwarzanie kompozytowych struktur wielowarstwowych o złożonym kształcie, zawierających krzywizny (czasami nazywane "strukturami 3D"), znacząco różni się od wytwarzania laminatów płaskich. Krzywizny i narożniki są uprzywilejowanym miejscem powstawania defektów o podłożu technologicznym. Jak wskazano w rozdziale 4.1., jakość obszaru krzywizny ma istotny wpływ na wytrzymałość struktury, dlatego też defekty o podłożu technologicznym są przedmiotem intensywnych badań oraz prób optymalizacji technologii wytwarzania. Do zaburzeń, jakie mogą wystąpić w krzywiznach, należą pustki, obszary bogate w żywicę, nieliniowe ułożenie włókien, zmarszczki, a także zaburzenia geometryczne, takie jak rozrzut grubości czy zmiana kąta pomiędzy płaszczyznami [143,144,145].

Defekty w obszarach krzywizn dotyczą wszystkich metod wytwarzania wyrobów kompozytowych. Niektóre zaburzenia, takie jak deformacje zbrojenia, są wspólne dla wszystkich technologii, inne wynikają z charakterystyki danego procesu. Technologia autoklawowa zmniejsza ryzyko wystąpienia defektów wynikających z konieczności przesycania zbrojenia osnową. Wykorzystanie prepregów zmniejsza też prawdopodobieństwo nieliniowości włókien, ze względu na kleistość ułatwiającą procesy kształtowania. Działanie ciśnienia minimalizuje ryzyko porowatości i pozawala na wytwarzanie wyrobów o dużej grubości. Istnieje jednak wiele czynników, sprzyjających powstawaniu wad podczas wytwarzania struktur 3D w technologii autoklawowej. Duża część tych czynników została dobrze scharakteryzowana, jako że metoda ta jest powszechnie wykorzystywana do wytwarzania różnego rodzaju kształtowników i katowników, wykorzystywanych w lotnictwie, gdzie jakość wyrobów jest bardzo ważna z punktu widzenia bezpieczeństwa. Powstawanie defektów jest jednak zjawiskiem złożonym, na które bardzo często składa się kilka różnych zależności [143,146,147].

Wady pochodzenia technologicznego w obszarze promienia mogą powstać na każdym z etapów wytwarzania, począwszy od przygotowania materiału typu prepreg, poprzez proces kształtowania, przygotowania pakietu podciśnieniowego i utwardzania. Powstawaniu nieprawidłowości sprzyjają także czynniki związane z projektowaniem wyrobu oraz procesu. Powstawanie wad jest zależne od struktury laminatu, jego grubości i orientacji włókien: najbardziej podatne na powstawanie zmarszczek oraz zaburzeń grubości w obszarze promienia są warstwy o orientacji 90°, ze względu na niską sztywność i podatność do odkształcania pod wpływem lokalnych zmian ciśnienia. Najmniej zaburzeń tego typu zaobserwowano dla warstw o orientacji 0°. Powstawanie defektów zależy też od rodzaju materiału: inaczej w obszarach krzywizn zachowują się

prepregi jednokierunkowe, a inaczej tkaniny oraz NCF: większą zdolność do odwzorowywania skomplikowanych kształtów wykazuja tkaniny, niż taśmy jednokierunkowe. Skłonność do powstawanie defektów i łatwość formowania zależy także od indywidualnych właściwości danego prepregu w stanie nieutwardzonym. Kolejnym czynnikiem, który może przyczyniać się do powstawania defektów, jest materiał i geometria formy. Zaburzenia zależa nie tylko od geometrii krzywizny, ale też od układu formy: inne defekty powstają na formach wklęsłych, a inne na formach wypukłych. Dla form wypukłych obserwuje się zwykle zmniejszenie grubości w obszarze promienia, zaś dla form wklęsłych, zwiększenie grubości w obszarze promienia (Rys. 17). Zmianom tym towarzyszą najczęściej także inne zjawiska, takie jak lokalne odchylenia udziału włókien oraz żywicy, obszary bogate w żywicę, czy porowatość (Rys. 18). W przeprowadzonych badaniach wyższą jakość wyrobów uzyskano jednak przy wykorzystaniu form wypukłych niż wklęsłych. Ponadto, odpowiednia geometria formy powinna zapewnić równomierne warunki nagrzewania wyrobu. Istotny jest także dobór odpowiedniego materiału formy: duża różnica współczynnika rozszerzalności cieplnej (ang. CTE - Coefficient of Thermal Expansion) pomiędzy materiałem formy a kompozytem sprzyja powstawaniu zaburzeń geometrycznych, zwłaszcza w przypadku dużych elementów i struktur o złożonych kształtach [143,144,148-152].



**Rys. 17**. Zmiana grubości w obszarze promienia w zależności od geometrii formy: a) pocienienie narożnika na formie wypukłej, b) pogrubienie narożnika na formie wklęsłej



**Rys. 18**. Defekty związane ze zmianą grubości w obszarze narożnika: a) forma wypukła - pocienienie i delaminacje, b) forma wklęsła - pogrubienie i porowatość, c) forma wklęsła - pogrubienie i akumulacja żywicy, d) forma wypukła – pocienienie [150]
Defekty w obszarach krzywizn mogą też powstać w trakcie procesu laminowania. Na dzień dzisiejszy, wyroby o skomplikowanych kształtach wciąż wytwarzane są głównie w procesach laminowania ręcznego, ze względu na ograniczenia przytoczone w rozdziale 2.1. Precyzyjne odwzorowanie krzywizny jest zależne od zdolności manualnych i doświadczenia operatora. Na dokładność procesu kształtowania wpływa też podatność materiału na formowanie. Spośród zaburzeń w ułożeniu zbrojenia wymienić można między innymi wyboczenie, poślizg i rozciągniecie włókien (Rys. 19), a także zmarszczki (Rys. 20), które powstają, kiedy naprężenia towarzyszące formowaniu przekroczą zdolność materiału do odwzorowania danej krzywizny. Podczas kształtowania narożników na formach wklesłych, istnieje także duże ryzyko mostkowania materiału, kiedy kolejne warstwy nie przylegają dokładnie do formy lub poprzedzających warstw, prowadząc do powstania pustek lub obszarów bogatych w żywicę (Rys. 21). Dla prawidłowego przebiegu procesu formowania, istotny jest także proces konsolidacji w worku próżniowym. Należy uwzględnić odpowiednią częstotliwość oraz czas konsolidacji, wielkość wygenerowanego podciśnienia oraz prawidłowe przygotowanie pakietu. Odpowiednio przeprowadzony proces konsolidacji pozwala osiągnąć dobre przyleganie oraz usunąć powietrze spomiędzy warstw, a także wstępnie zmniejszyć grubość stosu prepregu [143,144,145,146,153,154].



*Rys.* 19. Zaburzenia ułożenia włókien podczas formowania: a) poślizg i rozciągnięcie włókien, b) wyboczenie włókien [146]



Rys. 20. Zmarszczki powstałe w trakcie formowania krzywizny [155]



Rys. 21. Mostkowanie materiału podczas odwzorowywania krzywizny na formie wklęsłej [145]

Jednym z bardzo ważnych aspektów technologii autoklawowej jest prawidłowe przygotowanie pakietu podciśnieniowego do procesu utwardzania. Właściwe przygotowanie worka próżniowego obejmuje zarówno użycie odpowiednich materiałów pomocniczych, gwarantujących wymagane warunki odprowadzania powietrza i przepływu żywicy, jak i ich ułożenie na powierzchni wyrobu. Niewłaściwie dobrane warunki przepływu żywicy mogą przyczynić się do zbyt dużego udziału żywicy, zwiększonej porowatość i występowania naprężeń resztkowych. Niedokładne ułożenie pakietu na wklęsłych powierzchniach może prowadzić do mostkowania i lokalnego zmniejszenia ciśnienia w narożnikach. Zmarszczki występujące w materiałach tworzących pakiet podciśnieniowy mogą z łatwością zostać przeniesione także na powierzchnię laminatu ze względu na niską lepkość żywicy i lokalne zmiany ciśnienia. Nierównomierny rozkład worka próżniowego może też spowodować wystąpienie obszarów o większym udziale żywicy [143,144,148,156-158].

Defekty w obszarach krzywizny mogą też powstawać podczas procesu utwardzania w autoklawie. Dobór temperatury procesu oraz prędkości nagrzewania ma wpływ na prawidłowe zwilżanie włókien oraz równomierne rozprowadzenie żywicy w całej objętości kompozytu. Zaburzenie przepływu żywicy, spowodowane temperaturą, prowadzi do niejednorodnego udziału komponentów oraz rozkładu grubości w obszarze krzywizny, a także sprzyja powstawaniu pustek. Ważny jest także rozkład temperatury w objętości wyrobu: gradient temperatury prowadzi do nierównomiernego utwardzenia, co skutkuje powstawaniem naprężeń resztkowych i wybaczaniem wyrobów. Na jakość wyrobów wytwarzanych w autoklawie wpływa również ciśnienie. Wysokie ciśnienie powoduje zagęszczenie warstw oraz zmianę grubości wyrobu. Wraz ze zmniejszeniem przekroju, następuje zmiana promieni krzywizn, co może prowadzić do mostkowania warstw na krzywiznach wklęsłych (Rys. 22). W przypadku promieni wypukłych, zmiana promienia prowadzi do powstania nadmiarowej długości zewnętrznych warstw, które w warunkach ograniczonego poślizgu pomiędzy warstwami oraz oddziaływania ciśnienia, powodującego ściskanie w obszarze narożnika, prowadzi do powstania zmarszczek (Rys. 23). Powstawaniu defektów sprzyja także utrata podciśnienia wewnątrz pakietu próżniowego: niewielkie rozszczelnienie pakietu może prowadzić do występowania pustek w obszarach krzywizn, wrażliwych na wszelkie zmiany ciśnienia [143,153,159-163].



**Rys. 22**. Mostkowanie warstw we wklęsłym narożniku, spowodowane zagęszczeniem materiału i zmianą promienia krzywizny pod działaniem ciśnienia [153]



**Rys. 23**. Powstawanie zmarszczek na wypukłych krzywiznach podczas utwardzania w autoklawie: linia przerywana – początkowa grubość wyrobu, linia ciągła – grubość wyrobu po zagęszczeniu, kolor zielony – kompensacja nadmiarowej długości na krawędziach w warunkach poślizgu pomiędzy warstwami, kolor czerwony – potencjalne strefy powstawania zmarszczek [161]

Dla kompozytowych struktur zakrzywionych, wytwarzanych w autoklawie, zaobserwowano także odchylenia od założonej geometrii, polegające na zmianie kąta pomiędzy płaszczyznami tworzącymi krzywiznę, co pokazano na Rys. 24 (*ang. Spring-in*). W literaturze zbadano wpływ wielu różnych czynników na zmianę kąta krzywizny. Jest to zjawisko złożone, powstające na skutek naprężeń resztkowych w laminacie po procesie utwardzania. Naprężenia resztkowe są wynikiem skurczu żywicy, różnicy CTE pomiędzy żywicą a włóknami zbrojącymi, a także pomiędzy kompozytem a formą. Na całość odkształcenia wpływa również rodzaj użytego prepregu, grubość, struktura i orientacja wyrobu, jego kształt, materiał i geometria formy, a także parametry procesu utwardzania [164-167].



*Rys.* 24. Zmiana kąta pomiędzy ramionami tworzącymi krzywiznę (spring-in) [164]

## 4.3. Właściwości prepregów wpływające na procesy formowania krzywizny

Zdolność do odwzorowania danej krzywizny, a także skłonność do powstawania defektów, zależą od indywidualnych właściwości danego prepregu w stanie nieutwardzonym. Do tej pory opracowano kilka teorii i modeli służących do oceny formowalności materiału oraz mechanizmów powstawania defektów. Modele te uwzględniają zależności geometryczne, warunki procesu i zwilżania włókien, a także właściwości nieutwardzonych prepregów. Do właściwości materiałów, wpływających na kształtowanie należą: zachowanie przy ścinaniu w płaszczyźnie, przy rozciąganiu w płaszczyźnie, przy ścinaniu pomiędzy warstwami oraz przy zginaniu, a także podatność do zagęszczenia pod wpływem ciśnienia. Naprężenia powstające w każdym z tych stanów przedstawiono na Rys. 25. Podczas formowania wyrobów o skomplikowanej geometrii, za zdolność materiału do odwzorowania danej powierzchni i skłonność do powstawania defektów odpowiada najczęściej złożony stan naprężeń, obejmujący wszystkie wymienione powyżej mechanizmy [146,161,168,169,170].



**Rys. 25**. Mechanizmy wpływające na kształtowanie prepregu w procesie przetwórczym - od lewej kolejno ścinanie w płaszczyźnie, rozciąganie w płaszczyźnie, zginanie, ścinanie pomiędzy warstwami, zagęszczanie [161]

#### 4.3.1. Ścinanie w płaszczyźnie

Bardzo ważnym mechanizmem podczas formowania wyrobów zakrzywionych, mającym duży wpływ na jakość otrzymywanych wyrobów, jest ścinanie w płaszczyźnie, występujące w pojedynczej warstwie materiału. W przypadku skomplikowanych geometrii i dużych kątów gięcia, duże naprężenia ścinające w płaszczyźnie są niezbędne do uformowania wymaganego kształtu, zwłaszcza dla wyrobów podwójnie zakrzywionych. Jeżeli ścinanie potrzebne do odwzorowania kształtu jest zbyt duże, prowadzi do powstawania defektów, w tym zmarszczek. Materiał o większej zdolności do odkształcenia przez ścinanie jest bardziej podatny na kształtowanie. Włókna stosowane jako zbrojenie kompozytów polimerowych są praktycznie nierozciągalne. W przypadku tkanin, w których występują włókna splecione ze sobą w dwóch kierunkach, za ich zdolność do formowania na wyrobach zakrzywionych odpowiada tzw. locking angle, charakterystyczny dla danego zbrojenia. W warunkach ścinania w tkaninie dochodzi do zmiany kąta pomiędzy włókami wątku i osnowy. Najmniejszy kąt, jaki może wystąpić pomiędzy włóknami wątku i osnowy to właśnie locking angle, przy którym włókna wątku i osnowy blokują się wzajemnie. Po jego przekroczeniu, podczas formowania zaczynają tworzyć się zmarszczki, chociaż ich powstawanie jest procesem złożonym i zależy od ogólnego stanu naprężenia w materiale [168,169,172,173].

Zachowanie nieutwardzonych tkanin przy ścinaniu może być badane przy pomocy dwóch testów: Picture Frame i Bias Extension. Test Picture Frame polega na badaniu materiału umocowanego wewnatrz ramy o czterech równych bokach, połączonych ze sobą na zawiasach. Siła rozciągająca przykładana jest do przeciwległych narożników, tak że działa wzdłuż przekątnej próbki, sprawiając, że ramka odkształca się poprzez wydłużenie jednej przekątnej i skrócenie drugiej. Próbka wewnątrz ramki poddawana jest stałemu i ciągłemu naprężeniu ścinającemu w płaszczyźnie. Test Bias Extension polega na statycznym rozciąganiu prostokątnej próbki materiału o orientacji +/- 45° w stosunku do działającej siły. W środkowej strefie próbki, oznaczonej na Rys. 26 literą C, występują tylko włókna swobodne na obu końcach. Podczas rozciągania w tej strefie występują wyłącznie naprężenia ścinające w płaszczyźnie. Strefy oznaczone literą B stanowią strefy częściowej deformacji, nazywane także strefami mieszanymi, natomiast w strefie oznaczonej literą A próbka powinna pozostać nieodkształcona. Główną zaletą tego testu jest występowanie swobodnych włókien, na które nie oddziałują żadne siły rozciągające, przez co mogą być poddawane czystemu ścinaniu. Test opiera się na założeniu, że narożniki stanowią utwierdzone punkty, wokół których następuje odkształcenie [173,188].



Rys. 26. Odkształcenie próbki podczas testu Bias extension [173]

W przypadku formowania nierozciągalnych, jednokierunkowych włókien w celu odwzorowania zakrzywionych powierzchni, jedynym pożądanym mechanizmem odkształcenia w płaszczyźnie jest ścinanie względem równoległych, sąsiadujących ze sobą włókien. Niewiele jest jednak danych dostępnych na temat zachowania prepregów jednokierunkowych w warunkach ścinania. Do tej pory przeprowadzono zaledwie kilka prób ścinania materiałów jednokierunkowych. W przypadku tkanin, odkształcenie w warunkach ścinania następuje zgodnie z modelem Pin Jointed Net (PJN), według którego włókna są połączone w krzyżujących się punktach w taki sposób, że mogą obracać się wokół tych punktów. Tworzą w ten sposób siatkę, w której długość ramion pozostaje stała, ale może zmieniać się kąt pomiędzy ramionami, aż do osiągnięcia locking angle. W przypadku krzyżujących się włókien jednokierunkowych, locking angle nie występuje, jednakże przeprowadzone do tej pory badania pokazują, że odkształcenie krzyżujących się ze sobą warstw prepregu w warunkach ścinania w pewnym stopniu spełnia założenia PJN i pozwala osiągnąć prawidłowy mechanizm odkształcenia [175,176]. W jednym z tych badań wykonano test Bias Extension próbek o różnej geometrii składających się z czterech warstw o orientacji +/- 45° (po dwie warstwy dla każdej orientacji) hybrydowego, jednokierunkowego prepregu szklano-węglowego. Badania wykonano dla rożnych prędkości przemieszczenia głowicy. W badaniach prowadzonych przez inny zespół wykonano testy Bias Extension próbek wykonanych z prepregów na bazie włókna węglowego. Wszystkie próbki składały się 4 warstw, większość o orientacji +/- 45°, ale wykonano także próby dla innych kątów. Część prób została przeprowadzona w temperaturze pokojowej, a część materiałów zbadano także w temperaturach podwyższonych. Wykorzystano różne prędkości przemieszczenia głowicy. Wszystkie przeprowadzone badania wykazały odkształcenia w pewnym stopniu spełniające założenia modelu PJN, chociaż sam mechanizm odkształcenia jest złożony, ponieważ pojawiają się dodatkowe zjawiska, takie jak tarcie pomiędzy warstwami, a także poślizg pomiędzy włóknami i warstwami czy rotacja włókien, które ułatwia obecność żywicy, działającej jak lubrykant. W niektórych przypadkach pojawiła się także utrata konsolidacji i boczne marszczenie włókien w płaszczyźnie. W przeprowadzonych badaniach wykazano zależność od temperatury (im większa temperatura, tym mniejsze siły potrzebne do uzyskania odkształcenia) i prędkości odkształcenia (im większe prędkości odkształcenia, tym większe siły potrzebne do jego uzyskania), co jest wynikiem lepkospreżystych właściwości prepregów. Lepkospreżyste zachowanie potwierdza także relaksacja, którą zaobserwowano po zdjęciu obciążenia. Generalnie jednak przeprowadzone testy Bias Extension dla skrzyżowanych warstw prepregu o orientacji +/- 45° pozwoliły uzyskać powtarzalne rezultaty, a co za tym idzie wykorzystywać ten test do badania zachowania jednokierunkowych prepregów w warunkach ścinania, chociaż poza ścinaniem w trakcie testu pojawiają się także inne mechanizmy odkształcenia, co należy do wad proponowanej metody. Wyniki testu moga jednak służyć jako pomoc do modelowania procesów formowania lub do porównywania materiałów między soba. Metodę Bias Extension zastosowano również do badania właściwości przy ścinaniu jednokierunkowych prepregów termoplastycznych

w podwyższonych temperaturach, w warunkach formowania. Otrzymany model odkształcenia i wnioski płynące z przeprowadzonych badań były zbliżone do tych uzyskanych dla prepregów duroplastycznych [176-179]. Przeprowadzono także próby badania zachowania prepregów jednokierunkowych w warunkach ścinania poprzez rozciąganie nieosiowych pasów prepregu. Chociaż metoda ta pozwala osiągnąć ścinanie wewnątrz materiału, to wynik testu jest składową ścinania i rozciągania poprzecznego, a sama metoda jest narażona na większy rozrzut wyników i mniejszą powtarzalność ze względu na małe siły potrzebne do rozciągnięcia próbek w których wszystkie warstwy są ułożone w tym samym kierunku, a także niejednorodne odkształcenia, często zdominowane przez lokalne deformacje. Próbowano także zaadaptować kilka innych metod do badania właściwości jednokierunkowych prepregów termoplastycznych przy ścinaniu, jednak żadna z nich nie dała na tyle satysfakcjonujących rezultatów, aby uznać ją za powtarzalną i miarodajną. Póki co, zagadnienie zachowania prepregów jednokierunkowych w warunkach ścinania pozostaje nie do końca rozwiązane [180,181].

#### 4.3.2. Dwuosiowe rozciąganie w płaszczyźnie

Kolejną cechą, ważną z punktu widzenia formowania wyrobów zakrzywionych i powstawania defektów, jest zachowanie przy dwuosiowym rozciąganiu w płaszczyźnie warstwy. Mechanizm ten odnosi się do tkanin, w których poprzez splot występują zależności pomiędzy włóknami wątku i osnowy przy rozciąganiu. Taki stan naprężeń prowadzi do prostowania i spłaszczania wiązek oraz nieliniowego zachowania przy dwuosiowym rozciąganiu. Sztywność tkanin przy rozciąganiu zależy od rodzaju splotu i towarzyszącego mu pofalowania włókien. W przeprowadzonych badaniach wykazano, że sztywność tkanin przy rozciąganiu jest bardzo duża w odniesieniu do sztywności przy innych rodzajach obciążenia. Dlatego, sztywność przy rozciąganiu ma szczególny wpływ na pozostałe mechanizmy, występujące podczas kształtowania wyrobów zakrzywionych [169,170,182-184].

#### 4.3.3. Ścinanie międzywarstwowe

Na powstawanie defektów podczas utwardzania zakrzywionych kompozytów wpływa też ścinanie pomiędzy warstwami. Podczas zagęszczenia i zmiany grubości elementu w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury, w obszarze krzywizny powstaje nadmiarowa długość materiału, która w warunkach ograniczonego poślizgu pomiędzy warstwami tworzy defekty, takie jak zmarszczki lub pofalowanie włókien w płaszczyźnie. Przesuwanie się i poślizg warstw względem siebie jest możliwe w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia, kiedy żywica osiąga odpowiednio niską lepkość, ale przed rozpoczęciem procesu sieciowania. W warunkach ścinania, pomiędzy warstwami materiału, a także pomiędzy materiałem a formą pojawiają się siły tarcia, które zależą m.in. od ciśnienia procesu. Ciśnienie z jednej strony jest niezbędne do zagęszczenia warstw, a z drugiej ogranicza ruch pomiędzy nimi. Ponadto, poślizg

pomiędzy warstwami zależy od rodzaju materiału i chropowatości włókien, właściwości reologicznych żywicy, temperatury oraz pozostałych parametrów procesu [161,185-187].

### 4.3.4. Sztywność przy zginaniu

Z punktu widzenia kształtowania elementów zawierających krzywizny istotną rolę odgrywa też sztywność nieutwardzonego materiału przy zginaniu. Zmarszczki są jednym z najczęściej powstających defektów przy formowaniu wyrobów zawierających krzywizny ze względu na niską sztywność nieutwardzonego prepregu. Powstawanie zmarszczek jest zależne od całkowitego, złożonego stanu naprężeń materiału, a także warunków formowania wyrobu, jednakże sztywność przy zginaniu ma bardzo duży wpływ na kształt i rozmiar zmarszczek powstających w trakcie utwardzania. Mniejsza sztywność przy zginaniu może oznaczać większą podatność do tworzenia zmarszczek, ponieważ zmniejszająca się sztywność przy zginaniu obniża również odporność na ściskanie, które występuje w obszarach krzywizn w trakcie utwardzania [161,169,170,188].

Badanie sztywności przy zginaniu dla suchego zbrojenia jest dość powszechne i znormalizowane, jednakże zagadnienie zginania lepkich prepregów w dalszym ciągu nie jest do końca rozwiązane. Istnieje kilka metod wyznaczania sztywności materiałów przy zginaniu. Jedną z nich jest metoda KES-FB (Kawabata Evaluation System - Fabric Bending), która jednak wymaga zaawansowanej i drogiej aparatury, dlatego nie jest powszechnie stosowana. Najbardziej rozpowszechnioną i najprostszą metodą jest metoda Cantilever Test, zdefiniowana przez norme ASTM D1388: Standard Test Method For Stiffness of Fabric [190], wykorzystująca ugięcie materiału pod własnym ciężarem i bazująca na metodzie Cantilever Test zaproponowanej najpierw przez Peirce'a. W metodzie tej materiał jest wysuwany z określoną prędkością równolegle do swojego dłuższego wymiaru z poziomej platformy, do której jest przytwierdzony za pomocą docisku. Wysuwana część ugina się pod własnym ciężarem do momentu, w którym krawędź prowadząca dotknie platformy opuszczonej od poziomu o kat 41,5°. Następuje wtedy pomiar długości zwisu i na tej podstawie wyznaczana jest sztywność przy zginaniu. Istnieje także kilka innych metod, wykorzystujących ugięcie materiału pod własnym ciężarem, takich jak test składanej pętli, test wiszącej pętli czy test pętli w kształcie serca. Wszystkie te metody bazują jednak na liniowej teorii sprężystości, dlatego nie mogą być bezpośrednio stosowane do badania sztywności przy zginaniu preregów, które mają charakter lepkosprężysty [189,190]. W innej metodzie wykorzystano test wybaczania nieutwardzonej próbki pod wpływem osiowej siły ściskającej. Test ten wykazał zależność zachowania prepregów przy zginaniu od temperatury oraz prędkości odkształcenia, jest jednak niemożliwy do przeprowadzenia dla pojedynczej warstwy prepregu ze względu na bardzo małe, trudne to zarejestrowania siły potrzebne do uzyskania wyboczenia. W jednym z badań, do określenia zachowania prepregu przy zginaniu zastosowano metodę wykorzystującą unieruchomioną na jednym końcu próbkę prepregu, podobnie jak w badaniu Cantilever

Test, jednak w układzie pionowym. Ugięcie próbki było wywoływane siłownikiem, pozwalającym na użycie bardzo małej siły przy stosunkowo dużym przemieszczeniu, przyłożonej do swobodnie zwisającego końca próbki. Pomiaru siły potrzebnej do uzyskania określonego przemieszczenia dokonywano przy użyciu mikroczujnika siły. Przeprowadzony test pozwolił uzyskać dużą powtarzalność wyników i wykazać zależność sztywności przy zginaniu od temperatury i prędkości odkształcenia, wykazał też zgodność otrzymanych wyników z wykonanym dopasowaniem liniowym, nadal jedna wymaga rozwinięcia modelu opisującego rzeczywistą reakcję lepkosprężystą materiału. W innym badaniu, do opracowania współczynnika charakteryzującego zachowanie prepregu przy zginaniu, wykorzystano sztywność przy zginaniu wyznaczoną metodą Cantilever Test w oparciu o normę ASTM D1388. Aby uwzględnić lepkie właściwości osnowy, w trakcie badania wzięto pod uwagę zależność ugięcia od czasu. Zauważono, że ugięcie w pierwszej fazie szybko rośnie, a potem stabilizuje się do stałej wartości, którą przyjęto jako wartość efektywną ugięcia do wyznaczenia sztywności przy zginaniu. W innym opracowaniu do wyznaczenia charakterystyki prepregów przy zginaniu również wykorzystano badanie sztywności przy zginaniu w oparciu o metodę Cantilever Test na podstawie normy ASTM D1388. W tym wypadku, aby uwzględnić wpływ lepkich właściwości osnowy na zachowanie prepregu, odpowiednio wycięte pasmo materiału zostało przytwierdzone na jednym końcu, a 130 mm długości próbki podlegało ugięciu pod własnym ciężarem. Po upływie 30 sekund dokonywano pomiaru długości zwisu, która służyła do wyznaczenia pozornej sztywności przy zginaniu. Na podstawie normy ASTM D1388 przeprowadzono także inne badania zachowania przy zginaniu, wprowadzając różne modyfikacje metody Cantilever Test, uwzględniające brak liniowego odkształcenia sprężystego przy zginaniu. Badania te dotyczy jednak nieprzesyconego, sztywnego zbrojenia włóknistego lub oceny zachowania prepregów termoplastycznych w wysokich temperaturach [188-192].

#### 4.3.5. Współczynnik zagęszczenia

Kolejną z właściwości, mających duży wpływ na formowanie wyrobów zawierających krzywizny jest współczynnik zagęszczenia (*ang. bulk factor*), który charakteryzuje zmianę grubości prepregu w trakcie procesu utwardzania. Podczas utwardzania w autoklawie w warunkach wysokiego ciśnienia następuje ściśnięcie warstw, a co za tym idzie, zmiana grubości przekroju laminatu. Powietrze jest usuwane spomiędzy włókien, a wraz ze wzrostem temperatury i zmniejszeniem lepkości żywicy, następuje również zwilżanie włókien i zmniejszanie odległości pomiędzy nimi. W przypadku wyrobów zawierających krzywizny, na skutek tych procesów następuje zmiana promienia krzywizny, zwłaszcza na zewnętrznych warstwach, co może prowadzić do powstawania defektów, z których najczęstsze to zmarszczki w przypadku krzywizn wypukłych i mostkowanie w przypadku krzywizn wklęsłych. Współczynnik zagęszczenia wyraża się stosunkiem grubości początkowej stosu prepregu (przed utwardzeniem) do grubości końcowej laminatu (po utwardzeniu). Im większy współczynnik zagęszczenia,

tym większe ściśnięcie materiału w trakcie utwardzania. Do wytwarzania wyrobów zawierających krzywizny bardziej odpowiednie są prepregi charakteryzujące się mniejszym współczynnikiem zagęszczenia [161,193,194].

# 5. Motywacja do podjęcia badań

Wytwarzanie CFRP o zakrzywionej geometrii wymaga uwzględnienia wielu czynników i zależności, które nie występują w przypadku wyrobów płaskich. Duże ryzyko powstawania defektów, a także niska wytrzymałość w warunkach obciążenia poza płaszczyzna, często ograniczają ich zastosowanie. Wykorzystanie w tym celu prepregów o niskiej gramaturze wydaje się atrakcyjne nie tylko ze względu na potencjał obniżenia masy i zwiększenia możliwości konstrukcyjnych, ale przede wszystkim ze względu na ich zdolność do ograniczania rozwoju delaminacji i mikropęknięć. Wątpliwości budzi jednak nie do końca poznana charakterystyka laminatów cienkowarstwowych w warunkach obciążeń poza płaszczyzną, obniżona odporność na pękanie międzywarstwowe oraz brak informacji na temat wpływu grubości warstwy na ILTS. Nie znaleziono również informacji dotyczących wpływu gramatury na właściwości materiału w stanie nieutwardzonym, odpowiadające za procesy formowania oraz powstawania defektów. Niniejszy doktorat jest odpowiedzią na ww. luki w stanie wiedzy, które są poważnym problemem dla ŚCNTPL, w związku z rozwijaniem produkcji i wykorzystaniem prepregów o niskiej gramaturze do wytwarzania zaawansowanych struktur kompozytowych zawierających krzywizny.

# 6. Cele i zakres pracy

# 6.1. Teza i cele pracy

### Teza pracy:

Zastosowanie prepregu węglowo-epoksydowego o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> do wytwarzania struktur CFRP zawierających krzywizny, pozwoli na uzyskanie lepszej jakości i wytrzymałości wyrobu w stosunku do węglowo-epoksydowego prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.

### Cel naukowy pracy:

Celem naukowym pracy jest ocena właściwości mechanicznych belek kompozytowych zawierających krzywizny o różnej geometrii, wytworzonych metodą autoklawową na bazie prepregów o niskiej gramaturze. Ocena zostanie przeprowadzona w odniesieniu do ekwiwalentnych belek wytworzonych na bazie prepregów konwencjonalnych.

### Cel wdrożeniowy pracy:

Celem wdrożeniowym doktoratu jest ocena efektywności stosowania prepregów o niskiej gramaturze w autoklawowym procesie wytwarzania kompozytowych struktur zawierających krzywizny. Przeprowadzone badania dostarczą wartościowych wytycznych dotyczących możliwości zastosowania prepregów o niskiej gramaturze, jak i ich przetwarzania w procesie autoklawowym.

Zrealizowanie założonych celów pozwoli zweryfikować słuszność postawionej tezy.

## 6.2. Zakres pracy

Realizacja celów pracy polegała na analizie porównawczej wyników badań:

- jednokierunkowego prepregu węglowo-epoksydowego o niskiej gramaturze, wynoszącej 75 g/m<sup>2</sup>,
- jednokierunkowego prepregu węglowo-epoksydowego o standardowej gramaturze, wynoszącej 150 g/m<sup>2</sup>,

a także kompozytów wytworzonych w technologii autoklawowej na bazie wymienionych powyżej prepregów.

Badania prepregów oraz kompozytów zostały zaplanowane według następującego programu:

- 1. Badania właściwości prepregów o niskiej oraz standardowej gramaturze w stanie nieutwardzonym, w postaci taśm jednokierunkowych:
  - badanie współczynnika zagęszczenia (bulk factor),
  - badanie sztywności przy zginaniu,

- badanie zachowania przy ścinaniu w płaszczyźnie.
- 2. Podstawowe badania mechaniczne próbek płaskich, wytworzonych z badanych prepregów o niskiej oraz standardowej gramaturze:
  - badanie wytrzymałości na rozciąganie w kierunkach 0° i 90°,
  - badanie wytrzymałości na zginanie w kierunku 0°,
  - badanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe ILSS,
  - badanie właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie.
- 3. Ocena procesu wytwarzania wyrobów zawierających krzywizny o różnej geometrii w technologii autoklawowej z prepregów o niskiej oraz standardowej gramaturze, wykonywana podczas procesu wytwarzania zakrzywionych belek próbek do badań wytrzymałości.
- 4. Ocena jakości wytworzonych zakrzywionych belek próbek do badań wytrzymałości:
  - ocena wizualna,
  - pomiary geometryczne,
  - wyznaczenie gęstości próbek,
  - wyznaczenie udziałów objętościowych osnowy i zbrojenia,
  - badania strukturalne metodą aktywnej termografii w podczerwieni (badanie nieniszczące),
  - badania strukturalne metodą tomografii komputerowej (badanie obszarów reprezentatywnych).
- 5. Porównanie wytrzymałości zakrzywionych belek kompozytowych wytworzonych z prepregów o niskiej oraz standardowej gramaturze; w ramach statycznych prób wyznaczono wytrzymałość przy zginaniu zakrzywionej belki (CBS) oraz wytrzymałość laminatu na rozciąganie międzywarstwowe (ILTS).

Opisany powyżej program badań przedstawiono w formie schematu blokowego na Rys. 27.



Rys. 27. Program badań

# 7. Materiały do badań

Aby osiągnąć założony cel pracy i ocenić wpływ gramatury we wszystkich zaplanowanych badaniach, wybrano dwa prepregi tego samego typu, różniące się od siebie jedynie gramaturą:

- jednokierunkowy prepreg węglowo-epoksydowy o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>,
- jednokierunkowy prepreg węglowo-epoksydowy o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.

Komponenty tworzące wybrane prepregi to włókna węglowe o wysokiej wytrzymałości i standardowym module, produkowane z poliakrylonitrylu. Włóka te, ze względu na standardowy moduł, mają wystarczającą elastyczność, aby zapewnić swobodne kształtowanie w obszarach krzywizn. Osnowę w wybranym materiale stanowi system na bazie żywicy epoksydowej. Jest to uniwersalna osnowa o szerokiej gamie zastosowań i dobrych właściwościach mechanicznych. Utwardzanie prepregów na bazie wybranej osnowy jest możliwe w szerokim zakresie temperatur: od 80°C do 120°C. Prepregi zostały wytworzone przez jednego z partnerów przemysłowych i dostarczone w postaci jednokierunkowych taśm o szerokości 300 mm, z jednostronnym zabezpieczeniem w postaci papieru silikonowanego. Po odbiorze materiału okazało się, że poza gramaturą, prepregi różnią się także zawartością masową żywicy, która dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wynosiła średnio 37,5%, a dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> - 32,3%. Podstawowe parametry obu prepregów przedstawiono w Tabeli 1.

Gramatura	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>	
Postać prepregu	Taśma jednokierunkowa	Taśma jednokierunkowa	
Włókno węglowe	High strenght, standard modulus	High strenght, standard modulus	
Żywica	epoksydowa	epoksydowa	
Średnia zawartość żywicy	37,5%	32,3%	
Temperatura utwardzania	80 ÷ 120°C	80 ÷ 120°C	
Temperatura zeszklenia T <sub>g</sub>	135°C	135°C	
Szerokość rolki	300 mm	300 mm	
Zabezpieczenie	Papier silikonowany	Papier silikonowany	
Czas życia w temperaturze	60 dpi	60 dpi	
pokojowej	55 dili	00 dili	
Czas życia w -18°C	24 miesiące	24 miesiące	

Tabela 1. Charakterystyka prepregów użytych w badaniach

Aby zapewnić porównywalność wszystkich otrzymanych wyników, przed przystąpieniem do badań dokonano doboru parametrów procesu utwardzania w autoklawie, jednakowego dla wszystkich prowadzonych prób. Parametry dobrano w oparciu o zalecenia producenta oraz doświadczenie w pracy z podobnymi materiałami. Uwzględniono także kształt oraz geometrię docelowych wyrobów, tj. próbek do badań w postaci płaskich płyt oraz kątowników o grubości około 2 mm. Najważniejsze założenia procesu to powolne nagrzewanie, pozwalające na stopniowy i równomierny przyrost temperatury w całej objętości materiału oraz maksymalna próżnia, jaką pozwala wytworzyć układ podciśnieniowy autoklawu, dla uzyskania jak najlepszej jakości

wytwarzanych elementów. Zgodnie z kartą techniczną, utwardzanie prepregów na bazie wybranej osnowy może odbywać się już w temperaturze 80°C, czas wygrzewania wynosi wtedy 12 godzin, podniesienie temperatury utwardzania do 120°C pozwala skrócić ten czas do 45 minut.

Dla projektowanego procesu wybrano temperaturę utwardzania wynoszącą 120°C, aby przyspieszyć cały proces, wydłużono jednak czas wygrzewania aby zapewnić odpowiednią ilość czasu na osiągnięcie wymaganej temperatury przez wszystkie elementy układu. Zgodnie z zaleceniami producenta, podczas nagrzewania dodano także dodatkowe wytrzymanie w temperaturze 70°C, które pozwala na odprowadzenie powietrza i zmniejszenie porowatości wytwarzanych elementów w warunkach zmniejszonej lepkości żywicy, ale przed rozpoczęciem procesu utwardzania. Wybrane parametry zaprojektowanego procesu utwardzania EPOXY75/150 to:

- podciśnienie: -1 bar (według wskazania wakuometra autoklawu) / cały proces,
- ciśnienie: 4 bary / cały proces,
- nagrzewanie do temperatury 70°C z prędkością 1 °C/min,
- wygrzewanie w temperaturze 70°C przez 1 h,
- nagrzewanie do temperatury 120°C z prędkością 1 °C/min,
- wygrzewanie w temperaturze 120°C przez 3 h,
- chłodzenie do 40°C z prędkością 1,33°C/min,
- zwolnienie ciśnienia i podciśnienia.

Parametry zaprojektowanego procesu przedstawiono w formie graficznej na Rys. 28.



Rys. 28. Parametry procesu utwardzania w autoklawie

Podczas kontroli wizualnej obu materiałów stwierdzono, że prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> jest bardziej jednorodny od prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Prepreg o mniejszej gramaturze zawierał defekty w postaci bardzo drobnych szczelin, których nie zaobserwowano na prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Fragmenty obu materiałów

przedstawiono na Rys. 29. Wykonano także pomiary masy fragmentów obu prepregów, na podstawie których obliczono zawartość żywicy. Dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, całkowita masa wyniosła 121,24 g/m<sup>2</sup>, a dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> - 220,11 g/m<sup>2</sup>, co odpowiada udziałom masowym żywicy w prepregu deklarowanym przez producenta materiału, przedstawionymi w Tabeli 1.



*Rys.* 29. Fragmenty materiałów wybranych do badań - na prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> widoczne defekty w postaci drobnych szczelin

### 8. Metodyka badań i wyniki

W ramach niniejszego rozdziału przedstawiono metodologię przeprowadzonych badań oraz uzyskane daną metodą wyniki, wraz ze wstępnym omówieniem. Zbiorczą analizę wyników przedstawiona w rozdziale 9.

Dla wszystkich przeprowadzonych badań dokonano analizy statystycznej uzyskanych wyników. Aby porównywać ze sobą wyniki uzyskane dla różnych materiałów, dla wszystkich badanych właściwości wyznaczono wartość średnią  $\overline{x}$ , zgodnie ze wzorem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{n} x_i \right) \tag{1}$$

Dla oceny rozrzutu wyników uzyskanych dla poszczególnej próby, wyznaczono także odchylenie standardowe *S*, zgodnie ze wzorem:

$$S = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}))}{n - 1}}$$
(2)

Dla każdej próby wyznaczono także współczynnik zmienności CV, zgodnie ze wzorem:

$$CV = \frac{100 * S}{\bar{x}} \tag{3}$$

W ramach omawiania i prezentacji wyników, w tekście wielokrotnie pojawiają się liczby nie do końca zgodne z obowiązującymi wytycznymi metrologii – są przedstawiane z bardzo dużą dokładnością (np. 6 lub 7 cyfr znaczących). W przedmiotowych przypadkach, bardzo duża dokładność jest uzasadniona, ze względu na dużą subtelność porównywanych cech (np. masa potrzebna do wyznaczania udziału objętościowego dwóch prepregów, dla których teoretycznie powinna być ona identyczna).

#### 8.1. Badania właściwości prepregów nieutwardzonych

#### 8.1.1. Współczynnik zagęszczenia

Zgodnie z definicją przedstawioną w rozdziale 4.3.5, współczynnik zagęszczenia wyraża się wzorem:

$$B = \frac{t_i}{t_f} \tag{4}$$

gdzie:

B-współczynnik zagęszczenia,

ti – grubość początkowa stosu prepregu (po konsolidacji) [mm],

*t<sub>f</sub>* – grubość końcowa laminatu [mm].

Współczynnik zagęszczenia równy 1 oznacza brak zmiany grubości podczas utwardzania, jednak zdecydowana większość prepregów wykazuje współczynnik zagęszczenia > 1. Im większy współczynnik zagęszczenia, tym większe ściśnięcie materiału w trakcie utwardzania. Aby zmniejszyć współczynniki zagęszczenia, niezbędne jest przeprowadzenie procesu konsolidacji przed utwardzeniem [193,194].

Aby określić współczynnik zagęszczenia badanych materiałów, z obydwu prepregów wykonano próbki metodą laminowania ręcznego. Po wylaminowaniu wszystkich warstw zastosowano wydłużony proces konsolidacji, aby sprawdzić zmianę grubości wraz z upływem czasu konsolidacji. Ponownych pomiarów grubości dokonano po utwardzeniu próbek w autoklawie.

Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykonano z 26 warstw, natomiast próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wykonano z 13 warstw, aby otrzymać taką samą ilość włókien węglowych w każdej próbce. Dla każdego z materiałów wykonano jedną próbkę o orientacji [0°] oraz jedną próbkę o orientacji naprzemiennie [0°/90°]. Wszystkie próbki miały wymiary 140 x 140 mm. Szczegółową charakterystykę każdej z próbek podano w Tabeli 2.

Próbka		llość warstw	Orientacja	Wymiary [mm]
1	75 g/m <sup>2</sup> - 0°	26	[0°] <sub>x26</sub>	140 x 140
2	75 g/m <sup>2</sup> - 0°/90°	26	[0°/90°] <sub>x13</sub>	140 x 140
3	150 g/m <sup>2</sup> - 0°	13	[0°] <sub>x13</sub>	140 x 140
4	150 g/m <sup>2</sup> - 0°/90°	13	[(0°/90°) <sub>x6</sub> /0°]	140 x 140

Tabela 2. Próbki do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia prepregów

Wykroje dla każdej warstwy wycięto przy pomocy plotera tnącego i laminowano ręcznie, warstwa po warstwie. Proces konsolidacji prowadzono przez 24 godziny. Grubość próbek zmierzono bezpośrednio po laminowaniu, a następnie po 0,5 h, po 1,5 h, po 3 h, po 4,5 h, po 6 h oraz po 24 h konsolidacji. Grubość próbek po 24 h konsolidacji stanowiła jednocześnie wartość początkową  $t_i$  do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia. Pomiarów grubości dokonano przy pomocy mikrometru talerzykowego Mitutoyo Digimatic IP65, który umożliwił wykonanie pomiarów grubości nieutwardzonego prepregu, pozwalając uniknąć zaburzeń spowodowanych lokalnym naciskiem. Następnie próbki utwardzono w autoklawie w procesie EPOXY75/150, opisanym w rozdziale 7. Po utwardzeniu ponownie dokonano pomiarów grubości próbek. Za każdym razem wykonano 5 pomiarów wokół obwodu próbki i wyznaczono średnią wartość. Wszystkie pomiary wykonano w kontrolowanych warunkach środowiskowych, w pomieszczeniu czystym, przy temperaturze wynoszącej  $19^{\circ}C \pm 0.5^{\circ}C$  i wilgotności  $60\% \pm 5\%$ .

Największej ostrożności wymagały pomiary bezpośrednio po laminowaniu, ze względu na podatność nieutwardzonego materiału na odkształcenia spowodowane dużym naciskiem. Pomiary po konsolidacji były łatwiejsze ze względu na ściśnięcie materiału. Zdjęcia próbek po 24 h konsolidacji przedstawiono na Rys. 30. Próbki po utwardzeniu w autoklawie przedstawiono na Rys. 31.



**Rys. 30**. Próbki do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia po 24 godzinach konsolidacji, przed utwardzeniem



Rys. 31. Próbki do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia po utwardzeniu w autoklawie

Wyniki pomiarów grubości wraz z upływem czasu konsolidacji zestawiono w Tabeli 3. W Tabeli 4 zaobserwowaną zmianę grubości przedstawiono jako wartość procentową od grubości początkowej próbki. Zmianę grubości w funkcji upływu czasu konsolidacji w formie graficznej przedstawiono na Rys. 32. Dla każdej z badanych próbek średnia grubość malała wraz z upływem czasu konsolidacji, przy czym spadek ten był największy w ciągu pierwszych 30 minut. Zmiana grubości po 24 godzinach konsolidacji była nieznaczna w stosunku do grubości po 6 godzinach konsolidacji (za wyjątkiem próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i orientacji [0°/90°], dla której zmiana ta wyniosła 2% grubości początkowej).

Zarówno w przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, jak i 150 g/m<sup>2</sup>, większa zmiana grubości następowała w przypadku próbek o orientacji naprzemiennej  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ . Dla każdego z tych materiałów, początkowa grubość próbek o naprzemiennej orientacji była większa, niż w przypadku próbek jednokierunkowych o orientacji 0°, ale wraz z upływem czasu konsolidacji malała do wartości mniejszej niż grubość próbek jednokierunkowych. W przypadku próbek z materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> (zarówno o orientacji jednokierunkowej 0°, jak i naprzemiennej  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ ), zmiana grubości była widocznie większa, niż w przypadku próbek z materiału o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Różnica

pomiędzy materiałami dotyczy również czasu konsolidacji. W przypadku materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> mało znacząca zmiana grubości (o 1% lub mniej) jest osiągana dopiero po 3 godzinach konsolidacji, a w przypadku materiału o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> już po 0,5 godziny konsolidacji. Prawdopodobnie jest to wynikiem większej ilości warstw budujących stos w przypadku materiału o niskiej gramaturze, co przekłada się na większą ilość wolnych przestrzeni i powietrza pomiędzy warstwami po laminowaniu, usuwanego w trakcie konsolidacji. W każdym przypadku grubość próbek z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> była jednak mniejsza od próbek z prepregu 75 g/m<sup>2</sup> pomimo takiej samej ilości włókien węglowych przypadających na próbkę. Jednakże, ze względu na mniejszą zawartość żywicy w prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, nie sposób stwierdzić, czy jest to zależne od gramatury lub ilości warstw.

Czas konsolidacji	Grubość próbki [mm]					
[h]	75 g/m <sup>2</sup> [0°]	75 g/m <sup>2</sup> [0°/90°]	150 g/m <sup>2</sup> [0°]	150 g/m <sup>2</sup> [0°/90°]		
0	2,664	2,892	2,055	2,123		
0,5	2,338	2,45	1,958	1,942		
1,5	2,316	2,402	1,941	1,928		
3	2,291	2,345	1,932	1,915		
4,5	2,264	2,31	1,919	1,9		
6	2,253	2,271	1,912	1,894		
24	2,247	1,882				

Tabela 3. Wyniki pomiarów grubości nieutwardzonych próbek wraz z upływem czasu konsolidacji

**Tabela 4.** Zmiana grubości próbek wraz z upływem czasu konsolidacji wyrażona jako procent wartości poczatkowej

po ce quito in cj							
Czas konsolidacji	Procent grubości początkowej [%]						
[h]	75 g/m <sup>2</sup> 75 g/m <sup>2</sup> 10°]		150 g/m <sup>2</sup> [0°]	150 g/m <sup>2</sup> [0°/90°]			
0	100%	100%	100%	100%			
0,5	88%	85%	95%	91%			
1,5	87%	83%	94%	91%			
3	86%	81%	94%	90%			
4,5	85%	80%	93%	90%			
6	85%	79%	93%	89%			
24	84%	77%	93%	89%			



Rys. 32. Zmiana grubości nieutwardzonych próbek wraz z upływem czasu konsolidacji

W Tabeli 5 zestawiono grubość każdej z próbek po 24 godzinach konsolidacji i jednocześnie bezpośrednio przed utwardzeniem, a także po utwardzeniu. Zgodnie ze wzorem (4) wyznaczono także współczynnik zagęszczenia dla każdej próbki. Dla obydwu materiałów uzyskano małe współczynniki zagęszczenia, dlatego też oba materiały mogą być odpowiednie do wytwarzania wyrobów zawierających krzywizny. Współczynniki zagęszczenia dla próbek z materiału o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> są nieznacznie mniejsze niż dla materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, jednakże wszystkie wartości są do siebie na tyle zbliżone, że trudno je jednoznacznie różnicować.

	Grubość próbki [mm]				
	75 g/m <sup>2</sup> - 0°	75 g/m <sup>2</sup> - 0°/90°	150 g/m <sup>2</sup> - 0°	150 g/m <sup>2</sup> - 0°/90°	
Grubość początkowa t <sub>i</sub> [mm]	2,247	2,215	1,904	1,882	
Grubość końcowa t <sub>f</sub> [mm]	2,095	2,057	1,785	1,749	
Współczynnik zagęszczenia <i>B</i>	1,073	1,077	1,066	1,076	

Tabela 5. Grubość próbek przed i po utwardzeniu oraz współczynnik zagęszczenia

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że obydwa prepregi charakteryzują się porównywalnym współczynnikiem zagęszczenia. Różnią się natomiast istotnie zmianą grubości w trakcie procesu konsolidacji. Oznacza to, że pod kątem jakości otrzymywanych wyrobów niezwykle istotny jest proces właściwego przygotowania stosu prepregu do utwardzania, sam proces utwardzania ma już natomiast

w przypadku badanych prepregów mniejsze znaczenie. W przypadku prepregów o mniejszej gramaturze nie należy zmniejszać częstotliwości i czasu procesu konsolidacji. W przypadku wyrobów tej samej grubości zbudowanych z prepregów o mniejszej i o większej gramaturze, proces wytworzenia wyrobu z prepregu o mniejszej gramaturze jest bardziej wymagający i czasochłonny. Ze względu na większą ilość warstw, a co za tym idzie, większą ilość przestrzeni międzywarstwowych, w których znajduje się uwięzione powietrze, wymaga on większej ilości i dłuższych czasów procesów konsolidacji podczas laminowania.

#### 8.1.2. Sztywność przy zginaniu

Aby porównać ze sobą zachowanie wybranych prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup> przy zginaniu, ze względu na łatwość przeprowadzenia testu, postanowiono wykonać badanie sztywności przy zginaniu wykorzystując metodę Cantilever Test zgodnie z normą ASTM D1388: Standard Test Method For Stiffness of Fabric [190], jednak uwzględniając założenia wynikające z wpływu lepkich właściwości osnowy, przedstawione w opracowaniach [191,192] i omówione w rozdziale 4.3.4.

W pierwszej kolejności, na podstawie zmierzonej długości zwisu, wyznaczono długość ugięcia dla każdego materiału, którą dzięki zastosowaniu kąta 41,5° można wyznaczyć zgodnie ze wzorem podanym poniżej:

 $c = \frac{0}{2}$ 

gdzie:

c – długość ugięcia [mm], O – długość zwisu [mm].

Następnie wyznaczono sztywność przy zginaniu, w której uwzględniono całkowitą masę każdego materiału przypadającą na jednostkę powierzchni, włącznie z żywicą. Całkowite masy obu materiałów przypadające na jednostkę powierzchni podano w rozdziale 7. Sztywność materiału przy zginaniu obliczono według wzoru:

$$G = 1,421 * 10^{-5} * W * c^3 \tag{6}$$

(5)

gdzie:

G – sztywność materiału przy zginaniu [µNm], W – masa materiału na jednostkę powierzchni [g/m<sup>2</sup>], 1,421 \* 10<sup>-5</sup> – stała [m/s<sup>2</sup>].

Aby wyznaczyć sztywność przy zginaniu metodą Cantilever Test, w pierwszej kolejności zaprojektowano przyrząd do przeprowadzenia testu zgodnie z wymogami normy ASTM D1388. Geometrię przyrządu wraz z ruchomym klockiem dociskowym do przesuwania prepregu przedstawiono na Rys. 33. Przyrząd wykonano metodą obróbki skrawaniem z bloku poliuretanowego RAKU-TOOL WB-1404 o dużej gęstości i bardzo dobrej jakości obrabianej powierzchni. Aby dodatkowo zwiększyć łatwość poślizgu prepregu,

na poziomą platformę naniesiono wosk rozdzielający, zapewniający właściwości antyadhezyjne powierzchni. Na przedłużeniu poziomej platformy oraz poniżej powierzchni ukośnej, odchylonej od poziomu o kąt 41,5° przymocowano linijki służące do pomiaru długości zwisu.



*Rys. 33.* Przyrząd wraz z ruchomym klockiem dociskowym do przeprowadzenia badania sztywności przy zginaniu metodą Cantilever Test

Z obydwu badanych materiałów wycięto jednokierunkowe próbki o wymiarach 300 x 25 mm stanowiące pojedynczą warstwę prepregu w taki sposób, aby włókna przebiegały równolegle do dłuższego boku próbki, ponieważ w tym kierunku włókna wykazują największą sztywność. Ze względu na dużą sztywność prepregu w kierunku równoległym do włókien, zwiększono długość próbek w stosunku do 200 mm zalecanych przez normę ASTM, aby zapewnić dobry docisk próbek do poziomej platformy. Próbki wycięto przy pomocy plotera tnącego, aby uzyskać jak największą dokładność oraz uniknąć odchylenia od pożądanego kąta 0°. Ponadto, nieutrzymanie równoległości do kierunku 0° skutkowałoby przecięciem włókien na krawędziach próbki, które mogłoby prowadzić do jej skręcania. Papier zabezpieczający prepreg zdejmowano z próbek bezpośrednio przed testem, już po umieszczeniu próbki na poziomej platformie. Gotowy przyrząd wraz z próbką w pozycji wyjściowej przed testem przedstawiono na Rys. 34.



Rys. 34. Przyrząd do badania sztywności na zginanie wraz z próbką w pozycji wyjściowej przed testem

Przed rozpoczęciem testu przeprowadzono próby mające na celu opracowanie najbardziej optymalnej procedury. Po obserwacji charakteru ugiecia jednokierunkowego prepregu, który wykazuje dużą sztywność równolegle do kierunku ułożenia włókien, a także zależności ugięcia od czasu, za najefektywniejsze uznano połączenie procedur określonych przez normę ASTM D1388 oraz opisanych w opracowaniach [191,192]. Pasmo prepregu unieruchamiano na jednym końcu przy pomocy ruchomego klocka dociskowego, który służył jednocześnie do przesuwania prepregu. Następnie 170 mm wysuwano poza poziomą platformę i odczekiwano 30 sekund, aż nastąpi największe ugięcie, które po upływie wyznaczonego czasu zawsze osiągało stabilną wartość. Następnie z bardzo mała predkościa i z uwzglednieniem czasu potrzebnego na ustabilizowanie się ugięcia ze względu na lepkie właściwości osnowy, kontynuowano wysuwanie próbki, aż do osiągnięcia ustabilizowanej wartości ugięcia, przy którym prowadząca krawędź próbki dotykała powierzchni odchylonej od poziomu o kąt 41,5°. Po osiągnięciu ustabilizowanej wartości, dokonywano pomiaru długości zwisu, którą uznano za długość efektywną. Schemat prowadzenia testu i pomiaru długości zwisu przedstawiono na Rys. 35.



**Rys. 35.** Schemat pomiaru długości zwisu w metodzie Cantilever Test zgodnie z normą ASTM D1388 [190]

Dla każdego z materiałów przebadano w ten sposób 4 próbki, dla każdej z próbek wykonano 4 pomiary, z których wyciągnięto wartość średnią. Wszystkie próbki przebadano w jednakowych warunkach, w pomieszczeniu czystym klasy 10 000 (ISO 7) przy temperaturze  $19,3^{\circ}C \pm 0,1^{\circ}C$  i wilgotności  $61\% \pm 1\%$ . Przed przeprowadzeniem testu próbki przetrzymywano przez 24 godziny w tym samym pomieszczeniu w warunkach prowadzenia testu. Dla każdego z materiałów uzyskano powtarzalne rezultaty, wszystkie próbki wysuwały się płynnie, a uginająca się część nie ulegała skręceniu. Zdjęcia z pomiarów długości zwisu podczas prowadzonych testów dla każdego z materiałów przedstawiono na Rys. 36 i Rys. 37.



**Rys. 36**. Pomiar długości zwisu dla próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 37**. Pomiar długości zwisu próbki prepregu o gramaturze  $150 \text{ g/m}^2$ 

Wyniki pomiarów długości zwisu wykonane na prepregach o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup> metodą Cantilver Test przedstawiono w Tabeli 6.

150 g/m <sup>2</sup>				75 g/m <sup>2</sup>				
Próbka	Test	Długość zwisu O [mm]	Średnia długość zwisu O [mm]	Próbka	Test	Długość zwisu O [mm]	Średnia długość zwisu O [mm]	
	1	161			1	149		
D1/150	2	160	160.0	P1/75	2	147	147,1	
F1/150	3	160	100,0		3	147		
	4	159			4	145,5		
	1	162,5	161,0	D2/75	1	148	147,0	
D2/150	2	161			2	146		
FZ/150	3	160		101,0 P2/75	3	147		
	4	160,5			4	147		
	1	163	162,1 <b>P3/75</b>	162.1		1	147,5	
D2/150	2	163			162 1 <b>D2/7</b>	D2/75	2	144,5
P5/150	3	161		3	145	145,4		
	4	161,5			4	144,5		
P4/150	1	165,5	105.0	465.0		1	147	
	2	166,5				D4/75	2	146
	3	166	105,9	165,9 <b>P4/75</b>	3	146	146,0	
	4	165,5			4	145		

 Tabela 6. Uzyskane wyniki pomiarów długości zwisu w próbie Cantilever Test dla materiałów

 o gramaturze 75 g/m2 i 150 g/m2

Wyniki obliczeń sztywności przy zginaniu, wyznaczonej zgodnie ze wzorem (6), przedstawiono w Tabeli 7. Uśredniona sztywność dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wyniosła 675  $\mu$ Nm, a dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> 1670  $\mu$ Nm. Oznacza to, że o ile gramatura samych włókien węglowych w jednym prepregu jest dwukrotnie większa, tak zmiana sztywności przy zginaniu jest już 2,5 razy większa dla prepregu o większej gramaturze. Różnica sztywności przy zginaniu obydwu materiałów jest istotna z punktu widzenia formowania wyrobów zawierających krzywizny: prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, mający istotnie niższą sztywność przy zginaniu będzie się lepiej formował wokół zakrzywionych krawędzi, procesy laminowania będą zatem przebiegać łatwiej przy wykorzystaniu tego prepregu, co może mieć przełożenie na mniejszą ilość defektów powstających na etapie formowania na skutek niedokładności lub błędu ludzkiego. Jednocześnie też, ze względu na istotnie niższą sztywność przy zginaniu, prepreg ten będzie miał większą podatność do powstawania defektów, w tym zmarszczek, podczas utwardzania w warunkach ciśnienia wywołującego naprężenia ściskające w obszarach krzywizn.

Próbka	Średnia długość zwisu O [mm]	Dłuość ugięcia c [mm]	Stała [m/s <sup>2</sup> ]	Masa materialu na jednostkę powierzchni W [g/m <sup>2</sup> ]	Sztywność przy zginaniu G [µNm]	Średnia sztywność materiału przy zginaniu G [μNm]	Materiał
P1/150	160	80	0,00001421	220,11	1601,403	- 1670,86	150 g/m <sup>2</sup>
P2/150	161	80,5	0,00001421	220,11	1631,617		
P3/150	162,1	81,06	0,00001421	220,11	1666,06		
P4/150	165,9	82,94	0,00001421	220,11	1784,364		
P1/75	147,1	73,56	0,00001421	121,24	685,828		
P2/75	147	73,5	0,00001421	121,24	684,082	675 44	$\pi = \pi / m^2$
P3/75	145,4	72,69	0,00001421	121,24	661,645	0/5,44	75 g/m <sup>-</sup>
P4/75	146	73	0,00001421	121,24	670,216	]	

 Tabela 7. Sztywność prepregów o gramaturze 75 g/m² i 150 g/m² wyznaczona w oparciu o metodę

 Cantilever Test wg normy ASTM D1388

### 8.1.3. Ścinanie w płaszczyźnie

Ze względu na brak ustandaryzowanej metody pozwalającej na zbadanie właściwości jednokierunkowych prepregów przy ścinaniu, analizując wady i zalety opisanych w rozdziale 4.3.1. metod, w celu porównania zachowania materiałów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup> w warunkach ścinania przeprowadzono test Bias Extension. Test ten jest stosunkowo prosty do przeprowadzenia, dane uzyskiwane dla poszczególnych próbek powtarzalne, geometria próbek pozwala uniknąć silnego wpływu lokalnych deformacji na wyniki, a siły potrzebne do odkształcenia próbek na tyle duże, że możliwe było ich zarejestrowanie przy użyciu dostępnych maszyn wytrzymałościowych. Badanie przygotowano w oparciu o dostępne dane literaturowe [184-186].

Aby zbadać zachowanie obydwu badanych prepregów w warunkach ścinania w płaszczyźnie metodą Bias Extension, w pierwszej kolejności przygotowano próbki

do badań z obydwu porównywanych materiałów. Próbki z materiału 150 g/m<sup>2</sup> wykonano z 4 warstw o orientacji [ $(45^{\circ})_{x2}/(-45^{\circ})_{x2}$ ]. W przypadku materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, przygotowano dwa rodzaje próbek: wykonane z 4 warstw o orientacji  $[(45^{\circ})_{x2}/(-45^{\circ})_{x2}]$ oraz z 8 warstw o orientacji  $[(45^{\circ})_{x4}/(-45^{\circ})_{x4}]$ , ponieważ przed przystąpieniem do testu nie było jasne, jak różna grubość i gramatura przełożą się na analizę i porównywanie wyników. Przygotowano po 6 próbek z każdego rodzaju. Aby zapewnić jak najbardziej porównywalne warunki testów, oba materiały wyjęto w tym samym czasie z komory mroźnej, a wszystkie próbki poddano konsolidacji w tym samym pakiecie podciśnieniowym przy ciśnieniu -0,95 bar przez 1 godzinę. Wszystkie próbki miały wymiar 30 x 220 mm, przy czym 120 mm stanowiło długość testowana, a po 50 mm próbki z każdej strony było umieszczone w szczękach maszyny. Najważniejszym warunkiem, jaki muszą spełnić próbki do testu Bias Extension jest długość próbki co najmniej 2 razy większa niż jej szerokość, aby otrzymać strefę w której występuje pełne ścinanie. Długość przeznaczoną do uchwycenia przez maszynę dodatkowo oklejono taśmą, aby zapewnić lepsze trzymanie w szczękach. W przypadku badanych próbek, stosunek długości do szerokości wynosił 4. Po konsolidacji próbek do badań, na ich powierzchnię naniesiono białe linie, wyznaczające poszczególne strefy odkształcenia oraz ułatwiające ocenę odkształcenia. Przed przystąpieniem do testu zmierzono grubość każdej próbki przy użyciu mikrometru talerzykowego Mitutoyo Digimatic IP65. Przykład przygotowanej do testu i oznaczonej próbki przedstawiono na Rys. 38.



**Rys. 38**. Próbka Bias extension z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, przygotowana do testu

Próby przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion 45 z czujnikiem siły 1 kN. Do mocowania próbek wykorzystano szczęki o specjalnej geometrii, zapobiegającej wyślizgiwaniu się materiału. Stanowisko do badań przedstawiono na Rys. 39. Wszystkie badania przeprowadzono w jednakowych warunkach temperatury i wilgotności – podczas testów temperatura w pomieszczeniu wynosiła  $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , a wilgotność  $54,6\% \pm 5\%$ . Przemieszczenie wynosiło 21,6 mm/min, co odpowiadało 18% długości pomiarowej próbki. Wszystkie testy zarejestrowano przy pomocy kamery, aby ocenić mechanizmy odkształcenia oraz zmierzyć odkształcenie i kąt ścinania dla każdej z próbek. Badania prowadzono do momentu utraty spójności próbki.



Rys. 39. Stanowisko do badań Bias Extension

We wszystkich przeprowadzonych testach poziom zakłóceń był dość duży, ze względu na bardzo małe siły potrzebne do odkształcenia nieutwardzonego prepregu. Mimo, że dla poszczególnych rodzajów badanych próbek uzyskano duży rozrzut maksymalnych sił, to otrzymany charakter zniszczenia jest powtarzalny dla każdego rodzaju próbki.

Na Rys. 40 przedstawiono zależność siły od przemieszczenia głowicy, obrazującą przebieg badania dla próbek z materiału o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Krzywe te mają zbliżony przebieg, zwłaszcza w początkowym etapie, co świadczy o podobnym charakterze odkształcenia dla każdej z próbek. Ponadto, krzywe te aż do przemieszczenia wynoszącego ok 30 mm przypominają kształtem krzywe uzyskiwane w badaniach Bias Extension tkanin (do momentu wystąpienia locking angle, po osiągnięciu którego przy bardzo niewielkim przemieszczeniu odnotowuje się duży wzrost siły). Wykres ograniczony do przemieszczenia wynoszącego 30 mm przedstawiono na Rys. 41. Świadczy to o tym, że w pierwszym etapie badania dominującym mechanizmem odkształcenia było ścinanie, w późniejszym etapie natomiast zaczęły się pojawiać także inne mechanizmy, indywidualne i lokalne dla każdej próbki, takie jak poślizg, utrata konsolidacji, aż w końcu rozerwanie próbki i utrata spójności.



*Rys.* 40. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 41**. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> – widok dla przemieszczenia w zakresie do 30 mm

Powyższe wnioski potwierdziła również kontrola wizualna oraz analiza danych ze zdjęć i zarejestrowanych obrazów wideo. W pierwszej fazie odkształcenia następowało wydłużanie strefy ścinania, co pokazano na Rys. 42. W późniejszym czasie (w zależności od próbki, w zakresie ok 25 – 35 mm przemieszczenia), pojawiał się także poślizg, co przedstawiono na Rys. 43. W końcowej fazie, zaraz po osiągnięciu maksymalnego obciążenia, ze względu na brak mechanicznego połączenia pomiędzy włóknami, następował bardzo duży poślizg oraz rozrywanie pomiędzy włóknami w strefie przejściowej pomiędzy strefą ścinania a strefą mieszaną, co przedstawiono na Rys. 44.

Wszystkie próbki po badaniu przedstawiono na Rys. 45 - na każdej z nich widoczna jest strefa, w której wystąpiło ścinanie oraz zniszczenie w obszarze przejściowym pomiędzy obszarem ścinania a strefą mieszaną. Na próbkach w obszarze ścinania miejscowo widoczne są także drobne zmarszczki, co przedstawiono na Rys. 46. W literaturze w przeprowadzonych do tej pory badaniach Bias Extension również zauważono występowanie podobnych zmarszczek, podano jednak różne teorie na temat mechanizmu ich powstawania, sugerując, że mogą być one wynikiem naprężeń ściskających powstających na skutek występowania w prepregu włókien o zaburzonej orientacji lub też efektem nakładania się jednych włókien na drugie [176,177].



*Rys. 42.* Próbka P1 przy 12 mm przemieszczenia - następuje wydłużanie środkowej strefy na skutek ścinania



**Rys. 43**. Próbka P4 przy 26 mm przemieszczenia - widoczne są uskoki świadczące o występowaniu poślizgu



**Rys. 44**. Próbka P3 przy 36 mm przemieszczenia - następuje bardzo duży poślizg oraz rozrywanie pomiędzy strefą ścinania a strefą mieszaną



**Rys. 45**. Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> po badaniu Bias Extension



**Rys. 46**. Zmarszczki w strefie ścinania w próbce z prepregu o gramaturze 150 g/m2 po badaniu Bias Extension

Zupełnie inaczej wyglądało odkształcenie próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Przebieg badania miał podobny charakter dla obu rodzajów testowanych próbek, złożonych z 4 i z 8 warstw. Wykresy zależności siły i przemieszczenia dla próbek złożonych z 4 warstw prepregu przedstawiono na Rys. 47, a dla próbek złożonych z 8 warstw prepregu na Rys. 48. W obu przypadkach, zaraz po rozpoczęciu badania następował duży przyrost siły przy bardzo małym odkształceniu - zaledwie do 2 – 3 mm i tylko w tym zakresie przebieg krzywych jest zbliżony dla każdej z próbek. Większą jednorodność początkowej fazy testu uzyskano dla próbek złożonych z 4 warstw, co jest widoczne na Rys. 49 i Rys. 50, na których przedstawiono wykresy zależności siły od przemieszczenia do wartości 5 mm dla obu serii próbek. Następnie w obu przypadkach siła osiągała maksymalne wartości, po czym następowało bardzo duże odkształcenie: dla próbek złożonych z 4 warstw – przy stałej sile lub niewielkim jej spadku, dla próbek złożonych z 8 warstw – przy stopniowym spadku siły.



**Rys. 47**. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> dla próbek złożonych z 4 warstw



**Rys. 48.** Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> dla próbek złożonych z 8 warstw



**Rys. 49**. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek złożonych z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> dla przemieszczenia w zakresie do 5 mm



**Rys. 50**. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek złożonych z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> dla przemieszczenia w zakresie do 5 mm

Analiza danych z wykresów oraz zarejestrowanych obrazów wideo wraz z ocena wizualna próbek pozwoliły stwierdzić, że w przypadku próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> ścinanie wystąpiło jedynie w bardzo niewielkim zakresie odkształcenia, odpowiadajacemu ok 2-3 mm przemieszczenia głowicy. Próbki w tym zakresie przemieszczenia przedstawiono na Rys. 51 i Rys. 52. Przy dalszym obciążaniu próbek, w strefie środkowej zaczynały lokalnie pojawiać się duże poślizgi pomiędzy włóknami, a ich rozwój stawał się dominującym mechanizmem odkształcenia próbki, zatrzymując dalsze ścinanie, co przedstawiono na Rys. 53 i Rys. 54. Wyjątek stanowiły próbki P3 i P5, a częściowo także P6, złożone z 4 warstw prepregu – w nich również pojawiły się lokalne poślizgi pomiędzy włóknami, które jednak nie zatrzymały dalszego ścinania, co przedstawiono na Rys. 55. W tych próbkach ścinanie i poślizg występowały równocześnie, aż do rozpoczęcia rozrywania próbek pomiędzy włóknami w miejscach poślizgu, co potwierdza też przebieg krzywych na wykresie przedstawionym na Rys. 47. We wszystkich próbkach zniszczenie i utrata spójności próbek następowało na skutek rozrywania pomiędzy włóknami w strefach środkowych próbek, w miejscach poślizgu pomiędzy włóknami, w których następowała także widoczna utrata spójności pomiędzy warstwami prepregu, co przedstawiono na Rys. 56 i Rys. 57. Próbki po badaniu złożone z 4 warstw prepregu przedstawiono na Rys. 58, a próbki złożone z 8 warstw prepregu – na Rys. 59. Na wszystkich próbkach po badaniu widoczna jest utrata konsolidacji pomiędzy warstwami i zniszczenie na skutek dużego poślizgu i rozrywania pomiędzy włóknami w strefie, w której zgodnie z założeniami testu Bias Extension powinno występować czyste ścinanie.



*Rys.* 51. Próbka P1 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 1,5 mm - następuje wydłużanie strefy ścinania



*Rys.* 52. Próbka P2 złożona z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 3 mm - następuje wydłużanie strefy ścinania



**Rys. 53**. Próbka P2 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 8 mm - duży poślizg pomiędzy włóknami staje się dominującym mechanizmem odkształcenia


**Rys. 54**. Próbka P2 złożona z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 13 mm - duży poślizg pomiędzy włóknami staje się dominującym mechanizmem odkształcenia



**Rys. 55**. Próbka P5 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 20 mm – widoczne duże poślizgi pomiędzy włóknami, jednakże duże odkształcenie strefy środkowej świadczy o występującym jednocześnie ścinaniu



**Rys. 56**. Próbka P1 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 14 mm – widoczne zniszczenie próbki na skutek poślizgu i rozrywania pomiędzy włóknami w środkowej strefie próbki



**Rys. 57.** Próbka P3 złożona z 3 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> podczas testu Bias Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 27 mm – widoczne zniszczenie próbki na skutek poślizgu i rozrywania pomiędzy włóknami w środkowej strefie próbki



**Rys. 58**. Próbki złożone z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> po badaniu Bias Extension



**Rys. 59**. Próbki złożone z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> po badaniu Bias Extension

Aby porównać ze sobą różny charakter odkształcenia dla każdego z materiałów, na Rys. 60 przedstawiono uśrednione dane dla każdej z serii próbek, jednakże ze względu na duży rozrzut danych w późniejszych etapach badania, wykres ograniczono do 15 mm przemieszczenia dla materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz do 36 mm dla materiału o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Aby umożliwić porównanie otrzymanych wyników, siłę odniesiono do grubości próbek. W przypadku prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, ścinanie było dominującym mechanizmem odkształcenia, aż do utraty spójności próbki w obszarze przejściowym pomiędzy strefą ścinania a strefą mieszaną. W przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, już na początku badania odnotowano duży wzrost siły przy bardzo małym odkształceniu, co świadczy o tym, że udział ścinania w tych próbkach był niewielki. Ponieważ jednak naprężenia potrzebne do odkształcenia próbek złożonych z 8 warstw były większe, niż w przypadku próbek złożonych z 4 warstw, można przypuszczać, ze już na tym etapie następowała utrata spójności pomiędzy warstwami prepregu, która skutkowała pojawianiem się dużych poślizgów w późniejszym etapie odkształcenia. Z przebiegu krzywych można również wnioskować, że udział ścinania w całości odkształcenia był większy dla próbek złożonych z 4 warstw, niż dla próbek złożonych z 8 warstw.



**Rys. 60**. Zależność siły odniesionej do grubości próbek od przemieszczenia uzyskana w badaniu Bias Extension, uśredniona dla każdej serii próbek

Aby w pełni przeanalizować przebieg odkształcenia w trakcie testu Bias Extension, przeprowadzono także analizę kąta ścinania γ. Zgodnie z założeniami modelu PJN, wykorzystywanego przy badaniu tkanin, wyznaczono teoretyczne wartości kąta ścinania, korzystając ze wzoru [173]:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D+d}{\sqrt{2}D}\right) \tag{7}$$

gdzie:

γ – kąt ścinania,

D – długość strefy ścinania [mm],

*d* – przemieszczenie maszyny [mm].

Długość strefy ścinania D wyznaczana jest ze wzoru:

$$D = L - W \tag{8}$$

gdzie:

L – długość początkowa próbki [mm],

W-szerokość początkowa próbki [mm].

Wartości rzeczywiste kąta ścinania wyznaczono na podstawie analizy zdjęć – klatek z zarejestrowanego filmu. Do wyznaczenia kąta ścinania wykorzystano linie referencyjne wyznaczone na powierzchni próbek. Pomiarów dokonano przy pomocy programu ImageJ. Dla próbek z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> pomiarów dokonano co 1 mm przemieszczenia aż do wartości 35 mm (za wyjątkiem próbek P3 i P5, dla których pomiarów dokonano do 32 mm), po której następowała utrata spójności próbek. Kąt pomiędzy krzyżującymi się włóknami w próbkach poddawanych Bias Extension można wyznaczyć z zależności  $\frac{\pi}{2} - \gamma$ . Wykres zależności kąta ścinania od przemieszczenia dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 61. Przeprowadzone pomiary potwierdzają wcześniejsze obserwacje. Przebieg odkształcenia w początkowej fazie jest zbliżony do wartości teoretycznych, wyznaczonych zgodnie z modelem PJN, co świadczy o występowaniu ścinania w próbkach z prepregu jednokierunkowego. Wraz ze zwiększającym się przemieszczeniem, zaczyna się rozbieżność pomiędzy modelem, a zmierzonymi wartościami kąta ścinania, co jest wynikiem pojawiania się innych mechanizmów odkształcenia, takich jak poślizg.



**Rys. 61**. Wykres zależności kąta ścinania od przemieszczenia dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> - wartości zmierzone dla każdej z próbek oraz wartość teoretyczna wyznaczona z modelu PJN

Wykres zależności kąta ścinania od przemieszczenia dla próbek złożonych z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 62. W tym przypadku przebieg krzywych jest jednak bardzo zróżnicowany i dla niektórych próbek różni się znacząco od wartości wyznaczonych zgodnie z założeniami modelu PJN, ze względu na bardzo mały udział ścinania i inne mechanizmy odkształcenia. W przypadku próbek P1, P2 i P6 zniszczenie na skutek poślizgów i rozrywania nastąpiło bardzo szybko, powodując deformację strefy referencyjnej, dlatego krzywe przebiegają powyżej teoretycznej. Z tego względu niemożliwe też były pomiary dla wartości przemieszczenia większych niż 10 mm. W przypadku próbek P3 i P5, zmierzone wartości są zbliżone do wartości teoretycznych w początkowym zakresie odkształcenia, ale wraz ze wzrostem przemieszczenia stają się niższe, ze względu na równoczesne występowanie ścinania i poślizgów. W przypadku próbki P4, poślizg i utrata spójności pojawiły się bardzo szybko w strefie oddalonej od strefy referencyjnej i zdominowały całkowite odkształcenie, dlatego też zmierzone wartości kąta ścinania są niższe od wartości wyznaczonych zgodnie z założeniami modelu PJN.



**Rys. 62**. Zależność kąta ścinania od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek złożonych z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>- wartości zmierzone dla każdej próbki oraz wartość teoretyczna, wyznaczona zgodnie z założeniami modelu PJN

Wykres zależności kąta ścinania od przemieszczenia dla próbek złożonych z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 63. W tym przypadku pomiarów kąta ścinania dokonano do wartości przemieszczenia wynoszącej 10 mm. Powyżej tej wartości występowały duże poślizgi i utrata spójności próbek. Ścinanie występowało tylko w początkowej fazie odkształcenia. Jest to widoczne na wykresie, gdyż krzywe dążą do wartości niższych niż wartości teoretyczne, wyznaczone zgodnie z założeniami modelu PJN. Wyjątkiem jest próbka P3, dla której ścinanie występowało nadal, równolegle z poślizgiem, co jest widoczne na wykresie w postaci wartości wyższych wartości kąta ścinania.



**Rys. 63**. Zależność kąta ścinania od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek złożonych z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>- wartości zmierzone dla każdej próbki oraz wartość teoretyczna, wyznaczona zgodnie z założeniami modelu PJN

Test Bias Extension, mimo swoich ograniczeń przy zastosowaniu do badania krzyżujących się prepregów, pozwolił porównać ze sobą zachowanie materiałów o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> i 75 g/m<sup>2</sup> w warunkach ścinania. Analizując otrzymane dane, można stwierdzić, że prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> ma dużą podatność do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie, a w początkowej fazie przebieg odkształcenia jest zbliżony do tkanin. W późniejszej fazie zaczynają się pojawiać także inne mechanizmy, takie jak poślizg, o charakterze lokalnym. Powoduje to dużą rozbieżność wyników, jednakże charakter odkształcenia jest taki sam, aż do momentu utraty spójności próbki poprzez poślizg i rozrywanie w strefie przejściowej pomiędzy strefą ścinania a strefą mieszaną ze względu na brak mechanicznego połączenia pomiędzy warstwami.

Podatność prepregu o gramaturze 75  $g/m^2$  do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie jest bardzo mała. Ścinanie wstępuje tylko w bardzo niewielkim zakresie odkształcenia, bardzo szybko pojawiają się inne mechanizmy, takie jak utrata konsolidacji, poślizg i rozrywanie pomiędzy włóknami. Zniszczenie i utrata spójności następuje w środkowej strefie próbek. Dalsze odkształcenie ma losowy charakter i może przebiegać poprzez poślizg lub poślizg i ścinanie jednocześnie. Porównując dane dla próbek złożonych z 4 i z 8 warstw preregu można stwierdzić, że już w początkowej fazie odkształcenia następuje utrata konsolidacji, a poślizgi pojawiają się zarówno wewnątrz pojedynczej warstwy, jak i pomiędzy warstwami.

Biorąc pod uwagę zdolność prepregu do odkształcenia poprzez ścinanie można stwierdzić, że prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> bardziej nadaje się do formowania wyrobów zawierających krzywizny, ponieważ jest zdolny do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie. W przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, jego mała

zdolność do odkształcenia poprzez ścinanie w warunkach formowania oraz utwardzania może być przyczyną powstawania defektów.

# 8.2. Badania właściwości mechanicznych próbek płaskich

Kolejna część prac obejmowała badania podstawowych właściwości mechanicznych płaskich laminatów wytworzonych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup>. Aby móc bezpośrednio porównać właściwości mechaniczne kompozytów wykonanych z obydwu materiałów i ocenić wpływ gramatury, próbki wykonano w identycznych warunkach środowiskowych i przy wykorzystaniu identycznych materiałów pomocniczych, po czym utwardzono w procesie opisanym w rozdziale 7.

Badania wykonano zgodnie z dostępnymi normami. Zaplanowane badania mechaniczne, wraz z wymaganymi przez normę wymiarami i ilością próbek do badań, przestawiono w Tabeli 8.

			Processi Pro	
Badanie	Orientacja	Liczba próbek	Wymiary próbek [mm]	Norma
Wytrzymałość na	0°	7	250 x 15 x 1	PN - EN ISO 527-5 Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciaganiu - Część 5: Warunki badań
rozciąganie	rozciąganie 90° 7 250 x 25 x 2 k		kompozytów tworzywowych wzmocnionych włóknami jednokierunkowo	
Wytrzymałość na zginanie	0°	7	100 x 15 x 2	PN - EN ISO 14125 Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem - Oznaczenia właściwości przy zginaniu
Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe ILSS	0°	7	20 x 10 x 2	PN - EN ISO 14130 Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem - Oznaczenie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe metodą krótkiej belki (ILSS)
Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie In-Plane Shear	[45°/-45°]	7	250 x 25 x 2	ASTM D 3518/D 3518M Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a ±45° Laminate

Tabela 8. Przeprowadzone badania	mechaniczne próbek płaskich,	wraz z orientacją,	ilością i wymiarami
	nróhek		

# 8.2.1. Próbki do badań

Aby wykonać próbki do badań mechanicznych zgodnie z wytycznymi zawartymi w Tabeli 8, z obydwu prepregów metodą laminowania ręcznego wykonano płyty o odpowiedniej grubości i orientacji. Wytworzone płyty zestawiono w Tabeli 9. Płyty zaprojektowano tak, aby osiągnąć wymaganą przez normy grubość próbek do badań, a jednocześnie uzyskać taką samą gramaturę włókien węglowych, dlatego w przypadku płyt z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> ilości warstw zostały podwojone w stosunku do płyt o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Wszystkie płyty wykonano w jednakowych warunkach środowiskowych, w pomieszczeniu czystym. Odpowiednio wycięte pasy prepregu laminowano warstwa po warstwie na płaskim stole do laminowania, stosując proces

konsolidacji w worku próżniowym po pierwszej warstwie, a następnie co 3 warstwy. Wszystkie płyty zamknięto w pakiecie podciśnieniowym, złożonym z takich samych materiałów funkcyjnych: szklanej tkaniny oddzielającej pokrywanej teflonem nieperforowanej, szklanej tkaniny oddzielającej pokrywanej teflonem nieperforowanej, włókniny breather i folii zamykającej pakiet podciśnieniowy. Następnie płyty utwardzono w autoklawie w procesie EPOXY75/150, opisanym w rozdziale 7. Po procesie utwardzania i odformowaniu płyt, próbki poddano ocenie wizualnej i pomiarom grubości i masy przy użyciu mikrometru Insize IP 54 oraz wagi Radwag WLC 30/F1/R. Następnie próbki o odpowiednich wymiarach wycięto metodą obróbki skrawaniem przy użyciu narzędzi diamentowych na pięcioosiowej frezarce JOBS Jomach 146. Przed przystąpieniem do badań, na próbki przeznaczone do badania wytrzymałości na rozciąganie oraz do badania wytrzymałości na ścinanie w płaszczyźnie poprzez rozciąganie naklejono podkładki, zgodnie z wymogami normy. Kolejne etapy wytwarzania próbek przedstawiono na Rys. 64 - Rys. 66.

Materiał	Płyta	Orientacja	llość warstw	Próbki
	150 Tensile 0	٥°	7	Wytrzymałość na
	130 Tensile 0	0	/	rozciąganie w kierunku 0°
				Wytrzymałość na
				rozciąganie w kierunku 90°
Prpereg o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup>	150 Tensile 90	٥°	13	Wytrzymałość na zginanie w
	150 Tensile 50	U	15	kierunku 0°
				Wytrzymałość na ścinanie
				międzywarstwowe ILSS
		[45°/-45°]x6	12	Wytrzymałość na ścinanie w
	150 In-Plane Shear			płaszczyźnie In-Plane Shear
				p
	75 Tensile 0	0°	13	Wytrzymałość na
		0		rozciąganie w kierunku 0°
				Wytrzymałość na
				rozciąganie w kierunku 90°
	75 Tensile 90	0°	26	Wytrzymałość na zginanie w
Prpereg o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>		Ũ	20	kierunku 0°
				Wytrzymałość na ścinanie
				międzywarstwowe ILSS
				Wytrzymałość na ścinanie w
	75 In-Plane Shear	[45°/-45°]x12	24	płaszczyźnie In-Plane Shear
				place year of the shear

Tabela 9. Płyty wykonane w celu wytworzenia próbek do badań mechanicznych



*Rys.* 64. Laminowanie płyt z prepregu o gramaturze 150 g/m2 - od lewej kolejno do prób: Tensile 0, Tensile 90, In-Plane Shear



*Rys.* 65. Płyty z prepregu o gramaturze 75 g/m2 po utwardzeniu i frezowaniu - od lewej kolejno: Tensile 0, Tensile 90, In-Plane Shear



Rys. 66. Próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie z przyklejonymi podkładkami

Ze względu na różnice grubości oraz masy zaobserwowane podczas kontroli płyt po utwardzeniu, a także w celu porównania wyników badań mechanicznych, dla utwardzonych płyt wyznaczono udziały objętościowe komponentów.

### 8.2.2. Wyznaczenie udziału objętościowego włókien

W ramach pracy, oceny udziału objętościowego osnowy i zbrojenia dokonano metodą opierającą się na znajomości gramatury oraz pomiarach masy i geometrii wytworzonych

próbek w oparciu o normę ASTM D3171 – 15: Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials – Metoda II. Metody tej jednak nie można wykorzystywać do pomiaru zawartości pustek w materiale kompozytowym. [195]

W przypadku próbek płaskich do badań właściwości mechanicznych, gęstość próbek wyznaczono z równania:

$$\rho_c = \frac{M_i}{A \times h \times 1000} \tag{9}$$

gdzie:

 $\rho_c$  – gęstość próbki [g/cm<sup>3</sup>],

Mi-masa próbki [g],

A – pole powierzchni próbki [m<sup>2</sup>],

h – grubość próbki [mm].

W dalszej kolejności, na podstawie znajomości gramatury użytego prepregu oraz ilości warstw, wyznaczono udział masowy włókien w kompozycie:

$$W_r = \frac{A_r \times N \times 0.1}{\rho_c \times h} \tag{10}$$

gdzie:

Wr – udział masowy włókien [%],

 $A_r$  – gramatura użytego zbrojenia [g/m<sup>2</sup>],

N-ilość warstw zbrojenia

 $\rho_c$  – gęstość próbki [g/cm<sup>3</sup>],

*h* – grubość próbki [mm].

Do wyznaczenia udziału objętościowego włókien wykorzystano gęstość włókien, podaną przez producenta. Na tej podstawie wyznaczono udział objętościowy zgodnie ze wzorem:

$$V_r = \frac{A_r \times N \times 0.1}{\rho_r \times h} \tag{11}$$

gdzie:

Vr – udział objętościowy włókien [%],

 $A_r$  – gramatura użytego zbrojenia [g/m<sup>2</sup>],

N-ilość warstw zbrojenia,

 $\rho_r$  – gęstość włókien [g/cm<sup>3</sup>].

*h* – grubość próbki [mm].

Udział masowy żywicy wyznaczono na podstawie udziału zbrojenia, zgodnie ze wzorem:

$$W_m = 100 - W_r \tag{12}$$

gdzie:

 $W_m$  – udział masowy żywicy [%],

 $W_r$  – udział masowy włókien [%].

Udział objętościowy żywicy wyznaczono na podstawie gęstości i udziału masowego żywicy wg wzoru:

$$V_m = W_m \times \frac{\rho_c}{\rho_m} \tag{13}$$

gdzie:

 $V_m$  – udział objętościowy żywicy [%]

 $W_m$  – udział masowy żywicy [%],

 $\rho_c$  – gęstość próbki [g/cm<sup>3</sup>],

 $\rho_m$  – gęstość żywicy [g/cm<sup>3</sup>].

Wyniki obliczeń udziału objętościowego przedstawiono w Tabeli 10. Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykazały o wiele wyższe udziały objętościowe żywicy od płyt wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, co mogło mieć wpływ na właściwości mechaniczne wytworzonych próbek, dlatego analizując otrzymane wyniki, uwzględniono udziały objętościowe komponentów w badanych kompozytach.

		é li	Grubość		Gęstość	Udział	Udział	Udział	Udział
Matoriał	Phyto	Srednia	jednej	Masa	próbki	masowy	masowy	objętościowy	objętościowy
wateria	Fiyta	b [mm]	warstwy	M <sub>i</sub> [g]	ρ	włókien	żywicy	włókien	żywicy
		ոլտոյ	h <sub>p</sub> [mm]		[g/cm <sup>3</sup> ]	W <sub>r</sub> [%]	W <sub>m</sub> [%]	V <sub>r</sub> [%]	V <sub>m</sub> [%]
	Tensile 0	0,958	0,1368	260	1,508	72,69	27,31	60,90	34,32
150 g/m <sup>2</sup>	Tensile 90	1,810	0,1392	1001	1,536	70,13	29,87	59,86	38,24
	InPlane Shear	1,635	0,1363	917	1,558	70,67	29,33	61,15	38,08
	Tensile 0	1,082	0,0832	287	1,473	61,18	38,82	50,91	47,65
75 g/m <sup>2</sup>	Tensile 90	2,054	0,0790	1109	1,499	63,32	36,68	51,98	45,82
	InPlane Shear	1,903	0,0793	1017	1,484	63,74	36,26	52,79	44,84

Tabela 10. Udział objętościowy włókien i żywicy w płytach do badań mechanicznych

### 8.2.3. Badanie wytrzymałości na rozciąganie

Badanie wytrzymałości przy statycznym rozciąganiu prowadzono dla wzmacnianych jednokierunkowo prostokątnych kształtek z podkładkami. Badanie wykonano zgodnie z normami PN-EN ISO 527-1: Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 1: Zasady ogólne [196] oraz PN-EN ISO 527-5: Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 5: Warunki badania kompozytów tworzywowych wzmocnionych włóknami jednokierunkowo [197]. Badania przeprowadzono dla dwóch głównych kierunków kompozytów, tj. w kierunku 0° i 90°. Zgodnie z wytycznymi, dla każdej badanej próbki wyznaczono wartość wytrzymałości na rozciąganie, zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_M = \frac{F_{max}}{A} \tag{14}$$

gdzie:

 $\sigma_M$  – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],

 $F_{max}$  - maksymalna siła [N],

A – początkowe pole przekroju próbki [mm<sup>2</sup>].

W następnej kolejności wyznaczono moduł sprężystości przy rozciąganiu dla odkształceń i naprężeń w wyznaczonym zakresie referencyjnym. Jako wartość początkową zakresu przyjęto odkształcenie wzdłużne  $\varepsilon_1$  wynoszące 0,0005, a jako wartość końcową zakresu przyjęto odkształcenie  $\varepsilon_2$  wynoszące 0,0025. Moduł sprężystości wyznaczono według wzoru:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{15}$$

gdzie:

*E* – moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa],

 $\sigma_l$  – naprężenie rozciągające dla odkształcenia  $\varepsilon_1 = 0,0005$  [MPa],

 $\sigma_2$  - naprężenie rozciągające dla odkształcenia  $\varepsilon_2 = 0,0025$  [MPa].

Na podstawie różnicy odkształceń poprzecznych i wzdłużnych dla tego samego zakresu referencyjnego, odczytanych z ekstensometrów, obliczono także współczynnik Poissona, zgodnie ze wzorem:

$$\nu = \frac{\Delta \varepsilon_t}{\Delta \varepsilon_l} \tag{16}$$

gdzie:

v-współczynnik Poissona,

 $\Delta \varepsilon_t$  – różnica odkształceń poprzecznych w wyznaczonym zakresie referencyjnym [mm/mm],

 $\Delta \varepsilon_l$  – różnica odkształceń wzdłużnych w wyznaczonym zakresie referencyjnym [mm/mm].

Badanie wytrzymałości na rozciąganie dla próbek w obydwu badanych kierunkach głównych przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion 45. Zastosowano czujnik siły LPS.105 o zakresie 100 kN. Sygnałem sterującym badania było przemieszczenie, a prędkość badania wynosiła 2 mm/min. Do pomiaru wydłużenia zastosowano ekstensometr 634.31F-24. Stanowisko do badań wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono na Rys. 67. Przed przystąpieniem do testu zarejestrowano wymiary każdej próbki przy użyciu mikrometru Insize IP 54 i suwmiarki Mahr Marcal 16 EWR. Badania przeprowadzono w jednakowych warunkach środowiskowych (temperatura:  $21^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , wilgotność:  $60\% \pm 5\%$ ).



Rys. 67. Stanowisko do badań wytrzymałości na rozciąganie

Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kierunku 0° przedstawiono w Tabeli 11. Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kierunku 90° przedstawiono w Tabeli 12. Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kierunku 0° przedstawiono w Tabeli 13. Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kierunku 90° przedstawiono w Tabeli 14. Wyższe wyniki wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości przy rozciąganiu w kierunku 0° uzyskano dla próbek wykonanych prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, z kolei wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości w kierunku 90° uzyskano dla próbek wykonanych prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Najprawdopodobniej, jest to wynikiem wyższego udziału objętościowego włókien w próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.

	Maksymalna	Wytrzymałość	Moduł	Współczynnik
Próbka	siła	na rozciąganie	sprężystości	Poissona
	F <sub>max</sub> [kN]	σ <sub>M</sub> [MPa]	E [GPa]	v
150/T0/P1	35,06	2447,5	144,8	0,72
150/T0/P2	36,93	2500,2	136,1	0,68
150/T0/P3	36,91	2544,7	132,0	1,18
150/T0/P4	37,72	2564,1	149,5	1,18
150/T0/P5	37,81	2593,7	141,7	1,25
150/T0/P6	33,67	2348,7	128,0	0,94
150/T0/P7	37,25	2524,7	138,5	0,90
Średnia	36,5	2503,4	138,7	1,0
Odchylenie stadardowe	1,5	82,7	7,4	0,2
Współczynnik zmienności CV [%]	4,22	3,30	5,34	23,70

*Tabela 11.* Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kierunku 0°

Próbka	Maksymalna siła	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Współczynnik Poissona
	F <sub>max</sub> [kN]	σ <sub>M</sub> [MPa]	E [GPa]	v
150/T90/P1	2,06	44,2	7,9	0,26
150/T90/P2	1,80	38,9	8,1	0,13
150/T90/P3	1,79	39,9	8,1	0,33
150/T90/P4	1,91	40,5	8,0	0,20
150/T90/P5	1,81	39,3	8,1	0,29
150/T90/P6	1,78	37,6	7,9	0,14
150/T90/P7	1,92	39,9	7,7	0,31
Średnia	1,87	40,1	8,0	0,24
Odchylenie standardowe	0,10	2,0	0,2	0,08
Współczynnik zmienności CV [%]	5,57	5,09	1,91	33,83

*Tabela 12.* Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kierunku 90°

*Tabela 13.* Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kierunku 0°

Próbka	Maksymalna siła F <sub>max</sub> [kN]	Wytrzymałość na rozciąganie σ <sub>M</sub> [MPa]	Moduł sprężystości E [GPa]	Współczynnik Poissona v
75/T0/P1	36,86	2010,5	107,5	0,24
75/T0/P2	36,35	2026,2	117,4	0,53
75/T0/P3	33,36	1921,7	111,7	0,21
75/T0/P4	34,46	2033,8	119,1	0,45
75/T0/P5	34,99	1967,0	118,9	0,34
75/T0/P6	35,37	2000,5	122,2	0,37
75/T0/P7	32,05	1810,4	124,1	0,40
Średnia	34,78	1967,2	117,3	0,36
Odchylenie standardowe	1,67	79,1	5,8	0,11
Współczynnik zmienności CV [%]	4,81	4,0	5,0	31,01

*Tabela 14. Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kierunku 90* 

	Maksymalna	Wytrzymałość	Moduł	Współczynnik
Próbka	siła	na rozciąganie	sprężystości	Poissona
	F <sub>max</sub> [kN]	σ <sub>M</sub> [MPa]	E [GPa]	v
75/T90/P1	2,59	53,874	8,5	0,06
75/T90/P2	2,22	46,565	8,3	0,02
75/T90/P3	2,84	58,290	8,3	0,03
75/T90/P4	2,66	53,789	8,1	0,02
75/T90/P5	2,65	53,810	8,3	0,01
75/T90/P6	2,70	55,941	8,4	0,06
75/T90/P7	2,37	49,263	8,0	0,05
Średnia	2,58	53,076	8,3	0,04
Odchylenie standardowe	0,21	3,958	0,2	0,02
Wspołczynnik zmienności CV [%]	8,20	7,458	2,0	57,97

#### 8.2.4. Badanie właściwości przy zginaniu

Badanie właściwości przy zginaniu przeprowadzono w układzie trzypunktowym zgodnie z normą PN-EN ISO 14125: Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem - Oznaczanie właściwości przy zginaniu. Badanie przeprowadzono dla próbek jednokierunkowych, umacnianych w kierunku 0° [198].

W badaniu otrzymano wartości siły i strzałki ugięcia dla każdej z próbek, a na podstawie normy wyznaczono maksymalne naprężenie zginające, zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_f = \frac{3F_{max}L}{2bh^2} \tag{17}$$

gdzie:

 $\sigma_f$  – maksymalne naprężenie zginające [MPa],

*F<sub>max</sub>* – maksymalna siła przy zginaniu [N],

*L* – rozstaw podpór [mm],

b – szerokość próbki [mm],

*h* – grubość próbki [mm].

Obliczono także odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu, zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2} \tag{18}$$

gdzie:

ε – odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu [mm/mm],

s – strzałka ugięcia przy maksymalnym naprężeniu [mm],

*h* – grubość próbki [mm],

*L* – rozstaw podpór [mm].

W badaniu wyznaczono także moduł sprężystości przy zginaniu. W tym celu wyznaczono dwie wartości odkształceń zginających:  $\varepsilon_1 = 0,0005$  oraz  $\varepsilon_2 = 0,0025$ . Następnie obliczono odpowiadające tym odkształceniom strzałki ugięcia s<sub>1</sub> i s<sub>2</sub>, korzystając ze wzorów:

$$s_1 = \frac{\varepsilon_1 L^2}{6h} \tag{19}$$

oraz:

$$s_2 = \frac{\varepsilon_2 L^2}{6h} \tag{20}$$

gdzie:

 $s_1$  – strzałka ugięcia, odpowiadająca odkształceniu zginającemu:  $\varepsilon 1 = 0,0005$  [mm],  $s_2$  – strzałka ugięcia, odpowiadająca odkształceniu zginającemu:  $\varepsilon 2 = 0,0025$  [mm], h – grubość próbki [mm],

L-rozstaw podpór [mm].

Następnie dla wyznaczonych wartości strzałki ugięcia  $s_1$  i  $s_2$  wyznaczono odpowiadające im obciążenia  $F_1$  i  $F_2$  oraz obliczono moduł sprężystości przy zginaniu, zgodnie ze wzorem:

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s}\right) \tag{21}$$

gdzie:

*E<sub>f</sub>* – moduł sprężystości przy zginaniu [MPa],

*L* – rozstaw podpór [mm],

*b* – szerokość próbki [mm],

h – grubość próbki [mm],

 $\Delta s$  – różnica strzałki ugięcia  $s_2$  i  $s_1$ , [mm],

 $\Delta F$  – różnica obciążenia  $F_2$  i  $F_1$ , odpowiadającego strzałkom ugięcia  $s_2$  i  $s_1$  [N].

Badanie właściwości przy zginaniu przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion 45 z czujnikiem siły LPS.105. Odległość między dolnymi podporami wynosiła 80 mm. Sygnałem sterującym badania było przemieszczenie, a prędkość badania wynosiła 2 mm/min. Stanowisko do badań właściwości przy zginaniu przedstawiono na Rys. 68. Przed przystąpieniem do testu zarejestrowano wymiary każdej próbki przy użyciu mikrometru Insize IP 54 i suwmiarki Mahr Marcal 16 EWR. Badania przeprowadzono w jednakowych warunkach środowiskowych (temperatura:  $21^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , wilgotność:  $60\% \pm 5\%$ ).



Rys. 68. Stanowisko do badań właściwości przy zginaniu w układzie trzypunktowym

Wyniki uzyskane dla materiału o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 15. Wyniki uzyskane dla materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 16. Z otrzymanych wyników wynika, że wartości maksymalnych naprężeń zginających oraz modułu sprężystości przy zginaniu są większe dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.

Próbka	Maksymalna siła F <sub>max</sub> [kN]	Maksymalne naprężenie zginające σ <sub>f</sub> [MPa]	Strzałka ugięcia przy maksymalnym naprężeniu s [mm]	Odształcenie przy maksymalnym napręzeniu ε [mm/mm]	Moduł sprężystości przy zginaniu E <sub>f</sub> [GPa]
150/F0/P1	0,619	1621,0	8,066	0,013	125,9
150/F0/P2	0,645	1672,1	8,200	0,014	126,6
150/F0/P3	0,637	1608,6	7,384	0,012	131,0
150/F0/P4	0,640	1649,8	8,217	0,014	125,7
150/F0/P5	0,637	1587,5	8,185	0,014	120,1
150/F0/P6	0,646	1601,8	7,809	0,013	123,5
150/F0/P7	0,635	1577,8	8,367	0,014	112,9
Średnia	0,637	1616,9	8,033	0,013	123,7
Odchylenie standardowe	0,009	33,8	0,334	0,001	5,8
Współczynnik zmienności CV [%]	1,42	2,09	4,15	4,10	4,67

**Tabela 15**. Wyniki próby zginania trójpunktowego dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze  $150 \text{ g/m}^2$ 

**Tabela 16**. Wyniki próby zginania trójpunktowego dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze

Próbka	Maksymalna siła F <sub>max</sub> [kN]	Maksymalne naprężenie zginające σ <sub>f</sub> [MPa]	Strzałka ugięcia przy maksymalnym naprężeniu s [mm]	Odształcenie przy maksymalnym napręzeniu ε [mm/mm]	Moduł sprężystości przy zginaniu E <sub>f</sub> [GPa]
75/F0/P1	0,812	1254,5	5,819	0,012	102,7
75/F0/P2	0,805	1351,6	6,229	0,013	105,0
75/F0/P3	0,867	1330,3	5,766	0,012	106,9
75/F0/P4	0,785	1330,7	6,528	0,013	106,7
75/F0/P5	0,780	1263,8	5,746	0,012	101,4
75/F0/P6	0,819	1352,9	6,072	0,012	104,4
75/F0/P7	0,826	1330,0	5,695	0,012	107,0
Średnia	0,813	1316,2	5,979	0,012	104,9
Odchylenie standardowe	0,029	40,3	0,311	0,0005	2,2
Współczynnik zmienności CV [%]	3,57	3,06	5,19	3,97	2,12

### 8.2.5. Badanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe

Badanie polegało na wyznaczeniu ILSS metodą krótkiej belki. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 14130: Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie umownej wytrzymałości na ścinanie metodą krótkiej belki [199]. W badaniu testowano próbki jednokierunkowe, z włóknami zbrojącymi w kierunku 0°, który jest głównym kierunkiem laminatu. Rozstaw pomiędzy dolnymi podporami ustawiano indywidualnie dla każdej z próbek, gdyż zgodnie z zaleceniami normy powinien on wynosić *5h*, gdzie *h* oznacza grubość próbki. Zgodnie z normą, na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono umowną wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, korzystając ze wzoru:

$$\tau = \frac{3}{4} * \frac{F_{max}}{bh} \tag{22}$$

gdzie:

 $\tau$ – umowna wytrzymałość na ścinanie [MPa],

Fmax – maksymalna siła zarejestrowana podczas obciążania próbki [N],

- *b* szerokość próbki [mm],
- h grubość próbki [mm].

Badanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion 45 z czujnikiem siły LPS.105. Sygnałem sterującym badania było przemieszczenie, a prędkość badania wynosiła 1 mm/min. Stanowisko do badań umownej wytrzymałości na ścinanie przedstawiono na Rys. 69. Przed przystąpieniem do testu zarejestrowano wymiary każdej próbki przy użyciu mikrometru Insize IP 54 i suwmiarki Mahr MarCal 16 EWR. Badania przeprowadzono w jednakowych warunkach środowiskowych (temperatura:  $21^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , wilgotność:  $60\% \pm 5\%$ ).



Rys. 69. Stanowisko do badań umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe

Wyniki ILSS uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 17. Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 18. Próbki wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> cechuje wyższa wartość umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe oraz większa powtarzalność wyników.

Próbka	Maksymalna siła Fmax [kN]	Umowna wytrzymałość na ścinanie τ [MPa]
150/ILSS0/P1	1,169	50,10
150/ILSS0/P2	1,408	60,53
150/ILSS0/P3	1,681	72,06
150/ILSS0/P4	1,715	73,12
150/ILSS0/P5	1,662	70,38
150/ILSS0/P6	1,665	70,37
150/ILSS0/P7	1,625	69,38
Średnia	1,561	66,56
Odchylenie standardowe	0,200	8,34
Współczynnik zmienności CV [%]	12,83	12,53

 Tabela 17. Wyniki badania umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe dla próbek

 wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m²

Próbka	Maksymalna siła Fmax [kN]	Umowna wytrzymałość na ścinanie τ [MPa]
75/ILSS0/P1	2,288	91,03
75/ILSS0/P2	2,193	87,29
75/ILSS0/P3	2,152	86,57
75/ILSS0/P4	2,134	86,39
75/ILSS0/P5	2,290	88,22
75/ILSS0/P6	2,107	84,52
75/ILSS0/P7	2,290	89,91
Średnia	2,208	87,70
Odchylenie standardowe	0,081	2,22
Współczynnik zmienności CV [%]	3,65	2,53

Tabela 18. Wyniki badania umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe dla próbekwykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m²

### 8.2.6. Badanie właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie

Badanie właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie (*ang. IPS - In-Plane Shear*) polegało na rozciąganiu prostokątnych próbek kompozytowych umacnianych włóknem ciągłym o orientacji  $\pm 45^{\circ}$ . Badanie przeprowadzono zgodnie z normą ASTM D 3518/D 3518M: Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^{\circ}$  Laminate [200].

Sekwencja ułożenia warstw wynosiła [+45°/45°]<sub>n</sub> w taki sposób, by całkowita ilość warstw była podzielna przez 4, a grubość próbek zbliżona do 2 mm. W badaniach otrzymano dane dotyczące obciążenia oraz odkształcenia poprzecznego i wzdłużnego dla próbek z tensometrami. Następnie, zgodnie z normą, obliczono dla każdej z próbek maksymalne naprężenie ścinające. Dla próbek wykazujących duże odkształcenie w trakcie testu, zgodnie z zaleceniami normy, maksymalne naprężenie ścinające wyznaczono dla wartości 5% odkształcenia ścinającego. Maksymalne naprężenie ścinające wyznaczono korzystając ze wzoru:

$$\tau_{12}^m = \frac{F_m}{2A} \tag{23}$$

gdzie:

 $\tau_{12}^{m}$  – maksymalne naprężenie ścinające (przy 5% odkształcenia ścinającego) [MPa],

F<sub>m</sub> – maksymalna siła, w zakresie 5% odkształcenia ścinającego [N],

A – początkowy przekrój poprzeczny próbki [mm<sup>2</sup>].

Odkształcenie ścinające w dowolnym momencie testu wyznaczono, korzystając ze wzoru:

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \tag{24}$$

gdzie:

 $\gamma_{12}-odkształcenie \, \acute{scinające} \, [mm/mm],$ 

 $\varepsilon_x$  – odkształcenie wzdłużne [mm/mm],

 $\epsilon_y$  – odkształcenie poprzeczne [mm/mm].

Następnie dla próbek z tensometrami wyznaczono moduł sprężystości przy ścinaniu. Obszar odkształcenia do obliczenia modułu wyznaczono w zakresie liniowego przebiegu krzywych naprężenie-odkształcenie. Dolną granicę przyjęto dla odkształcenia ścinającego  $\gamma_{12}$  wynoszącego 0,002, a górną dla odkształcenia ścinającego  $\gamma_{12}$  wynoszącego 0,006. Moduł sprężystości przy ścinaniu wyznaczono, korzystając ze wzoru:

$$G_{12} = \frac{\Delta \tau_{12}}{\Delta \gamma_{12}} \tag{25}$$

gdzie:

G12 - moduł sprężystości przy ścinaniu [GPa],

 $\Delta \tau_{12}$  – różnica naprężeń w wyznaczonym zakresie referencyjnym [MPa],

 $\Delta \gamma_{12}$  – różnica odształceń w wyznaczonym zakresie referencyjnym [mm/mm].

Badanie przeprowadzono na osiowo-skrętnej maszynie wytrzymałościowej MTS 319.10 z czujnikiem siły 662.10B-07. Sygnałem sterującym badania było przemieszczenie, prędkość badania wynosiła 2 mm/min. Na powierzchni próbek zamocowano dwa tensometry, służące do pomiaru odkształcenia wzdłużnego i poprzecznego. Ze względu na ograniczoną dostępność tensometrów, pomiary z ich wykorzystaniem przeprowadzono dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz dla 3 próbek (P5, P6 i P7) z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Stanowisko do badań wytrzymałości na ścinanie w płaszczyźnie przedstawiono na Rys. 70. Badania przeprowadzono w jednakowych warunkach środowiskowych (temperatura:  $21^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , wilgotność:  $60\% \pm 5\%$ ).



Rys. 70. Stanowisko do badań właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie

Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze  $150 \text{ g/m}^2$  przedstawiono w Tabeli 19. W tym przypadku wartości modułu sprężystości wyznaczono

tylko dla próbek P5÷ P7. Dla próbek P1÷P4 wyznaczono maksymalne naprężenie ścinające oraz maksymalną siłę zarejestrowaną w trakcie testu. Dla wszystkich próbek zarejestrowano duże wartości odkształcenia ścinającego, dlatego w każdym przypadku maksymalne naprężenie ścinające wyznaczono dla wartości 5% odkształcenia ścinającego. Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 20. Zgodnie z otrzymanymi wynikami, próbki wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wykazują wyższą wytrzymałość przy 5% odkształcenia, próbki wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> cechuje wyższy moduł sprężystości. Należy jednak pamiętać, że dla laminatów wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> moduł sprężystości wyznaczono tylko dla 3 próbek, dlatego też wartość ta może być obciążona błędem pomiarowym.

Próbka	Siła przy 5% odkształcenia F <sub>m</sub> [kN]	Naprężenie przy 5% odkształcenia τ <sub>12</sub> <sup>m</sup> [MPa]	Moduł sprężystości przy ścinaniu G <sub>12</sub> [GPa]	Maksymalna siła w badaniu F <sub>max</sub> [kN]
150/IPS/P1	5,86	70,6	-	8,80
150/IPS/P2	6,00	71,2	-	9,05
150/IPS/P3	6,04	70,6	-	8,68
150/IPS/P4	5,99	70,9	-	8,27
150/IPS/P5	5,92	70,1	2,4	9,28
150/IPS/P6	6,31	74,8	2,3	9,07
150/IPS/P7	6,32	75,9	3,8	9,23
Średnia	6,06	72,01	2,80	8,91
Odchylenie standardowe	0,18	2,33	0,84	0,35
Współczynnik zmienności CV [%]	3,04	3,23	29,98	3,98

**Tabela 19**. Wyniki badania właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>

**Tabela 20**. Wyniki badania właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>

Próbka	Siła przy 5% odkształcenia F <sub>m</sub> [kN]	Naprężenie przy 5% odkształcenia τ <sub>12</sub> <sup>m</sup> [MPa]	Moduł sprężystości przy ścinaniu G <sub>12</sub> [GPa]	Maksymalna siła w badaniu F <sub>max</sub> [kN]
75/IPS/P1	2,23	60,2	3,3	3,18
75/IPS/P2	2,27	61,4	3,3	3,4
75/IPS/P3	2,25	60,6	3,4	3,28
75/IPS/P4	2,21	60,1	3,5	3,12
75/IPS/P5	2,5	58,8	2,8	2,85
75/IPS/P6	2,23	60,2	3,4	3,1
75/IPS/P7	2,26	60,7	3,3	3,27
Średnia	2,28	60,29	3,29	3,17
Odchylenie standardowe	0,10	0,79	0,23	0,18
Współczynnik zmienności CV [%]	4,38	1,31	6,90	5,54

## 8.3. Badania próbek zawierających krzywizny

#### 8.3.1. Geometria i struktura próbek zawierających krzywizny

Próbki do badań wytrzymałości CBS zaprojektowano w oparciu o wytyczne normy ASTM D6415/D6415M – Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite [201], wprowadzając modyfikacje geometrii krzywizny próbek. Dla celów porównawczych, zaprojektowano także próbkę płaską o pozostałych parametrach geometrii i struktury identycznych jak próbki zawierające krzywizny. Dla zbadania różnych geometrii krzywizny wybrano trzy różne kąty rozwarcia ramion  $\alpha$ , wynoszące 150°, 120° i 90°. Dla każdego z nich wybrano trzy różne promienie wewnętrzne  $R_i$ , wynoszące 4, 12 i 36 mm, stanowiące zaokrąglenie krawędzi wierzchołka. Geometrię krzywizny poszczególnych próbek przedstawiono na Rys. 71.



Rys. 71. Parametry geometrii krzywizny wybrane do badań wytrzymałości belek zakrzywionych

Pozostałe parametry geometrii próbek zakrzywionych przedstawiono na Rys. 72. Szerokość próbek w wynosiła 25 mm, a całkowita długość każdej próbki L, obejmująca długość ramion b oraz długość łuku krzywizny l, wynosiła 250 mm od wewnętrznej strony próbki. Długości łuku oraz ramion dla poszczególnych geometrii próbek przedstawiono w Tabeli 21. Grubość próbek t jest wynikiem ilości użytych warstw oraz zawartości żywicy w prepregu, zgodnie z zaprojektowaną strukturą.



Rys. 72. Geometria próbek do badań wytrzymałości zakrzywionych belek

	Długość	Długość
Próbka	ramienia <i>b</i>	łuku /
	[mm]	[mm]
α180°	250,00	-
α90°, R <sub>i</sub> 4	121,86	6,28
α90°, R <sub>i</sub> 12	115,58	18,85
α90°, R <sub>i</sub> 36	96,73	56,55
α120°, R <sub>i</sub> 4	122,91	4,19
α120°, R <sub>i</sub> 12	118,72	12,57
α120°, R <sub>i</sub> 36	106,15	37,70
α150°, R <sub>i</sub> 4	123,95	2,09
α150°, R <sub>i</sub> 12	121,86	6,28
α150°, R <sub>i</sub> 36	115,58	18,85

Tabela 21. Długość łuku krzywizny oraz długość ramion dla poszczególnych geometrii próbek

Dla każdego z badanych pepregów wykonano pełną serię próbek. Wszystkie próbki wykonano w układzie jednokierunkowym, o orientacji włókien wynoszącej 0° wzdłuż ramion próbek. Taki układ pozwala porównać właściwości materiałów o różnej gramaturze, wyeliminować wpływ orientacji na otrzymane wyniki oraz uniknąć powstawania naprężeń międzywarstwowych przy swobodnych krawędziach, wynikających z różnicy właściwości pomiędzy przylegającymi warstwami i mogącymi prowadzić do powstawania delaminacji. Ponadto, w warunkach obciążenia krzywizny momentem gnącym, dla układu jednokierunkowego możliwe jest wyznaczenie ILTS.

Grubość próbek zaprojektowano w taki sposób, aby uzyskać wynikającą z gramatury jednakową ilość włókien węglowych przypadających na jednostkę powierzchni. Jednocześnie ilość warstw dobrano w taki sposób, aby uzyskać grubość próbek wynoszącą około 2 mm, która zgodnie z normą powinna wystarczyć do uzyskania prawidłowego modelu zniszczenia próbek. Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykonano z 26 warstw materiału, a próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wykonano

z 13 warstw materiału. Dane dotyczące struktury próbek dla każdego z badanych materiałów przedstawiono w Tabeli 22.

[	Gramatura użytego materiału	Orientacja	llość warstw
	75 g/m <sup>2</sup>	0°	26
	150 g/m <sup>2</sup>	0°	13

Tabela 22. Struktura próbek do badań wytrzymałości zakrzywionych belek

# 8.3.2. Wytworzenie próbek

Aby wykonać próbki do badań wytrzymałości CBS metodą formowania w autoklawie, w pierwszej kolejności zaprojektowano i wykonano odpowiednie formy. Dla każdego układu geometrii oraz dla próbek płaskich przeznaczono po jednej formie, co dało w sumie 10 form. Każda forma mieściła serię 5 próbek z danego układu geometrycznego. Odległość pomiędzy próbkami na jednej formie wynosiła 15 mm, a odległość próbek od krawędzi formy wynosiła 20 mm. Formy zaprojektowano jako wypukłe, aby uzyskać dokładnie odwzorowany promień wewnętrzny i wewnętrzną geometrię próbki. Aby ułatwić obcinanie próbek, ich rozmiary oznaczono na formie rowkiem, który podczas utwardzania wypełnia się żywicą, pozostawiając ślad na utwardzonym wyrobie kompozytowym.

Formy wykonano z aluminium metodą obróbki skrawaniem. Aluminium stanowi dobre rozwiązanie dla krótkich serii wyrobów wytwarzanych metodą formowania w autoklawie, gdyż pomaga osiągnąć kompromis pomiędzy trwałością formy (dużo wyższą niż w przypadku form z drewna lub bloków epoksydowych), a ceną, która jest kilkakrotnie niższa niż w przypadku form kompozytowych. Formy aluminiowe ponadto cechują się dobrą odpornością termiczną, a także dobrą jakością otrzymywanych powierzchni. Po obróbce skrawaniem formy wypolerowano. Bezpośrednio przed rozpoczęciem laminowania, formy przygotowano przy użyciu odpowiednich środków: w pierwszej kolejności formy odtłuszczono, po czym nałożono 8 warstw środka uszczelniającego, który wypełnia wszystkie mikroporowatości i uszkodzenia, a następnie 8 warstw środka oddzielającego, którego działanie antyadhezyjne umożliwia oddzielenie wyrobu kompozytowego od formy po jego utwardzeniu. Komplet form dla każdego z zaprojektowanych układów geometrii krzywizny oraz dla próbki płaskiej przedstawiono na Rys. 73.



Rys. 73. Komplet form do wykonania próbek do badań wytrzymałości zakrzywionych belek

Próbki wykonano metodą laminowania (układania warstwy po warstwie) ręcznego, poddając ocenie proces kształtowania krzywizn o różnej geometrii z wykorzystaniem obydwu badanych prepregów. Wszystkie próbki wykonano w pomieszczeniu czystym w jednakowych warunkach środowiskowych (temperatura:  $20^{\circ}C \pm 1,5^{\circ}C$ , wilgotność  $60\% \pm 5\%$ ). W pierwszej kolejności wykonano wszystkie próbki z prepegu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, następnie przy użyciu identycznej technologii i tego samego zestawu form wykonano próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Z obu prepregów przy użyciu plotera tnącego ZUND wycięto wykroje (inaczej też preformy) o wymaganej orientacji i wymiarach. Preformy przygotowano tak, aby pokryć cały obszar formy, uwzględniając naddatki technologiczne wokół próbek oraz zapewnić ciągłość włókien wzdłuż całej długości próbki. Ponieważ orientacja próbek wynosiła 0° dla wszystkich warstw, wszystkie preformy miały jednakową orientację i wymiary.

Podczas laminowania stosowano proces konsolidacji w pakiecie próżniowym przez 30 minut przy podciśnieniu -0,9 bar. Proces zastosowano po pierwszej warstwie, a następnie powtarzano co dwie warstwy. Próbki przed i po konsolidacji przedstawiono na Rys. 74.



**Rys.** 74. Płyta z próbkami z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i geometrii  $\alpha$ 150°,  $R_i$ 12 przed i po konsolidacji

Podczas laminowania szczególną uwagę zwracano na obszar krzywizny, aby zminimalizować ryzyko powstawania defektów oraz ocenić zachowanie materiału podczas formowania obszarów krzywizn. Proces laminowania w obszarach krzywizn wymaga od operatora dużych zdolności manualnych i dokładności, a także znajomości zachowania się materiału typu prepreg podczas laminowania oraz w procesie utwardzania. Pomimo zachowania bardzo dużej staranności, w trakcie procesu laminowania napotkano pewne trudności. Wybrany rodzaj włókien węglowych o dużej wytrzymałości i standardowym module pozwolił dość dobrze kształtować wszystkie krzywizny. Mimo to, po kilku warstwach zaobserwowano niedokładne przyleganie warstw wokół krzywizn o mniejszym promieniu, co przestawiono na Rys. 75. Przyczynę problemu stanowiła stosunkowo duża grubość i sztywność papieru silikonowanego, zabezpieczającego prepreg. Obecność materiału protektorowego w przypadku laminowania prepregów jednokierunkowych jest konieczna dla zachowania spójności materiału. Jednakże papier silikonowany znacząco utrudniał dokładne odwzorowanie obszarów wokół krawędzi, unosząc się do góry w obszarze bezpośrednio przylegającym do promienia. Dla pozostałych preform zamieniono papier silikonowany na folie zabezpieczającą o właściwościach antyadhezyjnych, która ze względu na mniejszą grubość i sztywność pozwoliła na dokładniejsze odwzorowanie każdej z krzywizn, co przedstawiono na Rys. 76.



*Rys.* 75. Niedokładne przyleganie warstw w okolicach promienia, spowodowane dużą sztywnością papieru silikonowanego, zabezpieczającego prepreg



**Rys.** 76. Dokładniejsze przyleganie prepregu w obszarze promienia po zamianie papieru silikonowanego na folię oddzielającą

W trakcie laminowania zaobserwowano wpływ geometrii krzywizny na przebieg procesu laminowania. Największe trudności napotkano w takcie formowania próbek z promieniem krzywizny wynoszącym 4 mm. Mniejsze promienie wymagały większej dokładności w trakcie procedowania, aby uzyskać dobrze przyleganie prepregu. Wraz ze wzrostem promienia krzywizny, proces formowania przebiegał łatwiej. Kąt rozwarcia ramion również miał wpływ na przebieg procesu laminowania, chociaż mniejszy niż promień krzywizny. Próbki z większym kątem rozwarcia ramion były łatwiejsze do wykonania, gdyż wraz ze zmniejszającym się kątem, coraz większe ograniczenie stanowiła sztywność materiału. W przypadku próbek o większym kącie pomiędzy ramionami, droga włókien do ich prawidłowego ułożenia na ramionach próbki była krótsza niż w przypadku próbek o mniejszym kącie rozwarcia ramion, a co za tym idzie mniejsze były naprężenia materiału wokół krzywizny. Trudnościom wynikającym z geometrii krzywizny można było zapobiegać poprzez zachowanie należytej staranności i po zamianie papieru silikonowanego na folię oddzielającą.

W trakcie wytwarzania próbek zaobserwowano także wpływ gramatury na przebieg procesu laminowania. W przypadku prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wymagana była większa dokładność, a proces kształtowania i wygładzania każdej warstwy trwał dłużej niż w przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Najwięcej pracy wymagały próbki z promieniem krzywizny wynoszącym 4 mm. Ze względu na większą sztywność i grubość, prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> trudniej się układał, podnosząc się do góry w okolicy promienia, jednak po starannym formowaniu ze szczególnym uwzględnieniem krzywizny nie zaobserwowano żadnych defektów, a włókna węglowe układały się poprawnie wzdłuż każdego z promieni. W przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, proces laminowania krzywizny był łatwiejszy do przeprowadzenia.

W przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> zaobserwowano natomiast inny problem, który pojawił się po nałożeniu kilku warstw. Pomimo bardzo dokładnego odwzorowania krzywizny w trakcie układania materiału, po procesie konsolidacji zaobserwowano

tworzące się wokół krzywizny zmarszczki, co wskazuje na duże zagęszczenie materiału podczas konsolidacji. Zjawisko to nasilało się wraz ze wzrostem promienia oraz ze zmniejszeniem kąta rozwarcia ramion. Przykład zmarszczek dla dwóch różnych promieni krzywizny przedstawiono na Rys. 77. Wynika to prawdopodobnie z długości łuku krzywizny – wraz ze zwiększaniem promienia krzywizny oraz ze zmniejszaniem kąta rozwarcia pomiędzy ramionami, długość łuku krzywizny wzrastała. Po nałożeniu kilku warstw, promień krzywizny dla kolejnych układanych warstw był coraz większy. Po procesie konsolidacji, kiedy materiał ulegał zagęszczeniu, promień krzywizny, a wraz z nim długość materiału potrzebna do odwzorowania kształtu, zmniejszała się. Powstał nadmiar materiału, który utworzył zmarszczki. Podobnego zjawiska nie zaobserwowano dla prepregu o gramaturze wynoszącej 150 g/m<sup>2</sup>.



**Rys.** 77. Zmarszczki powstałe po procesie konsolidacji w przypadku próbek o kącie rozwarcia ramion  $\alpha$  wynoszącym 90° i promieniu krzywizny  $R_i 12 mm$  (od lewej) oraz promieniu krzywizny  $R_i 36$  (od prawej)

Czas laminowania pojedynczej warstwy był mniejszy dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, który o wiele łatwiej było uformować wokół krzywizny. Uwzględniając całościowy czas trwania procesu, wytworzenie próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wymagało więcej czasu i pracy, niż w przypadku prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, co wynika w oczywisty sposób z większej ilości warstw oraz większej ilości procesów konsolidacji. Pod kątem czasu pracy, bardziej ekonomiczne rozwiązanie stanowi prepreg o większej gramaturze.

Zdjęcia wszystkich próbek po procesie laminowania, przed ostatnią konsolidacją, zestawiono w Załączniku nr 1. Załącznik nr 1 zawiera również zdjęcia próbek po ostatniej konsolidacji, a przed przygotowaniem pakietu próżniowego. W przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, po procesie konsolidacji widoczne są zmarszczki powstałe w trakcie zagęszczania warstw. Dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, nie zaobserwowano powstawania zmarszczek materiału w okolicy promienia po procesie konsolidacji.

Po odpowiednim uformowaniu i konsolidacji wszystkich warstw, formy wraz z wyłożonym materiałem zamknięto w pakietach podciśnieniowych przy użyciu odpowiednich materiałów funkcyjnych. Dla wszystkich próbek z obu prepregów użyto identycznego układu pakietu podciśnieniowego. Bezpośrednio na prepreg wyłożono tkaninę delaminażową, aby uzyskać jednorodną powierzchnię o założonej chropowatości. Była to perforowana tkanina szklana, pokryta teflonem, o bardzo małej grubości i dobrych właściwościach antyadhezyjnych, umożliwiająca swobodny przepływ powietrza oraz żywicy. Następnie na formy nałożono folię oddzielającą, oraz włókninę typu breather z tworzywa PES, umożliwiającą przepływ powietrza wewnątrz pakietu podciśnieniowego. Całość zamknięto wewnątrz worka wykonanego z folii poliamidowej i uszczelniono przy użyciu taśmy butylokauczukowej. Połączenie z aparaturą podciśnieniową autoklawu zapewniały 2 zawory umieszczone wewnątrz każdego z pakietów. Każda z form została zamknięta wewnątrz indywidualnego pakietu podciśnieniowego. Formy w trakcie przygotowywania pakietów przedstawiono na Rys. 78.



Rys. 78. Formy w trakcie przygotowywania pakietów podciśnieniowych

Po przygotowaniu pakietów podciśnieniowych, próbki zostały utwardzone w autoklawie znajdującym się na wyposażeniu ŚCNTPL. Autoklaw firmy Scholz o średnicy 2500 mm i długości 5000 mm zapewnił przeprowadzenie procesu utwardzania próbek w ściśle określonych parametrach ciśnienia i temperatury, ze stale monitorowanym podciśnieniem generowanym wewnątrz pakietów podciśnieniowych. Duże rozmiary autoklawu pozwoliły na utwardzenie wszystkich próbek wykonanych z danego prepregu w jednym procesie. Formy wewnątrz autoklawu przedstawiono na Rys. 79. Parametry procesu EPOXY75/150, zaprojektowanego dla wybranych prepregów opisano w rozdziale 7. Wszystkie parametry przeprowadzonych procesów zostały zarejestrowane przez system autoklawu. Oryginalne wykresy przebiegu procesu utwardzania dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 80, a dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> na Rys. 81.



**Rys.** 79. Formy w pakietach podciśnieniowych w autoklawie Śląskiego Centrum Naukowo-Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o.



Rys. 80. Przebieg procesu utwardzania próbek zawierających krzywizny z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 81**. Przebieg procesu utwardzania próbek zawierających krzywizny z prepregu o gramaturze  $150 \text{ g/m}^2$ 

#### 8.3.3. Kontrola wizualna i wymiarowa wytworzonych próbek

Kontrola jakości stanowi istotny element procesu wytwarzania wyrobów kompozytowych. Inspekcja pozwala wykryć wady wynikające zarówno z błędów podczas formowania, jak i z problemów z użytym materiałem. Dodatkowo, dokładna kontrola wyrobów wytworzonych z różnych materiałów, przy zachowaniu identycznych parametrów procesu, pozwala odnotować różnice pomiędzy wykorzystanymi

materiałami. Z tego powodu, przed przystąpieniem do badań CBS, wytworzone próbki poddano dokładnej, wieloaspektowej kontroli, mającej na celu wykrycie ewentualnych defektów oraz różnic pomiędzy wykorzystanymi materiałami. Każdą wytworzoną płytę, zawierającą próbki do badania wytrzymałości CBS poddano więc dokładnej kontroli wizualnej okiem nieuzbrojonym oraz kontroli wymiarowej przy użyciu narzędzi pomiarowych: mikrometru, suwmiarki i kątomierza. Następnie ten sam proces powtórzono dla wyciętych próbek. Dla dokładnej oceny i porównania wytworzonych próbek, wyznaczono także gęstość wykonanych kompozytów oraz udziały objętościowe osnowy i zbrojenia. Aby ocenić próbki pod kątem struktury i występowania defektów, wykonano badania metodą aktywnej termografii w podczerwieni oraz tomografii komputerowej.

Procedura kontroli prowadzona zgodnie z wymogami technologicznymi firmy miała na celu dostarczenie wytycznych dla przyszłych celów wdrożeniowych.

Po utwardzeniu próbek w autoklawie, usunięto pakiety podciśnieniowe i z każdej formy zdjęto płytę zawierającą 5 próbek dla danej geometrii krzywizny. Próbki oznaczono i w pierwszej kolejności dokonano oceny wizualnej.

Od strony formy wszystkie płyty były gładkie, z dobrze widocznym przebiegiem włókien węglowych. Zarówno dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, jak i 150 g/m<sup>2</sup>, na żadnej z płyt nie zauważono żadnych defektów ani zaburzeń w ułożeniu włókien po wewnętrznej stronie.

Zewnętrzna powierzchnia wykonanych płyt była chropowata na skutek zastosowania tkaniny delaminażowej. Dla części próbek zaobserwowano zmarszczki powstałe od strony pakietu podciśnieniowego w obszarze krzywizny. Zmarszczki powstały na płytach wykonanych z obydwu prepregów, były jednak wyraźnie większe, występujące w większej ilości i dla większej liczby układów geometrii krzywizny w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Przykład zmarszczek dla identycznego układu geometrii krzywizny dla próbek wykonanych z prepregów o obydwu gramaturach przedstawiono na Rys. 82. W przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, powstawanie zmarszczek zaobserwowano już na etapie laminowania, po procesach konsolidacji. Zestawienie poszczególnych geometrii krzywizny dla których zaobserwowano zmarszczki przedstawiono w Tabeli 23. Powstawanie zmarszczek było także zależne od geometrii krzywizny: więcej zmarszczek tworzyło się na próbkach o promieniu krzywizny wynoszącym 36 mm, chociaż były one mniejsze i bardziej łagodne niż zmarszczki powstające dla mniejszych promieni. Również w tym przypadku, więcej zmarszczek powstało w układach o większej długości łuku krzywizny. W przypadku obydwu prepregów, zmarszczki powstałe na próbkach o katach rozwarcia ramion wynoszących 120° i 150° były wyraźnie widoczne, ale jednak mniejsze i słabiej wyczuwalne, niż w przypadku próbek o kącie rozwarcia ramion 90°, dla których zmarszczki były wyraźnie większe i bardziej wyczuwalne. Najbardziej prawdopodobną przyczyną powstania zmarszczek było wytworzenie naddatku materiału na skutek

zmniejszania promienia zewnętrznych warstw w trakcie procesu utwardzania, przy dodatkowo powstających naprężeniach ściskających, wywołanych oddziaływaniem ciśnienia w obrębie promienia. Przy niskiej sztywności prepregu oraz utrudnionemu przesuwaniu się warstw względem siebie, powstały w ten sposób naddatek materiału spowodował powstanie zmarszczek przy zewnętrznej powierzchni próbki. Dodatkowo, do powstawania zmarszczek przyczynić mogło się także rozszerzanie się aluminiowych form w warunkach wysokiej temperatury w procesie utwardzania, a następnie ich skurcz w trakcie chłodzenia, jest to jednak hipoteza mniej prawdopodobna ze względu na występowanie zmarszczek tylko w obrębie zewnętrznych warstw oraz widocznej zależności powstawania zmarszczek od geometrii krzywizny, nie można jednak zapomnieć o wpływie rozszerzalności cieplnej aluminium na naprężenia powstające w wyrobach kompozytowych w trakcie utwardzania. Aby jednak sprawdzić prawdziwość tej hipotezy, należałoby przeprowadzić dodatkowe testy, uwzględniające różne materiały formy.



**Rys. 82.** Zmarszczki powstałe w obszarze promienia na próbkach o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>12: od lewej próbki wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, od prawej próbki wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Zmarszczki widoczne na próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> są wyraźnie większe

Kąt rozwarcia / Gramatura	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>
a90°	R <i>i</i> 36, R <i>i</i> 12 i R <i>i</i> 4	R <i>i</i> 36 i R <i>i</i> 12
α120°	R <i>i</i> 36, R <i>i</i> 12 i R <i>i</i> 4	$R_i$ 36, $R_i$ 12 (niewielkie)
a150°	$R_i$ 36, $R_i$ 12 (niewielkie)	R <i>i</i> 36

Tabela 23. Geometrie krzywizny, na których zaobserwowano zmarszczki podczas kontroli wizualnejpróbek wykonanych z obu badanych prepregów

Na płytach wykonanych z obydwu badanych materiałów zaobserwowano ponadto drobne, ledwo wyczuwalne zmarszczki w obszarze ramion próbek, jak pokazano na Rys. 83. Zgrubienia te są najprawdopodobniej wynikiem zmarszczenia się w tych miejscach materiałów pomocniczych, wchodzących w skład pakietu podciśnieniowego. Działanie pakietu podciśnieniowego mogło też mieć pewien wpływ na kształt i przebieg (raczej nie na wielkość) opisywanych wcześniej zmarszczek występujących w obszarach krzywizn.



*Rys. 83.* Drobne zmarszczki i zgrubienia powstałe w obszarze ramion próbek na skutek pomarszczenia materiałów pomocniczych, tworzących pakiet podciśnieniowy

Zdjęcia płyt po utwardzeniu, dla wszystkich układów geometrii krzywizny, wykonanych z obydwu prepregów, zestawiono w Załączniku nr 2.

Po kontroli wizualnej utwardzonych płyt, dokonano pomiarów grubości w pięciu miejscach wokół obwodu każdej płyty przy użyciu mikrometru Insize IP 54. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, wyznaczono średnią grubość każdej płyty oraz grubość jednej warstwy po utwardzeniu. Wyniki pomiarów grubości zakrzywionych płyt, wykonanych z materiałów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono odpowiednio w Tabeli 24 i Tabeli 25.

Materiał 75 g/m <sup>2</sup>		Р	omiar [mn	ן		Średnia	Ochylenie	Współczynnik	Grubość jednej
Płyta - kąt rozwarcia i promień gięcia	1	2	3	4	5	[mm] standardowe		Zmienności CV [%]	[mm]
α180°	2,019	2,023	2,058	2,069	2,026	2,039	0,023	1,12	0,078
α90°, R <sub>i</sub> 4	2,035	2,076	2,030	2,062	2,050	2,051	0,019	0,93	0,079
α90°, R <sub>i</sub> 12	2,011	2,049	2,032	2,051	2,052	2,039	0,018	0,87	0,078
α90°, R <sub>i</sub> 36	2,046	2,038	2,019	2,050	2,030	2,037	0,012	0,61	0,078
α120°, R <sub>i</sub> 4	2,055	2,057	2,022	2,033	2,038	2,041	0,015	0,73	0,079
α120°, R <sub>i</sub> 12	2,033	2,050	2,063	2,044	2,032	2,044	0,013	0,63	0,079
α120°, R <sub>i</sub> 36	2,041	2,042	2,067	2,076	2,073	2,060	0,017	0,83	0,079
α150°, R <sub>i</sub> 4	2,081	2,044	2,050	2,063	2,076	2,063	0,016	0,78	0,079
α150°, R <sub>i</sub> 12	2,018	2,069	2,045	2,023	2,070	2,045	0,025	1,20	0,079
α150°, R <sub>i</sub> 36	2,046	2,066	2,032	2,029	2,064	2,047	0,017	0,85	0,079

**Tabela 24**. Wyniki pomiarów grubości zakrzywionych płyt, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>

Materiał 150 g/m <sup>2</sup>		Ρ	omiar (mn	n]		Średnia Ochylenie		Współczynnik Grubość jed	
Płyta - kąt rozwarcia i promień gięcia	1	2	3	4	5	[mm]	standardowe	[%]	[mm]
α180°	1,826	1,821	1,808	1,827	1,821	1,821	0,008	0,42	0,140
α90°, R <sub>i</sub> 4	1,812	1,815	1,816	1,815	1,820	1,816	0,003	0,16	0,140
α90°, R <sub>i</sub> 12	1,835	1,818	1,821	1,813	1,814	1,820	0,009	0,49	0,140
α90°, R <sub>i</sub> 36	1,830	1,824	1,818	1,831	1,814	1,823	0,007	0,41	0,140
α120°, R <sub>i</sub> 4	1,820	1,818	1,831	1,823	1,826	1,824	0,005	0,28	0,140
α120°, R <sub>i</sub> 12	1,833	1,824	1,833	1,837	1,846	1,835	0,008	0,43	0,141
α120°, R <sub>i</sub> 36	1,813	1,813	1,821	1,827	1,832	1,821	0,008	0,46	0,140
α150°, R <sub>i</sub> 4	1,838	1,822	1,824	1,832	1,816	1,826	0,009	0,47	0,140
α150°, R <sub>i</sub> 12	1,828	1,835	1,827	1,823	1,822	1,827	0,005	0,28	0,141
α150°, R <sub>i</sub> 36	1,831	1,815	1,816	1,823	1,824	1,822	0,007	0,36	0,140

Tabela 25. Wyniki pomiarów grubości zakrzywionych płyt, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>

Jak przedstawiono powyżej, grubości poszczególnych płyt, wytworzonych z danego materiału są do siebie podobne. W przypadku płyt wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, najmniejsza średnia grubość wynosiła 2,037 mm, a największa 2,063 mm. Różnica pomiędzy najmniejszą a największą średnią grubością płyty wynosiła 0,026 mm. Odpowiada to 0,336 grubości jednej warstwy. Dodatkowo, rozrzut uzyskanych wyników dla każdej z płyt był mały. W przypadku płyt wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, najmniejsza średnia grubość wynosiła 1,816 mm, a największa 1,835 mm. Różnica pomiędzy najmniejszą a największą średnią grubością płyty wynosiła 0,019 mm. Odpowiada to 0,244 grubości jednej warstwy. Grubość płyt wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> różniła się jednak od grubości płyt wykonanych z materiału 75 g/m<sup>2</sup>, pomimo teoretycznie jednakowej ilości włókien węglowych. Świadczy to zatem o mniejszym udziale objętościowym żywicy w płytach wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> i wynika z różnego udziału masowego żywicy w wykorzystanych prepregach.

Dokonano także pomiarów masy wszystkich wykonanych płyt zawierających krzywizny przy użyciu wagi laboratoryjnej Radwag WLC 1/A2/C/2. Wyniki pomiarów dla zakrzywionych płyt, wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono odpowiednio w Tabeli 26 i Tabeli 27. Wahania masy pomiędzy poszczególnymi płytami wykonanymi z tego samego prepregu były bardzo małe, co świadczy o zbliżonym udziale żywicy i włókien oraz jednorodności uzyskanych próbek dla każdego z materiałów. Średnia masa płyt wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wynosiła 240,901 g. Średnia masa płyt wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wynosiła 219,691 g, a zatem o 21,21 g mniej niż dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Zakładając jednakową masę włókien weglowych w płytach wykonanych z obydwu prepregów, świadczy to o mniejszym udziale żywicy w płytach z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Dla potwierdzenia, na podstawie masy zakrzywionych płyt i znajomości gramatury wykorzystanych prepregów, dokonano także wstępnych, szacunkowych obliczeń udziału masowego żywicy w utwardzonych płytach. Wyniki te również przedstawiono w Tabeli 26 i Tabeli 27. Do wyznaczenia udziału masowego żywicy w płytach wykorzystano wzór:

$$W_m = \left[\frac{M - (N * A * A_r)}{M}\right] * 100\%$$
(26)

gdzie:

 $W_m$  – udział masowy żywicy [%],

*M* – masa płyty [g],

N-ilość warstw,

A – pole powierzchni płyty [m2],

 $A_r$  – gramatura wykorzystanego prepregu [g/m<sup>2</sup>].

Udział masowy żywicy w płytach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wahał się od 36,12% do 36,97% a średni udział masowy wyniósł 36,54%. Udział masowy żywicy w płytach wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wahał się od 30,17% do 30,65%, a średni udział wyniósł 30,41%. Wstępne obliczenia wykazały znaczącą różnicę zawartości żywicy w płytach wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup>, którą należy uwzględnić w dalszych etapach badania i obliczeniach. Różnica ta wynika najprawdopodobniej z różnego fabrycznego udziału masowego żywicy w wykorzystanych prepregach.

Materiał 75 g/m <sup>2</sup>	Masa płyty M llość warstw N		Pole powierzchni	Gramatura A <sub>r</sub>	Udział masowy żywicy
Płyta - kąt rozwarcia i promień gięcia	[g]		płyty A [m²]	[g/m²]	W <sub>m</sub> [%]
α180°	242,557	26	0,078	75	36,97
α90°, R <sub>i</sub> 4	240,462	26	0,078	75	36,42
α90°, R <sub>i</sub> 12	240,262	26	0,078	75	36,37
α90°, R <sub>i</sub> 36	240,312	26	0,078	75	36,38
α120°, R <sub>i</sub> 4	239,703	26	0,078	75	36,22
α120°, R <sub>i</sub> 12	239,314	26	0,078	75	36,12
α120°, R <sub>i</sub> 36	241,693	26	0,078	75	36,75
α150°, R <sub>i</sub> 4	241,822	26	0,078	75	36,78
α150°, R <sub>i</sub> 12	242,022	26	0,078	75	36,83
α150°, R <sub>i</sub> 36	240,867	26	0,078	75	36,53

 Tabela 26. Masa płyt oraz wyznaczony na podstawie wstępnej kontroli udział masowy żywicy w płytach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>

Materiał					Udział
150 g/m <sup>2</sup>	Masa	Ilość	Pole	Gramatura	masowy
Płyta - kąt	płyty M	warstw	powierzchni	A <sub>r</sub>	żywicy
rozwarcia i promień	[g]	Ν	płyty A [m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	W <sub>m</sub>
gięcia					[%]
α180°	219,612	13	0,078	150	30,39
α90°, R <sub>i</sub> 4	218,960	13	0,078	150	30,18
α90°, R <sub>i</sub> 12	218,930	13	0,078	150	30,17
α90°, R <sub>i</sub> 36	219,349	13	0,078	150	30,30
α120°, R <sub>i</sub> 4	220,453	13	0,078	150	30,65
α120°, R <sub>i</sub> 12	220,179	13	0,078	150	30,57
α120°, R <sub>i</sub> 36	220,276	13	0,078	150	30,60
α150°, R <sub>i</sub> 4	219,954	13	0,078	150	30,49
α150°, R <sub>i</sub> 12	219,988	13	0,078	150	30,51
α150°, R <sub>i</sub> 36	219,205	13	0,078	150	30,26

Tabela 27. Masa płyt oraz wyznaczony na podstawie wstępnej kontroli udział masowy żywicy w płytachwykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m²

Po przeprowadzeniu kontroli jakości utwardzonych płyt, z każdej wycięto po 5 próbek, zgodnie z zaprojektowanymi wymiarami i trasami oznaczonymi na formach. Dodatkowo, podczas wycinania próbek do badań wytrzymałości belek zawierających krzywizny, z każdej płyty wycięto także próbkę o wymiarach 10 x 20 mm do wyznaczenia gęstości oraz próbkę szerokości 15 mm do badania metodą tomografii komputerowej. Do wycinania próbek użyto tarczy diamentowych, które zapewniają dobrą jakość obcinanych krawędzi i pozwalają uniknąć powstawania delaminacji, strzępienia lub innych defektów.

Próbki po wycinaniu poddano ponownie kontroli wizualnej, ze szczególnym uwzględnieniem obszaru krzywizny. Widok przekrojów wzdłużnych potwierdził istnienie zmarszczek w obszarze promienia na niektórych próbkach, przy czym zmarszczki większych rozmiarów zaobserwowano na próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Porównanie obszarów krzywizny dla próbek o jednakowym układzie geometrii, wykonanych z materiału o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 84. Zdjęcia obszarów krzywizny, wykonane w skali makro przy użyciu aparatu fotograficznego, przedstawiające wszystkie wytworzone próbki, zestawiono z Załączniku nr 2.



**Rys. 84**. Obszary krzywizny próbek o kącie pomiędzy ramionami  $\alpha$  90° i promieniu wewnętrznym  $R_i 12 \text{ mm: } a$ ) materiał o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, b) materiał o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>
Docięte próbki poddano dokładnej kontroli wymiarowej. Przy użyciu mikrometru Insize IP 54, dla każdej próbki wykonano po 10 pomiarów grubości w obszarze ramion (po 5 pomiarów na każde ramię), omijając obszar promienia. Następnie wykonano po 5 pomiarów grubości obszaru promienia przy użyciu suwmiarki Mahr Marcal 16 EWR (dla próbek płaskich wykonano tylko 10 pomiarów grubości z obszaru płaskiego). Schemat przeprowadzonych pomiarów grubości przedstawiono na Rys. 85.



*Rys.* 85. Schemat przeprowadzonych pomiarów grubości (P – pomiar w obszarze promienia, R – pomiar w obszarze ramion)

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, dla każdej próbki obliczono średnią grubość z 15 pomiarów, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności. Następnie z wyznaczonych współczynników zmienności obliczono średni współczynnik zmienności CV dla każdego układu geometrii dla próbek wykonanych z obu badanych prepregów. Wyznaczono także średnią grubość z obszaru płaskiego oraz z obszaru promienia dla każdego układu geometrii krzywizny. Wyniki przedstawiono w Tabeli 28.

Układ geometrii	Średnie CV ( [%	dla 5 próbek %]	Średnia ramior	grubość n [mm]	Średnia grubość promienia [mm]		
	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>	
α180°	0,76	0,67	2,035	1,825	-	-	
α90°, R <sub>i</sub> 4	10,35	1,50	2,047	1,820	2,402	1,847	
α90°, R <sub>i</sub> 12	3,15	1,47	2,038	1,819	2,110	1,828	
α90°, R <sub>i</sub> 36	1,51	1,35	2,033	1,817	2,043	1,802	
α120°, R <sub>i</sub> 4	2,07	2,22	2,034	1,834	2,128	1,852	
α120°, R <sub>i</sub> 12	1,45	1,39	2,015	1,831	2,034	1,794	
α120°, R <sub>i</sub> 36	1,35	1,41	2,066	1,827	2,036	1,828	
α150°, R <sub>i</sub> 4	1,11	1,33	2,049	1,829	2,030	1,795	
α150°, R <sub>i</sub> 12	1,13	1,13 1,27 2,0		1,827	2,016	1,790	
α150°, R <sub>i</sub> 36	0,95	1,15	2,038	1,814	2,016	1,783	

 Tabela 28. Średni współczynnik zmienności grubości próbek, a także średnia grubość z obszaru ramion

 i z obszaru promienia dla każdego układu geometrii krzywizny

Zmiana grubości w obszarze promienia, wyrażona współczynnikiem zmienności, może być miarą jakości wytworzonej krzywizny. W przypadku krzywizn wypukłych, w obszarze promienia dochodzi najczęściej do zmniejszenia grubości. Zmiana grubości jest tym większa, im mniejszy promień krzywizny

Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 28 można stwierdzić, że różnice w grubości dla wszystkich próbek są niewielkie, natomiast w przypadku niektórych promieni pojawiają się istotne różnice grubości w obszarze krzywizny. Największą zmianę grubości w obszarze promienia zaobserwowano dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion wynoszącym 90°. Dla tych próbek zaobserwowano także największe defekty w postaci zmarszczek w trakcie kontroli wizualnej, które w tym przypadku wyraźnie wpłynęły na zróżnicowanie grubości. Dla pozostałych geometrii krzywizny, dla których zaobserwowano mniej wyraźne zmarszczki, wpływ na całościowe zróżnicowanie grubości jest mniejszy. Przeprowadzone pomiary potwierdzają, że wraz ze zwiększeniem promienia krzywizny, zmiana grubości w obszarze promienia jest mniejsza. Poza układami, w których wyraźny jest wpływ zmarszczek powstałych na próbkach z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, nie zaobserwowano istotnego wpływu gramatury użytego materiału na zmianę grubości w obszarze promienia. Dla układów z największym kątem rozwarcia ramion zaobserwowano pocienienie w obszarze promienia, które jest częstym zjawiskiem przy wytwarzaniu krzywizn z wykorzystaniem form wypukłych. Dla pozostałych układów, zaobserwowano niewielką zmianę grubości lub pogrubienie, na które wpływ miały powstałe defekty w postaci zmarszczek. Wykluczając jednak wpływ defektów dla tych układów geometrii, dla których jest on wyraźny, można stwierdzić, że jakość wytworzonych próbek w obszarze krzywizny jest dobra, ponieważ zmiana grubości w obszarze promienia jest bardzo mała.

Dla wytworzonych próbek zaobserwowano także efekt odkształcenia po utwardzeniu, wynikający z naprężeń powstałych w kompozycie podczas utwardzania. Dla każdej z wytworzonych próbek dokonano pomiaru kąta rozwarcia ramion α po utwardzeniu, odformowaniu i wycięciu przy użyciu kątomierza cyfrowego Insize 2172-360A. Następnie dla każdego układu geometrii krzywizny wyznaczono średni kąt rozwarcia pomiędzy ramionami. Zestawienie średnich kątów rozwarcia ramion dla każdego układu geometrii przedstawiono w Tabeli 29. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że geometria krzywizny ma wpływ na naprężenia prowadzące do odkształcenia wyrobu po utwardzeniu. Im mniejszy promień krzywizny, tym większe odkształcenie kąta rozwarcia pomiędzy ramionami od wartości nominalnej. Im mniejszy kąt rozwarcia pomiędzy ramionami, tym większe odkształcenie od wartości nominalnej. Na postawie przeprowadzonych pomiarów można również stwierdzić, że efekt odkształcenia po utwardzeniu jest nieznacznie mniejszy dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, niż z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>.

Układ geometrii	Średni kąt rozwarcia α dla 5 próbek [%]					
8	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>				
α90°, R <sub>i</sub> 4	88,65	89,07				
α90°, R <sub>i</sub> 12	88,80	89,11				
α90°, R <sub>i</sub> 36	88,84	89,16				
α120°, R <sub>i</sub> 4	119,11	119,25				
α120°, R <sub>i</sub> 12	119,15	119,30				
α120°, R <sub>i</sub> 36	119,16	119,34				
α150°, R <sub>i</sub> 4	149,50	149,50				
α150°, R <sub>i</sub> 12	149,55	149,55				
α150°, R <sub>i</sub> 36	149,59	149,63				

 Tabela 29. Średni kąt rozwarcia ramion  $\alpha$  dla każdego układu geometrii

### 8.3.4. Wyznaczenie gęstości

Wyznaczenie gęstości materiału kompozytowego jest istotne dla określenia jakości wytworzonych wyrobów, w tym także dla wyznaczenia udziału objętościowego żywicy oraz włókien. Różnice w gęstości mogą wskazywać na różnice w udziale porowatości czy poszczególnych komponentów tworzących kompozyt. Badanie gęstości wykonano metodą zanurzeniową w oparciu o normy ISO 1183-1: Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics —Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method oraz ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (relative Density) of Plastics by Displacement [202,203].

Gęstość próbek wyznaczono zgodnie ze wzorem:

$$\rho_c = \frac{m_a * \rho_{il}}{(m_a - m_{il})} \tag{27}$$

gdzie:

 $ho_c$  – gęstość badanej próbki [g/cm<sup>3</sup>], m<sub>a</sub> – masa suchej próbki w powietrzu [g], m<sub>il</sub> – masa próbki zanurzonej w cieczy [g],  $ho_{il}$  – gęstość cieczy w temperaturze badania [g/cm<sup>3</sup>].

Podczas wycinania próbek do badań wytrzymałości belek zakrzywionych, z każdej płyty wycięto także po jednej dodatkowej próbce o wymiarach 10 x 20 mm z obszaru położonego jak najbliżej krzywizny, w celu wykonania pomiarów gęstości. Przed przystąpieniem do badania, próbki wygrzewano przez 24 godziny w temperaturze 50°C w celu pozbycia się wilgoci, po czym studzono do temperatury otoczenia w eksykatorze. Do pomiarów masy próbek wykorzystano wagę analityczną, umożliwiającą pomiar masy próbek zanurzonych w cieczy. Ciecz zanurzeniową stanowiła woda destylowana. Pomiarów gęstości dokonano poprzez pomiar masy suchej próbki w powietrzu oraz pomiar masy próbki całkowicie zanurzonej w wodzie. W tracie badania dokonano także pomiaru temperatury wody, która wynosiła 20,5°C. Gęstość wody w tej temperaturze wynosi 0,998103 g/cm<sup>3</sup>.

Wyniki pomiarów gęstości dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 30. Wyniki pomiarów gęstości dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 31.

/ 5 g/m2									
Próbki z prepregu o	Masa suchej próbki	Masa próbki w wodzie	Gęstość próbki						
gramaturze 75 g/m	m <sub>a</sub> [g]	m <sub>il</sub> [g]	ρ <sub>c</sub> [g/cm3]						
α180°	0,6878	0,2407	1,5354						
α90°, R <sub>i</sub> 4	0,6533	0,2301	1,5408						
α90°, R <sub>i</sub> 12	0,6446	0,2266	1,5392						
α90°, R <sub>i</sub> 36	0,6889	0,2373	1,5226						
α120°, R <sub>i</sub> 4	0,6518	0,2283	1,5362						
α120°, R <sub>i</sub> 12	0,6874	0,2402	1,5342						
α120°, R <sub>i</sub> 36	0,6503	0,2273	1,5344						
α150°, R <sub>i</sub> 4	0,6848	0,2356	1,5216						
α150°, R <sub>i</sub> 12	0,6582	0,2284	1,5285						
α150°, R <sub>i</sub> 36	0,6543	0,2274	1,5298						

*Tabela 30.* Wyniki pomiarów gęstości metodą zanurzeniową próbek wykonanych z prepregu o gramaturze

Tabela 31. Wyniki pomiarów gęstości metodą zanurzeniową próbek wykonanych z prepregu o gramaturze

Próbki z prepregu o	Masa suchej	Masa próbki	Gęstość
gramaturze 150	próbki	w wodzie	próbki
g/m²	m <sub>a</sub> [g]	m <sub>il</sub> [g]	ρ <sub>c</sub> [g/cm3]
α180°	0,6067	0,2203	1,5672
α90°, R <sub>i</sub> 4	0,6015	0,2193	1,5708
α90°, R <sub>i</sub> 12	0,6219	0,2257	1,5667
α90°, R <sub>i</sub> 36	0,5943	0,2165	1,5701
α120°, R <sub>i</sub> 4	0,6121	0,2229	1,5697
α120°, R <sub>i</sub> 12	0,6048	0,2187	1,5635
α120°, R <sub>i</sub> 36	0,5888	0,2147	1,5709
α150°, R <sub>i</sub> 4	0,6158	0,2235	1,5667
α150°, R <sub>i</sub> 12	0,5827	0,2103	1,5617
α150°, R <sub>i</sub> 36	0,5877	0,2134	1,5672

Wyniki pomiarów gęstości dla próbek wykonanych z tego samego prepregu są do siebie zbliżone, co świadczy o dobrej jakości i dużej jednorodności wytworzonych kompozytów. O dużej jednorodności świadczy też obecność czynników, mogących zwiększać rozrzut gęstości: wymiary i masę próbek zmniejszono ze względu na ograniczenia użytej wagi analitycznej do pomiaru masy próbek zanurzonych w cieczy. Dodatkowo, gęstość kompozytu może się lokalnie różnić, na skutek między innymi lokalnych odkształceń powierzchni od strony pakietu podciśnieniowego czy lokalnej zmiany udziału komponentów lub obecności defektów. Wyższa gęstość próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150g/m<sup>2</sup> świadczy o większym udziale włókien w stosunku do próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>.

### 8.3.5. Wyznaczenie udziałów objętościowych zbrojenia i osnowy

Udziały objętościowe komponentów w wytworzonych próbkach wyznaczono zgodnie z metodą II z normy ASTM D3171 – 15: Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials [195], zgodnie metodyką opisaną w rozdziale 8.2.2. Do wyznaczenia udziałów masowych oraz objętościowych wykorzystano próbki o wymiarach 10 x 20 mm, wycięte z każdej z płyt o danej geometrii krzywizny, dla których wyznaczono gęstość metodą zanurzeniową. Podczas wykonywania obliczeń pominięto więc wyznaczenie gęstości próbki w sposób obliczeniowy według wzoru (9), a wykorzystano gęstość próbek wyznaczoną w rozdziale 8.3.4. Przed przystąpieniem do badania gęstości wykonano po 5 pomiarów długości, szerokości i grubości każdej z wyciętych próbek przy użyciu mikrometru Insize IP 54 oraz suwmiarki Mahr Marcal 16 EWR oraz wyznaczono średnią wartość każdego z wymiarów. Zgodnie z danymi producenta, gęstość włókien węglowych wynosi 1,80 g/cm<sup>3</sup>, a gęstość żywicy 1,20 g/cm<sup>3</sup>.

Wyznaczone udziały osnowy i zbrojenia dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono w Tabeli 32, a dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w Tabeli 33.

Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>	Gęstość próbki ρ <sub>c</sub> [g/cm3]	Grubość próbki h [mm]	Udział masowy włókien W <sub>r</sub> [%]	Udział masowy żywicy W <sub>m</sub> [%]	Udział objętościowy włókien V <sub>r</sub> [%]	Udział objętościowy żywicy V <sub>m</sub> [%]
<b>α180°</b>	1,5354	2,024	62,75	37,25	53,52	47,67
α90°, R <sub>i</sub> 4	1,5408	2,032	62,28	37,72	53,31	48,43
α90°, R <sub>i</sub> 12	1,5392	2,002	63,28	36,72	54,11	47,10
α90°, R <sub>i</sub> 36	1,5226	2,035	62,94	37,06	53,24	47,03
α120°, R <sub>i</sub> 4	1,5362	2,031	62,50	37,50	53,34	48,00
α120°, R <sub>i</sub> 12	1,5342	2,029	62,64	37,36	53,39	47,76
α120°, R <sub>i</sub> 36	1,5344	2,006	63,35	36,65	54,00	46,86
α150°, R <sub>i</sub> 4	1,5216	2,009	63,79	36,21	53,92	45,91
α150°, R <sub>i</sub> 12	1,5285	2,042	62,48	37,52	53,05	47,80
α150°, R <sub>i</sub> 36	1,5298	2,028	62,86	37,14	53,42	47,35

*Tabela 32.* Udziały masowe i objętościowe włókien ora żywicy w próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>

Próbki z	Gestość	Grubość	Udział	Udział	Udział	Udział
prepregu o	nróhki	Grubosc	masowy	masowy	objętościowy	objętościowy
gramaturze		h [mm]	włókien	żywicy	włókien	żywicy
150 g/m <sup>2</sup>			W <sub>r</sub> [%]	W <sub>m</sub> [%]	V <sub>r</sub> [%]	V <sub>m</sub> [%]
α180°	1,5672	1,794	69,36	30,64	60,39	40,02
α90°, R <sub>i</sub> 4	1,5708	1,798	69,04	30,96	60,25	40,52
α90°, R <sub>i</sub> 12	1,5667	1,801	69,11	30,89	60,15	40,33
α90°, R <sub>i</sub> 36	1,5701	1,763	70,45	29,55	61,45	38,67
α120°, R <sub>i</sub> 4	1,5697	1,789	69,44	30,56	60,56	39,98
α120°, R <sub>i</sub> 12	1,5635	1,797	69,42	30,58	60,30	39,84
α120°, R <sub>i</sub> 36	1,5709	1,767	70,26	29,74	61,32	38,93
α150°, R <sub>i</sub> 4	1,5667	1,793	69,40	30,60	60,41	39,95
α150°, R <sub>i</sub> 12	1,5617	1,802	69,29	30,71	60,12	39,97
α150°, R <sub>i</sub> 36	1,5672	1,799	69,17	30,83	60,22	40,27

**Tabela 33**. Udziały masowe i objętościowe włókien ora żywicy w próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>

Zawartości komponentów w próbkach wykonanych z tego samego prepregu są do siebie zbliżone, a niewielkie różnice mogą wynikać ze stosunkowo małych rozmiarów badanych próbek. W próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> udział objętościowy żywicy jest większy niż w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Wyznaczone udziały komponentów potwierdzają obserwacje odnotowane na wcześniejszych etapach kontroli. Różnice w zawartości żywicy oraz kompozytów wykonanych włókien dla Z dwóch badanych materiałów są najprawdopodobniej wynikiem różnic zawartości masowej żywicy w prepregu. Ponieważ właściwości kompozytów silnie zależa od zawartości osnowy oraz zbrojenia, moga one mieć wpływ na przeprowadzone badania mechaniczne, co należy uwzględnić, analizując wyniki tych badań.

### 8.3.6. Badania nieniszczące – aktywna termografia w podczerwieni

Kontrolę jakości wytworzonych struktur zawierających krzywizny przeprowadzono metodą aktywnej termografii w podczerwieni (IrNDT) w celu identyfikacji defektów mających charakter nieciągłości. Metoda ta pozwala na bezstykową kontrolę struktury wewnętrznej materiałów mających możliwość emisji i absorpcji ciepła przy użyciu kamery termowizyjnej. W zależności od konkretnego zastosowania i badanego obiektu stosuje się rożne procedury pomiaru aktywnej termografii, które dzieli się w zależności od rodzaju wzbudzenia, układu stanowiska pomiarowego oraz metody i strefy wzbudzenia cieplnego badanego obiektu, co przedstawiono na Rys. 86 [204-206].



Rys. 86. Możliwe procedury termografii w podczerwieni

Inspekcję próbek do badań wytrzymałości belek zakrzywionych wykonano stosując metodę aktywną, polegającą na wykorzystaniu dodatkowego źródła wzbudzenia cieplnego. Źródło stymulacji cieplnej stanowiło promieniowanie emitowane przez lampę halogenową. Badanie prowadzono metodą odbiciową, w której źródło ciepła oraz urządzenie rejestrujące znajdują się po tej samej stronie badanego obiektu. IrNDT można także podzielić w zależności od sygnału wzbudzającego. Sygnał w przeprowadzonej inspekcji miał postać sinusoidalną (tzw. Metoda Lock-In) [204-206].

Chociaż termografia jest stosunkowo tanią i łatwo dostępną metodą badań nieniszczących, dobór prawidłowej metody i parametrów badania jest zależny od wielu czynników. Należy uwzględnić rodzaj badanego materiału, grubość oraz inne cechy geometryczne badanego obiektu, a także wpływ czynników i środowiska zewnętrznego, które mogą powodować zakłócenia pomiarów. Dla uzyskania prawidłowych rezultatów, istotny jest także dobór odpowiedniej metody analizy otrzymanych termogramów. Mnogość czynników warunkujących uzyskanie prawidłowych wyników sprawia, że prowadzenie badań nieniszczących metodą aktywnej termografii wymaga dużej wiedzy i doświadczenia. Dodatkowo, metoda ta często nie pozwala wykryć defektów o bardzo małych rozmiarach, położonych na dużej głębokości. Ze względu na dużą ilość czynników warunkujących prawidłowe przeprowadzenie badania, w ramach pracy przeprowadzono porównanie wyników uzyskanych metodą aktywnej termografii z obrazami otrzymanymi metodą tomografii komputerowej [204-206].

Każdą z wytworzonych belek zawierających krzywizny, stanowiących próbki do badań wytrzymałości CBS, zbadano wcześniej metodą IrNDT. Podczas poszukiwania prawidłowych parametrów badania, pozwalających na właściwe zobrazowanie interesujących obszarów, konieczne było uwzględnienie geometrii próbek. Ze względu

na obecność krzywizny, napotkano trudności w równomiernym nagrzewaniu całego obszaru próbki, z kolei mała szerokość próbki, wynosząca 25 mm, wymagała takiego przygotowania stanowiska do badań oraz analizy danych, aby w jak największym stopniu wyeliminować wpływ czynników zewnętrznych. Sygnał wzbudzający generowano przy wykorzystaniu lampy halogenowej HEDLER H 25s o mocy maksymalnej 2500 W. Do rejestracji promieniowania podczerwonego wykorzystano kamerę termowizyjną FLIR A615. Wszystkie próbki badano metodą odbiciową, w której lampę halogenową umieszczono bezpośrednio nad kamerą termowizyjną. Próbki umieszczano naprzeciw kamery, na platformie zbudowanej z płyt wiórowych i spienionego polistyrenu w taki sposób, aby wierzchołek próbki znajdował się w odległości 450 mm od kamery. Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono kalibrację parametrów pomiarowych, obejmującą wyznaczenie emisyjności badanego obiektu oraz temperaturę odbicia. Procedurę przeprowadzonej inspekcji przedstawiono na Rys. 87. Stanowisko do aktywnej termografii próbek zawierających krzywizny przedstawiono na Rys. 88. Wszystkie pomiary przeprowadzono w stałych warunkach środowiskowych (temperatura:  $21^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , wilgotność  $60\% \pm 5\%$ ).



Rys. 87. Procedura IrDT metodą odbiciową



Rys. 88. Stanowisko IrNDT próbek do badań wytrzymałości belek zakrzywionych

Do sterowania przebiegiem badania, rejestracji i przetwarzania obrazów wykorzystano oprogramowanie firmy Automation Technology. Do stymulacji cieplnej badanych próbek wykorzystano metodę Lock-In z sinusoidalnym sygnałem wzbudzającym. Do odpowiedniego wzbudzenia próbki wykorzystano 16 cykli, czas pojedynczego cyklu wynosił 5 sekund. Do oceny otrzymanych termogramów użyto metody Single Frequency DFT.

Na podstawie badań metodą aktywnej termografii, przeprowadzonej zgodnie z opisanymi parametrami, nie wykryto żadnych defektów wewnątrz wytworzonych próbek. Nie zaobserwowano również żadnych poważniejszych zaburzeń w ułożeniu włókien zbrojących, również w obszarach widocznych zmarszczek, za wyjątkiem próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion  $\alpha$  wynoszącym 90° i promieniu krzywizny R<sub>i</sub>4, dla których oprócz wyraźnie widocznej i dużej zmarszczki widoczne jest także odkształcenie włókien wokół promienia. Dla próbek tej samej geometrii, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, widoczne jest podobne odkształcenie, jednak zachodzące w dużo mniejszym stopniu. Porównanie próbek o geometrii krzywizny  $\alpha$ 90°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z obu prepregów, przedstawiono na Rys. 89.



**Rys. 89.** Obraz termograficzny - przykłady próbek o geometrii krzywizny  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i4$ : u góry próbka wykonana z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, na dole próbka wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>

Na próbkach przedstawionych na Rys. 89 można jednak zaobserwować, że zaburzenie ułożenia włókien dotyczy raczej samej krzywizny, a nie powstałych zmarszczek. Na pozostałych próbkach również nie zaobserwowano żadnych zaburzeń ułożenia włókien wokół zmarszczek, można więc przypuszczać, że mają one raczej charakter powierzchniowy. Niestety dokładna ocena ich głębokości przy zastosowanych parametrach badania jest niemożliwa.

Badanie metodą aktywnej termografii przy zastosowanych parametrach pozwoliło również na dobre zobrazowanie wszystkich defektów powierzchniowych. Na uzyskanych obrazach w dokładny sposób widoczny jest przebieg i rozmieszczenie wszystkich powstałych zmarszczek, również tych, których nie wykryto podczas inspekcji wizualnej okiem nieuzbrojonym. Ponadto, zaobserwowano obecność kilku innych defektów

na powierzchni próbek. Należą do nich drobne powierzchniowe zmarszczki (Rys. 90), delikatne, punktowe wgniecenia (Rys. 91) czy pofalowanie powierzchni próbki (Rys. 92). We wszystkich omawianych przypadkach, źródłem powstałych defektów są materiały pomocnicze, użyte do budowy pakietu podciśnieniowego. Drobne zmarszczki i pofalowania powierzchni powstały na skutek pofalowania bądź zagniecenia materiałów tworzących pakiet podciśnieniowy, wgniecenia z kolei powstały na skutek obecności zanieczyszczeń pochodzenia produkcyjnego we włókninie typu breather.



**Rys. 90**. Obraz termograficzny - zaobserwowana na próbce P5 wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> o geometrii krzywizny α120°, R<sub>i</sub>4 drobna zmarszczka, powstałą na skutek zagniecenia materiałów pomocniczych



**Rys. 91.** Obraz termograficzny - zaobserwowane na próbce P2 wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> o geometrii krzywizny  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i4$  punktowe wgniecenie, widoczne jako ciemna plama na lewym ramieniu próbki



**Rys. 92**. Obraz termograficzny - zaobserwowane na próbce P1 wykonanej z prepregu o gramaturze  $150 \text{ g/m}^2$  o geometrii krzywizny  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i 12$  pofalowanie powierzchni, widoczne w lewym dolnym rogu

Obrazy z inspekcji wszystkich próbek zestawiono w Załączniku nr 3. Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że próbki nie zawierają żadnych defektów wewnątrz struktury, a zaobserwowane wady mają charakter powierzchniowy, za wyjątkiem próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ , R<sub>i</sub>4, dla których widoczne jest odkształcenie włókien, mogące sięgać w głąb próbki. Defekty w postaci zmarszczek układają się w sposób losowy na próbkach tego samego rodzaju, a zaburzenie to ma charakter lokalny. Obserwując rozkład i intensywność zmarszczek powstałych w trakcie produkcji, wydaje się że zjawisko to ma poważniejszy charakter dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, niż dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, jednakże na podstawie wykonanego badania nie można określić głębokości zmarszczek.

### 8.3.7. Tomografia komputerowa

Tomografia komputerowa (*ang. CT – Computed Tomography*) jest szeroko stosowana jako metoda diagnostyczna w medycynie oraz w wielu gałęziach nauki i przemysłu. W ostatnich latach zyskuje także coraz większe znaczenie wśród metod badań materiałów kompozytowych. W metodzie tej wykorzystuje się promieniowanie rentgenowskie, które skanuje próbkę umieszczoną na stole rotacyjnym, a następnie jest wyłapywane przez odpowiednie detektory. Na podstawie różnic zaabsorbowanego promieniowania rentgenowskiego tworzone są obrazy badanej próbki, nazywane tomogramami. Poprzez obrót próbki i skanowanie pod różnymi kątami, a następnie komputerowe przetwarzanie uzyskanych obrazów, możliwe jest uzyskanie obrazu 3D badanego przedmiotu [207-211].

Metoda CT stanowi niezwykle skuteczny sposób oceny jakości wytworzonych kompozytów. Pozwala nie tylko wykryć istniejące defekty, ale też uzyskać kompletny obraz przestrzenny badanego przedmiotu, włącznie z przestrzennym rozmieszczeniem włókien zbrojących, a także pustek. Co więcej, uzyskane obrazy 3D mogą być wykorzystywane do tworzenia modeli przestrzennych wyrobów, które następnie mogą zostać użyte w procesach projektowania i analizy z uwzględnieniem rzeczywistej struktury wyrobów. Rozwój tomografii komputerowej pozwolił także na prowadzenie badań środowiskowych w warunkach obciążenia lub zmiennej temperatury, w których materiał badany jest w trakcie narażenia, dzięki czemu możliwa jest obserwacja zmiany ułożenia włókien oraz struktury w trakcie inicjacji pęknięć, prowadząca do poznania natury powstających zniszczeń. CT może być też wykorzystywana do oceny jakości wytworzonych wyrobów pod kątem obecności pustek i porowatości, zarówno w sposób ilościowy, jak i do określenia geometrii i lokalizacji pustek, która ma istotne znaczenie dla właściwości mechanicznych kompozytu. Próbki do badań metodą tomografii komputerowej nie wymagają żadnego specjalnego przygotowania, dlatego może to być bardzo dobra metoda badań nieniszczących wytworzonych wyrobów. Ograniczenie stanowią tu jedynie wymiary przestrzeni roboczej tomografu, która w wielu urządzeniach wciąż nie jest zbyt duża. Ponadto, dla uzyskania obrazów wysokiej rozdzielczości, badane obiekty muszą być na tyle małe, aby w całości znaleźć się w polu widzenia detektora. Podczas badania dużych obiektów uzyskiwane są więc mniejsze rozdzielczości obrazów. Ciągły rozwój CT prowadzi jednak do systematycznego zwiększania wymiarów badanych obiektów oraz zmniejszania czasu badania [207-211].

Dla dokładnej oceny struktury oraz jakości obszaru krzywizny wytworzonych struktur zakrzywionych, przeprowadzono badania metodą tomografii komputerowej. Ze względu na rozmiary przestrzeni roboczej tomografu, konieczne było ograniczenie wymiarów próbek, dlatego też przeprowadzone badania nie miały charakteru nieniszczącego. Stanowiły jednak badanie obszaru reprezentatywnego, pozyskanego z tych samych płyt co próbki do badań wytrzymałości zakrzywionych belek.

Badania strukturalne obszaru krzywizny próbek metodą CT wykonano w Laboratorium Naukowo-Dydaktycznym Nanotechnologii i Technologii Materiałowych na Wydziale

Politechniki Śląskiej. Mechanicznym Technologicznym Badania wykonano z wykorzystaniem tomografu komputerowego Nikon XT H 225 St 2x. Podstawki, na których ustawiono próbki do badań, wykonano z poliestru ekstrudowanego. Badanie zostało wykonane z wykorzystaniem anody molibdenowej stałej, odbiciowej. Skan tomograficzny został wykonany przy napięciu katody równym 60kV oraz mocy 4W. Do detekcji promieniowania rentgenowskiego wykorzystano detektor CsI:Tl o rozmiarze 43x43cm i rozdzielczości 2850x2850 pikseli. Obraz tomograficzny uzyskano przy obrocie elementu analizowanego o kąt 210°, wykonując 2800 projekcji przy 8 klatkach na projekcję i czasie akwizycji dla jednej klatki równemu 125 milisekund. Rekonstrukcje analizowanych próbek wykonano z wykorzystaniem stacji roboczej zainstalowanym oprogramowaniem CT Pro 3D firmy Nikon oraz VGStudio MAX 2023.2.

Podczas wycinania próbek do badań wytrzymałości belek zakrzywionych, z każdej utwardzonej płyty wycięto próbkę do badań metodą tomografii komputerowej o szerokości 15 mm. Ze względu na duży koszt i czas trwania badania, ilość próbek ograniczono do jednej z każdego materiału dla wybranej geometrii krzywizny. Zestawienie próbek badanych metodą tomografii komputerowej przedstawiono w Tabeli 34.

75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>
α180°	α180°
α150°, R <sub>i</sub> 4	α150°, R <sub>i</sub> 4
α150°, R <sub>i</sub> 36	α150°, R <sub>i</sub> 36
α120°, R <sub>i</sub> 4	α120°, R <sub>i</sub> 4
α120°, R <sub>i</sub> 36	α120°, R <sub>i</sub> 36
α90°, R <sub>i</sub> 4	α90°, R <sub>i</sub> 4
α90°, R <sub>i</sub> 12	α90°, R <sub>i</sub> 12
α90°, Ri36	α90°, Ri36

Wykonane obrazy pozwoliły ocenić strukturę występującą w próbkach wytworzonych z danego materiału i dla danego układu geometrii pod kątem ułożenia włókien, odległości pomiędzy warstwami, obszarów bogatych w żywicę oraz powstałych zmarszczek i ich głębokości. Ze względu na zbyt małą rozdzielczość, na podstawie uzyskanych tomogramów niemożliwe było wyznaczenie całkowitego udziału pustek w kompozycie. Jednakże, na podstawie oceny jakościowej obrazów można stwierdzić, że udział pustek w kompozycie jest bardzo mały, na wykonanych tomogramach praktycznie nie widać regularnej porowatości, przestrzenie pomiędzy warstwami są bardzo małe i wypełnione żywicą. Dla dokładnego wyznaczenia udziału pustek należałoby wykonać zdjęcia przy większym powiększeniu. W dwóch próbkach ( $\alpha 90^\circ$ , R<sub>i</sub>4, 75 g/m<sup>2</sup> oraz  $\alpha 90^\circ$ , R<sub>i</sub>4, 150 g/m<sup>2</sup>) wykryto pojedyncze pustki niewielkich rozmiarów, widoczne jako czarne obszary. Przykład wykrytej pustki przedstawiono na Rys. 93, widoczna na zdjęciu pustka,

zgodnie z pomiarami dokonanymi za pomocą programu ImageJ ma wymiary około 0,066 x 0,025 mm.

W kilku próbkach zdjęcia wykonane metodą tomografii komputerowej pozwoliły także wykryć drobne defekty, objawiające się jako białe wtrącenia pomiędzy warstwami. Są to najprawdopodobniej bardzo drobne cząstki papieru silikonowanego lub innych zanieczyszczeń, które pozostały niezauważone podczas procesu laminowania ze względu na bardzo małe rozmiary. Przykład obcego wtrącenia przedstawiono na Rys. 93. Widoczny defekt, zgodnie z pomiarami wykonanymi w programie ImageJ, ma wymiary około 0,049 x 0,028 mm.



**Rys. 93**. Obraz CT: pustka widoczna jako czarny obszar oraz wtrącenie obce, widoczne jako biały obszar, wykryte w próbce o geometrii α90°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze75 g/m<sup>2</sup>

Wykonane tomogramy pozwoliły także na analizę powstałych w trakcie wytwarzania zmarszczek. Wszystkie powstałe zmarszczki obejmują powierzchniowe warstwy przy zewnętrznym promieniu (od strony pakietu podciśnieniowego). Najczęściej sa to zmarszczki obejmujące tyko zewnetrzna warstwe lub w przypadku wiekszych zmarszczek – kilka zewnętrznych warstw. W przypadku każdej zmarszczki, ułożenie warstw wewnątrz próbki oraz wzdłuż promienia wewnętrznego pozostaje niezaburzone, dlatego powstałe zmarszczki nie powinny mieć istotnego wpływu na właściwości mechaniczne próbki w zaplanowanych badań, ponieważ w przypadku obciążania zakrzywionych belek momentem gnącym, największe naprężenia promieniowe osiągane są w dwóch trzecich przekroju. W obszarze zmarszczek nie zauważono również powstawania pustek ani dużych obszarów bogatych w żywicę, a zmiana przebiegu ułożenia włókien, spowodowana zmarszczeniem, nie jest duża. Przykład dużej zmarszczki, która mimo to obejmuje tylko zewnętrzne warstwy, przedstawiono na Rys. 94. Porównując ze sobą zdjęcia próbek wykonanych z prepregów o gramaturze  $75 \text{ g/m}^2$  oraz 150 g/m<sup>2</sup> zauważono, że w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, zaburzenia sięgają głębiej i obejmują większą liczbę warstw, niż w przypadku próbek z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. W przypadku prepregu o większej gramaturze, defekty obejmują najczęściej tylko zewnętrzną warstwę lub samą żywicę na powierzchni próbki. Porównanie zmarszczek dla próbek wykonanych z obu prepregów przedstawiono na Rys. 95.



**Rys. 94**. Obraz CT: duża zmarszczka, zaobserwowana w próbce o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>12, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, która obejmuje tylko zewnętrzne warstwy włókien węglowych



*Rys. 95.* Obraz CT: zmarszczki zaobserwowane na próbkach o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>36: u góry próbka z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, na dole z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>

Dla próbek o najmniejszym promieniu krzywizny R<sub>i</sub>4, obrazy uzyskane metodą tomografii komputerowej pozwoliły wykryć defekt w postaci powiększonych przestrzeni pomiędzy warstwami w obszarze promienia, wypełnionych z żywicą. Zjawisko to było największe dla próbek o kącie rozwarcia ramion  $\alpha 90^{\circ}$ , nieco widoczne także na próbach o kącie rozwarcia ramion  $\alpha 120^{\circ}$  i praktycznie niewidoczne dla próbek o kącie rozwarcia ramion  $\alpha 150^{\circ}$ . Nie zaobserwowano go także dla większych promieni krzywizny, jest zatem ściśle związane z geometrią krzywizny – im mniejszy kąt pomiędzy ramionami

i mniejszy promień krzywizny - tym większe prawdopodobieństwo jego wystąpienia. Próbki o promieniu krzywizny  $R_i$ 4, wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 96, próbki wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> przedstawiono na Rys. 97. Na podstawie oceny tomogramów stwierdzono również, że odległości pomiędzy warstwami są większe w przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, co jest widoczne zwłaszcza dla próbek o geometrii krzywizny  $\alpha 90^{\circ}$ , R<sub>i</sub>4. Dla potwierdzenia, za pomocą programu ImageJ dokonano obliczeń średniej odległości pomiędzy warstwami dla próbek o promieniu krzywizny R<sub>i</sub>4. W tym celu, dla każdej próbki zmierzono odległości pomiędzy warstwami w pięciu miejscach w kulminacyjnym miejscu krzywizny, w których odległość pomiędzy warstwami była wizualnie największa oraz w pięciu miejscach w kulminacyjnym punkcie krzywizny, w których odległość pomiędzy warstwami była wizualnie najmniejsza, po czym wyznaczono średnią wartość odległości pomiędzy warstwami. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli 35. Uzyskane wyniki potwierdzają, że efekt powiększenia odległości pomiędzy warstwami jest najbardziej wyraźny dla próbek o kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 90°, dla większych kątów rozwarcia ramion efekt ten jest znacznie mniejszy. Dla każdego typu geometrii, zmierzone odległości pomiędzy warstwami są większe w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>.



*Rys. 96.* Obraz CT: przekrój wzdłużny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i promieniu krzywizny *R*<sub>i</sub>4, o kącie rozwarcia ramion kolejno od góry: α90°, α120° i α150°



*Rys. 97.* Obraz CT: przekrój wzdłużny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> i promieniu krzywizny R<sub>i</sub>4, o kącie rozwarcia ramion kolejno od góry: α90°, α120° i α150°

		<i>.</i>							
Tahela	35	Srednie	ndleginści	nomiedzy	warstwami v	v nróhkach	o promieniu	krzywizny ł	: wvnoszacvm
Inocia	55.	Sicunic	ouregroser	pomięuzy	war stwantt i	proonach	o promieniu	<i>Ki 2y Wi2hiy</i> 1	ti wynoszącym

-	4 mm					
Kąt rozwarcia	Średnia odległość pomiędzy					
pomiędzy	warstwami [mm]					
ramionami α	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>				
90°	0,0331	0,0184				
120°	0,0106	0,0094				
150°	0,0134	0,0118				

Zestawienie tomogramów uzyskanych dla każdej z badanych próbek (rzut izometryczny, przekrój poprzeczny oraz przekroje wzdłużne) zestawiono w Załączniku nr 4.

Poza opisanymi powyżej defektami, na podstawie przeprowadzonego badania metodą tomografii komputerowej można stwierdzić, że wykonane próbki są bardzo dobrej jakości. Powstałe w trakcie produkcji defekty w postaci zmarszczek obejmują tylko zewnętrzne warstwy, zatem nie powinny mieć wpływu na wytrzymałość próbek, podobnie jak wykryte pustki i obce wtrącenia, których rozmiary są bardzo małe. Przeprowadzone badania pokazały, że skala defektów powstałych na skutek obecności krzywizny jest większa dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Generalnie jednak próbki wykonane z obydwu materiałów mają jednorodną strukturę z poprawnym ułożeniem włókien. Na próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> granice pomiędzy poszczególnymi warstwami są mniej wyraźne, a struktura bardziej jednorodna (poza obszarem krzywizny dla próbek o najmniejszym promieniu), co może być wynikiem większej sztywności pojedynczej warstwy prepregu o większej gramaturze. Mimo to dla próbek o najmniejszym kącie rozwarcia ramion, wynoszącym 90°, pomiary wykazały, że odległości pomiędzy warstwami w przypadku prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, może to być jednak wynikiem większej ilości żywicy w kompozytach utwardzonych z prepregu o niskiej gramaturze.

Na wszystkich wykonanych zdjęciach, poza kilkoma pustkami, nie widać regularnej porowatości, wszystkie warstwy włókien są dobrze scalone, a przestrzenie pomiędzy nimi wypełnione żywicą. Dla potwierdzenia, strukturę jednej z próbek, po zakończeniu badań metodą tomografii komputerowej, zbadano przy użyciu mikroskopu skaningowego. Zdjęcia wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi S-3400N, znajdującego się w Pracowni Badań Strukturalnych Katedry Technologii Materiałowych na Wydziale Inżynierii Materiałowej. Wykonane zdjęcia przedstawiono na Rys. 98 ÷ Rys. 100. Uzyskane obrazy potwierdzają dużą spójność i równomierne rozmieszczenie włókien, które są szczelnie otoczone osnową.



**Rys. 98**. Obraz próbki przy powiększeniu 275x, uzyskany przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego



*Rys.* 99. Obraz próbki przy powiększeniu 700x, uzyskany przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego



**Rys. 100**. Obraz próbki przy powiększeniu 5000x, uzyskany przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego

#### 8.3.8. Badanie wytrzymałości CBS belek zawierających krzywizny

Badania wytrzymałości CBS wytworzonych belek zawierających krzywizny wykonano w oparciu o normę ASTM D6415/D6415M - Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite [201]. Metoda ta polega na czteropunktowym zginaniu kompozytów zawierających krzywizny i przy zastosowaniu geometrii próbek zalecanej przez normę pozwala uzyskać czysty moment gnący w strefie zakrzywionej. W badaniu można wyznaczyć wytrzymałość kątowników obciążonych momentem gnącym CBS. Ponadto, w przypadku występowania tylko momentu gnącego w strefie zawierającej krzywiznę, pomiędzy warstwami nie występują naprężenia ścinające, a jedynie naprężenia rozciągające, dlatego też metoda ta może być wykorzystana do wyznaczenia ILTS. Co jednak istotne, aby wyznaczyć wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe, konieczne jest zaobserwowanie prawidłowego modelu zniszczenia próbki. Typowym modelem zniszczenia występującym podczas zginania zakrzywionych belek o jednokierunkowej orientacji jest delaminacja wewnętrznych warstw w obszarze zakrzywionym, która następnie gwałtownie rozszerza się na ramiona próbki [121,124,201,212].

Norma określa zasady badania wytrzymałości CBS belek zakrzywionych, dla których kąt rozwarcia ramion wynosi 90°, a wewnętrzny promień gięcia 6,4 mm. W celu zrozumienia wpływu gramatury na wytrzymałość wyrobów zawierających krzywizny, a także korelacji z geometrią krzywizny, wykonano badania wytworzonych kątowników o różnych kątach rozwarcia i różnych promieniach krzywizny, a do ich przeprowadzenia zaadaptowano sposób obciążania próbek i parametry badania proponowane przez normę. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono CBS, a dla próbek, dla których zaobserwowano prawidłowy model zniszczenia, także ILTS. W pierwszej kolejności, na podstawie zmierzonych wartości kąta pomiędzy ramionami, dla każdej próbki wyznaczono kąt początkowy pomiędzy ramieniem próbki a poziomem, zgodnie z zależnością:

$$\varphi_i = 90^\circ - 0.5\alpha \tag{28}$$

gdzie:

 $\varphi_i$  - kąt początkowy pomiędzy ramieniem próbki a poziomem [°],

 $\alpha$  – kąt pomiędzy ramionami próbki [°].

Dla każdej próbki obliczono rzeczywistą odległość pionową pomiędzy podporami w trakcie trwania testu. Odległość tą wyznaczono na podstawie przemieszczenia głowicy oraz geometrii próbki i stanowiska do badań, zgodnie ze wzorem:

$$d_y = d_x \tan \varphi_i + \frac{D+t}{\cos \varphi_i} - \Delta$$
 (29)

gdzie:

dy – pionowy dystans między podporami [mm],

*d*<sub>*x*</sub> – poziomy dystans między podporami [mm],

 $\varphi_i$  - kąt początkowy pomiędzy ramieniem próbki a poziomem [°],

D-średnica cylindrycznych podpór obciążających [mm],

t- średnia grubość próbki [mm],

 $\Delta$  – przemieszczenie głowicy [mm].

Następnie, dla danej odległości pionowej między podporami  $d_y$  wyznaczono rzeczywisty kąt pomiędzy ramieniem próbki a poziomem, zgodnie z zależnością:

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{-d_x \left( D + t \right) + \sqrt{d_x^2 + d_y^2 - D^2 - 2Dt - t^2}}{d_x^2 + d_y^2} \right)$$
(30)

gdzie:

 $\varphi$  - kąt rzeczywisty pomiędzy ramieniem próbki a poziomem [°],

dy – pionowy dystans między podporami [mm],

 $d_x$  – poziomy dystans między podporami [mm],

D-średnica cylindrycznych podpór obciążających [mm],

t- średnia grubość próbki [mm].

Następnie wyznaczono wytrzymałość CBS, będącą momentem na jednostkę szerokości, działającym na zakrzywiony obszar, powodującym nagły spadek siły lub powstanie delaminacji. Moment ten jest wynikiem siły wywieranej przez jedną z podpór obciążających i odległości pomiędzy dwoma podporami obciążającymi przy jednym z ramion próbki. Siłę wywieraną przez jedną z podpór można wyznaczyć na podstawie całkowitej siły oraz geometrii wykorzystanego uchwytu do zginania czteropunktowego. Na tej podstawie, wytrzymałość zakrzywionej belki oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$CBS = \left(\frac{P}{2w\cos\varphi}\right) \left(\frac{d_x}{\cos\varphi} + (D+t)\tan\varphi\right)$$
(31)

gdzie:

CBS - wytrzymałość przy zginaniu czteropunktowym zakrzywionej belki [N],

P – maksymalna siła uzyskana do pierwszego spadku [N],

dx – poziomy dystans między podporami [mm],

D – średnica cylindrycznych podpór obciążających [mm],

t- średnia grubość próbki [mm],

w – średnia szerokość próbki [mm],

 $\varphi$  - kąt rzeczywisty pomiędzy ramieniem próbki a poziomem [°].

Dla próbek, dla których zaobserwowano prawidłowy model zniszczenia, tj. delaminację w strefie krzywizny, wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS. Wyznaczenie naprężeń stycznych i promieniowych w cylindrycznie anizotropowej, zakrzywionej belce zostały opracowane przez S.G. Lekhnitskii w oparciu o klasyczną teorię sprężystości. Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe odpowiada największemu naprężeniu promieniowemu, wyznaczanemu zgodnie ze wzorem: [213]

$$\sigma_r = -\frac{CBS}{r_o^2 g} \left[ 1 - \frac{1 - \rho^{\kappa+1}}{1 - \rho^{2\kappa}} \left( \frac{r_m}{r_o} \right)^{\kappa-1} - \frac{1 - \rho^{\kappa-1}}{1 - \rho^{2\kappa}} \rho^{\kappa+1} \left( \frac{r_o}{r_m} \right)^{\kappa+1} \right]$$
(32)

gdzie:

 $\sigma_r$  – wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe (ILTS) [MPa], *CBS* - wytrzymałość przy zginaniu czteropunktowym zakrzywionej belki [N],  $r_o$  – promień zewnętrzny próbki [mm],

g,  $r_m$ ,  $\rho$ ,  $\kappa$  – współczynniki, wyznaczane z poniższych zależności:

$$\rho = \frac{R_i}{r_o} \tag{33}$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{E_{\theta}}{E_r}} \tag{34}$$

$$r_m = \left[ \frac{(1 - \rho^{\kappa - 1})(\kappa + 1)(\rho r_0)^{\kappa + 1}}{(1 - \rho^{\kappa + 1})(\kappa + 1)r_0^{-(\kappa - 1)}} \right]^{\frac{1}{2\kappa}}$$
(35)

$$g = \frac{1-\rho^2}{2} - \left[\frac{\kappa}{\kappa+1}\right] \left[\frac{(1-\rho^{\kappa+1})^2}{1-\rho^{2\kappa}}\right] + \left[\frac{\kappa\rho_2}{\kappa-1}\right] \left[\frac{(1-\rho^{\kappa-1})^2}{1-\rho^{2\kappa}}\right]$$
(36)

gdzie:

R<sub>i</sub> – promień wewnętrzny próbki [mm],

ro-promień zewnętrzny próbki [mm],

 $E_{\theta}$  – moduł sprężystości w kierunku stycznym [GPa],

*E<sub>r</sub>* – moduł sprężystości w kierunku promieniowym (poprzecznym).

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion 45. Zastosowano czujnik siły LPS.105 o zakresie 100 kN. Sygnałem sterującym badania było przemieszczenie, a prędkość badania wynosiła 5 mm/min. Badanie przeprowadzono w układzie zginania czteropunktowego. Aby wyeliminować tarcie pomiędzy próbkami i podporami i zapewnić obciążenie strefy zakrzywionej tylko momentem gnącym, cylindryczne podpory zamocowano na łożyskach, zapewniając ich swobodny obrót w trakcie trwania testu. Średnica podpór *D* wynosiła 10 mm, rozstaw podpór dolnych  $l_b$  wynosił 100 mm, a podpór górnych  $l_t$  75 mm. Geometrię uchwytu do zginania czteropunktowego przedstawiono na Rys. 101.



Rys. 101. Badanie próbek zakrzywionych w układzie zginania czteropunktowego [201]

Aby ograniczyć ugięcie ramion próbek i zabezpieczyć je przed niszczeniem w obszarze podpór, do każdej próbki przymocowano metalowe podkładki usztywniające. Podkładki mocowano przy pomocy taśmy poliestrowej, zachowując dystans minimum 10 mm od końca strefy zakrzywionej. Stanowisko do badania wytrzymałości kątowników na zginanie przedstawiono na Rys. 102. Dla każdej próbki test prowadzono aż do uzyskania znaczącego spadku siły. Podczas testu dla każdej próbki zarejestrowano zależność siły od przemieszczenia głowicy. Dodatkowo, przebieg badania rejestrowano przy pomocy kamery, aby ułatwić ocenę mechanizmu zniszczenia próbek. Wymiary wszystkich próbek sprawdzono w trakcie pomiarów geometrycznych podczas kontroli jakości wytworzonych próbek, co opisano w rozdziale 8.3.3. Wszystkie badania przeprowadzono w jednakowych warunkach środowiskowych (temperatura:  $21^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , wilgotność 56%  $\pm$  5%).



Rys. 102. Stanowisko do badań wytrzymałości na zginanie belek zakrzywionych użyte w ramach pracy

W trakcie badania, dla części próbek zaobserwowano prawidłowy model zniszczenia poprzez delaminację w obszarze krzywizny, pojawiającą się w obszarze zakrzywienia i propagującą gwałtownie na ramiona (Rys. 103). Pomimo zastosowania podkładek usztywniających, dla niektórych próbek zaobserwowano jednak model zniszczenia polegający na złamaniu w obszarze ramienia (Rys. 104).



Rys. 103. Zniszczenie poprzez delaminację w obszarze krzywizny



Rys. 104. Zniszczenie poprzez złamanie w obszarze ramienia

Na podstawie zarejestrowanych obrazów wideo oraz oględzin próbek po zniszczeniu okiem nieuzbrojonym, a także przy użyciu mikroskopu kieszonkowego Carson Optical MM-300, dokonano oceny modelu zniszczenia dla każdej z badanych próbek. Zaobserwowane delaminacje w próbkach wykonanych z obydwu prepregów o geometrii krzywizny  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i$ 12 przedstawiono na Rys. 105. Delaminacje w próbkach wykonanych

z obydwu prepregów o geometrii krzywizny  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i$ 4 przedstawiono na Rys. 106. Zdjęcia próbek wykonanych z obydwu prepregów o geometrii krzywizny  $\alpha 150^\circ$ ,  $R_i$ 12, które uległy zniszczeniu poprzez złamanie w obszarze ramion, przedstawiono na Rys. 107.



**Rys. 105**. Delaminacje obserwowane przy powiększeniu 60x, powstale na próbkach o geometrii krzywizny  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i 12$ : po lewej próbka wykonana z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, po prawej próbka wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 106.** Delaminacje obserwowane przy powiększeniu 120x, powstałe na próbkach o geometrii krzywizny α120°, R<sub>i</sub>4: po lewej próbka wykonana z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, po prawej próbka wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 107**. Zniszczenie poprzez złamanie w obszarze ramion próbek wykonanych z obydwu prepregów, o geometrii krzywizny α150°, R<sub>i</sub>12: na górze próbka wykonana z prepregu o gramaturze 75 g/m², na dole próbka wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m²

Analizując modele zniszczenia poszczególnych próbek zauważono, że w obrębie próbek wykonanych z tego samego materiału i o tym samym układzie geometrii krzywizny, wystąpił ten sam model zniszczenia. Wyjątek stanowiły dwie próbki:  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i 36$ , P4 oraz  $\alpha 120^{\circ}$ ,  $R_i 12$ , P1. Podczas badania tych próbek zaobserwowano rozklejanie się podkładek i zniszczenie w obszarze podpory, dlatego też tych próbek nie uwzględniono analizując otrzymane wyniki. Ponadto, ten sam model zniszczenia pojawił się dla próbek wykonanych z obydwu prepregów o danym układzie geometrii krzywizny. Podsumowanie modeli zniszczenia dla każdego typu próbek zestawiono w Tabeli 36. Dla wszystkich próbek o najmniejszym kącie rozwarcia ramion  $\alpha 90^{\circ}$  zaobserwowano zniszczenie poprzez delaminację. Również dla wszystkich próbek o najmniejszym fraedla wszystkich próbek o najmniejszym  $R_i$  wynoszącym 4 mm zaobserwowano zniszczenie poprzez delaminację. Dla wszystkich próbek o łagodniejszym przebiegu krzywizny, a zatem dla próbek o kątach rozwarcia ramion  $\alpha 120^{\circ}$  oraz  $\alpha 150^{\circ}$  oraz promieniach krzywizny  $R_i$  12 oraz 36 mm zaobserwowano zniszczenie poprzez zamanie w obszarze ramienia.

Dućhka	Model zn	iszczenia		
Ргорка	75 g/m <sup>2</sup>	150 g/m <sup>2</sup>		
α90°, R <sub>i</sub> 4	Delaminacja	Delaminacja		
α90°, R <sub>i</sub> 12	Delaminacja	Delaminacja		
α90°, R <sub>i</sub> 36	Delaminacja	Delaminacja		
α120°, R <sub>i</sub> 4	Delaminacja	Delaminacja		
α120°, R <sub>i</sub> 12	Złamanie	Złamanie		
α120°, R <sub>i</sub> 36	Złamanie	Złamanie		
α150°, R <sub>i</sub> 4	Delaminacja	Delaminacja		
α150°, R <sub>i</sub> 12	Złamanie	Złamanie		
α150°, R <sub>i</sub> 36	Złamanie	Złamanie		
α180°	Złamanie	Złamanie		

Tabela 36. Modele zniszczenia zaobserwowane podczas badań wytrzymałości CBS

Dla wszystkich badanych próbek, zgodnie z metodyką opisaną na początku rozdziału, wyznaczono wytrzymałość CBS zakrzywionej belki. Wyniki CBS dla wszystkich badanych próbek zestawiono w Tabeli 37. Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono duży rozrzut otrzymanych wyników badania, zwłaszcza dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację. Największy współczynnik zmienności zaobserwowano dla próbek o kącie rozwarcia ramion  $\alpha 90^{\circ}$  oraz promieniu krzywizny  $R_i$  wynoszącym 4 mm, dla których też w trakcie badania struktury metodą tomografii komputerowej zaobserwowano zwiększone przestrzenie pomiędzy warstwami w obszarze promienia.

		75 g/m <sup>2</sup>				150 g/m <sup>2</sup>			
	Próbka	Р	ф	CBS	Model	Р	ф	CBS	Model
		[N]	[°]	[N]	zniszczenia	[N]	[°]	[N]	zniszczenia
	P1	339,37	38,39	220,98	Delaminacja	1242,23	24,93	528,50	Delaminacja
	P2	529,47	36,00	316,69	Delaminacja	1030,90	27,05	463,28	Delaminacja
	P3	503,83	35,97	302,13	Delaminacja	894,41	28,65	421,14	Delaminacja
	P4	290,66	40,15	203,42	Delaminacja	1063,38	26,17	467,88	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 4	P5	401,37	37,95	254,84	Delaminacja	817,78	29,17	390,91	Delaminacja
	Średnia	412,94	37,69	259,61	-	1009,74	27,20	454,34	-
	Odchylenie standardowe	102,88	1,76	49,34	-	163,96	1,75	52,17	-
	Współczynnik zmienności	24.9	47	19.0	_	16.2	64	11 5	_
	CV [%]	21,3	-1,7	10,0		10,2	0,4	11,5	
	P1	838,79	31,23	430,93	Delaminacja	1688,57	20,57	637,95	Delaminacja
	P2	693,45	32,64	370,91	Delaminacja	1466,13	22,40	584,62	Delaminacja
	P3	778,11	32,58	412,48	Delaminacja	1648,52	19,70	613,07	Delaminacja
	P4	705,00	31,71	367,04	Delaminacja	1721,23	20,01	643,98	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 12	P5	495,33	36,74	303,14	Delaminacja	1441,66	21,35	555,52	Delaminacja
	Średnia	702,13	32,98	376,90	-	1593,22	20,81	607,03	-
	Odchylenie standardowe	129,71	2,18	49,39	-	130,06	1,09	37,12	-
	Współczynnik zmienności	18.5	6.6	13.1	-	8.2	5.2	6.1	-
	CV [%]	,-	-,-	,_		-/-	-,-	-,-	
	P1	678,06	31,59	350,38	Delaminacja	1799,37	12,88	572,13	Delaminacja
	P2	800,63	28,57	375,27	Delaminacja	1891,91	11,70	580,87	Delaminacja
	P3	853,70	26,98	383,86	Delaminacja	2042,75	10,90	616,76	Delaminacja
	P4	-	-	-	Rozklejenie	1986,36	12,37	620,08	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 36	P5	1035,20	25,56	447,17	Delaminacja	1894,33	13,03	602,69	Delaminacja
	Średnia	841,90	28,17	389,17	-	1922,94	12,18	598,51	-
	Odchylenie standardowe	148,38	2,59	41,19	-	94,11	0,88	21,35	-
	Współczynnik zmienności CV [%]	17,6	9,2	10,6	-	4,9	7,3	3,6	-

Tabela 37. Wytrzymałość CBS zakrzywionej belki – zestawienie dla wytworzonych próbek

dalszy									
	_	7	5 g/m <sup>4</sup>		_	15	50 g/m <sup>4</sup>		
	Próbka	P	ф	CBS	Model	P	ф	CBS	Model
		[N]	[°]	[N]	zniszczenia	[N]	[°]	[N]	zniszczenia
	P1	794,06	22,27	313,37	Delaminacja	1445,41	14,20	465,99	Delaminacja
	P2	641,79	23,24	259,46	Delaminacja	1472,23	14,86	485,84	Delaminacja
	P3 D4	040,40 721 //7	21,59	285 00	Delaminacia	1608.04	13,91	491,01 512.11	Delaminacia
	P4 D5	721,47	18.97	263,99	Delaminacia	1787.89	11.86	551.01	Delaminacia
α120°, R <sub>i</sub> 4	Średnia	745 52	21 72	200,17		1566 21	13 74	501 39	
	Siculta	743,32	21,72	230,04		1300,21	13,74	301,35	
	Odchylenie standardowe	78.04	1.64	31.28	-	138.46	1.12	32.41	-
	Współczynnik zmienności	/ 0/0 !	1,01	01,20		100,10	-)	02)12	
	CV [%]	10,5	7,6	10,8	-	8,8	8,2	6,5	-
	P1	-	-	-	Rozklejenie	2326,34	8,12	662,37	Złamanie
	P2	2254,26	10,31	677,26	Złamanie	2332,03	7,66	662,63	Złamanie
	P3	2225,63	10,67	676,27	Złamanie	2534,31	7,23	716,61	Złamanie
	P4	2738,14	9,20	809,34	Złamanie	2561,42	7,41	724,91	Złamanie
~120° D 12	P5	2561,46	9,17	750,07	Złamanie	2626,38	6,62	727,92	Złamanie
α120 , R <sub>i</sub> 12	Średnia	2444,87	9,84	728,23	-	2476,09	7,41	698,89	-
	Odshylania standardowa								
	Suchylettle statuaruowe	247,66	0,77	64,17	-	138,24	0,55	33,48	-
	Współczynnik zmienności								
	CV [%]	10,1	7,8	8 <i>,</i> 8	-	5,6	7,5	4,8	-
	P1	2485,10	9,99	744,31	Złamanie	2611,91	5,88	724,36	Złamanie
	P2	3007,40	8,63	873,19	Złamanie	2431,81	7 <i>,</i> 85	691,80	Złamanie
	P3	2202,89	11,41	675,61	Złamanie	2564,89	7,49	728,79	Złamanie
	P4	2936,62	8,84	860,75	Złamanie	2792,73	6,15	766,27	Złamanie
α120°. R.36	P5	2726,85	9,06	799,67	Złamanie	2576,15	6,51	713,40	Złamanie
a )	Średnia	2671,77	9,59	790,70	-	2595,50	6,78	724,92	-
	Odchylenie standardowe								
		331,86	1,14	82,45	-	129,69	0,86	27,18	-
	Współczynnik zmienności								
	CV [%]	12,4	11,9	10,4	-	5,0	12,6	3,7	-
	P1	2797,78	-0,51	688,01	Delaminacja	3178,85	-3,90	738,17	Delaminacja
	P2	1918,13	3,44	505,49	Delaminacja	3042,56	-3,55	713,42	Delaminacja
	P3	2048,74	2,68	534,45	Delaminacja	2232,60	0,38	554,96	Delaminacja
	P4	2163,58	2,77	563,60	Delaminacja	3108,94	-4,08	722,13	Delaminacja
α150°, R <sub>i</sub> 4	P5	2523,52	1,36	640,62	Delaminacja	2610,26	-1,98	625,62	Delaminacja
	Srednia	2290,35	1,95	586,44	-	2834,64	-2,63	670,86	-
	Odchylenie standardowe	262.22	1 57	75 00		402.02	1 07	70 1 0	
	Wcnółczynnik zmionności	302,23	1,57	75,00	-	403,03	1,67	76,10	-
		15.9	80.5	12.0	_	14.2	-71.2	117	_
	D1	2602.25	30,5	950.95	Złamanio	2202.00	-71,5	790 52	Złamanio
	P1 D2	3513.05	-2,70	830,65	Ziamanie	3362,80	-4,75	789.82	Ziamanie
	F2 D2	3683.20	-2,65	858.05	Ziamanie	3400,55	-4,39	755 76	Ziamanie
	PA	3561 97	-1 96	850 93	Ziamanie	3032 57	-4.20	703 10	Ziamanie
α150°. R.12	P5	3280 85	-1.03	801.73	Złamanie	3208 93	-4.23	744.13	Złamanie
	Średnia	3528.29	-2.43	838.60	- Liamanic	3250.94	-4.29	754.67	- Liamanic
	Odchvlenie standardowe	151.74	0.96	23.13	-	149.72	0.30	34.19	-
	Współczynnik zmienności	,	-,	,_0		,	2,00	,20	
	CV [%]	4,3	-39,6	2,8	-	4,6	-7,0	4,5	-
	P1	3554,67	-3,66	826,36	Złamanie	3157,19	-10,76	666.26	Złamanie
	P2	3948,99	-3,54	919,25	Złamanie	3280,65	-12,01	682,53	Złamanie
	P3	3175,34	-1,58	767,50	Złamanie	3198,48	-4,12	740,99	Złamanie
	P4	3777,12	-3,46	885,50	Złamanie	3090,55	-4,46	714,56	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 36	P5	3562,27	-3,17	<u>838,</u> 63	Złamanie	3147,51	-3,84	735 <u>,</u> 37	Złamanie
	Średnia	3603,68	-3,08	847,45	-	3174,87	-7,04	707,94	-
	Odchylenie standardowe	290,22	0,86	58,13	-	70,57	4,00	32,68	-
	Współczynnik zmienności								
	CV [%]	8,1	-27,9	6,9	-	2,2	-56,8	4,6	-
	P1	4784,08	-19,52	911,83	Złamanie	5761,23	-21,30	1091,07	Złamanie
	P2	5104,01	-18,38	976,93	Złamanie	5734,38	-23,24	1053,83	Złamanie
	P3	5646,35	-18,35	1082,11	Złamanie	5216,12	-20,20	990,47	Złamanie
	P4	5116,55	-17,65	990,76	Złamanie	5306,75	-21,71	990,49	Złamanie
α180°	P5	5147,91	-17,46	1012,17	Złamanie	5165,83	-19,60	981,50	Złamanie
	Średnia	5159,78	-18,27	994,76	-	5436,86	-21,21	1021,47	-
	Odchylenie standardowe	309,44	0,81	61,53	-	288,46	1,41	48,50	-
	Współczynnik zmienności								
	CV [%]	6,0	-4,4	6,2	-	5,3	-6,7	4,7	-

**Tabela 37.** Wytrzymałość CBS zakrzywionej belki CBS – zestawienie dla wytworzonych próbek – ciąg dalszy

W Tabeli 38 zestawiono średnie wartości wytrzymałości CBS. We wszystkich przypadkach, w których próbki uległy zniszczeniu poprzez delaminacje, a więc w próbkach o najmniejszych kątach rozwarcia ramion i najmniejszych promieniach krzywizny, większą wytrzymałość otrzymano dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. W przypadkach, w których próbki uległy zniszczeniu poprzez złamanie, a więc dla większych katów rozwarcia ramion i promieni krzywizny, większą wytrzymałość belki zakrzywionej otrzymano w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> (za wyjątkiem próbek płaskich). Analizując wykresy zależności siły od przemieszczenia zauważono, że dla próbek które uległy zniszczeniu poprzez delaminację, większą wytrzymałość i większe wartości przemieszczenia uzyskano w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. W próbkach tych obserwowano ciagły wzrost napreżeń, aż do nagłego rozwoju delaminacji, powodującej utratę nośności próbki. W przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> osiągnięto mniejszą wytrzymałość i przemieszczenie. Dla niektórych próbek wystąpiły też wcześniejsze delaminacje, po których utrzymywała się nośność resztkowa, aż do wystąpienia kolejnych delaminacji. Przykłady przedstawiające porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację, przedstawiono na Rys. 108 i Rys. 109. W przypadku próbek, które uległy zniszczeniu poprzez złamanie, większą wytrzymałość oraz sztywność zaobserwowano dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, jednak przebieg krzywych pomiędzy badanymi materiałami nie różnił się tak bardzo, jak w przypadku próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację (Rys. 110). Wykresy zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowane podczas badania wytrzymałości belek zawierających krzywizny dla wszystkich próbek zestawiono w Załączniku nr 5.

	75 g/m <sup>2</sup>			150 g/m <sup>2</sup>				
Próbka	Średnia maksymalna siła do pierwszego spadku P [N]	Średni kąt pomiędzy ramieniem próbki a poziomem φ [°]	Średnia wytrzymałość CBS [N]	Model zniszczenia	Średnia maksymalna siła do pierwszego spadku P [N]	Średni kąt pomiędzy ramieniem próbki a poziomem φ [°]	Średnia wytrzymałość j CBS [N]	Model zniszczenia
α90°, R <sub>i</sub> 4	412,94	37,69	259,61	Delaminacja	1009,74	27,20	454,34	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 12	702,13	32,98	376,90	Delaminacja	1593,22	20,81	607,03	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 36	841,90	28,17	389,17	Delaminacja	1922,94	12,18	598,51	Delaminacja
α120°, R <sub>i</sub> 4	745,52	21,72	290,64	Delaminacja	1566,21	13,74	501,39	Delaminacja
α120°, R <sub>i</sub> 12	2444,87	9,84	728,23	Złamanie	2476,09	7,41	698,89	Złamanie
α120°, R <sub>i</sub> 36	2671,77	9,59	790,70	Złamanie	2595,50	6,78	724,92	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 4	2290,35	1,95	586,44	Delaminacja	2834,64	-2,63	670,86	Delaminacja
α150°, R <sub>i</sub> 12	3528,29	-2,43	838,60	Złamanie	3250,94	-4,29	754,67	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 36	3603,68	-3,08	847,45	Złamanie	3174,87	-7,04	707,94	Złamanie
α180°	5159,78	-18,27	994,76	Złamanie	5436,86	-21,21	1021,47	Złamanie

 Tabela 38. Średnia wytrzymałość CBS, uzyskana dla próbek wykonanych z prepregów o gramaturze

 75 g/m² oraz 150 g/m²



**Rys. 108**. Porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowanych podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α 90°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregów o gramaturach 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 109.** Porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowanych podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α 120°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregów o gramaturach 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup>



**Rys. 110**. Porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowanych podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α 120°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregów o gramaturach 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup>

Następnie, zgodnie z metodyką opisaną na początku rozdziału, dla próbek, dla których zaobserwowano zniszczenie poprzez delaminację w strefie krzywizny, wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS, odpowiadające największemu naprężeniu promieniowemu. Niezbędne do wyznaczenia naprężeń promieniowych wartości modułów sprężystości w kierunkach promieniowym i stycznym mogą być w przybliżeniu potraktowane jako wartości modułów sprężystości odpowiadające jednokierunkowym laminatom płaskim w kierunkach odpowiednio 90° i 0°. Dla badanych materiałów wykorzystano moduły sprężystości wyznaczone w trakcie badań próbek płaskich, opisanych w rozdziale 8.2.3. Wartości tych modułów przedstawiono w Tabeli 39.

Gramatura	Moduł sprężystości w kierunku stycznym	Moduł sprężystości w kierunku promieniowym			
	E <sub>θ</sub> [GPa]	E <sub>r</sub> [GPa]			
75 g/m <sup>2</sup>	117,3	8,3			
150/m <sup>2</sup>	138,7	8,0			

**Tabela 39**. Wartości modułów sprężystości badanych materiałów wyznaczone podczas badania próbek plaskich, odpowiadające w przybliżeniu modułom sprężystości w kierunku stycznym i promieniowym

Otrzymane wartości ILTS przedstawiono w Tabeli 40. Dla wszystkich rodzajów próbek, wykonanych z prepregów o obydwu porównywanych gramaturach, wyznaczono także wartość średnią, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności. Dla każdego układu geometrii próbki, większą ILTS otrzymano w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. W przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> otrzymano mniejsze wartości wytrzymałości na rozciąganie

międzywarstwowe oraz większy rozrzut wyników. Ponadto, zaobserwowano, że wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe maleje wraz ze wzrostem promienia krzywizny, a także rośnie wraz ze wzrostem kąta rozwarcia pomiędzy ramionami.

Próbka		75 g/m <sup>2</sup>		150 g/m <sup>2</sup>	
		CBS	σ <sub>r</sub> (ILTS)	CBS	σ <sub>r</sub> (ILTS)
		[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
	P1	220,98	30,9	528,50	88,5
	P2	316,69	43,7	463,28	78,3
α90°, R <sub>i</sub> 4	Р3	302,13	41,8	421,14	71,2
	P4	203,42	28,0	467,88	78,5
	Р5	254,84	35,2	390,91	66,3
	Średnia	259,61	35,9	454,34	76,6
	Odchylenie standardowe	49,34	6,8	52,17	8,4
	Współczynnik zmienności CV [%]	19,0	18,9	11,5	11,0
	P1	430,93	24,1	637,95	40,8
	P2	370,91	20,9	584,62	37,2
	Р3	412,48	22,8	613,07	38,9
α90° Β.12	P4	367,04	20,8	643,98	41,3
uso, Niz	Р5	303,14	16,8	555,52	35,8
	Średnia	376,90	21,1	607,03	38,8
	Odchylenie standardowe	49,39	2,8	37,12	2,3
	Współczynnik zmienności CV [%]	13,1	13,1	6,1	6,0
	P1	350,38	6,8	572,13	12,8
	P2	375,27	7,5	580,87	13,0
	Р3	383 <i>,</i> 86	7,7	616,76	13,9
α90° B.36	P4	-	-	620,08	14,0
uso , n <sub>i</sub> so	Р5	447,17	9,0	602,69	13,5
	Średnia	389,17	7,8	598,51	13,4
	Odchylenie standardowe	41,19	0,9	21,35	0,5
	Współczynnik zmienności CV [%]	10,6	11,6	3,6	3,8
	P1	313,37	46,6	465,99	77,9
	P2	259,46	38,2	485 <i>,</i> 84	81,2
	Р3	331,24	47,3	491,01	81,5
α120°. Β.4	P4	285,99	41,5	513,11	85,6
	P5	263,17	39,0	551,01	93,2
	Średnia	290,64	42,5	501,39	83,9
	Odchylenie standardowe	31,28	4,2	32,41	5,9
	Współczynnik zmienności CV [%]	10,8	9,9	6,5	7,0
	P1	688,01	102,0	738,17	126,2
	P2	505,49	76,0	713,42	120,6
	P3	534,45	77,4	554,96	94,9
α150°, R <sub>i</sub> 4	P4	563,60	85,5	722,13	124,5
	P5	640,62	93,9	625,62	105,7
	Średnia	586,44	87,0	670,86	114,4
	Odchylenie standardowe	75,88	11,0	78,18	13,6
	Współczynnik zmienności CV [%]	12,9	12,7	11,7	11,9

Tabela 40. Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS próbek zawierających krzywizny, któreuległy zniszczeniu poprzez delaminację

# 9. Zbiorcza analiza otrzymanych wyników

## 9.1. Właściwości prepregów nieutwardzonych

Formowanie wyrobów zakrzywionych z kompozytów polimerowych umacnianych włóknami jest procesem złożonym, a na jakość końcowego wyrobu wpływa wiele czynników, do których zalicza się także właściwości prepregów w stanie nieutwardzonym. Współczynnik zagęszczenia opisujący zmianę grubości przekroju laminatu w trakcie procesu utwardzania dla obydwu badanych prepregów jest relatywnie mały, a różnice pomiędzy prepregiem o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> i 75 g/m<sup>2</sup> są nieznaczne. Oznacza to, że dla obydwu materiałów zmiana grubości w trakcie utwardzania jest nieduża, co jest istotną zaletą w trakcie wytwarzania wyrobów zawierających krzywizny. Oba materiały różnią się natomiast istotnie zmianą grubości w trakcie procesu konsolidacji. Porównanie grubości badanych próbek po 24 godzinach konsolidacji przedstawiono na Rys. 111. Dla próbek o orientacji jednokierunkowej [0°] prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykazuje o 9% większą zmianę grubości niż prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, a dla próbek o orientacji naprzemiennej  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  – o 12%. Wytwarzając wyroby z prepregu o mniejszej gramaturze należy więc odpowiednio zadbać o odpowiednią częstotliwość i czas procesu konsolidacji dla uniknięcia defektów, a zatem sam proces laminowania jest dłuższy i bardziej wymagający dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Większy jest też potencjał do wystąpienia defektów w obszarach krzywizn będących efektem niewłaściwie przygotowanego do utwardzenia stosu prepregu.



*Rys.* 111. Zmiana grubości próbki po 24 godzinach konsolidacji, wyrażona jako procent grubości początkowej

Analizując sztywność przy zginaniu prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup> można stwierdzić, że prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> ma 2,5 razy większą sztywność przy zginaniu. Formowanie wyrobów zawierających krzywizny jest więc łatwiejsze w przypadku prepregu o mniejszej gramaturze, ponieważ wymaga użycia mniejszej siły

do odwzorowania geometrii krzywizny. Mniejsza sztywność może jednak powodować większą podatność do powstawania defektów w obszarze krzywizny w trakcie procesu utwardzania.

Porównując zachowanie badanych materiałów w warunkach ścinania w płaszczyźnie, można stwierdzić że prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> ma dużą podatność do odkształcenia poprzez ścinanie, w przeciwieństwie do prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Dla prepregu o standardowej gramaturze, odkształcenie przebiegało głównie poprzez ścinanie w płaszczyźnie, podczas gdy dla prepregu o niskiej gramaturze odkształcenie następowało na skutek poślizgu pomiędzy włóknami oraz utraty spójności warstw. W przypadku wyrobów zawierających krzywizny, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, może to zwiększać podatność do występowania defektów, zwłaszcza w przypadku skomplikowanych geometrii czy kształtów podwójnie zakrzywionych, w których ścinanie jest niezbędnym mechanizmem do prawidłowego odwzorowania powierzchni krzywizny.

Podczas formowania i utwardzania wyrobów zawierających krzywizny w prepregu występuje złożony stan naprężeń. Jakość wyrobu końcowego jest także wypadkowa wielu innych czynników, takich jak właściwości materiału, dokładność i precyzja podczas procesu laminowania, użyte materiały pomocnicze, materiał formy i parametry procesu. Biorąc jednak pod uwagę właściwości nieutwardzonych prepregów, mające wpływ na formowanie wyrobów zawierających krzywizny, można stwierdzić, że prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wykazuje wieksza przydatność do formowania wyrobów zawierających krzywizny, niż prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Formowanie wyrobów zakrzywionych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> jest bardziej czasochłonne, wymaga także stosowania dłuższych i częstszych procesów konsolidacji, co jest czynnikiem sprzyjającym powstawaniu defektów w obszarach krzywizn. Sam proces formowania zależny jest od kształtu wyrobu i orientacji włókien. W przypadku prostych krzywizn, łatwiejsze może być formowanie z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, który ma mniejszą sztywność przy zginaniu. Jednakże już podczas wytwarzania wyrobów o skomplikowanej geometrii i różnych krzywiznach, łatwiejsze może być formowanie wyrobów z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, który ma także zdolność do odkształcenia poprzez ścinanie. Natomiast podczas samego utwardzania w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury, prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> ma większą podatność do tworzenia defektów w obszarach krzywizn niż prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> ze względu na mniejsza sztywność przy zginaniu i mniejszą względną zdolność do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie.

## 9.2. Właściwości mechaniczne kompozytów

Uśrednione wartości właściwości mechanicznych, wyznaczonych w każdym z testów dla płaskich (niezakrzywionych) próbek kompozytów na bazie prepregów o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> oraz 75 g/m<sup>2</sup> zestawiono zbiorczo w Tabeli 41. Próbki wykonane z prepregu

o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> wykazują lepsze właściwości przy rozciąganiu w kierunku 0°, przy zginaniu w kierunku 0° oraz przy ścinaniu. Próbki wykonane z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykazują lepsze właściwości przy rozciąganiu w kierunku 90° oraz wyższą umowną wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe.

Dedenie	Deveneetv	Cumhal	la du cativa	Materiał	
Badanie	Parametr	Symbol	Jednostka	$150 \text{ g/m}^2$	75 g/m <sup>2</sup>
Statyczna próba rozciagania	Wytrzymałość na rozciąganie	σ <sub>M</sub>	MPa	2503,4	1967,2
w kierunku 0°	Moduł sprężystości przy rozciąganiu	E	GPa	138,7	117,3
Statyczna próba rozciagania	Wytrzymałość na rozciąganie	σ <sub>M</sub>	MPa 40,1		53,1
w kierunku 90°	Moduł sprężystości przy rozciąganiu	E	GPa	8,0	8,3
Badanie właściwości przy	Maksymalne naprężenie zginające	$\sigma_{\rm f}$	MPa	1616,9	1316,2
zginaniu w kierunku 0°	Moduł sprężystości przy zginaniu	E <sub>f</sub>	GPa	123,7	104,9
Badanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe	Umowna wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe	τ	MPa	66,6	87,7
Badanie właściwości przy	Maksymalne naprężenie ścinające	$ au_{12}^{m}$	MPa	72,0	60,3
ścinaniu w płaszczyźnie	Moduł sprężystości przy ścinaniu	G <sub>12</sub>	GPa	2,8	3,3

 Tabela 41 . Uśrednione wyniki badań właściwości mechanicznych próbek kompozytowych wykonanych z prepregów o gramaturze 150 g/m² oraz 75 g/m²

Istotny wpływ na otrzymane wyniki mogą mieć udziały objętościowe włókien i żywicy w przygotowanych do badań próbkach, które nie były jednakowe, co przedstawiono w Tabeli 10. Udziały poszczególnych komponentów mają bardzo duży wpływ na właściwości CFRP. Dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> uzyskano niemalże 10% więcej udziału włókien od próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Wyniki badań mechanicznych dla właściwości i kierunków, w których główną rolę odgrywają włókna wzmacniające, są wyższe dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Z kolei w statycznej próbie rozciągania w kierunku 90°, w którym za wytrzymałość odpowiada głównie matryca, lepsze właściwości uzyskano dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Aby móc bezpośrednio porównać właściwości kompozytów otrzymane dla dwóch różnych gramatur prepregu, wyniki badań znormalizowano do 55% udziału objętościowego włókien, korzystając ze wzoru:

$$X_{55} = \frac{55\%}{V_f} X_f \tag{37}$$

gdzie:

 $X_{55}$  – wartość danej właściwości znormalizowana do 55% udziału objętościowego włókien,

*X<sub>f</sub>* - wartość danej właściwości wyznaczona w badaniu,

V<sub>f</sub>-udział objętościowy włókien w próbkach użytych do badania.

Otrzymane w badaniach właściwości mechaniczne, znormalizowane do 55% udziału objętościowego włókien, przedstawiono w Tabeli 42. Wytrzymałość oraz moduł

sprężystości przy statycznym rozciąganiu w kierunku 0° oraz przy zginaniu mają bardzo zbliżone wartości. Wytrzymałość przy statycznym rozciąganiu w kierunku 90° jest o 34,5% wyższa dla kompozytu wykonanego z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. ILSS jest o 34% wyższa dla kompozytu wykonanego z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Porównanie podstawowych właściwości wytrzymałościowych w formie graficznej przedstawiono na Rys. 112.

	Parametr	Symbol	Jednostka	Właściwości	
Badanie				znormalizowane do 55% V <sub>f</sub>	
				150 g/m <sup>2</sup>	75 g/m²
Statyczna próba rozciagania	Wytrzymałość na rozciąganie	$\sigma_{M55}$	MPa	2260,7	2125,2
w kierunku 0°	Moduł sprężystości przy rozciąganiu	E <sub>55</sub>	GPa	125,2	126,7
Statyczna próba rozciagania	Wytrzymałość na rozciąganie	$\sigma_{M55}$	MPa	36,8	56,2
w kierunku 90°	Moduł sprężystości przy rozciąganiu	E55	GPa	7,3	8,8
Badanie właściwości przy	Maksymalne naprężenie zginające	$\sigma_{f55}$	MPa	1485,7	1392,7
zginaniu w kierunku 0°	Moduł sprężystości przy zginaniu	E <sub>f55</sub>	GPa	113,6	111,0
Badanie umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe	Umowna wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe	τ <sub>55</sub>	MPa	61,2	92,8
Badanie właściwości przy	Maksymalne naprężenie ścinające	$\tau_{1255}^{ m}$	MPa	64,8	62,8
ścinaniu w płaszczyźnie	Moduł sprężystości przy ścinaniu	G <sub>1255</sub>	GPa	2,5	3,4

 Tabela 42. Wyniki badań właściwości mechanicznych kompozytów wykonanych z prepregów o gramaturze

 75 g/m² oraz 150 g/m², znormalizowane do 55% udziału objętościowego włókien



**Rys. 112**. Porównanie podstawowych właściwości mechanicznych kompozytów wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup>

Otrzymane wyniki pokrywają się z danymi literaturowymi, przedstawionymi w rozdziale 3.3. Wyższa wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 90° oraz wyższa ILSS w przypadku laminatów zbudowanych z cienkich warstw są wynikiem bardziej jednorodnej mikrostruktury i równomiernego rozkładu naprężeń oraz zdolności do tłumienia mikropęknięć osnowy.

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że w przypadku obciążeń w płaszczyźnie, wpływ gramatury na właściwości struktur jednokierunkowych, w których decydujące w przenoszeniu obciążeń są włókna umacniające, jest niewielki. W przypadku właściwości, w których na wytrzymałość wpływa również jednorodność struktury, wyższe wartości osiągane są dla materiałów o niskiej gramaturze. Wybór materiału jest zatem zależny od stanu naprężeń w projektowanym wyrobie, jednakże w przypadku podstawowych obciążeń w płaszczyźnie, w jakich zwykle pracują wyroby płaskie, korzystniejsze wydaje się użycie prepregu o mniejszej gramaturze. Pozwalają one istotnie zwiększyć wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 90° oraz ILSS. Ponadto, zmniejszenie gramatury niesie za sobą inne korzyści, takie jak możliwość zmniejszenia masy wyrobu czy zastosowania dodatkowych orientacji włókien zbrojących.

# 9.3. Właściwości zakrzywionych próbek kompozytowych

## 9.3.1. Ocena procesu wytwarzania

Podczas procesu formowania próbek zawierających krzywizny o różnych kątach rozwarcia i różnych promieniach gięcia zaobserwowano wpływ gramatury prepregu na przebieg procesu laminowania. Ukształtowanie pojedynczej warstwy prepregu było łatwiejsze dla materiału o mniejszej gramaturze, co było widoczne zwłaszcza w przypadku próbek o najmniejszych promieniach krzywizny i kątach rozwarcia pomiędzy ramionami. Prawidłowe uformowanie pojedynczej warstwy wokół krzywizny wymagało więcej czasu oraz siły w przypadku prepregu o większej gramaturze.

Mimo łatwiejszego formowania pojedynczej warstwy, sam proces laminowania był o wiele dłuższy w przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, ze względu na większą ilość warstw i przeprowadzonych procesów konsolidacji do uzyskania pożądanej grubości, zatem pod kątem czasu pracy, bardziej ekonomiczne rozwiązanie stanowi prepreg o większej gramaturze.

Podczas wytwarzania próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> zaobserwowano problem z powstawaniem zmarszczek w obszarze krzywizny po procesie konsolidacji. Problem ten pojawił się już po ułożeniu kilku warstw, a zatem po uzyskaniu pewnej grubości stosu prepregu na formie, był też bardziej widoczny dla próbek o większej długości łuku krzywizny. Przyczynę stanowi więc najprawdopodobniej zmiana grubości podczas konsolidacji. Zmiana grubości pociąga za sobą zmniejszenie promienia zewnętrznych warstw, a więc powstanie naddatku materiału, który ulegał marszczeniu. Zjawiska tego nie zaobserwowano w przypadku prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.
Powyższe zjawiska, zaobserwowane w trakcie wytwarzania próbek zawierających krzywizny, pokrywają się z wynikami badań właściwości prepregów w stanie nieutwardzonym, których podsumowanie przedstawiono w rozdziale 9.1. Łatwiejszy proces formowania prepregu o mniejszej gramaturze jest wynikiem mniejszej sztywności przy zginaniu. Zaobserwowane w przypadku prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> zmarszczki, powstające po procesie konsolidacji, są wynikiem zarówno dużej zmiany grubości stosu prepregu w trakcie konsolidacji, którą zaobserwowano podczas badania współczynnika zagęszczenia, jak i małej sztywności przy zginaniu. Prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, cechuje się 2,5 razy większą sztywnością przy zginaniu oraz mniejszą zmianą grubości stosu w trakcie konsolidacji, dlatego w tym przypadku nie zaobserwowano powstawania zmarszczek.

### 9.3.2. Ocena jakości wytworzonych próbek

Podczas kontroli wizualnej stwierdzono obecność defektów w postaci zmarszczek w obszarze krzywizny na próbkach wykonanych z obydwu badanych prepregów, defekty te były jednak większe oraz występowały w większej ilości na próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Powstałe zmarszczki są wynikiem działania naprężeń ściskających, spowodowanych oddziaływaniem ciśnienia na obszar krzywizny oraz zmniejszania promienia, przy ograniczonej możliwości przesuwania się materiału względem siebie wzdłuż ramion próbki ze względu na małą sztywność przy zginaniu i dużą adhezję warstw. Dodatkowy wpływ na powstawanie zmarszczek mogło mieć także odkształcenie materiałów pomocniczych, tworzących pakiet podciśnieniowy, które mają dużą sztywność na skutek działającego ciśnienia. Większa ilość i rozmiary zmarszczek dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> są wynikiem niskiej sztywności przy zginaniu (2,5 razy mniejszej niż dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>), co sprawia, że materiał ten jest bardziej podatny na odkształcenia w trakcie formowania i utwardzania wyrobów zawierających krzywizny.

Przeprowadzone pomiary grubości próbek wykazały, że powstałe zmarszczki wpłynęły w istotny sposób na grubość w obszarze promienia tylko dla próbek o najmniejszych kątach rozwarcia ramion i promieniach krzywizny. W tych przypadkach, wpływ zmarszczek na grubość był większy dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> (dla próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ , R<sub>i</sub>4 współczynnik zmienności wyniósł 10,35% dla próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 1,50% dla próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>). Dla pozostałych układów geometrii krzywizny, powstałe zmarszczki nie miały istotnego wpływu na zmianę grubości w obszarze promienia. Nie zauważono też wpływu gramatury na zmianę grubości w obszarze promienia.

Dla wszystkich próbek zaobserwowano też zjawisko odkształcenia po utwardzeniu, objawiające się zmianą kąta rozwarcia ramion od zaprojektowanej wartości. Im mniejszy promień krzywizny i kąt rozwarcia ramion, tym większe odkształcenie od wartości nominalnej. Dla wszystkich układów geometrii, odkształcenie od wartości nominalnej

było większe w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów geometrycznych można stwierdzić, że mniejszą zmianę geometrii wyrobu po utwardzeniu uzyskano w przypadku zastosowania prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> niż 75 g/m<sup>2</sup>.

Na podstawie wyznaczonej gęstości próbek oraz udziałów objętościowych zbrojenia i osnowy można stwierdzić, że wykonane próbki miały dobrą jakość i dużą powtarzalność, ponieważ mimo stosunkowo małej próby reprezentatywnej, wytypowanej do badań, wszystkie próbki wykonane z prepregu o danej gramaturze miały bardzo zbliżoną gęstość i zawartość poszczególnych komponentów. Dla każdej z badanych właściwości wyznaczono wartość średnią, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności. Wyniki przedstawiono w Tabeli 43. Uzyskane wartości odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności są bardzo małe, co potwierdza dobrą jakość i powtarzalność wykonanych próbek.

	75 g/m²	150 g/m <sup>2</sup>
Średnia gęstość $ ho_c$ [g/cm3]	1,5323	1,5674
Odchylenie standardowe	0,0065	0,0031
Współczynnik zmienności CV [%]	0,43	0,20
Średni udział objętościowy włókien V <sub>r</sub> [%]	53,53	60,52
Odchylenie standardowe	0,36	0,48
Współczynnik zmienności CV [%]	0,67	0,79
Średni udział objętościowy żywicy V <sub>m</sub> [%]	47,39	39,85
Odchylenie standardowe	0,71	0,59
Wsnółczynnik zmienności CV [%]	1 49	1 49

 Tabela 43. Analiza statystyczna gęstości oraz udziałów objętościowych zbrojenia i osnowy próbek

 wytworzonych z danego rodzaju prepregu

Pomimo dobrej jakości wytworzonych próbek, pomiary gęstości oraz udziału poszczególnych komponentów potwierdziły różnice pomiędzy próbkami wykonanymi z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup>, zaobserwowane już na etapie kontroli wymiarowej. Różnice te w sposób graficzny przedstawiono na Rys. 113. Są one wynikiem różnej zawartości żywicy w wykorzystanych materiałach. Zawartość masowa żywicy w prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wynosiła 37,5 %, a w prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> 32,3%, co przełożyło się na wyższą gęstość i wyższy udział objętościowy włókien w kompozytach wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.



*Rys. 113.* Udziały objętościowe osnowy i zbrojenia w kompozytach wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup>

#### 9.3.3. Badania strukturalne

W badaniach nieniszczących wykonanych metodą aktywnej termografii w podczerwieni nie wykryto żadnych defektów w postaci nieciągłości wewnątrz struktury. Na próbkach o najmniejszym kącie rozwarcia pomiędzy ramionami oraz najmniejszym promieniu krzywizny α90°, R<sub>i</sub>4 zaobserwowano odkształcenie włókien wokół promienia, które jest większe dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Powstałe po procesie utwardzania zmarszczki na podstawie oceny IrNDT wydają się mieć powierzchniowy charakter, ponieważ w ich obrębie nie zauważono żadnych większych deformacji włókien. Rozkład zmarszczek w obszarze krzywizny ma charakter losowy. Za pomocą wybranej metody nie można jednak ocenić głębokości zmarszczek. Większą ilość zmarszczek wykryto na próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Ponadto, przeprowadzone badania pozwoliły na bardzo dokładne zobrazowanie wszystkich defektów powierzchniowych.

Badania strukturalne przeprowadzone metodą CT pozwoliły uzyskać bardzo dokładne obrazy wytworzonych struktur, włącznie z ułożeniem warstw oraz włókien dla obszarów reprezentujących krzywizny o danej geometrii. Przeprowadzone badania potwierdziły dobra jakość próbek, z bardzo małym udziałem pustek i dobrze wypełnionymi żywicą przestrzeniami pomiędzy warstwami. Uzyskane obrazy pozwoliły wykryć defekty w postaci pustek oraz obcych wtrąceń, jednak przeprowadzone pomiary wykazały, że ich rozmiar i udział jest bardzo mały. Zdjęcia wykonane metoda tomografii komputerowej pozwoliły na bardzo dokładną ocenę ułożenia i głębokości zmarszczek powstałych Wszystkie po procesie utwardzania. powstałe zmarszczki miałv charakter powierzchniowy, obejmując tylko zewnętrzną lub kilka zewnętrznych warstw włókien, nie powodując żadnego zaburzenia ułożenia włókien wewnątrz próbki. Większą ilość zmarszczek i głębokość zmarszczek zaobserwowano dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Dla próbek o najmniejszym promieniu krzywizny R<sub>i</sub>4 zauważono

ponadto zwiększone odległości pomiędzy warstwami w obszarze promienia, wypełnione żywicą, zwłaszcza dla próbek o geometrii  $\alpha 90^\circ$ , R<sub>i</sub>4. Defekt ten ma poważniejszy charakter w próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Próbki wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> miały bardziej jednorodną strukturę. Dla próbek o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> poszczególne granice pomiędzy warstwami były bardziej widoczne, chociaż przeprowadzone pomiary odległości między warstwami wykazały mniejsze odległości w przypadku próbek z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, co może być wynikiem większego udziału żywicy w próbkach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, a także mniejszej sztywności pojedynczej warstwy tego materiału.

Oba przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić dobrą jakość wykonanych próbek. Występowanie defektów w postaci pustek i wtrąceń w obszarze reprezentatywnym pozwala zakładać ich obecność także w innych obszarach próbek, jednak ze względu na mały rozmiar, nie powinny mieć one istotnego wpływu na właściwości badanych materiałów. Podobnie utworzone podczas procesu utwardzania zmarszczki nie powinny mieć istotnego wpływu na właściwości wytworzonych próbek ze względu na ich powierzchniowy charakter, za wyjątkiem próbek o promieniu krzywizny wynoszącym 4 mm, dla których zaobserwowano relatywnie duże przestrzenie pomiędzy warstwami, wypełnione żywicą. Większą tendencję do powstawania defektów w obszarach krzywizn zaobserwowano dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, co pokrywa się z wynikami badań właściwości prepregów w stanie nieutwardzonym, zgodnie z którymi materiał ten ma większą podatność na powstawanie defektów w trakcie utwardzania wyrobów zawierających krzywizny.

Porównując ze sobą oba przeprowadzone badania struktury wytworzonych kompozytów metodą aktywnej termografii w podczerwieni oraz metodą tomografii komputerowej, należy stwierdzić, że CT jest o wiele dokładniejszą i bardziej niezawodną metodą, pozwalającą na uzyskanie kompletnego obrazu struktury, również w układzie przestrzennym oraz ocenę ilościową uzyskanych obrazów. Wykorzystana metoda aktywnej termografii w podczerwieni nie pozwoliła na ocene głębokości zaobserwowanych defektów powierzchniowych. Nie wykryła małych defektów w postaci pustek i obcych wtrąceń. Rozmiar tych defektów jest mniejszy od głębokości, na jakiej znajdują się wewnątrz kompozytu, co sprawia, że są niemożliwe do wykrycia metodą aktywnej termografii w podczerwieni. Metoda ta jest więc przydatna do wykrywania dużych defektów. Badanie przeprowadzone przy wykorzystaniu parametrów opisanych rozdziale 8.3.6. pozwoliło raczej na dokładne zobrazowanie defektów W powierzchniowych, niż strukturalnych. Być może przy użyciu innych parametrów badania lub innej metody wzbudzenia, uzyskane termogramy pozwoliłyby na analizę większej ilości danych. Sprawia to jednak, że uzyskanie odpowiednich wyników metodą IrNDT może być problematyczne ze względu na mnogość czynników warunkujących przebieg procedury badania oraz analizę danych.

#### 9.3.4. Ocena wytrzymałości CBS

Podczas badania belek zawierających krzywizny metodą zginania czteropunktowego zaobserwowano zależność modelu zniszczenia próbki od geometrii krzywizny. Próbki o tym samym układzie geometrii, wykonane z obydwu prepregów, ulegały zniszczeniu w taki sam sposób. Dla wszystkich badanych próbek wyznaczono CBS, a dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację, wyznaczono także ILTS. Średnie wartości uzyskane dla badanych próbek przedstawiono zbiorczo w Tabeli 44. Analiza statystyczna pokazała również dość duży rozrzut otrzymanych wyników, zwłaszcza dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację. Wpływ na rozrzut wyników mogły mieć defekty obszaru krzywizny, co jest widoczne zwłaszcza dla próbek o geometrii krzywizny  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i$ 4, dla których podczas badań struktury zauważono zwiększone przestrzenie pomiędzy warstwami, wypełnione żywicą. Generalnie jednak wytworzone próbki miały bardzo dobą jakość, co potwierdziła przeprowadzona kontrola jakości, badania nieniszczące oraz strukturalne. Duży rozrzut wyników jest często spotykany w przypadku wytrzymałości CBS belek zawierających krzywizny i wynika z charakteru samego badania. Dodatkowy wpływ na rozrzut otrzymanych wyników mogło mieć także stosunkowo duże odkształcenie ramion w trakcie testu, obserwowane mimo zastosowania podkładek usztywniających.

	75 g/m <sup>2</sup>			75 g/m <sup>2</sup>		
Próbka	Średnia wytrzymałość CBS [N]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS σ <sub>r</sub> [MPa]	Model zniszczenia	Średnia wytrzymałość CBS [N]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS σ <sub>r</sub> [MPa]	Model zniszczenia
α90°, R <sub>i</sub> 4	259,61	35,93	Delaminacja	454,34	76,56	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 12	376,90	21,09	Delaminacja	607,03	38,76	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 36	389,17	7,76	Delaminacja	598,51	13,43	Delaminacja
α120°, R <sub>i</sub> 4	290,64	42,53	Delaminacja	501,39	83,88	Delaminacja
α120°, R <sub>i</sub> 12	728,23	-	Złamanie	698,89	-	Złamanie
α120°, R <sub>i</sub> 36	790,70	-	Złamanie	724,92	-	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 4	586,44	86,97	Delaminacja	670,86	114,37	Delaminacja
α150°, R <sub>i</sub> 12	838,60	-	Złamanie	754,67	-	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 36	847,45	-	Złamanie	707,94	-	Złamanie
α180°	994,76	-	Złamanie	1021,47	-	Złamanie

 Tabela 44. Średnie wartości wytrzymałości CBS oraz wytrzymałości na rozciąganie międzywarstwowe

 ILTS dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m² oraz 150 g/m²

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w Tabeli 44, dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację zaobserwowano większą CBS oraz ILTS w przypadku prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> niż 75 g/m<sup>2</sup>. Dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez złamanie, większą wytrzymałość zaobserwowano w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> (za wyjątkiem próbek płaskich). Mając jednak na uwadze spore różnice udziału objętościowego żywicy oraz włókien w wytworzonych próbkach (przedstawione w rozdziale 8.3.5.) oraz duży wpływ udziału poszczególnych

komponentów na CBS i ILTS, otrzymane wyniki znormalizowano dla udziału włókien wynoszącego 55%, zgodnie ze wzorem (37).

Do wyznaczenia znormalizowanych wartości CBS oraz ILTS wykorzystano udziały objętościowe zbrojenia przedstawione w Tabeli 32 i Tabeli 33. Znormalizowane wartości powyższych CBS oraz ILTS przedstawiono w Tabeli 45.

**Tabela 45.** Wytrzymałość CBS oraz wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS znormalizowana do 55% udziału włókien zbrojących, dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz

	75 g/m <sup>2</sup>			150 g/m <sup>2</sup>		
Próbka	Wytrzymałość CBS 55% V <sub>f</sub> CBS <sub>55</sub> [N]	Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS dla 55% V <sub>f</sub> σ <sub>r55</sub> [MPa]	Model zniszczenia	Wytrzymałość CBS dla 55% V <sub>f</sub> CBS₅₅ [N]	Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS dla 55% V <sub>f</sub> σ <sub>r55</sub> [MPa]	Model zniszczenia
α90°, R <sub>i</sub> 4	267,83	37,06	Delaminacja	414,74	69,88	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 12	383,08	21,44	Delaminacja	555,04	35,44	Delaminacja
α90°, R <sub>i</sub> 36	402,07	8,01	Delaminacja	535,70	12,02	Delaminacja
α120°, R <sub>i</sub> 4	299,69	43,85	Delaminacja	455,40	76,19	Delaminacja
α120°, R <sub>i</sub> 12	750,16	-	Złamanie	637,49	-	Złamanie
α120°, R <sub>i</sub> 36	805,28	-	Złamanie	650,20	-	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 4	598,14	88,71	Delaminacja	610,79	104,13	Delaminacja
α150°, R <sub>i</sub> 12	869,39	-	Złamanie	690,41	-	Złamanie
α150°, R <sub>i</sub> 36	872,53	-	Złamanie	646,59	-	Złamanie
α180°	1022,19	-	Złamanie	930,36	-	Złamanie

Analiza znormalizowanych do 55% udziału objętościowego włókien zbrojących wartości CBS i ILTS pozwala potwierdzić wcześniejsze obserwacje. Dla wszystkich próbek o najmniejszym promieniu krzywizny  $R_i$  wynoszącym 4 mm oraz najmniejszym kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 90°, wyższe wartości CBS oraz ILTS otrzymano dla prepregu o gramaturze wynoszącej 150 g/m<sup>2</sup>, co przestawiono w sposób graficzny na Rys. 114 i Rys. 115. Na przedstawionych wykresach widać również, że wraz ze zmianą geometrii próbek, a więc wraz ze zwiększeniem promienia krzywizny oraz kąta rozwarcia pomiedzy ramionami, różnice pomiedzy próbkami wykonanymi z obu prepregów maleja. Potwierdziły to wyznaczone różnice CBS oraz ILTS pomiędzy próbkami wykonanymi z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> a 75 g/m<sup>2</sup>, przedstawione w Tabeli 46. Oznacza to, że największe różnice pomiędzy wytrzymałością kompozytów wykonanych z prepregu o standardowej gramaturze oraz prepregu o niskiej gramaturze obserwuje się dla najmocniej zakrzywionych próbek. Wraz ze zwiększeniem promienia krzywizny i kąta rozwarcia pomiędzy ramionami, a więc wraz ze złagodzeniem geometrii krzywizny, różnice w wytrzymałości laminatów wykonanych z prepregu o większej oraz o mniejszej gramaturze maleją. Jest to wynikiem zmiany mechanizmu zniszczenia. Wraz ze zwiększaniem promienia, podczas obciążenia obok naprężeń promieniowych pojawiają się także naprężenia ścinające pomiędzy warstwami.



Rys. 114. Wytrzymałość CBS dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację



**Rys. 115.** Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację

**Tabela 46.** Różnica w wytrzymałości CBS oraz wytrzymałości na rozciąganie międzywarstwowe ILTS pomiędzy próbkami o danej geometrii krzywizny, wykonanymi z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> oraz  $75 \text{ g/m}^2$ 

	/5 g/m	
Dućblez	Różnica	Róznica ILTS
РГОрка	CBS [N]	σ <sub>r</sub> [MPa]
α90°, R <sub>i</sub> 4	146,9	32,8
α90°, R <sub>i</sub> 12	172,0	14,0
α90°, R <sub>i</sub> 36	133,6	4,0
α120°, R <sub>i</sub> 4	155,7	32,3
α150°, R <sub>i</sub> 4	12,7	15,4

Dla próbek o większych kątach rozwarcia i większych promieniach gięcia, które uległy zniszczeniu poprzez złamanie, większe wartości CBS otrzymano dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, co w sposób graficzny przedstawiono na Rys. 116. W tym przypadku, wraz ze wzrostem promienia krzywizny oraz kąta rozwarcia pomiędzy ramionami, różnica wytrzymałości CBS pomiędzy próbkami wykonanymi z obu prepregów rośnie na korzyść prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> (za wyjątkiem próbki płaskiej), co przedstawiono w Tabeli 47.



Rys. 116. Wytrzymałość CBS dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez złamanie

0 g	rumulurze 150 g/m	01u2 / 5 g/m		
Duźbka	CBS [N]			
Ргорка	75 g/m <sup>2</sup> 150 g/m <sup>2</sup> Różnie			
α120°, R <sub>i</sub> 12	750,16	637,49	112,7	
α120°, R <sub>i</sub> 36	805,28	650,20	155,1	
α150°, R <sub>i</sub> 12	869,39	690,41	179,0	
α150°, R <sub>i</sub> 36	872,53	646,59	225,9	
α180°	1022,19	930,36	91,8	

 Tabela 47. Różnica CBS pomiędzy próbkami o danej geometrii krzywizny, wykonanymi z prepregu

 o gramaturze 150 g/m² oraz 75 g/m²

W danych literaturowych, przytoczonych w rozdziale 4.1. zaobserwowano wzrost CBS oraz zmniejszenie ILTS wraz ze zwiększeniem promienia. Na Rys. 117 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości CBS od promienia krzywizny. Wraz ze wzrostem promienia krzywizny odnotowano wzrost wytrzymałości zakrzywionej belki, przy czym zmiana ta jest wyraźna w zakresie promienia 4 – 12 mm, dla promienia wynoszącego 36 mm obserwuje się nieznaczący spadek lub wzrost. Większy wzrost wytrzymałości dla małych promieni odnotowano w przypadku próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. Wzrost wytrzymałości zakrzywionej belki można też zaobserwować wraz ze wzrostem kąta rozwarcia ramion. Dla ILTS, wraz ze wzrostem promienia widoczny jest spadek wytrzymałości na rozciąganie międzywarstwowe, co jest

skutkiem wydłużenia obszaru krzywizny wraz ze wzrostem promienia oraz pojawienia się naprężeń ścinających pomiędzy warstwami. Wraz ze wzrostem kąta rozwarcia pomiędzy ramionami widoczny jest wzrost wytrzymałości na rozciąganie międzywarstwowe.



**Rys. 11**7. Wykres zależności wytrzymałości CBS od promienia krzywizny dla próbek o poszczególnych kątach rozwarcia ramion, wykonanych z obydwu badanych prepregów

Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że zarówno CBS, jak i ILTS zależą od geometrii krzywizny oraz od gramatury prepregu użytego do wykonania próbek. W przypadku próbek o kącie rozwarcia pomiędzy ramionami wynoszącym 90° oraz promieniach krzywizny wynoszących 4 mm, wyższe CBS oraz ILTS wykazują próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> niż 75 g/m<sup>2</sup>. W przypadku próbek o geometrii krzywizny  $\alpha$ 120, R<sub>i</sub>12,  $\alpha$ 120, R<sub>i</sub>36,  $\alpha$ 150, R<sub>i</sub>12 oraz  $\alpha$ 150, R<sub>i</sub>36, większą CBS wykazują próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> niż 150 g/m<sup>2</sup>. Różnica pomiędzy próbkami wykonanymi z obu badanych materiałów zmienia się na korzyść prepregu o niskiej gramaturze wraz ze złagodzeniem geometrii krzywizny. Jest to wynikiem zmiany mechanizmu obciążenia i pojawianiem się naprężeń ścinających pomiędzy warstwami wraz ze zwiększaniem promienia krzywizny. Jak bowiem przedstawiono w rozdziale 9.2, laminaty cienkowarstwowe wykazują z kolei niższą ILTS, zatem dobór materiału jest uzależniony od geometrii krzywizny oraz występujących obciążeń.

## 10. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zbadanie i ocena możliwości efektywnego zastosowania prepregu o niskiej gramaturze w procesie wytwarzania zakrzywionych kompozytowych struktur warstwowych, z wykorzystaniem metody autoklawowej. Wstępnie założono, że zastosowanie prepregu węglowo-epoksydowego o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> do wytwarzania struktur CFRP, zawierających krzywizny, pozwoli na uzyskanie lepszej jakości i wytrzymałości wyrobu w stosunku do węglowo-epoksydowego prepregu konwencjonalnego o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Wszystkie przeprowadzone badania ukierunkowano na pokazanie wpływu gramatury na właściwości:

- mechaniczne i technologiczne prepregów; m.in. na proces formowania i utwardzania złożonych kształtów,
- mechaniczne wyrobów zawierających krzywizny o różnej geometrii.

Cel pracy osiągnięto poprzez przeprowadzenie badań prowadzących do porównania laminatów uzyskanych z dwóch typów prepregów – klasycznego i o niskiej gramaturze, a także samych prepregów, w zakresie:

- właściwości prepregów w stanie nieutwardzonym (współczynnika zagęszczenia, sztywności przy zginaniu oraz zachowaniu w warunkach ścinania w płaszczyźnie),
- właściwości mechanicznych płaskich laminatów (wytrzymałości na rozciąganie, zginanie, ścinanie w płaszczyźnie oraz ILSS),
- oceny procesu technologicznego oraz jakości wyrobów zawierających krzywizny w postaci zakrzywionych belek próbek do badań wytrzymałości,
- oceny właściwości mechanicznych kompozytów w zakrzywionych belkach poprzez wyznaczenie wytrzymałości CBS oraz ILTS.

Badania struktur zawierających krzywizny przeprowadzono dla kątowników o kątach rozwarcia pomiędzy ramionami wynoszącymi 90°, 120° oraz 150° oraz o promieniach krzywizny wynoszących 4 mm, 12 mm i 36 mm dla każdego z kątów.

Na podstawie obserwacji oraz uzyskanych wyników badań nie można jednoznacznie stwierdzić, że zastosowanie prepregu węglowo-epoksydowego o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> pozwoli na poprawę jakości i wytrzymałości wyrobów zakrzywionych w stosunku do prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Uzyskane wyniki są bowiem zróżnicowane w zależności od geometrii krzywizny oraz stanu obciążenia. <u>Nie można więc stwierdzić prawdziwości tezy postawionej przy formułowaniu celów pracy</u>.

Analizując całokształt przeprowadzonych prac i uzyskane wyniki, można sformułować następujące wnioski:

1. Spośród właściwości prepregów w stanie nieutwardzonym, które wpływają na procesy formowania oraz powstawanie defektów w technologii autoklawowej,

prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> ma porównywalny do prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> współczynnik zagęszczenia, ale większą o  $9 \div 12\%$  (w zależności od orientacji) zmianę grubości w trakcie konsolidacji. Ma też 2,5 razy mniejszą sztywność przy zginaniu oraz nie wykazuje zdolności do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie (odkształcenie odbywa się poprzez poślizg pomiędzy włóknami i utratę spójności pomiędzy warstwami), w przeciwieństwie do prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, który wykazuje relatywnie dużą zdolność do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie. Właściwości te sprawiają, że prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> jest bardziej podatny na powstawanie defektów podczas formowania i utwardzania wyrobów zawierających krzywizny, niż prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>.

- 2. Wytrzymałość na rozciąganie oraz na zginanie w kierunku 0°, a także maksymalne naprężenia ścinające podczas ścinania w płaszczyźnie, są porównywalne dla kompozytów wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup>. Kompozyty z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykazują natomiast wyższą o 34,5% wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 90° oraz wyższą o 34% ILSS. Zastosowanie prepregu o niskiej gramaturze może więc poprawić właściwości kompozytu w przypadku obciążeń oddziałujących w płaszczyźnie.
- 3. Na podstawie oceny technologii formowania próbek zawierających krzywizny o różnej geometrii stwierdzono, że kształtowanie pojedynczej warstwy jest łatwiejsze dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> ze względu na mniejszą sztywność przy zginaniu. Jednakże, cały proces jest bardziej czasochłonny dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> ze względu na większą ilość warstw, a obecność złożonych kształtów uniemożliwia zastosowanie zautomatyzowanych procesów laminowania. Prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> jest też bardziej podatny na powstawanie defektów technologicznych, wynikających ze zmiany grubości w trakcie konsolidacji.
- 4. Prepreg o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykazuje większą skłonność do powstawania defektów o podłożu technologicznym w trakcie utwardzania w autoklawie, niż prepreg o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Obecność defektów w większej ilości oraz o większych rozmiarach dla kompozytów na bazie prepregu o niskiej gramaturze zaobserwowano podczas kontroli jakości wytworzonych próbek zawierających krzywizny. Przeprowadzona kontrola obejmowała ocenę wizualną, pomiary geometryczne (zmianę grubości w obszarze promienia oraz kąta pomiędzy ramionami) oraz badania strukturalne metodą aktywnej termografii w podczerwieni i tomografii komputerowej obszaru reprezentatywnego. Do zaobserwowanych wad należą defekty powierzchniowe, pochodzące od pakietu podciśnieniowego, zmarszczki w obszarach krzywizny oraz zwiększone odległości pomiędzy warstwami, wypełnione żywicą w próbkach o geometrii α90°, R<sub>i</sub>4. Poza ostatnim z wymienionych defektów, zaobserwowane

nieprawidłowości miały charakter powierzchniowy, dlatego nie powinny mieć wpływu na wytrzymałość wytworzonych próbek. Rezultaty przeprowadzonej kontroli jakości utwardzonych kompozytów są zgodne z przewidywaniami wynikającymi z badań właściwości nieutwardzonych prepregów.

- 5. Wytrzymałość CBS przy zginaniu zakrzywionej belki jest zależna od geometrii krzywizny oraz modelu zniszczenia, który w zależności od badanego układu występował jako delaminacja lub pękanie poprzeczne w przekroju. W przypadku próbek o kącie rozwarcia między ramionami α90° oraz promieniach krzywizny R<sub>i</sub>4 mm, wyższe CBS otrzymano dla próbek z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> niż dla 75 g/m<sup>2</sup>. W przypadku próbek o geometrii krzywizny α120, R<sub>i</sub>12, α120, R<sub>i</sub>36, α150, R<sub>i</sub>12 oraz α150, R<sub>i</sub>36, wyższe CBS otrzymano dla próbek z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> niż dla 150 g/m<sup>2</sup>. Różnica pomiędzy CBS próbek o tej samej geometrii zmienia się na korzyść prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wraz ze zwiększaniem promienia krzywizny, co jest związane ze zmianą obciążenia i pojawieniem się naprężeń ścinających pomiędzy warstwami. Jest to sytuacja korzystna dla bardziej jednorodnego materiału, jakim jest laminat na bazie prepregu 75 g/m<sup>2</sup>.
- 6. Dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację, wyznaczono ILTS. Kompozyty zawierające krzywizny, wykonane z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> wykazują niższą wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS niż kompozyty wykonane z prepregów o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Różnica pomiędzy wytrzymałością dla obu badanych materiałów jest zależna od geometrii krzywizny i ogólnie jest mniejsza przy wyższych promieniach krzywizny i wyższych kątach rozwarcia.

### Rekomendacje i wytyczne wdrożeniowe

Na podstawie otrzymanych wniosków, rekomenduje się wykorzystanie prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> do wytwarzania kompozytowych struktur zakrzywionych, zawierających krzywizny o małych promieniach (4 mm) oraz małych kątach pomiędzy płaszczyznami tworzącymi krzywiznę (90°). Dla struktur o większych kątach pomiędzy płaszczyznami (120° i 150°) oraz większych promieniach krzywizny (12 i 36 mm) rekomenduje się wykorzystanie prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. W przypadku struktur o złożonych geometriach krzywizny, wykorzystanie prepregu o standardowej gramaturze zmniejsza ryzyko powstawania defektów o podłożu technologicznym. Ze względu na wyższe ILTS, pozwoli też uzyskać wyższą wytrzymałość wyrobów, dla których dominujące w obszarach krzywizn i decydujące o powstawaniu zniszczenia są naprężenia promieniowe, działające poza płaszczyzną. W przypadku struktur o łagodniejszych geometriach krzywizny, wykorzystanie prepregu o niskiej gramaturze pozwoli uzyskać wyższą wytrzymałość wyrobu, ze względu na podwyższone właściwości w warunkach obciążeń w płaszczyźnie, a zwłaszcza ILSS. Ze względu na łatwiejszy proces formowania, wykorzystanie prepregu o niskiej gramaturze nie powinno też istotnie zwiększyć ryzyka powstania defektów o podłożu technologicznym.

Przeprowadzone badania stanowiły wstęp do oceny wpływu gramatury prepregu na procesy formowania i powstawania defektów podczas wytwarzania wyrobów w technologii autoklawowej oraz na wytrzymałość wyrobów zawierających krzywizny, zwłaszcza w warunkach obciążeń poza płaszczyzną. Poprzez realizację niniejszej pracy, zyskano cenną wiedzę na temat zależności, jakie występują podczas doboru gramatury materiału do wytwarzania wyrobów zawierających krzywizny, co przyczyniło się do zwiększenia wiedzy i świadomości na temat prepregów o niskiej gramaturze, które są przedmiotem nowych inwestycji realizowanych w ŚCNTPL. Dla uzyskania pełnego obrazu rozstrzyganego zagadnienia, wymagane jest poszerzenie wyników o inne geometrie krzywizny oraz gramatury badanych materiałów. Przyszłe prace powinny też objąć struktury wielokierunkowe, w tym quasi-izotropowe. Interesujące może być także zastosowanie materiałów hybrydowych, złożonych z warstw prepregów o niskiej oraz o standardowej gramaturze w celu optymalizacji struktur zawierających krzywizny pod kątem poprawy wytrzymałości i minimalizacji masy. Wiedza nabyta w ramach realizacji pracy oraz ustalone rekomendacje do dalszych badań są bardzo cenne dla Firmy i w pełni uzasadniają udział ŚCNTPL w projekcie doktorskim.

## BIBLIOGRAFIA

- 1. P. K. Mallick, "Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design", wydanie trzecie, CRC Press, Boca Raton, 2007.
- 2. W. Królikowski, "*Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*", Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- 3. J. German, "Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych", Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. T. Kościuszki, Kraków, 1996.
- B. Jucha, *"Technologie projektowania i wytwarzania w przemyśle lotniczym i kosmicznym"*, Raport dotyczący obszaru technologicznego "Technologie lotnicze i przemysł kosmiczny" w ramach projektu "Proces Przedsiębiorczego Odkrywania w obszarze technologii lotniczych i z nimi powiązanych", realizowany w ramach Działania 1.3 "Profesjonalizacja IOB" Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014 2020, Czechowice-Dziedzice, 2019.
- 5. C. Wu, F. Xu, H. Wang, H. Liu, F. Yan, C. Ma, *"Manufacturing Technologies of Polymer Composites A Review"*, w: Polymers, Volume 15, Issue 3, styczeń 2023.
- ECSS-E-HB-32-20 Part 1A: "Space engineering. Structural materials handbook
   Part 1: Overview and material properties and applications", ESA Requirements and Standards Division, ESTEC, Noordwijk, marzec 2011.
- W. K. Goertzen, M. R. Kessler, "Thermal and mechanical evaluation of cyanate ester composites with low-temperature processability", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 38, Issue 3, marzec 2007, str. 779-784.
- 8. https://www.alliedmarketresearch.com/fiber-reinforced-composites-market-A10307 [dostep: 21.07.2023r., godz.: 11:55]
- 9. A. P. Wilczyński, "Polimerowe kompozyty włókniste: własności, struktura, projektowanie", Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1996.
- 10. https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/ [dostęp: 21.07.2023r., godz.: 12:30]
- C. Zweben, "*Composite materials*" w: Mechanical Engineers' Handbook. Materials and Engineering Mechanics, wydanie czwarte, pod redakcją M. Kutz, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2015.
- 12. B. Jucha, M. Kozioł, "Manufacturing gearbox housing case made of carbon fiber reinforced polymer composite by autoclave method", w: Composites Theory and Practice, r. 19, nr 4, 2019, str. 135 142.
- 13. T. Figlus, M. Kozioł, "Diagnosis of early-stage damage to polymer glass fibre composites using non-contact measurement of vibration signals", w: Journal of Mechanical Science and Technology, 30 (8), sierpień 2016, str. 3567 3576.
- 14. A. Koniuszewska, K. Naplocha, J.W. Kaczmar, "Zastosowanie lekkich elementów z kompozytów polimerowych i metalowych w budowie środków transportu", w: TTS Technika Transportu Szynowego, R. 22, nr 12, 2015, str. 2650 2656.

- 15. https://safetyfirst.airbus.com/safe-operations-with-composite-aircraft/ [dostęp: 21.07.2023, godz.: 15:00]
- J.W. Kaczmar, "Wytwarzanie, właściwości i zastosowanie elementów z materiałów kompozytowych", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- 17. A. Boczkowska, G. Krzesiński, "*Kompozyty i techniki ich wytwarzania"*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
- 18. P. K. Mallick, "*Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*", wydanie drugie, Woodhead Publishing, 2021.
- 19. B. A. Strong, "Fundamentals of composites manufacturing: Materials, Methods and Applications", Society of Manufacturing Engineers, Deaborn, Michigan 2008.
- 20. https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353 [dostęp 26.10.2021, godz.: 14:30].
- J. M. Kenny, L. Nicolais, ,, 18 Science and Technology of Polymer Composites", w: Comprehensive Polymer Science and Supplements, pod redakcją G. Allen i J. C. Bevington, Pergamon, 1989, str. 471-525.
- 22. https://neweramaterials.com/en/products/nemplate [dostęp: 21.07.2023r., godz.: 19:00]
- 23. MIL-HDBK-17-3F: "Department of Defense Handbook. Composite materials handbook. Volume 3. Polymer Matrix Coposites. Materials usage, design and analysis", United States of America Department of Defense, 17 czerwiec 2002.
- 24. D. Budelmann, C. Schmidt, D. Meiners, "*Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication*", w: Polymer Composites 2020;41, str.: 3440–3458.
- 25. K. K. Chawla, "*Composite Materials. Science and Engineering*", Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013.
- 26. https://www.compositesworld.com/articles/rediscovering-the-benefits-of-prepregs-in-composites-manufacturing [dostęp 27.10.2021, godz.: 10:00].
- D. H.-J.A. Lukaszewicz, C. Ward, K. D. Potter, *"The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future"*, Composites Part B: Engineering, Volume 43, Issue 3, kwiecień 2012, str. 997-1009.
- 28. B.T. Åström, "Manufacturing of polymer composites", Chapman & Hall, Londyn 1997.
- 29. https://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-defining-the-megatrendsin-composite-aerostructures [dostęp: 22.07.2023, godz.: 12:00].
- K. Kozaczuk, "Automated Fiber Placement System Overview", opracowanie w ramach projektu "Automated Fiber Placement technology introduction", Instytut Lotnictwa, Warszawa 2016, DOI: 10.5604/05096669.1226355.
- A. Brasington, C. Sacco, J. Halbritter, R. Wehbe, R. Harik, "Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward", w: Composites Part C: Open Access, Volume 6, październik 2021, 100182.

- 32. B. Denkena, C. Schmidt, P. Weber, "Automated Fiber Placement Head for Manufacturing of Innovative Aerospace Stiffening Structures", w: Procedia Manufacturing, Volume 6, 2016, str. 96-104.
- https://secure.boeingimages.com/archive/787-Dreamliner-Aftbody-Operations-Composite-Fabrication-at-Boeing-South-Carolina-2JRSXLJESQ2J.html [dostęp: 23.07.2023r., godz.: 13:00]
- 34. https://www.toraytac.com/products/composite-tooling/composite-tooling-prepregs [dostęp: 22.07.2023r., 09:00].
- 35. S. M. Lee, "Handbook of Composites Reinforcements", VCH Publishers, 1993.
- 36. J. C. Seferis, C. N. Velisaris, V. M. Drakonakis, *"Prepreg manufacturing"*, w: Wiley Encyclopedia of Composites, 2011.
- 37. https://kevra.fi/wp-content/uploads/Prepreg\_Technology\_.pdf [dostęp: 23.07.2023r., godz.: 19:00].
- 38. http://www.scntpl.pl/ [dostęp: 22.10.2022r., godz.: 14:00].
- 39. F. Y. C. Boey, *"Development of an autoclave curing system for fibre reinforced polymer composites"*, w: Polymer Testing, Volume 8, Issue 6, 1989, str. 375-384.
- F. Ahmad, M. A. Awadh, M. Abas, S. Noor, A. Hameed, "Optimization of Carbon Fiber Reinforced Plastic Curing Parameters for Aerospace Application", w: Applied Sciences 12(9):4307, kwiecień 2022.
- 41. L. Nele, A. Caggiano, R. Teti, *"Autoclave Cycle Optimization for High Performance Composite Parts Manufacturing*", Procedia CIRP, Volume 57, 2016, str. 241-246.
- 42. O. A. Ekuase, N. Anjum, V. O. Eze, O. I. Okoli, "A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing", w: Journal of Composites Science, 6(6), 172, czerwiec 2022.
- 43. T. Centea, L.K. Grunenfelder, S.R. Nutt, "A review of out-of-autoclave prepregs
   Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations",
  w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 70, marzec
  2015, str. 132-154.
- 44. F. Shaik, R. Malkapuram, K. C. Shekar, D. Varma, "Analysis of VBO governing sequence to minimize porosity in out-of-autoclave prepregs", w: Composites Theory and Practice, R. 21, nr 3, 2021, str. 87 95.
- 45. J. Cauberghs J., "Out-of-Autoclave Manufacturing of Aerospace Representative Parts", praca magisterska, Mechanical Engineering Department, McGill University, Montreal, Quebec, 2011.
- P. Hubert, T. Centea, L. Grunefelder, S. Nutt, J. Kratz, A. Lévy, "Out-of-Autoclave Prepreg Processing", w: Comprehensive Composite Materials II, 2, Elsevier, 2018, str. 63-94, DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09900-8.
- 47. S. Mahdavi, S. K. Gupta, M, Hojjati, "*Thermal cycling of composite laminates made of out-of-autoclave materials*", w: Science and Engineering of Composite Materials, Volume 25, Issue 6, 2018, str. 1145-1156.
- 48. J. K. Sutter, W. S. Kenner, L. Pelham, S. G. Miller, D. L. Polis, C. Nailadi, T.-H. Hou, D. J. Quade, B. A. Lerch, R. D. Lort, T. J. Zimmerman, J. Walker, J. Fikes,

"Comparison of Autoclave and Out-of-Autoclave Composites", materialy konferencyjne: SAMPE 2010 Technical Conference, Salt Lake City, 2010.

- 49. C. Pasco, K. Kendall, "*Characterisation of the thermoset prepreg compression moulding process*", materiały konferencyjne, SPE Annual Automotive Composites Conference & Exhibition, Detroit, wrzesień 2016.
- 50. https://www.compositesworld.com/articles/prepreg-compression-molding-makes-its-commercial-debut [dostęp: 25.07.2023r., godz.:18:00].
- 51. https://neweramaterials.com/en/products/nempreg [dostęp: 25.07.2023r., godz.:18:00].
- 52. https://www.hexcel.com/Products/HexPly-Snap-Cure [dostęp: 25.07.2023r., godz.:18:00].
- 53. S. J. Joshi, K. S. Patel, D. B. Shah, K. M. Patel. B. K. Mawandiya, "Development and performance analysis of out-of-autoclave curing process for CFRP composites", w: Advances in Materials and Processing Technologies, Volume 8, Issue sup3, 2022, str. 1593-1603.
- 54. T. de Lumley, F. Mathieu, D. Cornet, D. Gueuning, N. Van Hille, "Out-of-Autoclave Process and Automation: A Successful Path to Highly Integrated and Cost Efficient Composite Wing Moveables", materialy konferencyjne, SAMPE 2019 Technical Conference, Charlotte, 2019.
- 55. https://www.compositesworld.com/articles/sqrtm-enables-net-shape-parts [dostęp: 25.07.2023r., godz.:18:00].
- E.-T. Park, Y. Lee, J. Kim, B.-S. Kang, W. Song, "Experimental Study on Microwave-Based Curing Process with Thermal Expansion Pressure of PTFE for Manufacturing Carbon Fiber/Epoxy Composites", w: Materials 12(22), 3737, 2019.
- Y. Lia, N. Lib, J. Zhoua, Q. Cheng, "Microwave Curing of Multidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", w: Composite Structures, Volume 212, 15 marzec 2019, str. 83-93.
- 58. M. Kwak, P. Robinson, A. Bismarck, R. Wise, "*Curing of composite materials using the recently developed hephaistos microwave*", materiały konferencyjne, 18th International Conference on Composite Materials, 2011, str. 21-26.
- 59. J. Galos, "*Thin-ply composite laminates: a review*", w: Composite Structures, Volume 236, Marzec 2020.
- A. E. Lovejoy, S. J. Scotti, S. G. Miller, P. Heimann, S. S. Miller, *"Characterization of IM7/8552 Thin-ply and Hybrid Thin-ply Composites"*, materiały konferencyjne, AAIA Scitech 2019 Forum, Sesja: Composite Structural Design, Test and Analysis II, Sn Diego, 2019.
- 61. S. Sihn, R. Y. Kim, K. Kawabe, S. W. Tsai, *"Experimental studies of thin-ply laminated composites"*, w: Composites Science and Technology, Volume 67, Issue 6, Maj 2007, str. 996-1008.
- 62. https://www.thinplytechnology.com/pl/technology/spread-tow-technology [dostęp 19.03.2023, godz.: 16:00]
- 63. https://www.textreme.com/products-services/spread-tow-products/ [dostęp 19.03.2023, godz.: 16:00]

- 64. https://estcarbon.com/blog/carbon-fiber-what-is-k/ [dostęp 19.03.2023, godz.: 16:00]
- 65. United States Patent Nr US 6,311,377 B1 Apparatus and method for spreading fibrous tows into linear arrays of generally uniform density and products made thereby
- 66. H. M. El-Dessouky, "Spread Tow Technology for Ultra Lightweight CFRP Composites: Potential and Possibilities", w: Advanced Composite Materials: Properties and Applications, pod redakcją E. Bafekrpour, De Gruyter Open Poland, Warszawa 2017, str. 323 – 348.
- 67. D. Dimesky, V. Srebrenkoska, "Advanced prepreg ballistic composites for military helmets", materiały konferencyjne: 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2014, Belgrad.
- M. Standiford, C. Grubb, N. Larson, "Development of unidirectional carbon prepreg using a solvent dip process", Western Washington University, Bellingham,2021,https://web.archive.org/web/20220520203550id\_/https://www. digitallibrarynasampe.org/data/pdfs/s2021\_pdfs/TP21-0000000499.pdf [dostęp: 04.08.2023, godz.: 11:00].
- K. Deng, C. Zhang, X. Dong, K. K. Fu, "Rapid and energy-efficient manufacturing of thermoset prepreg via localized in-plane thermal assist (LITA) technique", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 161, October 2022, 107121.
- D. Le, "Press lamination manufacturing process of prepreg composites", praca dyplomowa, Materials Processing Technology, 2020, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/353861/DangLe\_thesis\_2020.pdf
   ?sequence=2&isAllowed=y [dostęp: 04.08.2023, godz.: 11:00].
- R. Amacher, J. Cugnoni, J. Botsis, L. Sorensen, W. Smith, C. Dransfeld, "*Thin ply composites: Experimental characterization and modeling of size-effects*", w: Composites Science and Technology, Volume 101, 12 wrzesień 2014, str. 121-132.
- 72. R. Amacher, W. Smit, J. Botsis, C. Dransfeld, J. Cugnoni, "*New design opportunities using thin-ply composites*", w: JEC Composites Magazine, No 96, kwiecień 2015, str. 38-40.
- G.-D. Wang, J. Wang, S. K.M. Hossain, H. Chen, "Research on design rules for composite laminate", w: Science and Engineering of Composite Materials, Volume 22, Issue 3, kwiecień 2015, str. 315–323,
- 74. K. Zheng, D. Cao, H. Hu, Y. Ji, S. Li, "Mechanical Properties of Thin-Ply Composites Based on Acoustic Emission Technology", w: Materials, 14(4), 913, luty 2021.
- 75. A. Arteiroa, C. Furtadoa, G. Catalanottic, P. Linded, P.P. Camanho, "*Thin-ply polymer composite materials: A review*", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 132, Maj 2020, 105777.
- 76. C. Huang, M. He, Y. He, J. Xiao, J. Zhang, S. Ju, D. Jiang, "Exploration relation between interlaminar shear properties of thin-ply laminates under short-beam

*bending and meso-structures*", w: Journal of Composite Materials, Volume 52, Issue 17, lipiec 2018, str. 2375–2386.

- 77. Y.-C. Ho, H. Sasayama, J. Yanagimoto, "Mechanical properties and drawing process of multilayer carbon-fiber-reinforced plastic sheets with various prepreg thicknesses", w: Advances in Mechanical Engineering, Vol. 9(3), 2017, str. 1–12.
- S. K. Bhudolia, S. C. Joshi, Y. D. Boon, "Experimental and Microscopic Investigation on Mechanical Performance of Textile Spread-tow Thin Ply Composites", w: Fibers and Polymers, Volume 20, No. 5, maj 2019, str. 1036-1045.
- 79. Y. Yuan, X. Yao, B. Liu, H. Yang, H. Imtiaz, *"Failure modes and strength prediction of thin ply CFRP angle-ply laminates"*, w: Composite Structures, Volume 176, 15 września 2017, str. 729-735.
- G. Guillamet, A. Turon, J. Costa, P. Linde, "A quick procedure to predict freeedge delamination in thin-ply laminates under tension", w: Engineering Fracture Mechanics, Volume 168, Part B, grudzień 2016, str. 28-39.
- 81. J.D. Fuller, M.R. Wisnom, "*Pseudo-ductility and damage suppression in thin ply CFRP angle-ply laminates*", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 69, luty 2015, str. 64-71.
- 82. Y. Nishikawa, K. Okubo, T. Fujii, K. Kawabe, *"Fatigue crack constraint in plain-woven CFRP using newly-developed spread tows"*, w: International Journal of Fatigue, Volume 28, Issue 10, październik 2006, str. 1248-1253.
- 83. T. Yokozeki, Y. Aoki, T. Ogasawara, "Experimental characterization of strength and damage resistance properties of thin-ply carbon fiber/toughened epoxy laminates", w: Composite Structures, Volume 82, Issue 3, luty 2008, str. 382-389.
- A. Arteiro a, G. Catalanotti a, J. Xavier b, P.P. Camanho, "Notched response of non-crimp fabric thin-ply laminates", w: Composites Science and Technology, Volume 79, 18 kwiecień 2013, str. 97-114.
- G. Czél, M. R. Wisnom, "Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 52, wrzesień 2013, str. 23-30.
- G. Czél, M. Jalalvand, M. R. Wisnom, "Design and characterisation of advanced pseudo-ductile unidirectional thin-ply carbon/epoxy–glass/epoxy hybrid composites composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg", w: Composite Structures, Volume 143, 20 maj 2016, str. 362-370.
- M. Fotouhi, M. Jalalvand , M. R. Wisnom, "High performance quasi-isotropic thin-ply carbon/glass hybrid composites with pseudo-ductile behaviour in all fibre orientations", Composites Science and Technology, Volume 152, 10 listopad 2017, str. 101-110.
- M. Fotouhi, J. Fuller, M. Longana, M. Jalalvand, M. R. Wisnom, "The high strain rate tension behaviour of pseudo-ductile high performance thin ply composites", w: Composite Structures, Volume 215, 1 maj 2019, str. 365-376.
- Y. Yuan, S. Wang, H. Yang, X. Yao, B. Liu, "Analysis of pseudo-ductility in thinply carbon fiber angle-ply laminates", w: Composite Structures, Volume 180, 15 listopad 2017, str. 876-882.

- M. R. Wisnom, "Mechanisms to create high performance pseudo-ductile composites", materialy konferencyjne, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 139, 37th Risø International Symposium on Materials Science, Risø, wrzesień 2016.
- 91. J.D. Fuller, M. Jalalvand, M.R. Wisnom, "Combining fibre rotation and fragmentation to achieve pseudo-ductile CFRP laminates", w: Composite Structures, Volume 142, 10 maj 2016, str. 155-166.
- 92. R. J. Mania, C. B. York, "Buckling strength improvements for Fibre Metal Laminates using thin-ply tailoring", Composite Structures, Volume 159, 1 styczeń 2017, str. 424-432.
- 93. T. B. C. Braz, C. A. Cimini, P. Wennhague, D. Zenkert, T. Nyman, "*Thick ply versus thin ply composite laminate stiffened panel buckling and post-buckling behavior*", materiały konferencyjne: ICCM International Conferences on Composite Materials, International Committee on Composite Materials, Xi'an, sierpień 2017.
- 94. J.-B. Moon, M.-G. Kim, C.-G. Kim, S. Bhowmik, "Improvement of tensile properties of CFRP composites under LEO space environment by applying MWNTs and thin-ply", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 42, Issue 6, lipiec 2011, str. 694-701.
- 95. H. Wu, S. Li, J. Zhang, L. Tong, "Electrical resistivity response of unidirectional thin-ply carbon fiber reinforced polymers", w: Composite Structures, Volume 228, 15 listopad 2019, 111342.
- 96. https://sbir.nasa.gov/content/thin-ply-composite-technology-and-applications-1 [dostęp: 19.03.2023, godz.: 19:00]
- 97. https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/game\_changing\_development/proje cts/dcb [dostęp: 19.03.2023, godz.: 19:00]
- 98. C. Leclerc, S. Pellegrino, "*Ultra-Thin Composite Deployable Booms*", materiały konferencyjne: International Association for Shell and Spatial Structures Annual Symposium, Hamburg, wrzesień 2017.
- 99. Y. Hu, Y. Wei, G. Han, J. Zhang, G. Sun, X. Hu, F. Cheng, "Comparison of impact resistance of carbon fibre composites with multiple ultra-thin CNT, aramid pulp, PBO and graphene interlayers", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 155, kwiecień 2022, 106815.
- 100. J. Cugnoni, R. Amacher, S. Kohler, J. Brunner, E. Kramer, C. Dransfeld, W. Smith, K. Scobbie, L. Sorensen, J. Botsis, "Towards aerospace grade thin-ply composites: Effect of ply thickness, fibre, matrix and interlayer toughening on strength and damage tolerance", Composites Science and Technology, Volume 168, 10 listopad 2018, str. 467-477.
- 101. A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, N. Blanco, J. Orr, P. Linde, "Impact and compression after impact response in thin laminates of spread-tow woven and non-crimp fabrics", Composite Structures, Volume 215, 1 maj 2019, str. 432-445.
- 102. T.A. Sebaey, E. Mahdi, "Using thin-plies to improve the damage resistance and tolerance of aeronautical CFRP composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 86, lipiec 2016, str. 31-38.

- 103. A. Wagih, P. Maimí, N. Blanco, S.M. García-Rodríguez, G. Guillamet, R.P. Issac, A. Turon, J. Costa, "Improving damage resistance and load capacity of thin-ply laminates using ply clustering and small mismatch angles", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 117, luty 2019, str. 76-91.
- 104. A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, V. Singery, P. Linde, "Mitigating the weak impact response of thin-ply based thin laminates through an unsymmetrical laminate design incorporating intermediate grade plies", Composite Structures, Volume 220, 15 lipiec 2019, str. 93-104.
- 105. H. Saito, M. Morita, K. Kawabe, M. Kanesaki, H. Takeuchi, M. Tanaka, I. Kimpara, "*Effect of ply-thickness on impact damage morphology in CFRP laminates*", w: Journal of Reinforced Plastics and Composites, Volume 30, Issue 13, 2011, str. 1097–1106.
- 106. A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, N. Blanco, J. Orr, P. Linde, "Effect of ply thickness and ply level hybridization on the compression after impact strength of thin laminates", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 121, czrwiec 2019, str. 232-243.
- 107. S.M. García-Rodríguez, J. Costa, A. Bardera, V. Singery, D. Trias, "A 3D tomographic investigation to elucidate the low-velocity impact resistance, tolerance and damage sequence of thin non-crimp fabric laminates: effect of plythickness", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 113, październik 2018, str. 53-65.
- 108. T. Yokozeki, A. Kuroda, A. Yoshimura, T. Ogasawara, T. Aoki, "Damage characterization in thin-ply composite laminates under out-of-plane transverse loadings", Composite Structures, Volume 93, Issue 1, grudzień 2010, str. 49-57.
- 109. ASTM D 5766/D 5766M Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates.
- 110. C. Huang, S. Ju, M. He, Q. Zheng, Y. He, J. Xiao, J. Zhang, D. Jiang, "Identification of failure modes of composite thin-ply laminates containing circular hole under tension by acoustic emission signals", Composite Structures, Volume 206, 15 grudzień 2018, str. 70-79.
- 111. A. Arteiro, G. Catalanotti, J. Xavier, P. Linde, P.P. Camanho, "A strategy to improve the structural performance of non-crimp fabric thin-ply laminates", Composite Structures, Volume 188, 15 marzec 2018, str. 438-449.
- 112. G. Frossard, J. Cugnoni, T. Gmür, J. Botsis, "Mode I interlaminar fracture of carbon epoxy laminates: Effects of ply thickness", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 91, Part 1, grudzień 2016, str. 1-8
- 113. R.F. Teixeira, S.T. Pinho, P. Robinson, "Thickness-dependence of the translaminar fracture toughness: Experimental study using thin-ply composites", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 90, listopad 2016, str. 33-44.
- 114. G. Bullegas, S. T. Pinho, S. Pimenta, "Engineering the translaminar fracture behaviour of thin-ply composites", w: Composites Science and Technology, Volume 131, 2 sierpień 2016, str. 110-122.

- 115. J. Steeves, S. Pellegrino, "Post-cure shape errors of ultra-thin symmetric CFRP laminates: Effect of ply-level imperfections", w: Composite Structures, Volume 164, 15 marzec 2017, str. 237-247.
- 116. A. Corrado, W. Polini, "Analysis of process-induced deformation on the springin of carbon fiber-reinforced polymer thin laminates", w: Journal of Composite Materials, Volume 53, Issue 20, 2019.
- 117. Kozioł, M. "Mechanical performance of GFRP laminates manufactured from deformed stitched and three-dimensional woven preforms", w: Journal of Composite Materials, Vol. 50(19), 2016, str. 2617-2631.
- 118. Chiang, Y.-Ch., "Curved laminate analysis", w: Structural Engineering and Mechanics, Volume 39, Issue 2, 2011, str. 169-186.
- 119. M. Aggarwal, "Analysis of curved composite beam", praca dyplomowa, West Virginia University, Morgantown, grudzień 2016.
- 120. K. T. Kedward, R. S. Wilson, S. K. McLean, "Flexure of simply curved composite shapes", w: Composites, Volume 20, Issue 6, Listopad 1989, str. 527-536.
- B. O. Yavuz, L. Parnas, D. Coker "Interlaminar tensile strength of different angleply CFRP composites", w: Procedia Structural Integrity, Volume 21, 2019, str. 198-205.
- 122. R. H. Martin, "Delamination failure in unidirectional curved composite laminate", NASA Contractor Report No. 182018, Hampton, kwiecień 1990.
- 123. P. L. Zumaquero, J. Justo, E. Graciani, "On the Thickness Dependence of ILTS in Curved Composite Laminates", w: Key Engineering Materials, Volume 774, sierpień 2018, str. 523-528.
- 124. W. Cui, T. Liu, J. Len, R. Ruo, "Interlaminar tensile strength (ITLS) measurement od woven glass/polyester laminates using four-point curved beam specimen", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 27, Issue 11, 1996, str. 1097-1105
- 125. W. L. Ko, R. H. Jackson, "Multilayer Theory for Delamination Analysis of a Composite Curved Bar Subjected to End Forces and End Moments", NASA Technical Memorandum 4139, Edwards, wrzesień 1989.
- 126. W. Hao, D. Ge, Y. Ma, X. Yao, Y. Shi, "Experimental investigation on deformation and strength of carbon/epoxy laminated curved beams", w: Polymer Testing, Volume 31, Issue 4, czerwiec 2012, str. 520-526.
- 127. W. C. Jackson, R. H. Martin, "An Interlaminar Tensile Strength Specimen", w: E.T. Camponeschi, "Composite materials: testing and design", ASTM STP 1206, Vol. 11. American Society for Testing and Materials, 1993, str. 333–354.
- 128. D. Ranz, J. Cuartero, A. Miravete, R. Miralbes, "Experimental research into interlaminar tensile strength of carbon/epoxy laminated curved beams", w: Composite Structures, Volume 164, 15 marzec 2017, str. 189-197.
- 129. M. A. Arca, D. Coker, "Experimental investigation of CNT effect on curved beam strength and interlaminar fracture toughness of CFRP laminates", w: Journal of Physics: Conference Series, Volume 524, czerwiec 2014, DOI: 10.1088/1742-6596/524/1/012038.

- 130. M. A. Arca, "Strengthening of L-shaped composite laminates using carbon nanotube reinforcement and thin ply non-crimp fabrics", praca dyplomowa, Middle East Technical University, Ankara, wrzesień 2014.
- 131. E. Kalfon-Cohen, R. Kopp, C. Furtado, X. Ni, A. Arteiro, G. Borstnar, M. N. Mavrogordato, I. Sinclair, S. M. Spearing, P. P. Camanho, B. L. Wardle, *"Synergetic effects of thin plies and aligned carbon nanotube interlaminar reinforcement in composite laminates"*, w: Composites Science and Technology, Volume 166, 29 wrzesień 2018, str. 160-168.
- 132. A. T. Seyhan, M. Tanoglu, K. Schulte, "Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites", Engineering Fracture Mechanics, Volume 75, Issue 18, grudzień 2008, str. 5151-5162.
- 133. A. Godara, L. Mezzo, F. Luizi, A. Warrier, S.V. Lomov, A.W. van Vuure, L. Gorbatikh, P. Moldenaers, I. Verpoest, "Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites", w: Carbon, Volume 47, Issue 12, październik 2009, str. 2914-2923.
- 134. E. J. Garcia, B. L. Wardle, A. J. Hart, "Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 39, Issue 6, czerwiec 2008, str 1065-1070.
- 135. M. Kozioł, R. Mazurkiewicz, "Evaluation of behavior of stitched epoxy-carbon fiber laminate under static bending conditions using simplified analysis of failure energy", w: Composites Theory and Practice, R. 19, nr 3, 2019, str. 112-118.
- 136. D. Ranz, J. Cuartero, A. Miravete, R. Miralbes, "Experimental research into interlaminar tensile strength of carbon/epoxy laminated curved beams", w: Composite Structures, Volume 164, 15 marzec 2017, str. 189-197.
- 137. E. M. Zubova, D. S. Lobanov, E. M. Strungar, M. S. Temerova, "Research of the carbon/epoxy laminated curved beams strength in four-point bending test", w: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 747, 2020, DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012139.
- 138. G. Seon, A. Makeev, Y. Nikishkov, E. Lee, "Effects of defects on interlaminar tensile fatigue behavior of carbon/epoxy composites", w: Composites Science and Technology, Volume 89, 13 grudzień 2013, str. 194-201.
- 139. I. A. Hakim, S. L. Donaldson, N. G. Meyendorf, C. E. Browning, "Porosity Effects on Interlaminar Fracture Behavior in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites", w: Materials Sciences and Applications, Volume 8, No.2, luty 2017, str. 170 – 187.
- 140. M. L. Costa, S. F. M.de Almeida, M. C. Rezende, "*The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates*", Composites Science and Technology, Volume 61, Issue 14, listopad 2001, str. 2101-2108.
- 141. K. J. Bowles, S. Frimpong, "Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites", w: Journal of Composite Materials, Volume 26, Issue 10, 1992, str. 1487–1509.

- 142. A. Makeev, G. Seon, Y. Nikishkov, E. Lee, "Methods for assessment of interlaminar tensile strength of composite materials", w: Journal of Composite Materials, Volume 49, Issue 7, 2014, str. 783–794.
- 143. M. H. Hassan, A. R. Othman, S. Kamaruddin, "A review on the manufacturing defects of complex-shaped laminate in aircraft composite structures", w: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 91, 2017, str. 4081–4094.
- 144. C. Netzel, A. Mordasini, J. Schubert, T. Allen, M. Battley, C.M.D. Hickey, P. Hubert, S. Bickerton, "An experimental study of defect evolution in corners by autoclave processing of prepreg material", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 144, maj 2021, 106348.
- 145. R. Azzouz, S. Allaoui, R. Moulart, "Composite preforming defects: a review and a classification", w: International Journal of Material Forming, Volume 14, 2021, str. 1259–1278.
- 146. P. Boisse, N. Hamila, A. Madeo, "Modelling the development of defects during composite reinforcements and prepreg forming", w: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Volume 374, Issue 2071, lipiec 2016, 20150269.
- 147. Y. Ma, T. Centea, S. R. Nutt, "Defect Reduction Strategies for the Manufacture of Contoured Laminates Using Vacuum Bag-Only Prepregs", w: Polymer Composites, Volume 38, wrzesień 2015 Ma, Yi Hua et al. "Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs." Polymer Composites 38, str. 2016-2025.
- 148. P. Hubert, A. Poursartip, "Aspects of the Compaction of Composite Angle Laminates: An Experimental Investigation", w: Journal of Composite Materials, Volume 35, Issue 1, 2001, str. 2-26.
- 149. K. J. Wu, W.-B. Young, "Fabrication and quality analysis of angle composite part by vacuum-bag-only process with interleaved woven fiber/prepreg layup", w: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 122, wrzesień 2022, str. 3281–3297.
- 150. Y. Ma, T. Centea, G. Nilakantan, S. Nutt, "Vacuum Bag Only Processing of Complex Shapes: Effect of Corner Angle, Material Properties and Processing Conditions", materiały konferencyjne, American Society of Composites 29th Technical Conference/16th US-Japan Conference on Composite Materials/ASTM D-30 Meeting, San Diego, wrzesień 2014.
- 151. Y. Li, M. Li, Y. Gu, Z. Zhang, *"Numerical and Experimental Study on the Effect of Lay-Up Type and Structural Elements on Thickness Uniformity of L-Shaped Laminates*", w: Applied Composite Materials, Volume 16, luty 2009, str. 101-115.
- 152. J. M. Svanberg, P. Hallander, T. Nyman, "Variation in shape distortion due to corner thinning/thickening of prepreg", materialy konferencyjne: ICCM-17: 17<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, Edynburg, lipiec 2009.
- 153. K.D. Potter, "Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture", materiały konferencyjne: ICCM-17: 17th International Conference on Composite Materials, Edynburg, lipiec 2009.

- 154. H. V. Jones, A. Chatzimichali, R. A. Middleton, K. D. Potter, C. Ward, "Exploring the discrete tools used by laminators in composites manufacturing: application of novel concept", w: Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science, Volume 1, Issue 4, listopad 2015, str. 185-198.
- 155. A. A. Skordos, C. Monroy Aceves, M. P. F. Sutcliffe, "A simplified rate dependent model of forming and wrinkling of pre-impregnated woven composites", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 38, Issue 5, maj 2007, str. 1318-1330.
- 156. V. Michaud, S. Sequeira Tavares, A. Sigg, S. Lavanchy, J.-A. E. Månson, "Low pressure processing of high fiber volume content composites", materiały konferencyjne: The 8<sup>th</sup> International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM8), Douai, lipiec 2006.
- 157. C. Xin, Min Li, Y. Gu, J. Luo, Z. Zhang, "Study on the resin flow and fiber compaction of tapered composite laminates during autoclave processing", w: Journal of Reinforced Plastics and Composites, Volume 30, Issue 16, październik 2011.
- 158. C. B. Xin, Y. Z. Gu, M. Li, J. Luo, Y. X. Li, Z. G. Zhang, "Experimental and numerical study on the effect of rubber mold configuration on the compaction of composite angle laminates during autoclave processing", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 42, Issue 10, październik 2011, str. 1353-1360.
- 159. A. Johnston, P. Hubert, G. Fernlund, R. Vaziri, A. Poursartip, "Process Modeling of Composite Structures Employing a Virtual Autoclave Concept", w: Science and Engineering of Composite Materials, w: Volume 5, Issue 3-4, grudzień 1996, str. 235 – 252.
- 160. M. I. Naji, S. V. Hoa, "Curing of Thick Angle-Bend Thermoset Composite Part: Curing Process Modification for Uniform Thickness and Uniform Fiber Volume Fraction Distribution", w: Journal of Composite Materials, Volume 34, Issue 20, październik 2000, str. 1710 – 1755.
- 161. A. Rashidi, J. P.-H. Belnoue, A. J. Thompson, S. R. Hallett, A. S. Milani, "Consolidation-driven wrinkling in carbon/epoxy woven fabric prepregs: An experimental and numerical study", w: Composites Part A Vol. 143, Kwiecień 2021, 106298.
- 162. T. J. Dodwell, R. Butler, G. W. Hunt, "Out-of-plane ply wrinkling defects during consolidation over an external radius", Composites Science and Technology, Volume 105, 10 grudzień 2014, str. 151-159.
- 163. P. Boisse, M. Akermo, C. Mattei, M. Petersson, T. Nyman, "An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 50, lipiec 2013, str. 54-64.
- 164. D.W. Radford, T. S. Rennick, "Separating Sources of Manufacturing Distortion in Laminated Composites", w: Journal of Reinforced Plastics and Composites, Volume 19, Issue 8, maj 2000, str. 621-641.

- 165. C. Albert, G. Fernlund, "Spring-in and warpage of angled composite laminates", w: Composites Science and Technology, Volume 62, Issue 14, listopad 2002, str. 1895-1912.
- 166. N. Traiforos, M. Matveev, D. Chronopoulos, T. Turner, "Spring-in of composite L-shape specimens: An experimental and numerical investigation", w: Composite Structures, Volume 310, 15 kwiecień 2023, 116772.
- 167. J. M. Svanberg, P. Hallander, T. Nyman, "Variation in shape distortion due to corner thinning/thickening of prepreg", materialy konferencyjne: ICCM-17: 17<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, Edynburg, lipiec 2009.
- 168. P. Hallander, M. Akermo, C. Mattei, M. Petersson, T. Nyman, "An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 50, lipiec 2013, str. 54-64.
- 169. P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, F. Dumont, "Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses", w: Composites Science and Technology, Volume 71, Issue 5, 22 Marzec 2011, str. 683-692.
- 170. P. Boisse, J. Colmars, N. Hamila, N. Naouar, Q. Steer, "Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations", w: Composites Part B: Engineering, Volume 141, 15 maj 2018, str. 234-249.
- 171. J. P.-H. Belnoue, O. J. Nixon-Pearson, D. Ivanov, S. R. Hallett, "A novel hyperviscoelastic model for consolidation of toughened prepregs under processing conditions", w: Mechanics of Materials, Volume 97, czerwiec 2016, str. 118-134.
- 172. A. G. Prodromou, J. Chen, " On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 28, Issue 5, 1997, str. 491-503.
- 173. P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, Angela Madeo, G. Hivet, F. Dell'Isola, "The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinfocements and prepregs: a review", w: International Journal of Material Forming, 2017, 10 (4), str. 473-492.
- 174. P. Harrison, M.J. Clifford, A.C. Long, "Shear characterisation of viscous woven textile composites: a comparison between picture frame and bias extension experiments", w: Composites Science and Technology, Volume 64, Issues 10–11, sierpień 2004, str. 1453-1465.
- A. S. Tam, T. G. Gutowski, *"The kinematics for forming ideal aligned fibre composites into complex shapes"*, w: Composites Manufacturing, Volume 1, Issue 4, grudzień 1990, str. 219-228.
- 176. K. Potter, "Bias extension measurements on cross-plied unidirectional prepreg", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 33, Issue 1, styczeń 2002, str. 63-73.
- 177. Y. R. Larberg, M. Åkermo, "In-plane properties of cross-plied unidirectional prepreg", materiały konferencyjne: 16<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, Kyoto, July 2007.

- 178. Y. R. Larberg, M. Åkermo, M. Norrby, "On the in-plane deformability of crossplied unidirectional prepreg", w: Journal of Composite Materials, Volume 46, Issue 8, Kwiecień 2012, str. 929–939.
- 179. D. Brands, S. Wijskamp, W. J. B. Grouve, R. Akkerman, "In-Plane Shear Characterization of Unidirectional Fiber Reinforced Thermoplastic Tape Using the Bias Extension Method", w: Frontiers in Materials, Volume 9, Article 863952, 2 czerwiec 2022.
- 180. K. Potter, "In-plane and out-of-plane deformation properties of unidirectional preimpregnated reinforcement", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 33, Issue 11, Listopad 2002, str. 1469-1477.
- 181. Y. Wang, M. K. Chea, J. P.-H. Belnoue, J. Kratz, D. S. Ivanov, S. R. Hallett, "Experimental characterisation of the in-plane shear behaviour of UD thermoset prepregs under processing conditions", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 133, Czerwiec 2020, 105865.
- 182. K. Buet-Gautier, P. Boisse, "*Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements*", w: Experimental Mechanics Volume 41, 2001, str. 260–269.
- 183. V. Carvelli, C. Corazza, C. Poggi, "Mechanical modelling of monofilament technical textiles", Computational Materials Science, Volume 42, Issue 4, czerwiec 2008, str. 679-691.
- 184. P. Boisse, A. Gasser, G. Hivet, "Analyses of fabric tensile behaviour: determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 32, Issue 10, październik 2001, str. 1395-1414.
- 185. A. Rashidi, B. Crawford, T. Olfatbakhsh, A. S. Milani, "A mixed lubrication model for inter-ply friction behaviour of uncured fabric prepregs", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 149, październik 2021, 106571.
- 186. T. A Weber, M. Englhard, J.-C. Arent, J. Hausmann, "An experimental characterization of wrinkling generated during prepreg autoclave manufacturing using caul plates", w: Journal of Composite Materials, Volume 53, Issue 26-27, 2019, str. 3757–3773.
- 187. S. Erland, T. J. Dodwell, R. Butler, "Characterisation of inter-ply shear in uncured carbon fibre prepreg", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 77, październik 2015, str. 210-218.
- 188. H. Alshahrani, M. Hojjati, "A new test method for the characterization of the bending behavior of textile prepress", w: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 97, Czerwiec 2017, str. 128-140.
- 189. J. Wang, A. C. Long, M. J. Clifford, "Experimental measurement and predictive modelling of bending behaviour for viscous unidirectional composite materials", w: International Journal of Material Forming 3:1253-1266, wrzesień 2010.
- 190. ASTM D1388: Standard Test Method For Stiffness of Fabric.
- 191. B. Catwright, P. De Luca, J. Wang, K. Stellbrink, R. Paton, "Some Proposed Experimental Tests for use in Finite Element Simulation of Composite Forming",

materiały konferencyjne: 12<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, Paris, 5-9 lipiec 1999.

- 192. R. Banks, A.P. Mouritz, S. John, F. Coman, R. Paton, "Development of a new structural prepreg: characterization of handling, drape and tack properties", w: Composite Structures, Volume 66, Issues 1–4, październik – grudzień 2004, str. 169-174.
- 193. D.S.-C. Liu, P. Hubert, "Bulk factor characterization of heated debulked autoclave and out-of-autoclave carbon fibre prepregs", w: Composites Part B: Engineering, Volume 219, 15 sierpień 2021, 108940.
- 194. S. G. K. Schechter, L. K. Grunenfelder, S. R. Nutt, "Design and application of discontinuous resin distribution patterns for semi-pregs", w: Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 6:2, kwiecień 2020, str. 72-85.
- 195. ASTM D3171 15: Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials
- 196. PN-EN ISO 527-1: Tworzywa sztuczne Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu Część 1: Zasady ogólne.
- 197. PN-EN ISO 527-5: Tworzywa sztuczne Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 5: Warunki badania kompozytów tworzywowych wzmocnionych włóknami jednokierunkowo.
- 198. PN-EN ISO 14125 Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem -Oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- 199. PN-EN ISO 14130: Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie umownej wytrzymałości na ścinanie metodą krótkiej belki.
- 200. ASTM D 3518/D 3518M: Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a ±45° Laminate.
- 201. ASTM D6415/D6415M Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite.
- 202. ISO 1183-1: Plastics Methods for determining the density of non-cellular plastics —Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method.
- 203. ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (relative Density) of Plastics by Displacement.
- 204. W. Świderski, "Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych", w: Problemy Techniki Uzbrojenia, r. 38, z. 112, 2009, str. 75 92.
- 205. P.D. Pastuszak, "Badania termograficzne cylindrycznych paneli kompozytowych", w: Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska, t. 9-M/2012, Kraków 2012, str. 213-222.
- 206. A. Mouahid, "Infrared thermography used for composite materials", materiały konferencyjne: MATEC Web of Conferences, Volume 191, Article 00011, 1<sup>st</sup> International Conference on Non-Destructive Evaluation of Composite Structures (NDECS 2017), sierpień 2018.
- 207. E. N. Landis, D. T. Keane, "X-ray microtomography", w: Materials Characterization, Volume 61, Issue 12, grudzień 2010, str. 1305-1316.

- 208. S.C. Garcea, Y. Wang, P.J. Withers, "X-ray computed tomography of polymer composites", w: Composites Science and Technology, Volume 156, 1 marzec 2018, str. 305-319.
- 209. E.A. Zwanenburg, D.G. Norman, C. Qian, K.N. Kendall, M.A. Williams, J.M. Warnett, "Effective X-ray micro computed tomography imaging of carbon fibre composites", w: Composites Part B: Engineering, Volume 258, 1 czerwiec 2023, 110707.
- 210. Y. Gao, W. Hu, S. Xin, L. Sun, "A review of applications of CT imaging on fiber reinforced composites", w: Journal of Composite Materials, Volume 56, Issue 1, styczeń 2022, str. 133-164.
- 211. Y. Nikishkov, L. Airoldi, A. Makeev, "Measurement of voids in composites by X-ray Computed Tomography", w: Composites Science and Technology, Volume 89, 13 grudzień 2013, str. 89-97.
- R. Hron, M. Kadlec, R. Růžek, *"Effect of the Test Procedure and Thermoplastic Composite Resin Type on the Curved Beam Strength"*, w: Materials 2021, 14, 352, 12 styczeń 2021.
- 213. S.G. Lekhnitskii, "Anisotropic plates", Gordon and Breach Publishers, Nowy Jork, 1968, str. 95-101.

# SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Schemat głowicy urządzenia ATL [28] 14
Rys. 2. Urządzenie ATL znajdujące się na wyposażeniu Śląskiego Centrum Naukowo-
Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o
Rys. 3. Schemat głowicy urządzenia AFP [30] 15
Rys. 4. Wytwarzanie części kadłuba Boeinga 787 Dreamliner przy użyciu urządzenia
AFP [33 - Boeing Company]15
Rys. 5. Autoklawy znajdujące się na wyposażeniu Śląskiego Centrum Naukowo-
Technologicznego Sp. z o.o. [38] 17
Rys. 6. Przykładowy schemat pakietu próżniowego do procesu utwardzania w autoklawie
<b>Rys. 7.</b> Schemat procesu utwardzania w autoklawie
Rys. 8. Prepreg do utwardzania poza autoklawem, składający się z obszarów
przesyconych (impregnated fibers) i nieprzesyconych żywicą (dry fibers) [43] 20
Rys. 9. Prepreg do utwardzania poza autoklawem, zawierający sieć suchych włókien,
służących do odprowadzania powietrza [44] 21
Rys. 10. Schemat procesu Prepreg Compression Moulding: 1 – wycinanie i układanie
prepregu, 2 - wstępne podgrzewanie, 3 - układanie na formie, 4 - prasowanie, 5 -
otwarcie formy i wyjęcie gotowego wyrobu [49] 22
Rys. 11. Pierwotna wiązka, złożona z dużej ilości pojedynczych włókien (po lewej)
i wiązka po rozszerzeniu w celu uzyskania materiału o niskiej gramaturze (po prawej)
[61]
Rys. 12. Schemat tkaniny wykonanej ze standardowej wiązki (po lewej) i z włókien
po rozszerzeniu (po prawej) [59]
Rys. 13. Schemat rozszerzania wiązki włókien z wykorzystaniem przepływu powietrza,
na linii złożonej z dwóch modułów rozszerzających [66] 25
Rys. 14. Przykład bi-stabilnego masztu kompozytowego, który można zrolować bez
utraty właściwości czy zniszczenia włókien [97, NASA]
Rys. 15. Niedoskonałości prepregów, zależne od gramatury: od lewej kolejno prepregi
o gramaturach 30 g/m <sup>2</sup> , 75 g/m <sup>2</sup> i 150 g/m <sup>2</sup> 31
<b>Rys. 16.</b> Przykład zniszczenia kompozytowego kątownika w obszarze krzywizny [120]
$\mathbf{D}_{\mathbf{r}} = 17 \cdot 7_{\mathbf{r}} \mathbf{i}_{\mathbf{r}} \mathbf{r}_{\mathbf{r}} \mathbf{i}_{\mathbf{r}} \mathbf{r}_{\mathbf{r}} \mathbf{i}_{\mathbf{r}} \mathbf{r}_{\mathbf{r}} \mathbf{i}_{\mathbf{r}} \mathbf{r}_{\mathbf{r}} \mathbf{i}_{\mathbf{r}} \mathbf{i}_{$
<b>Rys.</b> 17. Zmiana grubosci w obszarze promienia w zależności od geometrii formy:
a) pociemenie naroznika na formie wypukłej, b) pogrubienie naroznika na formie
$\mathbf{W}_{\mathbf{K}} = 18  \mathbf{D}_{\mathbf{K}} = 14  \mathbf{M}_{\mathbf{K}} = 14 $
<b>Rys. 10.</b> Delekty związane ze zmianą grudości w obszarze naroznika: a) forma wypukła
- pocienienie i delaminacje, b) forma wkięsta - pogrubienie i porowatose, c) forma
wkięsia - pogrubienie i akumulacja zywicy, d) forma wypukła – pocienienie [150] 36
<b>Kys. 19.</b> Zaburzenia ułożenia włokien pouczas formowania: a) poslizg i rozciągnięcie włólkien b) wybeczenie włólkien [146]
włokien, b) wyboczenie włokien [146]

Rys. 20. Zmarszczki powstałe w trakcie formowania krzywizny [155]
Rys. 21. Mostkowanie materiału podczas odwzorowywania krzywizny na formie
wklęsłej [145]
Rys. 22. Mostkowanie warstw we wklęsłym narożniku, spowodowane zagęszczeniem
materiału i zmianą promienia krzywizny pod działaniem ciśnienia [153] 39
Rys. 23. Powstawanie zmarszczek na wypukłych krzywiznach podczas utwardzania
w autoklawie: linia przerywana – początkowa grubość wyrobu, linia ciągła – grubość
wyrobu po zagęszczeniu, kolor zielony – kompensacja nadmiarowej długości
na krawędziach w warunkach poślizgu pomiędzy warstwami, kolor czerwony –
potencjalne strefy powstawania zmarszczek [161] 39
Rys. 24. Zmiana kąta pomiędzy ramionami tworzącymi krzywiznę (spring-in) [164] 40
Rys. 25. Mechanizmy wpływające na kształtowanie prepregu w procesie przetwórczym
- od lewej kolejno ścinanie w płaszczyźnie, rozciąganie w płaszczyźnie, zginanie,
ścinanie pomiędzy warstwami, zagęszczanie [161] 40
Rys. 26. Odkształcenie próbki podczas testu Bias extension [173]
Rys. 27. Program badań
<b>Rys. 28.</b> Parametry procesu utwardzania w autoklawie
<b>Rys. 29.</b> Fragmenty materiałów wybranych do badań - na prepregu o gramaturze 75 $g/m^2$
widoczne defekty w postaci drobnych szczelin
Rys. 30. Próbki do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia po 24 godzinach
konsolidacji, przed utwardzeniem
<b>Rys. 31</b> . Próbki do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia po utwardzeniu
w autoklawie
<b>Rys. 32</b> . Zmiana grubości nieutwardzonych próbek wraz z upływem czasu konsolidacji
<b>Rys. 33.</b> Przyrząd wraz z ruchomym klockiem dociskowym do przeprowadzenia badania
sztywności przy zginaniu metodą Cantilever Test
<b>Rys. 34</b> . Przyrząd do badania sztywności na zginanie wraz z próbką w pozycji wyjściowej
przed testem
<b>Rys. 35.</b> Schemat pomiaru długości zwisu w metodzie Cantilever Test zgodnie z norma
ASTM D1388 [190]
<b>Rys. 36</b> . Pomiar długości zwisu dla próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>
<b>Rys. 37</b> . Pomiar długości zwisu próbki prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup>
<b>Rys. 38</b> . Próbka Bias extension z prepregu o gramaturze $150 \text{ g/m}^2$ , przygotowana do testu
<b>Rvs. 39</b> . Stanowisko do badań Bias Extension
<b>Rys. 40</b> . Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek
prepregu o gramaturze $150 \text{ g/m}^2$
<b>Rys. 41</b> . Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Rias Extension próbek
prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> – widok dla przemieszczenia w zakresie do 30 mm - 66
<b>Rys. 42.</b> Próbka P1 przy 12 mm przemieszczenia - następuje wydłużanie środkowej strefy
na skutek ścinania 67

Rys. 43. Próbka P4 przy 26 mm przemieszczenia - widoczne są uskoki świadczące
o występowaniu poślizgu
Rys. 44. Próbka P3 przy 36 mm przemieszczenia - następuje bardzo duży poślizg oraz
rozrywanie pomiędzy strefą ścinania a strefą mieszaną
<b>Rys. 45</b> . Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> po badaniu Bias Extension
<b>Rys. 46</b> . Zmarszczki w strefie ścinania w próbce z prepregu o gramaturze 150 g/m2
po badaniu Bias Extension
Rys. 47. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension
prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> dla próbek złożonych z 4 warstw
Rys. 48. Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension
prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> dla próbek złożonych z 8 warstw
<b>Rys. 49</b> . Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek
złożonych z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> dla przemieszczenia w zakresie
do 5 mm
<b>Rys. 50</b> . Wykres zależności siły od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek
złożonych z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> dla przemieszczenia w zakresie
do 5 mm
<b>Rys. 51.</b> Próbka P1 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 1,5 mm - następuje wydłużanie
strefy ścinania
<b>Rys. 52.</b> Próbka P2 złożona z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 3 mm - następuje wydłużanie
strefy ścinania
<b>Rys. 53</b> . Próbka P2 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 8 mm - duży poślizg pomiędzy
włóknami staje się dominującym mechanizmem odkształcenia
<b>Rys. 54</b> . Próbka P2 złożona z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 13 mm - duży poślizg pomiędzy
włóknami staje się dominującym mechanizmem odkształcenia
<b>Rys. 55</b> . Próbka P5 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 20 mm – widoczne duże poślizgi
pomiędzy włóknami, jednakże duże odkształcenie strefy środkowej świadczy
o występującym jednocześnie ścinaniu
<b>Rys. 56</b> . Próbka P1 złożona z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 14 mm - widoczne zniszczenie
próbki na skutek poślizgu i rozrywania pomiędzy włóknami w środkowej strefie próbki
<b>Rys. 57.</b> Próbka P3 złożona z 3 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> podczas testu Bias
Extension przy przemieszczeniu głowicy wynoszącym 27 mm - widoczne zniszczenie
próbki na skutek poślizgu i rozrywania pomiędzy włóknami w środkowej strefie próbki
74

Rys. 58. Próbki złożone z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> po badaniu Bias
Extension
Rys. 59. Próbki złożone z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> po badaniu Bias
Extension
Rys. 60. Zależność siły odniesionej do grubości próbek od przemieszczenia uzyskana
w badaniu Bias Extension, uśredniona dla każdej serii próbek
Rys. 61. Wykres zależności kąta ścinania od przemieszczenia dla prepregu o gramaturze
$150~{\rm g/m^2}$ - wartości zmierzone dla każdej z próbek oraz wartość teoretyczna wyznaczona
z modelu PJN
Rys. 62. Zależność kąta ścinania od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek
złożonych z 4 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m²- wartości zmierzone dla każdej
próbki oraz wartość teoretyczna, wyznaczona zgodnie z założeniami modelu PJN 77
Rys. 63. Zależność kąta ścinania od przemieszczenia podczas testu Bias Extension próbek
złożonych z 8 warstw prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> - wartości zmierzone dla każdej
próbki oraz wartość teoretyczna, wyznaczona zgodnie z założeniami modelu PJN 78
<b>Rys. 64</b> . Laminowanie płyt z prepregu o gramaturze 150 g/m2 - od lewej kolejno do prób:
Tensile 0, Tensile 90, In-Plane Shear
<b>Rys. 65</b> . Płyty z prepregu o gramaturze 75 g/m2 po utwardzeniu i frezowaniu - od lewej
kolejno: Tensile 0, Tensile 90, In-Plane Shear
<b>Rys. 66.</b> Próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie z przyklejonymi podkładkami
<b>Rys. 67</b> . Stanowisko do badań wytrzymałości na rozciąganie
<b>Rys. 68</b> . Stanowisko do badań właściwości przy zginaniu w układzie trzypunktowym 88
Rys. 69. Stanowisko do badań umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe
<b>Rys. 70</b> . Stanowisko do badań właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie
Rys. 71. Parametry geometrii krzywizny wybrane do badań wytrzymałości belek
zakrzywionych
<b>Rys. 72</b> . Geometria próbek do badań wytrzymałości zakrzywionych belek
Rys. 73. Komplet form do wykonania próbek do badań wytrzymałości zakrzywionych
belek
<b>Rys. 74</b> . Płyta z próbkami z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> i geometrii $\alpha$ 150°, R <sub>i</sub> 12 przed
i po konsolidacji
Rys. 75. Niedokładne przyleganie warstw w okolicach promienia, spowodowane dużą
sztywnością papieru silikonowanego, zabezpieczającego prepreg
<b>Rys. 76</b> . Dokładniejsze przyleganie prepregu w obszarze promienia po zamianie papieru
silikonowanego na folię oddzielającą
Rys. 77. Zmarszczki powstałe po procesie konsolidacji w przypadku próbek o kącie
rozwarcia ramion α wynoszącym 90° i promieniu krzywizny R <sub>i</sub> 12 mm (od lewej) oraz
promieniu krzywizny R <sub>i</sub> 36 (od prawej)

Rys. 79. Formy w pakietach podciśnieniowych w autoklawie Śląskiego Centrum
Naukowo-Technologicznego Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o
Rys. 80. Przebieg procesu utwardzania próbek zawierających krzywizny z prepregu
o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>
Rys. 81. Przebieg procesu utwardzania próbek zawierających krzywizny z prepregu
o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup>
Rys. 82. Zmarszczki powstałe w obszarze promienia na próbkach o geometrii krzywizny
$\alpha 90^{\circ}$ , R <sub>i</sub> 12: od lewej próbki wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> , od prawej próbki
wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> . Zmarszczki widoczne na próbkach
wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> są wyraźnie większe 104
Rys. 83. Drobne zmarszczki i zgrubienia powstałe w obszarze ramion próbek na skutek
pomarszczenia materiałów pomocniczych, tworzących pakiet podciśnieniowy 105
Rys. 84. Obszary krzywizny próbek o kącie pomiędzy ramionami α 90° i promieniu
wewnętrznym $R_i12 \text{ mm: a}$ ) materiał o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> , b) materiał o gramaturze
150 g/m <sup>2</sup>
Rys. 85. Schemat przeprowadzonych pomiarów grubości (P – pomiar w obszarze
promienia, R – pomiar w obszarze ramion) 109
Rys. 86. Możliwe procedury termografii w podczerwieni
Rys. 87. Procedura IrDT metodą odbiciową116
Rys. 88. Stanowisko IrNDT próbek do badań wytrzymałości belek zakrzywionych116
Rys. 89. Obraz termograficzny - przykłady próbek o geometrii krzywizny a90°, Ri4:
u góry próbka wykonana z prepregu o gramaturze 75 g/m², na dole próbka wykonana
z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 117
Rys. 90. Obraz termograficzny - zaobserwowana na próbce P5 wykonanej z prepregu
o gramaturze 150 g/m² o geometrii krzywizny $\alpha 120^\circ$ , R <sub>i</sub> 4 drobna zmarszczka, powstałą
na skutek zagniecenia materiałów pomocniczych118
Rys. 91. Obraz termograficzny - zaobserwowane na próbce P2 wykonanej z prepregu
o gramaturze 75 g/m² o geometrii krzywizny $\alpha 90^\circ$ , R <sub>i</sub> 4 punktowe wgniecenie, widoczne
jako ciemna plama na lewym ramieniu próbki118
Rys. 92. Obraz termograficzny - zaobserwowane na próbce P1 wykonanej z prepregu
o gramaturze 150 g/m² o geometrii krzywizny $\alpha 120^\circ$ , R <sub>i</sub> 12 pofalowanie powierzchni,
widoczne w lewym dolnym rogu118
Rys. 93. Obraz CT: pustka widoczna jako czarny obszar oraz wtrącenie obce, widoczne
jako biały obszar, wykryte w próbce o geometrii $\alpha 90^\circ$ , R <sub>i</sub> 4, wykonanej z prepregu
o gramaturze75 g/m <sup>2</sup>
Rys. 94. Obraz CT: duża zmarszczka, zaobserwowana w próbce o geometrii krzywizny
$\alpha 90^\circ, R_i 12,$ wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m², która obejmuje tylko zewnętrzne
warstwy włókien węglowych 122
<b>Rys. 95</b> . Obraz CT: zmarszczki zaobserwowane na próbkach o geometrii krzywizny $\alpha 90^{\circ}$ ,
$R_{\rm i}36{\rm :}$ u góry próbka z prepregu o gramaturze 75 g/m², na dole z prepregu
o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 122

Rys. 96. Obraz CT: przekrój wzdłużny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze
75 g/m <sup>2</sup> i promieniu krzywizny $R_i$ 4, o kącie rozwarcia ramion kolejno od góry: $\alpha$ 90°,
α120° i α150°
Rys. 97. Obraz CT: przekrój wzdłużny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze
150 g/m <sup>2</sup> i promieniu krzywizny R <sub>i</sub> 4, o kącie rozwarcia ramion kolejno od góry: α90°,
α120° i α150°
Rys. 98. Obraz próbki przy powiększeniu 275x, uzyskany przy użyciu skaningowego
mikroskopu elektronowego 125
Rys. 99. Obraz próbki przy powiększeniu 700x, uzyskany przy użyciu skaningowego
mikroskopu elektronowego 126
Rys. 100. Obraz próbki przy powiększeniu 5000x, uzyskany przy użyciu skaningowego
mikroskopu elektronowego 126
Rys. 101. Badanie próbek zakrzywionych w układzie zginania czteropunktowego [201]
Rys. 102. Stanowisko do badań wytrzymałości na zginanie belek zakrzywionych użyte
w ramach pracy
Rys. 103. Zniszczenie poprzez delaminację w obszarze krzywizny
Rys. 104. Zniszczenie poprzez złamanie w obszarze ramienia
Rys. 105. Delaminacje obserwowane przy powiększeniu 60x, powstałe na próbkach
o geometrii krzywizny α90°, Ri12: po lewej próbka wykonana z prepregu o gramaturze
75 g/m <sup>2</sup> , po prawej próbka wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 132
Rys. 106. Delaminacje obserwowane przy powiększeniu 120x, powstałe na próbkach
o geometrii krzywizny $\alpha 120^{\circ}$ , $R_i$ 4: po lewej próbka wykonana z prepregu o gramaturze
75 g/m <sup>2</sup> , po prawej próbka wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 132
Rys. 107. Zniszczenie poprzez złamanie w obszarze ramion próbek wykonanych
z obydwu prepregów, o geometrii krzywizny a150°, Ri12: na górze próbka wykonana
z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> , na dole próbka wykonana z prepregu o gramaturze
150 g/m <sup>2</sup>
Rys. 108. Porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowanych
podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii $\alpha$ 90°, R <sub>i</sub> 4, wykonanych
z prepregów o gramaturach 75 g/m <sup>2</sup> oraz 150 g/m <sup>2</sup> 137
Rys. 109. Porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowanych
podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii a 120°, Ri4, wykonanych
z prepregów o gramaturach 75 g/m <sup>2</sup> oraz 150 g/m <sup>2</sup> 137
Rys. 110. Porównanie krzywych zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowanych
podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii a 120°, Ri4, wykonanych
z prepregów o gramaturach 75 g/m <sup>2</sup> oraz 150 g/m <sup>2</sup> 138
Rys. 111. Zmiana grubości próbki po 24 godzinach konsolidacji, wyrażona jako procent
grubości początkowej
Rys. 112. Porównanie podstawowych właściwości mechanicznych kompozytów
wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> i 150 g/m <sup>2</sup> 143

Rys. 113. Udziały objętościowe osnowy i zbrojenia w kompozytach wykonanych
z prepregów o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> oraz 150 g/m <sup>2</sup> 147
Rys. 114. Wytrzymałość CBS dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację
Rys. 115. Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS dla próbek, które uległy
zniszczeniu poprzez delaminację151
Rys. 116. Wytrzymałość CBS dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez złamanie152
Rys. 117. Wykres zależności wytrzymałości CBS od promienia krzywizny dla próbek
o poszczególnych kątach rozwarcia ramion, wykonanych z obydwu badanych prepregów
# **SPIS TABEL**

<b>Tabela 1.</b> Charakterystyka prepregów użytych w badaniach
<b>Tabela 2</b> . Próbki do wyznaczenia współczynnika zagęszczenia prepregów
Tabela 3. Wyniki pomiarów grubości nieutwardzonych próbek wraz z upływem czasu
konsolidacji
Tabela 4. Zmiana grubości próbek wraz z upływem czasu konsolidacji wyrażona jako
procent wartości początkowej 57
Tabela 5. Grubość próbek przed i po utwardzeniu oraz współczynnik zagęszczenia 58
Tabela 6. Uzyskane wyniki pomiarów długości zwisu w próbie Cantilever Test
dla materiałów o gramaturze 75 g/m2 i 150 g/m2
<b>Tabela 7</b> . Sztywność prepregów o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> i 150 g/m <sup>2</sup> wyznaczona w oparciu
o metodę Cantilever Test wg normy ASTM D1388
Tabela 8. Przeprowadzone badania mechaniczne próbek płaskich, wraz z orientacją,
ilością i wymiarami próbek
Tabela 9. Płyty wykonane w celu wytworzenia próbek do badań mechanicznych 80
Tabela 10. Udział objętościowy włókien i żywicy w płytach do badań mechanicznych
Tabela 11. Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu
o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> w kierunku 0°
Tabela 12. Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu
o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> w kierunku 90°
Tabela 13. Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu
o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> w kierunku 0°
Tabela 14. Wyniki statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z prepregu
o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> w kierunku 90
<b>Tabela 15.</b> Wyniki próby zginania trójpunktowego dla próbek wykonanych z prepregu
o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup>
<b>Tabela 16</b> . Wyniki próby zginania trójpunktowego dla próbek wykonanych z prepregu
o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>
Tabela 17. Wyniki badania umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe
dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup>
Tabela 18. Wyniki badania umownej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe
dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>
Tabela 19. Wyniki badania właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie dla próbek
wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup>
Tabela 20. Wyniki badania właściwości przy ścinaniu w płaszczyźnie dla próbek
wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup>
Tabela 21. Długość łuku krzywizny oraz długość ramion dla poszczególnych geometrii
próbek
Tabela 22. Struktura próbek do badań wytrzymałości zakrzywionych belek

Tabela 23. Geometrie krzywizny, na których zaobserwowano zmarszczki podczas
kontroli wizualnej próbek wykonanych z obu badanych prepregów 104
Tabela 24. Wyniki pomiarów grubości zakrzywionych płyt, wykonanych z prepregu
o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> 105
Tabela 25. Wyniki pomiarów grubości zakrzywionych płyt, wykonanych z prepregu
o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 106
Tabela 26. Masa płyt oraz wyznaczony na podstawie wstępnej kontroli udział masowy
żywicy w płytach wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> 107
Tabela 27. Masa płyt oraz wyznaczony na podstawie wstępnej kontroli udział masowy
żywicy w płytach wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 108
Tabela 28. Średni współczynnik zmienności grubości próbek, a także średnia grubość
z obszaru ramion i z obszaru promienia dla każdego układu geometrii krzywizny 109
<b>Tabela 29</b> . Średni kąt rozwarcia ramion α dla każdego układu geometrii111
Tabela 30. Wyniki pomiarów gęstości metodą zanurzeniową próbek wykonanych
z prepregu o gramaturze 75 g/m2112
Tabela 31. Wyniki pomiarów gęstości metodą zanurzeniową próbek wykonanych
z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 112
Tabela 32. Udziały masowe i objętościowe włókien ora żywicy w próbkach wykonanych
z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> 113
Tabela 33. Udziały masowe i objętościowe włókien ora żywicy w próbkach wykonanych
z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> 114
Tabela 34. Zestawienie geometrii krzywizny próbek do badań wytrzymałości belek
zakrzywionych, dla których wykonano badania metodą tomografii komputerowej 120
Tabela 35. Średnie odległości pomiędzy warstwami w próbkach o promieniu krzywizny
R <sub>i</sub> wynoszącym 4 mm 124
Tabela 36. Modele zniszczenia zaobserwowane podczas badań wytrzymałości CBS 134
Tabela 37. Wytrzymałość CBS zakrzywionej belki – zestawienie dla wytworzonych
próbek
Tabela 37. Wytrzymałość CBS zakrzywionej belki CBS – zestawienie dla wytworzonych
próbek – ciąg dalszy 135
Tabela 38. Średnia wytrzymałość CBS, uzyskana dla próbek wykonanych z prepregów
o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> oraz 150 g/m <sup>2</sup> 136
Tabela 39. Wartości modułów sprężystości badanych materiałów wyznaczone podczas
badania próbek płaskich, odpowiadające w przybliżeniu modułom sprężystości
w kierunku stycznym i promieniowym
Tabela 40. Wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS próbek zawierających
krzywizny, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację 139
Tabela 41. Uśrednione wyniki badań właściwości mechanicznych próbek
kompozytowych wykonanych z prepregów o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> oraz 75 g/m <sup>2</sup> 142
Tabela 42. Wyniki badań właściwości mechanicznych kompozytów wykonanych
z prepregów o gramaturze 75 g/m² oraz 150 g/m², znormalizowane do 55% udziału
objętościowego włókien 143

Tabela 43. Analiza statystyczna gęstości oraz udziałów objętościowych zbrojenia
i osnowy próbek wytworzonych z danego rodzaju prepregu 146
Tabela 44. Średnie wartości wytrzymałości CBS oraz wytrzymałości na rozciąganie
międzywarstwowe ILTS dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m <sup>2</sup> oraz
150 g/m <sup>2</sup>
Tabela 45. Wytrzymałość CBS oraz wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe
ILTS znormalizowana do 55% udziału włókien zbrojących, dla próbek wykonanych
z prepregu o gramaturze 75 g/m² oraz 150 g/m² 150
Tabela 46. Różnica w wytrzymałości CBS oraz wytrzymałości na rozciąganie
międzywarstwowe ILTS pomiędzy próbkami o danej geometrii krzywizny, wykonanymi
z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> oraz 75 g/m <sup>2</sup> 151
Tabela 47. Różnica CBS pomiędzy próbkami o danej geometrii krzywizny, wykonanymi
z prepregu o gramaturze 150 g/m <sup>2</sup> oraz 75 g/m <sup>2</sup> 152

Załącznik zawiera zdjęcia próbek po procesie laminowania, przed ostatnią konsolidacją (dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> - Rysunek 1.1 ÷ Rysunek 1.4, dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> - Rysunek 1.8 ÷ Rysunek 1.11), a także zdjęcia próbek po ostatniej konsolidacji, a przed wykonaniem pakietu próżniowego do procesu utwardzania w autoklawie (dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> - Rysunek 1.5 ÷ Rysunek 1.7, dla prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> - Rysunek 1.12 ÷ Rysunek 1.14).



**Rysunek 1.1.** Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 150° po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



**Rysunek 1.2.** Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 120° po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją w kolejności od lewej:  $R_i$ 4,  $R_i$ 12 i  $R_i$ 36



**Rysunek 1.3.** Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 90° po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją w kolejności od lewej:  $R_i4$ ,  $R_i12$  $i R_i36$ 



**Rysunek 1.4**. Próbki płaskie z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją



*Rysunek 1.5.* Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 150° po ostatniej konsolidacji w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12, R<sub>i</sub>36



*Rysunek 1.6.* Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 120° po ostatniej konsolidacji w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12, R<sub>i</sub>36



**Rysunek 1.7**. Próbki z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 90° po ostatniej konsolidacji w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12, R<sub>i</sub>36



**Rysunek 1.8**. Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 150° po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>36, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>4



**Rysunek 1.9.** Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 120° po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją w kolejności od lewej:  $R_i$ 4,  $R_i$ 12 i  $R_i$ 36



**Rysunek 1.10.** Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 90° po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją w kolejności od lewej:  $R_i$ 36,  $R_i$ 12 i  $R_i$ 4



**Rysunek 1.11**. Próbki płaskie z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> po wylaminowaniu wszystkich warstw, a przed ostatnią konsolidacją



**Rysunek 1.12**. Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 150° po ostatniej konsolidacji w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>36, R<sub>i</sub>12, R<sub>i</sub>4



**Rysunek 1.13**. Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 120° po ostatniej konsolidacji w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>36, R<sub>i</sub>12, R<sub>i</sub>4



**Rysunek 1.14**. Próbki z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> z kątem rozwarcia ramion wynoszącym 90° po ostatniej konsolidacji w kolejności od lewej: R<sub>i</sub>36, R<sub>i</sub>12, R<sub>i</sub>4

Załącznik zawiera zdjęcia wykonane podczas kontroli jakości wytworzonych próbek zawierających krzywizny:

- zdjęcia utwardzonych płyt bezpośrednio po odformowaniu, wykonane w trakcie kontroli wizualnej utwardzonych płyt (dla prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> Rysunek 2.1 ÷ Rysunek 2.4, dla prepregu o gramaturze 150 g/m2 Rysunek 2.5 ÷ Rysunek 2.8),
- zdjęcia w skali makro obszarów krzywizny próbek po wycinaniu (dla próbek o kącie rozwarcia ramion α 90° Rysunek 2.9 i Rysunek 2.10, dla próbek o kącie rozwarcia ramion α 120° Rysunek 2.11 i Rysunek 2.12, dla próbek o kącie rozwarcia ramion α 120° Rysunek 2.13 i Rysunek 2.14, dla próbek płaskich Rysunek 2.15).



**Rysunek 2.1.** Płyta wykonana z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki płaskie, po lewej od strony formy, po prawej od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.2.** Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/ $m^2$ , zawierające próbki o kącie rozwarcia ramion 90° i promieniu krzywizny kolejno od lewej  $R_i$ 36,  $R_i$ 12 i  $R_i$ 4, na górze od strony formy, na dole od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.3.** Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki o kącie rozwarcia ramion 120° i promieniu krzywizny kolejno od lewej  $R_i$ 36,  $R_i$ 12 i  $R_i$ 4, na górze od strony formy, na dole od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.4**. Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki o kącie rozwarcia ramion 150° i promieniu krzywizny kolejno od lewej R<sub>i</sub>36, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>4, na górze od strony formy, na dole od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.5.** Płyta wykonana z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki płaskie, po lewej od strony formy, po prawej od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.6.** Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki o kącie rozwarcia ramion 90° i promieniu krzywizny kolejno od lewej  $R_i$ 4,  $R_i$ 12 i  $R_i$ 36, na górze od strony formy, na dole od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.7**. Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki o kącie rozwarcia ramion 90° i promieniu krzywizny kolejno od lewej R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36, na górze od strony formy, na dole od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.8**. Płyty wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, zawierające próbki o kącie rozwarcia ramion 150° i promieniu krzywizny kolejno od lewej R<sub>i</sub>36, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>4, na górze od strony formy, na dole od strony pakietu podciśnieniowego



**Rysunek 2.9**. Widok boczny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 90°, o promieniu krzywizny od lewej kolejno: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



**Rysunek 2.10**. Widok boczny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion a wynoszącym 90°, o promieniu krzywizny od lewej kolejno: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



**Rysunek 2.11.** Widok boczny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 120°, o promieniu krzywizny od lewej kolejno: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



**Rysunek 2.12.** Widok boczny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 120°, o promieniu krzywizny od lewej kolejno: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



*Rysunek 2.13.* Widok boczny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 150°, o promieniu krzywizny od lewej kolejno: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



**Rysunek 2.14**. Widok boczny próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> o kącie rozwarcia ramion α wynoszącym 150°, o promieniu krzywizny od lewej kolejno: R<sub>i</sub>4, R<sub>i</sub>12 i R<sub>i</sub>36



**Rysunek 2.15**. Widok boczny próbek płaskich α 180°, po lewej wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m², po prawej wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m²

Załącznik zawiera obrazy uzyskane podczas IrNDT wytworzonych próbek zawierających krzywizny dla obu badanych materiałów i wszystkich układów geometrii (Rysunek 3.1 ÷ Rysunek 3.20).



**Rysunek 3.1**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i4$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.2**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i4$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.3**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.4**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.5**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i 36$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.6**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 90^{\circ}$ ,  $R_i 36$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.7**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i4$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.8**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i4$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



*Rysunek 3.9.* Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>12 z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.10**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.11.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i 36$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.12.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 120^\circ$ ,  $R_i 36$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.13.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii a150°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.14.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 150^\circ$ ,  $R_i4$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.15.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 150^\circ$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.16**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 150^\circ$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.17**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 150^\circ$ ,  $R_i 36$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.18**. Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek o geometrii  $\alpha 150^\circ$ ,  $R_i 36$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.19.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek płaskich o geometrii a180°, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m² w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5



**Rysunek 3.20.** Obrazy uzyskane metodą aktywnej termografii w podczerwieni dla próbek płaskich o geometrii a180°, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> w kolejności od góry: P1, P2, P3, P4, P5

Załącznik zawiera tomogramy próbek zakrzywionych, wykonanych z prepregów o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> oraz 150 g/m<sup>2</sup> (przekrój poprzeczny, rzut izometryczny oraz przekroje wzdłużne): Rysunek  $4.1 \div$  Rysunek 4.16.



**Rysunek 4.1**. Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.2**. Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.3.** Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny a90°, R<sub>i</sub>12, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.4.* Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>12, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.5**. Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny a90°, R<sub>i</sub>36, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.6.* Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α90°, R<sub>i</sub>36, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.7**. Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny a120°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.8**. Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny a120°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.9.** Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α120°, R<sub>i</sub>36, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.10.* Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α120°, R<sub>i</sub>36, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.11.* Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α150°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.12.* Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α150°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



**Rysunek 4.13**. Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny a150°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.14.* Obrazy CT próbki o geometrii krzywizny α150°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczy obszaru krzywizny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.15.* Obrazy CT próbki płaskiej α180°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne



*Rysunek 4.16. Obrazy CT próbki płaskiej α180°, R<sub>i</sub>4, wykonanej z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>: a) przekrój poprzeczny, b) rzut izometryczny, c, d) przekroje wzdłużne* 

Załącznik zawiera wykresy zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowane podczas badania wytrzymałości CBS przy zginaniu zakrzywionych belek (Rysunek 5.1 ÷ Rysunek 5.20).



*Rysunek 5.1. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α90°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.2. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α90°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.3. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α90°, R<sub>i</sub>12, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.4**. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.5**. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii  $\alpha 90^\circ$ ,  $R_i 12$ , wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.6. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α90°, R<sub>i</sub>36, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>


*Rysunek 5.7. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.8. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.9. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>12, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>* 



*Rysunek 5.10. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>12, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.11**. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>36, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.12**. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α120°, R<sub>i</sub>36, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.13. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α150°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.14.** Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α150°, R<sub>i</sub>4, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.15**. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α150°, R<sub>i</sub>12, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.16. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α150°, R<sub>i</sub>12, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.17.** Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek o geometrii α150°, R<sub>i</sub>36, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.18. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek o geometrii α150°, R<sub>i</sub>36, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>



**Rysunek 5.19**. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości CBS dla próbek płaskich α180°, wykonanych z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>



*Rysunek 5.20. Wykres zależności siły od przemieszczenia, zarejestrowany podczas badania wytrzymałości* CBS dla próbek płaskich α180°, wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>

## STRESZCZENIE

Niniejsza praca powstała we współpracy ze Śląskim Centrum Naukowo-Technologicznym Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o. w odpowiedzi na rosnące zainteresowanie wykorzystaniem prepregów o niskiej gramaturze do wytwarzania zaawansowanych kompozytowych struktur zawierających krzywizny w technologii autoklawowej. Prepregi o niskiej gramaturze cieszą się coraz większą popularnościa ze względu na możliwość obniżenia masy, zwiększenia możliwości konstrukcyjnych oraz poprawy wytrzymałości w przypadku obciążeń w płaszczyźnie. Do tej pory nie określono jednak wpływu gramatury prepregu na procesy formowania oraz wytrzymałość w przypadku obciążeń oddziałujących poza płaszczyzną. Cel pracy ukierunkowano na zrozumienie wpływu gramatury na jakość oraz wytrzymałość struktur kompozytowych, zawierających krzywizny. Dla osiągnięcia założonego celu wybrano dwa takie same jednokierunkowe prepregi węglowo-epoksydowe, różniące się jedynie gramatura: prepreg o niskiej gramaturze, wynoszącej 75 g/m<sup>2</sup> oraz prepreg o konwencjonalnej gramaturze, wynoszącej 150 g/m<sup>2</sup>. Przeprowadzone badania obejmowały w pierwszej kolejności porównanie właściwości prepregów w stanie nieutwardzonym, wpływajace na kształtowanie wyrobów zawierajacych krzywizny w technologii autoklawowej: współczynnik zagęszczenia, sztywność przy zginaniu oraz zachowanie przy ścinaniu w płaszczyźnie. Następnie porównano właściwości mechaniczne płaskich laminatów wytworzonych na bazie wybranych prepregów (wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe ILSS oraz wytrzymałość przy ścinaniu w płaszczyźnie). W dalszej kolejności, również na bazie tych samych prepregów, wytworzono kompozytowe próbki w postaci zakrzywionych belek, o różnej geometrii krzywizny, do badań wytrzymałości. Ocenie poddano proces wytwarzania oraz jakość wytworzonych próbek. Kontroli jakości dokonano poprzez ocenę wizualną, pomiary geometryczne, wyznaczenie gęstości oraz udziału komponentów, badania nieniszczace metoda aktywnej termografii w podczerwieni oraz badania obszarów reprezentatywnych metodą tomografii komputerowej. Wytworzone próbki poddano badaniom wytrzymałościowym metodą zginania czteropunktowego (CBS). Dla próbek, które uległy zniszczeniu poprzez delaminację, wyznaczono także wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono większą podatność prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup> na powstawanie defektów podczas wytwarzania struktur zakrzywionych w technologii autoklawowej ze względu na większą zmianę grubości w trakcie konsolidacji, niższą sztywność przy zginaniu oraz brak podatności do odkształcenia poprzez ścinanie w płaszczyźnie. Badania właściwości płaskich laminatów wykazały zwiększenie wytrzymałości na rozciaganie w kierunku 90° oraz ILSS w przypadku zastosowania prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. W trakcie badania próbek zakrzywionych zaobserwowano zależność CBS od geometrii krzywizny. Dla najmniejszych promieni krzywizny oraz najmniejszych kątów pomiędzy płaszczyznami tworzącymi krzywiznę, większą wytrzymałość wykazały próbki

wykonane z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Dla tych układów geometrii zaobserwowano także zniszczenie poprzez delaminację oraz wyznaczono ILTS. Wyższą ILTS otrzymano dla próbek wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>. Dla próbek o większych promieniach krzywizny oraz kątach pomiędzy płaszczyznami, wyższą CBS wykazały próbki wykonane z prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>. W ten sposób wykazano, że wpływ gramatury na wytrzymałość laminatów zakrzywionych jest zależny od geometrii krzywizny oraz stanu obciążenia wyrobu. Dla najmniejszych kątów rozwarcia pomiędzy ramionami i promieni krzywizny, wyższą CBS wykazano dla laminatów wykonanych z prepregu o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup>, jednak wraz ze zwiększaniem kąta rozwarcia ramionami oraz promienia krzywizny, różnica pomiędzy CBS próbek o tej samej geometrii zmienia się na korzyść prepregu o gramaturze 75 g/m<sup>2</sup>.

## ABSTRACT

This thesis was written as a result of the growing demand of using thin ply prepregs to manufacture advanced CFRP structures with different curvatures in the autoclave technology. All research were done in cooperation with Śląskie Centrum Naukowo-Technologiczne Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o. Thin ply prepregs provide a lot of benefits, such as the possibility of mass reduction, higher design flexibility or increased in-plane strength and this is why these materials are gaining more and more interest. However, in accordance with the current state-of the-art, the influence of the ply thickness on the composite forming processes and out-of-plane strength is not known yet. The objective of this work was to understand the influence of the ply thickness on the curved composites quality and strength. To reach this goal, all research was done using the same unidirectional carbon-epoxy prepreg with two different areal weights: 75  $g/m^2$ for thin ply prepreg and 150  $g/m^2$  for standard prepreg. The scope of this work was to check uncured prepreg properties which influence curved composites forming processes: bulk factor, out-of-plane bending stiffness and in-plane shear. Then, the basic mechanical properties of both laminates were tested: tensile properties, flexural properties, Interlaminar Shear Strength and In-Plane Shear response. Next, the compared prepregs were used to produce CFRP curved beams with different inner radius and different angles between the legs. Composites manufacturing process with the use of examined prepregs was also assessed. The quality of the manufactured samples was checked by the visual inspection, geometrical measurements, determining of the density and constituent content of composites, Active Infrared Thermography NDT and X-ray Computed Tomography of representative areas. Finally, the samples were used to determine the Curved Beam Strength (CBS) in a four-point bending test. For the samples which were destroyed by delamination, the Interlaminar Tensile Strength (ILTS) was also calculated. Performed tests showed that 75  $g/m^2$  prepreg is more prone to create manufacturing defects because of the higher thickness change during the debulk before curing, lower out-of-plane bending stiffness and very weak response to in-plane shear. Mechanical tests of flat laminates showed higher 90° tensile strength and higher ILSS for the composites made of 75  $g/m^2$  prepreg. During the Curved Beam Strength tests of the curved samples it was noticed that CBS value depends on the curvature geometry. For the lowest inner radius and angles between the legs, higher CBS was measured for the laminates made of 150 g/m<sup>2</sup> prepreg. As these samples were destroyed by delamination, the ILTS was also calculated. Laminates made of 150 g/m<sup>2</sup> shown higher ILTS. For the samples with higher inner radius and angles between the legs, higher CBS was measured for the laminates made of 75 g/m<sup>2</sup> prepreg. The obtained dependency indicates that the ply thickness influence on curved laminates strength is related to the curvature geometry and the stress state. For the lowest inner radius and angles between the legs, higher CBS was measured for laminates made of 150 g/m<sup>2</sup> prepreg, but while increasing the inner radius and angles between the legs, the difference

of strength between the same geometry samples changes to be higher for the laminates made of 75 g/m<sup>2</sup> prepreg.