



UNIWERSYTET RADOMSKI
im. Kazimierza Pułaskiego
w Radomiu

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Dyscyplina naukowa: **Inżynieria mechaniczna**

ROZPRAWA DOKTORSKA

**OCENA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH POLIMEROWYCH
KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH DO WYTWARZANIA
STRUKTUR OCHRONNYCH W SAMOCHODACH ELEKTRYCZNYCH**

Wykonała:

mgr inż. Joanna Masiewicz

nr albumu 228

Promotor:

**dr hab. inż. Marcin Kostrzewa,
prof. URad.**

Radom 2024

Podziękowanie

Panu prof. dr. hab. inż. Marcinowi Kostrzewie składam serdeczne podziękowania za opiekę naukową, profesjonalizm i cenne uwagi, które przyczyniły się do mojego rozwoju i doskonalenia jako badacza, a także za wsparcie i cierpliwość, dzięki którym czułam się zmotywowana do kontynuowania badań nawet w trudnych momentach.

Panu dr. inż. Pawłowi Przybyłkowi dziękuję za niezwykłą wyrozumiałość, wnikliwość, rady i wiedzę na temat dziedziny badań, które były dla mnie inspiracją i potwierdzały moją pewność, że jestem w otoczeniu ekspertów, gotowych wspierać mnie na każdym etapie mojej drogi naukowej.

Mgr. inż. Mateuszowi Czyżowi dziękuję za nieocenioną pomoc w realizacji obliczeń, możliwość zgłębienia wiedzy na temat obszarów analizowania danych i motywację na każdym etapie powstawania rozprawy doktorskiej.

Księdzu mgr. Pawłowi Śliżewskiemu SAC dziękuję za niestrudzone wsparcie podczas całego procesu przygotowania do egzaminów doktorskich i obrony – ta fala dobra, życzliwości i modlitwy dawała mi odwagę do osiągnięcia celu w stylu lepszym niż się spodziewałam.

Współpracownikom Katedry Płatowca i Silnika Wydziału Lotnictwa z Lotniczej Akademii Wojskowej dziękuję za wyrozumiałość, budujące dyskusje i stworzenie odpowiednich warunków do realizacji mojej pracy.

Niezmiernie dziękuję również Mamie, Bratu oraz przyjaciółom i bliskim osobom, którzy byli ze mną na każdym etapie powstawania rozprawy doktorskiej. Wasze wsparcie emocjonalne, słowa zachęty i wyrozumiałość były dla mnie niezastąpione.

Streszczenie

Kompozyty energochłonne są poddawane szczególnej ekspozycji na obciążenia udarowe i spełniają funkcję zabezpieczającą osłanianych elementów w sytuacjach „awaryjnych”, w których następuje przypadkowe lub zamierzone oddziaływanie statyczne lub dynamiczne. Właściwości energochłonne materiałów kompozytowych są na szeroką skalę wykorzystywane w lotnictwie i przemyśle morskim, jednak poszukuje się rozwiązań, aby wykorzystywać je również w przemyśle motoryzacyjnym oraz innych rodzajach transportu.

Udoskonalenia materiałów i dostępność aparatury umożliwiającej badania mechaniczne, wytrzymałościowe, termiczne struktur warstwowych, w tym badania zmęczeniowe, pozwalają na dynamiczny rozwój prac badawczych potwierdzających efektywność zastosowania kompozytów konstrukcyjnych jako struktur energochłonnych. Właściwy dobór materiałów i projektu, techniki wytwarzania, a także strategii napraw i konserwacji może gwarantować produkcję wysoce wydajnych konstrukcji kompozytowych.

W rozprawie doktorskiej zaprojektowano i wytworzono epoksydowo – szklany kompozyt warstwowy ze zmodyfikowaną osnową i porowatym rdzeniem, dokonano analizy mechanizmów uszkodzeń i charakterystyki wytrzymałościowej. Przeprowadzone badania eksperymentalne zostały zaproponowane jako baza do stworzenia procedury badawczej, służącej kompleksowej charakterystyce wytrzymałościowej i mechanicznej kompozytu do zastosowania go jako struktura ochronna w samochodach elektrycznych. Realizacja celów obejmowała:

- analizę i opracowanie literaturowe na temat kompozytów energochłonnych, materiałów stosowanych do ich wytworzenia, badań wytrzymałościowych oraz kierunków ich zastosowania.
- otrzymanie materiału warstwowego z modyfikowaną chemicznie osnową stanowiącą element nowości jako czynnik kształtujący właściwości pochłaniania energii uderzenia.
- charakterystykę ilościowego i jakościowego wpływu doboru materiałów i modyfikacji osnowy na udarność, zginanie, ściskanie, odporność na przebicie i wytrzymałość resztkową oraz dynamiczną analizę mechaniczną warstwy kompozytowej w zakresie ujemnych i wysokich temperatur.
- analizę mechanizmów uszkodzeń epoksydowo – szklanych kompozytów wielowarstwowych z lekkim rdzeniem oraz wzajemnego oddziaływania komponentów pod wpływem obciążeń występujących podczas zaproponowanych testów eksperymentalnych.

SUMMARY

The energy-absorbing composites have been subjected to specific exposure to impact loads and have a protective function for shielded components in 'failure' situations where there is accidental or intentional mechanical or dynamic action.. The energy-absorbing properties of composite materials are used extensively in the aviation and marine industries, but solutions are being sought to use them also in the automotive or other transport industries.

Improvements of materials and the availability of apparatus enabling strength, mechanical, thermal, including fatigue tests of layered structures , allow a dynamic development of research work confirming the effectiveness of the use of structural composites as energy-absorbing structures. The right selection of materials and project, production technique, as well as repair and maintenance strategies can guarantee the production of highly efficient composite structures.

In this doctoral thesis, an epoxy-glass layered composite with a modified matrix and porous core was designed and fabricated, and damage mechanisms and strength characteristics were analysed. Experimental studies carried out were proposed as a basis for the development of a test procedure for the comprehensive strength and mechanical characterisation of the composite for use as a protective structure in electric cars. The realisation of the objectives included:

- a literature analysis and study of energy-absorbing composites, the materials applied to their production, strength tests and application directions.
- the preparation of a layered material with a chemically modified matrix constituting an element of innovation as a factor determining impact energy absorption properties.
- characterisation of the quantitative and qualitative effects of material selection and matrix modification on impact, bending, compression, impact resistance and residual strength, and dynamic mechanical analysis of the composite layer in the range of low and high temperatures.
- analysis of the failure mechanisms of epoxy-glass layered composites with lightweight core and the interaction of the components under the loads during the proposed experimental tests.

SPIS TREŚCI

WYKAZ SKRÓTÓW	11
WSTĘP	13
1. ENERGOCHŁONNE KOMPOZYTY KONSTRUKCYJNE.....	15
1.1. Zależności charakteryzujące zdolność absorpcji energii uderzenia w konstrukcjach kompozytowych.....	16
1.2. Mechanizmy uszkodzeń kompozytów strukturalnych	22
1.3. Materiały stosowane na kompozyty energochłonne	32
1.3. Techniki produkcji kompozytów warstwowych	43
1.4. Kierunki zastosowań energochłonnych kompozytów strukturalnych.....	48
1.5. Inne aspekty zastosowania materiałów kompozytowych w wytwarzaniu konstrukcji energochłonnych.....	53
2. METODY BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH KOMPOZYTÓW WIELOWARSTWOWYCH Z RDZENIEM PIANKOWYM	55
2.1. Badania udarowości kompozytów strukturalnych.....	55
2.1.1. Udarowościowe zginanie krótkiej belki.....	57
2.1.2. Oddziaływanie poprzecznych obciążeń udarowościowych	61
2.1.2.1. Tolerancja na uszkodzenia	62
2.1.2.2. Odporność na przebicie metodą BAI.....	68
2.2. Badania wytrzymałości na zginanie	70
2.3. Inne metody badań właściwości kompozytów	75
3. CELE PRACY	79
4. METODYKA BADAŃ KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH	81
4.1. Założenia i warunki badań	81
4.1.1. Dobór materiałów.....	85
4.1.2. Przygotowanie osnowy	87
4.1.3. Przygotowanie kompozytu	88
5. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ MECHANICZNYCH KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH	90
5.1. Weryfikacja składu kompozytu.....	90
5.2. Analiza wyników badań właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych kompozytów wielowarstwowych	100
6. WNIOSKI.....	122
LITERATURA	127
Spis rysunków	138
Spis tabel	141

WYKAZ SKRÓTÓW

- EACS – kompozyty energochłonne (ang. *Energy Absorbing Composite Structures*)
- WEA – względna energia absorpcji
- EA – zdolność pochłaniania energii
- EAE – efektywność absorpcji energii
- FRP – kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami (ang. *Fiber Reinforced Polymer*)
- LVI – uderzenie o niskiej prędkości (ang. *Low Velocity Impact*)
- BVID – ledwo widoczne uszkodzenie uderzeniowe (ang. *Barely Visible Impact Damage*)
- HLU – technika układania (laminowania) ręcznego (ang. *Hand Lay-up*)
- FVF – frakcja objętościowa włókien (ang. *Fiber Volume Fraction*)
- IPN – układ wzajemnie przenikających się sieci polimerowych (ang. *Interpenetrating Polymer Networks*)
- GFRP – kompozyt wzmocniony włóknami szklanymi z osnową polimerową (ang. *Glass Fiber Reinforced Polymer*)
- ILSS – ścinanie międzywarstwowe (ang. *Interlaminar Shear Strength*)
- FGC – kompozyty wielowarstwowe ze stopniowanym rdzeniem (ang. *Functionally Graded Core*)
- BAI – badanie wytrzymałości resztkowej oznaczanej przez trójpunktowe zginanie kompozytu po uderzeniu (ang. *Bending After Impact*)
- DMA – dynamiczna analiza mechaniczna (ang. *Dynamic Mechanical Analysis*)
- E^* - moduł zespolony
- E' – moduł zachowawczy
- E'' – moduł stratności
- $Tg \delta$ – stosunek modułu zachowawczego do modułu stratności
- EV – pojazd elektryczny (ang. *Electric Vehicle*)
- BAI – zginanie po uderzeniu (ang. *Bending After Impact*)
- BO – zginanie (w metodzie BAI) (ang. *Bending Only*)
- XPS – pianka z ekstrudowanego polistyrenu (rdzeń kompozytu)
- EP – żywica epoksydowa (osnowa)
- PU – poliuretan (modyfikator)
- GF – tkanina z włókna szklanego (ang. *Glass Fiber*) (wzmocnienie kompozytu)

WSTĘP

Kompozyty konstrukcyjne są wykorzystywane w bardzo wielu dziedzinach, począwszy od przedmiotów użytku codziennego po zaawansowane materiały wykorzystywane w przemyśle kosmicznym. Właściwości kompozytów warstwowych czynią je alternatywą dla dotychczas używanych jednolitych materiałów ceramicznych lub metalowych. Rozwój metod badawczych oraz możliwości poprawy właściwości materiałów sprawiają, że kompozyty o właściwościach pochłaniających energię uderzenia przy zachowaniu niskiej masy posiadają ogromny potencjał konstrukcyjny i perspektywy optymalizacji pod wieloma kątami w zależności od konkretnych warunków eksploatacji.

W opracowaniu przedstawiono:

1. *W rozdziale 1:* zależności charakteryzujące zdolność materiału do pochłaniania energii uderzenia, mechanizmy uszkodzeń kompozytów warstwowych, techniki produkcji kompozytów warstwowych, charakterystykę materiałów stosowanych do wytwarzania kompozytów energochłonnych, kierunki badań i zastosowań struktur warstwowych oraz inne aspekty zastosowania kompozytów warstwowych
2. *W rozdziale 2:* metody badań i oceny właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych poddawanych obciążeniom udarowym, zginaniu trójpunktowemu, ścisaniu krawędziowemu oraz wytrzymałość resztkową i dynamiczną analizę mechaniczną.
3. *W rozdziale 3:* cele pracy dotyczące właściwości wytrzymałościowych i mechanicznych modyfikowanych kompozytów epoksydowo – szklanych z porowatym rdzeniem.
4. *W rozdziale 4:* założenia oraz metodykę badań udarności, zginania trójpunktowego, wytrzymałości resztkowej, ścisania, DMA, dobór materiałów oraz proces przygotowania kompozytów warstwowych.
5. *W rozdziale 5:* weryfikację składu kompozytu oraz analizę otrzymanych wyników badań, zależności i wynikające z nich interakcje, mechanizmy, potencjał optymalizacji i zastosowania
6. *W rozdziale 6:* wnioski końcowe z przeprowadzonych badań i analizy wyników.

1. ENERGOCHŁONNE KOMPOZYTY KONSTRUKCYJNE

Materiały energochłonne w swoich zastosowaniach są poddawane szczególnej ekspozycji na obciążenia udarowe, zginanie lub ściskanie i spełniają głównie funkcję zabezpieczającą osłanianych przez kompozyt elementów w sytuacjach „awaryjnych”, w których następuje przypadkowe lub zamierzone oddziaływanie statyczne lub dynamiczne. W praktyce oznacza to zachowanie materiału, który posiada efektywną zdolność absorpcji energii.

Wspólną potrzebą w ramach projektowania materiałów do budowy maszyn, pojazdów lub innych konstrukcji inżynierskich jest określenie ich potencjału łagodzenia skutków uderzeń lub innych obciążeń mechanicznych. Najpowszechniej obserwowanym następstwem podczas zderzenia materiału z innym obiektem o dużej sile lub prędkości uderzenia jest praktycznie całkowite jego zniszczenie i pochłonięcie możliwie największej ilości energii uderzenia, zabezpieczające obiekt lub użytkowników znajdujących się w obszarze danej konstrukcji. Materiał pełniący funkcję osłony, podczas zderzenia pochłania energię, rozpraszając jej nadmiar w procesie nieodwracalnej deformacji. Aby temu zapobiegać lub możliwie maksymalnie ograniczać obszary zniszczeń zaczęto stosować materiały, które pochłaniają energię uderzenia bez drastycznego pogorszenia ich wytrzymałości [1].

Kompozyty energochłonne (EACS – ang. *Energy Absorbing Composite Structures*) posiadają zdolność do przekształcania energii uderzenia w pewną formę energii pochłoniętej na skutek deformacji. Dowiedziono, że mają one znacznie wyższą zdolność do absorpcji energii uderzenia niż odpowiadające temu samemu działaniu struktury metalowe [2]. W porównaniu z jednolitymi materiałami, wiele czynników wskazuje także na coraz większą przewagę zastosowania kompozytowych struktur warstwowych, które oprócz wysokich wartości wskaźników wytrzymałościowych, posiadają mniejszą masę oraz znacznie efektywniejszą zdolność do pochłaniania energii wstrząsu lub obciążenia udarowego [1].

Właściwości energochłonne materiałów kompozytowych są na największą skalę wykorzystywane w lotnictwie i przemyśle morskim, jednak obecnie powstaje coraz więcej rozwiązań i obszarów wykorzystania kompozytów energochłonnych w takich dziedzinach przemysłu jak motoryzacja, transport, odnawialne źródła energii czy elementy architektury.

Udoskonalenia materiałów i dostępność aparatury umożliwiającej badania wytrzymałościowe, mechaniczne, termiczne i zmęczeniowe struktur warstwowych pozwalają na dynamiczny rozwój prac badawczych, które potwierdzają efektywność zastosowania konstrukcyjnych kompozytów energochłonnych. Konstrukcje pochłaniające energię wykonane

z materiałów kompozytowych są lekkie i przyjazne dla środowiska. Właściwy dobór materiałów i projektu, techniki wytwarzania, a także strategii napraw i konserwacji może gwarantować produkcję wysoce wydajnych konstrukcji kompozytowych [2].

1.1. Zależności charakteryzujące zdolność absorpcji energii uderzenia w konstrukcjach kompozytowych

Termin *absorbpcja* (łac. *absorbatio* – pochłanianie) może naturalnie kojarzyć się z pojęciem z zakresu chemii fizycznej lub spektrofotometrii, *który oznacza proces zatrzymywania jednej substancji (absorbantu) przez inną (absorbent)* [3]. Absorbpcja w ujęciu konstrukcyjnym rozumiana jest jako pochłanianie energii kinetycznej uderzenia, czego efektem jest zamiana ujemnego przyrostu energii uderzenia na pracę potrzebną do zniszczenia materiału [4], które nie powinno przebiegać gwałtownie, lecz umożliwiać jego stopniowe kruszenie [5]. Reakcja materiału na uderzenie zależy przede wszystkim od właściwości wykorzystanych komponentów, zastosowanego procesu wytwarzania oraz eksploatacji konstrukcji. Najważniejszymi parametrami mierzonymi w zakresie pochłaniania energii jest:

- względna energia absorpcji (WEA),
- zdolność pochłaniania energii (EA),
- efektywność absorpcji energii (EAE).

Początek XXI wieku owocował we wzrost zastosowania struktur metalicznych do konstrukcji pochłaniających energię uderzenia [2]. Postęp technologiczny skłonił jednak do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, modyfikacji i modelowania powszechnie występujących materiałów i wykorzystywania ich jako zamienniki konstrukcji metalowych. Kompozyty polimerowe posiadają najwyższą względną energię absorpcji (WEA; w artykułach anglojęzycznych oznaczana jest również jako SEA - *specific energy absorption*) w odniesieniu do masy. Z tego względu zastosowanie ich w konstrukcjach pochłaniających energię są przedmiotem ogromnego zainteresowania i spotyka się z coraz większą adaptacją w wielu aplikacjach. Względna energia absorpcji zapisywana jest wzorem:

$$WEA = \frac{EA}{m_k} \text{ [kJ/kg]} \quad (1)$$

gdzie *EA* (ang. *energy absorbing*) - zaabsorbowana energia uderzenia [kJ],

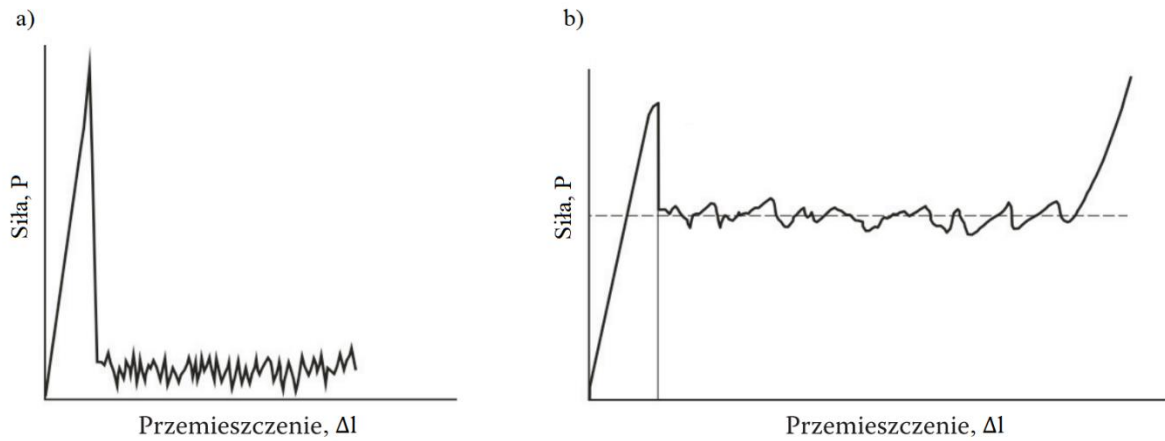
m_k - masa rozdrobnionej struktury kompozytowej [kg] [2].

Zaabsorbowaną energię uderzenia charakteryzuje pole powierzchni pod krzywą obciążenie – przemieszczenie, które służy ocenie zdolności materiału do rozpraszania energii:

$$EA = \int_0^l P \cdot dl \text{ [kJ]} \quad (2)$$

gdzie P - wartość siły niszczącej, a dl to przemieszczenie.

Wykresy pokazane na Rysunku 1.1. przedstawiają krzywe charakterystyczne dla materiału, w którym zniszczenie odbywa się w sposób gwałtowny (a) oraz materiału z zastosowaniem czynnika inicjującego niszczenie progresywne (b) [6].



Rysunek 1.1. Zależność siły niszczącej i przemieszczenia

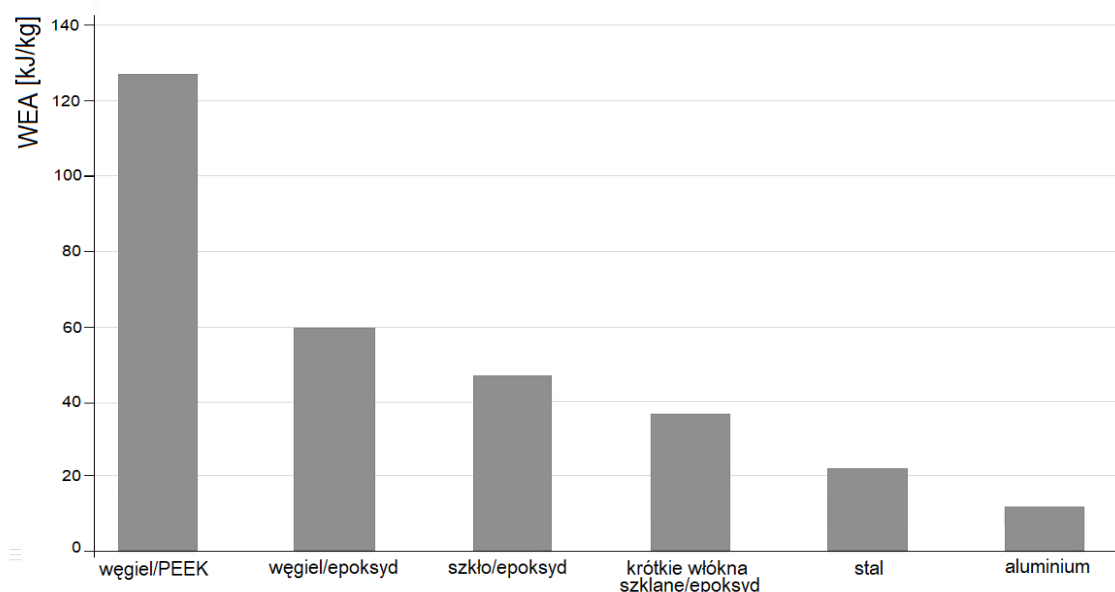
- a) bez zastosowanego czynnika inicjującego proces stopniowego kruszenia materiału;
- b) z zastosowaniem czynnika inicjującego stopniowe kruszenie materiału [6]

Nachylenie pierwszej części wykresu $P-\Delta l$, w próbach, zależy od sztywności zginania kompozytu, która definiowana jest jako para sił (obciążenie-przemieszczenie) potrzebnych do ugięcia próbki o jedną jednostkę (przy zniszczeniu dominuje zginanie warstw). Efektywność absorpcji energii (ang. *Energy Absorption Efficiency*) definiowana jest przy określonym odkształceniu i wyrażana następującym wzorem:

$$EAE(\varepsilon_a) = \frac{\int_0^{EAE} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_a} \quad (3)$$

gdzie σ_a to wartość naprężenia w punkcie ϵ_a , które wyznaczone są na podstawie krzywej naprężenie-odkształcenie, będącej przekształceniem krzywej siła-przemieszczenie.

Ze względu na bardzo dobre właściwości, małą gęstość i najwyższy wśród materiałów stosunek wytrzymałości i sztywności do masy właściwej, kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami (ang. *Fiber Reinforced Polymer*, FRP) są najczęściej wykorzystywane do projektowania konstrukcji energochłonnych [6, 7, 8], a w zestawieniu z materiałami metalowymi wykazują znacznie wyższe wartości względnej energii absorpcji (Rysunek 1.2.).

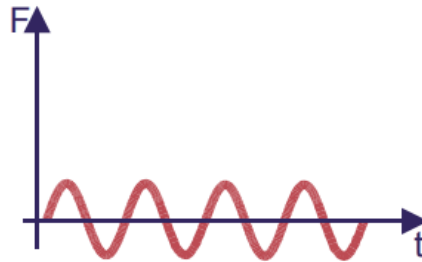


Rysunek 1.2. Porównanie względnej energii absorpcji w odniesieniu do masy wybranych materiałów [6]

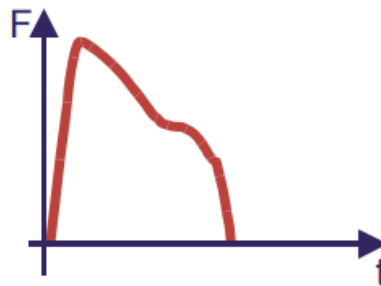
Aby kompozyt pochłonął jak największą ilość energii uderzenia konieczne jest zastosowanie czynnika, który zainicjuje proces stopniowego kruszenia albo przez cechę geometryczną albo przez odpowiednią strukturę kompozytu (np. wprowadzenie rdzenia). Ponadto, optymalna konstrukcja kompozytowa powinna eliminować zjawisko delaminacji włókien i wzmocnić mechanizmy międzywarstwowe, które pochłaniają najwięcej energii [7].

Klasyfikując obciążenia dynamiczne w aspekcie absorpcji energii z uwzględnieniem charakterystyki przebiegów siły w funkcji czasu, możemy wyróżnić [8]:

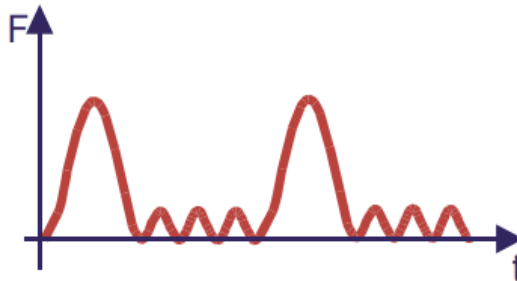
- a) drgania ustalone o długotrwałym czasie, wielu cyklach i ograniczoną amplitudą parametrów drgań



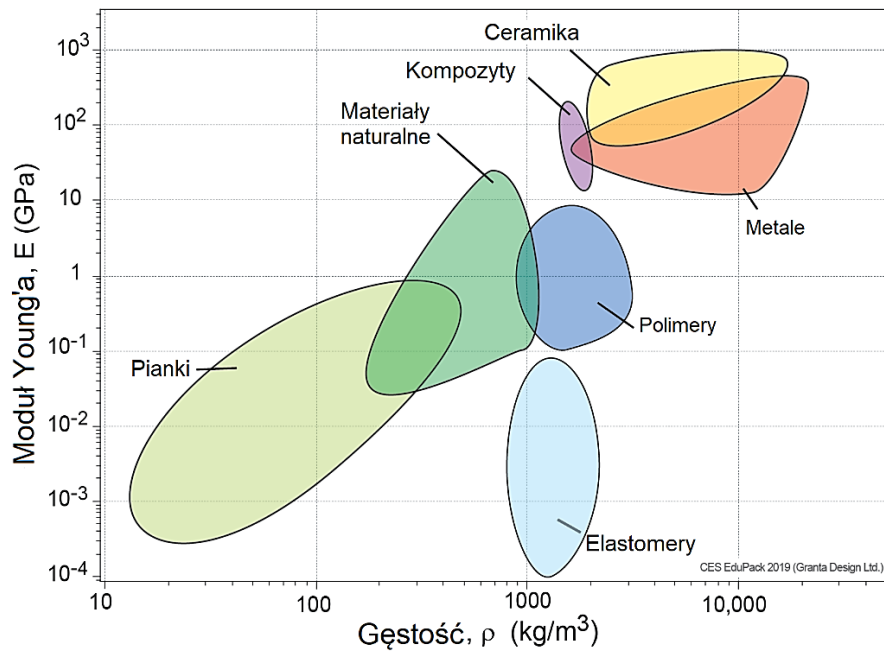
- b) jednokrotne, krótkotrwałe obciążenia udarowe, charakterystyczne szczególnie dla oddziaływań kontaktowych w trakcie zderzenia



- c) cykliczne obciążenia udarowe o powtarzających się impulsowych oddziaływaniach

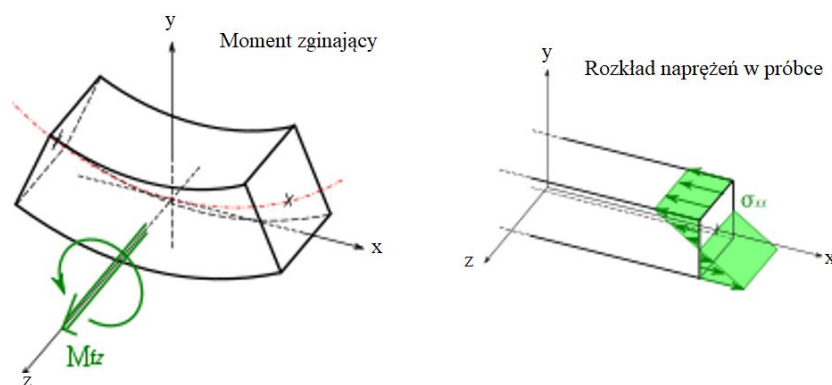


Decydującą rolę w kształtowaniu modelu zniszczeń mają odkształcenie przy zniszczeniu i moduły sprężystości (wzdłużnej Younga i poprzecznej Kirchoffa). Kompozyty zyskują w tym względzie przewagę nad metalami i ceramiką ze względu na korzystniejszy stosunek modułu sprężystości wzdłużnej do gęstości materiału (Rysunek 1.3.). Jest to szczególnie istotne w konstrukcjach, których masa powinna być możliwie jak najniższa przy zachowaniu jak najlepszych właściwości wytrzymałościowych. Dotyczy to w dużej mierze przemysłu lotniczego, morskiego, sportowego, ale także przedmiotów codziennego użytku (np. lekkie i wytrzymałe walizki podróżne lub walizki do przenoszenia elementów elektronicznych szczególnie wrażliwych na wstrząsy i uderzenia).



Rysunek 1.3. Zależność modułu sprężystości i gęstości materiałów na podstawie wykresu Ashby'ego [9]


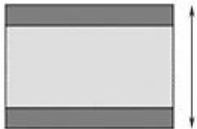
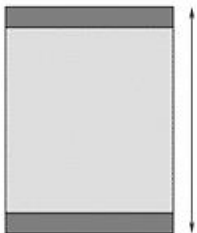
Jak wspomniano, konstrukcje kompozytowe narażone są także na działanie obciążeń zginających. Teoria „czystego zginania” zakłada, że odpowiedź materiału na moment zginający jest wyrażony liniową zmianą naprężeń, których maksymalne wartości występują w jego górnej i dolnej części (Rysunek 1.4.). Powierzchnie te poddane są odpowiednio ścisnaniu i rozciąganiu, a naprężenia w środku próbki wynoszą zero (warstwa obojętna).



Rysunek 1.4. Moment zginający i rozkład naprężeń wewnętrznych belki [10]

Zależność ta nie jest jednak wystarczająco użytkowa, ponieważ rzadko występuje sytuacja, aby naprężenia na całym przekroju kompozytu były równomierne. Jedną z metod optymalizacji

materiału pod tym kątem jest wprowadzenie w pobliżu warstwy obojętnej materiału o niskiej gęstości. Warstwa lekkiego rdzenia oddziela znacznie sztywniejsze od niego okładziny, tym samym zwiększając ich odległość od warstwy obojętnej. Sztywność przy zginaniu EI (ang. *flexural rigidity*) określa stopień zapobiegania ugięciu konstrukcji. E jest to moduł Younga, natomiast I to tak zwany drugi moment powierzchni, charakteryzujący opór stawiany podczas zginania próbki, zwiększający się wraz ze wzrostem odległości od warstwy obojętnej. Zależności między zwiększeniem sztywności przy zginaniu w stosunku do masy kompozytu w wyniku separacji okładzin warstwą rdzenia przedstawiono na Rysunku 1.5. [10].

	Sztywność	Masa	EI
	2t	1	2
	6t	2,27	11,0
	11t	2,6	38,0

Rysunek 1.5. Efekt separacji okładzin na sztywność, masę i sztywność zginania kompozytów

[10]

Dużym ograniczeniem w budowie kompozytowych konstrukcji inżynierskich jest ich niedostateczna w danym zastosowaniu sztywność, która najczęściej bywa modyfikowana przez różnego rodzaju profile lub usztywnienia metalowe. Skutkuje to jednak zwiększeniem masy konstrukcji. W aplikacjach, gdzie najbardziej pożądaną cechą jest lekkość przy możliwie najlepszych właściwościach wytrzymałościowych, w tym wysokiej sztywności, najefektywniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie warstw wielokomórkowych o wysokiej sztywności przy bardzo niskiej masie. Szczegółowy opis rdzeni stosowanych w kompozytach przekładkowych zawarto w rozdziale 1.3.

1.2. Mechanizmy uszkodzeń kompozytów strukturalnych

Konstrukcja kompozytu warstwowego, przez wzgląd na swoją wielowarstwowość, generuje znacznie więcej możliwości zniszczeń, których potencjalne występowanie powinno być szczególnie brane pod uwagę na etapie projektowania. Bardzo powszechnym założeniem jest równoważność zniszczenia kompozytu ze zniszczeniem pierwszej jego warstwy, określane jako obciążenie FPF (ang. *First Ply Failure*). Nie musi to jednak oznaczać całkowitego wyczerpania nośności materiału. Obciążenia niszczące mogą być przenoszone przez kolejne warstwy kompozytu, ulegając progresywnemu niszczeniu. Gdy następuje zniszczenie ostatniej warstwy, możemy mówić wówczas o całkowitej perforacji kompozytu i pozbawieniu go użyteczności konstrukcyjnej. Taki rodzaj obciążenia niszczącego określany jest jako LPF (ang. *Last Ply Failure*). Wytrzymałość struktury kompozytu oceniana według hipotez wytrzymałościowych nie jest miarodajna. Podstawowe hipotezy wytrzymałościowe tj.

- hipoteza maksymalnych naprężeń,
- hipoteza maksymalnych odkształceń,
- hipoteza Tsai-Wu

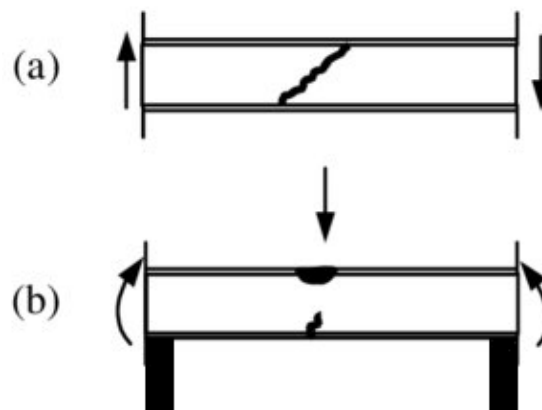
charakteryzują matematycznie stany, które prowadzą do zniszczenia kompozytu, jednak nie uwzględniają mechanizmów zniszczenia, dlatego nie wykazują pełnego potwierdzenia teoretycznego i doświadczalnego. Występowanie lokalnych naprężeń i odkształceń, skokowa zmiana kształtu konstrukcji, a także temperatura otoczenia czy niedoskonałości produkcyjne sprawiają, że ocena wytrzymałości nie jest możliwa na poziomie makrostrukturalnym [12].

Kompozyty strukturalne z rdzeniem piankowym wytwarzane są metodami opartymi na układaniu warstw w różnej konfiguracji, które poddawane procesowi utwardzania zostają ze sobą połączone i wykazują znakomite właściwości w płaszczyźnie. Nie wytrzymują jednak w dużej większości obciążeń poprzecznych, które skutkują rozwarstwieniem, wyboczeniem i drastycznym skróceniem czasu i możliwości eksploatacji materiału [22]. Aby zwiększyć zdolność materiału do pochłaniania energii należy przeanalizować proces jego niszczenia oraz oszacować potencjał optymalizacji poszczególnych komponentów. Znaczna ilość energii uderzenia jest pochłaniania w stopniowym procesie niszczenia [13], wśród których najpowszechniejszymi mechanizmami są zjawiska:

- pęknięcia warstwy okładzinowej i/lub włókien,
- lokalnego lub globalnego wyboczenia konstrukcji,
- delaminacji,
- ścinania rdzenia.

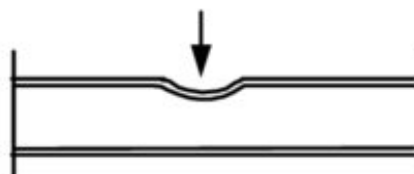
W kompozytach warstwowych, ze względu na mnogość potencjalnych obszarów uszkodzeń może dochodzić do zniszczeń wywołanych różnego rodzaju obciążeniami, które są trudne do przewidzenia. Chcąc zastosować pewnego rodzaju klasyfikację, można wyróżnić potencjalne mechanizmy uszkodzeń uwzględniając kierunek działania sił niszczących na kompozyt:

- siły działające na kompozyt w dwóch kierunkach jednocześnie (Rysunek 1.6.), występujące podczas prób zginania lub ściskania międzywarstwowego, powodują gwałtowne ugięcie lub pęknięcie warstwy okładziny oraz gwałtowne pęknięcie rdzenia;



Rysunek 1.6. Potencjalne mechanizmy zniszczenia kompozytu warstwowego przez a) uszkodzenie rdzenia przy ścinaniu, b) ugięcie/pęknięcie warstwy okładziny [14]

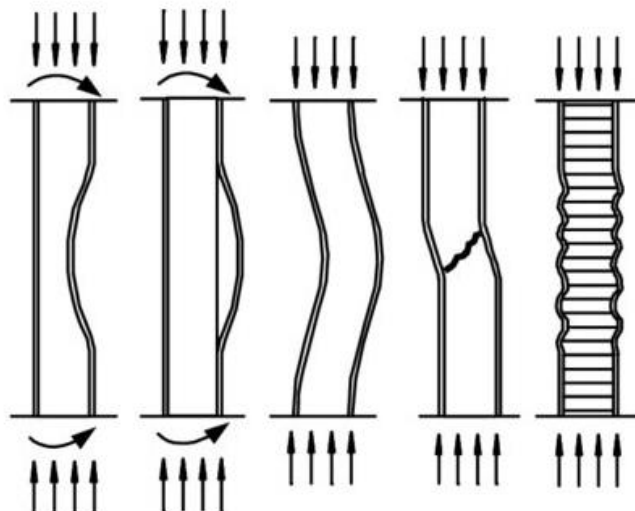
- siła działająca prostopadle do powierzchni kompozytu (Rysunek 1.7.), występująca podczas prób uderzeniowych, powoduje trwałe uszkodzenia materiału, począwszy od trudno dostrzegalnych pęknięć warstwy okładziny i lokalnych wgłębień, po całkowitą perforację kompozytu;



Rysunek 1.7. Potencjalne mechanizmy zniszczenia kompozytu warstwowego przez lokalne wgłębienie [14]

- siła działająca równoległe do ułożenia warstw kompozytu (Rysunek 1.8.), występująca najczęściej podczas prób ściskania krawędziowego lub prób zginania trójpunktowego,

powoduje fałdowanie lub gwałtowne wyboczenie powierzchni warstw okładziny, trwałe odkształcenia lub pęknięcie rdzenia;



Rysunek 1.8. Potencjalne mechanizmy zniszczenia kompozytu warstwowego przez fałdowanie, wyboczenie/ globalne wyboczenie powierzchni warstw okładziny, ścinanie rdzenia lub rozległe wgłębienia warstwy okładzinowej [14]

Podczas rozciągania materiału, pęknięcie w warstwie okładziny może następować na granicy włókno-osnowa (ang. *debonding*) lub wyłącznie na poziomie pojedynczych składowych okładziny (włókno lub osnowa). Gdy między włóknem a osnową dochodzi do utraty adhezji, wówczas jest to początkowe stadium degradacji materiału. Uszkodzenia występujące lokalnie na niewielkich obszarach nie prowadzą zwykle do drastycznego pogorszenia właściwości całego kompozytu. Jednak w przypadku bardziej rozległych uszkodzeń ogromne znaczenie zyskuje ich stałe monitorowanie. Pęknięcie włókien zachodzi w materiale, gdy stosunek modułów sprężystości wzdłużnej (moduł Younga, E) osnowy i włókna są większe od stosunków wytrzymałości na rozciąganie tych komponentów. Zjawisko pojawia się wówczas, gdy zachodzi zależność:

$$\varepsilon_w^* < \varepsilon_o^* \quad (4)$$

gdzie ε_w^* - wzdłużne odkształcenie niszczące włókien, ε_o^* - wzdłużne odkształcenie niszczące osnowy. Pęknięcia warstwy osnowy powstają często w połączeniu z uszkodzeniami powstałymi w ramach debondingu, propagując pęknięcie przebiegające w ramach całej grubości warstwy [12].

Zjawisko wyboczenia jest następstwem gwałtownej i szybkiej redystrybucji sił wewnętrznych, będących jednym z działań nazywanych utratą stateczności konstrukcji, następujących podczas prób ściskania. Wyboczenie lokalne (falowanie) ogranicza się zwykle do określania parametrów krytycznych ze względu na dużą złożoność zjawiska [15]. Zależność, według której można określić naprężenie krytyczne ma postać:

$$\sigma_{kr} = \frac{m^2 \pi^2 D}{t l^2} + \frac{\left(c + \frac{t}{2}\right) \pi^2 B m^2 \left(\frac{t g h(p c)}{p} + \frac{t}{2}\right)}{t l^2 \left(1 + \frac{\pi^2 B c m^2}{G_r l^2}\right)}; [\text{Pa}] \quad (5)$$

gdzie:

$$D = \frac{E_t t^3}{12(1-\nu_t^2)}; B = \frac{E_t t}{1-\nu_t^2}; p^2 = \left(\frac{m \pi}{l}\right)^2 \frac{1-2\nu_r}{2(1-\nu_r)} \quad (6)$$

gdzie m – liczba półfal; l – długość badanej próbki; $2c$ – grubość warstwy rdzenia; t – grubość okładziny; G_r – moduł ściskania warstwy rdzenia; E_t – moduł Younga warstwy okładziny; ν_t – współczynnik Poissona warstwy okładziny [16].

Delaminacja, zwana także interlaminarnym mechanizmem zniszczenia, jest zjawiskiem utraty spójności między warstwami kompozytu, będącym następstwem działania zmiennych lub gwałtownych odkształceń, błędów produkcyjnych, niewłaściwych warunków utwardzania osnowy (temperatura, rodzaj i proporcje składników), niewystarczającego przylegania wzmocnienia i rdzenia do warstwy osnowy. W kompozytach typu sandwich może także dochodzić do ścinania rdzenia, którego skutkiem jest zmiana kształtu rdzenia bez żadnej zmiany jego objętości. Delaminacja warstw i ścinanie rdzenia są formami zniszczeń, które najczęściej występują lokalnie. Do pełnej analizy konieczna jest znajomość właściwości mechanicznych zastosowanych materiałów.

Delaminacja materiału przekładkowego zachodzi przy naprężeniu krytycznym, które opisuje zależność:

$$\sigma_{kr} = \frac{G_c h_c}{2 t_f}; [\text{Pa}] \quad (7)$$

gdzie G_c -moduł Kirchoffa warstwy rdzenia, h_c -grubość warstwy rdzenia, t_f -grubość warstwy okładziny.

Ścinanie rdzenia zachodzi przy naprężeniu krytycznym, które oblicza się według wzoru:

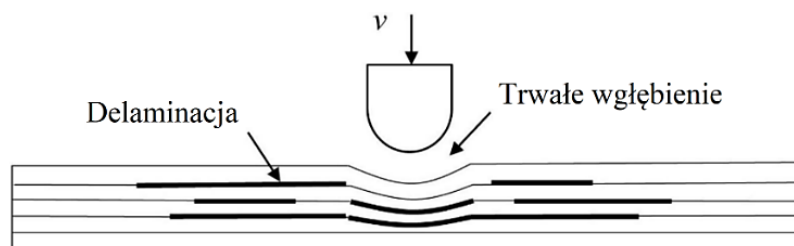
$$\sigma_{kr} = \left[\frac{2t_f E_c E_f}{3h_c(1-\nu_f^2)} \right]^{1/2}; [\text{Pa}] \quad (8)$$

gdzie t_f – grubość okładziny, E_f – moduł Younga okładziny, ν_f – współczynnik Poissona okładziny, E_c – moduł Younga warstwy rdzenia, h_c – grubość warstwy rdzenia.

Zależności są uproszczone i mają zastosowanie w konstrukcjach warstwowych płyt, paneli oraz konstrukcji cylindrycznych [17]. Wzory (5 - 8) są zapisami natury ogólnej, niemającymi istotnego znaczenia w sensie eksploatacyjnym, szczególnie poruszonym w niniejszej pracy.

Kolejną często występującą formą zniszczenia kompozytu jest rozwarstwienie, które następuje na skutek oddzielenia warstw kompozytu i zalicza się do mechanizmów międzywarstwowych. Przyczyną rozwarstwienia są często błędy produkcyjne (duża ilość pustych przestrzeni, niedokładne lub nierównomierne rozprowadzenie osnowy i włókien), niska charakterystyka wytrzymałościowa komponentów i ich niewłaściwy dobór pod względem właściwości adhezyjnych [2].

Istotnym problemem kompozytów przekładkowych jest strategia wprowadzania obciążeń zewnętrznych, w przypadku których najlepszym rozwiązaniem byłoby poddawanie ich małym lub średnim obciążeniom nie skoncentrowanym wyłącznie na niewielkich obszarach powierzchni kompozytu [12]. LVI (ang. *Low Velocity Impact*, uderzenie o niskiej prędkości) wywołuje złożone mechanizmy uszkodzeń struktury kompozytu, takie jak pękanie osnowy/włókien, trwałe wgłębienie czy delaminacja (Rysunek 1.9.). Aby zwiększyć marginesy bezpieczeństwa w użytkowaniu kompozytu stosowane są dodatkowe warstwy, które zwiększały masę kompozytu, a tym samym zmniejszały ich konkurencyjność w zestawieniu z metalami. Dało to także początek badaniom pod kątem poprawy odporności na uderzenia (odporności na przebicie, ang. *Impact resistance*) w ramach struktury kompozytów i poszczególnych ich komponentów.



Rysunek 1.9. Schemat uszkodzeń wywołanych przez uderzenia niskiej prędkości [22]

Odporność na przebicie oraz tolerancja na uszkodzenia (opisane w rozdziale 2.1.2.) zależą od czynników pierwotnych i wtórnych. Do czynników pierwotnych należą:

- właściwości i wytrzymałość osnowy,
- architektura i wytrzymałość wzmocnienia i rdzenia.

Czynniki wtórne, które mają znaczący wpływ na zachowanie kompozytu podczas uderzenia to:

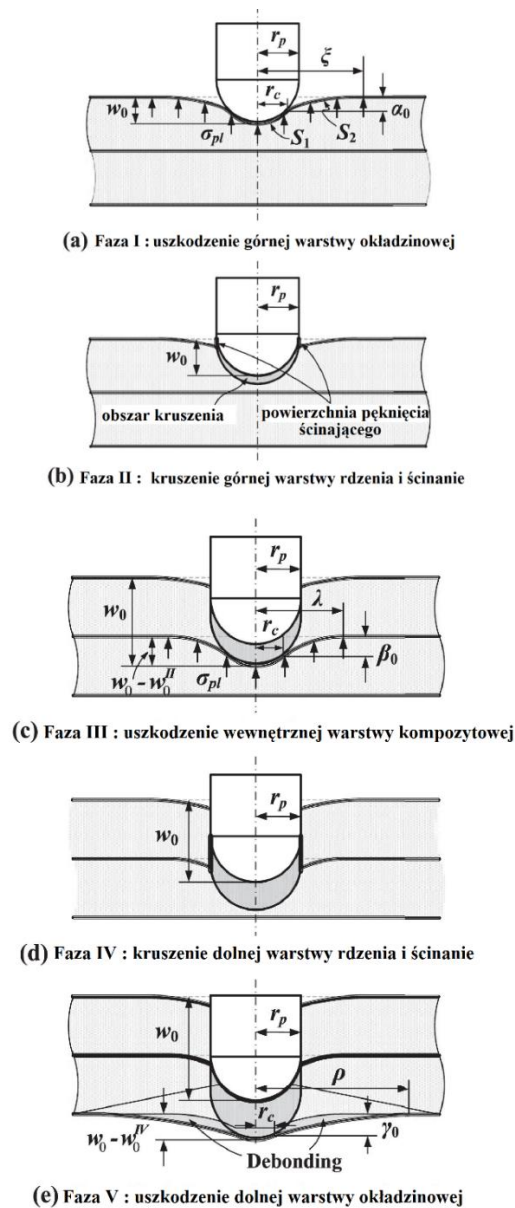
- hybrydyzacja osnowy lub włókien,
- proces produkcji,
- warunki higrotermiczne,
- geometria impaktora,
- cykliczność uderzenia.

Czynniki pierwotne koncentrują się na odpowiedzi osnowy lub/i włókien oraz rdzenia podczas LVI i uszkodzeniach wewnątrz struktury kompozytu, bezpośrednio wpływając na pogorszenie właściwości materiału. Aby można było temu zapobiegać należy wprowadzać rozwiązania, które zmniejszają skalę zniszczenia materiału poprzez poprawę odporności na pękanie międzywarstwowe, ograniczenie wielkości obszaru uszkodzenia oraz zwiększenie wytrzymałości resztkowej. Niezwykle istotnym czynnikiem jest w tym względzie odporność żywicy. Oczekuje się, aby osnowa miała jak najwyższą wytrzymałość, odporność na obciążenia poprzeczne, dobrą adhezję do włókien czy wysoką udarność [22].

Kompozyty przekładkowe z piankowym rdzeniem pod wpływem uderzenia o niskiej prędkości ulegają uszkodzeniom według postępujących po sobie faz (Rysunek 1.10.) Proces odpowiedzi wielowarstwowego kompozytu na uderzenie o niskiej prędkości przebiega w następujący sposób:

- faza I – następuje lokalne uszkodzenie górnej warstwy kompozytowej, którego elastycznym fundamentem jest podtrzymujący górną okładzinę piankowy rdzeń. Głębokość i promień odkształcenia (wgłębienia) wynoszą odpowiednio w_0 i ξ . Długości rzutu obszaru styku i bezkontaktowego uszkodzenia w płaszczyźnie xz wynoszą odpowiednio $S1$ i $S2$, a promień styku wynosi r_c . Gdy górna warstwa kompozytowa zostaje uszkodzona, impaktor rozpoczyna propagację uszkodzeń w górnej warstwie rdzenia.
- faza II – górna warstwa rdzenia ulega kruszeniu i ścinaniu. Gdy rdzeń zostaje całkowicie zmiażdżony następuje zakończenie fazy II i obciążenie zostaje przeniesione na wewnętrzną warstwę kompozytową.

- faza III – zastosowanie rdzenia piankowego sprawia, że środkowa (dolna w kompozytach o dwóch okładzinach i jednym rdzeniu) warstwa kompozytowa może nie ulegać takim samym uszkodzeniom, co warstwa górna. Promień wcięcia oznacza λ .
- faza IV – powtórzenie fazy II i III (występuje w kompozytach wielowarstwowych)
- faza V – następuje odkształcenie i pęknięcie dolnej warstwy kompozytowej aż do momentu całkowitej penetracji impaktora przez cały panel kompozytowy. Aby odróżnić odkształcenie dolnego arkusza czołowego od pozostałych dwóch arkuszy, promień odkształcenia (wgłębienia) jest oznaczony ρ .

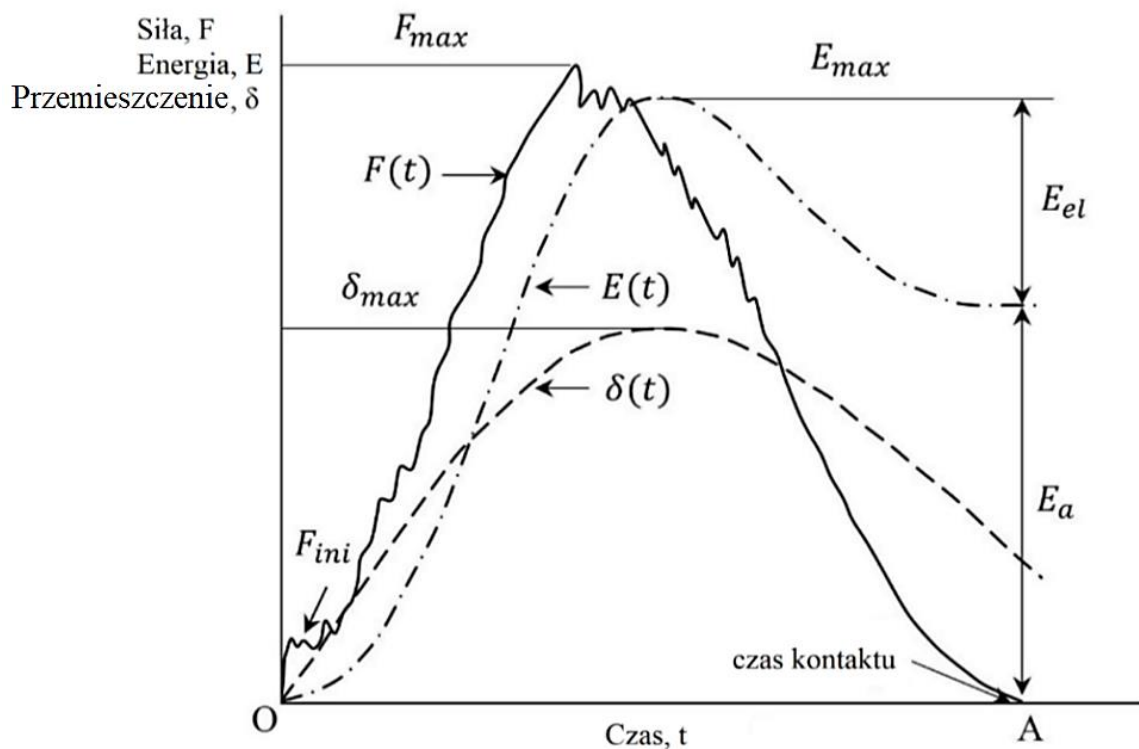


Rysunek 1.10. Fazy zniszczeń kompozytu wielowarstwowego w wyniku uderzenia o niskiej prędkości

[23]

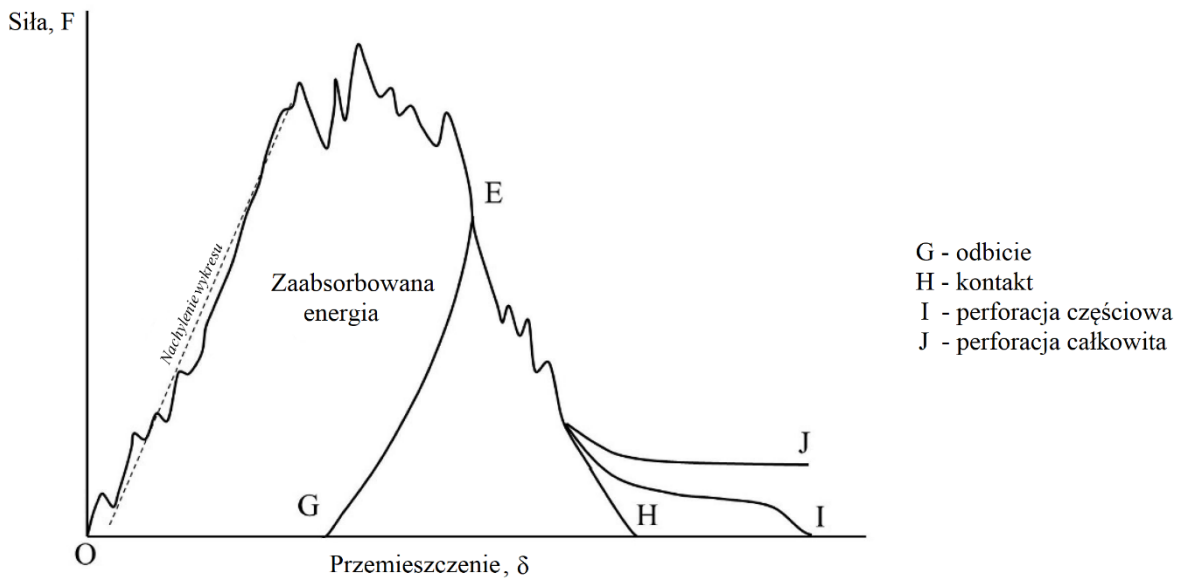
Testy uderzenia LVI pozwalają na uzyskanie danych w postaci podstawowych wykresów siły, energii i przemieszczenia (Rysunek 1.11.). Wykres zależności siły od czasu pokazuje zmiany powodowane naprężeniami poprzecznymi. Piki występujące na wykresie mogą świadczyć pękaniu poszczególnych warstw kompozytu. Początek wykresu to tak zwana siła inicjacji, po osiągnięciu której wartość siły wzrasta aż do osiągnięcia punktu maksymalnego, a następnie maleje. Punkty O-A na osi czasu wyznaczają czas kontaktu impaktora z materiałem.

Na podstawie danych wykresu zależności energii i czasu możemy wyznaczyć maksymalną energię (E_{max}) uderzenia, będącą sumą energii sprężystej (E_{el}) i pochłoniętej (E_a). Wskazuje to zatem, że tylko część energii uderzenia jest rzeczywiście pochłonięta przez kompozyt, reszta wykorzystywana jest do odbicia impaktora [22].



Rysunek 1.11. Porównanie wykresów siły, energii i przemieszczenia w zależności od czasu [22]

Mechanika uderzeń LVI pozwala także na wyznaczenie ilości pochłoniętej przez kompozyt energii, czemu służy wykres zależności siły i przemieszczenia oraz obszar pod krzywą wyznaczoną na podstawie tych dwóch parametrów [22].

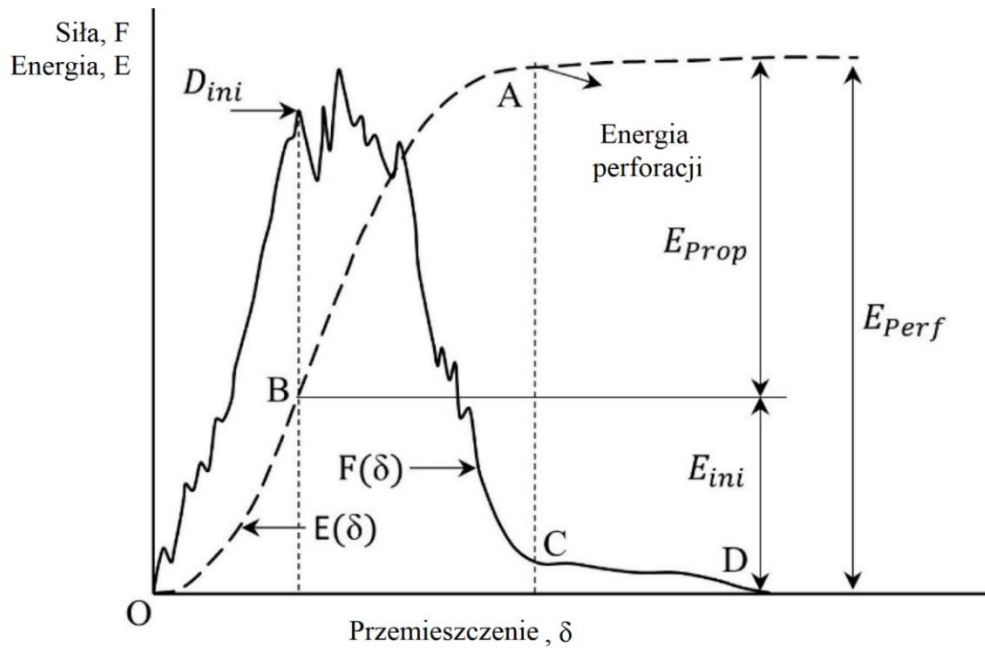


Rysunek 1.12. Wykres zależności siły i przemieszczenie [22]

Obserwując nachylenie wykresu (Rysunek 1.12) uzyskujemy informacje o sztywności zginania, a punkty (G i H) przedstawiają dane o nieodwracalnym ugięciu materiału, natomiast punkt E wskazuje na maksymalne ugięcie materiału. Możliwymi rodzajami uszkodzeń w wyniku LVI są także opisane na wykresie (Rysunek 1.13.) punkty ABCD. Są to:

- odbicie impaktora bez perforacji (G)
- maksymalne ugięcie bez perforacji (H)
- perforacja (I)
- całkowita penetracja (J) [22].

Testy LVI dostarczają także danych o energii w momencie inicjacji pęknięcia osnowy (B) oraz o ilości zaabsorbowanej energii w momencie propagacji uszkodzeń (B-A). Punkt A wskazuje na początek perforacji impaktora w wyniku uszkodzenia włókien, a energia perforacji jest sumą energii inicjacji uszkodzeń i energii ich propagacji. W mechanice uszkodzeń dochodzi także do sytuacji, w której impaktor zatrzymuje się podczas procesu przebicia materiału (punkt D). Jest to spowodowane siłami tarcia impaktora, a siła działająca na kompozyt osiąga 0 [22].



Rysunek 1.13. Porównanie wykresów zależności siły i energii od przemieszczenia [22]

Efektom uderzeń o niskiej energii są często podpowierzchniowe rozwarstwienia, których identyfikacja wzrokowa jest trudna do rozpoznania lub objawia się bardzo niewielkim odkształceniem powierzchni kompozytu. Taki rodzaj uszkodzeń, będący powodem postępującej degradacji właściwości strukturalnych, określa się jako ledwo widoczne uszkodzenie uderzeniowe (ang. *Barely Visible Impact Damage*, BVID) [24]. Zmienne naprężenia prowadzą do utraty sztywności, a w efekcie do niekontrolowanego niszczenia konstrukcji, stąd tak ważne jest, aby monitorować wysoko obciążone konstrukcje kompozytowe, reagując w odpowiednim momencie i dokonując potrzebnych konserwacji konstrukcji. Proponowanych jest wiele metod, które powinny być dostosowane do eksploatowanego materiału pod względem możliwości wykonania kontroli oraz ewentualnych ograniczeń jej wykonania. Skanowanie ultradźwiękowe pozwala na kontrolę uszkodzeń podpowierzchniowych, jednak materiał musi być dobrym przewodnikiem dźwięku. Z kolei uszkodzenia powierzchniowe można kontrolować stosując barwnik penetrujący pod warunkiem braku uszkodzeń podpowierzchniowych. Ograniczeniem jest także niemożliwość stosowania metody dla materiałów porowatych. Testy podczerwieni i mikroskopia umożliwiają wykrywanie wad powierzchni, ale nie są zalecane do badania grubych próbek i dużych komponentów. Najprostszą metodą wykrywania uszkodzeń powierzchni jest kontrola wizualna, jednak bardzo małe uszkodzenia są w tej metodzie trudne do wykrycia [25].

1.3. Materiały stosowane na kompozyty energochłonne

Intensyfikacja prac nad rozwojem energochłonnych kompozytów konstrukcyjnych opiera się na maksymalnym obniżaniu ciężaru kompozytu oraz dążeniu do poprawy parametrów wytrzymałościowych i mechanicznych. Determinowane są one przez czynniki, których współzależność ma znaczący wpływ na właściwości i eksploatację materiału (Tabela 1.1.). Należą do nich:

- sztywność osnowy,
- wytrzymałość i sztywność wzmocnienia,
- adhezja pomiędzy osnową a wzmocnieniem [16].

Tabela 1.1. Kierunki kształtowania właściwości kompozytów [12]

Parametr	Pożądane tendencje kształtowania właściwości
Wytrzymałość	wysoka
Sztywność	wysoka
Temperatura pracy	wysoka
Gęstość	niska
Koszt	niski

Osnowa kompozytu przekładkowego pełni szereg funkcji, wśród których jest zapewnienie spójności materiału oraz odpowiada za kształt i przenoszenie obciążeń, którym kompozyt jest poddawany. Charakter osnowy i napełniaczy, ich kształt i udział, jakość połączenia oraz stosowany proces technologiczny są parametrami, które mogą oddziaływać na kształtowanie właściwości materiału kompozytowego. Osnowa ma ponadto za zadanie spełnienie wymagań warunkowanych przez wiele czynników eksploatacyjnych i technologicznych, do których należą m.in.:

- zapewnienie odporności na czynniki chemiczne i wysokie temperatury,
- stabilność elektryczna i mechaniczna,
- trwałość spojenia osnowy i wzmocnienia, nieulegająca degradacji w procesie utwardzania.

Ze względu na rodzaj osnowy podzielić je można na :

- kompozyty o osnowie metalowej – MMCs (ang. *Metal Matrix Composites*)
- kompozyty o osnowie ceramicznej – CMCs (ang. *Ceramic Matrix Composites*)
- kompozyty o osnowie polimerowej – PMCs (ang. *Polymer Matrix Composites*) [12, 16].

Osnowa polimerowa jest w ostatnich latach najczęstszym wyborem projektantów i inżynierów zajmujących się wytwarzaniem kompozytów i szacuje się, że rozwój właśnie tego typu kompozytów będzie postępował najszybciej. Właściwy dobór materiału na osnowę jest bardzo istotny na etapie projektu i planowania metod otrzymywania, a cenną cechą kompozytów z osnową polimerową jest możliwość uzyskania wymaganego kształtu wyrobu w stosunkowo prostych procesach. Właściwości polimerów decydują również o parametrach termicznych i chemicznych, a także ze względu na szczególną zdolność do relaksacji naprężeń niwelują zakłócenia stanu równowagi wywoływane czynnikami zewnętrznymi. Uzyskanie pożądaných właściwości wytrzymałościowych w dużej mierze zależy od zastosowanego wzmocnienia, jednak na takie właściwości jak odporność cieplna, wytrzymałość na ściskanie i ścinanie ma ogromny wpływ właśnie osnowa [14].

Stosowane na osnowę polimerową materiały to tworzywa termoplastyczne i duroplasty. Materiały termoplastyczne, wśród których najbardziej powszechnymi są polipropylen (PP) i polietylen (PE), odznaczają się niskimi kosztami produkcji, a zastosowanie odpowiedniego wzmocnienia pozwala nadać kompozytom oczekiwane właściwości. Polimery termoplastyczne cechuje liniowa lub rozgałęziona struktura makrocząsteczek, stąd w podwyższonej temperaturze zmieniają się w lepłą ciecz, a po ochłodzeniu wracają do stanu stałego. Taki proces można powtarzać wielokrotnie, co jest dużą korzyścią ze względu na recykling materiałowy. Temperatura zeszklenia (T_g) może sięgać $260\text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura topnienia fazy krystalicznej sięga $360\text{ }^\circ\text{C}$ [1,14].

Większość duroplastów ma stabilniejszą w porównaniu do termoplastów strukturę molekularną i pozwala to na większy zakres temperaturowy i obciążeniowy ich pracy. Duroplasty to materiały w stanie ciekłym lub stałym (proszek/kryształy), których proces utwardzania dokonuje się w podwyższonej temperaturze lub na skutek reakcji chemicznych z innymi reaktywnymi związkami (utwardzacze, inne polimery, inicjatory), dzięki którym proces sieciowania może zachodzić w temperaturze pokojowej. Proces jest nieodwracalny, a materiały charakteryzują się gęstym sieciowaniem i amorficznością, wysoką temperaturą zeszklenia (T_g) oraz dużą wytrzymałością. Utwardzone materiały są również bardziej odporne na działanie związków chemicznych i mniej podatne na uszkodzenia podczas długotrwałej eksploatacji.

Najpowszechniej stosowanymi duroplastami są żywice poliestrowe i żywice epoksydowe, które są przedstawicielami tworzyw chemoutwardzalnych, natomiast wśród tworzyw termoutwardzalnych dominują żywice fenolowe, fenolowo-formaldehydowe, aminowe

i silikonowe [9, 16]. Tabela 1.2. przedstawia charakterystykę właściwości najczęściej stosowanych materiałów na osnowę polimerową.

Tabela 1.2. Zestawienie właściwości materiałów stosowanych na osnowę polimerową [16]

OSNOWA POLIMEROWA	Gęstość g/cm³	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [GPa]	Względne wydłużenie niszczące [%]	Zakres trwałości temperatur [°C]	Kierunki zastosowań
Epoksydowa	1,16	25-91	2,4-5,0	1-6	125-190	Lotnictwo, motoryzacja, aeronautyka przemysł morski, sport, elektrotechnika
Poliestrowa	1,1-1,29	40-60	2,8-3,5	1,2-4,5	100-140	
Fenolowa	1,1-1,2	70	3,0	1-3	180	Motoryzacja, aeronautyka, elektrotechnika
Nylon 6,6	1,14	-	2,7-3,3	10-40	120	Tworzywa sztuczne otrzymywane w wyniku formowania wtryskowego, materiały kompozytowe z włóknami krótkimi
PET	1,3-1,32	> 55	2,5-2,8	20-50	280	
Poliwęglan	1,2	57-70	2,4-2,8	50-100	-	
Polipropylen	0,9-0,92	25-40	1,3-1,8	200-800	100	
PEEK	1,3	> 45	4,0	30-35	250	Materiały kompozytowe z włóknami krótkimi lub ciągłymi w podwyższonej temperaturze
PPS	1,36-1,37	-	2,6-2,8	20-50	240	
Poliamidoimid	1,38-1,4	150-160	3,2-3,8	9-30	230	

Łatwość wytwarzania i niskie koszty pozwalają na wykorzystanie żywic poliestrowych w wielu aplikacjach. Do ich dużych zalet należą wysokie wskaźniki wytrzymałościowe (w tym udarność), właściwości izolacyjne i odporność na działanie wielu substancji chemicznych oraz cenna w wielu zastosowaniach przezroczystość z możliwością stosowania barwników. Dyskwalifikująca jest jednak słaba odporność na wrzącą wodę oraz wodnych roztworów zasadowych i rozpuszczalników (wyjątek stanowią alkohole i benzyna).

Żywice epoksydowe, przez wzgląd na bardzo dobre właściwości mechaniczne (Tabela 1.3.), są coraz częściej stosowane jako osnowa polimerowa kompozytów. Są to

najczęściej lepkie ciecze, jednak zdarza się, że występują w postaci ciał stałych. Powstają w reakcji poliaddycji epichlorohydryny lub związków zawierających grupy epoksydowe z fenolami wielowodorotlenowymi. W zależności od warunków przygotowania i jakości składników najbardziej optymalne właściwości osiągają w temperaturze 120 - 180°C. Jest to cenna cecha z uwagi na przetwórstwo, bowiem wraz ze wzrostem temperatury lepkość żywic epoksydowych spada. Ponadto, żywice wykazują wiele właściwości, które czynią je najlepszym wyborem wśród materiałów termoutwardzalnych dla większości zastosowań konstrukcyjnych:

- podczas procesu sieciowania nie obserwuje się emisji produktów lotnych i niebezpiecznych;
- żywica epoksydowa wykazuje bardzo niski skurcz podczas sieciowania, a w przypadku niektórych kompozycji skurcz nie jest obserwowany;
- mają wysoką przyczepność do bardzo dużej grupy materiałów dzięki obecności grup polarnych w swojej strukturze cząsteczkowej;
- kompozyty na bazie żywicy epoksydowej charakteryzują się łatwością kształtowania i lekkością, wykazują bardzo wysokie parametry wytrzymałościowe i eksploatacyjne – wysoka udarność, bardzo dobre właściwości dielektryczne, termoizolacyjne oraz tłumienie drgań, wysoka odporność na czynniki chemiczne, wodę i wilgoć oraz korozję [11, 16].

Tabela 1.3. Właściwości mechaniczne żywic epoksydowych [26]

Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	25–91
Moduł Younga (GPa)	2.4–5,0
Wydłużenie przy zerwaniu (%)	1–6
Współczynnik Poissona	0.29–0.34
Udarność (J/m²)	10–50
Twardość Rockwell M	100–112

Przyjmując jako kryterium kształt i wymiary wzmocnienia otrzymujemy podział na:

- wzmocnienie cząstkami (duże cząstki/dispersja);
- wzmocnienie włókniste (włókna ciągłe/nieciągłe);
- wzmocnienie strukturalne (laminaty/kompozyty przekładkowe).

Między fazami kompozytu (fazą ciągłą – osnowa i fazą rozproszoną – wzmocnienie) istnieje ścisłe połączenie, które jest decydujące na etapie doboru komponentów. Konstrukcje kompozytowe z włóknami lub cząstkami poprawiają właściwości wytrzymałościowe osnowy, niejednokrotnie zwiększając sztywność kompozytu i polepszając jego potencjał w zakresie redukcji hałasu i kontroli drgań. Oprócz dużej stabilności mechanicznej, osnowa ze wzmocnieniem włóknistym musi zapewniać równomierne rozmieszczenie tychże włókien, umożliwiając przygotowanie prepregów do procesu produkcji elementów konstrukcyjnych, których wytwarzanie zachodzi w stosunkowo niskiej temperaturze i niskim ciśnieniu.

W projektowaniu kompozytów konstrukcyjnych ważną rolę odgrywa znajomość mechanizmów wzmocnienia w osnowie, które zestawiono w Tabeli 1.4. Na ich podstawie możemy wstępnie kształtować i modyfikować funkcję osnowy w całej konstrukcji materiału [1, 4, 6, 8, 11, 12, 16].

Tabela 1.4. Mechanizmy działania układu wzmacniającego w osnowie [12]

Rodzaj wzmocnienia	Średnica wzmocnienia	Mechanizm
Dyspersja (udział objętościowy 1-15%)	0,01 – 1,0 μm	Hamowanie ruchu dyslokacji
Cząstki (udział objętościowy > 25%)	powyżej 1 μm	Ograniczenie odkształcania się osnowy
Włókna (udział objętościowy ~ 70%)	poniżej 1 μm do kilkuset μm	Przeniesienie obciążenia na wysoko wytrzymałe włókno

Wprowadzenie dyspersji nadaje osnowie niemal samodzielną funkcję przenoszenia obciążeń, a ta może mieć wpływ na właściwości wytrzymałościowe kompozytu, szczególnie gdy zachodzi między fazami do powstania wzajemnie przenikających się sieci polimerowych (układy IPN). W przypadku wzmocnienia cząstkami, jak to ma miejsce w przypadku betonu, obserwuje się, że w podobnym stopniu za przenoszenie obciążeń odpowiada zarówno osnowa (cement), jak i wzmocnienie (kruszywo). Sztywne i twarde cząstki przyczyniają się do minimalizacji odkształceń. Tabela 1.5. przedstawia wybrane rodzaje materiałów wzmacniających.

Wzmocnienie w postaci proszku lub włókien oddziałuje fizycznie na osnowę, powodując poprawę wytrzymałości, sztywności i twardości kompozytów, a często zmniejsza znacznie koszt surowcowy (dotyczy to zwłaszcza napełniaczy proszkowych). W zależności od budowy kompozytu można również polepszyć inne właściwości, np. przewodność cieplną i elektryczną, odporność na wysokie i niskie temperatury czy odporność na ścieranie. Wzmacniające

działanie włókien oraz właściwości mechaniczne kompozytu są określone przez długość, średnicę i budowę chemiczną włókien oraz ich ilość i położenie [11].

W ostatnich latach gwałtownie wzrosło zainteresowanie włóknami. Kompozyty wzmocniane włóknami (ang. *Fiber-Reinforced Polymers*, FRP) spełniają wymagania dużej wytrzymałości materiałów przy niewielkim ciężarze właściwym kompozytu. Włókna biorą największy udział w przenoszeniu obciążeń, osnowa natomiast łączy je i chroni przed czynnikami zewnętrznymi [7]. Eksploatacyjne wymagania stawiane włóknom zawierają się w bardzo podobnych cechach, które stawiane są samym osnowom, tj. wysokie parametry wytrzymałościowe oraz zachowanie stosunkowo stabilnych właściwości podczas eksploatacji w różnych temperaturach i pod wpływem różnych czynników zewnętrznych (atmosferycznych, chemicznych).

Wybór wzmocnienia uzależniony jest od zastosowania kompozytu i na etapie projektowania należy wziąć pod uwagę charakterystyczne dla włókien właściwości:

- gęstość,
- szczególne właściwości (akustyczne, termiczne, elektryczne),
- moduł sprężystości i wytrzymałość na rozciąganie/ściskanie/ścinięcie,
- zdolność do pochłaniania energii uderzenia,
- odporność na pękanie i deformację materiału,
- cena [16].

Ważnym czynnikiem z uwagi na wytwarzanie i eksploatację kompozytu jest adhezja między wzmocnieniem a osnową, od której w dużym stopniu zależy jego wytrzymałość. Słaba adhezja powoduje wzrost naprężeń na granicy osnowy i włókna, co często inicjuje uszkodzenie i dalszą degradację materiału. Poprzez zastosowanie Apretur (związków chemicznych nanoszonych na powierzchnię włókna w procesie produkcyjnym) można uzyskać poprawę adhezji włókien do osnowy. Zachodzące wówczas reakcje chemiczne „wiążą” włókno z osnową, a dodatkowo przyczyniają się do zwiększenia zwilżalności między nimi. Przy maksymalnym udziale objętościowym włókien (przekraczającym 80%) osnowa nie może wypełnić wszystkich przestrzeni pomiędzy włóknami, dlatego tak istotnym jest, aby unikać nadmiernej ilości wzmocnienia, która w efekcie odpowiada za pogorszenie właściwości wytrzymałościowych materiału kompozytowego. Ponadto, adhezja między fazami kompozytu nie powinna pogarszać się w wyniku zmian temperatur. Odporność kompozytów w dodatnim i ujemnym zakresie temperatur jest bardzo różnorodna. Temperatura zeszklenia waha się dla termoplastów od 80 - 300 °C, a dla typowych duroplastów od 60 - 160 °C [11, 16].

Tabela 1.5. Porównanie właściwości wybranych rodzajów materiałów wzmacniających [16]

Rodzaj	Nazwa/marka	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	Wytrzymałość na ściskanie [GPa]	Moduł Younga [GPa]	Zakres trwałości do temp. [°C]
Nieorganiczne	E - szkło	2,58	3,5	0,8	75	350 pełzanie
	S - szkło	2,46	4,5	1,1	-	
	Bor	2,5-2,6	3,5	5,9	415	350 oksydacja w powietrzu
	Nicalan	2,8	2,8	3,1	200	-
Polimerowe	Kevlar 29	1,44	2,8	0,4	65	40
	Kevlar 49	1,44	3,5	0,4	125	
	Kevlar 149	1,47	3,4	0,4	185	
	Spectra 1000	0,97	3,0	0,17	170	-
Metalowe i ceramiczne	Stal 18-8	8,0	1,0-1,4	-	198	-
	Wolfram	19,3	5,5	-	360	-
	Beryl	1,85	1,8	-	300	-
	Korundowe krystaliczne	3,7	1,7	6,9	350-380	1900
	SiC	2,8-3,1	3,0	-	250	500
Węglowe	T-300	1,76	3,2	2,88	235	400 oksydacja w powietrzu
	T-1000	1,82	7,1	2,76	295	
	Amoco P-25	1,9	1,4	1,15	160	2000 oksydacja w atmosferze obojętniej
	Carbolon-L	1,95	2,42	-	380	
	Madmor-1	2,0	1,7-2,5	-	400-500	

MODYFIKACJA CHEMICZNA

Stosując jako osnowę żywicę epoksydową uzyskuje się korzystny stosunek ceny do jakości, jednak ich słabą stroną jest kruchość i mała odporność na pękanie [26]. W celu wyeliminowania wad osnowy epoksydowej oraz poprawy właściwości mechanicznych i przetwórczych otrzymanych stosowane są różnego rodzaju modyfikacje [27 - 32], wśród których szczególną uwagę Autora objęte zostało wykorzystanie elastomerów. Wiele związków wielkocząsteczkowych pełniąc funkcję modyfikatora żywicy epoksydowej mogą tworzyć z nią układ wzajemnie przenikających się sieci polimerowych (IPN) [33 - 40] Literatura dostarcza wielu przykładów tworzenia układów IPN, będących znakomitą alternatywą dla tradycyjnych i jednorodnych tworzyw sztucznych.

Żywicę epoksydową modyfikowano między innymi kopolimerem karboksylowanego butadienu z akrylonitrylem (CTBN) i polibutadienem zakończonym grupą hydroksylową (HTPB) [41]. Modyfikację żywicy poprzedzono reakcją HTPB z TDI, w wyniku której powstają wiązania uretanowe z wolnymi grupami izocyjanianowymi reagującymi z grupami epoksydowymi żywicy. Udział CTBN wynosił 5, 10, 15, 20 % mas., natomiast udział HTPB wynosił 3, 5, 6, 8 i 10 % mas. Próbkę odniesienia stanowiła kompozycja czystej żywicy epoksydowej. Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze wzrostem zawartości CTBN w żywicy udarność kompozytów znacząco wzrasta, przy czym z każdą zawartością modyfikatora udarność jest większa niż w przypadku czystej żywicy. Badania mikrostruktury SEM wyraźnie wskazują również na dwufazowy charakter kompozytu oraz na doskonałą dyspersję elastomerów w żywicy, co stwarza możliwość zastosowania ich jako środków wzmacniających żywicę.

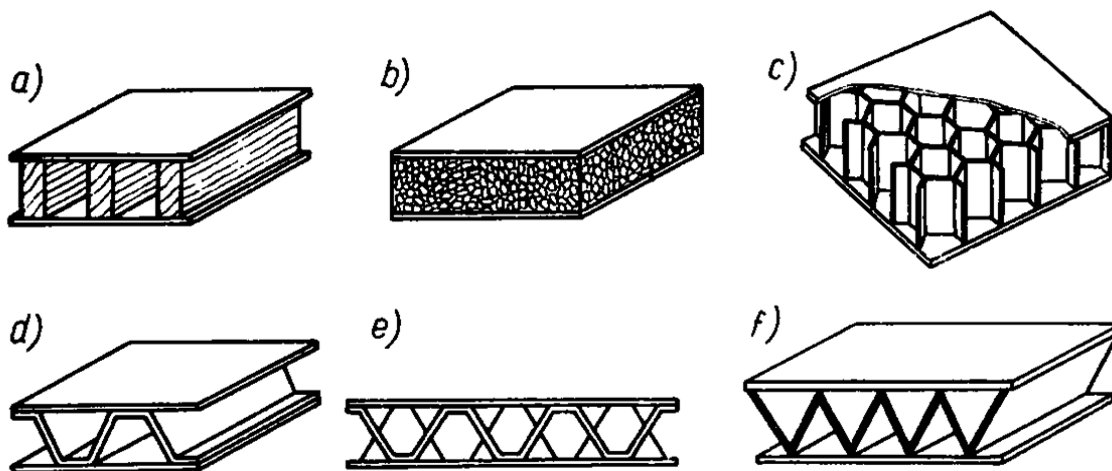
Analizie poddawano jest także wpływ dodatku poliuretanu na właściwości mechaniczne kompozytów na bazie żywicy epoksydowej [42]. Modyfikator dodawano w ilości 5, 10, 15 i 20% masowych. Otrzymane kompozyty badano pod kątem udarności, współczynnika intensywności naprężeń krytycznych (K_C) oraz wytrzymałości na zginanie trójpunktowe. Najlepsze właściwości wytrzymałościowe wykazały kompozyty z udziałem do 10 % mas. poliuretanu otrzymane w wyniku połączenia MDI lub PMDI z poliolem Rokopol 1003. Obecność poliuretanowych segmentów elastycznych odpowiada za wzrost sprężystości kompozytu.

Inne badania [43 - 45] podejmują także temat wpływu dodatkowych napelniaczy proszkowych, temperatury i czasu utwardzania na właściwości otrzymanych kompozytów. Na podstawie uzyskanych wyników wskazano, że najlepsze właściwości wytrzymałościowe osiąga materiał poddany utwardzaniu przez 5 godzin w temperaturze 60°C. Analiza uzyskanych

wyników potwierdza również wyniki badań *Jia i in.*, że dodatek niewielkiej ilości PUR (do 10% mas.) i 1% montmorylonitu w żywicy epoksydowej znacząco poprawia właściwości mechaniczne kompozytów.

RDZEŃ - PIANKI

Literatura dostarcza wielu informacji dotyczących modyfikacji znanych rozwiązań konstrukcyjnych, w których stosuje się elementy absorbujące energię uderzenia, znacznie polepszające efektywność absorpcji energii uderzenia i gwałtownych uszkodzeń całej struktury kompozytu. Oprócz wzmocnienia kompozytu w postaci włókien, na wzrost absorpcji energii uderzenia i odporności na działanie obciążeń zginających, z uwagi na wysoki stosunek sztywności zginania do masy, do konstrukcji warstwowej wprowadza się lekką warstwę rdzenia w postaci pianki, plastra miodu, struktur ażurowych czy różnego rodzaju płyt profilowanych pomiędzy okładziny kompozytowe. Tego rodzaju rdzenie z powodzeniem stosowane jest w motoryzacji w celu ochrony pasażerów i pojazdów, do produkcji opakowań transportowych substancji radioaktywnych, w lotnictwie czy przemyśle morskim [46]. Rysunek 1.14 przedstawia powszechnie wykorzystywane rodzaje rdzenia w konstrukcjach przekładkowych.



Rysunek 1.14. Rdzenie konstrukcji przekładkowych

a) rdzeń ażurowy drewniany, b) rdzeń z tworzywa sztucznego (pianka), c) „plaster miodu”, d) płyta profilowana, e) płyta piramidalna, f) laminat wykonany z tkaniny trójwymiarowej [11]

Koncepcja struktur warstwowych jest w dużej mierze inspirowana naturą, na przykład czaszka składa się z dwóch warstw gęstej kości korowej oddzielonych od siebie kością gąbczastą, co chroni mózg przed uderzeniami [47].

Do najważniejszych zalet zastosowania materiałów porowatych rdzeni należą:

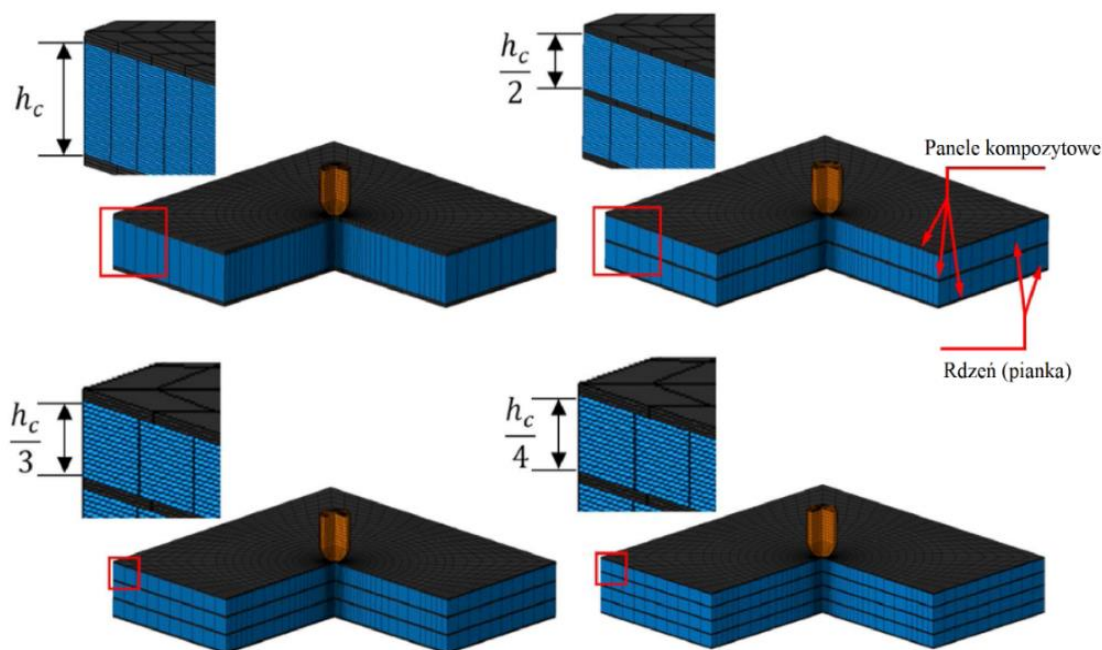
- niska gęstość i wysoka sztywność,
- właściwości tłumienia energii mechanicznej,
- wytrzymałość zmęczeniowa i wibracyjna,
- niska przewodność cieplna, elektryczna i akustyczna,
- łatwość obróbki mechanicznej i w wielu przypadkach możliwość recyklingu.

Właściwości te pozwalają na stosowanie rdzeni piankowych w konstrukcjach wykładzin tłumiących, elementach nadwozia samochodów, samolotów, statków, a w połączeniu z bardziej zaawansowanymi materiałami są wykorzystywane także w przemyśle kosmicznym w budowie elementów rakiet. Łatwa dostępność i bardzo dobre właściwości sprawiają, że komponenty porowate połączone z innymi materiałami pozwalają na osiągnięcie parametrów wytrzymałościowych nieosiągalnych w ramach pojedynczego komponentu. Tendencja obniżania masy konstrukcji pozwoliła na zakwalifikowanie materiałów porowatych jako tworzywa nowej generacji. W konstrukcjach stojących masa jest drugorzędnym wymogiem, natomiast w pojazdach, urządzeniach, maszynach, konstrukcjach latających, przenośnych i ochronnych ma ona ogromne znaczenie [48]. Strażacy, narażeni na ekspozycję działania fal uderzeniowych, ognia, elementów powstałych w wyniku wybuchu, zabezpieczeni byli dotychczas wyłącznie tkaninami o zwiększonej odporności na działanie ognia, a tarcze ochronne będące na wyposażeniu policji były wykonane z poliwęglanu. Zaproponowano wykorzystanie materiałów absorbujących energię jako wzmocnienie tarcz i zwiększające bezpieczeństwo strażaków biorących udział w akcjach ratunkowych. Istotnym elementem takiego rozwiązania jest także cena, która pozwala na upowszechnienie wykorzystania tarcz z rdzeniem absorbującym energię uderzenia.

Zdolność do pochłaniania energii uderzenia przez zastosowanie materiałów piankowych w dużej mierze zależy od zastosowanej metody badawczej. Z powodu niemiernodajnych wyników podczas prób rozciągania, służących określeniu zdolności pianek do pochłaniania energii dowiedziono, że bardziej rzeczywiste wyniki można uzyskać wykonując testy ściskania [47, 49].

W kompozycie typu sandwich rdzeń odpowiada za przeciwdziałanie odkształceniom spowodowanym naprężeniami prostopadłymi do powierzchni warstw okładzinowych. Aby zwiększyć efektywność tego oddziaływania stosuje się struktury z funkcjonalnie stopniowanym

rdzeniem (ang. *Functionally Graded Core*, FGC), które należą do grupy funkcjonalnie stopniowanych materiałów (ang. *Functionally Graded Materials*, FGM). Ich właściwości zmieniają się w zależności od ułożenia w taki sposób, aby jak najbardziej zoptymalizować wybrane właściwości całego kompozytu. Funkcjonalnie stopniowane materiały są porównywalne do laminatów, jednak FGM posiadają wyraźną granicę połączenia warstw, stąd zmiana właściwości na każdym poziomie jest gwałtowna. Projektowanie struktur warstwowych z FGM dostosowuje się do konkretnych zastosowań lub funkcji [50, 51]. Stopniowanie może odbywać się na zasadzie podziału jednej grubej warstwy rdzenia na cieńsze (Rysunek 1.15.) lub zastosowania kilku cienkich warstw wyprodukowanych komercyjnie.



Rysunek 1.15. Struktury warstwowe ze stopniowanym rdzeniem [78]

Stopniowanie rdzenia zmniejsza znacznie naprężenia normalne i ścinające, a także redukuje wartość ugięcia i wielkość odkształceń [50, 52]. Badania wytrzymałości na zginanie i sztywności kompozytów warstwowych [53] udowadniają, że zastosowanie wielordzeniowej konstrukcji wykazuje znacznie lepsze parametry wytrzymałościowe w porównaniu z kompozytami zawierającymi jedną warstwę rdzenia.

Funkcjonalnie stopniowane kompozyty warstwowe są stosunkowo nowym rozwiązaniem, będącym odpowiedzią na problemy kompozytów składających się z dwóch warstw okładziny i jednej warstwy rdzenia, związane z pękaniem na granicy okładzina-rdzeń z powodu naprężeń ścinających. Niejednorodny rozkład właściwości w kompozycie powoduje, że zniszczenie

stopniowanego materiału wielowarstwowego wymaga użycia większej energii uderzenia ze względu na wiele mechanizmów uszkodzeń. Wykazano że funkcjonalnie stopniowany rdzeń znacznie zmniejsza ugięcie oraz odkształcenia normalne i ścinające, jednak trudno jest przewidzieć ich zachowanie, ze względu na złożone mechanizmy zniszczeń i nieprzewidywalne ścieżki pęknięć na poziomie strukturalnym [50, 54].

1.3. Techniki produkcji kompozytów warstwowych

Istotny wpływ na możliwość wykorzystania kompozytu w zastosowaniach konstrukcyjnych ma proces wytwarzania. Należy uwzględnić korelację aspektów ekonomicznych i dynamicznie rozwijającego się rynku materiałów kompozytowych wraz z ich specyficznymi właściwościami. Kryterium wyboru odpowiedniej techniki produkcyjnej EACS wiąże się z takimi czynnikami jak:

- koszty wytwarzania,
- właściwości wytrzymałościowe kompozytu,
- wydajność produkcji,
- kształt i wymiary wytwarzanego elementu.

Najpopularniejsze techniki wytwarzania wykazują pewne różnice, przez które nie mogą być stosowane do każdego rodzaju wytwarzanych materiałów. Należy wobec tego dokonywać prawidłowego projektu i przewidywania możliwych niepożądanych czynników podczas produkcji. W Tabeli 1.6. zestawiono zalety i wady najczęściej stosowanych metod wytwarzania energochłonnych kompozytów konstrukcyjnych [2].

Prostota i niskie koszty produkcji sprawiają, że technika układania (laminowania) ręcznego (ang. *Hand Lay-up*, HLU) [19] jest najpowszechniej wykorzystywaną metodą wytwarzania kompozytów konstrukcyjnych oraz konstrukcji przekładkowych z zastosowaniem pianek jako rdzeni kompozytu. Proces polega na ręcznym przesączaniu włókien warstwą ciekłej osnowy i układaniu tak powstałych prepregów w odpowiedni kształt i określoną grubość w zależności od zastosowania lub zapotrzebowania do dalszej procedury badawczej (Rysunek 1.16.). Zastosowanie narzędzi dociskających służy eliminowaniu pęcherzy powietrza, będących główną przyczyną wad kompozytu i pogorszenia jego właściwości.

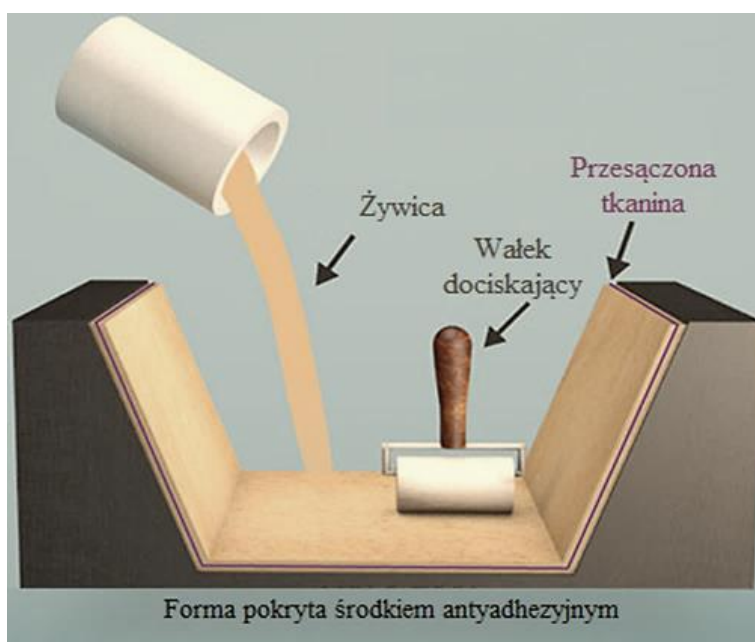
Tabela 1.6. Zalety i wady metod wytwarzania EACS [2]

Metoda wytwarzania	Zalety	Wady/wyzwania
Układanie ręczne (HLU)	<ul style="list-style-type: none"> - wytwarzanie kompozytów na bazie różnego rodzaju włókien - tani i nieskomplikowany proces wytwarzania (brak konieczności posługiwania się specjalistycznymi maszynami) - możliwość osiągnięcia 60% FVF (frakcja objętościowa włókien, ang. Fiber Volume Fraction) - możliwe wytwarzanie bardzo mocnych i sztywnych części kompozytowych 	<ul style="list-style-type: none"> - technika nie sprzyja produkcji wielkoseryjnej - czas produkcji zależy od czasu utwardzania kompozytu - duże ryzyko powstawania „pustek” - dodatkowe niebezpieczeństwo bezpośredniego kontaktu z komponentami
Formowanie transferowe żywic wspomagane próżniowo (VARTM)	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość osiągnięcia nawet 70% FVF - niewielkie straty materiałowe - produkcja części o specyficznych wymiarach i kształtach - metoda sprzyja powstawaniu jeszcze lżejszych kompozytów energochłonnych - możliwość produkcji części o dużych rozmiarach - możliwość wykorzystania różnego rodzaju włókien 	<ul style="list-style-type: none"> - wysokie koszty zakupu maszyn produkcyjnych.

<p>Nawijanie filamentu</p>	<ul style="list-style-type: none"> - elastyczność i równomierność rozkładu komponentów (włókien i żywicy) - możliwość produkcji wielkoseryjnej 	<ul style="list-style-type: none"> - metoda pozwala na wytwarzanie wyłącznie zaokrąglonych lub cylindrycznych kształtów - wysokie koszty oprzyrządowania - możliwość zastosowania do 60%
<p>Pultruzja (metoda przeciągania włókna)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - niskie koszty produkcji - możliwość produkcji dużych form kompozytów 	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość wytwarzania części o regularnym, nieskomplikowanym przekroju - bardzo duże trudności w produkcji elementów cienkościennych
<p>Autoklaw i worek próżniowy</p>	<ul style="list-style-type: none"> - możliwość usuwania „pustek”, dzięki czemu można zastosować większą zawartość FVF 	<ul style="list-style-type: none"> - potrzeba obsługi specjalistycznych maszyn - oprzyrządowanie generuje dodatkowe koszty

Technika układania ręcznego umożliwia wytwarzanie kompozytów na bazie wielu rodzajów włókien (również naturalnych). Literatura przedmiotu często ukazuje przykłady kompozytów pochłaniających energię wytwarzanych techniką HLU na bazie żywicy epoksydowej lub poliestrowej z włóknem szklanym, węglowym lub kevlarowym. Wymagane są jedynie umiejętności manualne, bez konieczności specjalnych kwalifikacji do obsługi maszyn.

Zastosowanie techniki układania ręcznego pozwala na uzyskanie ponad 60% frakcji objętościowej włókien (FVF ang. *Fiber Volume Fraction*), a przy zachowaniu ostrożności możliwe jest wytwarzanie bardzo mocnych i sztywnych części kompozytowych. Nie jest to jednak wydajna technika w produkcji wielkoseryjnej. Czas produkcji uzależniony jest od czasu utwardzania osnowy, od grubości zastosowanych warstw, zastosowanych modyfikatorów lub napełniacz, a ponadto istnieje wysokie ryzyko występowania tzw. „pustek”. Wymagana jest także konieczność stosowania się do zasad BHP ze względu na zdrowie i bezpieczeństwo pracowników w bezpośrednim kontakcie z komponentami [2].



Rysunek 1.16. Proces produkcji kompozytów metodą układania ręcznego [19]

Technika ręcznego laminowania, choć jest najprostsza, wciąż pozostaje doceniana przez inżynierów. Kanadyjscy studenci inżynierii mechanicznej tworząc pojazd terenowy Baja SAE (Rysunek 1.17.) wykorzystali technikę HLU do wytworzenia elementów nadwozia na bazie żywicy epoksydowej z wykorzystaniem włókna szklanego i węglowego.



Rysunek 1.17. Prototyp Baja SAE z Université Laval wykonany techniką HLU [18]

Odpowiedni wybór metody produkcji kompozytów ma wpływ na efektywność pochłaniania energii przez kompozyt. *Esnaola* i *Tena* [2, 20] porównali wartości względnej absorpcji energii kompozytów wzmacnianych włóknem szklanym w zależności od techniki wytwarzania (Tabela 1.7.). Wyniki tej analizy wykazały, że metoda układania ręcznego

generuje wartości WEA kompozytów GFPR o 6 - 12% wyższe w porównaniu z techniką pultruzji i około 40-46% wyższe w porównaniu z metodą infuzji.

Tabela 1.7. Wartości względnej absorpcji energii w zależności od zastosowanej metody wytwarzania kompozytów GFPR [20]

Metoda wytwarzania	WEA (kJ/kg)
Infuzja termiczna	31,09 ± 1,70
Infuzja UV	31,41 ± 0,94
Układanie ręczne	51,98 ± 1,79
Pultruzja UV	48,65 ± 1,32

Szklano – poliestrowe kompozyty zbadano także pod kątem wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe – kompozyty wykonane metodą układania ręcznego oraz pultruzji wykazywały wartości ILSS (ang. *Interlaminar Shear Strength*) na poziomie 43 MPa, podczas gdy kompozyt wykonany metodą infuzji termicznej wykazywał wartość ścinania międzywarstwowego na poziomie 33 MPa, co przypisuje się także nierównomiernemu rozkładowi włókien podczas produkcji tą metodą [2, 20].

Inną popularną techniką wytwarzania kompozytów energochłonnych jest formowanie próżniowe z transferem żywicy (ang. *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*, VARTM). Kompozyt formowany jest podobnie jak w metodzie HLU – z wykorzystaniem odpowiedniej formy, aby zapewnić mu odpowiednią geometrię, a dodatkowo użyta jest cienka membrana, która po zastosowaniu ciśnienia ścisła szczelnie formę i zawarty w niej kompozyt [21]. Ogromną zaletą procesu jest możliwość osiągnięcia nawet 70% frakcji objętościowej włókien. Pozwala to na dużą swobodę w testowaniu i poszukiwaniu odpowiedniej zawartości FVF w konkretnym zastosowaniu. McGegor i Vaziri poddali testom dynamicznym i quasi-statycznym rury kompozytowe o różnych kształtach, wzmocnionych włóknem węglowym (39% i 41% FVF). Niezależnie od geometrii kompozytów, większy wpływ na względną absorpcję energii uderzenia ma właśnie zawartość procentowa włókien. Niemniej jednak, zastosowanie metody VARTM do wytwarzania kompozytów wzmacnianych włóknem pozwala na regulację zawartości włókien i otrzymanie kompozytu znacznie bardziej skomplikowanych struktur kompozytowych.

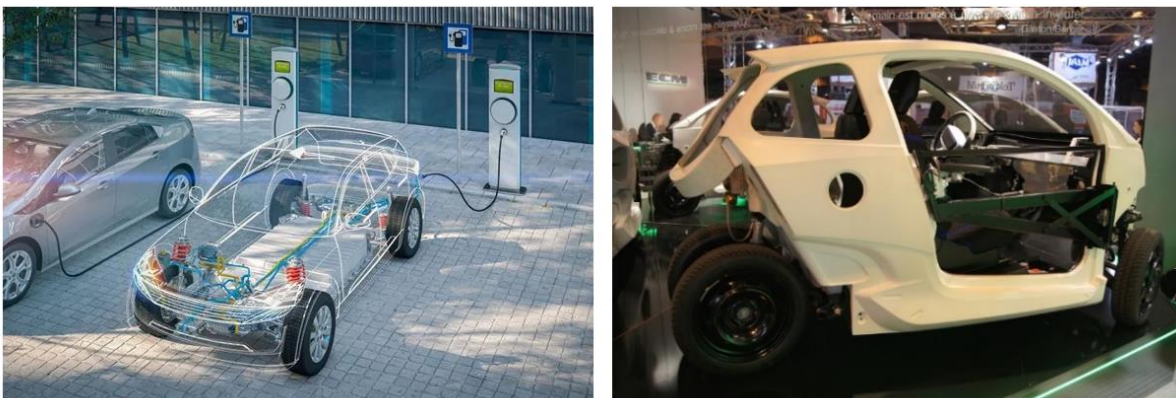
1.4. Kierunki zastosowań energochłonnych kompozytów strukturalnych

Energochłonne kompozyty strukturalne dzięki swoim właściwościom wytrzymałościowym, niskiej wadze i zdolności do efektywnego rozpraszania skutków uderzeń zyskują ogromną przewagę nad materiałami metalowymi i z powodzeniem zastępują je w różnych nieoczywistych i innowacyjnych zastosowaniach. Właściwie dobrane komponenty mogą dodatkowo wpływać na uzyskanie przez kompozyt innych cennych właściwości, takich jak izolacja termiczna, elektryczna, właściwości antykorozyjne, które w konkretnych aplikacjach tym bardziej wpływają na korzyść zastosowania konstrukcji kompozytowej.

Kryterium zastosowania kompozytów konstrukcyjnych można podzielić je na:

- *commercial composite material* – powszechnego użytku, mające zastąpić tradycyjne dotąd materiały stosowane do wytworzenia konstrukcji przemysłowych lub elementów maszyn, w których znaczącą rolę odgrywa także cena surowców i koszty związane z procesem produkcyjnym;
- *high technology* – materiały technologicznie zaawansowane, spełniające szczegółowe wymagania dla uzyskania najlepszych parametrów kompozytów, w których koszty produkcji mają drugorzędne znaczenie [150].

Pojazdy elektryczne (ang. *Electric Vehicle*, skrót EV) to niekwestionowana przyszłość transportu, której poświęca się coraz więcej uwagi. Stany Zjednoczone czy Wielka Brytania wydają decyzje ograniczające korzystanie z pojazdów benzynowych czy wysokoprężnych, a kraje azjatyckie koncentrują swoje cele sprzedażowe na pojazdy elektryczne i hybrydowe [111]. Wydaje się naturalne, że EV bazować będą na lekkich kompozytach konstrukcyjnych (Rysunek 1.18), które także przechodzą ogromny rozwój w zakresie możliwości ich wykorzystania, szczególnie pod względem zwiększenia wydajności pojazdu i maksymalnego zmniejszenia jego masy.



Rysunek 1.18. Panel kompozytowy samochodu elektrycznego [111, 112]

Zasięg EV poprzednich generacji wynosił od 400 - 640 km, gdzie problemem była waga baterii, generujących większy pobór energii. Aby zminimalizować ten problem zastosowano kompozyty przekładkowe jako tace na baterie samochodu elektrycznego, która zmniejsza wagę konstrukcji pojazdu, chroniąc samą baterię dzięki cechom takim jak energochłonność oraz ognioodporność czy izolacja termiczna i elektryczna [112].

Obudowa akumulatora jest jednym z najważniejszych elementów pojazdu elektrycznego. Ma za zadanie zabezpieczyć akumulator przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz wpływem czynników zewnętrznych. Obudowa musi spełniać wysokie wymagania pod względem wytrzymałości na uderzenia, stanowić ochronę przed czynnikami chemicznymi, termicznymi i mechanicznymi oraz zapewniać odpowiednią wentylację i dystrybucję ciepła. Często wykorzystywanymi materiałami do ich konstrukcji są stopy aluminium, zapewniające bezpieczeństwo baterii oraz sztywność strukturalną. Materiały kompozytowe mogą stanowić skuteczną alternatywę dla tego typu zastosowań. Ich zaletą jest znacznie niższa masa, dzięki której można oszczędzić ok. 40% masy całego pojazdu. Wytrzymałość materiałów kompozytowych może również znacznie przewyższać wytrzymałość aluminium lub stali, dzięki czemu można z nich projektować również część struktury nadwozia, aby chronić nie tylko akumulator, ale także pasażerów [144, 145].



Rysunek 1.19. Obudowa baterii z zastrzeżonymi materiałami CSP [113]

Kompozyt typu sandwich składający się z paneli okładzinowych na bazie żywicy poliuretanowej ze wzmocnieniem z włókna naturalnego, węglowego lub szklanego i rdzeniem o strukturze plastra miodu wykorzystano do konstrukcji obudowy baterii samochodowych (Rysunek 1.19.). Materiał pozwolił na formowanie skomplikowanych kształtów i ostrych

krawędzi, co umożliwiło produkcję paneli kompozytowych o bardzo wysokiej sztywności i bardzo niskiej wadze. Aby poprawić wydajność baterii samochodu elektrycznego stosuje się także pianki strukturalne do pochłaniania energii, dzięki czemu zwiększa się wydajność zderzeniowa konstrukcji [113].

Współczesnym rozwiązaniem w celu zmniejszenia masy pojazdu jest zastępowanie ciężkich materiałów konstrukcyjnych nadwozia i podwozia lżejszymi laminatami polimerowymi wzmocnionymi włóknami lub kompozytami warstwowymi. Badania wytrzymałościowe warstwowych kompozytów stosowanych do wytwarzania struktur ochronnych do baterii samochodów elektrycznych powinny koncentrować się w dużej mierze na badaniu:

- wytrzymałości i mechanizmów pochłaniania energii uderzenia,
- wytrzymałości na zginanie (moduł zginania i naprężenie przy zginaniu),
- właściwości termicznych materiału,
- resztkowej wytrzymałości po uderzeniu.

Właściwości mechaniczne kompozytów warstwowych i ich odporność na przebicie czy tolerancja na uszkodzenia udarowe nie są dobrze znane. Konieczne jest w tym przypadku zrozumienie, że praktyczne wdrożenie struktur ochronnych baterii w EV wiąże się z zapewnieniem przez kompozyt przede wszystkim wystarczającej tolerancji w przypadku kolizji, generującej uszkodzenia udarowe [144, 145, 147].



Rysunek 1.20. Lekki elektryczny pojazd w dystrybucji miejskiej [115]

LEFV (ang. *Light Electric Freight Vehicle*) oznacza lekki elektryczny pojazd w dystrybucji miejskiej (Rysunek 1.20.), a kompozyty warstwowe są wykorzystywane w konstrukcji ich karoserii. Struktury przekładkowe z rdzeniem XPS czy PET pozwalają na utrzymanie odpowiedniej temperatury wewnątrz, zmniejszenie całkowitej masy i zachowanie wysokich parametrów wytrzymałościowych, w tym odporności zderzeniowej [114].

Rozwój technologiczny komponentów samochodowych jest napędzany przez kilka czynników, w tym standaryzację, lekkość i czystość komponentów. „Lekkie rozwiązanie” polega na optymalizacji kompleksowych wrażeń z jazdy poprzez poprawę bezpieczeństwa, komfortu jazdy, odporności na zderzenia przy jednoczesnym zmniejszeniu masy.

Cennym rozwiązaniem z punktu widzenia transportu żywności, produktów farmaceutycznych czy roślin jest wykorzystanie kompozytowego panelu przekładkowego we wnętrzu samochodu ciężarowego z funkcją kontroli temperatury (Rysunek 1.21.). Zastosowanie pianki z ekstrudowanego polistyrenu i pianki poliuretanowej z okładzinami FPR zapewniają termoizolację nadwozia, przy zachowaniu lekkości pojazdu i wysokiej odporności na niekontrolowane skutki zderzeń [117].



Rysunek 1.21. Wnętrze pojazdu transportowego z funkcjami kontroli temperatury [117]

Zastosowanie materiałów kompozytowych w pojazdach nie ogranicza się wyłącznie do innowacyjnych konstrukcji. Nowe rozwiązania z wykorzystaniem kompozytów warstwowych pojawiają się także w „klasycznych” pojazdach. Materiały typu sandwich znajdują zastosowanie w dachach autobusów i pociągów (Rysunek 1.22.), w wyniku czego uzyskuje się redukcję masy o ok. 20% w porównaniu do konstrukcji metalowych lub aluminiowych. Oprócz

tego zapewniają izolację termiczną, która przy zmiennych warunkach pogodowych i temperaturowych podnosi komfort jazdy pasażerów.



Rysunek 1.22. Technologia sandwich dla autobusów i przyczep kempingowych [118, 119]

Nie bez znaczenia jest także fakt, że zastosowanie kompozytów przekładkowych zwiększa właściwości energochłonne pojazdu w aspekcie odporności na zderzenie oraz umożliwia szczególną ochronę podatnych na uszkodzenia elementów elektronicznych [118].

Materiały kompozytowe są również odpowiednie do budowy pojazdów zoptymalizowanych pod kątem obciążenia. Dostosowane do potrzeb pojazdów ratowniczych, pojazdów eventowych, kamperów i nadbudówek ciężarówek do zastosowań specjalnych jest największym atutem projektowania tych konstrukcji z wykorzystaniem kompozytów przekładkowych.



Rysunek 1.23. Wnętrze samochodu dostawczego z zastosowanymi kompozytami przekładkowymi firmy Design Composite GmbH [120]

Kompozyty przekładkowe są także szczególnie preferowane w samochodach dostawczych, paczkowych i ekspresowych, co jest zasługą wykorzystania trwałych komponentów o wysokiej

sztywności wykorzystujących rdzenie piankowe, polipropylenowe lub aluminiowe o strukturze plastra miodu oraz okładzin wzmocnionych włóknem szklanym (GRP) lub aluminium (Rysunek 1.23.). Zwiększa to odporność na uderzenia, efektywnie chroniąc przed zniszczeniem przewożony ładunek [120].

1.5. Inne aspekty zastosowania materiałów kompozytowych w wytwarzaniu konstrukcji energochłonnych

Commercial composite materials to kompozyty mające zastąpić tradycyjne materiały stosowane do wytworzenia konstrukcji przemysłowych lub elementów maszyn, w których znaczącą rolę, oprócz właściwości wytrzymałościowych, odgrywa także cena surowców i koszty związane z procesem produkcyjnym. Spośród szerokiej gamy materiałów dostępnych na rynkach światowych największy rozwój dostrzec można właśnie wśród materiałów kompozytowych. Mnogość zastosowań (Rysunek 1.24.) i wzrastające zużycie tych materiałów doprowadziło do opanowania przez kompozyty znacznej części rynku w zastosowaniach codziennego użytku i zaawansowanych konstrukcjach hi-tech [131, 132, 150].

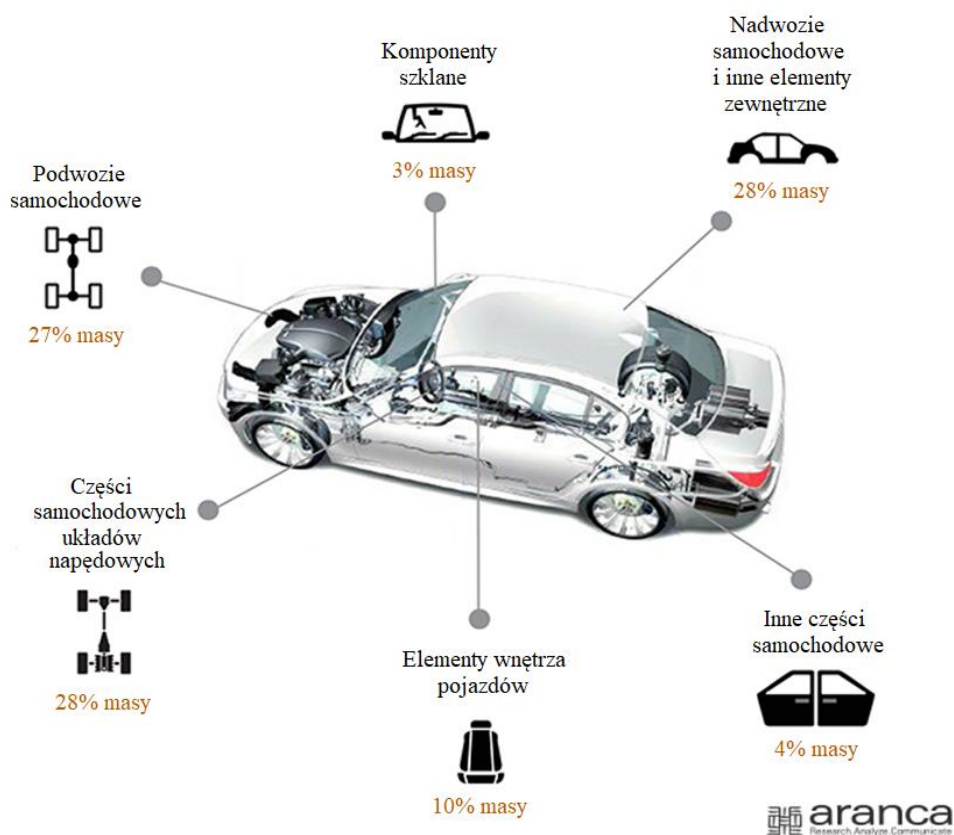


Rysunek 1.24. Główne obszary zastosowań kompozytów wg Raportu Composite Market – Global Trends and Forecast to 2021 [131]

Według danych Raportu najważniejszymi działaniami, jakie podejmują producenci kompozytów jest zmniejszenie wysokich dotąd kosztów wytwarzania i produkcji oraz ograniczenie stosowania ogromnych inwestycji w celu stworzenia tanich, skomercjalizowanych kompozytów. Z tego faktu wyłania się potrzeba udoskonalania istniejących technologii i zwiększenia mocy produkcyjnej, wykorzystując przy tym właściwości i dostępność włókien i innego rodzaju wzmocnień [133], aby podtrzymać pozycję

produkcyjno-eksploatacyjnej opłacalności. Umiejętne połączenie, począwszy od etapu projektowania, przez wybór komponentów, technologii wytwarzania po zarządzanie produktem sprawia, że materiały kompozytowe mogą zastępować dotychczas stosowane materiały metalowe, których produkcja wiąże się z dużymi kosztami, a wiele ich właściwości wciąż może przysparzać problemy eksploatacyjne. W ciągu ostatnich lat obserwuje się znaczny wzrost wykorzystania kompozytów w takich dziedzinach jak elektrotechnika, budownictwo, motoryzacja, sport, lotnictwo czy przedmiotach codziennego użytku.

Z analizy Raportu Globalnej produkcji samochodów wynika, że do w 2025 r. produkcja samochodów wyniesie ponad 110 mln sztuk, a struktura samochodu będzie zawierała około 350 kg tworzyw sztucznych [134]. Redukcja masy pojazdów jest jedną z najważniejszych strategii energooszczędności w motoryzacji (Rysunek 1.25). Regulacje dotyczące emisji zanieczyszczeń i związane z tym potrzeby opracowania nowych rozwiązań prowadzą do rosnącego zainteresowania branży samochodowej lekkimi materiałami. Samochody są wytwarzane w ok. 63% z metali. Zmniejszenie masy pojazdu o 10% mogłoby skutkować obniżeniem zużycia paliwa o 6 - 8% w samochodach z silnikiem spalinowym oraz o 10% w pojazdach elektrycznych.



Rysunek 1.25. Statystyka ciężaru komponentów samochodowych [134]

Przewiduje się, że rynek kompozytowych materiałów samochodowych, szacowany na ok. 9,4 mld USD w 2020r. będzie stale wzrastał i w 2027 r. wyniesie ok. 19,4 mld USD. Przysłużyć się temu może produkcja kompozytów wzmocnianych włóknami (FRP), wśród których znaczny wzrost zastosowania obserwuje się dla włókien węglowych (CFRP) i włókien szklanych (GFRP). Ich zaletami jest lekkość, elastyczność i bardzo dobre właściwości mechaniczne. Elementy na bazie włókna szklanego i włókna węglowego mogą zredukować masę całej konstrukcji odpowiednio o 25-35% i 40-70%. Stosunek właściwości wytrzymałościowych do kosztów produkcji przemawia na korzyść zastosowania GFRP w produkcji dachów samochodowych, pokryw bagażnika, modułów drzwiowych czy podpór zderzaków [135].

Ponadto, kompozyty energochłonne znajdują swoje zastosowanie w :

- konstrukcjach mobilnych kontenerów i przenośnych biur [122, 123],
- budowie jachtów i konstrukcjach przemysłu morskiego [124],
- konstrukcjach lotniczych i budowie bezzałogowych statków powietrznych [125 – 130],
- energetyka i odnawialne źródła energii [136],
- przemyśle sportowym [137].

2. METODY BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH KOMPOZYTÓW WIELOWARSTWOWYCH Z RDZENIEM PIANKOWYM

2.1. Badania udarowościowe kompozytów strukturalnych

Testy udarowości zaliczają się do prób dynamicznych, a ich celem jest zbadanie zdolności kompozytu do przenoszenia obciążeń typu uderzeniowego. Oceniając użyteczność kompozytu w zastosowaniach energochłonnych należy wziąć pod uwagę, że na mechanizmy zniszczenia oraz zdolność pochłaniania energii mają wpływ przede wszystkim czynniki takie jak:

- rodzaj użytych materiałów i ich wzajemne korelacje,
- grubość warstwy okładziny,
- rodzaj wzmocnienia oraz grubość i gęstość warstwy rdzenia,
- prędkość i siła uderzenia,
- zastosowana technika produkcji i jej warunki [55]. Szczegółowe zdefiniowanie tych zmiennych prowadzi do właściwej analizy skutków, jakie może wywołać zderzenie z innym

obiektem [56]. Rodzaj zniszczeń, powodujących obniżenie wytrzymałości oraz zdolność pochłaniania energii uderzenia są kluczowymi aspektami określającymi charakterystykę udarnościową kompozytów strukturalnych, od których w dużej mierze zależy odporność zderzeniowa i efektywność ochronnych właściwości konstrukcji. Aby dokonać właściwej oceny efektywności pochłaniania energii w konkretnym zastosowaniu należy odpowiednio dopasować cechy oraz właściwości mechaniczne kompozytu w taki sposób, aby możliwie najskuteczniej zapobiec negatywnemu oddziaływaniu obciążeń lub zniszczeń, na jakie kompozyt będzie szczególnie narażony [57].

Analizując mechanizmy uszkodzenia i ogólne zachowanie kompozytu pod wpływem obciążeń udarowych stosuje się klasyfikację wytrzymałości mechanicznej IK (*Impact Protection*). Jest to parametr określający odporność urządzeń (w tym szczególnie osłon urządzeń elektrycznych) na uderzenia i inne zewnętrzne uszkodzenia mechaniczne.

Tabela 2.1. Klasyfikacja stopni ochrony IK i charakterystyka testów udarności [151, 152]

Kod IK	Energia uderzenia	Charakterystyka testu udarności	
00	0 J	-	-
01	0,15 J	młot wahadłowy	-
02	0,20 J	młot wahadłowy	-
03	0,35 J	młot wahadłowy	-
04	0,50 J	młot wahadłowy	-
05	0,70 J	młot wahadłowy	-
06	1 J	młot wahadłowy	-
07	2 J	młot wahadłowy	młot spadowy
08	5 J	młot wahadłowy	młot spadowy
09	10 J	młot wahadłowy	młot spadowy
10	20 J	młot wahadłowy	młot spadowy
11	50 J	-	młot spadowy

Stopień ochrony IK zdefiniowany został w normie IEC EN 62262 [151] i opisywany jest w dwunastostopniowej skali (od 2021 wprowadzono dodatkowe oznaczenie IK 11 dla uderzenia o wartości 50 J), w której im wyższa wartość liczbową kodu IK tym wyższa wytrzymałość mechaniczna elementu (Tabela 2.1.) [152].

Dzięki znajomości parametru IK oraz jego zależności od wartości energii uderzenia można zweryfikować czy elementy stosowane na osłony będą skutecznie spełniały swoją rolę podczas całego procesu eksploatacji i w warunkach prawidłowego użytkowania.

2.1.1. Udarowościowe zginanie krótkiej belki

Kompozyty energochłonne o strukturze warstwowej są często poddawane udarowym obciążeniom prostopadłym do powierzchni. W wyniku takiego obciążenia pojawiają się widoczne lub niewidoczne deformacje. Uszkodzenia trudne do zidentyfikowania generują niekontrolowane obniżenie wytrzymałości i sztywności kompozytu, zainicjowane wewnątrz materiału przez pęknięcie włókien, osnowy lub delaminację [16]. W celu scharakteryzowania kompozytów przy obciążeniu udarowym stosuje się różnego rodzaju metody [58], schematy których przedstawiono na Rysunku 2.1., podkreślającym zasadniczą różnicę pomiędzy badaniami, która dotyczy ułożenia próbki poddanej uderzeniu.

Wyróżnia się metod badania udarowości:

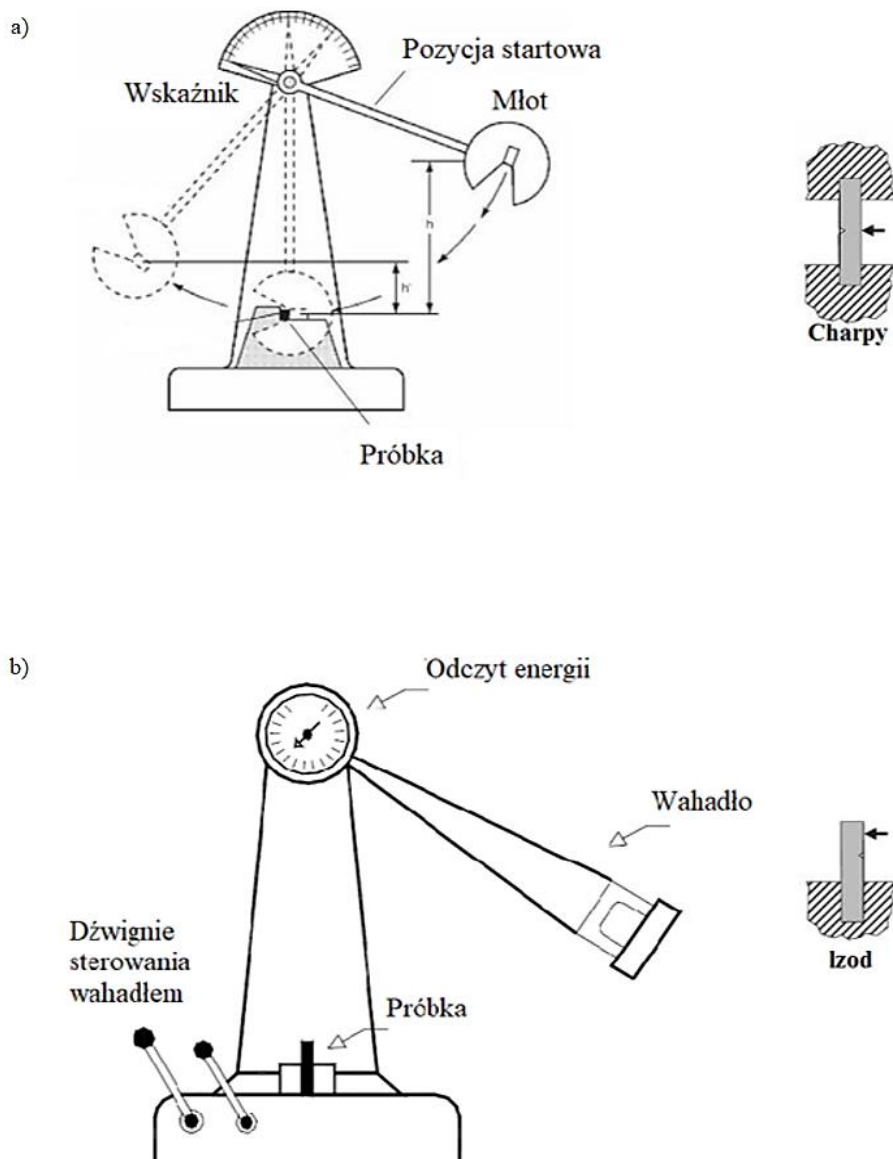
- metoda Charpy'ego,
- metoda Izoda,
- metoda Dynstat.

W metodzie Charpy'ego kształtka do badań (belecza), podparta jest w pobliżu jej końców i ułożona poziomo. Uderzana jest pojedynczym uderzeniem młota udarowego w środku między podporami i zgina z dużą, nominalnie stałą prędkością. W przypadku kompozytów wzmocnianych warstwowo stosuje się:

- uderzenie krawędziowe,
- uderzenie płaszczyznowe,
- uderzenie prostopadłe,
- uderzenie równoległe.

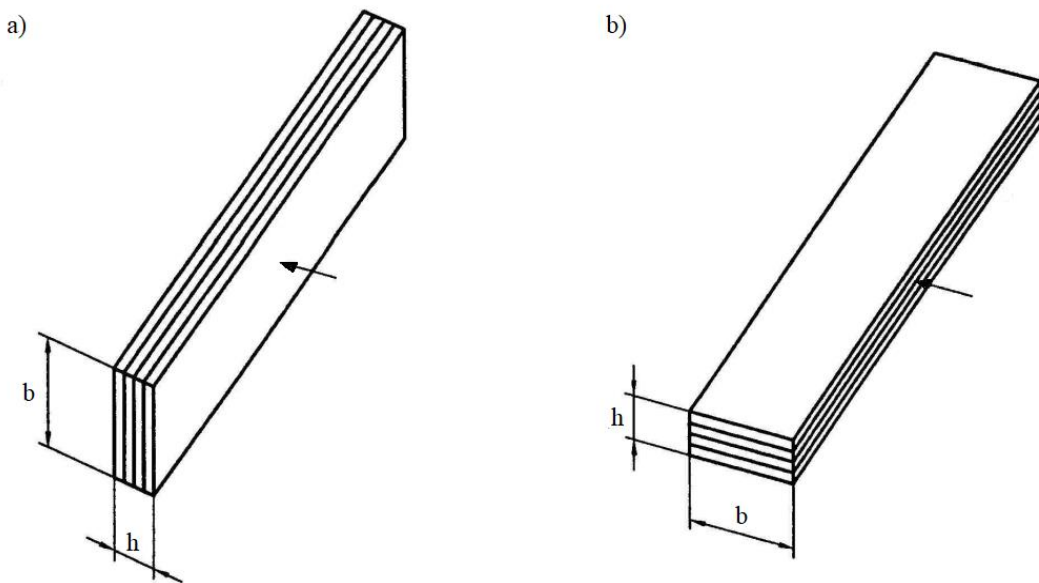
Metoda Izoda różni się od metody Charpy'ego sposobem zamocowania próbki, wymiarami próbek oraz prędkością uderzenia wahadła młota. W metodzie Izoda zawsze stosuje się tylko próbkę z odpowiednio przygotowanym karbem. Próbkę mocuje się pionowo zawróconą stroną z naciętym karbem do miejsca natarcia młota.

Zasada badania udarności na aparacie Dynstat jest taka sama jak w metodzie Charpy’ego, jednak również różni się sposobem zamocowania próbki. Próbka zamocowana jest jednostronnie w pozycji pionowej, a w miejscu podparcia ma styk liniowy z uchwytem. Do pomiarów stosuje się próbki gładkie i próbki z karbem. Metodę należy stosować do badania wyrobów i półwyrobów z tworzyw sztucznych, których wymiary uniemożliwiają wykonanie oznaczania inną metodą. Wyniki otrzymane tą metodą są nieporównywalne z wynikami udarności wykonanych za pomocą młotów Charpy’ego lub Izoda [59 - 64].



Rysunek 2.1. Schematy prób udarnościowych
a) metoda Charpy’ego, b) metoda Izoda [59, 60]

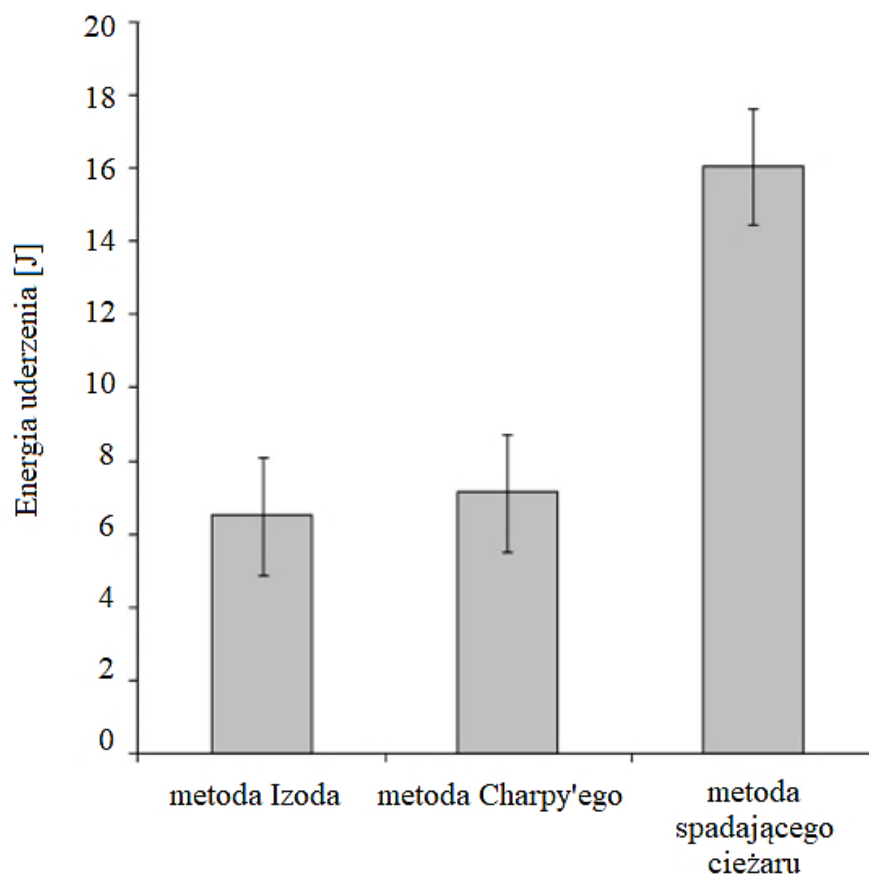
Metoda Charpy'ego przeprowadzana jest zgodnie z normą EN ISO 179-1 [62]. Na Rysunku 2.2. przedstawiono przykłady ułożenia kompozytów podczas próby udarności i kierunku uderzenia. Aparat składa się z wahadła o odpowiedniej masie i długości, wprowadzanego w ruch wahadłowy z pewnej wysokości. Zgodnie z normą próbki z karbem o głębokości 1 mm powinny mieć wymiary 80 x 10 x 4 mm, jednak w przypadku kompozytów warstwowych możliwe jest zaniechanie nacięcia karbu, a próbki do badań przygotowuje się według odpowiednio dobranych proporcji grubości i szerokości.



Rysunek 2.2. Kierunki uderzenia próbek w badaniach metodą Charpy'ego

a) uderzenie płaszczyznowe prostopadłe, b) uderzenie krawędziowe równoległe [63, 64]

Zachowanie kompozytów warstwowych pod wpływem różnego rodzaju obciążeń udarnościowych stało się przedmiotem analizy *V.K. Srivastava* [65]. Literatura przedmiotu nie dostarcza wielu wspólnych zestawień tych metod, najczęściej bowiem pojawiają się badania wykorzystujące tylko jedną z metod badania udarności. Przekładkowe kompozyty epoksydowo-szklane z rdzeniem z pianki PVC o grubości 12 mm, wykonane metodą laminowania ręcznego, poddane zostały testom udarności metodą Izoda, metodą Charpy'ego oraz odporności na uderzenie przy zastosowaniu spadającego ciężaru. Warstwy okładzin były przyklejane do rdzenia za pomocą kleju na bazie żywicy epoksydowej. Wykazano, że podczas próby udarności metodą spadającego ciężaru energia uderzenia jest znacznie wyższa aniżeli dla kompozytów poddanych badaniom według pozostałych metod (Rysunek 2.3.).

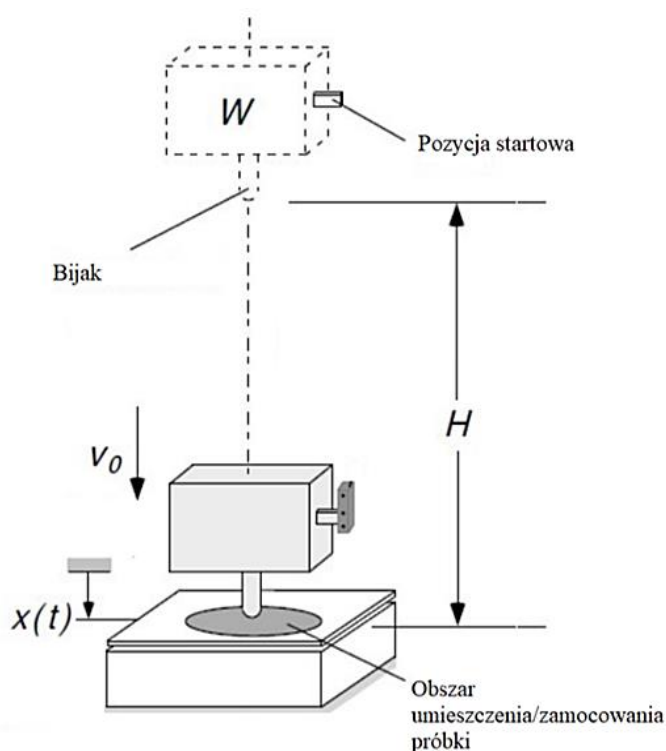


Rysunek 2.3. Wartość energii uderzenia kompozytu GFRP/PVC/GFRP w zależności od zastosowanej metody [65]

Ze względu na dominujące zachowanie zginające w metodzie Charpy'ego i metodzie Izoda, próbki pękały wzdłuż miejsca kontaktu młota z próbką. W metodzie spadającego ciężaru energia uderzenia jest rozłożona równomiernie, powodując lokalne deformacje jedynie na powierzchni górnej okładziny, która ulega delaminacji. Po uszkodzeniu pierwszej warstwy pianka PVC przejmuje zdolność do pochłaniania energii, która zostaje efektywnie zaabsorbowana lub rozproszona przez warstwę rdzenia, bowiem w dolnej warstwie okładziny nie obserwowano widocznych zniszczeń na skutek uderzenia. Porównanie to wskazuje bardzo jednoznacznie, że ten sam kompozyt poddany różnego rodzaju obciążeniom udarnościowym wykazuje zupełnie inne zachowanie w aspekcie pochłaniania energii uderzenia, stąd tak ważna jest umiejętność przewidywania możliwych oddziaływań dynamicznych lub statycznych, którym kompozyt będzie poddawany w trakcie eksploatacji [65].

2.1.2. Oddziaływanie poprzecznych obciążeń udarnościowych

Metoda testowa z wykorzystaniem młota spadowego jest standardowym badaniem udarnościowym kompozytów strukturalnych zgodnie z normą ASTM D7136 [156]. Materiały poddawane uderzeniu spadającego ciężaru bardzo często nie są całkowicie niszczone (nie dochodzi do całkowitej perforacji), ale powstają skomplikowane wzory różnorodnych mechanizmów uszkodzeń. Istotą badań udarnościowych jest więc badanie mechanizmów uszkodzeń i sposobów pochłaniania energii. Na Rysunku 2.4. przedstawiono schemat testu udarnościowego wykonywanego na młocie spadowym.



Rysunek 2.4. Schemat testu udarności metodą spadającego ciężaru [61]

Energia uderzenia oraz energia pochłonięta przez kompozyt są parametrami niezbędnymi do oceny reakcji materiału na obciążenie udarowe. Wprowadzenie dodatkowych warstw stało się obiecującą metodą wzmacniania oddziaływań międzyfazowych. Natomiast prędkość, z jaką bijak uderza badaną próbkę ma istotny wpływ na odpowiedź materiału, dlatego należy dobrać ją odpowiednio do przyszłych warunków eksploatacyjnych. Najpowszechniej stosowanymi rodzajami badań tolerancji na uderzenia są próby wykonywane na młocie spadowym z uderzeniem o niskiej prędkości (LVI, < 10 m/s), uderzeniem z prędkością pośrednią (ang. *Intermediate Velocity Impact*, $10 - 50$ m/s) i uderzeniem o dużej prędkości (ang. *High Velocity*

Impact, HVI, 50 – 1000 m/s). Te kategorie obciążeń udarowych są ważne, ponieważ występują ekstremalne zmiany w transferze energii między bijakiem a próbką, rozpraszaniu energii uderzenia i mechanizmach rozprzestrzeniania się uszkodzeń wraz ze zmianą prędkości uderzenia [153, 154, 155].

Odporność materiału kompozytowego na uderzenie zazwyczaj określana jest za pomocą dwóch kluczowych właściwości:

- tolerancji na uszkodzenie,
- odporności na przebicie.

2.1.2.1. Tolerancja na uszkodzenia

Tolerancja na uszkodzenia wiąże się bezpośrednio mechanizmami uszkodzeń wywołanych uderzeniem, które szczegółowo zostały opisane w podrozdziale 1.2. Oznacza zdolność materiału do przenoszenia obciążeń pomimo ich wystąpienia. Zarówno wielkość obciążenia jak i uszkodzenia oraz jego charakter powinny odzwierciedlać warunki eksploatacji a szczególnie uszkodzenia móc być zlokalizowane i ocenione za pomocą określonej metody w oparciu o jednoznaczne parametry. Dwie największe firmy lotnicze BOEING i AIRBUS zdefiniowały minimalne uszkodzenie spowodowane uderzeniem poprzez głębokość oraz pole powierzchni wyraźnie wykrywalne podczas kontroli wzrokowej w typowych warunkach oświetleniowych z odległości ok. 1,5 m.

Testy wysokich prędkości uderzenia (HVI) powodują całkowitą perforację materiału i rozległe rozwarstwienia, natomiast badania LVI powodują wewnętrzne i niekiedy ledwo widoczne uszkodzenia kompozytu, tj. rozwarstwienia, uszkodzenia osnowy, zerwania włókien i to te rodzaje uszkodzeń są szczególnie niebezpieczne dla zachowania integralności strukturalnej kompozytów [153].

Szereg badań dotyczących mechanizmów uszkodzeń kompozytów strukturalnych dostarcza cennych informacji o ich odpowiedzi na poprzeczne obciążenia udarnościowe. Analiza mechaniczna *A.C. Balaban* dotyczyła kompozytu typu sandwich do zastosowania w przemyśle morskim. Materiał składał się z wierzchnich warstw żywicy wzmocnionej włóknem szklanym typu E oraz rdzenia w postaci pianki PVC. Próbkę poddano badaniu udarności spadającym ciężarem z niską prędkością przy pięciu wartościach energii: 20, 40, 60, 80 i 100 J. Dokonano charakterystyki typu uszkodzeń na wierzchnich warstwach i wewnętrznych częściach pianki analizując zależności siła – czas, siła – przemieszczenie i siła – energia. Stwierdzono, że energia o wartości 80J jest początkowym poziomem

zapoczątkowania mechanizmu penetracja – perforacja. Wyznaczona charakterystyka udarowościowa określona na podstawie różnych wartości energii uderzenia wskazuje, że obszar zniszczeń wzrasta wraz ze wzrostem wartości energii. Przy niskich wartościach zniszczenia obejmowały obszar osnowy lub okładziny górnej, podczas gdy przy wyższych wartościach energii obszar zniszczeń eskalował na kolejne warstwy kompozytu, powodując całkowite jego zniszczenie [66].

Ważnym aspektem w określaniu potencjału energochłonności kompozytu jest wybór metody produkcji. *R. Wojtyra i K. Imielińska* analizowali skuteczność łączenia warstw kompozytu i wpływu zastosowanego połączenia na właściwości absorpcyjne materiału. Kompozyty wykonano metodą laminowania ręcznego, stosując dwie techniki – jeden rodzaj kompozytu składał się z uprzednio utwardzonych okładzin, które przyklejano do rdzenia za pomocą spoiw małej i dużej gęstości. Drugą techniką było przykładanie kolejnych warstw okładzin „na mokro”, formowanie kompozytu przez połączenie laminatów z rdzeniem i utwardzanie całego kompozytu w temperaturze pokojowej, a następnie dotwardzanie w temperaturze 60°C. Do wytworzenia kompozytów przekładkowych wykorzystano żywicę poliestrową ze wzmocnieniem z maty szklanej o gramaturze 150 g/m² i tkaniny o gramaturze 450 g/m². Na ich bazie wyprodukowano okładziny w formie laminatu o grubości 26mm. Jako rdzeń zastosowano piankę PVC Divinyceł H80-DIAB o grubości 20mm. Przygotowane kompozyty poddano dynamicznemu badaniu udarowemu z zastosowaniem energii uderzenia o wartościach w zakresie 19,7 - 51,6 J. Niezależnie od techniki wytwarzania i rodzaju kompozytu wartość obciążenia, przy której następowała inicjacja zniszczeń wynosiła około 2,5 kN. Obserwowano także powstałe zniszczenia kompozytów, które przy wyższych wartościach energii wykazywały więcej niż jeden mechanizm. Najbardziej wyraźne zniszczenia występowały w „kompozytach klejonych”, gdzie obserwowano pękanie rdzenia i delaminację okładzin. Pękanie następowało w nich głównie między warstwami okładziny a rdzeniem, co określano jako pęknięcie adhezyjne, które eskalując powodowało pękanie rdzenia. Kompozyty wyprodukowane „na mokro”, których ulegały pękaniu tylko w wierzchniej warstwie, potwierdzając istotne znaczenie wyboru metody produkcji na energochłonne właściwości materiału [67].

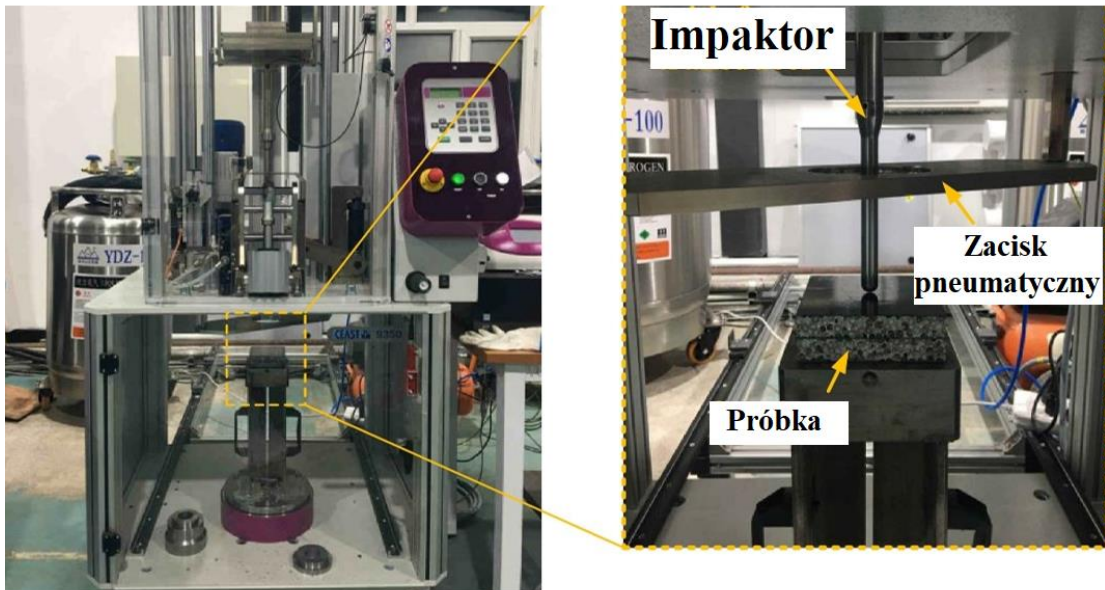
Badania kompozytów warstwowych z różnymi rodzajami wzmocnienia poddanych uderzeniu spadającym ciężarem z małą prędkością przeprowadziła *O.A. Mocian* w kooperacji z austriacko-rumuńskimi badaczami. Wierzchnie warstwy kompozytowe wykonane zostały z żywicy epoksydowej RT500, tkaniny szklanej o gramaturze 500 g/m² i ciętego włókna szklanego w 5 różnych konfiguracjach ilościowych tych włókien. Jako rdzeń piankowy

wykorzystano dwa rodzaje pianek grubości 12 mm: poliuretanową Necuron 100 o gęstości 100 kg/m^3 i polistyren ekstrudowany o gęstości 32 kg/m^3 . Okładziny i pianka zostały sklejone za pomocą kleju epoksydowego typu Araldite AW106. Próby udarowości wykonano z zastosowaniem trzech energii uderzenia (133 J, 163 J, 193 J) i różnej masy uderzenia, przy stałej prędkości uderzenia. Krzywe obciążenie – przemieszczenie umożliwiły ocenę zachowania wierzchnich płyt kompozytowych na uderzenie. Ponadto dla trzech z pięciu konfiguracji (próbki referencyjnej oraz dla próbek z zawartością krótkich włókien szklanych odpowiednio 6,4g i 9,3g na 100g żywicy) odnotowano uszkodzenia górnych warstw wierzchnich oraz pęknięcia włókien. W kompozytach zawierających piankę poliuretanową zaobserwowano zwiększenie wielkości i głębokości uszkodzeń. Dla pozostałych konfiguracji, nie posiadających w swojej strukturze tkaniny szklanej, odnotowano znaczące obniżenie sztywności, co skutkowało całkowitą perforacją materiału. Zastosowanie odpowiedniego wzmocnienia ma więc istotny wpływ na zmniejszenie degradacji warstw wierzchnich i zwiększenie odporności na uderzenie [68].

Kompozyty warstwowe na bazie polimeru epoksydowego wzmocnionego włóknem szklanym z rdzeniem w postaci pianki fenolowej stały się przedmiotem prac nad produkcją kompozytowego podkładu kolejowego. W analizie istotną uwagę zwrócono na połączenie pomiędzy fazami kompozytu, składającego się z warstw okładzinowych, w których skład wchodziło 8 warstw włókien szklanych ułożonych pod różnym kątem połączonych żywicą. Stosunek objętości włókien wynosił 45%. Osnowa polimerowa została zmodyfikowana przez mieszanek wypełniaczy – środek uniepalniający, *pusta mikrosfera* i popiół lotny. Mieszanek dodano w zakresie od 30 - 50% objętości kompozycji. Eksperyment wykazał, że najlepszą kompozycją z uwagi na siłę wiązań pomiędzy płytą warstwową a okładzinami, jest zestawienie 40% wypełniacza do 60% żywicy. Osnowa z większą ilością wypełnienia łatwiej tworzy puste przestrzenie, powodując szybsze niszczenie kompozytu. Ponadto, grubość matrycy polimerowej ma największy wpływ na utrzymanie silnego połączenia między fazami kompozytu oraz rodzajem zniszczenia występującego wskutek uderzenia [69].

Y. Zhu i Y. Sun [70] analizowali zachowanie wielowarstwowych kompozytów CFPR z rdzeniem piankowym pod wpływem uderzenia. Kompozyt składał się z okładzin epoksydowo-węglowych grubości 0,125 mm (4 warstwy układane w kierunku 0°) i rdzenia piankowych o grubości 15 mm. Komponenty w kompozycie wielowarstwowym łączono za pomocą folii samoprzylepnej J-272C. Prepregi arkuszy okładziny były przygotowywane w warunkach podwyższonej temperatury. Kompozyt został wytworzony metodą ręcznego laminowania i worka próżniowego. Przeprowadzono testy udarowości o niskiej prędkości

metodą spadającego ciężaru zgodnie z normą ASTM D7136 przy wykorzystaniu maszyny Instron Ceast 9350 (Rysunek 2.5.). Energia uderzenia wynosiła 250 J.



Rysunek 2.5. Maszyna Instron Ceast 9350 oraz ustawienie próbki do próby spadającego ciężaru [70]

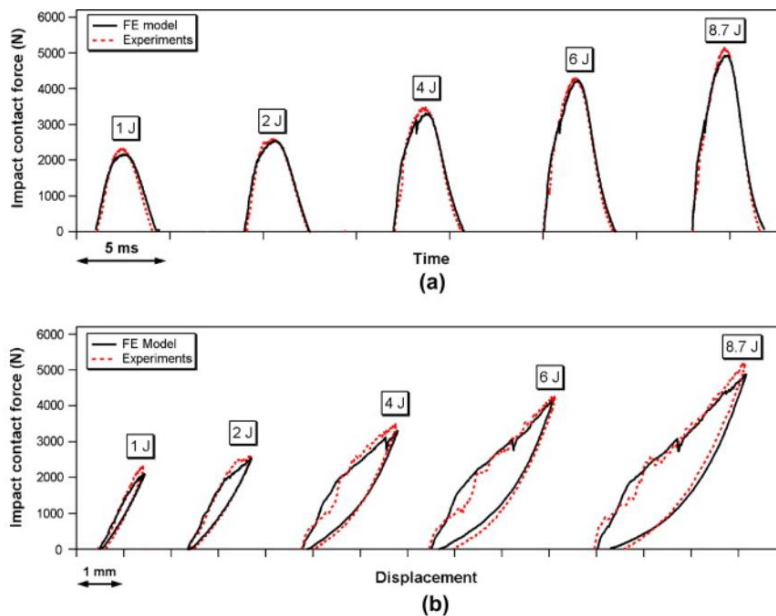
Wyniki pokazały, że kompozyt wielowarstwowy ma wysoką odporność na uderzenia niskiej prędkości. Maksymalna siła nacisku jest zmniejszana bez znacznej utraty zdolności pochłaniania energii. Dodatkowo zwiększenie sztywności górnej warstwy okładziny pozwoliłoby na zwiększenie absorpcji energii o ok. 7,1 %, jednak kompozyt musi uwzględniać wymagania stawiane w konkretnych zastosowaniach inżynierskich.

T. Anderson i E. Madenci [71] przedstawili eksperymentalne badania dotyczące struktur warstwowych poddawanych oddziaływaniom udarowym przy niskiej prędkości. Badali kompozyty na bazie okładzin epoksydowo-węglowych (3 lub 6 warstw tkaniny o splocie twill) z rdzeniem o strukturze plastra miodu lub w postaci pianki polimetakrymidowej Rohacell (różnej gęstości i stałej grubości – 12,7 mm). Próbki o wymiarach 76,2 mm x 76,2 mm poddano uderzeniu niskiej prędkości na różnych poziomach energii, aby otrzymać ledwo widoczne uszkodzenia (BVID), całkowitą perforację kompozytu oraz rodzaj uszkodzeń będący pomiędzy tymi dwoma rodzajami zniszczeń. W związku z tym masa impaktora oscylowała pomiędzy 1,8 - 2,7 kg, natomiast wysokość zrzutu impaktora wynosił od 0,2 - 1,2 m. W kompozytach z 3 warstwami tkaniny obserwowano znaczne uszkodzenia przy energii uderzenia 8,5 J, bez względu na gęstość zastosowanego rdzenia. Natomiast w kompozytach z 6 warstwami tkaniny węglowej i rdzeniu o wysokiej gęstości zaobserwowano znaczne uszkodzenia podczas

uderzenia z energią 12,55 J, co odpowiadało 0,13 mm trwałego odkształcenia (wgniecenia). Kompozyty zawierające 3 warstwy wzmocnienia i rdzeniu o strukturze plastra miodu niskiej i wysokiej gęstości wykazywały znaczne uszkodzenia na poziomie 8,07J, podczas gdy grubsza okładzina (6 warstw tkaniny) i rdzeń o strukturze plastra miodu dużej gęstości uszkodzeniom ulegały na poziomie energii uderzenia o wartości 12,55 J, wykazując jednak znacznie większe uszkodzenia wewnątrz kompozytu.

Analizy kompozytów warstwowych stosowanych w łopatach turbin wiatrowych podczas uderzenia niskiej prędkości podjęli się również *D. Feng i F. Aymerich* [72]. Do wytworzenia materiału przekładkowego jako osnowę użyto prepregu epoksydowo-węglowego ułożonego w sekwencji $[0^{\circ}_3/+45^{\circ}/-45^{\circ}]_s$, a jako rdzeń zastosowano piankę o gęstości 65 kg/m^3 i grubości 10 mm. Kompozyty poddane zostały uderzeniu impaktora o masie 2,34 kg z energią o wartości od 1-9 J. Wyniki eksperymentalne i symulacje numeryczne były zbliżone, co potwierdzają wykresy zależności siły od czasu i siły od przemieszczenia przedstawione na Rysunku 2.6.

Powyżej obciążenia o wartości ok. 2 kN krzywe pokazały spadek nachylenia, co wskazywało na uszkodzenie w okładzinie, a stan ten potwierdziły przeprowadzone analizy rentgenowskie i mikrograficzne. Uszkodzenie zostało zainicjowane podczas uderzenia z energią o wartości 1 J, kiedy zaobserwowano pęknięcia, które wraz ze wzrostem energii uderzenia postępowało w głąb warstw kompozytu. Wyniki wskazały również na występowanie pęknięć włókien w górnych warstwach okładziny podczas uderzenia z zastosowaniem energii powyżej 6 J.



Rysunek 2.6. Wykresy zależności siły od czasu i siły od przemieszczenia [72]

W dobie rosnącej świadomości i wiedzy o ochronie środowiska przemysł kompozytowy chętnie poszukuje nowych rozwiązań proekologicznych także w zakresie wytwarzania konstrukcji warstwowych. *K. Mak i in.* [98] wykorzystali tkaninę z włókna lnianego (FFRP) oraz żywicę epoksydową na bazie 30% zawartości składników biologicznych. Jako rdzeń natomiast zastosowano piankę poliizocyanurową (PIR) o różnej grubości i gęstości. Badania udarności metodą spadającego ciężaru wykonano w różnych warunkach uderzenia:

- 100% wartości energii – 1 uderzenie,
- 75% wartości maksymalnej energii – 50 uderzeń,
- 50% wartości maksymalnej energii – 50 uderzeń.

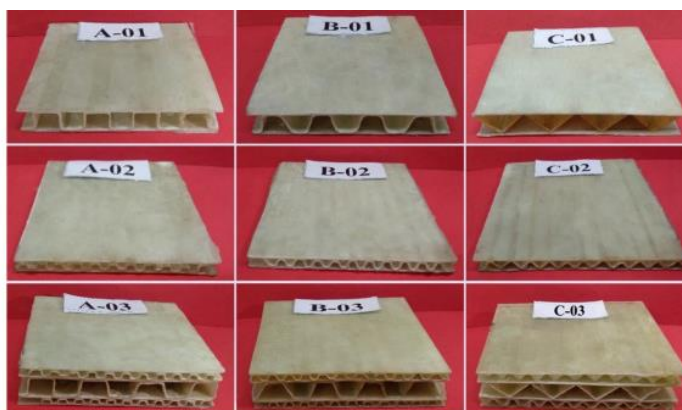
Test zginania wykonano z prędkością 15-20 mm/min.

Analiza wyników wykazała, że kompozyty odznaczały się bardzo wysoką sprężystością. Test udarności nie powodował zmniejszenia wytrzymałości, a w przypadku kompozytów uderzonych 100% wartością energii oraz 50-krotnym uderzeniem o 50% wartości maksymalnej energii odnotowano wzrost wytrzymałości. Wielokrotne uderzenia powodowały jedynie niewielki spadek sztywności kompozytu, co przypisywano mikropęknięciom na powierzchni górnej okładziny.

Literatura dostarcza wielu informacji i analiz wytrzymałości kompozytów typu sandwich poddanych uderzeniom niskiej prędkości, wśród których szczególną uwagę objęte są kompozyty wielowarstwowe ze stopniowanym rdzeniem (FGC) [73 - 78]. Ten typ rdzenia ma znaczący wpływ na polepszenie wydajności pochłaniania energii uderzenia, czego dowodem jest praca *A.F Avila* [78], który przedstawił analizę zachowania poddanego uderzeniu kompozytu epoksydowo-szklanego (50% frakcji objętościowej włókien, gramatura 200 g/m³, splot plain). Jako rdzeń zastosowano spieniony polistyren o gęstości 59 kg/m³. Warstwy okładziny i rdzenia połączono ze sobą elastycznym klejem pełniącym dodatkową funkcję przyjmowania niewielkich odkształceń, chroniąc piankę przed uszkodzeniem. Rdzeń został podzielony i ułożony w taki sposób, aby możliwe było porównanie zachowania kompozytu w zależności od zastosowanej gęstości i grubości warstw pianki. Wszystkie zastosowane konfiguracje ułożenia warstw piankowych prowadziły do efektywnej poprawy właściwości kompozytu w porównaniu do konwencjonalnego materiału przekładkowego bez stopniowanego rdzenia. Maksymalne obciążenie dla konfiguracji z rdzeniem o najniższej i najwyższej gęstości pod górną warstwą okładziny wykazały wartości odpowiednio o 138% i 192% wyższe niż referencyjny kompozyt przekładkowy. Dodatkowo najlepszą wydajność w aspekcie pochłaniania energii uderzenia uzyskują kompozyty z rdzeniem stopniowanym

o najwyższej gęstości zastosowanej pod górną warstwą okładziny, zapobiegając drastycznemu uszkodzeniu materiału [79].

Różnorodność geometrii i grubości rdzeni pozwala na wykorzystanie ich potencjału w kompozytach FGC. W tym celu S.A. Taghizadeh i in. [80] wykonali testy nowatorskich kompozytów wielowarstwowych z funkcjonalnie stopniowanym rdzeniem, które przedstawiono na Rysunku 2.7.



Rysunek 2.7. Zestawienie kompozytów z funkcjonalnie stopniowanym rdzeniem [80]

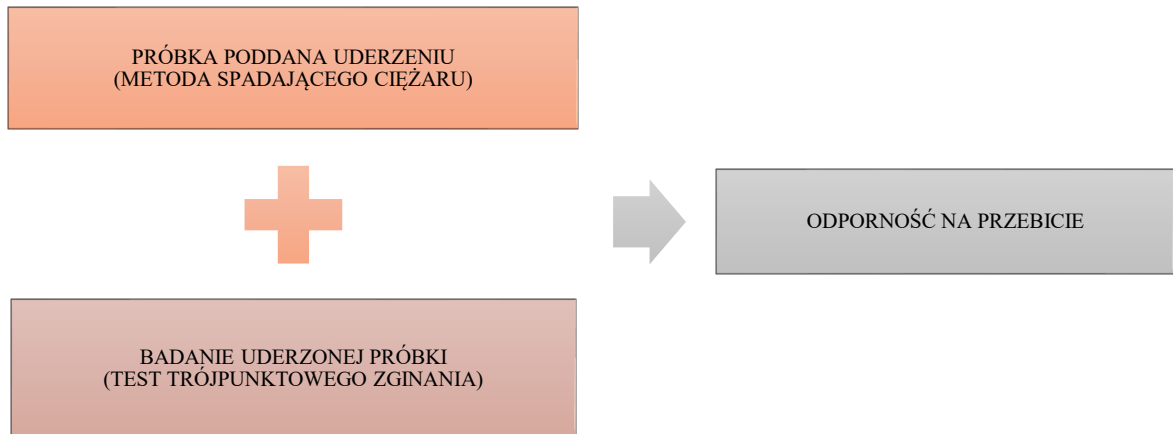
Efektom tego, jak i podobnych rozwiązań dotyczących stosowania funkcjonalnie stopniowanego rdzenia jest poprawa zdolności pochłaniania energii oraz częściowa minimalizacja uszkodzeń wewnątrz struktury kompozytu.

2.1.2.2. Odporność na przebicie metodą BAI

Odporność na przebicie kompozytów strukturalnych składa się z dwóch etapów:

- poddanie oddziaływaniu poprzecznych obciążeń udarnościowych (uderzenie);
- badanie wybranej właściwości wytrzymałościowej lub mechanicznej, która w odniesieniu do próbki uderzonej pozwoli na wyznaczenie tzw. wytrzymałości resztkowej.

Wiele badań koncentruje uwagę na testach ściskania po uderzeniu (ang. *Compression After Impact*, CAI), jednak znacznie częściej wymagane jest, aby kompozyty warstwowe wytrzymały obciążenia zginające, stąd też należy poddawać je testom zginania po uderzeniu (ang. *Bending After Impact*, BAI) [94, 95]. Uproszczoną procedurę testu BAI przedstawiono na Rysunku 2.8.



Rysunek 2.8. Uproszczona procedura wyznaczania odporności na przebicie - test BAI

Wartości referencyjne stanowią próbki poddane tylko próbie zginania (BO, ang. *Bending Only*), a analiza wyników obejmuje wyznaczenie procentowego spadku wybranych właściwości (w tym przypadku właściwości przy zginaniu).

I. Baran i W. Weijermars [94] badali zachowanie kompozytów epoksydowo – szklanych z różnymi rodzajami rdzenia – pianką styrenowo-akrylonitrylową (SAN), pianką politereftalanu etylenu (PET) i drewnem Balsa. W jednej serii przeprowadzono wyłącznie test zginania, którego wyniki stanowiły punkt odniesienia (ang. *Bending Only*, BO). W serii drugiej przeprowadzono test spadającego ciężaru niskiej prędkości (3,4 m/s) o energii uderzenia na poziomie 34,7 J, a następnie test zginania trójpunktowego z prędkością 6mm/min do momentu maksymalnego odkształcenia wyznaczonego na 20 mm lub 50% spadku siły.

W oparciu o wyniki stwierdzono, że na wytrzymałość resztkową kompozytów wpływ miał test uderzenia niskiej prędkości, mimo podobnych wartości pochłoniętej energii na poziomie 30 J. Wartość modułu zginania kompozytów zmniejszyła się odpowiednio o 22,8% dla kompozytu z rdzeniem Balsa, o 4,9% dla kompozytu z rdzeniem SAN i o 22,1% dla kompozytu z rdzeniem PET.

Innym przykładem badań wytrzymałości resztkowej kompozytów warstwowych była praca *A. Saifullah i in.* [96]. Poddano analizie dwa rodzaje struktur przekładkowych z okładziną polietylenową PE i dwoma rodzajami rdzenia PE o różnej gęstości wytwarzanych metoda formowania rotacyjnego. Kompozyt przygotowano w kombinacji: warstwa górna 2mm / rdzeń 4 mm / warstwa dolna 2 mm, które są stosowane w budowie kadłubów łodzi, i innych zastosowaniach przemysłu morskiego. W testach uderzenia spadającym ciężarem zastosowano trzy wartości energii – 25 J, 35 J i 45 J, po czym badano strukturę kompozytu przy pomocy mikrotomografii wysokiej rozdzielczości. Test trójpunktowego zginania przeprowadzono

w celu charakterystyki uszkodzeń wywołanych uderzeniem i ich wpływu na wytrzymałość resztkową (prędkość 2 mm/min, maksymalne przemieszczenie 60 mm).

Wbrew założeniom kompozyt z rdzeniem niższej gęstości wykazywał lepszą odporność na uderzenia i charakteryzował się większą tolerancją na uszkodzenia. Nośność tych kompozytów spadała odpowiednio o 17% po uderzeniu 25 J, o 18% po uderzeniu 35 J i o 23 % po uderzeniu 45J. Autorzy przypisywali ten fakt możliwością występowania wad produkcyjnych w materiale z rdzeniem o wyższej gęstości, dla którego odnotowano spadek nośności o 23% po uderzeniu 25J, o 34% po uderzeniu 35 J i o 30% po uderzeniu 45 J. Niemniej jednak, wspólnym mechanizmem uszkodzenia dla obu rodzajów kompozytów było pękanie dolnej warstwy okładziny podczas badań. Analiza udowodniła także znaczący wpływ jakości wytwarzania na właściwości kompozytów.

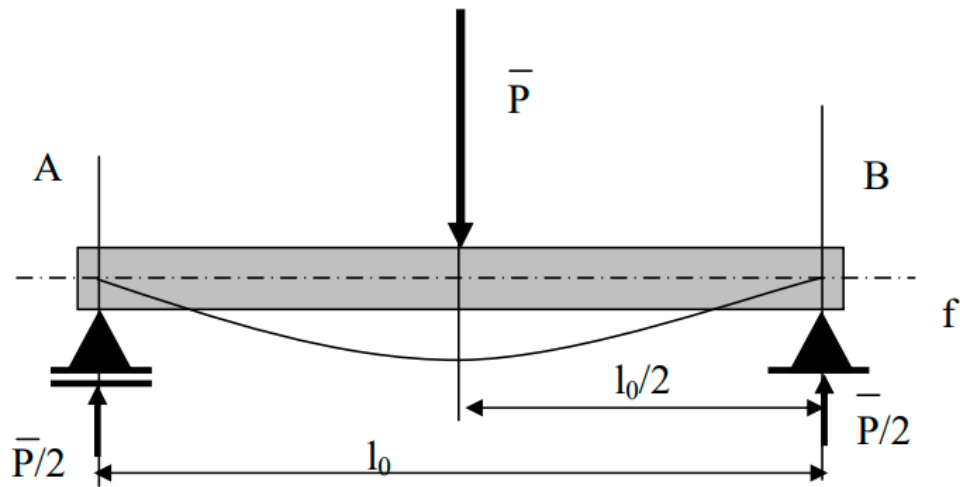
Nowe szlaki morskie w rejonach Arktyki charakteryzują się ekstremalnie niskimi temperaturami. Stawia to nowe wymagania wobec materiałów konstrukcyjnych łodzi i statków, które muszą wykazywać wysoką odporność na działanie niskich temperatur przy zachowaniu wysokich parametrów wytrzymałościowych. W odpowiedzi na te wymagania, *M.H. Khan i in.* przeprowadzili testy BAI kompozytów epoksydowo – węglowych z rdzeniem s pianki PVC o grubości 6,35 mm. Okładzinę stanowiły 3 warstwy tkaniny węglowej o splocie prostym i sekwencji układania 0/90°. Kompozyty schładzano do temperatur - 23°C, -30°C i -70°C. Test spadającego ciężaru wykonano z energią uderzenia 4 J i 8 J, i prędkością odpowiednio 1,52 m/s i 2,14 m/s, a test zginania trójpunktowego wykonywano z prędkością 0,5mm/min.

Eksperymentalne testy wykazały, że w najniższej temperaturze dominują mechanizmy uszkodzeń takie jak ścinanie rdzenia, pękanie włókien i całkowita perforacja warstwy wierzchniej. Wytrzymałość na zginanie zmniejszyła się wraz ze wzrostem zastosowanej energii uderzenia, a wielkość uszkodzeń zwiększa się wraz ze spadkiem temperatury [97].

2.2. Badania wytrzymałości na zginanie

Zastosowanie kompozytów strukturalnych jest korzystne w przenoszeniu obciążeń zginających i doskonale sprawdzają się w zastosowaniach narażonych na ścinanie międzywarstwowe lub wyboczenie. W celu określenia właściwości wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych stosuje się próbę zginania określoną przez normę PN-EN ISO 178 [81]. Test wykonuje się według schematu trój- lub czteropunktowego, wynikiem którego jest

zależność siły zginającej i odkształcenia. Schemat zginania trójpunktowego przedstawia Rysunku 2.9.



Rysunek 2.9. Schemat próby zginania trójpunktowego [81]

Uszkodzenia powstające wskutek delaminacji znacznie obniżają wskaźnik wytrzymałości na zginanie. Wielkością charakteryzującą skłonność materiału do rozwarstwień jest ścinanie międzywarstwowe (ILSS, ang. *Interlaminar Shear Strength*) obliczane według wzoru:

$$\tau_M = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{bh} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

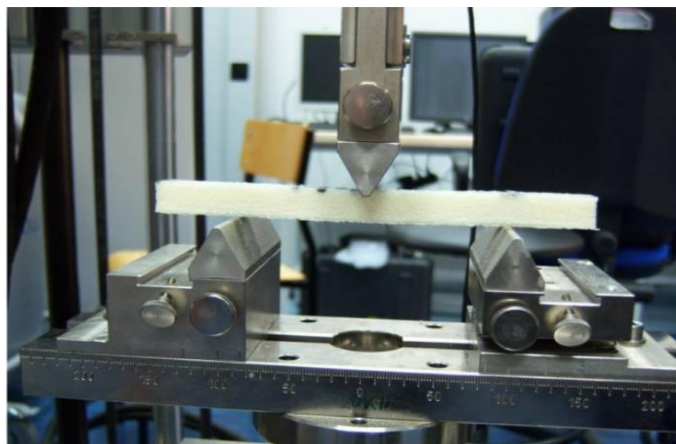
gdzie oznaczenia:

- F – maksymalna siła [N],
- b – szerokość próbki [mm],
- h – grubość próbki [mm].

Wiele prac badawczych koncentruje się na analizie zachowania kompozytów podczas próby zginania trójpunktowego [82, 83, 84, 85, 86, 87].

Cennych informacji na temat kompozytów typu sandwich dostarcza praca *A. Krzyżak* [88], w ramach której przygotowano epoksydowo-szklane kompozyty z rdzeniem piankowym próbki do trzypunktowego testu zginania (Rysunek 2.10.) zostały przygotowane zgodnie z normą PN-EN ISO 14125:2001. Jako wzmocnienie zastosowano tkaninę szklaną i matę szklaną, a kompozyty porównywano także pod kątem wpływu zastosowanej metody produkcji

(metoda ręczna, metoda z wykorzystaniem prasy i autoklaw). Badania wytrzymałości przy zginaniu przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia Zwick Roell Z100.



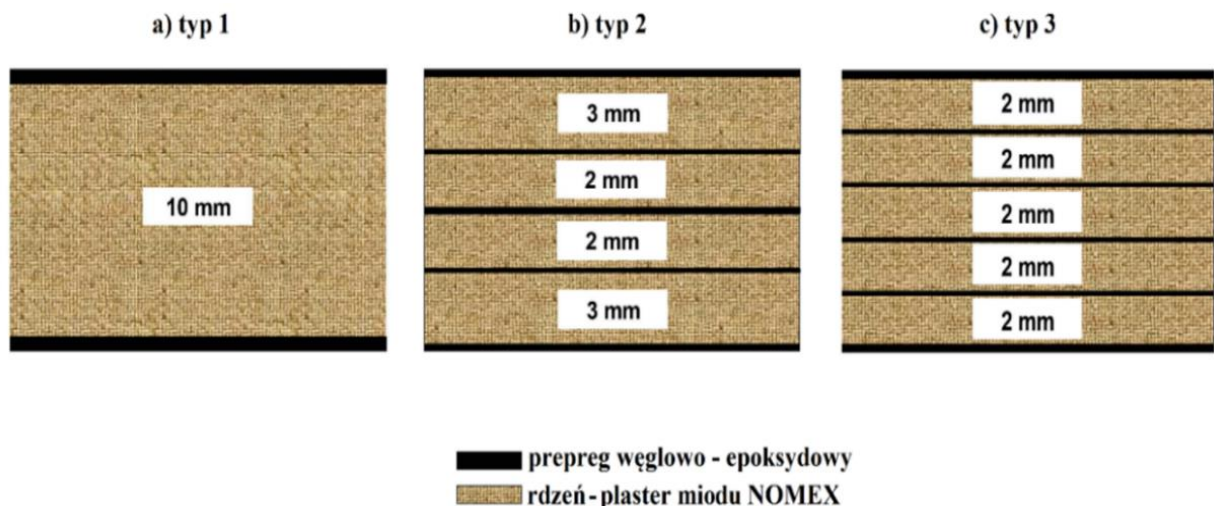
Rysunek 2.10. Schemat badania kompozytu podczas próby trójpunktowego zginania [88]

Kompozyty wzmocnione matą szklaną osiągają wyższe wartości modułu E. Największa sztywność i wytrzymałość na zginanie spowodowana jest prawdopodobnie większą ilością żywicy pomiędzy luźno rozłożonymi włóknami, podczas gdy ciasno związane włókna tkanin przyjmowały znacznie mniejszą ilość żywicy do przesączenia wzmocnienia. Zastosowane metody produkcji pokazują wyraźną przewagę dla zastosowania autoklawu, bowiem wytworzone materiały odznaczają się wizualnie jednorodnością i ciągłością strukturalną, podczas gdy w pozostałych dwóch metodach widoczne były w materiale uskoki powierzchniowe i pęcherze powietrza. Było to źródłem znacznego rozrzutu oznaczanych wartości i braku powtarzalności wyników.

Iyer i in. [89] również analizowali zachowanie się kompozytu warstwowego podczas prób zginania. W tym celu przygotowano kompozyty epoksydowe wzmocnione tkaniną szklaną E-glass o gramaturze 280g/m^2 jako arkusze wierzchnie oraz piankami o zamkniętych porach (poliuretanową i poliizocyjanurową) o grubości 25mm i gęstości $1,25\text{ kg/m}^3$. W celu uzyskania lepszej trwałości tkaninę szklaną układano w stosunku wagowym 3:1 i 4:1. Utwardzone próbki przygotowano do prób zginania zgodnie z normami ASTM D6272-10, D7264/7264M-15, D7249/D7249M – 06. Wyniki badań przy zginaniu wykazały, że próbki o stosunku wagowym 4:1 z rdzeniem z pianki poliizocyjanurowej przyjmują większe obciążenia, osiągają wyższą nośność kompozytu i mimo niewielkiego rozwarstwienia mają największy potencjał do optymalizacji w zastosowaniach lotniczych.

Wielu badaczy podejmowało próby analizy wpływu rodzaju rdzenia na właściwości kompozytów. Jednym z nich był *W. Harizi* [90], który w swojej pracy wykonał kompozyty przekładkowe na bazie żywicy polifenylosulfonowej (PPSU) wzmocnionej dwoma warstwami tkaniny węglowej. Zastosowano rdzeń Nomex, blachy aluminiowe i polieteroimid PEI. Zastosowano rdzenie o dwóch gęstościach (48 i 64 kg/m³) i różne topologie. Podczas prób zginania mierzono ugięcie próbek oraz obserwowano powstające uszkodzenia. Wyniki wykazywały bardzo różnorodne obserwacje. Największą nośność posiadały kompozyty z rdzeniem Nomex o gęstości 48 kg/m³, natomiast najniższe wartości osiągnęły kompozyty z rdzeniem PEI 48 kg/m³ (różnica 31,67%). Kompozyt z rdzeniem PEI o gęstości 64 kg/m³ osiąga najwyższą wartość ugięcia oraz najlepszą zdolność pochłaniania energii. Ważne było również to, że każdy z kompozytów należało analizować pod kątem przyszłego zastosowania. W konstrukcjach wymagających większej sztywności zalecono stosowanie rdzenia z blachy aluminiowej, a w aplikacjach wymagających większej ciągliwości rdzeń termoplastyczny, gdzie ugięcie i zdolność pochłaniania energii są znacznie lepsze.

Podobnie jak w przypadku badań odporności kompozytu na uderzenia, tak w przypadku trójpunktowego zginania niezwykle istotną rolę ma ilość warstw lub funkcjonalne ich stopniowanie. Rysunek 2.11. przedstawia konfigurację kompozytów poddanych badaniom i analizie przez *K. Naresh* i *W.J. Cantwell* [91].



Rysunek 2.11. Przykłady konfiguracji kompozytów warstwowych [91]

Każdy z kompozytów zawierał dokładnie 8 warstw prepegu, jednak ze względu na stopniowanie rdzenia i ich zróżnicowane rozmieszczenie, warstwy okładzinowe miały różne

grubości. Test zginania trójpunktowego został wykonany na maszynie Instron 5969 przy prędkości 1mm/min. Średnie wyniki zestawiono w Tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Maksymalne obciążenie i przemieszczenie kompozytów z rdzeniem o strukturze plastra miodu [91]

	Maksymalne obciążenie (N)		
	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Wartość średnia	541,3 ± 32,81	263,8 ± 1,20	278 ± 1,27
	Przemieszczenie (mm) przy maksymalnym obciążeniu		
	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Wartość średnia	10,38 ± 0,72	5,68 ± 0,92	3,65 ± 0,37

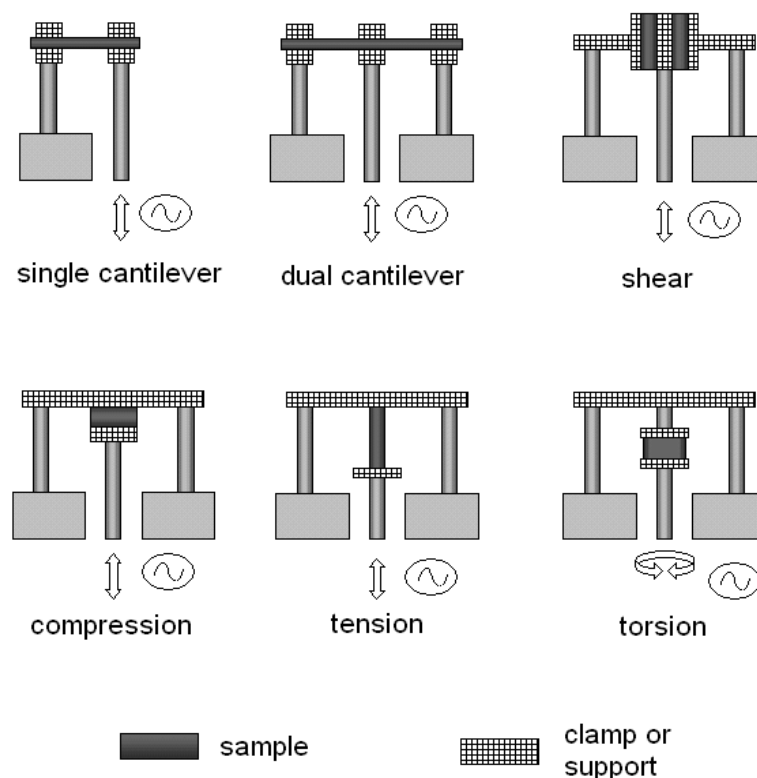
Dla kompozytu typu 1 obserwowano niestabilny zakres pomiaru, w którym odnotowano spadek obciążenia po osiągnięciu wartości 540 N. Zjawisko przypisuje się gwałtownemu ścinaniu jednowarstwowego rdzenia. W przypadku kompozytów typu 2 zaobserwowano pseudo-ciągły tryb uszkodzenia, zapobiegający gwałtownemu spadkowi obciążenia, natomiast kompozyt typu 3 wykazywał kombinację obu typów materiałów. Wyniki, które uzyskano wskazały na wyższą sztywność zginania i wyższe wartości obciążenia zginającego dla kompozytu typu 1, jednak biorąc pod uwagę mechanizm uszkodzenia był on gwałtowny, podczas gdy w kompozytach typu 2 i 3 obserwowano progresywny mechanizm uszkodzeń. Powoduje to, że struktury ze stopniowanym rdzeniem wykazują zdolność do progresywnego przenoszenia obciążeń, opóźnienia propagacji pęknięć oraz kruszenia rdzenia, co stanowi potencjał zastosowania kompozytów między innymi w konstrukcjach lotniczych.

Testom zginania poddawane były także kompozyty warstwowe o osnowie metalowej grubości 1,5 mm z rdzeniem w postaci pianki poliuretanowej [92]. Wykonano 3 rodzaje kompozytów, w strukturze których zastosowano stopniowanie rdzenia - odpowiednio z trzema warstwami o gęstości względnej 8,5 %, 22,2 % i 36,4 %, dwoma warstwami o gęstości względnej 8,5 % i 36,4 % i jedną warstwą o gęstości względnej 22,2 %. Całkowita grubość warstwy rdzenia w każdym przypadku wynosiła 30 mm. Test trójpunktowego zginania wykazywał również, że gęstość rdzenia, jego grubość oraz układ ze stopniową zmianą gęstości są najważniejszymi parametrami wpływającymi na zachowanie kompozytu, w którym dominującym mechanizmem uszkodzeń jest ścinanie rdzenia, występujące niezależnie od sekwencji układania warstw [93].

2.3. Inne metody badań właściwości kompozytów

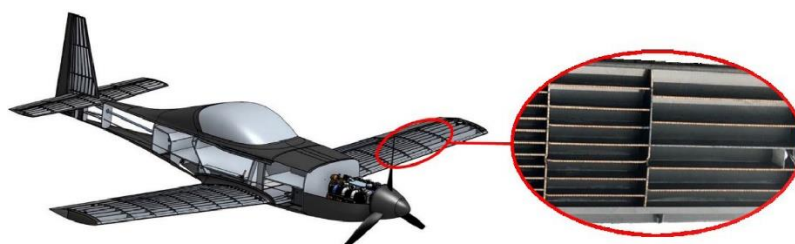
Dynamiczna analiza mechaniczna (ang. *Dynamic Mechanical Analysis*, DMA) jest metodą charakteryzującą właściwości mechaniczne materiałów jednocześnie w funkcji czasu, częstotliwości i temperatury [99, 148]. Konfiguracja testu opiera się na 6 głównych trybach badania, które schematycznie przedstawiono na Rysunku 2.12. Przyłożone do próbek podczas DMA sinusoidalnie oscylujące obciążenie sprawia, że powstaje odpowiadające mu oscylujące odkształcenie. Materiały nieidealnie sprężyste wykazują w tym względzie pewne opóźnienie. Stosunek maksymalnej wartości naprężenia do maksymalnego odkształcenia daje moduł zespolony (E^*), który składa się z modułu zachowawczego (E') charakteryzującego sztywność materiału oraz modułu stratności (E'') opisującego własności lepkosprężyste [100, 101].

Charakterystyka mechaniczna kompozytów warstwowych uzyskiwana dzięki testom DMA sprawia, że możliwe jest prześledzenie zachowania materiału w szerokim zakresie temperatur oraz zmiennych warunków zmęczeniowych, będących odzwierciedleniem rzeczywistych warunków eksploatacji.



Rysunek 2.12. Tryby testu DMA [100]

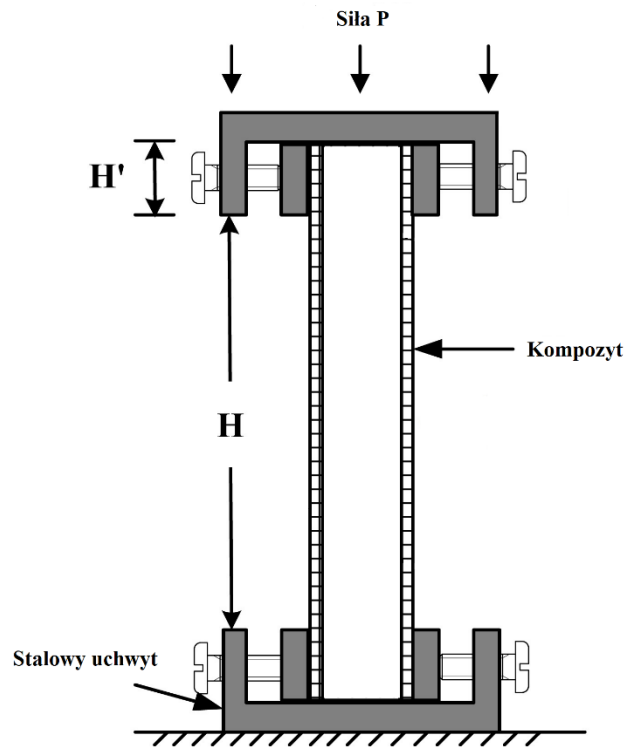
Dane literaturowe [102 - 106] dostarczają informacji o użyteczności stosowania badania DMA w badaniach kompozytów przekładkowych. Jednym z przykładów takich badań była praca przeprowadzona przez *A. Redmann i in.* [106], której celem było przedstawienie potencjału zastosowania badania DMA do pomiarów zdolności tłumienia ($\tan \delta$) oraz oceny jakości wytwarzania struktur przekładkowych. Dynamicznej analizie mechanicznej poddano epoksydowe kompozyty warstwowe ze wzmocnieniem z włókna węglowego oraz aramidowych rdzeniach Nomex i rdzeniach aluminiowych o strukturze plastra miodu. Pomiar o częstotliwości od 0,1-100Hz i odkształceniu statycznym 0,25, 0,5 i 1% przeprowadzono w celu odzwierciedlenia zachowania kompozytów w warunkach lotu (Rysunek 2.13.).



Rysunek 2.13. Przykład zastosowania struktur przekładkowych w statkach powietrznych [106]

W oparciu o wyniki udowodniono, że badanie DMA jest skuteczną formą charakterystyki zachowań kompozytów warstwowych w różnych warunkach temperatury, częstotliwości i odkształcenia. Jest to ważne w kontekście zapewnienia prawidłowego procesu wytwarzania i możliwości testowania wybranych odcinków całej konstrukcji w warunkach eksploatacji.

W związku z nietypowym zachowaniem kompozytów warstwowych pod wpływem różnego rodzaju obciążeń i nieprzewidywalnymi w dużej mierze mechanizmami uszkodzeń, nie wszystkie rodzaje badań są dedykowane dla tego rodzaju struktur. Jednak ze względu na specyfikę zastosowań kompozytów warstwowych konieczna jest ich charakterystyka w warunkach eksploatacji i próba modyfikacji, aby zachować jak najwyższą jakość i parametry wytrzymałościowe całej konstrukcji. Stąd szczególna rola przeprowadzania testów ściskania krawędziowego (Rysunek 2.14.) w ramach zastosowań takich jak opakowania czy obudowy urządzeń, aby w możliwie największy sposób zapobiegać negatywnym skutkom obciążeń działających na zewnątrz konstrukcji, chroniąc wewnętrzne przedmioty osłaniane przez te struktury.



Rysunek 2.14. Schemat testu ściskania krawędziowego kompozytów przekładkowych według normy ASTM C364-99 [107]

Jednym z przykładów badań ściskania krawędziowego była praca *H.Lei i in.*, którzy poddali testom kompozyty wzmocnione jednokierunkową tkaniną z włókna szklanego i rdzeniem z ekspandowanej pianki PVC Mycell M060 o grubości 20mm i gęstości 60g/cm^3 . Kompozyty posiadały różne wymiary geometryczne – szerokość w zakresie $\sim 15,7$ mm do 90 mm, a długość wahała się od $\sim 68,9$ mm do 170,2 mm. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych stwierdzono, że wraz ze wzrostem szerokości znacznie spada krytyczne obciążenie ściskające, a okładzina wykazywała liniowo elastyczne zachowanie, aż do osiągnięcia maksymalnej wartości naprężenia (290 MPa). Wyboczenie pojawiające się w każdym z badanych kompozytów było głównym mechanizmem uszkodzenia, postępującym wraz ze wzrostem długości [107].

Literatura dostarcza wiele badań teoretycznych i eksperymentalnych dotyczących ściskania kompozytów typu sandwich [108, 109, 110], jednak praktycznie nie spotkano się z analizą badań dotyczącą ściskania krawędziowego kompozytów ze stopniowanym rdzeniem. Rozpoczęcie nowego kierunku badań pod tym kątem pozwoliłoby dopełnienie charakterystyki kompozytów FGC i możliwości ich zastosowania w niestandardowych dotąd konstrukcjach inżynierskich.

Do uzyskania pełnej charakterystyki właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych kompozytów, które mają być zastosowane jako osłona baterii w samochodach elektrycznych, potrzeba znacznie bardziej kompleksowego podejścia do badanych właściwości i analizy uzyskanych wyników. Pomimo tego, że materiały kompozytowe są znane od wielu lat, nie określono nadal jednoznacznie ważnych zależności między składem kompozytu a mechanizmami zniszczenia występującymi podczas testów udarności. Testy te warto również zestawiać z innymi badaniami takimi jak wytrzymałość na zginanie czy ściskanie, aby móc w pełnym zakresie odzwierciedlić warunki eksploatacji. Istotnym wydaje się być również to, że istnieje niewiele danych literaturowych dotyczących stosowania modyfikacji chemicznej osnowy kompozytów warstwowych, będącej czynnikiem wpływającym na poprawę właściwości materiału. Znalezienie tej luki badawczej pozwoliło na realizację pracy i sformułowanie celu i celów cząstkowych. Dzięki odpowiedniemu doborowi modyfikatora w połączeniu z osnową epoksydową, wzmocnieniem z tkaniny szklanej i lekkim, elastycznym rdzeniem otrzymano kompozyt o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych i wytrzymałościowych przy niskich kosztach produkcji, a zaproponowana procedura badań eksperymentalnych miała na celu określenie wpływu modyfikacji, składu i korelacji między warstwami kompozytu na wybrane cechy wytrzymałościowe oraz mechanizmy zniszczenia.

3. CELE PRACY

Głównym celem pracy było zaprojektowanie i wytworzenie oraz analiza mechanizmów uszkodzeń, charakterystyka wytrzymałościowa epoksydowo – szklanego kompozytu warstwowego ze zmodyfikowaną osnową i cienkim, porowatym rdzeniem oraz zaproponowanie bazy do stworzenia procedury badawczej służącej kompleksowej charakterystyce wytrzymałościowej i mechanicznej kompozytu do zastosowania go jako struktura ochronna w samochodach elektrycznych. Do osiągnięcia celu głównego konieczne było zrealizowanie celów cząstkowych, tj.:

- Analiza i opracowanie literaturowe na temat kompozytów energochłonnych, materiałów stosowanych do ich wytworzenia, badań wytrzymałościowych oraz kierunków ich zastosowania.
- Otrzymanie materiału warstwowego z modyfikowaną chemicznie osnową stanowiącą element nowości jako czynnik kształtujący właściwości pochłaniania energii uderzenia.
- Charakterystyka ilościowego i jakościowego wpływu doboru materiałów i modyfikacji osnowy na właściwości kompozytu w zaproponowanym zestawie badań eksperymentalnych, na które składały się udarność, trójpunktowe zginanie, ściskanie, tolerancja na uszkodzenia, odporność na przebicie i wytrzymałość resztkowa oraz dynamiczna analiza mechaniczna warstwy kompozytowej w zakresie ujemnych i wysokich temperatur.
- Analiza mechanizmów uszkodzeń epoksydowo – szklanych kompozytów warstwowych wielowarstwowym z lekkim porowatym rdzeniem oraz wzajemnego oddziaływania komponentów pod wpływem obciążeń występujących podczas zaproponowanych testów eksperymentalnych.

W celu charakterystyki materiału na osłonę baterii samochodów elektrycznych przeprowadzono zestaw badań eksperymentalnych, które stanowiły część procedury badawczej przedstawionej na Rysunku 3.1.



Rysunek 3.1. Schemat procedury badań eksperymentalnych

4. METODYKA BADAŃ KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH

4.1. Założenia i warunki badań

Realizacja doświadczalnej części pracy obejmowała wytworzenie epoksydowo-szklanych kompozytów przekładkowych z rdzeniem w postaci pianki XPS z modyfikowaną poliuretanem osnową i dwoma rodzajami tkanin szklanych oraz przeprowadzenie wybranych na podstawie literatury badań wytrzymałościowych w zależności od ilościowych i jakościowych składów materiałowych. Badania udarności metodą Charpy'ego w dwóch kierunkach uderzenia (płaszczyznowym i krawędziowym) wykonano dla kompozytów jedno- i wielowarstwowych. Dodatkowo, dla kompozytów ze stopniowanym rdzeniem wykonano testy odporności na przebicie metodą BAI, trójpunktowego zginania, tolerancji na uszkodzenia i ściskania krawędziowego, przeprowadzone w temperaturze pokojowej. Analizy tej nie zastosowano dla kompozytów jednorodzeniowych, ze względu na przewidywalną słabość materiału poddanego uderzeniu punktowemu, którą potwierdzono eksperymentalnie, w efekcie czego nastąpiła całkowita perforacja materiału. Wykonano także dynamiczną analizę mechaniczną okładziny w zakresie temperatur od -120°C do 140°C , które dopełniały charakterystykę struktury kompozytu i służyły potwierdzeniu słuszności wyboru zastosowanych komponentów.

Założenia obejmowały wytworzenie kompozytu przekładkowego przy jednoczesnym zachowaniu maksymalnej grubości kompozytu do 10 ± 1 mm. Wiele prac badawczych wskazuje na zastosowanie rdzeni o grubości ok. 15 – 20 mm (jako jedna warstwa). W przygotowanym kompozycie wielowarstwowym zastosowano rdzeń o łącznej grubości 9 mm, rozłożonego na 3 stopniowane warstwy. Takie rozwiązanie wynika z faktu, że zwiększenie ilości warstw ma korzystny wpływ na właściwości kompozytu [16]. W celu wstępnego porównania i podkreślenia zasadności wyboru struktury kompozytu wykonano również kompozyty składające się z jednej warstwy rdzenia i dwóch warstw okładziny. Dodatkowo, w celu scharakteryzowania warstwy okładziny, wykonano dynamiczną analizę mechaniczną, ponieważ jako jedyny komponent kompozytu była modyfikowana. Pozostałe materiały zostały wykorzystane bez modyfikacji. Wobec tego założono tzw. „efekt synergii”, ponieważ zachodzące reakcje chemiczne i procesy fizyczne mogą generować unikalne, niespodziewane odpowiedzi mechaniczne kompozytu.

Pomiar czasu żelowania osnowy określono organoleptycznie. Używając termometru bagnetowego, mieszano kompozycje w temperaturze pokojowej aż do momentu sieciowania.

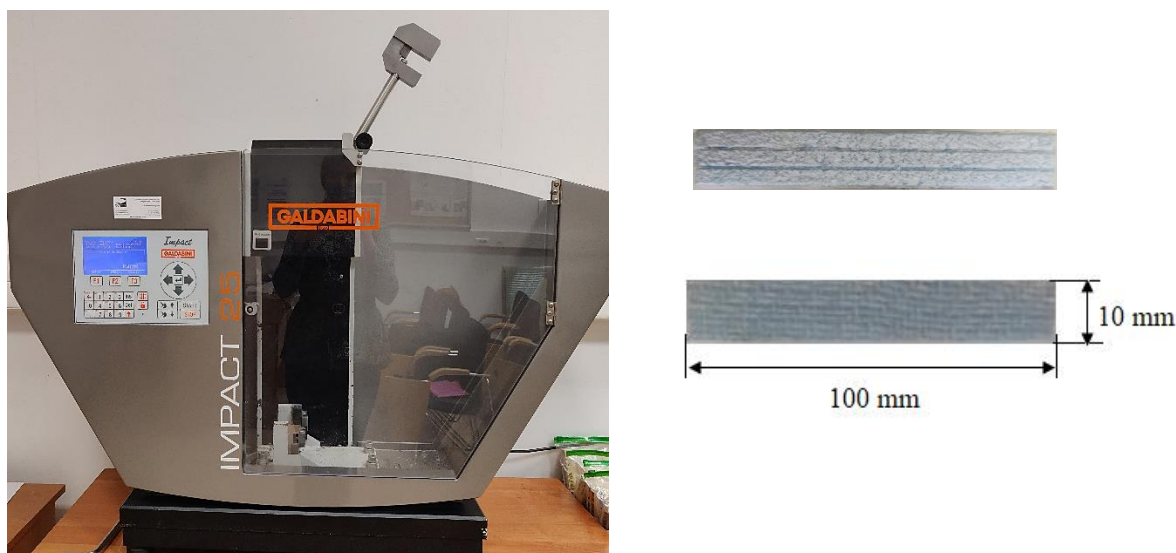
Dla gotowych kompozytów oznaczono gęstość, obliczając wartości według wzoru :

$$d = m / V \quad (10)$$

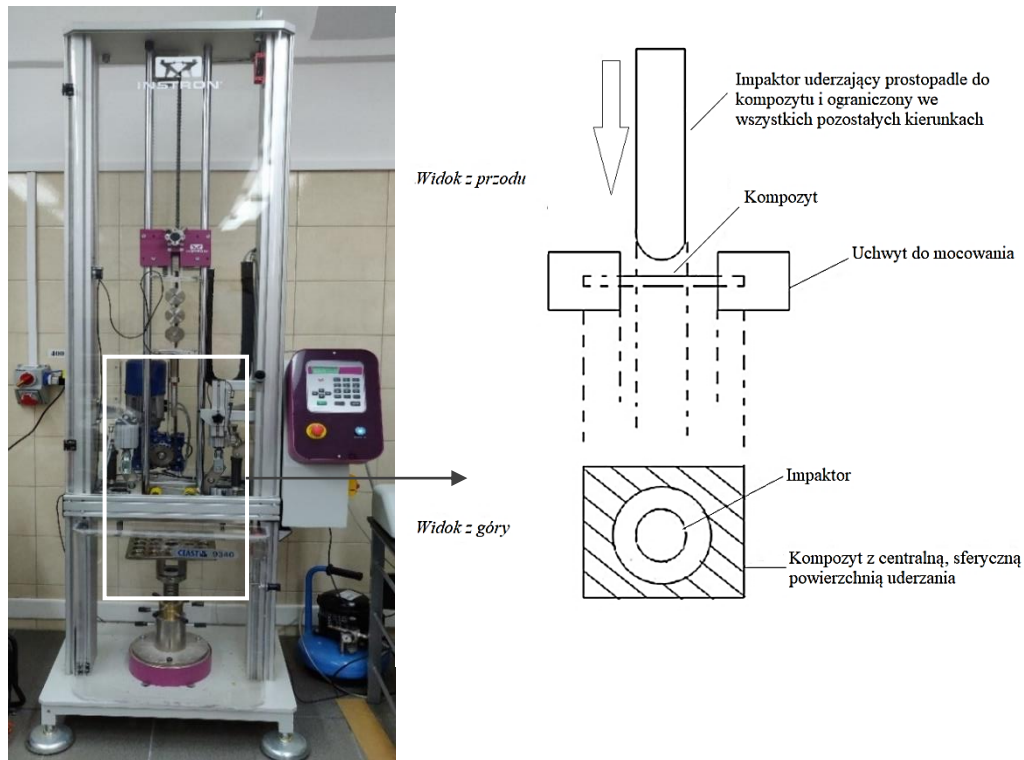
gdzie: m – masa próbki, V – objętość obliczona na podstawie wymiarów badanej próbki.

Dynamiczną analizę mechaniczną warstw okładziny przeprowadzono przy użyciu urządzenia DMA Q800 (TA Instruments, USA). Próbki o wymiarach 40 x 15 x 1 mm badano na wspornikach przy częstotliwości 1 Hz w zakresie temperatur od -120 do 140°C (szybkość nagrzewania: 4°C/min). Rejestrowano moduł zachowawczy i moduł stratności oraz tangens δ w funkcji temperatury.

Testy udarności próbek kompozytowych o przekroju prostokątnym (bez karbu) badano metodą Charpy'ego zgodnie z normą ISO 179 dla materiałów warstwowych [62]. Wymiary próbek wynosiły 100 x 15 i grubość zależną od ilości warstw rdzenia. Próbki uderzano młotem wahadłowym o energii 7,5J z wykorzystaniem aparatury Impact25 (Galdabini, Cardano al Campo (VA), Italy) o rozstawie podpór 75 mm, aby młot uderzał dokładnie w środek próbki (Rysunek 4.1.). Wyniki stanowiły średnią arytmetyczną z 3 pomiarów. Kompozyty uderzano w dwóch kierunkach: prostopadłe (uderzenie płaszczyznowe) i równoległe (uderzenie krawędziowe) do ułożenia warstw.

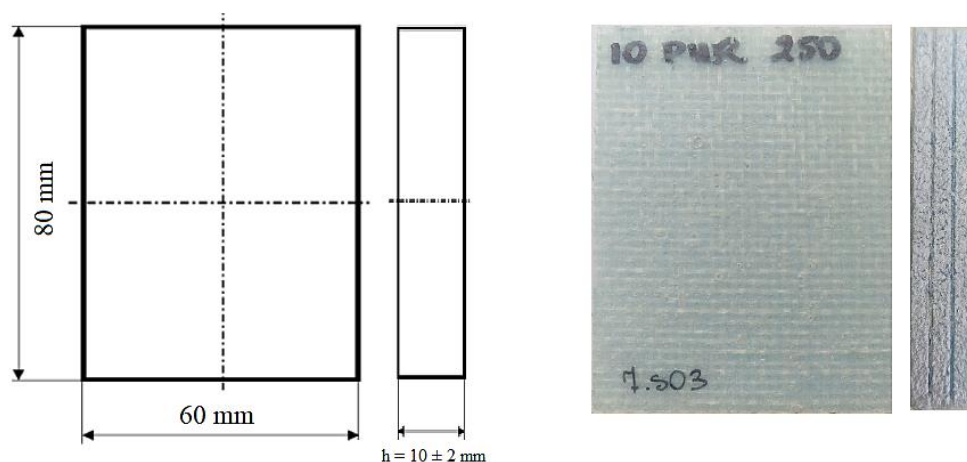


Rysunek 4.1. Aparat Impact25 do badań udarności metoda Charpy'ego i próbki do prostopadłego i krawędziowego testu udarności [fot. JM]

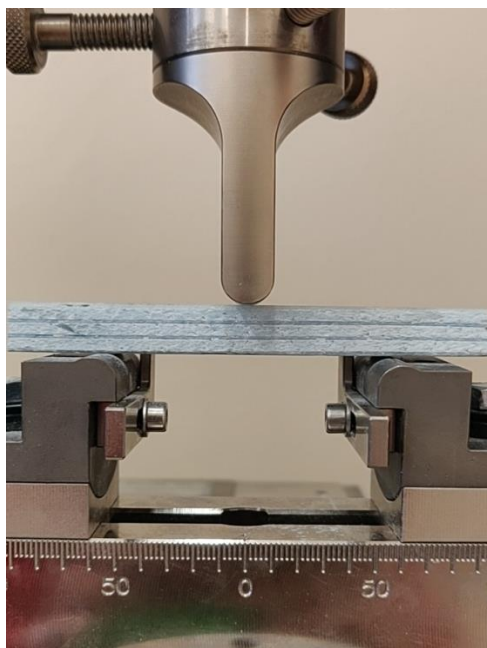


Rysunek 4.2. Maszyna wytrzymałościowa Instron CEAST 9340 [fot. JM] i schemat badania udarności metoda spadającego ciężaru (widok z przodu i z góry) [149]

Badanie udarności metodą spadającego ciężaru wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron CEAST 9340 (Rysunek 4.2.). Próbki umieszczane były swobodnie na cylindrycznej podstawie z otworami. Schemat próbek do badań przedstawiono na Rysunku 4.3. Półkulisty impaktor przymocowany wraz z obciążnikiem o masie 2,65 kg spadał z wysokości 385 mm z prędkością 2,74 m/s, aby wygenerować uderzenie o wartości 10J. Próby wykonano w temperaturze pokojowej. Wyniki stanowiły średnią arytmetyczną z 3 pomiarów.



Rysunek 4.3. Próbki do testów udarności metodą spadającego ciężaru



Rysunek 4.4. Próbką przed rozpoczęciem badania zginania trójpunktowego [fot. JM]

Próbkę zginania trójpunktowego zginania kompozytów przekładkowych wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 14125:2001 [146] przy użyciu aparatu wytrzymałościowego Zwick/Roell Z010 (Ulm, Niemcy). Prostokątne próbki o długości 100 mm, szerokości 15 mm i grubości 10 mm (± 2 mm) umieszczano na podporach o rozstawie 60 mm (Rysunek 4.4). Kompozyty zginano ze stałą prędkością 5 mm/min. Wyniki stanowiły średnią arytmetyczną z 3 pomiarów. Wyznaczono moduł zginania, maksymalne odkształcenie przy zginaniu oraz wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe.

Wytrzymałość resztkową kompozytów określono metodą BAI (ang. *Bending After Impact*). Jest ona bezpośrednio związana z próbą udarności metodą spadającego ciężaru i wytrzymałości na zginanie. Próbkę kompozytu została w pierwszej kolejności poddana uderzeniu z odpowiednią energią, a następnie przeprowadzono na niej próbę zginania. Wartości referencyjne stanowiły próbki poddane tylko próbie zginania (ang. *Bending Only*). Wyniki stanowiły średnią arytmetyczną z 3 pomiarów. Analiza wyników obejmowała procentowy spadek wartości właściwości takich jak energia przy zniszczeniu, moduł zginania, maksymalna siła zginająca i odkształcenie przy zginaniu.

Przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z010 (Ulm, Niemcy) wykonano eksperymentalną próbę ściskania krawędziowego kompozytów warstwowych zgodnie z normą EN ISO 604 [157]. Ściskano próbki prostopadłościennych o wymiarach 50 x 15 mm i grubości 10 mm (± 2 mm). Pomiar prowadzono przy stałej prędkości ściskania 1 mm/min. Wyniki stanowiły średnią arytmetyczną z 3 pomiarów.

4.1.1. Dobór materiałów

Materiały wykorzystane do wytworzenia energochłonnych kompozytów przekładkowych dobrano zgodnie z kryteriami przedstawionymi w podrozdziale 1.4.

Na osnowę kompozytu zastosowano płynną żywicę epoksydową Epidian 5 utwardzaną dedykowanym utwardzaczem Z1. Tabela 4.1. przedstawia krótką charakterystykę tych materiałów.

Tabela 4.1. Charakterystyka materiałów zastosowanych na osnowę kompozytu [138]

SUROWIEC	NAZWA HANDLOWA	CHARAKTERYSTYKA	PRODUCENT
Żywica epoksydowa	EPIDIAN 5	Lepkość w temp. 25°C: 20,000–30,000 mPa·s	„CIECH – Sarzyna S.A.”, Nowa Sarzyna, Polska
		Równoważnik epoksydowy: 196–208 g/mol	
		Liczba epoksydowa: 0.480–0.510 mol/100g	
		Gęstość w 20°C: 1.17g/cm ³	
Utwardzacz	Z1 (trietylenoterraamina)	Gęstość w 25°C: 0,979- 0,985 g/cm ³	

Żywica ma postać bursztynowej lepkiej cieczy. Po utwardzeniu charakteryzuje się bardzo niskim skurczem w warunkach sieciowania oraz możliwością utwardzania w temperaturze pokojowej. Posiada bardzo dobrą adhezję do większości materiałów konstrukcyjnych. Cechuje się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, dielektrycznymi oraz wysoką odpornością na działania odczynników chemicznych czy krótkotrwałe działanie temperatur do 80°C. Jako utwardzacz zastosowano płynny utwardzacz poliamidowy Z1 w stosunku 12 g utwardzacza na 100g żywicy epoksydowej. Sieciowanie w temperaturze pokojowej wynosi ok. 35 minut, natomiast po 48 godzinach uzyskuje się ok.80 - 90% stopnia utwardzenia. Całkowite utwardzenie dokonuje się w ciągu 7 - 14 dni, jednak poprzez zastosowanie podwyższonej temperatury proces ten można znacznie skrócić [138].

Kompozyty różniły się rodzajem (splotem) i gramaturą tkaniny szklanej pozyskanej od polskich producentów tkanin szklanych – Krosglass S.A. i Tkaniny Techniczne S.A. Tabela 4.2. przedstawia charakterystykę materiałów wykorzystanych jako wzmocnienie.

Tabela 4.2. Charakterystyka materiałów zastosowanych jako wzmocnienie [139, 140]

SUROWIEC	CHARAKTERYSTYKA	PRODUCENT
Tkanina szklana	250 g/m ² (plain)	Tkaniny Techniczne S.A., Pabianice, Polska
	324 g/m ² (twill)	Krosglass S.A., Krosno, Polska

Typ splotu tkaniny ma istotny wpływ na właściwości kompozytu. Splot płócienny (*plain*) charakteryzuje się naprzemiennym przeplataniem włókien, przez co przesączona później tkanina jest mocno związana, sztywna i gwarantuje dobrą stabilność wzmocnienia. Jednak w wielu zastosowaniach istnieje potrzeba, aby tkanina było luźniej związana, łatwiej odkształcalna, a przez to lepiej układająca się na krzywiznach i załamaniach, wykazująca ostatecznie większą elastyczność. Takimi cechami charakteryzuje się splot skośny (*twill*), w którym nici wątku przechodzą nad jedną nicią osnowy, a następnie pod większą ich ilością ze skokiem w prawo lub lewo [139, 140].

Dodatkowa formą wzmocnienia kompozytu, która miała na celu poprawę właściwości wytrzymałościowych była modyfikacja żywicy epoksydowej prepolimerem poliuretanowym z zablokowanymi grupami izocyjanianowymi Desmocap 12 (Tabela 4.3.).

Tabela 4.3. Charakterystyka modyfikatora [141]

SUROWIEC	NAZWA HANDLOWA	CHARAKTERYSTYKA	PRODUCENT
POLIURETAN (prepolimer poliuretanowy z zablokowanymi grupami izocyjanianowymi)	DESMOCAP 12	Lepkość w temp. 25°C: 23,000 - 43,000 mPa·s	„Bayer Material Science”, Leverkusen, Niemcy
		Zawartość zablokowanych grup NCO: 1.80 - 2.10 %	
		Gęstość w 25°C: 1,04g/cm ³	

Obecność poliuretanowych segmentów elastycznych ma znaczący wpływ na poprawę odporności na propagację pęknięć, co jest bezpośrednio związane ze wzrostem elastyczności

kompozytu. Istotny wpływ na udarność i wzrost wytrzymałości ma w tym względzie tworzenie się wzajemnie przenikających się sieci polimerowych (IPN) [142].

Jako rdzeń kompozytu użyto cienkiej płyty ekstrudowanego polistyrenu (XPS). Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością, a dodatkowo bardzo dobrymi właściwościami termoizolacyjnymi. Ponadto, materiał jest niedrogi i łatwo dostępny, posiada tzw. właściwości samogasnące, można go także poddawać recyklingowi (Tabela 4.4.).

Tabela 4.4. Charakterystyka rdzenia [143]

SUROWIEC	NAZWA HANDLOWA	CHARAKTERYSTYKA	PRODUCENT
Ekstrudowany polistyren (XPS)	Płyty ekstrudowanego polistyrenu XPS	Gęstość: 0,38 kg/m ³	CEZAR Przedsiębiorstwo Produkcyjne, Ełk, Polska
		Grubość: 3 mm	
		Deklarowane naprężenie ściskające przy 10% odkształceniu względnym: 60 kPa	

4.1.2. Przygotowanie osnowy

Na podstawie wcześniejszych badań eksperymentalnych i analizy otrzymanych wyników z zastosowaniem PU w zakresie od 0 - 20% oraz analizy literatury [42] wytypowano skład osnowy zawierający 0, 5, 10 % PU, zachowując równowagę pomiędzy poprawą właściwości mechanicznych kompozytu a minimalizowaniem strat materiałowych będących efektem osiągnięcia tylko nieznacznej poprawy parametrów wytrzymałościowych.

Odpowiednie ilości EP i PU (Tabela 4.5.) umieszczano w zlewce o pojemności 250 cm³, dokładnie mieszano i przy użyciu homogenizatora IKA T18 (Staufen, Niemcy) mieszano kompozycję przez 10 minut. Następnie przeprowadzono homogenizację ultradźwiękową prowadzono w aparacie Hielscher UP 200H (Teltow, Niemcy) przez 10 min. Po zakończeniu mieszania dodawano stechiometryczną ilość utwardzacza. Mieszanie kontynuowano przez 5 minut.

Tabela 4.5. Skład ilościowy składników do otrzymania osnowy

Rodzaj kompozytu	Epidian 5 (EP) [g]	Desmocap 12 (PU) [g]	Utwardzacz Z1 [g]
EP0	89,3	-	10,7
EP5PU	84,8	5	10,2
EP10PU	80,4	10	9,6

4.1.3. Przygotowanie kompozytu

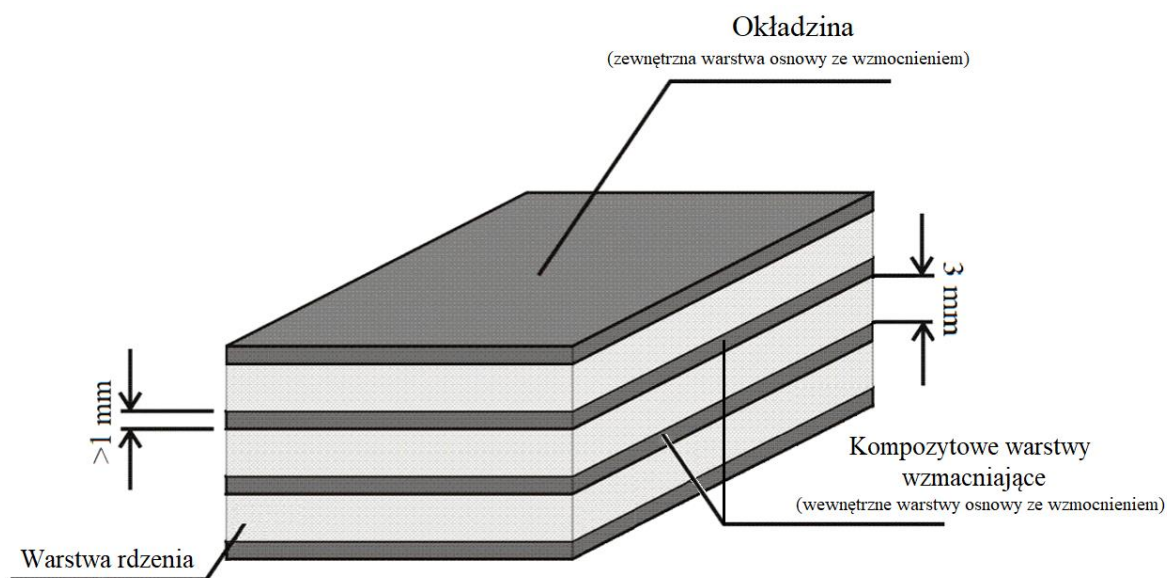
Kompozyty warstwowe wykonano metodą laminowania ręcznego i przygotowano według następującej procedury:

1. Pierwsza warstwa - przesączenie tkaniny żywicą
 - część osnowy (przygotowanej według procedury opisanej w podrozdziale 4.1.2. wylano wzdłuż krótkiego brzegu formy i rozprowadzono na całej długości formy tworząc cienką, równomierną warstwę;
 - tkaninę umieszczono na żywicy i dociskano wałkiem, aby możliwie najdokładniej usunąć powstające pęcherze powietrza;
 - rozprowadzono drugą cienką warstwę osnowy.
2. Na tak przygotowaną warstwę okładziny umieszczano cienką płytę porowatego, elastycznego rdzenia (XPS).
3. Na warstwie rdzenia ponownie powtarzano procedurę zgodnie z punktem 1. Tak przygotowano kompozyt składający się z dwóch warstw okładziny i jednej warstwy rdzenia. Aby przygotować kompozyt wielowarstwowy (3 warstwy rdzenia i 2 warstwy okładziny i 2 kompozytowe warstwy wzmacniające) powtarzano punkty 1. – 3. aż do uzyskania odpowiedniej liczby warstw. Tak przygotowane kompozyty przykrywano metalową płytą obciążano z zastosowaniem docisku o wartości 0,3 MPa i pozostawiano na 24 godziny. Po tym czasie usuwano obciążnik i pozostawiono kompozyty na 7 dni do całkowitego utwardzenia w temperaturze pokojowej. Przybliżone wartości zastosowanych komponentów do przygotowania jednej warstwy kompozytu zestawiono w Tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Przybliżona wartość zastosowanych komponentów do przygotowania jednej warstwy kompozytu (okładzina-rdzeń-okładzina)

RODZAJ KOMPOZYTU	RDZEŃ (XPS) [m ²]	TKANINA SZKLANA [m ²]	EP [g]	PU [g]	Z1 [g]
EP0250GF/XPS	~ 0,1	~ 0,2	133,9	-	16,1
EP0324GF/XPS					
EP5PU250GF/XPS	~ 0,1	~ 0,2	127,2	7,5	15,3
EP5PU324GF/XPS					
EP10PUR250/XPS	~ 0,1	~ 0,2	120,6	15	14,4
EP10PUR324/XPS					

Łącznie wytworzono sześć rodzajów kontrolnych płyt kompozytowych (Tabela 4.6) z których następnie przygotowano próbki do poszczególnych badań eksperymentalnych. Na Rysunku 4.5. przedstawiono schemat wytworzonego kompozytu warstwowego. Kompozyt z jedną warstwą rdzenia składał się wyłącznie z zewnętrznych okładzin oraz warstwy rdzenia (nie zawierał wewnętrznych warstw wzmacniających).

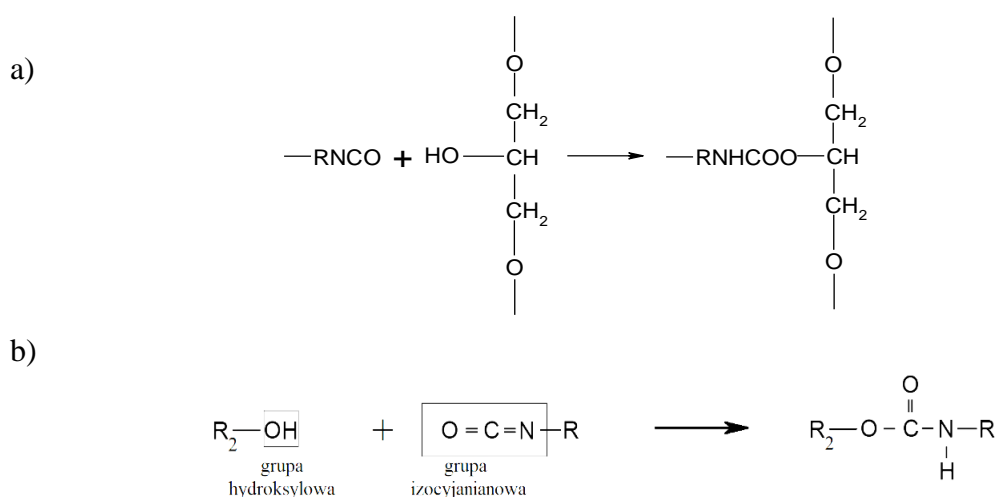


Rysunek 4.5. Schemat kompozytu warstwowego z 3 warstwami rdzenia XPS

5. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ MECHANICZNYCH KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH

5.1. Weryfikacja składu kompozytu

Badania eksperymentalne dotyczące kompozytów epoksydowo – szklanych z rdzeniem XPS wskazują na innowacyjny charakter i potencjał zastosowań w wielu konstrukcjach inżynierskich. Elementem nowości w przedstawionej pracy jest modyfikacja chemiczna osnowy oraz wstępna weryfikacja składu kompozytu z wykorzystaniem dynamicznej analizy mechanicznej. Na podstawie dotychczasowych badań eksperymentalnych z zastosowaniem PU w zakresie od 0 - 20% i analizy literatury [42] zastosowano modyfikację osnowy w ilości wag. 0 - 10% PU, zachowując równowagę pomiędzy poprawą właściwości mechanicznych kompozytu a minimalizowaniem strat materiałowych będących efektem osiągnięcia tylko nieznacznej poprawy parametrów wytrzymałościowych. W większości prac badawczych analizowanych na etapie studiom literaturowego obserwowano trend stosowania jako wzmocnienie osnowy wyłącznie włókien lub napełniaczy proszkowych. Modyfikacja ciekłym polimerem zastosowana w niniejszej rozprawie doktorskiej doprowadziła do wytworzenia z wzajemnie przenikających się sieci polimerowych (Rys. 5.1. a)) między reaktywnymi grupami – OCN w łańcuchu strukturalnym poliuretanu a żywicą. Warty odnotowania był fakt, że poliuretan może tworzyć wiązania chemiczne także z grupami hydroksylowymi obecnymi na powierzchni szkła (Rys. 5.1. b)).



Rysunek 5.1. Reakcje zachodzące podczas modyfikacji kompozytu

Modyfikacja prowadzi do wzmocnienia nie tylko na poziomie fizycznym, w którym poliuretan pełni rolę ciekłego napełniacza polimerowego, ale również na poziomie chemicznym, spełniając funkcję promotora adhezji. Wprowadzeniu modyfikatora przypisuje się nie tylko poprawę właściwości wytrzymałościowych warstwy osnowy, ale także polepszenie właściwości adhezyjnych między fazami kompozytu, zahamowanie propagacji pęknięć w całej warstwie okładziny oraz efektywniejsze zachowanie w aspekcie pochłaniania energii w warunkach różnego rodzaju obciążeń.

Wytwarzanie kompozytów metodą ręczną pozwoliło na równoległą możliwość określenia czasu żelowania kompozycji. Parametr ten jest bardzo ważny w kontekście produkcji i przetwórstwa.

Tabela 5.1. Czas żelowania kompozycji epoksydowych w temperaturze pokojowej

Zawartość PU [%]	Czas żelowania [min]
0PU	65
5PU	60
10PU	61

Tabela 5.1. przedstawia czas żelowania kompozycji EP/PU w zależności od procentowej ilości zastosowanego modyfikatora. Dodatek poliuretanu do żywicy epoksydowej skrócił czas żelowania kompozycji w porównaniu do niemodyfikowanej żywicy, jednak różnice te nie wpływają znacznie na przetwórstwo kompozycji i sam proces wytwarzania kompozytu.

Kolejnym kryterium wstępnej oceny kompozytów warstwowych była ich gęstość, która jest jedną z najważniejszych cech umożliwiających ich zastosowanie w aplikacjach konstrukcyjnych. Redukcja masy bez pogorszenia właściwości kompozytu to obecnie jeden z priorytetowych celów badawczych w zakresie projektowania konstrukcji. Tabela 5.2. przedstawia wyniki pomiarów gęstości kompozytów przekładkowych. Wyniki potwierdzają zależność pomiędzy ilością warstw porowatego rdzenia a gęstością kompozytu. Zwiększenie ilości warstw wpłynęło efektywnie na obniżenie gęstości materiału o ok. 25%.

Tabela 5.2. Gęstość kompozytu w zależności od ilości warstw rdzenia

	Gęstość kompozytu [g/cm ³]	
	1XPS	3XPS
EP0250GF	0,43	0,33
5PU250GF	0,39	0,31
10PU250GF	0,39	0,33
EP0324GF	0,41	0,34
5PU342GF	0,42	0,37
10PU324GF	0,41	0,35

Ze względu na nowatorski charakter zastosowania modyfikacji chemicznej osnowy, warstwę kompozytową (osnowa + wzmocnienie) poddano dynamicznej analizie mechanicznej (DMA), która jest skuteczną formą charakterystyki kompozytów warstwowych w zmiennych warunkach temperatury, częstotliwości i odkształcenia. Pozwala na ocenę procesu wytwarzania kompozytu oraz na zobrazowanie właściwości całego kompozytu, bowiem w dużej mierze to okładzina w przenoszeniu obciążeń (m.in. udarowych). Rysunki 5.2. i 5.3. prezentują zestawienie właściwości mierzonych podczas dynamicznej analizy mechanicznej okładzin (moduł zachowawczy, moduł stratności i tangens δ).

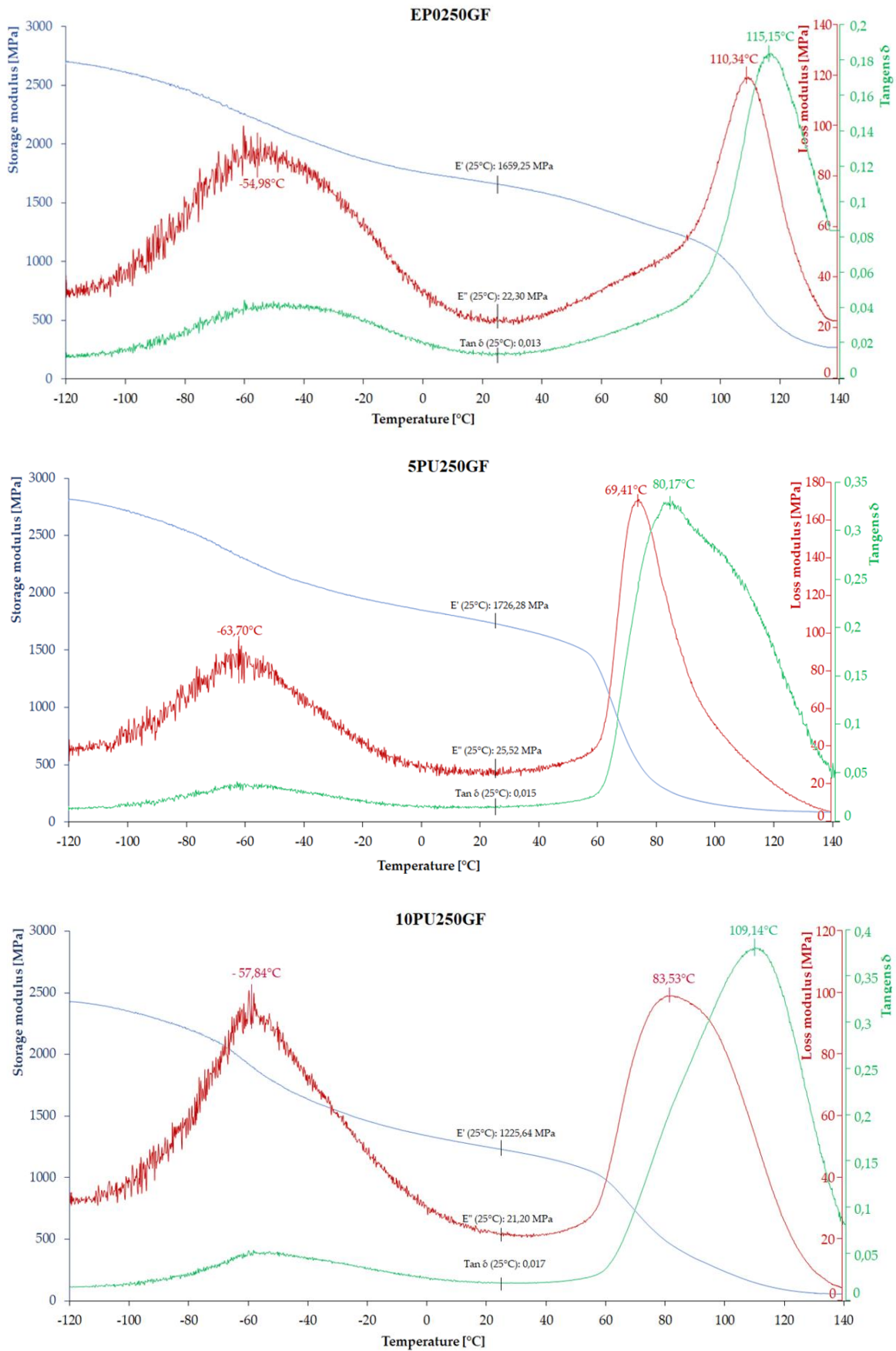
Analiza krzywych dla osnowy epoksydowej ze wzmocnieniem GFplain250 w przedziale dodatnich temperatur wykazała, że dodatek 5% wag. modyfikatora powoduje wzrost modułu stratności E'' (169,80 MPa) w znacznie niższej temperaturze w porównaniu do kompozytu EP0250GF. Z kolei własności lepkosprężyste materiału z dodatkiem 10% wag. poliuretanu są najniższe w porównaniu do kompozytów EP0250GF i 5PU250GF. Moduł stratności wyniósł w tym przypadku 98,22 MPa. Moduł zachowawczy kompozytów, określający sztywność materiału, charakteryzował się gwałtownym spadkiem sztywności w temperaturze ok. 60 – 70°C dla kompozytów modyfikowanych, podczas gdy dla kompozytów niemodyfikowanych taki spadek odnotowano w temperaturze ok. 70 – 90°C. Stosunek sztywności materiału do własności lepkosprężystych ($\text{tg}\delta$) był najniższy dla kompozytu EP0250GF (0,18), a najwyższy dla kompozytu 10PU250GF (0,37).

Kompozyty wzmocnione tkaniną GF324 charakteryzowały się zupełnie odmiennym przebiegiem niż kompozyty z GF250. Dodatek 5% wag. modyfikatora powodował obniżenie modułu stratności (139,55 MPa) w porównaniu do kompozytów EP0324GF (200,91 MPa)

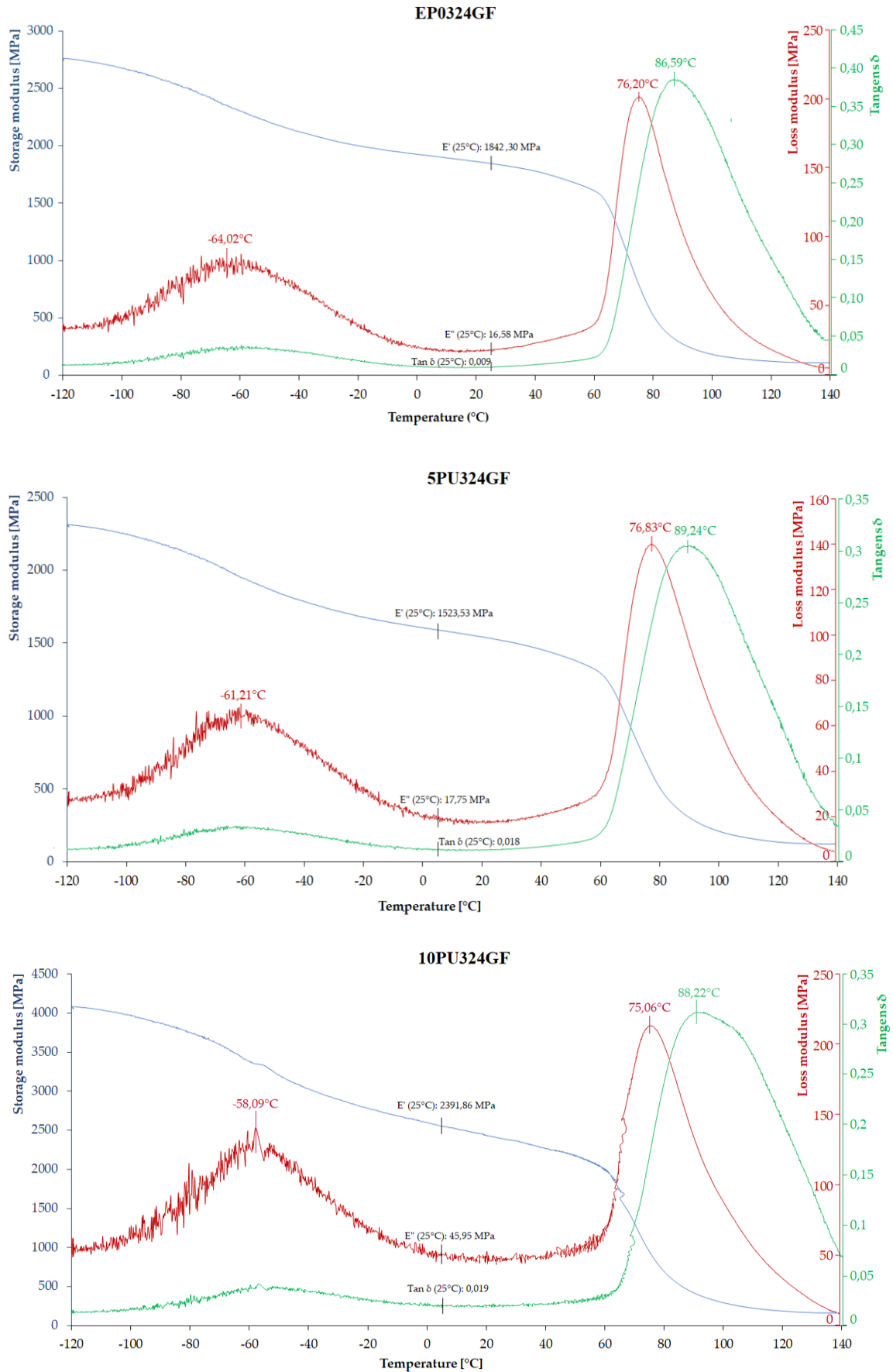
i 10PU324GF (213,07 MPa), których maksymalne wartości występowały w bardzo zbliżonej temperaturze (ok 75 – 77°C). Największą sprężystością w połączeniu z elastyczną tkaniną twill charakteryzował się kompozyt z dodatkiem 10% poliuretanu, który osiągał również najwyższe wartości modułu zachowawczego o temperaturze 25°C. Dla wszystkich badanych kompozytów z tkaniną GFtwill324 gwałtowny spadek sztywności nastąpił w temperaturze ok. 60°C. Tg δ najniższy był dla kompozytu 5PU324GF, który wyniósł 0,30, natomiast najwyższy stosunek sztywności materiału do własności lepkosprężystych osiągnął kompozyt EP0324GF (0,39).

Wartości tangensa δ modyfikowanych kompozytów z tkaniną GFplain250 informowały uelastycznieniu materiału z dodatkiem modyfikatora, co charakteryzowało przesunięcie tg δ w kierunku niższej temperatury w porównaniu do kompozytu niemodyfikowanego. Wartości tangensa δ dla kompozytów wzmocnionych tkaniną GFtwill324 pozostawały na podobnym poziomie zarówno dla kompozytu modyfikowanego jak i referencyjnego.

Analizując przebiegi krzywych w funkcji ujemnych temperatur zaobserwowano także charakterystyczne piki w module stratności. Świadczyły one o występowaniu niskotemperaturowej przemiany drugorzędowej osnowy (*secondary transition*), nieodłącznie związanej z właściwościami wzmocnienia. W przypadku osnowy ze wzmocnieniem tkaniną plain GF250 dodatek 5% wag. poliuretanu prowadził do niskotemperaturowej przemiany drugorzędowej i gwałtownego wzrostu modułu stratności E'' w ok. 10°C temperaturze niż w kompozycie bez modyfikatora, przy bardzo zbliżonej wartości modułu (ok. 85 MPa). Dodanie 10% wag. modyfikatora doprowadziło do niskotemperaturowej przemiany drugorzędowej w temperaturze zbliżonej do kompozytu EP0GF250, jednak wartość modułu oscylowała na poziomie 100 MPa. W przypadku osnowy ze wzmocnieniem tkaniną twill GF324 wraz ze wzrostem zawartości modyfikatora nieznacznie wzrastała temperatura krystalizacji niskotemperaturowej. Im wyższa wartość modułu E'' tym materiał stawał się bardziej plastyczny. W temperaturze ok. -60°C moduł stratności oscylował na poziomie 87,4 MPa dla kompozytu EP0324GF, 64,2 MPa dla kompozytu 5PU324GF i 140,5 MPa dla kompozytu 10PU324GF.



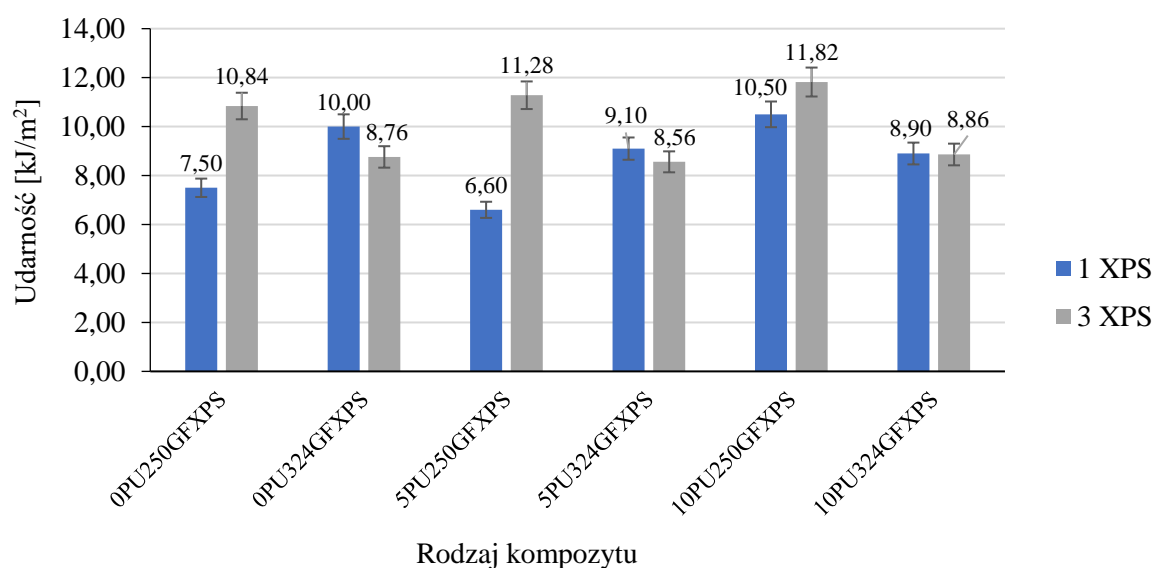
Rysunek 5.2. Dynamiczna analiza mechaniczna kompozytów EP/PU/250GF



Rysunek 5.3. Dynamiczna analiza mechaniczna kompozytów EP/PU/324GF

Badanie DMA pozwoliło na charakterystykę warstwy kompozytowej w zależności od zastosowanego wzmocnienia i zawartości modyfikatora, w zakresie ujemnych i dodatnich temperatur oraz pod wpływem stałego, wielokrotnie powtarzającego się obciążenia. Analiza miała na celu potwierdzenie mechanizmu wzmacniającego modyfikatora oraz możliwości zastosowania materiału na osłony elektroniki lub baterii samochodów elektrycznych.

Analizę wstępnych właściwości mechanicznych kompozytów rozpoczęto od badań udarności metodą Charpy’ego w dwóch kierunkach uderzenia. Stanowiły one niekonwencjonalne podejście do procedur badawczych w stosunku do badań przedstawionych w przeglądzie literatury. Porównanie wartości próbek poddanych uderzeniu prostopadłemu przedstawiono na Rysunku 5.4. Tkanina typu plain charakteryzuje się większą sztywnością w porównaniu z tkaniną o splocie twill. Odczytane wartości jednoznacznie wskazują, że kompozyty z tkaniną GFplain250 pochłaniają większą ilość energii uderzenia, to jednak biorąc pod uwagę mechanizmy zniszczenia (Tabela 5.3.) lepsze zachowanie z punktu widzenia osłonowych zastosowań konstrukcyjnych wykazują kompozyty wzmocnione tkaniną GFtwill324.



Rysunek 5.4. Udarność – uderzenie płaszczyznowe prostopadłe

Biorąc pod uwagę ilość warstw rdzenia w strukturze kompozytu, niejednoznaczne zachowanie wykazały kompozyty przekładkowe z jedną warstwą rdzenia. Dodatek 5% wag. PU powodował obniżenie wartości udarności, niezależnie od zastosowanego typu tkaniny szklanej, podczas gdy 10% dodatek modyfikatora skutkowało poprawą właściwości w porównaniu do kompozytów z niemodyfikowaną osnową. Największy wpływ na

przenoszenie obciążenia w przypadku kompozytów jednordzeniowych ma warstwa kompozytowa, jednak na skutek ugięcia próbki, lekki i elastyczny rdzeń neutralizował gwałtowne mechanizmy uszkodzenia struktury kompozytu. Scharakteryzowanie mechanizmów zniszczenia kompozytów jednordzeniowych było niemożliwe do usystematyzowania ze względu na brak powtarzalności wyników. Kompozyty z 3 warstwami rdzenia wyróżniały się znacznie bardziej usystematyzowaną charakterystyką. Na uwagę zasługuje też fakt, że wraz ze wzrostem ilości procentowej PU, wzrasta odporność kompozytu GFplain250/3XPS na obciążenia udarowe. Maksymalną udarność odnotowano dla próbki 10PU250GF3XPS – 11,82 kJ/m², co stanowi wzrost o 10% w porównaniu kompozytu bez modyfikowanej osnowy.





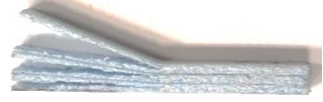




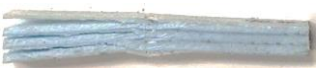


Tkanina twill charakteryzuje się większą elastycznością, co znacznie wpływa na zahamowanie gwałtownej propagacji pęknięć w porównaniu do sztywniejszej tkaniny plain. Kompozyt GF250 znacznie łatwiej rozwarstwiał się w całej strukturze kompozytu, a warstwa wierzchnia, będąca w bezpośrednim kontakcie z uderzającym młotem, była bardziej podatna na złamanie zarówno w warstwie osnowy, jak i wzmocnienia. W warstwie wierzchniej kompozytów GF324 zniszczenie było ledwo widoczne lub następowało rozwarstwienie pierwszej warstwy, przy zachowaniu spójności w kolejnych warstwach kompozytu.

Analizując wyniki kompozytów z trzema warstwami rdzenia należy szczególną uwagą objąć mechanizmy zniszczenia kompozytów. Pod wpływem prostopadłego uderzenia płaszczyznowego warstwy kompozytu sekwencyjnie przyjmowały kolejną część energii uderzenia, jednak największy udział w przeciwdziałaniu odkształceniom spowodowanym obciążeniami prostopadłymi do powierzchni miał rdzeń piankowy, czynnie pochłaniając lub rozpraszając energię uderzenia. Wraz ze wzrostem zawartości modyfikatora w osnowie obserwowano nieznaczny wpływ na udarność, a elastyczne łańcuchy poliuretanowe wpływały pośrednio na lepszą odpowiedź materiału w warunkach uderzenia. W Tabeli 5.3. przedstawiono charakterystyczne dla poszczególnych rodzajów kompozytów mechanizmy uszkodzenia wywołane uderzeniem prostopadłym płaszczyznowym i równoległym krawędziowym podczas testu udarności metodą Charpy'ego.

W przypadku wszystkich kompozytów następowało ścinanie i delaminacja rdzenia, jednak dla kompozytów z tkaniną 250g/m² zanotowano także tryb pęknięcia i oderwania wierzchniej warstwy okładziny. Z kolei kompozyty z potrójną warstwą rdzenia i tkaniną szklaną 324g/m², dzięki większej elastyczności nie wykazywały mechanizmu pęknięcia osnowy i jednostronnie pozostawały spójne w swojej strukturze. Choć udarność pozostawała dla każdej z konfiguracji na zbliżonym poziomie (8,56 - 8,86 kJ/m²) to najbardziej efektywne zachowanie energochłonne

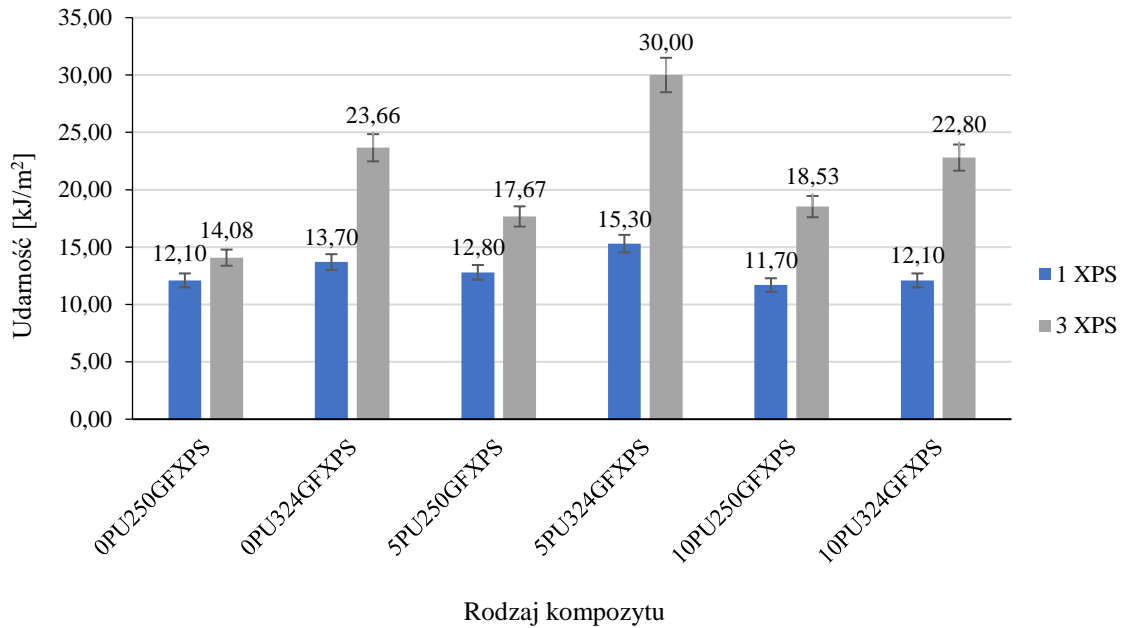
wykazał kompozyt 5PU324GF3XPS, który uległ wyłącznie częściowemu rozwarstwieniu. W zastosowaniach jako materiał osłaniający może to być decydującym parametrem pomimo nieco niższych wartości pochłaniania energii uderzenia.

Tabela 5.3. Charakterystyczne uszkodzenia kompozytów poddanych badaniu udarności w dwóch kierunkach

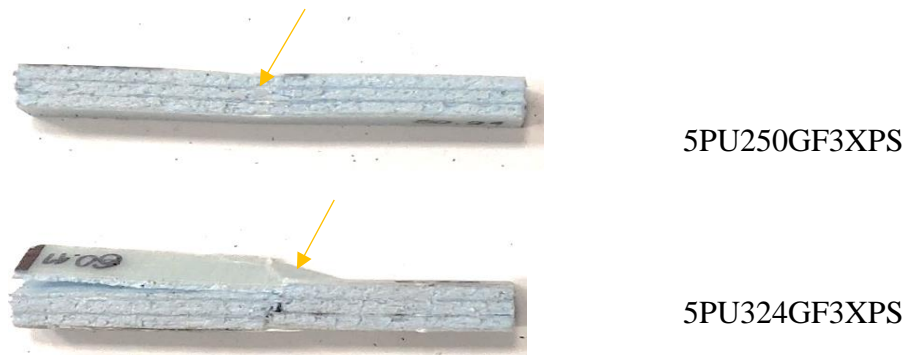
	Uderzenie prostopadłe	Uderzenie równoległe
EP0250GF3XPS		
EP0324GF3XPS		
5PU250GF3XPS		
5PU324GF3XPS		
10PU250GF3XPS		
10PU324GF3XPS		

Znacznie większe różnice w zachowaniu kompozytów zaobserwowano podczas testu udarności krawędziowej (Tabela 5.3.). Przy wyborze odpowiedniego materiału konstrukcyjnego należy sugerować się zarówno odpornością kompozytu na obciążenia prostopadłe do powierzchni, ale również odpornością na siły działające w kierunku równoległym do ułożenia warstw. W tym względzie największą rolę w pochłanianiu lub rozpraszaniu energii uderzenia ma warstwa kompozytowa (osnowa + wzmocnienie).

Zauważono systematyczność, że kompozyty ze wzmocnieniem 324GF osiągają wyższe wartości udarności badanej metodą krawędziową w porównaniu do kompozytów ze wzmocnieniem 250GF (Rysunek 5.5.). Jednak tak, jak podczas testu w kierunku prostopadłym, tak również test równoległego uderzenia krawędziowego analizowano pod kątem powstałych uszkodzeń kompozytów.



Rysunek 5.5. Udamność – uderzenie krawędziowe równoległe



Rysunek 5.6. Rodzaje uszkodzeń kompozytów z 5% zawartością PU pod wpływem równoległego uderzenia krawędziowego

Najwyższą udamnością wykazują się kompozyty z 5% zawartością PU. W przypadku kompozytu 5PU250GF3XPS materiał uległ wyłącznie niewielkiemu, trwałemu wgłębieniu w miejscu kontaktu kompozytu z uderzającym go młotem (Rysunek 5.6.), a udamność jaką uzyskał wyniosła 17,76 kJ/m². Z kolei kompozyt 5PU324GF3XP, pomimo większej ilości uszkodzeń (pęknięcie i częściowa delaminacja górnej okładziny), uzyskał najwyższą udamność – 30 kJ/m². Zastosowanie modyfikatora poliuretanowego w przypadku kompozytów z jedną

warstwą XPS nie wpłynęło znacznie na poprawę udarności, z wyjątkiem kompozytu 5PU324GFXPS, dla którego odnotowano najwyższą wartość – 15,30 kJ/m².

Podobnie jak w przypadku badania udarności w kierunku prostopadłym kompozytów jednorodzeniowych, próbki poddane badaniu w kierunku równoległym wykazywały niejednoznaczne zachowania. W tym przypadku 5% dodatek PU poprawiał udarność dla każdego kompozytu wzmocnionego tkaniną szklaną, natomiast 10% dodatek modyfikatora obniżał odporność kompozytów na obciążenia udarowe w porównaniu do kompozytów z niemodyfikowaną osnową jak i kompozytów z dodatkiem 5% wag. modyfikatora.

Badania udarności w dwóch kierunkach pozwoliły na wytypowanie do dalszej analizy struktury materiału, która wykazała lepszą odpowiedź pod względem bardziej efektywnych mechanizmów pochłaniania energii. W dalszej części pracy analizowano wyniki kompozytów zawierających wyłącznie 3 warstwy rdzenia XPS.

5.2. Analiza wyników badań właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych kompozytów wielowarstwowych

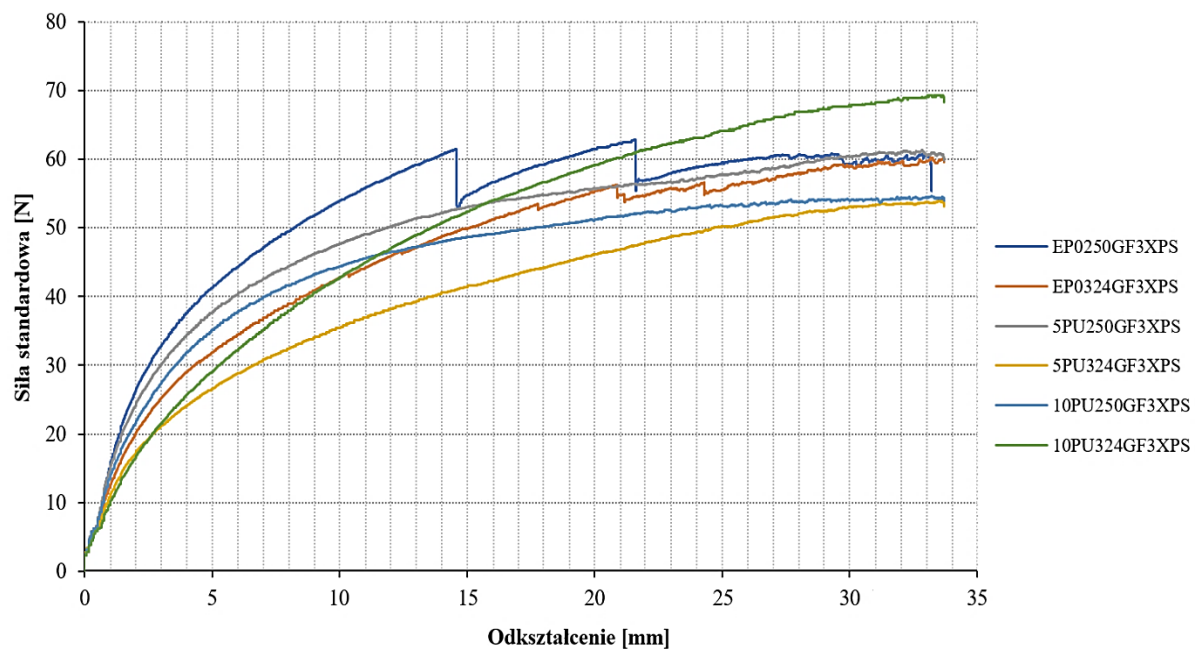
Testy eksperymentalne wykonane w ramach rozprawy doktorskiej służyły jako baza do stworzenia procedury badawczej będącej kompleksowym zestawieniem charakterystyk wytrzymałościowych i mechanicznych kompozytów strukturalnych do zastosowań energochłonnych. Wybór badań opierał się w dużej mierze na odzwierciedleniu możliwych warunków eksploatacyjnych, którym poddany zostanie kompozyt w konkretnym zastosowaniu oraz wnioskach sformułowanych podczas analizy literatury na temat kompozytów energochłonnych. W celu uzupełnienia charakterystyk wytrzymałościowych kompozytów wykonano badanie wytrzymałości na zginanie trójpunktowe oraz wytrzymałości na ściskanie.

Próby trójpunktowego zginania kompozytów wielowarstwowych miały na celu porównanie zachowania kompozytów oraz wpływu zastosowanej modyfikacji wytrzymałość na zginanie oraz wyznaczenie charakterystyki ich zachowania podczas statycznego obciążenia zginającego. Wyznaczono parametry takie jak moduł zginania, maksymalna siła przy zginaniu oraz ścinanie międzywarstwowe. Wartości uzyskane podczas badania zestawiono w Tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Wyniki próby zginania trójpunktowego kompozytów przekładkowych

Kompozyt	Moduł zginania [MPa]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Maksymalna siła przy zginaniu [N]	Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe [MPa]
EP0250GF3XPS	56,70	3,11	63,39	0,28
5PU250GF3XPS	54,45	3,17	60,09	0,29
10PU250GF3XPS	47,30	2,93	52,56	0,25
EP0324GF3XPS	40,40	3,10	59,76	0,27
5PU324GF3XPS	29,05	3,05	53,58	0,26
10PU324GF3XPS	28,45	3,54	68,26	0,32

Pojawiające się na wykresie zależności siły i odkształcenia (Rysunek 5.7.) skokowe załamania dla próbek bez dodatku modyfikatora informowały o pękaniu okładzin i kompozytowych warstw wzmacniających w miarę wzrostu odkształcenia. W momencie osiągnięcia maksymalnej siły zainicjowany został proces uszkodzenia kompozytu, jednak bez widocznych defektów w warstwie wzmocnienia.



Rysunek 5.7. Wykres zależności siły i odkształcenia podczas próby trójpunktowego zginania kompozytów

W przypadku kompozytów z modyfikowaną osnową nie obserwowano pękania okładzin ani wewnętrznych warstw wzmacniających, co świadczy o znacznym uelastycznieniu kompozytu przez dodatek poliuretanu i dobrej adhezji do elastycznego, porowatego rdzenia. Nie zaobserwowano również uszkodzeń spowodowanych delaminacją lub ścinaniem pianki XPS. Najwyższa wartość siły działającej na kompozyt 10PU324GF3XPS wyniosła 69 N przy odkształceniu przewyższającym trzykrotnie grubość badanej próbki. W miarę wzrostu odkształcenia modyfikowanych kompozytów wzrost siły był także efektem jednoczesnego rozciągania i ściskania warstw kompozytowych oraz kompresji rdzenia w miejscu działania impaktora. Rysunek 5.8. przedstawia zachowanie próbki kompozytu 5PU324GF3XPS przy maksymalnym odkształceniu.



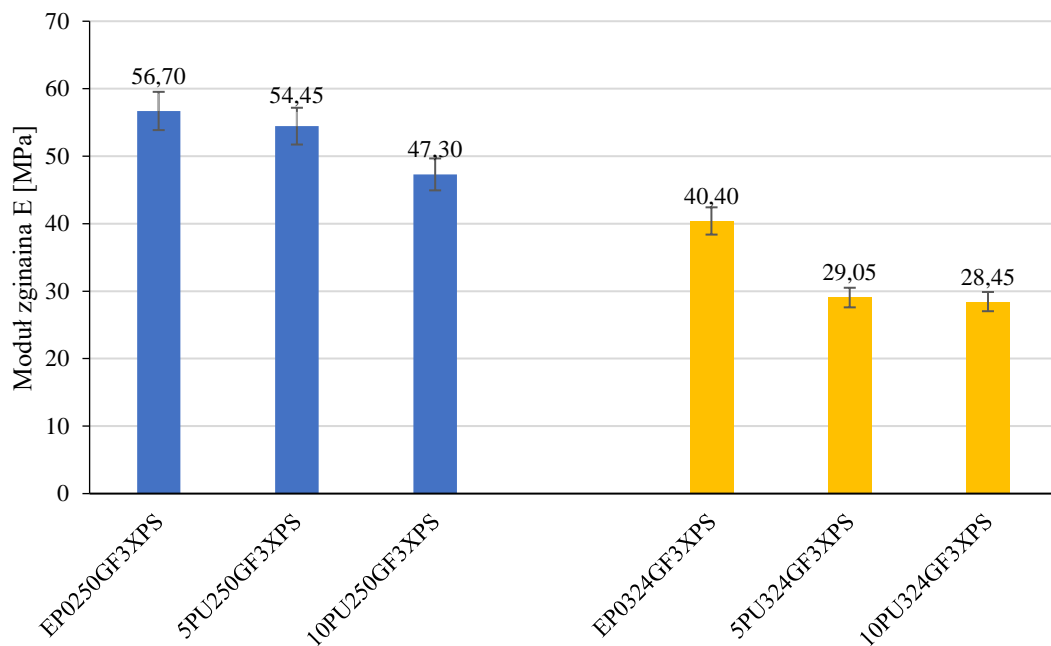
Rysunek 5.8. Ugięcie kompozytu z modyfikowaną osnową przy maksymalnym odkształceniu

Podobne zachowanie wykazywały wszystkie kompozyty z modyfikowaną osnową. Kompozyt EP0GF2503XPS jako jedyny wśród badanych materiałów uległ całkowitemu uszkodzeniu – dolna warstwa pękła przy odkształceniu o wartości 33 mm (na Rysunku 5.7. wskazuje na to koniec krzywej biegnący ku wartości 0; w trakcie badania jest to równoznaczne ze zniszczeniem próbki).

Kompozyty referencyjne (niemodyfikowane) wykazywały znacznie większą sztywność i kruchość osnowy podczas testów trójpunktowego zginania. Obserwując zachowanie

kompozytów EP0, zarówno ze wzmocnieniem tkaniną GFplain250 jak i GFtwill324, zaobserwowano pękanie okładzin, a w miarę wzrostu działającego na kompozyty obciążenia, następowała także jednostronna delaminacja.

Rysunek 5.9. przedstawia zależność modułu zginania od zawartości modyfikatora w osnowie. Moduł zginania zmniejszał się wraz ze wzrostem zawartości PUR zarówno dla kompozytów wzmocnionych tkaniną GFplain250, jak i tkaniną GFtwill324, co świadczy o uelastyczniającym działaniu poliuretanu.

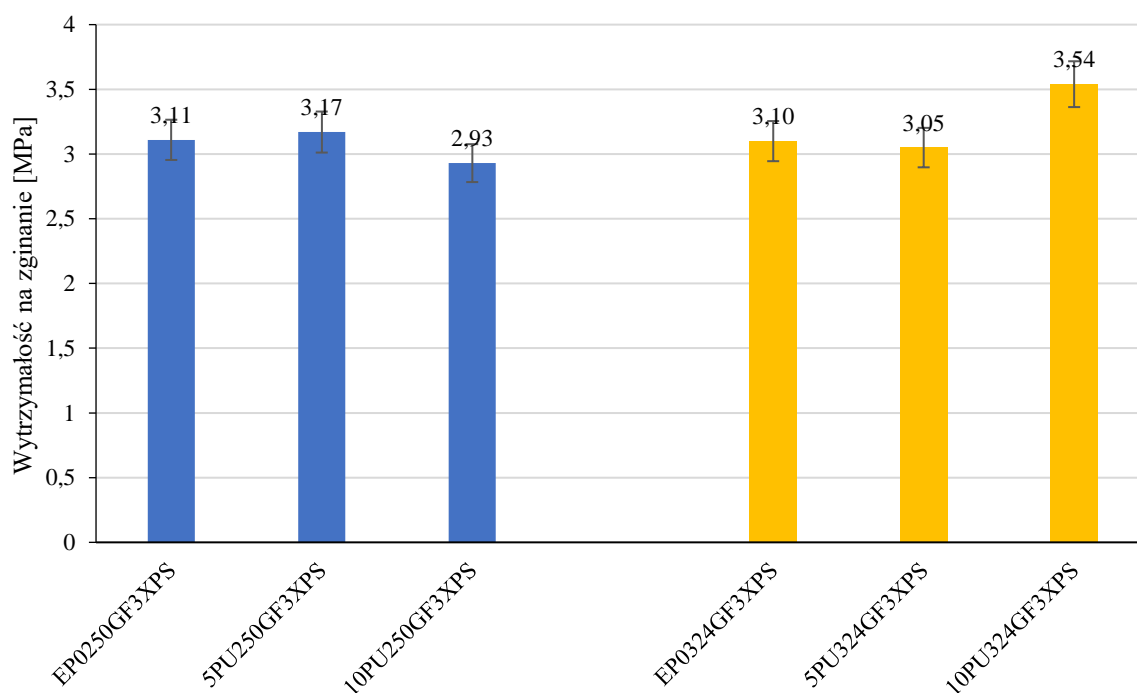


Rysunek 5.9. Moduł zginania kompozytów

Wyniki przedstawione na wykresie potwierdziły także istotne znaczenie rodzaju tkaniny na odpowiedź kompozytu na obciążenia zginające. Tkanina GFplain250 z reguły jest sztywniejsza, dlatego kompozyty osiągnęły o około 30-47% wyższe wartości modułu zginania w porównaniu z kompozytami wzmocnionymi tkaniną GFtwill 324. Moduł zginania osiągnął maksymalną wartość 56,70 MPa dla kompozytu EP0GF2503XPS, który pomimo najwyższej sztywności uległ całkowitemu uszkodzeniu z delaminacją rdzenia. Natomiast najwyższą elastyczność wykazywał kompozyt 5PU250GF3XPS - moduł zginania 29,05 MPa, bez uszkodzeń okładzin, kompozytowych warstw wzmacniających i rdzenia.

Wpływ zawartości modyfikatora oraz użytego wzmocnienia wytrzymałość na zginanie przedstawia Rysunek 5.10. Zaobserwowano, że dodatek poliuretanu bardzo nieznacznie przyczynia się do wzrostu naprężenia przy zginaniu. Kompozyty wzmocnione tkaniną

GFplain250 osiągały wartości na zbliżonym poziomie (2,93 – 3,17 MPa). Wśród kompozytów wzmocnionych tkaniną GFtwill324 najwyższe naprężenie osiągnął materiał z 10% udziałem poliuretanu (3,54 MPa), co stanowiło wzrost naprężenia o ok. 13% w stosunku do kompozytu EP0324GF3XPS. Parametr wytrzymałości został oznaczony w celu weryfikacji przybliżonej wartości naprężenia.



Rysunek 5.10. Wytrzymałość na zginanie

Energia zniszczenia kompozytów jest parametrem pozwalającym określić ilość pracy koniecznej do zniszczenia materiału. W przypadku kompozytów poddanych badaniu trójpunktowego zginania nie wyznaczono tego parametru, ponieważ kompozyty nie ulegały całkowitemu zniszczeniu.

Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe jest jednym z parametrów wyliczanych na podstawie testu trójpunktowego zginania. Warunkiem, który musiał zostać spełniony, aby prawidłowo określić wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe był stosunek odległości między podporami do grubości badanej próbki, który wynosił 5:1. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe τ_M obliczono się według wzoru:

$$\tau_M = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{bh} \text{ [MPa]}$$

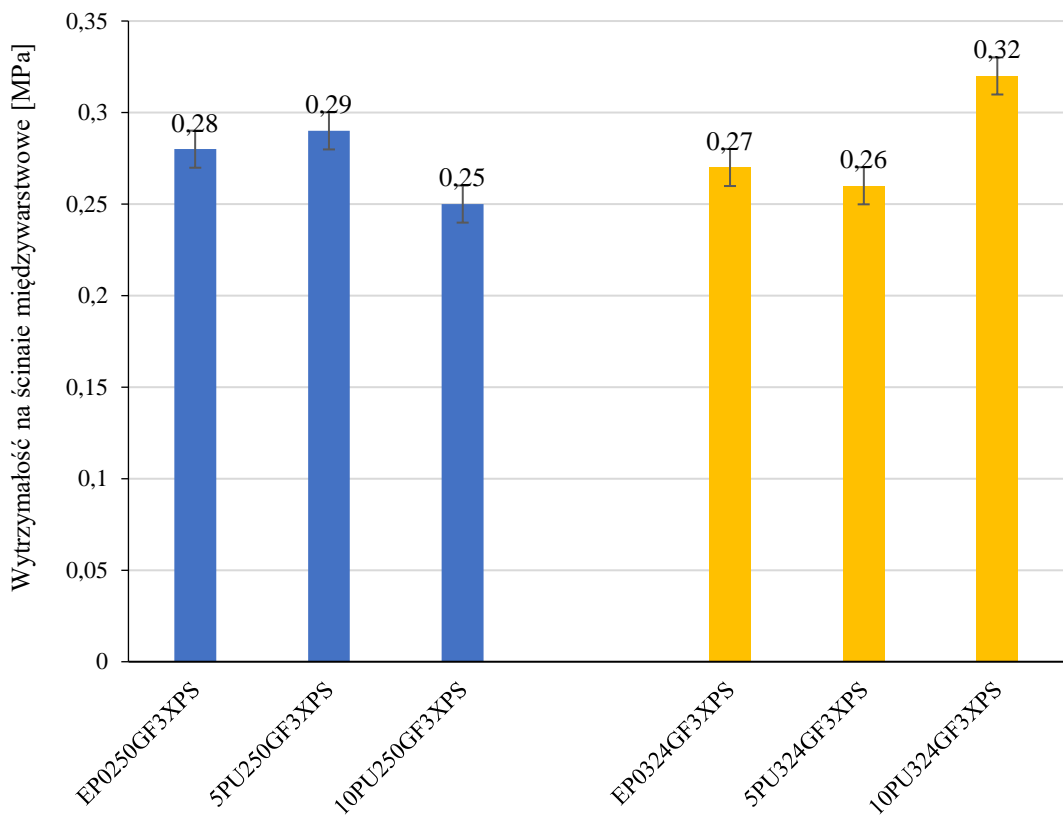
gdzie oznaczenia:

F – maksymalna siła [N],

b – szerokość próbki [mm],

h – grubość próbki [mm].

Serię wyników wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe obliczonych dla kompozytów przedstawia Rysunek 5.11. Zauważono, że wartość badanego parametru waha się między 0,25 a 0,32 MPa, co stanowi niewielką różnicę między kompozytami i może wynikać z niedoskonałości technologicznych, które często generuje metoda laminowania ręcznego. Można więc przypuszczać, że rodzaj zastosowanych modyfikacji nie wpływa znacząco na wytrzymałość kompozytów na ścinanie międzywarstwowe.



Rysunek 5.11. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe kompozytów

Przeprowadzenie testów ściskania krawędziowego wyznaczyło pewnego rodzaju innowacyjną procedurę badawczą w zakresie charakterystyki kompozytów ze stopniowanym rdzeniem. Stanowiły one uzupełnienie charakterystyki badania udarności w kierunku równoległym do ułożenia warstw i obrazowało różnice między statycznym a dynamicznym

charakterem obciążenia. Ponadto, bardzo niewiele prac badawczych podejmuje temat badań ściskania kompozytów z rdzeniem piankowym ze względu na przewidywalne wyboczenia i ścinanie rdzenia. Test ściskania krawędziowego może jednak posłużyć wyznaczeniu granicznych wartości obciążenia i pozwolić na zastosowanie kompozytu w aplikacjach, które pierwotnie wydawały się nie być dla niego przeznaczone. Tabela 5.5. przedstawia wyniki badanych podczas testu ściskania krawędziowego. Rezygnacja z testów ściskania płaszczyznowego wiązała się z przewidywalną kompresją pianki XPS, która nie będzie miała prawidłowego przełożenia na wyniki wytrzymałościowe całego kompozytu.

Tabela 5.5. Wyniki kompozytów podczas próby ściskania krawędziowego

	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Moduł ściskania [MPa]
EP0250GF3XPS	3,07	130,00
5PU250GF3XPS	2,68	175,00
10PU250GF3XPS	4,48	175,00
EP0324GF3XPS	4,69	174,00
5PU324GF3XPS	3,38	136,00
10PU324GF3XPS	4,00	139,50

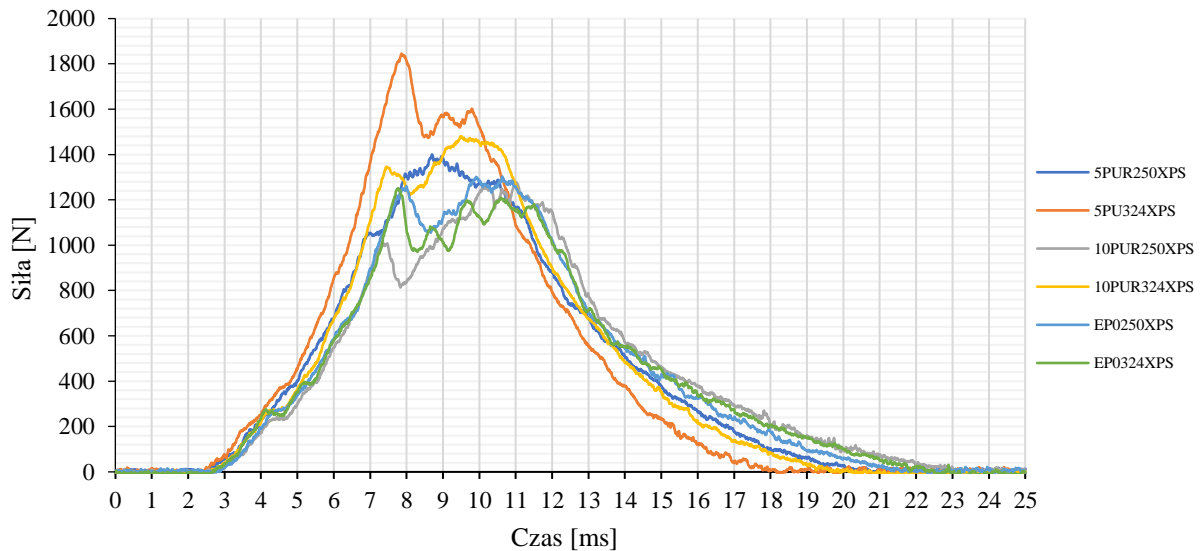
Wyboczenie było głównym mechanizmem uszkodzenia pojawiającym się w każdym z badanych kompozytów, a kompozyty z niemodyfikowaną osnową wykazywały także mechanizm delaminacji ze względu na słabą adhezję między warstwą kompozytową a rdzeniem.

W przypadku kompozytów z tkaniną GFplain250 dodatek poliuretanu przyczynił się do zwiększenia modułu ściskania, co spowodowało, że modyfikator działał wzmacniająco na kompozyt. Sztywność materiału reprezentowana przez wartość modułu zwiększyła się o ok. 25%. (175 MPa). Z kolei w przypadku kompozytów z tkaniną GFtwill324 zaobserwowano obniżenie modułu ściskania – ok. 20%. Zastosowanie poliuretanu z elastyczną tkaniną GFtwill324 potęgowało uelastycznienie całego materiału.

Modyfikacja 5% dodatkiem poliuretanu obniżyła wytrzymałość na krawędziowe ściskanie kompozytów z tkaniną GFplain250, z kolei kompozyt z 10% dodatkiem PU osiągnął wartość wytrzymałości na ściskanie na poziomie 4,48 MPa. Nieco inną charakterystykę materiału prezentowały wyniki dla kompozytu wzmocnionego tkaniną GFtwill324. Wprowadzenie modyfikatora doprowadziło do obniżenia wytrzymałości kompozytu na ściskanie krawędziowe, co wiąże się bezpośrednio z uelastyczniającym działaniem poliuretanu w warstwie okładzin i kompozytowych warstw wzmacniających. Wyniki potwierdziły także, że już niewielki (5% wag.) dodatek modyfikatora skutkuje efektywnym zwiększeniem elastyczności materiału.

Typową procedurą badawczą, której poddawane są energochłonne kompozyty strukturalne jest badanie oddziaływań poprzecznych obciążeń udarnościowych. Test udarności metodą spadającego ciężaru, w którym kompozyty ze względu na punktowy charakter uderzenia wykazywały bardzo specyficzne mechanizmy uszkodzeń, pozwolił na wyznaczenie następujących charakterystyk (Rysunki 5.12 – 5.20):

- siła – czas,
- siła – przemieszczenie,
- energia – czas.



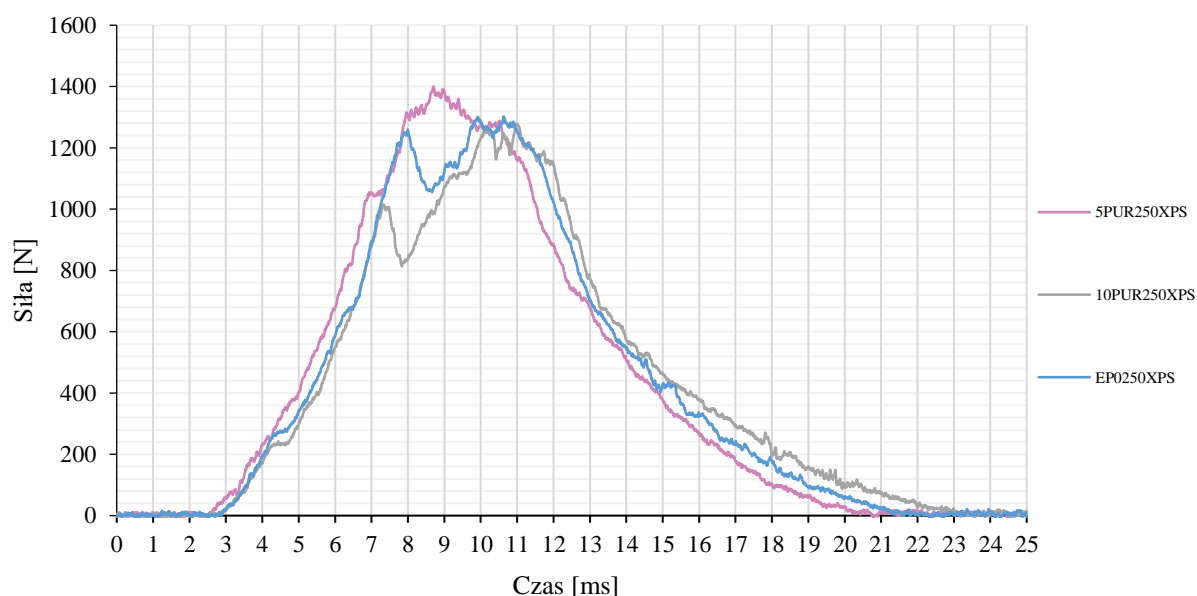
Rysunek 5.12. Wykres zależności siły od czasu

W Tabeli 5.6. podano wartości maksymalnej siły działającej na kompozyt podczas badania udarności metodą spadającego ciężaru.

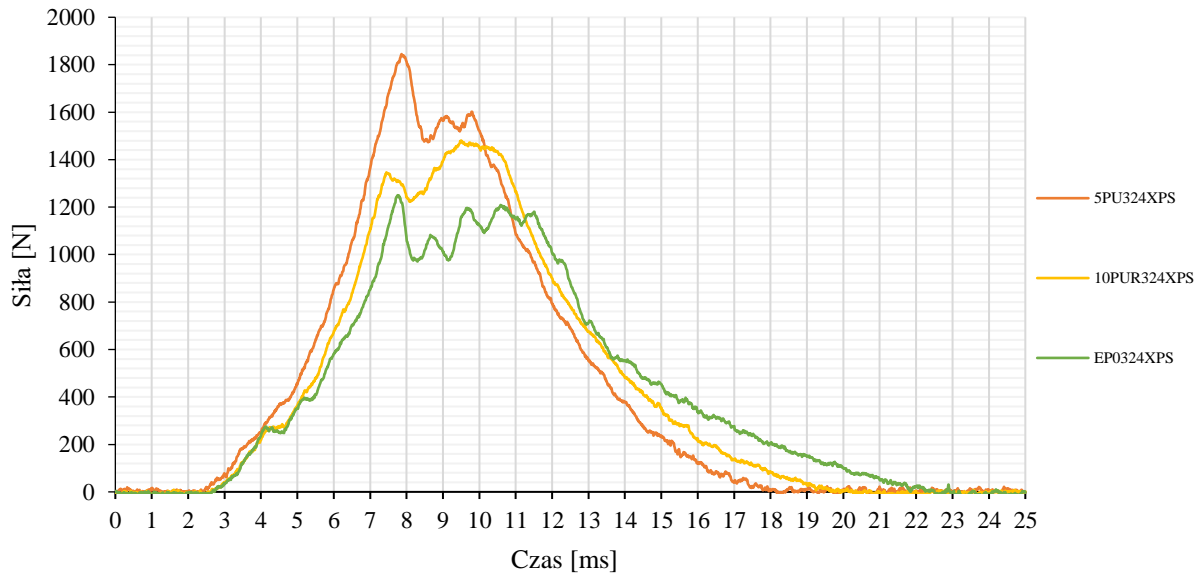
Tabela 5.6. Wartość siły maksymalna podczas badania udarności metodą spadającego ciężaru

RODZAJ KOMPOZYTU	MAKSYMALNA SIŁA [N]
EP0250GF3XPS	1302,44
EP0324GF3XPS	1231,77
5PU250GF3XPS	1399,43
5PU324GF3XPS	1844,89
10PU250GF3XPS	1302,79
10PU324GF3XPS	1353,01

Rysunek 5.12 przedstawia wpływ modyfikacji i rodzaju tkaniny na uderzenie o wartości 10J. Zarówno pod względem ilości modyfikatora jak i rodzaju zastosowanego wzmocnienia obserwowany był efekt synergii związany z odmiennym zachowaniem materiału w zależności od składu kompozytu, dlatego w dalszej części analizę przeprowadzono biorąc pod uwagę wyłącznie wpływ modyfikacji osnowy na badane parametry.



Rysunek 5.13. Wykres zależności siły od czasu – kompozyty GF250

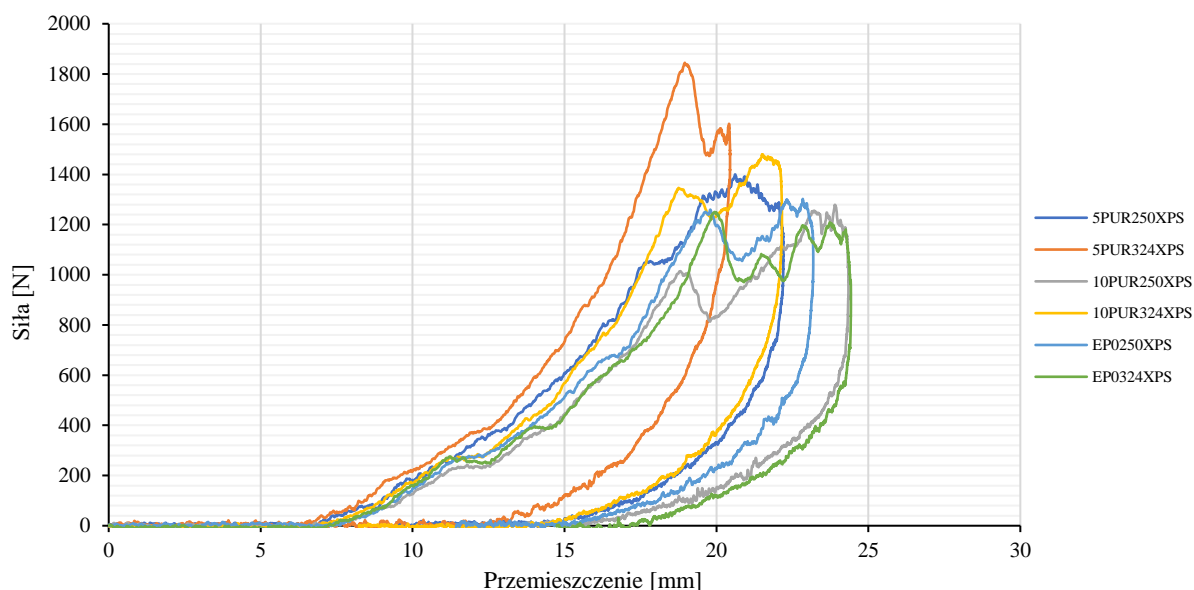


Rysunek 5.14. Wykres zależności siły od czasu – kompozyty GF324

Powyższe wykresy przedstawiają siłę uderzenia w funkcji czasu dla kompozytów referencyjnych (EP0) oraz modyfikowanych poliuretanem w ilości 5 - 10% wagowych (5PU/10PU), wzmocnionych tkaniną GFplain250 (Rysunek 5.13.) i tkaniną GFtwill324 (Rysunek 5.14.). Przebiegi wykresów w każdym przypadku charakteryzowały się początkowym narastaniem siły, a jej maksymalne wartości wyniosły 1399,43 N dla kompozytu 5PU250GF3XPS i 1844,89 N dla kompozytu 5PU324GF3XPS. Widoczne powstawanie kolejnych pików, niestabilność i spadek siły uderzenia informowały o powstawaniu naprężeń w kolejnych warstwach kompozytu i możliwym uszkodzeniu materiału.

Obserwacja przebiegu wykresów siła-czas oraz ich kształt pozwoliła również na ocenę wpływu modyfikacji osnowy na badane parametry. Dodatek poliuretanu w ilości 5% wag. w kompozycie ze wzmocnieniem tkaniną GFtwill324 spowodował nieznaczne zwiększenie sztywności materiału, o czym świadczy nachylenie początkowej części wykresu oraz pole powierzchni pod krzywą. Materiał przyjął jednak o 32% większe obciążenie w porównaniu z kompozytem referencyjnym i o 20% większe obciążenie w porównaniu z kompozytem z 10% udziałem PU.

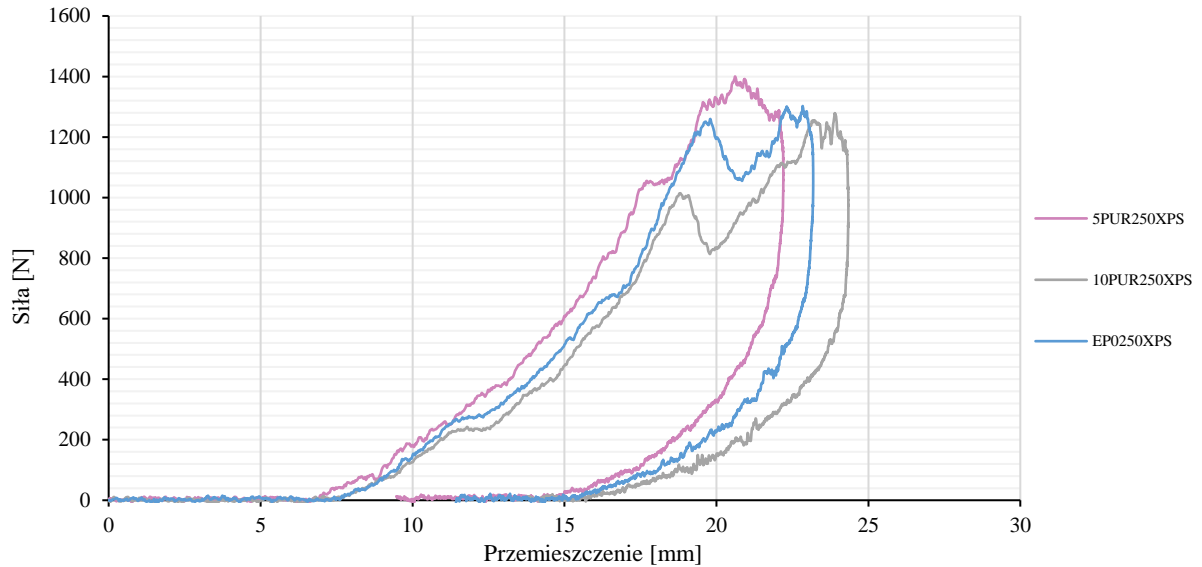
Zupełnie inne zachowanie wykazał kompozyt ze wzmocnieniem tkaniną plain250. Przebieg krzywej kompozytu 5PU250GF3XPS wskazuje na sprężyste zachowanie kompozytu podczas uderzenia impaktora, ale wyłącznie dla kompozytu z udziałem 5% wag. PU. Dla kompozytu z niemodyfikowaną osnową i kompozytu z dodatkiem 10% wag. PU zaobserwowano wyraźny pik wskazujący na uszkodzenie pierwszej warstwy wzmocnienia.



Rysunek 5.15. Wykres zależności siły od przemieszczenia

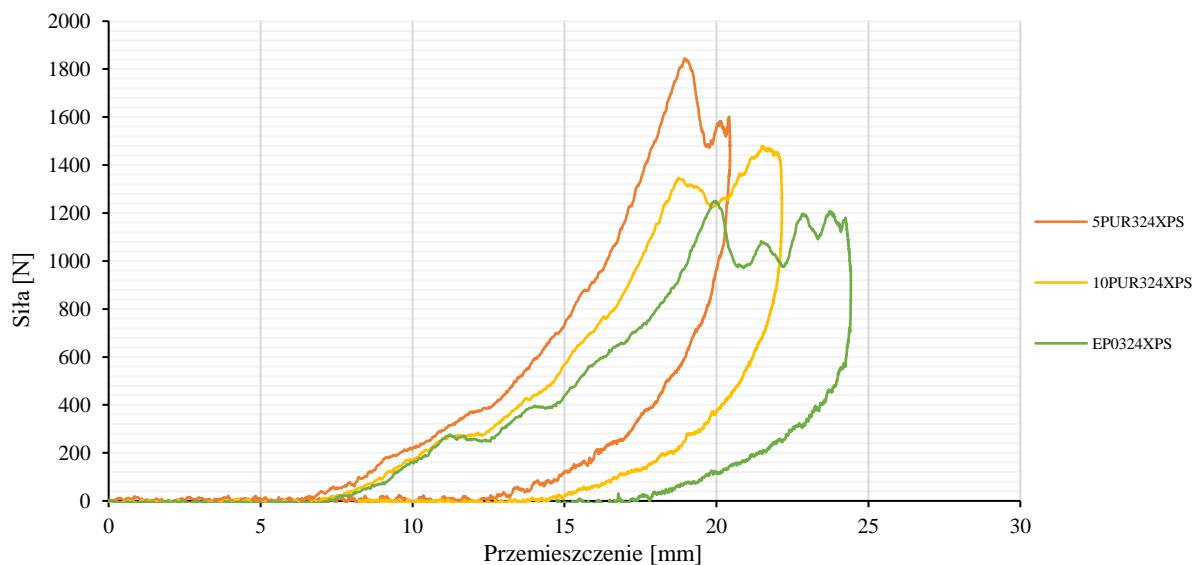
Wykresy zależności siły od przemieszczenia w największym stopniu charakteryzują ilość zaabsorbowanej przez kompozyt energii uderzenia, której graficznym odzwierciedleniem jest pole powierzchni pod krzywą. Analiza krzywych na Rysunku 5.15. wskazuje jednoznacznie, że przypadku każdego z kompozytów nastąpiło odbicie impaktora bez perforacji materiału, o czym świadczy kształt krzywych i ich „zawrócenie” ku punktom rozpoczęcia kontaktu impaktora z badanym materiałem. Identyfikacja wzrokowa uszkodzeń powierzchniowych wykazała także bardzo podobne zachowanie kompozytów – ślad punktowego uderzenia impaktora, gdzie nastąpiło uszkodzenie osnowy i włókien oraz liniowe pęknięcia promieniowe w dwóch kierunkach były powtarzalne dla każdego z kompozytów.

Obserwując nachylenie, kształt wykresów (Rysunek 5.16.) oraz obszar pod krzywą uzyskujemy informację o sztywności materiału oraz o ilości zaabsorbowanej energii uderzenia. Dla kompozytów 5PU250XPS zaobserwowano najmniejsze przemieszczenie (22 mm) i najwyższą wartość przyjętego przez materiał obciążenia (1399,42 N). Zmniejszenie średniego przemieszczenia wyniosło zatem ok. 5% w porównaniu z kompozytem referencyjnym oraz o ok. 10% w porównaniu z kompozytem zawierającym 10% wag. modyfikatora. Zmniejszenie przemieszczenia wskazuje także na zwiększenie odporności kompozytu na rozwarstwienie, co potwierdza identyfikacja wzrokowa po badaniu. Analiza zachowania materiałów wzmocnionych GFplain250 sugeruje więc, że niewielka zawartość PU skutecznie zmniejsza przemieszczenie perforacji przy jednoczesnym zwiększeniu odporności na przebicie.



Rysunek 5.16. Wykres zależności siły od przemieszczenia – kompozyty GF250

Nachylenie krzywych dla kompozytów wzmocnionych tkaniną GF324 wskazuje na wyraźne zmiany w odpowiedzi materiału na zastosowane obciążenie. Kompozyt niemodyfikowany przyjął uderzenie o sile 1231,77 N przy największym wśród badanych kompozytów przemieszczeniu 24,42 mm. Powstawanie kilku pików na wykresie obrazującym zachowanie kompozytu EP0 wskazuje także na wyraźne uszkodzenie kolejnych warstw materiału. Lepszą odpowiedź na obciążenie wykazuje kompozyt z osnową modyfikowaną 10% zawartością PU. Maksymalna siła uderzenia wynosiła 1353,01 N, co wskazuje na poprawę odporności o ok. 10% w porównaniu do kompozytu EP0 (Rysunek 5.17.).



Rysunek 5.17. Wykres zależności siły od przemieszczenia – kompozyty GF324

Niewielką poprawę odporności na perforację zaobserwowano przez zmniejszenie przemieszczenia kompozytu 10PU324GF3XPS wyniosło 22,44 mm w odniesieniu do kompozytu EP0. Siłę o najwyższej wartości wśród badanych kompozytów przyjął kompozyt 5PU324GF3XPS. Jej wartość wyniosła 1844, 88 N. Kompozyt charakteryzował się też najniższym przemieszczeniem – 20,78 mm oraz niewielką ilością pików świadczących o penetracji impaktora w głąb materiału.

Na podstawie wykresu zależności siła – przemieszczenie i wyników pojedynczych próbek generowanych przez program badawczy można obliczyć również energię absorpcji kompozytu, czyli rzeczywistą wartość energii, jaką kompozyt pochłonął w wyniku uderzenia. Parametr ten stanowi jedną z najważniejszych cech materiałów stosowanych jako struktury ochronne w pojazdach i maszynach. Energię absorpcji (EA) obliczono się wykorzystując równanie (10), a w Tabeli 22. zestawiono wartości energii zaabsorbowanej przez kompozyt.

$$EA = \int_0^l P \cdot dl \text{ [kJ]} \quad (10)$$

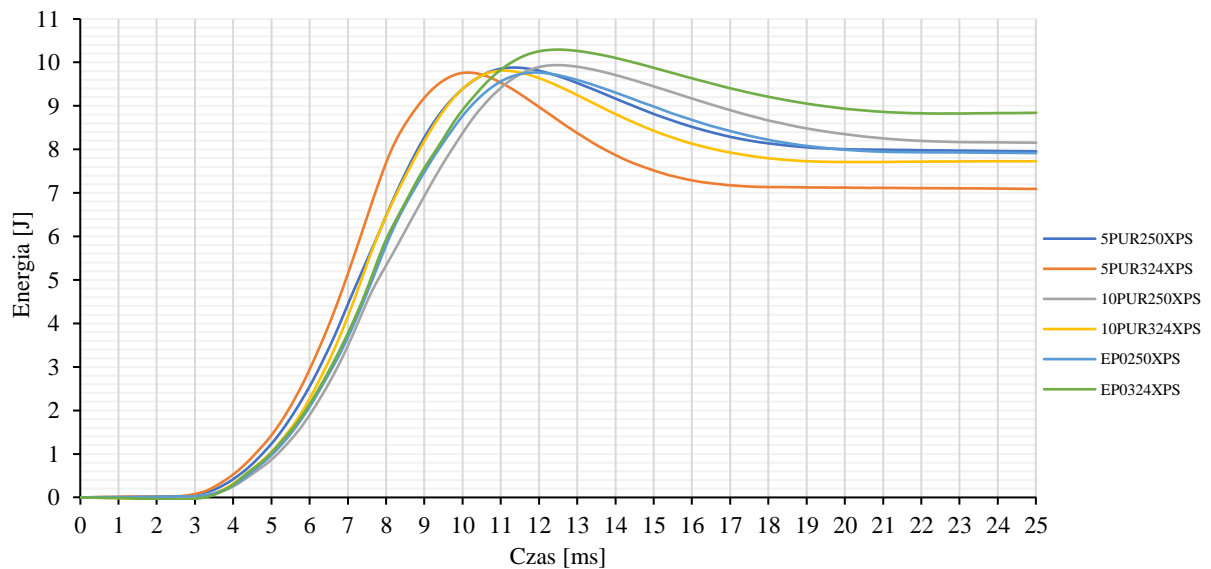
gdzie P - wartość siły niszczącej, a dl to przemieszczenie.

Tabela 5.7. Energia zaabsorbowana przez kompozyt

ENERGIA ZAABSORBOWANA PRZEZ KOMPOZYT		
EP0250GF	7,89 J	± 0,40 J
5PU250GF	8,17 J	± 0,41 J
10PU250GF	7,92 J	± 0,40 J
EP0324GF	7,08 J	± 0,35 J
5PU342GF	7,76 J	± 0,39 J
10PU324GF	8,90 J	± 0,45 J

Wyniki zestawione w Tabeli 5.7. wskazują, że materiał pochłania 70 – 90% energii uderzenia. Uwagę zwraca fakt, że żaden z kompozytów nie uległ całkowitej perforacji, dzięki czemu można zakładać bardzo dobrą odpowiedź materiału w warunkach uderzenia i skuteczną ochronę osłanianego obiektu. Największą energię uderzenia pochłonął kompozyt 10PU324GF (8,90 J). Wysokie wartości pochłoniętej energii wykazywały wszystkie modyfikowane na

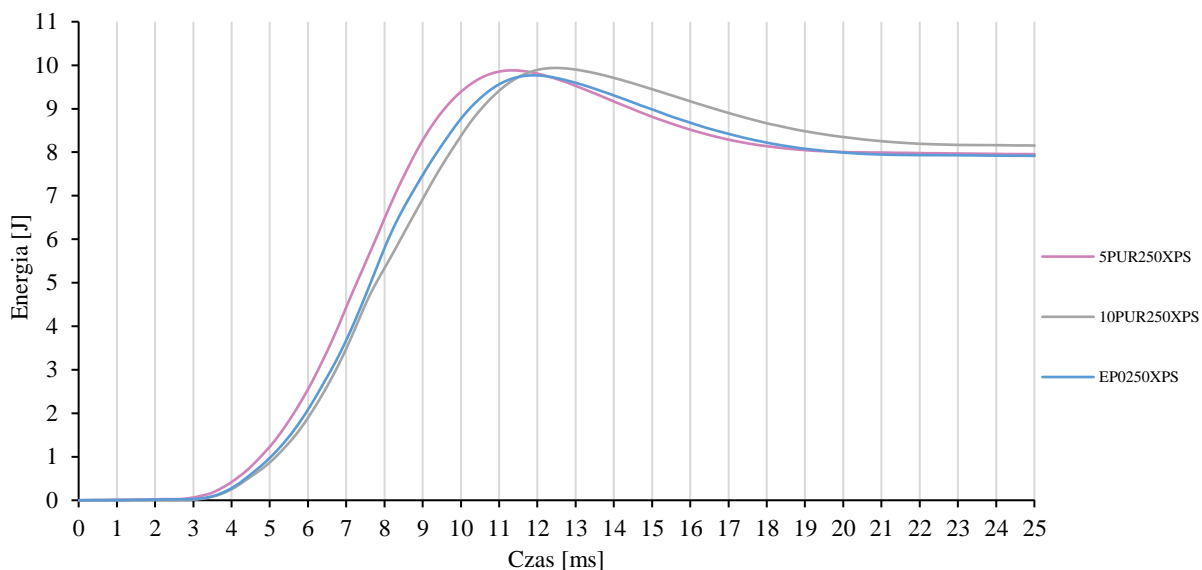
poziomie osnowy kompozyty, co przypisywać można szczególnemu uelastycznieniu materiału przez zdyspergowany dodatek poliuretanu i powstanie wzajemnie przenikających się sieci polimerowych. Pozwala to także stwierdzić, że zastosowanie materiału jako osłony baterii lub elektroniki pojazdów elektrycznych będzie korzystne zarówno ze względu na właściwości mechaniczne jak i niski koszt wytwarzania. Spełnił on wymagania klasyfikacji wytrzymałości mechanicznej IK na poziomie 9 (por. Tabela 2.1.). Biorąc pod uwagę niezbadane w niniejszej pracy właściwości akustyczne i izolacyjne pianki XPS należy przypuszczać, że przedstawiony materiał będzie posiadał jeszcze więcej korzystnych właściwości w zastosowaniach jako struktura ochronna.



Rysunek 5.18. Wykres zależności energii od czasu

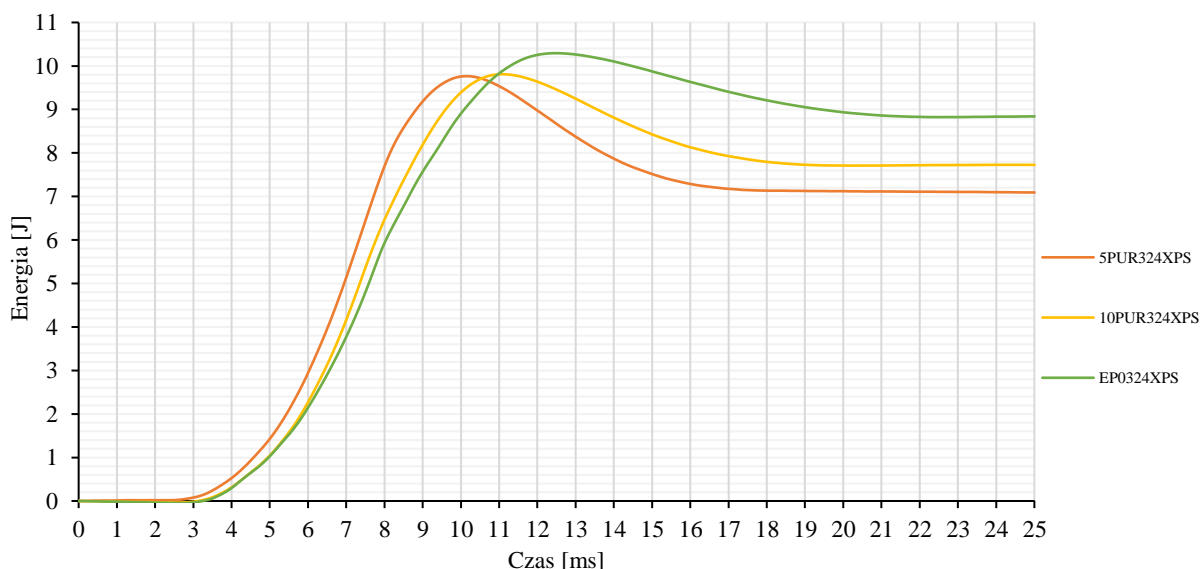
Średni czas kontaktu impaktora (C_t) wyznacza szerokość „piku” wzdłuż linii podstawowej krzywych na wykresie zależności energii od czasu. Wartość ta określa moduł sprężystości i odporność na przebicie pojedynczego panelu kompozytowego.

Lepkosprężysty kompozyt o wysokim module sprężystości i odporności na przebicie powinien wykazywać niską wartość C_t . Rysunek 5.18. przedstawia wykres zależności energii od czasu epoksydowo - szklanych kompozytów warstwowych z 3 warstwami rdzenia XPS. W dalszej części analizę przeprowadzono biorąc pod uwagę wyłącznie wpływ modyfikacji osnowy na badane parametry.



Rysunek 5.19. Wykres zależności energii od czasu – kompozyty GFplain250

Średni czas kontaktu impaktora dla kompozytów ze wzmocnieniem tkaniną GFplain250 wykazał zmniejszenie szerokości piku po zastosowaniu modyfikatora (Rysunek 5.19.). Największą poprawą tego parametru w porównaniu z kompozytem bez dodatku modyfikatora charakteryzował się kompozyt 5PU250GF3XPS. Połączenie tkaniny plain z uelastyczniającym osnowę modyfikatorem poliuretanowym znacznie poprawia właściwości wytrzymałościowe oraz jego odporność na przebicie.

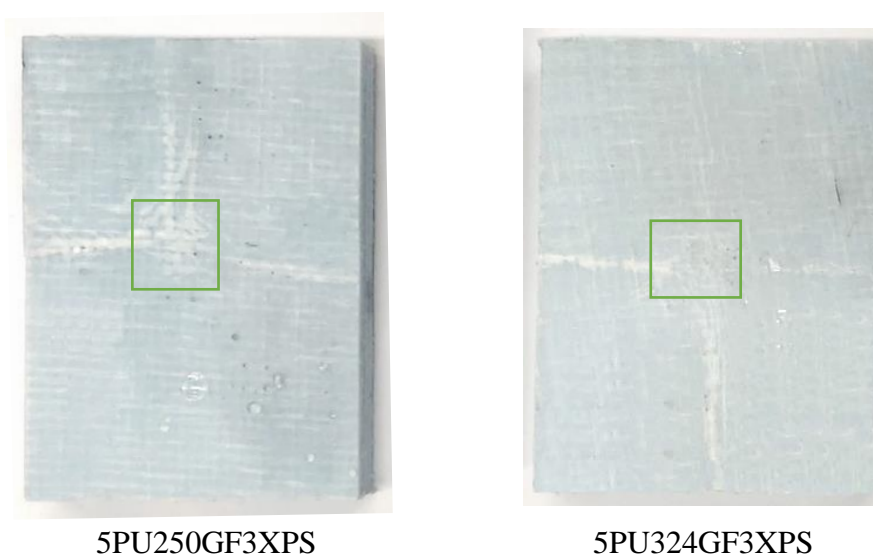


Rysunek 5.20. Wykres zależności energii od czasu – kompozyty GFtwill324

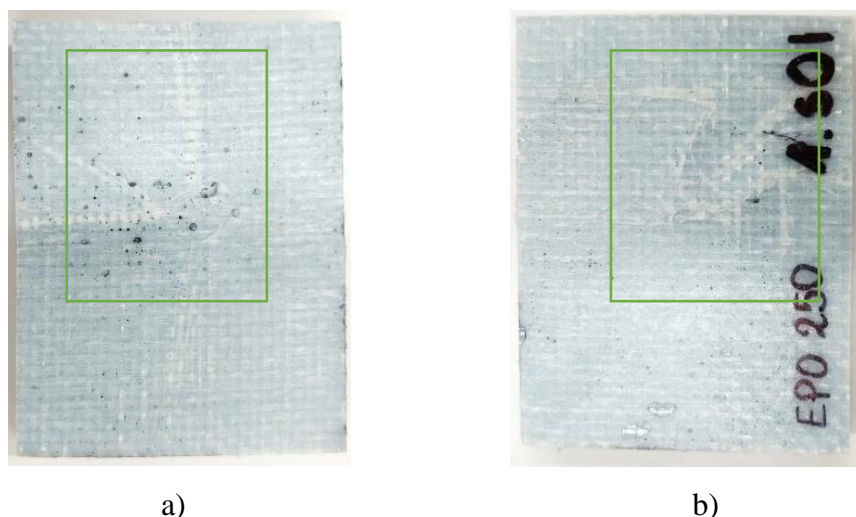
Analizując średni czas kontaktu impaktora dla kompozytów ze wzmocnieniem tkaniną GFtwill324 zaobserwowano zmniejszenie szerokości piku po zastosowaniu modyfikatora

(Rysunek 5.20.). Dodatek poliuretanu skutecznie zwiększa odporność na przebicie kompozytu dzięki elastycznym segmentom w strukturze modyfikatora oraz poprawie adhezji między warstwami kompozytu po jego zastosowaniu. Największą poprawą tego parametru w porównaniu z kompozytem bez dodatku modyfikatora charakteryzował się kompozyt 5PU324GF3XPS.

Wzrokowa identyfikacja uszkodzeń kompozytów również potwierdza poprawę tolerancji na uszkodzenia poprzez modyfikację osnowy. Nie zauważono żadnych widocznych uszkodzeń w dolnych warstwach kompozytów z modyfikowaną poliuretanem osnową, co świadczy o tym, że zewnętrzne (Rysunek 5.21.) i środkowe warstwy kompozytu efektywnie hamują rozprzestrzenianie się uszkodzeń. Pozwala to potwierdzić potencjał zastosowania modyfikowanych poliuretanem kompozytów do zastosowań jako osłony elementów lub urządzeń, ponieważ dolna część kompozytu (najbliższa chronionemu elementowi) nie traci ciągłości swojej struktury i skutecznie zabezpieczenia element znajdujący się wewnątrz osłony. Kompozyty z niemodyfikowaną osnową pękały zarówno w warstwie górnej jak i dolnej warstwie okładzinowej (Rysunek 5.22.), co oznacza bardzo małą zdolność do pochłaniania energii uderzenia (niska tolerancja na uszkodzenia).



Rysunek 5.21. Uszkodzenia górnej okładziny kompozytów z dodatkiem 5PU



Rysunek 5.22. Przykład uszkodzenia kompozytów z niemodyfikowaną żywicą po uderzeniu 10 J
a) górna okładzina b) dolna okładzina

Odporność na przebicie kompozytów z trzema warstwami rdzenia została określona przez zginanie trójpunktowe po uderzeniu (BAI, ang. *Bending After Impact*). Metoda pozwala na ocenę stopnia obniżenia wartości oznaczonych właściwości po uderzeniu i zginaniu w stosunku do pierwotnych wartości (wyłącznie zginane kompozyty). W Tabeli 5.8. zestawiono wyniki uzyskane z teście zginania kompozytów przed i po uderzeniu. Próbkę nieuderzoną oznaczono jako BO, a próbki poddane próbie spadającego ciężaru przed próbą zginania oznaczono jako BAI. Odporność na przebicie jest jednym z parametrów, który jest kluczowy w zastosowaniach nośnych poddawanych obciążeniom udarowym.

Tabela 5.8. Wyniki wytrzymałości resztkowej kompozytów określonej metodą BAI

	E_z [kJ/m ²]			Moduł zginania [MPa]		
	BO	BAI	Wytrzymałość resztkowa	BO	BAI	Wytrzymałość resztkowa
EP0250GF3XPS	6,38	5,03	79%	41,95	26,40	62%
EP0324GF3XPS	7,21	5,69	78%	50,20	26,95	53%
5PU250GF3XPS	6,55	5,32	81%	35,57	27,10	76%
5PU324GF3XPS	9,11	8,11	89%	42,50	32,00	75%
10PU250GF3XPS	6,47	4,97	76%	40,75	24,90	61%
10PU324GF3XPS	8,55	5,61	65%	42,20	23,15	55%

Analiza wyników wskazuje, że kompozyty z 5% udziałem PU charakteryzują się najwyższą wytrzymałością resztkową. Dla kompozytu 5PU324GF3XPS, zarówno jego początkowa wartość E_z (9,11 kJ/m²), jak i wartość po uderzeniu i zginaniu (8,11 kJ/m²) były najwyższe wśród badanych materiałów. Oznacza to, że kompozyt zachował 89% swojej początkowej wytrzymałości biorąc pod uwagę ilość pracy potrzebnej do zniszczenia próbki. Najniższą wartością energii zniszczenia charakteryzował się kompozyt 10PU324GF3XPS, potwierdzając wnioski innych badań, że 10% udział poliuretanu jest za duży i przyczynia się do pogorszenia właściwości.

Rozpatrując wyniki określające moduł zginania badanych kompozytów także kompozyty z 5% udziałem modyfikatora wykazywały mniejszy spadek sztywności porównując z pozostałymi materiałami. Choć moduł zginania w badaniu BO dla tych kompozytów był początkowo najniższy (35,57 MPa), to po badaniu BAI wartość ich modułu była najwyższa spośród wszystkich kompozytów, zachowując 75 – 76 % pierwotnej wytrzymałości (27,10 MPa). Najmniejszą odpornością na przebicie charakteryzował się kompozyt EP0324GF3XPS, którego moduł zginania zmniejszył się o prawie połowę w stosunku do pierwotnej wartości (BO – 50,20 MPa, BAI – 26,95 MPa).

W Tabelach 5.9. – 5.14. przedstawiono porównanie uszkodzeń powstałych w wyniku badania wytrzymałości resztkowej metoda BAI. Kompozyty z niemodyfikowaną osnową charakteryzowały się dużą kruchością osnowy, stąd wyraźne pęknięcia i wgłębienia zarówno górnej jak i dolnej warstwy. Przez wzgląd na słabą adhezję obserwowano także delaminację międzywarstwową o dużej powierzchni dla kompozytów wzmocnionych tkaniną GFplain250.

Tabela 5.9. Uszkodzenia kompozytów EP0250GF3XPS po badaniu metodą BAI





BO	BAI	
		<p>Górna warstwa kompozytów po badaniu</p>

Tabela 5.10. Uszkodzenia kompozytów EP0324GF3XPS po badaniu metodą BAI

<p>BO</p> 	<p>BAI</p> 	<p>Górna warstwa kompozytów po badaniu</p>
---	---	--

Kompozyty modyfikowane wykazywały znacznie lepszą odpowiedź na obciążenia podczas testów zginania (BO) i zginania po uderzeniu (BAI). Podobnie jak dla kompozytów niemodyfikowanych obserwowano delaminację rdzenia, jednak znacznie mniejszą powierzchniowo (wyłącznie przy krawędziach). Górna i dolna okładziny zachowywała ciągłość swojej struktury - pozostawała praktycznie nienaruszona lub z minimalnym pęknięciem osnowy. Świadczy to zatem o skutecznym zahamowaniu propagacji pęknięć poprzez zastosowanie modyfikatora poliuretanowego oraz dobrej adhezji osnowy i wzmocnienia.

Tabela 5.11. Uszkodzenia kompozytów 5PU250GF3XPS po badaniu metodą BAI




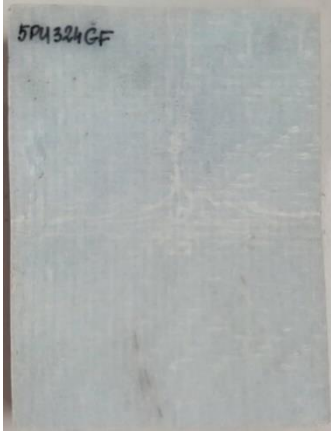
<p>BO</p> 	<p>BAI</p> 	<p>Górna warstwa kompozytów po badaniu</p>
---	---	--

Tabela 5.12. Uszkodzenia kompozytów 5PU324GF3XPS po badaniu metodą BAI

BO	BAI	
		<p>Górna warstwa kompozytów po badaniu</p>

Kompozyty modyfikowane poliuretanem w ilości 5-10% wag. wykazywały bardzo zbliżone mechanizmy uszkodzenia, jednak analiza wyników wytrzymałości resztkowej wskazuje, że najkorzystniejsze pod kątem składowego bilansu ilościowego jest zastosowanie modyfikatora w ilości 5% wagowych. Dodatkowo, kompozyty wzmocnione GFTwill324 poddane testom zginania (BO) wykazują znacznie lepszą odpowiedź pod obciążeniem zginającym – brak charakterystycznego wyraźnego ugięcia w górnej warstwie osnowy, a po testach BAI kompozyty wykazywały znacznie łagodniejsze zniszczenia w górnej warstwie osnowy.

Tabela 5.13. Uszkodzenia kompozytów 10PU250GF3XPS po badaniu metodą BAI




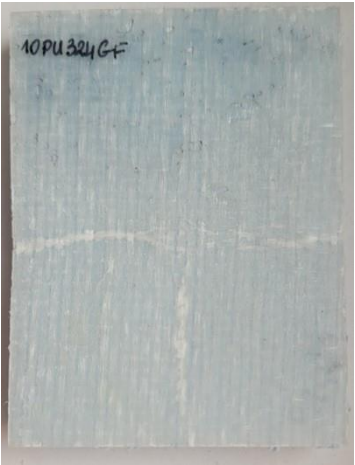
BO	BAI	
		<p>Górna warstwa kompozytów po badaniu</p>

Tabela 5.14. Uszkodzenia kompozytów 10PU324GF3XPS po badaniu metodą BAI

<p>BO</p> 	<p>BAI</p> 	<p>Górna warstwa kompozytów po badaniu</p>
---	---	--

Wszystkie zaproponowane badania eksperymentalne pozwoliły uzupełnić lukę badawczą dostrzeżoną podczas analizy literatury oraz dokonać oceny doboru materiałów i właściwości otrzymanych kompozytów pod kątem zastosowania ich jako struktur ochronnych w samochodach elektrycznych oraz pozwoliły

Przeprowadzono również analizę kosztów wytwarzania kompozytów EP/PU/GF/XPS o korzystnym stosunku ceny do właściwości materiału warstwowego. W Tabeli 5.15 podano szacunkowe ceny użytych materiałów (stan na dzień 15.03.2024 r.).

Tabela 5.15. Szacunkowe ceny materiałów do wytworzenia kompozytu EP/PU/GF/XPS

<p>Żywica epoksydowa Epidian 5</p>	<p>65,00 zł/kg</p>
<p>Utwardzacz Z1</p>	<p>78,00 zł/kg</p>
<p>Pianka XPS Expert Matt 3mm</p>	<p>3,74 zł/m²</p>
<p>Poliuretan DESMOCAP 12</p>	<p>~ 100 zł/kg</p>
<p>Tkanina szklana gramatura 250g/m² [splot plain]</p>	<p>~ 15 zł/m²</p>
<p>Tkanina szklana gramatura 324g/m² [splot twill]</p>	<p>~ 18,50 zł/m²</p>

Częstym zjawiskiem będącym następstwem produkcji wytrzymałych materiałów do zastosowań energochłonnych jest konieczność wykorzystania generujących wysokie koszty metod produkcji lub materiałów. Kompozyty EP/PU/GF/XPS przedstawione są alternatywą dla wysoko budżetowych materiałów również dzięki bardzo dobrym właściwościom

wytrzymałościowym przedstawionym w pracy. Całkowity koszt materiałowy w przeliczeniu na 1m² kompozytów z trzema warstwami rdzenia wytwarzanych w niniejszej pracy przedstawiono w Tabeli 5.16.

Tabela 5.16. Koszt materiałowy w przeliczeniu na 1m² kompozytu

Rodzaj kompozytu	Szacunkowa cena 1 m² kompozytu [zł]
EP0250GF3XPS	164,43
EP0324GF3XPS	178,43
5PU250GF3XPS	166,72
5PU324GF3XPS	180,72
10PU250GF3XPS	169,07
10PU324GF3XPS	183,07

6. WNIOSKI

Głównym celem pracy było wytworzenie epoksydowo – szklanego kompozytu przekładkowego z osnową modyfikowaną poliuretanem i porowatym rdzeniem XPS oraz analiza mechanizmów uszkodzeń i jego charakterystyka wytrzymałościowa, określająca możliwość zastosowania materiału w strukturach ochronnych w samochodach elektrycznych. Dobór badań wytrzymałościowych miał na celu kompleksową charakterystykę wytrzymałościową i mechaniczną. Osiągnięcie celu wymagało w początkowym etapie doboru materiałów, modyfikacji osnowy oraz wytworzenia kompozytu przekładkowego. Obserwacja mechanizmów zniszczenia pod wpływem zastosowanych obciążeń statycznych i dynamicznych oraz analizy wyników badań właściwości wytrzymałościowych, tj. dynamiczna analiza mechaniczna warstwy kompozytowej, udarność, trójpunktowe zginanie, ściskanie, tolerancja na uszkodzenia i odporność na przebicie. Przyjęto, że spośród materiałów do zastosowań energochłonnych jako struktury ochronne w samochodach elektrycznych (w tym w szczególności jako osłony baterii samochodów elektrycznych) wytypowane zostaną te kompozyty, które wykazują wysoką wytrzymałość na obciążenia udarowe i zginające oraz niski spadek wytrzymałości resztkowej.

Wybór materiałów do wytworzenia kompozytów opierał się na próbie zachowania równowagi między niską ceną, prostotą produkcji i wysokich wartościach parametrów wytrzymałościowych. Przygotowanie kompozytów metoda ręczną wpisało się w te założenia, jednak metoda ta może być udoskonalana lub zastąpiona w celu uniknięcia wad materiału. Przy użyciu znanych metod produkcji można z łatwością zautomatyzować proces w skali przemysłowej.

Zastosowanie pianki XPS może być bardzo korzystne w zastosowaniach, gdzie wymagana jest pewna elastyczność i znaczna redukcja masy, jednak powinny być to zastosowania, w których nie występują ekstremalnie wysokie obciążenia mechaniczne. Zastosowanie pianki zwiększa wydajność zderzeniową konstrukcji w aspekcie pochłaniania energii, co ma korzystny wpływ na trwałość, właściwości i bezpieczeństwo baterii samochodu elektrycznego.

Modyfikacja chemiczna osnowy kompozytu przekładkowego stanowiła pierwszy element innowacyjnego podejścia do wytwarzania kompozytów warstwowych stosowanych jako struktury energochłonne. W znacznej większości prac badawczych obserwowano trend wykorzystywania jako wzmocnienie kompozytów wyłącznie włókien, tkaniny lub napełniaczy proszkowych. Zastosowana modyfikacja ciekłym polimerem sprawiła, że reaktywne grupy – OCN w łańcuchu strukturalnym poliuretanu wytworzyły z żywicą wzajemnie przenikające się

sieci polimerowe IPN. Doprowadziło to do wzmocnienia nie tylko na poziomie fizycznym, w którym poliuretan pełni rolę uelastyczniającego napełniacza polimerowego, ale również na poziomie chemicznym, spełniając funkcję promotora adhezji. Wprowadzeniu modyfikatora przypisuje się nie tylko poprawę właściwości okładzin i kompozytowych warstw wzmacniających oraz polepszenie właściwości adhezyjnych między warstwami kompozytu, ale także zahamowanie propagacji pęknięć w całej warstwie okładziny oraz efektywniejsze zachowanie w aspekcie pochłaniania energii w warunkach różnego rodzaju obciążeń poprzez uelastycznienie osnowy.

Badanie DMA pozwoliło scharakteryzować warstwę kompozytową i potwierdzić mechanizm wzmocnienia w zależności od zawartości modyfikatora w zakresie ujemnych i dodatnich temperatur oraz pod wpływem stałego, wielokrotnie powtarzającego się obciążenia:

- dodatek 5% wag. modyfikatora w osnowie epoksydowej ze wzmocnieniem GF250 w przedziale dodatnich temperatur spowodował wzrost modułu stratności E'' (169,80 MPa);
- stosunek sztywności materiału do własności lepkosprężystych ($tg\delta$) był najniższy dla kompozytu EP0250GF (0,18), a najwyższy dla kompozytu 10PU250GF (0,37);
- moduł zachowawczy kompozytów, określający sztywność materiału, wykazał, że kompozyty modyfikowane charakteryzowały się gwałtownym spadkiem sztywności w temperaturze ok. 60 – 70°C;
- przebiegi krzywych w funkcji ujemnych temperatur wykazały charakterystyczne piki w przebiegu modułu stratności, świadczących o niskotemperaturowej przemianie drugorzędowej osnowy (*secondary transition*), nieodłącznie związanej z właściwościami wzmocnienia.

Wraz ze wzrostem zawartości modyfikatora w osnowie obserwowano ok. 10% wzrost odporności na udarowe zniszczenie, a elastyczne łańcuchy poliuretanowe wpływały pośrednio na lepszą odpowiedź materiału w warunkach uderzenia:

- tkanina plain charakteryzowała się większą sztywnością, co znacznie wpływało na przyspieszenie gwałtownej propagacji pęknięć w porównaniu do tkaniny twill;
- pod wpływem prostopadłego uderzenia płaszczyznowego warstwy kompozytu sekwencyjnie przyjmowały kolejną część energii uderzenia, a największy udział w przeciwdziałaniu odkształceniom spowodowanym obciążeniami prostopadłymi do powierzchni miały rdzeń piankowy i modyfikowana osnowa, czynnie pochłaniające lub rozpraszające energię uderzenia.

Badania tolerancji na uszkodzenia oraz odporności na przebicie wykazały, że zarówno pod względem ilości modyfikatora jak i rodzaju zastosowanego wzmocnienia obserwowano efekt synergii związany z odmiennym zachowaniem materiału w zależności od składu kompozytu:

- w przypadku każdego z kompozytów nastąpiło odbicie impaktora bez perforacji materiału;

- identyfikacja wzrokowa uszkodzeń powierzchniowych wykazała bardzo podobne zachowanie kompozytów – ślad punktowego uderzenia impaktora i liniowe pęknięcia promieniujące w dwóch kierunkach

- kompozyty niemodyfikowane pękały w warstwie osnowy, uszkadzając także włókna w warstwie wzmocnienia;

- kompozyty modyfikowane zachowywały ciągłość struktury w warstwie kompozytowej dzięki uelastyczniającemu działaniu modyfikatora.

Otrzymany materiał kompozytowy spełnił wymagania klasyfikacji wytrzymałości mechanicznej IK na poziomie 9, które kwalifikują go do zastosowania jako osłona baterii w samochodach elektrycznych.

Próby trójpunktowego zginania kompozytów przekładkowych miały na celu porównanie zachowania kompozytów oraz wpływu zastosowanej modyfikacji na wytrzymałość na zginanie oraz wyznaczenie charakterystyki ich zachowania podczas statycznego obciążenia zginającego:

- w przypadku kompozytów z modyfikowaną żywicą nie obserwowano pęknięcia warstw osnowy, co świadczy o znacznym uelastycznieniu kompozytu dzięki obecności elastycznego poliuretanu w osnowie i dobrej adhezji do rdzenia;

- brak uszkodzeń spowodowanych delaminacją lub ścinaniem pianki XPS – najwyższa siła działająca na kompozyt 10PU324GF3XPS wyniosła wartość 69 N przy odkształceniu przewyższającym trzykrotnie grubość badanej próbki.

- kompozyty referencyjne (niemodyfikowane) wykazywały znacznie większą sztywność i kruchość osnowy podczas testów trójpunktowego zginania., a w miarę wzrostu działającego na kompozyty obciążenia, następowała także jednostronna delaminacja i pęknięcie warstw.

Wytrzymałość resztkowa kompozytów z trzema warstwami rdzenia została określona przez zginanie trójpunktowe po uderzeniu (BAI, ang. *Bending After Impact*). Metoda ta pozwoliła na ocenę stopnia obniżenia właściwości wytrzymałościowych w stosunku do pierwotnych wartości. Analiza wyników wskazuje, że kompozyty z 5% udziałem PUR charakteryzują się najwyższą odpornością na przebicie. Dla kompozytu 5PU324GF3XPS, zarówno jego początkowa wartość energii zniszczenia E_z (9,11 kJ/m²), jak i wartość po uderzeniu i zginaniu (8,11 kJ/m²) były najwyższe wśród badanych materiałów.

Oznaczone wartości modułu zginania badanych metodą BAI materiałów wskazują, że kompozyty z 5% udziałem modyfikatora charakteryzują się najmniejszym spadkiem sztywności porównując z pozostałymi materiałami, zachowując 75 - 76% pierwotnej wytrzymałości. Kompozyty z niemodyfikowaną osnową charakteryzowały się niską, stąd wyraźne pęknięcia zarówno górnej jak i dolnej warstwy okładziny. Ze względu na słabą adhezję obserwowano także delaminację międzywarstwową.

Identyfikacja wzrokowa uszkodzeń kompozytów z modyfikowaną osnową wykazała znacznie lepszą odpowiedź na obciążenia podczas testów zginania (BO) i uderzenia po zginaniu (BAI). Zahamowanie propagacji pęknięć było efektem dobrej adhezji osnowy i wzmocnienia spowodowanego działaniem modyfikatora poliuretanowego. Taka odpowiedź materiału pozwala na efektywne wykorzystanie go w zastosowaniach ochronnych.

Przeprowadzenie testów ściskania krawędziowego wyznaczyło pewnego rodzaju innowacyjną procedurę badawczą w zakresie charakterystyki kompozytów ze stopniowanym rdzeniem. Stanowiły one uzupełnienie charakterystyki badania udarności w kierunku równoległym do ułożenia warstw i obrazowało różnice między statycznym a dynamicznym charakterem obciążenia.

Wyboczenie było głównym mechanizmem uszkodzenia pojawiającym się w każdym z badanych kompozytów, a kompozyty z niemodyfikowaną osnową wykazywały także mechanizm delaminacji ze względu na słabą adhezję między warstwami. Modyfikacja 5% dodatkiem poliuretanu obniżyła wytrzymałość na krawędziowe ściskanie kompozytów z tkaniną GFplain250 i GFtwill324, w porównaniu zarówno do kompozytów niemodyfikowanych, jaki i kompozytów modyfikowanych 10% zawartością PU. Może to wynikać z faktu, że 5% wag. modyfikatora wpływa optymalnie na uelastycznienie materiału.

Podsumowując, kompozyty epoksydowo - szklane z dodatkiem 5% poliuretanu i rdzeniem piankowym XPS posiadają efektywną zdolność do pochłaniania energii wstrząsu lub obciążenia udarowego oraz bardzo dobre parametry odpowiedzi na obciążenia zginające i ściskające. Dowodzi to słuszności zastosowania modyfikacji chemicznej mającej istotny wpływ na właściwości kompozytu potwierdzone badaniami eksperymentalnymi wykonanymi w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej. Na podstawie analizy wyników zauważono, że poprawę właściwości mechanicznych kompozytu uzyskuje się już przy 5% zawartości modyfikatora, co pozwala na zwiększenie oszczędności materiałowych w procesie przygotowania kompozytu. Bardzo niski koszt wytwarzania kompozytów EP/PU/GF/XPS o korzystnym stosunku ceny do właściwości materiału warstwowego jest wartym uwagi aspektem rozpatrywanym na etapie projektowania.

Ponadto, otrzymany kompozyt warstwowy przedstawiony w pracy spełnia wszystkie wymogi stosowane kompozytom stosowanym jako osłona elementów elektroniki lub baterii w samochodach elektrycznych o zmniejszonej masie, wykazującej polepszone właściwości mechaniczne. Biorąc pod uwagę niezbadane w niniejszej pracy właściwości akustyczne i izolacyjne pianki XPS należy przypuszczać, że otrzymany i przebadany kompozyt będzie posiadał jeszcze więcej korzystnych cech, takich jak dobre właściwości izolacji termicznej i akustycznej wynikające z zastosowania pianki XPS.

Wyniki badań uzyskane w pracy potwierdziły słuszność postawionych na początku założeń i celów. Zastosowanie modyfikacji chemicznej było skuteczną i niekonwencjonalną formą wzmocnienia kompozytu, która potwierdzona została przez wyniki badań i wyraźną poprawę właściwości wytrzymałościowych i mechanicznych kompozytu. Natomiast zaproponowane w pracy testy eksperymentalne, tj. udarność, zginanie, ściskanie, odporność na przebicie i wytrzymałość resztkową oraz dynamiczna analiza mechaniczna warstwy kompozytowej w zakresie ujemnych i wysokich temperatur, mogą posłużyć jako kompleksowa baza do przeprowadzenia procedury badawczej dla kompozytów pełniących funkcję materiałów pochłaniających energię uderzenia oraz innych obciążeń działających na obiekt i wielowymiarowo odzwierciedlają one warunki eksploatacyjne, w których dana konstrukcja będzie użytkowana.

LITERATURA

1. Haq A.U., A brief review on various high energy absorbing materials, *Materials Today: Proceedings* 38, 2021, 3198–3204
2. Isaac C.W., A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability, *Composite Structures* 257, 2021, 113081
3. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1997. Online version (2019-) created by S. J. Chalk
4. Ochelski S., Wpływ prędkości obciążenia na zdolność pochłaniania energii kompozytowych elementów energochłonnych, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2011, Vol. 60, nr 4, 91-101
5. Ochelski S. Porównanie energochłonności konstrukcji przekładkowych typu sandwich z wypełnieniem oraz cienkościennych struktur falistych, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, Vol. 57, nr 1, 2008, 145-157
6. Ochelski S. Doświadczalna ocena zdolności pochłaniania energii kompozytów węglowo-epoksydowych i szklano-epoksydowych, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2007, Vol. 56, nr 1, 143-158
7. Costa S., Physically based fibre kinking model for crash of composites, Thesis For The Degree Of Licentiate Of Engineering In Solid And Structural Mechanics Department Of Applied Mechanics, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden, 2016
8. Pawłowski P., Systemy adaptacyjnej absorpcji obciążeń udarowych. Rozprawa doktorska. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2011
9. [Online][Zacytowano:28.05.2022]:<https://www.grantadesign.com/education/students/charts/>
10. [Online][Zacytowano:29.05.2022]:<https://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel/?fbclid=IwAR3ybzT5zD4jH9IT3TkjqNgh7z7FDI16J9l6h3BHWpe2Qa-JAzut1Rys7LA>
11. Kucharczyk W., Mazurkiewicz A., Żurowski W. Nowoczesne materiały konstrukcyjne. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo UTH, Radom 2011
12. Boczkowska A., Krzesiński G., Kompozyty i techniki ich wytwarzania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016

13. Mazurkiewicz Ł., Badanie procesu delaminacji próbek kompozytowych w aspekcie oceny ich energochłonności, *Modelowanie Inżynierskie* 43, 2012, 169-176
14. Kaminski M.L., Fasano E., Ultimate strength, 14th International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC) Tokyo Vol. 1, 253-322
15. [Online][Zacytowano: 29.05.2022]: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Wyboczenie>
16. Ochelski S. *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, Wydawnictwo PWN, Warszawa, 2018
17. Muc, A., Nogowczyk, R., Formy zniszczenia konstrukcji sandwichowych z okładzinami wykonanymi z kompozytów, *Kompozyty* 5, nr 4, 2005, 31-35
18. [Online][Zacytowano:29.08.2022]:<https://resinepoxy.ca/fr/2017/11/03/baja-ulaval-resines-a-laminer-en-wet-lay-up/>
19. [Online][Zacytowano:29.08.2022]: <https://www.dofrp.com/hand-lay-frp-process/>
20. Esnaola A, Tena I., Effect of the manufacturing process on the energy absorption capability of GFRP crush structures, *Composite Structures*, Vol. 187, 2018, 316-324
21. [Online][Zacytowano: 29.08.2022]: <https://www.rtmcomposites.com/process/vacuum-assisted-resin-transfer-molding-vartm>
22. Shah S.Z.H., Karuppanan S., Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review, *Composite Structures*, Vol. 217, 2019, 100-121
23. Zhu Y., Sun Y., Low-velocity impact response of multilayer foam core sandwich panels with composite face sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 209, November 2021, 106704
24. Polimeno U., Meo M., Detecting barely visible impact damage detection on aircraft composites structures, *Composite Structures*, Volume 91, Issue 4, December 2009, 398-402
25. Razali N.,Sultan M.T.H., Impact damage analysis of hybrid composite materials, *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 2019, 121-132
26. Fiore V., Valenza A., Epoxy resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites, *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2013, 88-121
27. Frigione M.E., Oligomeric and polymeric modifiers for toughening of epoxy resins, *European Polymer Journal*, Volume 31, Issue 11, November 1995, 1021-1029

28. Jansen B.J.P., Preparation of thermoset rubbery epoxy particles as novel toughening modifiers for glassy epoxy resins, *Polymer*, Vol. 40, Issue 20, 1999, 5601-5607
29. Ben Saleh A.B., Synthesis and Characterization of Liquid Natural Rubber as Impact Modifier for Epoxy Resin, *Physics Procedia*, Vol. 55, 2014, 129-137
30. Jagtap S.B., Nanocomposites based on epoxy resin and organoclay functionalized with a reactive modifier having structural similarity with the curing agent, *Polymer*, Vol. 63, 2015, 41-51
31. Foix D., New pegylated hyperbranched polyester as chemical modifier of epoxy resins in UV cationic photocuring, *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 71, Issue 4, 2011, 417-424
32. Tan J. Hydrophobic epoxy resins modified by low concentrations of comb-shaped fluorinated reactive modifier, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 105, 2017, 353-361
33. Zhang Z., A laboratory study of epoxy/polyurethane modified asphalt binders and mixtures suitable for flexible bridge deck pavement, *Construction and Building Materials* 274, 2021, 122084
34. Zhou L., Synergetic effect of epoxy resin and carboxylated nitrile rubber on tribological and mechanical properties of soft paper-based friction materials, *Tribology International* 129, 2019, 314–322
35. Sharma S., A comprehensive review of current developments on the waste-reinforced polymer-matrix composites for automotive, sports goods and construction applications: Materials, processes and properties, *Materials Today: Proceedings* 33, 2020, 1671–1679
36. Yu P., Role of SiC submicron-particles on tribofilm growth at water-lubricated interface of polyurethane/epoxy interpenetrating network (PU/EP IPN) composites and steel, *Tribology International* 153, 2021, 106611
37. S.C. Tjong, Impact toughening behaviour of quaternary PP/HDPE/EPDM/EP blends, *European Polymer Journal*, Volume 34, 1998, 755-760
38. Peng Y.-J., A new recyclable crosslinked polymer combined polyurethane and epoxy resin, *Polymer* 149, 2018, 154-163
39. Sarafrazi M., Optimize epoxy matrix with RSM/CCD method and influence of multi-wall carbon nanotube on mechanical properties of epoxy/polyurethane, *Mechanics of Materials* 138, 2019, 103154
40. Iqbal Khan Z., Mechanical and thermal properties of sepiolite strengthened thermoplastic polymer nanocomposites: A comprehensive review, *Alexandria Engineering Journal*, 2021, article in press

41. Ramos V.D, Modification of epoxy resin: a comparison of different types of elastomer, *Polymer Testing* 24, 2005, 387–394
42. Kostrzewa M., Effect of polyurethane type on mechanical properties of composites based on epoxy resin with IPN structure, *Przetwórstwo Tworzyw* 2, 2015, 131-134
43. Jia Q.-M., Morphologies and properties of polyurethane/epoxy resin interpenetrating network nanocomposites modified with organoclay, *Materials Letters*, Vol. 60, Issues 9–10, 2006, 1306-1309
44. Białkowska A., Effect of post-curing times and temperature on selected properties of epoxy nanocomposites modified with condensation nonisocyanate polyurethanes, *Przetwórstwo Tworzyw* 3, 2015, 205-209
45. Białkowska A., Nanokompozyty epoksydowe modyfikowane poliuretanem kondensacyjnym, *Przemysł Chemiczny* 8, 2014
46. Niezgoda T., Barnat W. Analiza podatnych elementów kompozytowych w zastosowaniu do poprawy energochłonności barier drogowych, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2006, Vol. 55, nr 4, 21-43
47. Tarlochan F., Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review, *Materials*, 2021, 4731
48. [Online][Zacytowano: 15.09.2022]: <https://tvv-journal.upol.cz/pdfs/tvv/2012/01/53.pdf>
49. Ryszkowska J., Leszczyńska M., Rdzenie konstrukcji kompozytowych z pianek pólztywnych do zastosowań w tarczach ochronnych dla strażaków, *Polimery* 2018, 63
50. Apetre N.A., Sankar B.V. Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, 2006, 2479-2496
51. [Online][Zacytowano: 16.09.2022]: https://en.wikipedia.org/wiki/Functionally_graded_material
52. M. Kashtalyan, M. Menshykova: Three-dimensional elasticity solution for sandwich panels with a functionally graded core, *Compos Struct*, Vol. 87, 2009, 36-43
53. C. Capela, J. Ferreira, J. Costa: Effect of the foam core density on the bending response on sandwich composites, *Fibers Polymers*, Vol. 14, 2013, 597-602
54. Ghimire S., Chen J., Predicting fracture mechanisms in synthetic foam sandwiches with multi-layered cores using extended cohesive damage model, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 223, 2020, 106719

55. Y. Zhua, Y. Sun, Dynamic response of foam core sandwich panel with composite facesheets during low-velocity impact and penetration, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 139, 2020, 103508
56. F. Galdino Jr., R. Gomes da Silva, Development of a machine per drop weight impact for composite materials, Conference: 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Brazil, 2013
57. [Online][Zacytowano:23.09.2022]:<https://www.compositesworld.com/columns/sandwich-panel-test-methods>
58. [Online][Zacytowano:23.09.2022]:<https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/udarnosc;3990794.html>
59. W. Zhang, Technical problem identification for the failures of the liberty ships, *Challenges*, Vol. 7, 2016
60. [Online][Zacytowano:23.09.2022]:<https://sites.google.com/site/gobanengineeringnotes/materials-testing/impact-testing/izod-impact-test?pli=1>
61. Ismail M. F., Sultan M. T. H., A study on the low velocity impact response of hybrid kenaf-kevlar composite laminates through drop test rig technique, *BioResources* 13, 2, 2018, 3045-3060
62. Norma PN-EN ISO 179-1
63. Zimowski S., Adamczyk P., Oznaczanie cech wytrzymałościowych struktur z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknami, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków 2014
64. Chen C., Wang P., Effect of Core Architecture on Charpy Impact and Compression Properties of Tufted Sandwich Structural Composites, *Polymers*, 13 (10), 2021, 1665
65. Srivastava V. K., Impact Behaviour of Sandwich GFRP-Foam-GFRP Composites, *International Journal of Composite Materials*, Vol. 2 (4), 2012, 63-66
66. Balaban A.C., Low Velocity Impact Behaviour of Sandwich Composite Structures with E-Glass/Epoxy Facesheets and PVC Foam, *Procedia Structural Integrity* 18, 2019, 577–585
67. Wojtyra R., Imielińska K., Badania pęknięcia udarowego w konstrukcjach przekładkowych poliestrowo-szklanych z rdzeniem z pianki PVC, *Kompozyty* 7 (3), 2007, 140-144
68. Mocian O.A., Constantinescu D.M. Impact response of sandwich panels with polyurethane and polystyrene core and composite facesheets, *Materials Today: Proceedings* 12, 2019, 192–199

69. Ferdous W., Manalo A., Bond behaviour of composite sandwich panel and epoxy polymer matrix: Taguchi design of experiments and theoretical predictions, *Construction and Building Materials*, Vol. 145, 2017, 76-87
70. Zhu Y., Low-velocity impact response of multilayer foam core sandwich panels with composite face sheets, *International Journal of Mechanical Sciences* Vol. 209, 2021, 106704
71. Anderson T., Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites, *Composite Structures*, Vol. 50, Issue 3, 2000, 239-247
72. Feng D., Damage prediction in composite sandwich panels subjected to low-velocity impact, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 52, 2013, 12-22
73. Sain M. K., Fabrication and characterization of homogenous and functionally graded glass fiber reinforced polymer composites, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 66, Part 8, 2022, 3602-3608
74. Suresh S., Graded materials for resistance to contact deformation and damage, *Science*, Vol. 292, 29, 2001, 2447-2451
75. Sun G., Low-velocity impact behaviour of sandwich panels with homogeneous and stepwise graded foam cores, *Materials & Design*, Vol. 160, 2018, 1117-1136
76. Zhou J., The impact response of graded foam sandwich structures, *Composite Structures*, Vol. 97, 2013, 370-377
77. Huo X., On low-velocity impact response of foam-core sandwich panels, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 181, 2020, 105681
78. Avila A. F., Failure mode investigation of sandwich beams with functionally graded core, *Composite Structures*, Vol. 81, 2007, 323-330
79. Cunningham P. R., A new measurement technique for the estimation of core shear strain in closed sandwich structures, *Composite Structures*, Vol 51, 2001, 319-334
80. Taghizadeh S. A., Investigation of novel multi-layer sandwich panels under quasi-static indentation loading using experimental and numerical analyses, *Thin-Walled Structures*, Vol. 160, 2021, 107326
81. Norma PN-EN ISO 178
82. Corigliano A., Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, 2169-2180
83. Li T., Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials, *Composite Structures*, Vol. 175, 2017, 46-57

84. Rahman A., Three-point bending tests on composite sandwich structure with balsa wood core and fiberglass faces for glider design, AIP Conference Proceedings, Vol. 2226, 2020
85. Balcioğlu H. E., Flexural behaviors of sandwich composites produced using recycled and natural material, Mugla Journal of Science and Technology, 2018
86. Damodaran V., Multilayered recoverable sandwich composite structures with architected core, Materials & Design, Vol. 212, 2021, 110268
87. Farrokhbadi A., Experimental and numerical analysis of novel multi-layer sandwich panels under three point bending load, Composite Structures, Vol. 250, 2020, 112631
88. Krzyżak A., Sandwich structured composites for aeronautics: Methods of manufacturing affecting some mechanical properties, International Journal of Aerospace Engineering, 2016
89. Iyer V., Ritam C. Behaviour of rigid foam core glass/epoxy face sheet sandwich composites, Materials Today: Proceedings 5, 2018, 12083-12090
90. Harizi W., Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests, Composite Structures, Vol. 262, 2021, 113590
91. Naresh K., Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures, Composite Structures, Vol. 256, 2021, 113059
92. Kazemi M., Experimental analysis of sandwich composite beams under three-point bending with an emphasis on the layering effects of foam core, Structures, Vol. 29, 2021, 383-391
93. Hazwani F., Deformation mechanism of porous composite sandwich beam for orthopaedical application under three-point bending, Composite Structures, Vol. 281, 2022, 114983
94. Baran I., Residual bending behaviour of sandwich composites after impact, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 22, 2018
95. Betts D., Post-impact residual strength and resilience of sandwich panels with natural fiber composite faces, Journal of Building Engineering, Volume 38, June 2021, 102184
96. Saifullah A., Low velocity impact (LVI) and flexure-after-impact (FAI) behaviours of rotationally moulded sandwich structures, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 15, 2021, 3915-3927

97. Khan M. K., Impact performance and bending behavior of carbon-fiber foam-core sandwich composite structures in cold arctic temperature, *Journal of Composites Science*, 2020
98. Mak K., Performance of flax-FRP sandwich panels exposed to different ambient temperatures, *Construction and Building Materials*, Vol. 219, 2019, 121-130
99. Dokumentacja Operating Manual DMA 242 E, NETZSCH-Gerätebau GmbH, 2019
100. [Online][Zacytowano:21.12.2022]:https://analyzing-testing.netzsch.com/pl/training-know-how/sloownik/modul-zespolony-e?fbclid=IwAR0TJGv88XXJKUsnjIN1f4L_-oTOTsGTVRZScXE0A5wct0RfCiNkoGDXueI
101. Stark W., Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of epoxy carbon-fibre prepregs partially cured in a discontinued autoclave analogue process, *Polymer Testing*, Vol. 41, 2015, 140-148
102. Stark W., Investigation of the curing behaviour of carbon fibre epoxy prepreg by Dynamic Mechanical Analysis DMA, *Polymer Testing*, Vol. 32,v2013, 231-239
103. Stark W., Online monitoring of thermoset post-curing by dynamic mechanical thermal analysis DMTA, *Polymer Testing* Vol. 28, Issue 6, 2009, 561-566
104. Jaunich M., Carbon-fibre epoxy prepreg (CFC) curing in an autoclave analogue process controlled by Dynamic Mechanical Analysis (DMA), *Polymer Testing*, Vol. 32, 2013, 1487-1494
105. Xie M., A new method to characterize the cure state of epoxy prepreg by dynamic mechanical analysis, *Thermochimica Acta*, Volume 487, April 2009, 8-17
106. Redmann A., High-force dynamic mechanical analysis of composite sandwich panels for aerospace structures, *Composites Part C: Open Access*, Volume 5, July 2021, 100136
107. Lei H., Experimental and numerical investigation on the crushing behavior of sandwich composite under edgewise compression loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol.94, 2016, 34-44
108. Mousa M. A., Global buckling of composite structural insulated wall panels, *Materials & Design*, Vol. 32, 2011, 766-772
109. Koissin V., Compression strength of sandwich panels with sub-interface damage in the foam core, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, 2009, 2231-2240
110. Gdoutos E. E ., Compression facing wrinkling of composite sandwich structures, *Mechanics of Materials*, Vol. 35, 2003, 511-522
111. [Online][Zacytowano:20.11.2022]:<https://topolocfrt.com/how-about-composites-in-evs/>

112. [Online][Zacytowano:21.11.2022]:<https://www.plastics.gl/exhibit/weight-was-the-basic-exercise-2/>
113. Keenan T., Continental structural plastics in auburn hills unveils lightweight EV battery enclosure, DBusiness Magazine, 2020
114. [Online][Zacytowano:21.05.2022]:<https://www.topolocfrt.com/light-electric-freight-vehicles-in-amsterdam/>
115. [Online][Zacytowano:21.05.2022]:<https://www.researchgate.net/project/The-use-of-light-electric-vehicles-in-urban-freight/figures>
116. [Online][Zacytowano:24.05.2022]:<https://topolocfrt.com/composite-materials-on-vehicle-use/>
117. [Online][Zacytowano:24.05.2022]: <https://topolocfrt.com/refrigerated-truck-body/>
118. Meyer G., Hybrid and Electric Vehicles - The Electric Drive Delivers, International Energy Agency (IEA), 2015
119. [Online][Zacytowano:24.05.2022]:<https://olivertraveltrailers.com/>
120. [Online][Zacytowano:24.05.2022]:<https://www.design-composite.com/en/lightweight-construction/commercial-vehicles>
121. [Online][Zacytowano:24.05.2022]:https://www.alibaba.com/product-detail/40ft-container-Mobile-container-office-price_60525297141.html
122. [Online][Zacytowano:24.05.2022]:<https://aishanguizu.en.made-in-china.com/product/hNFmWkPcwZVS/China-Prefabricated-Mobile-Sandwich-Panel-Container-Shop-with-SGS.html>
123. [Online][Zacytowano:27.05.2022]:http://stadiony.net/aktualnosci/2021/11/katar_2022_kontenerowy_stadion_juz_gotowy
124. [Online][Zacytowano:27.05.2022]:<https://www.holycorepanel.com/sandwich-panel/composite-sandwich-panel/composite-sandwich-panel-for-yacht.html>
125. [Online][Zacytowano:29.05.2022]:<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12234>
126. [Online][Zacytowano:29.05.2022]:https://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/images/sopwith_at_1000.jpg
127. [Online][Zacytowano:29.05.2022]: <https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-model-general-mq-1-predator-flight/856085>
128. [Online][Zacytowano:29.05.2022]:<https://www.turbosquid.com/3d-models/uav-drone-collection-1492087>

129. [Online][Zacytowano:17.05.2022]:<http://www.jameslgilchrist.com/wp-content/uploads/2016/04/2014-Spec-Final-1.pdf>
130. [Online][Zacytowano:17.05.2022]:<http://www.milar.pl/wp-content/uploads/2019/10/2014-Kompozyt-materia%C5%82em-przysz%C5%82o%C5%9Bci.pdf>
131. [Online][Zacytowano:21.05.2022]:https://www.marketsandmarkets.com/infographics/Composites_Market.asp
132. [Online][Zacytowano:22.05.2022]:<https://kompozyty.net/perspektywy-rozwoju-ryнку-materialow-kompozytowych-w-przemysle-samochodowym-cz-1/>
133. Sarfraz M. S., Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study, *Composite Structures*, Vol. 266, 2021, 113864
134. [Online][Zacytowano:25.05.2022]:<https://www.aranca.com/knowledge-library/infographics/ip-research/automotive-component-weight-statistics>
135. [Online][Zacytowano:30.05.2022]:<https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-renewable-energy>
136. Nehls G., Carbon Rivers to commercialize fiberglass composites upcycling project, *CompositesWorld*, 2021
137. [Online][Zacytowano:30.05.2022]:<https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-sports-and-recreation>
138. [Online][Zacytowano:12.05.2022]:<https://www.zywicesarzyna.pl/epidian-5-utwardzacz-z1/>
139. [Online][Zacytowano:12.05.2022]:<http://kompozyty.milar.pl/zbrojenia/tkaniny-szklane-plecione/>
140. STR 022-250-110/125, Krosglass S.A. - Producent Włókna Szklanego
141. Desmocap® 12 A | Covestro AG
142. Kostrzewa M., Effect of polyurethane type on mechanical properties of composites based on epoxy resin with IPN structure, *Przetwórstwo Tworzyw 2*, 2015, 131-134
143. EXPERT MATT z polistyrenu ekstrudowanego (XPS) - Cezar.eu
144. Galos J., Best A. S., Multifunctional sandwich composites containing embedded lithium-ion polymer batteries under bending loads, *Materials & Design*, Vol. 185, 2020, 108228

145. Galos J., Tensile properties of multifunctional composites embedded with lithium-ion polymer batteries, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 136, 2020, 105966
146. PN-EN ISO 14130:2001
147. Pojemniki na baterie do pojazdów elektrycznych | SGL Węgiel (sglcarbon.com)
148. Dynamiczna analiza mechaniczna (DMA) (labaratuar.com)
149. Singh K., Analysis of symmetric and asymmetric glass fiber reinforced plastic laminates subjected to low-velocity impact, *Journal of Composite Materials*, Vol. 50 (14), 2015
150. [Online][Zacytowano:07.11.2022]:https://kmim.wm.pwr.edu.pl/fatigue/wp-content/uploads/sites/74/2022/01/inst_12.pdf
151. Wrochna P., Stopień ochrony IK, *Poradnik Inżyniera*, 2022
152. [Online][Zacytowano:12.08.2023]:<https://www.designplan.co.uk/technical/technical-information/ik-rating-2/>
153. Safri S.N.A., Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials – A review, *The International Journal Of Engineering And Science*, Vol. 3 (9), 2014, 50-60
154. Barcikowski M., Wpływ materiałów i struktury laminatów poliestrowo-szklanych na ich odporność na udar balistyczny, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny*, 2012
155. AlOmari A.S., Experimental and computational analysis of Low-Velocity Impact on carbon-, glass- and mixed-fiber composite plates, *Journal of Composite Science*, Vol. 4(4), 2020, 148
156. Norma ASTM D7136
157. Norma EN ISO 604

Spis rysunków

Rysunek 1.1. Zależność siły niszczącej i przemieszczenia.....	17
Rysunek 1.2. Porównanie względnej energii absorpcji w odniesieniu do masy wybranych materiałów.....	18
Rysunek 1.3. Zależność modułu sprężystości i gęstości materiałów na podstawie wykresu Ashby’ego	20
Rysunek 1.4. Moment zginający i rozkład naprężeń wewnętrznych belki.....	20
Rysunek 1.5. Efekt separacji okładzin na sztywność, masę i sztywność zginania kompozytów.....	21
Rysunek 1.6. Potencjalne mechanizmy zniszczenia kompozytu warstwowego.....	23
Rysunek 1.7. Potencjalne mechanizmy zniszczenia kompozytu warstwowego przez lokalne wgłębienie	23
Rysunek 1.8. Potencjalne mechanizmy zniszczenia kompozytu warstwowego przez fałdowanie, wyboczenie/ globalne wyboczenie powierzchni warstw okładziny, ścinanie rdzenia lub rozległe wgłębienia warstwy okładzinowej.....	24
Rysunek 1.9. Schemat uszkodzeń wywołanych przez uderzenia niskiej prędkości	26
Rysunek 1.10. Fazy zniszczeń kompozytu wielowarstwowego w wyniku uderzenia o niskiej prędkości.....	28
Rysunek 1.11. Porównanie wykresów siły, energii i przemieszczenia w zależności od czasu [22].....	29
Rysunek 1.12. Wykres zależności siły i przemieszczenie	30
Rysunek 1.13. Porównanie wykresów zależności siły i energii od przemieszczenia.....	31
Rysunek 1.14. Rdzenie konstrukcji przekładkowych	40
Rysunek 1.15. Struktury warstwowe ze stopniowanym rdzeniem	42
Rysunek 1.16. Proces produkcji kompozytów metodą układania ręcznego	46
Rysunek 1.17. Prototyp Baja SAE z Université Laval wykonany techniką HLU.....	46
Rysunek 1.18. Panel kompozytowy samochodu elektrycznego	48
Rysunek 1.19. Obudowa baterii z zastrzeżonymi materiałami CSP.....	49
Rysunek 1.20. Lekki elektryczny pojazd w dystrybucji miejskiej	50
Rysunek 1.21. Wnętrze pojazdu transportowego z funkcjami kontroli temperatury.....	51
Rysunek 1.22. Technologia sandwich dla autobusów i przyczep kempingowych.....	52
Rysunek 1.23. Wnętrze samochodu dostawczego z zastosowanymi kompozytami przekładkowymi firmy Design Composite GmbH	52

Rysunek 1.24. Główne obszary zastosowań kompozytów	53
Rysunek 1.25. Statystyka ciężaru komponentów samochodowych	54
Rysunek 2.1. Schematy prób udarnościowych	58
Rysunek 2.2. Kierunki uderzenia próbek w badaniach metodą Charpy'ego	59
Rysunek 2.3. Wartość energii uderzenia kompozytu GFRP/PVC/GFRP w zależności od zastosowanej metody	60
Rysunek 2.4. Schemat testu udarności metodą spadającego ciężaru	61
Rysunek 2.5. Maszyna wytrzymałościowa Instron Ceast 9350 oraz ustawienie próbki do próby spadającego ciężaru	65
Rysunek 2.6. Wykresy zależności siły od czasu i siły od przemieszczenia	66
Rysunek 2.7. Zestawienie kompozytów z funkcjonalnie stopniowanym rdzeniem	68
Rysunek 2.8. Uproszczona procedura wyznaczania odporności na przebicie - test BAI	69
Rysunek 2.9. Schemat próby zginania trójpunktowego	71
Rysunek 2.10. Schemat badania kompozytu podczas próby trójpunktowego zginania	72
Rysunek 2.11. Przykłady konfiguracji kompozytów warstwowych	73
Rysunek 2.12. Tryby testu DMA	75
Rysunek 2.13. Przykład zastosowania struktur przekładkowych w statkach powietrznych	76
Rysunek 2.14. Schemat testu ściskania krawędziowego kompozytów przekładkowych według normy ASTM C364-99	77
Rysunek 3.1. Schemat procedury badań eksperymentalnych	80
Rysunek 4.1. Aparat Impact25 do badań udarności metoda Charpy'ego i próbki do prostopadłego i krawędziowego testu udarności	82
Rysunek 4.2. Maszyna wytrzymałościowa Instron CEAST 9340 i schemat badania udarności metoda spadającego ciężaru	83
Rysunek 4.3. Próbki do testów udarności metodą spadającego ciężaru	83
Rysunek 4.4. Próbka przed rozpoczęciem badania zginania trójpunktowego	84
Rysunek 4.5. Schemat kompozytu warstwowego z 3 warstwami rdzenia XPS	89
Rysunek 5.1. Reakcje zachodzące podczas modyfikacji kompozytu	90
Rysunek 5.2. Dynamiczna analiza mechaniczna kompozytów EP/PU/250GF	94
Rysunek 5.3. Dynamiczna analiza mechaniczna kompozytów EP/PU/324GF	95
Rysunek 5.4. Udarność – uderzenie płaszczyznowe prostopadłe	96
Rysunek 5.5. Udarność – uderzenie krawędziowe równoległe	99
Rysunek 5.6. Rodzaje uszkodzeń kompozytów z 5% zawartością PU pod wpływem równoległego uderzenia krawędziowego	99

Rysunek 5.7. Wykres zależności siły i odkształcenia podczas próby trójpunktowego zginania kompozytów.....	101
Rysunek 5.8. Ugięcie kompozytu z modyfikowaną osnową przy maksymalnym odkształceniu	102
Rysunek 5.9. Moduł zginania kompozytów.....	103
Rysunek 5.10. Wytrzymałość na zginanie	104
Rysunek 5.11. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe kompozytów.....	105
Rysunek 5.12. Wykres zależności siły od czasu	107
Rysunek 5.13. Wykres zależności siły od czasu – kompozyty GF250.....	108
Rysunek 5.14. Wykres zależności siły od czasu – kompozyty GF324.....	109
Rysunek 5.15. Wykres zależności siły od przemieszczenia	110
Rysunek 5.16. Wykres zależności siły od przemieszczenia – kompozyty GF250	111
Rysunek 5.17. Wykres zależności siły od przemieszczenia – kompozyty GF324	111
Rysunek 5.18. Wykres zależności energii od czasu.....	113
Rysunek 5.19. Wykres zależności energii od czasu – kompozyty GFplain250	114
Rysunek 5.20. Wykres zależności energii od czasu – kompozyty GFtwill324	114
Rysunek 5.21. Uszkodzenia górnej okładziny kompozytów z dodatkiem 5PU	115
Rysunek 5.22. Przykład uszkodzenia kompozytów z niemodyfikowaną żywicą po uderzeniu 10J	116

Spis tabel

Tabela 1.1. Kierunki kształtowania właściwości kompozytów.....	32
Tabela 1.2. Zestawienie właściwości materiałów stosowanych na osnowę polimerową.....	34
Tabela 1.3. Właściwości mechaniczne żywic epoksydowych	35
Tabela 1.4. Mechanizmy działania układu wzmacniającego w osnowie	36
Tabela 1.5. Porównanie właściwości wybranych rodzajów materiałów wzmacniających	38
Tabela 1.6. Zalety i wady metod wytwarzania EACS.....	44
Tabela 1.7. Wartości względnej absorpcji energii w zależności od zastosowanej metody wytwarzania kompozytów GFPR.....	47
Tabela 2.1. Klasyfikacja stopni ochrony IK i charakterystyka testów udarności.....	56
Tabela 2.2. Maksymalne obciążenie i przemieszczenie kompozytów z rdzeniem o strukturze plastra miodu	74
Tabela 4.1. Charakterystyka materiałów zastosowanych na osnowę kompozytu.....	85
Tabela 4.2. Charakterystyka materiałów zastosowanych jako wzmocnienie.....	86
Tabela 4.3. Charakterystyka modyfikatora.....	86
Tabela 4.4. Charakterystyka rdzenia	87
Tabela 4.5. Skład ilościowy składników do otrzymania osnowy.....	88
Tabela 4.6. Przybliżona wartość zastosowanych komponentów do przygotowania jednej warstwy kompozytu.....	89
Tabela 5.1. Czas żelowania kompozycji epoksydowych w temperaturze pokojowej.....	91
Tabela 5.2. Gęstość kompozytu w zależności od ilości warstw rdzenia	92
Tabela 5.3. Charakterystyczne uszkodzenia kompozytów poddanych badaniu udarności w dwóch kierunkach.....	98
Tabela 5.4. Wyniki próby zginania trójpunktowego kompozytów przekładkowych.....	101
Tabela 5.5. Wyniki kompozytów podczas próby ściskania krawędziowego	106
Tabela 5.6. Wartość siły maksymalna podczas badania udarności metodą spadającego ciężaru	108
Tabela 5.7. Energia zaabsorbowana przez kompozyt.....	112
Tabela 5.8. Wyniki wytrzymałości resztkowej kompozytów określonej metodą BAI	116
Tabela 5.9. Uszkodzenia kompozytów EP0250GF3XPS po badaniu metodą BAI	117
Tabela 5.10. Uszkodzenia kompozytów EP0324GF3XPS po badaniu metodą BAI	118
Tabela 5.11. Uszkodzenia kompozytów 5PU250GF3XPS po badaniu metodą BAI.....	118

Tabela 5.12. Uszkodzenia kompozytów 5PU324GF3XPS po badaniu metodą BAI	119
Tabela 5.13. Uszkodzenia kompozytów 10PU250GF3XPS po badaniu metodą BAI	119
Tabela 5.14. Uszkodzenia kompozytów 10PU324GF3XPS po badaniu metodą BAI	120
Tabela 5.15. Szacunkowe ceny materiałów do wytworzenia kompozytu EP/PU/GF/XPS.....	120
Tabela 5.16. Koszt materiałowy w przeliczeniu na 1m ² kompozytu.....	121