

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Mateusz Juzuń

WYBRANE WYTYCZNE DOTYCZĄCE PROJEKTOWANIA
OSŁON PODWOZI POJAZDÓW SZYNOWYCH

Promotor:
prof. dr hab. inż. Wojciech Cholewa
Promotor pomocniczy:
dr inż. Mariusz Pawlak

Gliwice, 2021

”Płatne ze środków Ministerstwa Edukacji i Nauki
na podstawie umowy nr 12/DW/2017/01/1
z dnia 07.11.2017 r.”

PODZIĘKOWANIA

Szczerze wyrazy wdzięczności pragnę złożyć na ręce Promotora niniejszej rozprawy prof. dr. hab. inż. Wojciecha Cholewy, za bezcenną pomoc, liczne sugestie i opiekę. Dziękuję ponadto za bezgraniczne dzielenie się wiedzą i doświadczeniem oraz ukierunkowanie w świecie pracy naukowej, a także poza nim.

Serdecznie dziękuję Promotorowi pomocniczemu dr. inż. Mariuszowi Pawlakowi za wsparcie, cenne uwagi i poprawki, które pozytywnie wpłynęły na końcowy kształt mojej rozprawy.

Dziękuję również firmie Alstom Konstal S.A., a w szczególności Opiekunowi z firmy, dr. inż. Krzysztofowi Stacherze, za zaufanie, poświęcony czas i wsparcie w zakresie realizacji niniejszej dysertacji.

Pragnę podziękować również wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej pracy, a zwłaszcza Pracownikom Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn, z którymi miałem przyjemność na przestrzeni lat pracować.

Chciałbym podziękować dr. hab. inż. Januszowi Mazurkiewiczowi, prof. PŚ, za cenne wsparcie w zakresie obserwacji mikroskopowych i analiz wyników.

Wielkie podziękowania składam mojej wspaniałej żonie Agnieszce oraz córce Helenie, za nieustanną wiarę we mnie na każdym kroku, przestrzeń do rozwoju oraz wszelkie okazane wsparcie.

Podziękowania kieruję również do moich rodziców Renaty i Tomasza, za ich motywację i wychowanie, dzięki czemu chętnie podjąłem trud nauki.

Mateusz Juzuń

Spis treści

Streszczenie	5
Summary	7
1. Wstęp	9
2. Ochrona podwozi pojazdów szynowych	10
2.1. Aktualne wytyczne dotyczące projektowania osłon kompozytowych	12
2.2. Przyczyny uszkodzeń na podwoziu pojazdu szynowego	14
2.2.1. Fenomen podrywania kamieni z podtorza	15
2.3. Mechanika uderzenia	18
2.4. Prezentacja uszkodzonej osłony kompozytowej	20
3. Materiały kompozytowe	22
3.1. Klasyfikacja kompozytów	23
3.2. Laminaty	24
3.3. Kompozyty przekładkowe	26
3.4. Teoria sztywności kompozytów	27
4. Degradacja kompozytów	28
4.1. Uszkodzenia powierzchni kompozytów	29
4.2. Kryteria zniszczeń kompozytów	31
4.2.1. Kryterium maksymalnych naprężeń i odkształceń	32
4.2.2. Kryterium Tsai-Hilla	33
4.2.3. Kryterium Tsai-Wu	33
5. Uzasadnienie celowości badań	34
5.1. Stan wiedzy w obszarze badań	34
5.2. Przedmiot i cel badań	35
5.3. Teza pracy	36
5.4. Zadania badawcze	36
6. Model procesu niszczenia osłony	37
6.1. Czynniki uwzględnione w modelu	38
6.2. Budowa modelu fenomenologicznego	39
7. Metody eksperymentalne i numeryczne stosowane w pracy	41
7.1. Współczynnik restytucji	41
7.1.1. Stanowisko badawcze do pomiaru współczynnika restytucji	43
7.2. Pomiar odporności na uderzenia	45
7.2.1. Stanowisko badawcze do weryfikacji odporności na uderzenia im- pulsowe	46
7.3. Metoda elementów skończonych MES	48

7.3.1. Narzędzie do analizy MES	51
8. Przebieg badań laboratoryjnych	52
8.1. Planowanie eksperymentu	52
8.2. Przygotowanie badań - próbki	54
8.3. Badania eksperymentalne	57
8.3.1. Wyznaczanie współczynnika restytucji	57
8.3.2. Badanie odporności na uderzenia	58
8.3.3. Wyniki badań odporności na uderzenia	59
8.3.4. Analiza wpływu współczynnika tarcia na wyniki	66
8.3.5. Analiza wpływu kierunku włókien na wyniki	67
8.3.6. Analiza wpływu tłumienia	67
8.3.7. Analiza statystyczna wyników	68
9. Przebieg symulacji numerycznych	69
9.1. Budowa modelu MES	70
9.1.1. Określenie postaci konstrukcyjnej i materiałowej	70
9.1.2. Określenie warunków brzegowych	74
9.1.3. Definicja współczynnika tarcia	74
9.1.4. Definicja typu kontaktu	75
9.2. Strojenie modelu MES	76
9.2.1. Własności tłumiące układu w modelu numerycznym	76
9.2.2. Dodatkowe parametry materiałowe	78
9.2.3. Kierunek warstw próbki	79
9.3. Omówienie wyników symulacji MES	80
9.3.1. Dodatkowe wnioski z symulacji	82
10. Wykorzystanie opracowanego modelu MES do innych analiz	84
10.1. Określenie nowych parametrów symulacji	84
10.2. Omówienie wyników symulacji MES	85
11. Podsumowanie i wnioski	88
11.1. Plan dalszych badań	90
Spis tabel	92
Spis rysunków	93
Literatura	96

Streszczenie

Koncepcja pracy dotyczy poszerzenia wiedzy z zakresu projektowania osłon kompozytowych stosowanych do zabezpieczania podwozi pojazdów szynowych przed uderzeniami kamieni. Praca została podzielona na dwie części, z których pierwsza dotyczy zakresu wiedzy teoretycznej w omawianym obszarze, druga natomiast zawiera opis badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych przeprowadzonych w celu symulacji omawianego zjawiska.

W części teoretycznej przedstawiono obecnie stosowanych rozwiązań do zabezpieczania podwozi pojazdów szynowych oraz przybliżono aktualne wymagania obowiązujące w procesie ich projektowania. Całość uzupełniono analizą i przedstawieniem przyczyn powstawania uszkodzeń na podwoziu oraz przybliżono ogólne zagadnienia związane z materiałami kompozytowymi. Na tej podstawie opracowano model fenomenologiczny, który umożliwił stworzenie modelu do analiz MES oraz na przeprowadzenie eksperymentów stanowiskowych. W oparciu o badania osłony kompozytowej zdemontowanej z elektrycznego zespołu trakcyjnego eksploatowanego na polskich szlakach kolejowych dokonano analizy powstających w omawianym procesie uszkodzeń. Wiedzę w tym zakresie uzupełniły oględziny dokonane z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego.

Na podstawie powyższych analiz opracowano i przedstawiono metodykę prowadzenia badań eksperymentalnych, a także określono cel, tezę oraz zadania badawcze do zrealizowania w pracy.

W części badawczej, z wykorzystaniem badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych, dokonano weryfikacji postawionej tezy.

Materiały kompozytowe, które używane są do produkcji osłon charakteryzują się możliwością szerokiej adaptacji ich własności w procesie konstruowania elementów, stąd weryfikacji w niniejszej pracy podlegał wpływ czynników związanych ze sztywnością i tarciem warstw zewnętrznych próbek kompozytowych. Są to czynniki na które wpływ mają konstruktorzy podczas projektowania osłony. Wykorzystując zaprojektowane na potrzeby niniejszej pracy stanowiska badawcze służące do pomiaru współczynnika restytucji oraz odporności próbek kompozytowych na uderzenia kątowe, przeprowadzono ocenę wpływu wytypowanych czynników na zmianę obszaru powstałego uszkodzenia. Przeprowadzona analiza statystyczna wniosków pozwoliła podsumować wpływ zidentyfikowanych czynników oraz ich wzajemnych powiązań na stopień odporności osłon dla rozpatrywanego typu uderzenia. Całość badań podsumowana została w rozdziale opisującym wpływ poszczególnych czynników na wyniki. Przygotowany i dostrojony model do analiz MES wykorzystano w celu weryfikacji wyników uzyskanych w trakcie badań eksperymentalnych oraz użyto do przeprowadzenia symulacji innych wariantów, których przeprowadzenie na stanowiskach badawczych z różnych względów nie było możliwe.

W części podsumowującej zamieszczono najistotniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań empirycznych oraz analizy literatury. Całość zwieńczono możliwymi kierunkami kontynuacji badań w przyszłości.

W rezultacie, pozyskany materiał badawczy oraz przeprowadzona analiza pozwoliły na

wzbogacenie prezentowanych w części teoretycznej wytycznych dotyczących projektowania kompozytowych osłon podwozia pojazdu szynowego o nowe spostrzeżenia. Ponadto, wyniki badań stanowią uzupełnienie stanu wiedzy na temat ogólnej odporności próbek kompozytowych na uderzenia elementu o ostrych krawędziach pod małym kątem. Informacje te zwracają uwagę na możliwy kierunek zmian w podejściu do projektowania kompozytowych osłon narażonych na jednokierunkowy charakter uszkodzeń. Wyniki uzyskane w ramach realizacji procesu badawczego pozwoliły wykazać słuszność postawionej tezy dotyczące wpływu określonych własności materiału na stopień odporności osłon.

Summary

The idea of the work is related to the extension of knowledge in the field of designing composite covers used to protect the chassis of rail vehicles against stone impacts. The work has been divided into two parts, the first of which concerns the scope of theoretical knowledge in the area under discussion, while the second contains a description of experimental tests and numerical calculations that have been performed in order to simulate the above mentioned phenomenon.

In the theoretical part, the solutions currently used for securing the chassis of rail vehicles have been presented, together with the presentation of the current requirements applicable in the process of their design. All that is complemented with the analysis and presentation of the causes of chassis damage together with the general issues related to composite materials. On this basis, a phenomenological model was developed, which made it possible to create a model for FEM analyses as well as to carry out stationary experiments. On the basis of tests of a composite cover dismantled from an electric multiply unit operated on the Polish railway lines, an analysis of damages occurring in the process under discussion was performed. The knowledge in this respect was supplemented by a visual inspection performed using a scanning electron microscope.

On the basis of the above-mentioned analyses, a methodology for conducting experimental research was developed and presented, while the aim, thesis and research tasks to be carried out in the study were also defined.

In the research part, with the use of experimental research and numerical simulations, the thesis was verified.

Composite materials, which are used for the production of covers are characterised by the possibility of a wide adaptation of their properties in the process of element construction, thus the influence of factors related to the stiffness and friction of the outer layers of composite samples was verified in this study. Such factors can be influenced by the designers at the design stage of the covers. Using test stands designed for the purpose of this study, which enabled the measuring of restitution and resistance coefficient to angular impact of composite samples, an assessment was carried out of the influence of the selected factors on the change of the resulting damage area. The statistical analysis of the conclusions enabled the influence of the identified factors and their interrelationships on the degree of resistance of the covers for the considered type of impact to be summarised. The complete research was summarised in the chapter describing the influence of particular factors on the results. The model prepared and adjusted for FEM analysis was used to verify the results obtained during experimental research and was also used to simulate other variants, which for various reasons could not be carried out on test stands. The summary part contains the most important conclusions resulting from the conducted empirical research as well as literature analysis. Additionally, the possible directions for further research in the future have been provided.

As a result, the obtained research material together with the analysis performed enabled the guidelines presented in the theoretical part related to the design of composite

covers of rail vehicle chassis to be enriched with new observations.

Moreover, the research results broaden the current knowledge of the general resistance of composite specimens to the impact of a sharp-edged element at a small angle. This information draws attention to the possible change of direction in the approach to the design of composite covers exposed to unidirectional damage. The results obtained in the course of the research process allowed us to confirm the validity of the thesis concerning the influence of specific material properties on the degree of the resistance of a protective cover.

1. Wstęp

Z uwagi na rosnące prędkości poruszania się pojazdów szynowych po szlakach kolejowych, rośnie ryzyko związane z intensyfikacją ilości oraz siły uderzeń kamieni tworzących nawierzchnię torową w powierzchnię podwozia. Zjawisko to prowadzi do powstawania licznych uszkodzeń w czasie eksploatacji pojazdów, w związku z tym, w celu zabezpieczenia podwozi przed skutkami uderzeń, stosowane są dedykowane osłony zabezpieczające, chroniące strukturę oraz zamontowane wyposażenie. Osłony wykonywane są z różnych tworzyw, natomiast w związku z równoległym, dynamicznym rozwojem branży kompozytowej, od wielu lat stosowane są w tym celu kompozyty polimerowe. Wynika to z faktu licznych korzyści jakie oferuje to tworzywo względem metali. Można do nich zaliczyć między innymi niższą masę, wysoką wytrzymałość mechaniczną oraz sztywność. Tworzywa kompozytowe charakteryzuje również możliwość manipulowania parametrami projektowanego elementu w zależności od ilości, układu czy rodzaju zbrojenia użytego dla poszczególnych warstw.

Motywacją do podjęcia badań i realizacji niniejszej pracy był brak zdefiniowanych wytycznych dla konstruktorów osłon kompozytowych służących do zabezpieczenia podwozi. Materiały kompozytowe przyjmują skomplikowane w porównaniu z metalami formy uszkodzeń mechanicznych, a ich cechy związane z odpornością powierzchni na uderzenia styczne spowodowane przez kamienie lub inne przedmioty o ostrych krawędziach, nie są do dnia dzisiejszego dokładnie zweryfikowane. Nie brakuje analiz dotyczących uszkodzeń elementów wykonanych z tworzyw kompozytowych na skutek uderzeń prostopadłych, dokonanych na przykład przez lecący z dużą prędkością pocisk. Wynika to z faktu szerokiego zastosowania tego typu tworzyw do produkcji kamizelek kuloodpornych oraz innego rodzaju pancerzy.

Istotność problemu związanego z uszkodzeniami podwozi potwierdzona jest poprzez doświadczenie eksploatacyjne w przedsiębiorstwach przewozowych, które wykazuje częste przypadki uszkodzeń podwozi pojazdów eksploatowanych na szlakach kolejowych całego świata. Problem ten wynika z niedostatecznej wytrzymałości osłon. Zagadnienie to skłoniło autora do podjęcia naukowej analizy tematu oraz na jej podstawie sformułowania wytycznych stanowiących dodatkowe źródło wiedzy dla konstruktorów, którzy będą takie osłony projektowali w przyszłości. Uwagę skupiono na wybranych, wymaganych własnościach, które posiadać powinna osłona w celu skutecznej ochrony podwozia. Praca nie porusza szczegółowych zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej dotyczących sposobów zapewnienia tych własności, a jedynie je definiuje. Przeprowadzone badania stanowiskowe i numeryczne pozwoliły wytypować cechy, które powinny być uwzględnione w procesie projektowania, w celu otrzymania produktu o wysokiej użyteczności eksploatacyjnej.

2. Ochrona podwozi pojazdów szynowych

W przypadku większości współczesnych pojazdów szynowych, a zwłaszcza elektrycznych zespołów trakcyjnych, problem stanowi wygospodarowanie miejsca do montażu wyposażenia znajdującego się na pociągu. W zależności od dopuszczalnych prędkości poruszania się oraz rodzaju obsługiwanego ruchu, do głównych obszarów zabudowy aparatury zaliczyć można dach i podwozie. Do wspomnianego wyposażenia zalicza się m.in skrzynie elektryczne, kompresory, zbiorniki, przewody rurowe i elektryczne oraz zawory. Wszystkie elementy zamontowane na podwoziu pojazdu poruszającego się po torach o budowie podsypkowej, narażone są na uderzenia erozyjne kamieni, zwanych również balastem. Strefę podwozia pojazdu niewyposażonego w osłony przedstawia Rys. 1. Uwidacznia on liczne elementy narażone na potencjalne uszkodzenie oraz dużą ilość zakamarków mogących gromadzić lód lub pył.



Rysunek 1: Podwozie współczesnego pojazdu szynowego obsługującego ruch regionalny, niewyposażonego w osłony zabezpieczające podwozie

Negatywnym skutkiem uderzeń zapobiegać może specjalna budowa pojazdu, która wyklucza strefę podwozia z montażu jakiegokolwiek wyposażenia, co ma miejsce szczególnie w pojazdach projektowanych do pracy w trudnych warunkach klimatycznych, np. Norwegii. W tym przypadku już na etapie projektowo-konstrukcyjnym wprowadzane są rozwiązania zapewniające prostotę wspomnianego obszaru oraz brak wyposażenia w tej strefie. Komplikuje to jednakże strukturę pojazdu oraz generuje wysokie koszty. Przykład rozwią-

zania, w którym budowa podwozia pojazdu zapewnia płaską powierzchnię i nie wymaga dodatkowego zabezpieczenia przedstawia Rys. 2.



Rysunek 2: Podwozie pojazdu szynowego przystosowanego na etapie projektowo-konstrukcyjnym do poruszania się po szlakach skandynawskich

Rozwiązanie to nie jest jednak powszechne, stąd istnieje konieczność zabezpieczania podwozi pozostałych pojazdów w inny sposób. W tym celu, zwłaszcza w przypadku pojazdów szynowych poruszających się z dużymi szybkościami, zastosowanie znajdują specjalne osłony przykręcane do podwozia [68]. Osłony te po montażu zapewniają jednolitą powierzchnię, zakrywając przy tym rury i przewody biegnące pod podłogą. W celu poprawy skuteczności ochrony, ich kształt w przekroju poprzecznym do osi wagonu jest delikatnie zaokrąglony do góry. Przykład podwozia zabezpieczonego przykręcanymi osłonami przedstawia Rys. 3.

Sposób montażu i kształt wspomnianych osłon gwarantuje ponadto poprawę parametrów aerodynamicznych pociągu.

Nie bez znaczenia pozostaje również fakt, że tak obudowane podwozie jest łatwiej utrzymać w czystości podczas normalnej eksploatacji, ale także w przypadku usuwania skutków incydentów kolejowych.

W celu umożliwienia dostępu do wyposażenia oraz ułatwienia obsługi, osłony podzielone są na sekcje, dostosowane wymiarowo do zabezpieczanego obszaru.

Oprócz wspomnianych cech zastosowanie osłon w pociągach pasażerskich sprzyja izolacji akustycznej wpływając na komfort podróżujących pasażerów. Każda z osłon obwodowo wyposażona jest w uszczelki, które po skompresowaniu na skutek dokręcenia do struktury podwozia izolują akustycznie przestrzeń od czynników zewnętrznych. Sama osłona również może posiadać własności poprawiające izolację akustyczną w przypadku, gdy zbudowana jest z kompozytów polimerowych, zwłaszcza o strukturze przekładkowej. Źródłem hałasu we wnętrzu wagonu mogą być zarówno uderzające o podwozie kamienie, jak i powietrze.

Ponadto, zastosowanie uszczelnień obwodowych ogranicza dostawanie się wody, śniegu i kurzu do przedziału podwozia, w którym mogą w takim przypadku zostać zabudowane elementy bardziej wrażliwe na działanie warunków atmosferycznych.

Równolegle zapewniona jest izolacja termiczna przedziału pasażerskiego od warunków zewnętrznych. Sprzyja to oszczędności związanej z ograniczonym grzaniem, chłodzeniem i zmniejszonymi stratami ciepła przedziału pasażerskiego.



Rysunek 3: Podwozie pojazdu szynowego wyposażonego w osłony zabezpieczające

Do budowy osłon najczęściej zastosowanie znajduje płyta metalowa lub kompozytowa struktura przekładkowa. Materiały kompozytowe wykazują jednak przewagę w postaci lepszych parametrów wibroizolacyjnych oraz niskiej masy, dlatego w większości nowych pojazdów używany jest kompozyt polimerowy o budowie przekładkowej.

Jego użycie wymaga jednak świadomości wpływu poszczególnych własności tworzywa na odporność na uderzenia, stąd tak istotną kwestią jest przeprowadzenie stosownych obliczeń i badań symulacyjnych [60].

Na potrzeby niniejszej rozprawy rozpatrywany będzie wyłącznie przypadek dotyczący projektowania osłon wykonanych z kompozytów polimerowych.

2.1. Aktualne wytyczne dotyczące projektowania osłon kompozytowych

Proces projektowania elementów z materiałów kompozytowych odbiega od powszechnie znanego procesu stosowanego do materiałów tradycyjnych. Główną różnicę stanowi fakt, iż w przypadku kompozytów, projektant nie tylko nadaje postać konstrukcyjną i materiałową przedmiotowi, ale również poniekąd projektuje sam materiał. Zmiana rodzaju zastosowanych włókien, ich ułożenia, czy rodzaju żywicy wpływa w istotny sposób

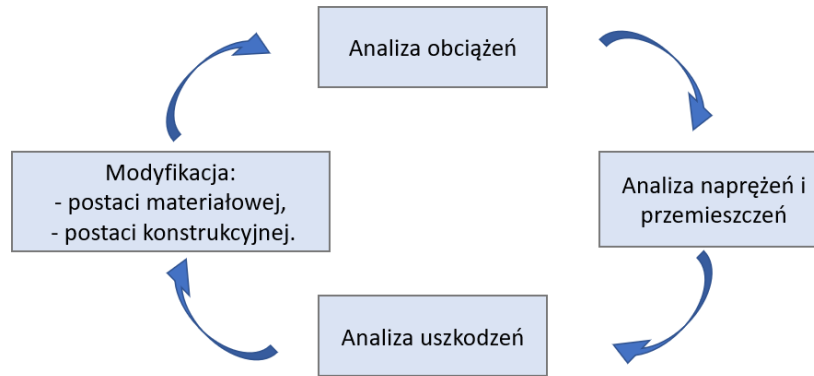
na sztywność i wytrzymałość materiału. W związku z tym, konstruktor ma możliwość doboru odpowiedniej struktury materiału oraz własności mechanicznych, dopasowanych do każdego rodzaju wytworu indywidualnie, uwzględniając specyficzne kształty lub rodzaje obciążenia elementu [7]. Stawia to dodatkowe wyzwania i konieczność poszerzenia kompetencji przez zespoły projektowe, ale również umożliwia uzyskanie cech trudnych do osiągnięcia za pomocą tradycyjnych tworzyw konstrukcyjnych.

Projektując dowolny element z materiału kompozytowego korzystnie jest przyjąć metodyczne podejście do oceny wymagań projektowych. Dla każdego przypadku zastosowania powinny zostać określone kryteria projektowe, w kolejności najlepiej odzwierciedlającej specyfikę konkretnej aplikacji. Do kryteriów oraz ograniczeń projektowych zaliczyć można m.in [37]:

- koszt,
- wytrzymałość,
- sztywność,
- masa,
- geometria i rozmiar,
- wymagania powtarzalności i precyzji wykonania na odpowiednim poziomie,
- estetyka elementu,
- niezawodność i odporność na szczególne przypadki uszkodzenia charakterystyczne dla obszaru zastosowania,
- łatwość napraw,
- odporność na działanie ognia, rezystancja, itp.

Analiza powyższych kryteriów pozwala wysnuć wniosek, iż od konstruktorów mechaników projektujących elementy z tworzyw kompozytowych, oczekiwana jest bliska współpraca z obliczeniowcami, materiałowcami i technologami w celu opracowania optymalnego wytworu. Proces projektowania przyjmuje charakter iteracyjny, jak przedstawiono na Rys. 4. Konstruktor opracowuje wstępny projekt, który w następnej kolejności poddawany jest analizie, co w efekcie skutkuje wprowadzeniem modyfikacji postaci konstrukcyjnej i materiałowej, a następnie ponownej weryfikacji.

W dużej mierze proces projektowania osłon nie odbiega od ogólnych wytycznych dotyczących projektowania elementów kompozytowych. W związku z tym istnieje wiele opracowań i narzędzi wspierających konstruktorów w trakcie tego procesu. Do tego typu narzędzi zaliczyć można wykresy Ashby'ego [66], które pozwalają na wybór optymalnej klasy materiału dla kombinacji określonych jej cech, np. konstrukcji sztywnej i taniej lub lekkiej i wytrzymałej [7]. Ponadto, istnieją ogólnie sformułowane wnioski i wytyczne dotyczące



Rysunek 4: Uproszczony proces iteracyjny procesu projektowania elementów kompozytowych [80]

własności mechanicznych kompozytu opisane w formie potwierdzonych tez w publikacjach [37], [7].

Zauważono jednak brak sprecyzowanych wytycznych projektowych dotyczących szczególnego zastosowania materiałów kompozytowych - do budowy osłon zabezpieczających podwozia pojazdów szynowych. Dlatego też, niniejsza praca skupia się na określeniu wybranych wytycznych mogących wesprzeć konstruktorów w procesie projektowo-konstrukcyjnym w kontekście niezawodności oraz odporności materiałów kompozytowych na uderzenia kamieni. Wytyczne te przedstawione zostaną w oparciu o wnioski wynikające z weryfikacji postawionej tezy.

Warto zaznaczyć, że z uwagi na zmniejszoną względem metali odporność materiałów kompozytowych na długotrwałe działanie ognia, w każdym przypadku konieczna jest końcowa weryfikacja zgodności opracowanego tworzywa z wymaganiami normy EN-45545 "Railway applications – Fire protection on railway vehicles." [60].

2.2. Przyczyny uszkodzeń na podwoziu pojazdu szynowego

Przeprowadzona analiza literatury zgłębiającej zjawisko uszkodzeń podwozi pojazdów szynowych w czasie eksploatacji, pozwoliła zauważyć, że dla pociągów można określić kilka przyczyn powstawania uszkodzeń na podwoziu, jednak głównym, bezpośrednim źródłem rozpatrywanych uszkodzeń są uderzenia spowodowane przez tłuczeń kolejowy tworzący torowisko.

Rozróżniane są dwa typy torowisk różniące się budową, tj. torowisko z podsypką oraz z płytami [24]. Każde z nich ma swoje wady i zalety, natomiast jeśli chodzi o zastosowanie, tor podsypkowy jest stosowany zarówno dla kolei normalnych oraz dużych szybkości, podczas gdy tor płytowy głównie stosowany jest dla kolei dużych szybkości. Nie mniej jednak oba typy w równym stopniu mogą sprostać bezpiecznym warunkom eksploatacji nawet przy dużej szybkości poruszających się po nich pociągów. Zauważono natomiast, że torowiska płytowe wymagają mniejszego zakresu obsługi i mają dłuższą żywotność [25], [71]. Ze względu na koszty, tory bazujące na podsypce tłuczniowej są bardzo często

stosowane na przykład we Francji, Hiszpanii, Włoszech czy Polsce. We Francji wszystkie koleje dużych prędkości, dla których prędkość eksploatacyjna przekracza 320km/h bazują na torach tłuczniowych.

Wadą torów opartych na podsypce, jest wspomniana na początku możliwość unoszenia się kamieni. Zjawisko to nie jest w pełni wyjaśnione do dnia dzisiejszego, wiadomo natomiast, że powstaje w wyniku połączenia sił mechanicznych i aerodynamicznych generowanych przez przejazd pociągu, co powoduje, że część z kamieni pokonuje siłę grawitacji i unosi się w kierunku pojazdu. Kamienie te powodują uszkodzenia główek szyn, podwozi pociągów, ale również sąsiednich konstrukcji stojących przy torach, a w skrajnych przypadkach nawet obrażenia ludzi znajdujących się w okolicy [36].

Zjawisko najgroźniejsze jest w przypadku prędkości przekraczających 300km/h, natomiast obserwowane jest również w przypadku dużo niższych prędkości, poniżej 160 km/h [16], [64]. Podobnie jest w rozpatrywanym w niniejszej pracy przypadku, prawdopodobnie spowodowane jest to dodatkowymi czynnikami sprzyjającymi podnoszeniu się kamieni z powierzchni ziemi.

2.2.1. Fenomen podrywania kamieni z podtorza

Zjawisko podrywania kamieni dotyczy szlaków kolejowych na całym świecie, a o problemach z nim związanych wciąż informują kolejne firmy kolejowe. Zjawisko unoszenia kamieni jest jednym z głównych problemów spowodowanych wzrostem prędkości poruszania się pojazdów szynowych, w kontekście bezpieczeństwa oraz pogarszania stanu pojazdów i urządzeń obsługujących kolej.

Do przyczyn poruszania kamieni tworzących podsypkę, zaliczyć można wspomnianą kombinację efektów mechanicznych i aerodynamicznych, spowodowanych głównie przez silne podmuchy powietrza, podciśnienia oraz warunki pogodowe, które wpływają na zachowanie się tłucznia.

W przypadku ekstremalnych warunków pogodowych obce obiekty, takie jak np. fragmenty lodu, mogą odrywać się od podwozia i powodować ruch kamieni poprzez nadanie im energii kinetycznej w procesie zderzenia [15]. Na podstawie badań przeprowadzonych w warunkach zimowych, określono, że statystycznie w dzień o temperaturze średniej $-3^{\circ}C$ i opadach śniegu 3cm, bryły lodu osiadające na podwoziu mogą osiągnąć masę 5-10kg [84]. W okresie gdy pociąg porusza się z dużymi szybkościami w mroźnym klimacie, fragmenty lodu narastają w okolicy zestawów kołowych, tworząc rozbudowane i ciężkie bryły. Jedną z rozpatrywanych sytuacji jest wjazd pociągu do tunelu, gdzie temperatura otoczenia może wzrosnąć powodując topnienie fragmentów lodu i ich odpadanie na tory co może skutkować podbijaniem do góry kamieni. Przypadek ten dotyczy głównie eksploatacji w krajach o zimnym klimacie, takich jak Japonia, północ Europy czy północne Chiny [36]. Kolejnym przypadkiem jest przejazd pociągu, na którym odłożyły się bryły lodu, przez rozjazdy kolejowe, które wprawiają pojazd w drgania, mogące doprowadzić do zrzucenia brył z pociągu. Zjawisko odrywania się brył lodu zostało zasymulowane w ramach eksperymentów prowadzonych m.in. przez francuskiego przewoźnika SNCF.

W pozostałych przypadkach, w warunkach oddziaływania dynamicznego i aerodynamicznego poprzez poruszające się z dużymi prędkościami pociągi, kamienie wibrują luzując kontakt pomiędzy sobą, a tym samym niwelując stopień zaklinowania się. To prowadzi do przemieszczeń luźnych kamieni, a gdy poruszający się pociąg wywoła dodatkowo oddziaływania aerodynamiczne, może to spowodować dostarczenie wystarczającej ilości energii do pokonania siły grawitacji i uniesienia kamieni do góry [36].

Tematem tym od strony analitycznej zajmuje się m.in. Jing et al. [36], który opracował proste równanie do wykrycia kluczowych czynników efektów aerodynamicznych i dynamicznych. Zależność pomiędzy przyspieszeniem cząsteczek a_T , przyspieszeniem ziemskim g , przyspieszeniem wibracyjnym wertykalnym a oraz wiatrem $U(A)$, może być opisana jako:

$$a_T = \frac{\alpha \int_0^A U(A) dA}{m} - (g - a) \quad (1)$$

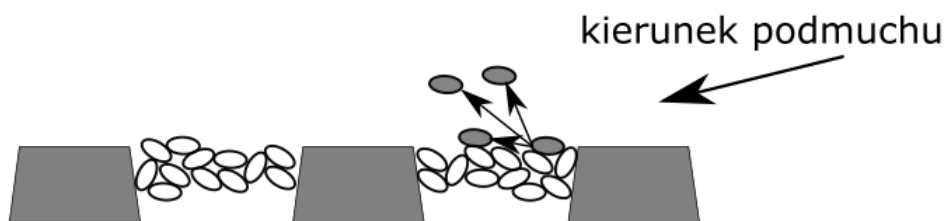
,gdzie A jest efektywnym polem obciążenia kamieni podmuchem, a α określa współczynnik oddziałującego ciśnienia wiatru. W przypadku, gdy wartość $a_T > 0$ mamy do czynienia z unoszeniem kamieni.

Prawdopodobne wystąpienie zdarzenia związanego z unoszeniem balastu, można zamodelować jako kombinację 2 zdarzeń, tzn. przemieszczania się kamieni z ich pozycji spoczynkowych, tzw. luzowanie oraz poderwania ich z powierzchni. Przyczyny obu zdarzeń przedstawione zostały na Rys. 5.



Rysunek 5: Czynniki wpływające na ryzyko poderwania kamieni

Jak pokazuje natomiast Rys. 6, w zależności od kierunku ruchu oraz energii początkowej, część poderwanych do lotu kamieni może osiągnąć wysokość pozwalającą na kontakt z podwoziem przejeżdżającego pociągu. Zjawisko to przedstawione jest szczegółowo na Rys. 7, pkt a). W wyniku przeprowadzonych przez Kawashima K. et al. w [47] testów, określono możliwy kąt Θ kierunku wektora poruszającego się kamienia w zakresie od 0° do 70° względem wzdłużnej osi horyzontalnej.

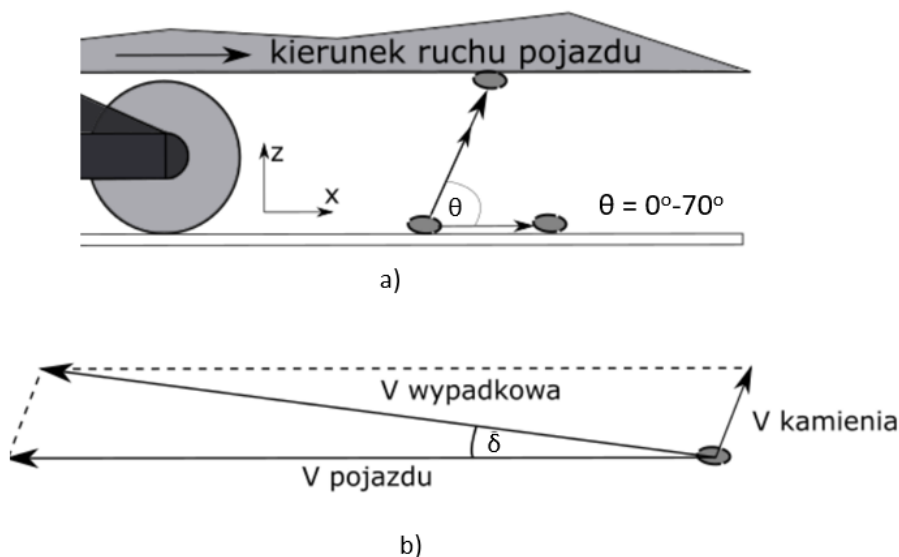


Rysunek 6: Wizualizacja zjawiska poderwania kamieni na skutek działania sił aerodynamicznych

Zbadano, że prędkość poddmuchu wiatru wywołana przez pociąg poruszający się z szybkością 300 km/h osiąga w okolicy główki szyny ok. 25 m/s [36]. Ponieważ tylko niektóre z unoszonych tym podmuchem kamieni dosięgają podwozia przejeżdżającego pojazdu, ich prędkość w chwili poprzedzającej uderzenie jest mocno zredukowana z powodu przekształcania energii kinetycznej kamienia wraz ze wzrostem wysokości w energię potencjalną. Zakładając, że pociąg w rozpatrywanym przypadku porusza się z prędkością maksymalną 260 km/h, oszacowano maksymalną prędkość kamienia w momencie rozpoczęcia unoszenia z torowiska jako 20 m/s. Na bazie tej wartości założono, że w momencie uderzenia o podwozie wartość ta nie przekracza 8 m/s.

W związku z tym, głównym czynnikiem wpływającym na parametry uderzenia jest horyzontalna prędkość poruszającego się pociągu. Rozkład składowych można zaobserwować na Rys. 7, pkt b).

Biorąc pod uwagę założoną prędkość poruszającego się pociągu wynoszącą 260 km/h, z rozkładu wektorów wyznaczono: kąt uderzenia δ , który wyniósł 8° i prędkość wypadkową uderzenia, wynoszącą 250 km/h, co odpowiada niemal prędkości poruszającego się pociągu.



Rysunek 7: Wektorowe przedstawienie zjawiska poderwania kamieni

Podsumowując, rozpatrywany jest przypadek, w którym prędkość uderzenia kamienia

o podwozie wynosi 250 km/h, a kąt uderzenia wynosi 8° względem powierzchni podwozia. Masa kamienia, jako elementu uderzającego, wynosi 60g i wynika ze średniej masy tłucznia stanowiącego podsypkę.

Energia pojedynczego kamienia w chwili poprzedzającej uderzenie wynosi:

$$E_K = \frac{mV^2}{2} \quad (2)$$

$$E_K = 147[J]$$

Podkreślenia wymaga fakt, że na bazie obserwacji uszkodzeń na podwoziach pojazdów szynowych, stwierdzono zachowaną kierunkowość uderzeń zgodną z kierunkiem wzdłużnym pojazdu. Oznacza to, że kierunek uderzenia kamieni jest zawsze zgodny z kierunkiem poruszającego się pociągu.

2.3. Mechanika uderzenia

Bazując na definicji mechaniki, uderzenia powstają wskutek nagłego, bezpośredniego zetknięcia się dwóch ciał stałych, z których przynajmniej jedno znajduje się w ruchu. Proces uderzenia powoduje wystąpienie sił, które stają się źródłem powstania intensywnej fali naprężeń. Fala ta rozprzestrzenia się po całej objętości ciał oraz ulega wielokrotnym odbiciom od krawędzi granicznych, na skutek czego energia jest wytracana. W związku z tym, wyróżniamy efekty lokalne, związane z oddziaływaniem w obszarze bliskim miejsca styku, oraz efekty ogólne związane z reakcją w miejscach oddalonych [73].

Energia utracona w czasie zderzenia zostaje oddana w postaci:

1. Energii drgań, która wskutek działania czynników tłumiących zostaje zamieniona w ciepło i następnie rozproszona do otoczenia.
2. Pracę odkształceń plastycznych (lokalnych i ogólnych).

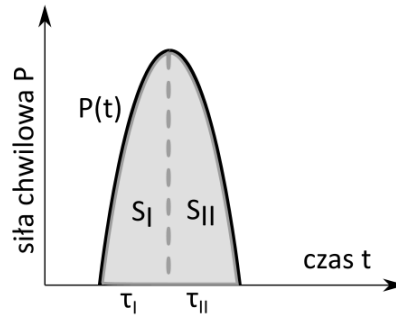
Wpływ na sposób rozpadu energii jest uzależniony od wielu czynników, m.in sztywności materiałów tworzących zderzające się elementy, różnicy mas, tarcia warstw zewnętrznych oraz struktury i kształtu elementów biorących udział w zderzeniu.

Przy zderzeniach ciał materialnych, występują tak zwane siły chwilowe, których cechą charakterystyczną jest to, że działając przez krótki czas (kilka ms) osiągają bardzo wysokie wartości w porównaniu z innymi siłami, np. siłą ciężkości.

W przypadku wystąpienia siły chwilowej $P(t)$ w momencie $t = t_0$, która działa przez czas τ to wielkość wektorową określoną wzorem:

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} P(t)dt = S \quad (3)$$

nazywamy impulsem siły chwilowej. Moduł wektora S określony jest polem znajdującym się pod krzywą, która obrazuje przebieg czasowy siły $P(t)$ [73], przedstawiony na Rys. 8.



Rysunek 8: Przebieg czasowy siły chwilowej [73]

Proces zderzenia składa się z dwóch faz. W pierwszej fazie następuje monotoniczny wzrost siły chwilowej i narastanie odkształceń, które początkowo powstają lokalnie w miejscu zetknięcia się ciał, a później również powstanie odkształceń ogólnych obejmujących zasięgiem całą objętość zderzających się ciał. Faza ta obejmuje zakres oznaczony na wykresie jako τ_I . W tym momencie następuje osiągnięcie maksymalnej wartości siły chwilowej oraz największej wartości odkształceń chwilowych, a zaraz po tym rozpoczyna się druga faza, oparta na stopniowym spadku wartości siły chwilowej aż do zera wraz z zanikaniem odkształceń lokalnych. Teoretycznie, odkształcenia lokalne mogą zniknąć całkowicie, ale tylko gdy wyężenie materiału w miejscu uderzenia nie przekroczyło wartości granicznej.

Impulsy siły chwilowej w obu fazach oznaczone S_I i S_{II} sumuje się osiągając impuls całkowity S . W celu umożliwienia uwzględnienia stopnia sprężystości zderzenia, został przez Newtona wprowadzony współczynnik restytucji "R", określony jako ułamek impulsu z pierwszej fazy zderzenia odzyskany w drugiej fazie, co analitycznie przedstawia wzór:

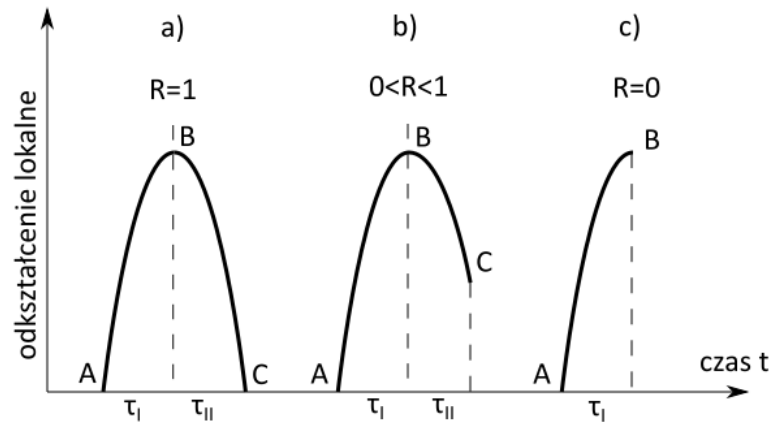
$$S_{II} = RS_I \quad (4)$$

W przypadku, gdy przebieg czasowy siły chwilowej w drugiej fazie, odpowiada przebiegowi czasowemu w pierwszej fazie (czyli $S_{II} = S_I$), wówczas $R=1$ i dotyczy to przypadku odkształceń wyłącznie sprężystych w których nie następuje strata energii kinetycznej zderzających się ciał [73]..

Tego typu zderzenie określane jest zderzeniem sprężystym. Odwrotnym przypadkiem określamy zderzenie plastyczne, kiedy występują wyłącznie odkształcenia trwałe, które nie znikają nawet gdy siła zmalała do zera, wówczas $S_{II} = 0$, a tym samym $R=0$. Oba z powyższych przypadków są wyidealizowane, oznacza to, że w rzeczywistości współczynnik restytucji przyjmuje wartość z zakresu $0 < R < 1$. Jego wartość wyznaczana jest doświadczalnie.

Z uwagi na bezsprzeczny wpływ współczynnika restytucji na przebieg procesu zderzenia i jego ścisłą korelację z wartością sprężystości materiału tworzącego próbkę, weryfikacja jego wpływu na zakres powstałych uszkodzeń został przyjęty jako jedno z założeń pracy.

W przypadku, gdy powierzchnie ciał w miejscu zetknięcia są idealnie gładkie, wektory sił chwilowych zderzenia oraz impulsów sił, leżą na normalnej zderzenia i określane są jako



Rysunek 9: Przebieg czasowy odkształceń. a) zderzenie sprężyste b) zderzenie elasto-plastyczne c) zderzenie plastyczne [73]

impulsy normalne. W rzeczywistości jednak powierzchnia ciała wykazuje pewną chropowatość, szorstkość, wobec czego w przypadku zderzenia ukośnego, które jest tematem niniejszej rozprawy, występują dodatkowe impulsy styczne S_t . Występują one na skutek pojawienia się sił chwilowych związanych z siłami tarcia, których wektory leżą w płaszczyźnie stycznej zderzenia. Wspomniany impuls normalny oraz styczny, można powiązać następującą zależnością [73]:

$$S_t = f_d S_n \quad (5)$$

, gdzie „ f_d ” oznacza dynamiczny współczynnik tarcia.

2.4. Prezentacja uszkodzonej osłony kompozytowej

W celu szczegółowego przeanalizowania problemu, poproszono przewoźnika kolejowego o udostępnienie uszkodzonej osłony do przeprowadzenia szczegółowych analiz oraz testów niszczących. Pozwoliło to na przeprowadzenie oceny stopnia rzeczywistych uszkodzeń powstałych w czasie eksploatacji. Dostarczona osłona, przedstawiona na Rys. 10, zdemontowana została z elektrycznego zespołu trakcyjnego poruszającego się na polskich szlakach kolejowych.

Z uwagi na duże gabaryty zewnętrzne osłony, w pierwszej kolejności wytypowano i sklasyfikowano miejsca szczególnie interesujące, które zostały następnie wyodrębnione poprzez wycięcie. Na podstawie przeprowadzonej analizy sklasyfikowanych uszkodzeń, wyróżniono 2 dominujące typy:

1. Regularne, powtarzalne, płytkie uszkodzenia erozyjne, wszystkie skierowane w tą samą stronę względem kierunku ruchu pojazdu.
2. Nieregularne uszkodzenia w postaci przebić, wynikające z incydentalnego uderzenia sztywnego elementu takiego jak pręt, płyta czy inna część metalowa. W tym przypadku następowała pełna penetracja laminatu, a czasem nawet całego kompozytu.

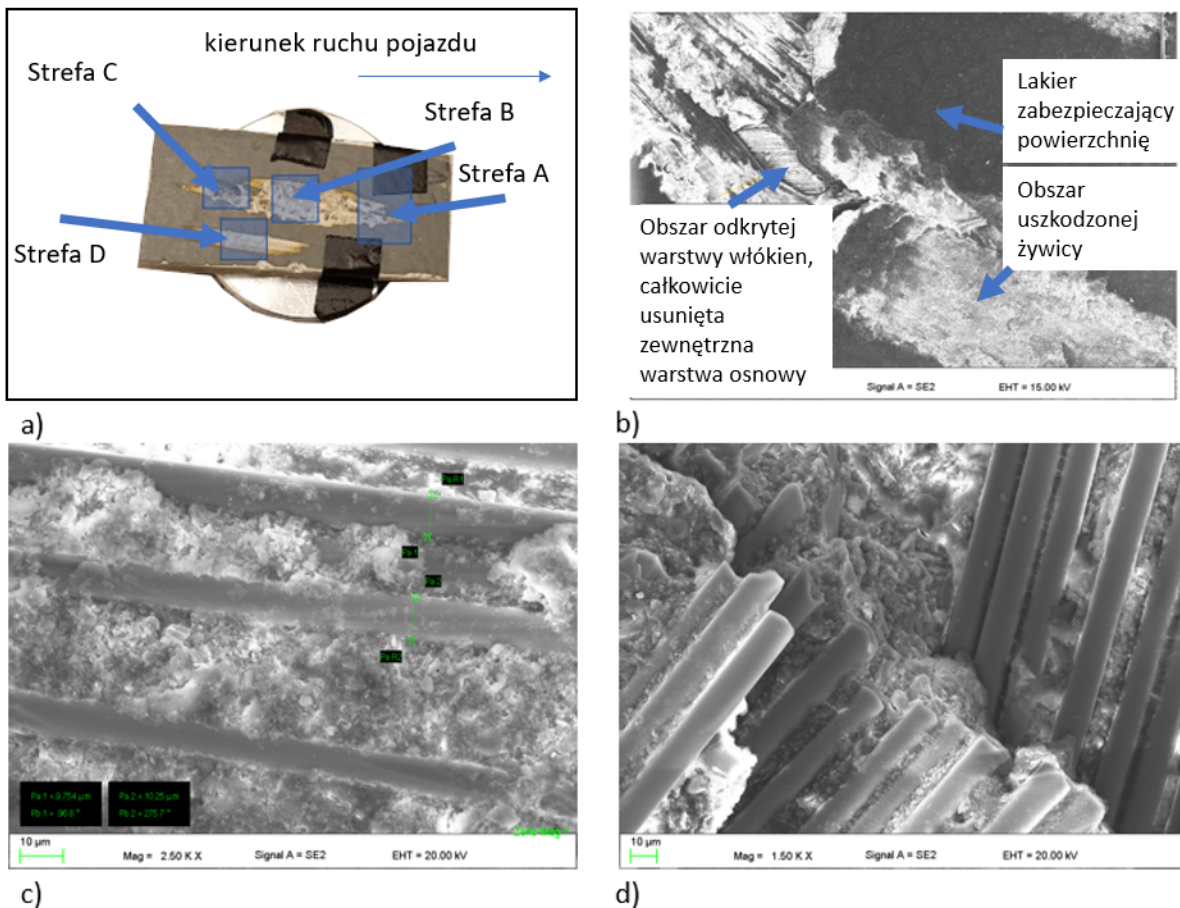


Rysunek 10: Osłona z elektrycznego zespołu trakcyjnego wycofana z eksploatacji z powodu licznych uszkodzeń erozyjnych i perforacji. Po prawej stronie szczegółowy widok przykładowych uszkodzeń wraz z wymiarami

Zaproponowana w niniejszej pracy metodologia dotyczy wyłącznie przypadków typu 1. Wynika to z faktu, że uszkodzenia typu 2 są to przypadki incydentalne i choć prowadzą do niezwłocznego wycofania osłony z eksploatacji, nie są następstwem eksploatacji w normalnych warunkach.

Przeprowadzona analiza uszkodzeń z użyciem mikroskopu elektronowego, której efekty częściowo przedstawione zostały na Rys. 11, pozwoliła na szczegółową inspekcję obszaru uszkodzenia. W wyniku badań, potwierdzony został kierunkowy charakter uszkodzenia z dobrze widocznymi strefami, takimi jak: zadarcie warstwy osnowy (strefa A i B) oraz mała ilość „przerwanych” włókien co może świadczyć o tym, że większość z nich jest z kompozytu usuwana podczas powstawania uszkodzenia, zwiększając tym samym obszar destrukcji.

Duża ilość usuniętych włókien powodująca powstanie ubytku erozyjnego, spotęgowana jest dodatkowo faktem, że włókna w zewnętrznej warstwie tego kompozytu są krótkie i rozłożone losowo w warstwie. Z jednej strony przybliża to własności wytrzymałościowe i sztywnościowe w płaszczyźnie warstwy do izotropowych, z drugiej natomiast nie pozwala w pełni wykorzystać możliwości oferowanych przez materiały kompozytowe, polegających na świadomej manipulacji sztywnością i wytrzymałością w poszczególnych kierunkach w celu uzyskania optymalnych efektów.



Rysunek 11: Fragment uszkodzonej osłony poddany obserwacji. a) próbka przygotowana do badań b) Strefa A, pow 100x c) Strefa B, pow. 2500x d) Strefa C, pow. 1500x

3. Materiały kompozytowe

W literaturze nie istnieje jednoznaczna, klarowna definicja słowa kompozyt, które jest skrótem od terminu: materiał kompozytowy. Wynika to z szerokiego znaczenia tego słowa zmieniającego się wraz ze zmianą obszaru w ramach którego jest rozpatrywany.

Jedną z obowiązujących definicji w literaturze polskiej, jest określenie kompozytu jako materiału złożonego z co najmniej dwóch komponentów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma on właściwości lepsze od każdego z komponentów używanego osobno lub będących wynikiem ich sumowania [7].

Do elementów składowych każdego kompozytu zaliczamy dwa podstawowe komponenty, czyli składnik ciągły kompozytu nazywany osnową lub matrycą (z ang. matrix) oraz składnik napełniający (z ang. filler), czyli włókna lub cząstki, inaczej nazywane wzmocnieniem lub zbrojeniem (z ang. reinforcement) kompozytu. Rolą osnowy w kompozycie, jest wypełnienie przestrzeni pomiędzy elementami wzmacniającymi oraz spajanie tych elementów i nadawanie całemu kompozytowi odpowiedniego kształtu. W dodatku, chroni ona materiał wzmacniający przed czynnikami zewnętrznymi oraz przenosi naprężenia na zbrojenie oraz na zewnątrz. Rolą wzmocnienia jest natomiast nadanie szczególnych cech wytrzymałościowych.

3.1. Klasyfikacja kompozytów

Jak zostało wspomniane, nie istnieje jasna akceptowalna definicja kompozytów, zatem ich pełna klasyfikacja również nie jest jednoznaczna i różni się w zależności od przyjętych definicji. Do niepodważalnych, podstawowych kryteriów można jednak zaliczyć przeznaczenie kompozytu, rodzaj osnowy, kształt i rodzaj elementów zbrojących [7]. Pod kątem przeznaczenia kompozytu wyróżnić można m.in. materiały kompozytowe o charakterze funkcjonalnym.

Z uwagi na fakt, że jedną z zalet kompozytów jest łączenie kilku różnych tworzyw w jedną całość, istnieje możliwość manipulowania parametrami takiego nowo utworzonego materiału. Dlatego znaleźć można kompozyty o zróżnicowanych właściwościach, np. elektrycznych, ślizgowych, magnetycznych, barierowych, które dopasowane są idealnie do zapotrzebowania. Często materiały z tej grupy wykorzystywane są z powodu wysokich walorów estetycznych jako atrakcyjne wizualnie elementy wykończeniowe, np. obudowy różnych urządzeń lub wewnętrzne wyposażenie pojazdów.

Drugą grupą w podziale pod kątem przeznaczenia są kompozyty konstrukcyjne, które opracowywane są w celu osiągnięcia optymalnych parametrów wytrzymałościowych dla konkretnego przypadku zastosowania. Kompozyty konstrukcyjne znajdują zastosowanie jako elementy nośne urządzeń, czy kluczowe elementy konstrukcji środków transportu, m.in. śmigłowców i samolotów.

Kolejnym kryterium podziału jest rodzaj zastosowanej w kompozycie osnowy [52]. Do najpopularniejszych zaliczane są kompozyty metalowe, ceramiczne oraz polimerowe.

Kompozyty ceramiczne stosowane są głównie w środowisku, w którym wykorzystuje się ich korzystne własności mechaniczne w niskich oraz wysokich temperaturach. Do unikalnych własności ceramiki jako tworzywa, zaliczyć można trwałość mechaniczną i chemiczną, wysoką twardość i sztywność przy małej gęstości oraz dobrą odporność na zużycie. Obarczone to jest jednak niską odpornością tego tworzywa na kruche pękanie oraz dużym rozrzutem właściwości mechanicznych pomiędzy fazami, z których wytwarzane są materiały ceramiczne [76].

Kompozyty metalowe podzielone są wg zastosowań na kompozyty, których zadaniem jest spełnienie funkcji użytecznych np. w branży lotniczej lub kosmicznej, dla których temat kosztu materiału jest sprawą drugorzędną oraz kompozyty, dla których obowiązujący jest kompromis pomiędzy parametrami, a ceną [22], [43].

Zastosowanie polimerów jako osnowy pozwala nadać kompozytom następujące cechy: niską masę, odporność na korozję, zdolność tłumienia drgań i izolację cieplną [7]. W związku z tymi licznymi zaletami znalazły one szerokie zastosowanie w większości dziedzin przemysłu, od produkcji sprzętu AGD, aż po przemysł kosmiczny.

W przypadku rozpatrywania podziału kompozytów wg kryterium rodzaju i postaci zbrojenia, wyróżnić można kompozyty:

- zbrojone cząstkami, w tej grupie zawierają się podtypy dyspersyjne oraz zbrojenie dużymi cząstkami.
- zbrojone włóknem, w tym przypadku zbrojenie ma postać włókien, a osnowa jest

spoiwem. Wyróżnić można włókna krótkie (do ok. 0,3mm), włókna długie (0,3 - 20 mm) oraz włókna ciągłe. Włókna w kompozytach opartych o ten typ wzmocnienia mogą być ukierunkowane w jedną stronę lub mogą być nieorientowane, o losowym ułożeniu w kompozycie [72].

Źródłem podziału może być również tworzywo, z którego wykonane są włókna. Najpopularniejsze z nich to włókna szklane, węglowe, aramidowe oraz cała grupa włókien pochodzenia naturalnego. W niniejszej pracy rozpatrywany jest typ wzmocnienia włóknami ciągłymi wykonanymi z lnu. Zaletą włókien naturalnych jest dostępność, odnawialność zasobów, biodegradowalność, niska cena, niska gęstość, a także ułatwiony recykling. Do innych materiałów tworzących włókna naturalne zaliczyć można jutę, szał czy kokos. Materiały kompozytowe otrzymane na bazie włókien naturalnych oznaczane są skrótem NFRP (z ang. natural fibre reinforced plastic). Wytrzymałość włókien naturalnych jest mniejsza niż syntetycznych, natomiast moduł Younga przyjmuje wartości zbliżone do włókien szklanych. Włókna te ponadto posiadają zdolność do absorbowania dużych ilości energii przy pękaniu.

Stosując kryteria przeznaczenia można podzielić kompozyty na:

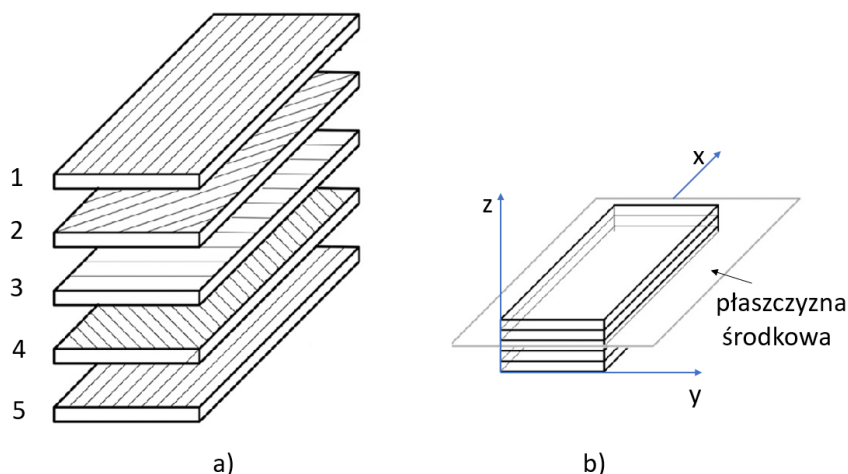
- konstrukcyjne - których właściwości pozwalają przenosić duże obciążenia,
- niekonstrukcyjne - które posiadają wyjątkowe właściwości, np. estetyczne.

Kompozyty stosowane powszechnie w konstrukcji pojazdów szynowych podzielić można na 2 grupy. Do pierwszej z nich należą laminaty, do drugiej natomiast zaliczyć można konstrukcje przekładkowe. Te pierwsze zastosowanie znajdują w przypadku poszyc zewnątrznych, osłon, paneli wewnętrznych, gdzie głównym kryterium jest estetyka. Konstrukcje przekładkowe, z uwagi na zastosowany rdzeń są sztywne i mogą być stosowane na elementy konstrukcyjne. Kompozyty przekładkowe znalazły szersze zastosowanie w lotnictwie jako elementy konstrukcyjne np. wirników nośnych.

3.2. Laminaty

Laminaty zbudowane są z pojedynczych warstw, zwanych laminami, w których włókna ułożone są w jednym kierunku oraz osnowy, która spaja całość. Z założenia wszystkie laminy tworzące laminat powinny mieć jednakową grubość, która wynosi ok. $120\mu\text{m}$ w przypadku włókien węglowych w osnowie epoksydowej [7]. Poszczególne warstwy mogą być układane w różnym ustawieniu kątowym względem siebie, przez co można manipulować właściwościami wynikowymi tworzywa. Zazwyczaj laminat zawiera od 4 do 40 warstw. Warstwy tworzące mogą być oparte zarówno na włóknach kierunkowych (z ang. UD Unidirectional) lub mogą być tkane. W przypadku włókien tkanych parametry pojedynczej warstwy mogą wykazywać cechy izotropowe w płaszczyźnie.

W zależności od rodzaju ułożenia włókien w poszczególnych warstwach, mogą powstać laminaty [72]:



Rysunek 12: Budowa laminatu. a) Pojedyncze laminy, które po połączeniu tworzą laminat b) Laminat z zaznaczoną płaszczyzną środkową

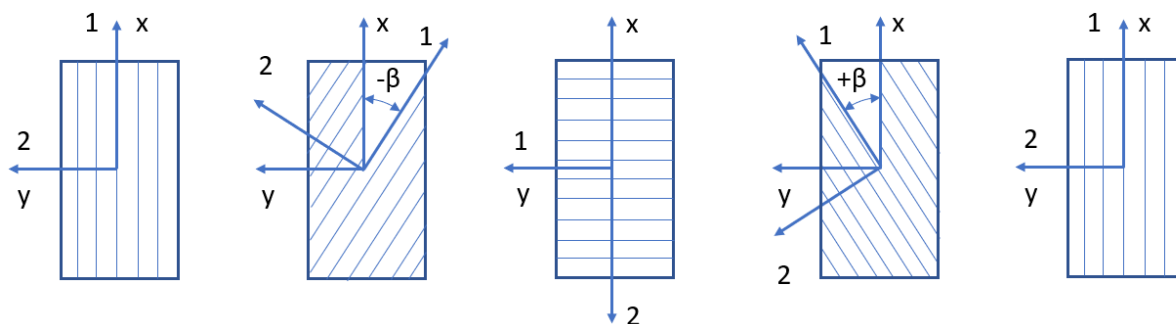
- jednokierunkowe, w których wszystkie warstwy ułożone są w jednym kierunku, powstały kompozyt posiada silne właściwości anizotropowe,
- poprzeczne, w których warstwy ułożone są wyłącznie w kierunku 0^0 i 90^0 , kompozyt taki posiada właściwości ortotropowe,
- dowolne, w których warstwy ułożone są pod dowolnym kątem i mogą utworzyć kompozyt quazi-izotropowy.

W przypadku przedstawionym na Rys. 12 warstwy 1, 3 oraz 5 stanowią dla układu współrzędnych x, y kierunki główne ortotropii, natomiast warstwy 2, 4 tworzą względem nich tzw. kierunki dowolne. Uwagę zwraca zaznaczona płaszczyzna środkowa. Istnieją bowiem charakterystyczne warianty kompozytów dla których płaszczyzna środkowa jest płaszczyzną symetrii, taki kompozyt określony jest kompozytem symetrycznym. Sposób ułożenia warstw w kompozycie może być przedstawiony za pomocą kodu, a przedstawiony na Rys. 12 laminat, można opisać jako:

$$[0/ - \beta/90/ + \beta/0]_T \quad (6)$$

Zapis oznacza laminat 5 warstwowy, dla którego idąc od góry, kierunki ułożenia warstw, tworzą z układem osi x, y odpowiednio kąty: $0^0, -\beta, 90^0, +\beta, 0^0$. Szczegółowo każdą warstwę zaprezentowano na Rys. 13. Symbol T na końcu kodowania opatrzonego numerem 6 oznacza, że jest to cały kompozyt, natomiast w przypadku, gdy kodowanie zakończone jest symbolem S, oznacza to, że laminat jest symetryczny geometrycznie i materiałowo, a płaszczyzną symetrii jest płaszczyzna środkowa. W przypadku wystąpienia kilku warstw o tym samym ułożeniu kątowym w bezpośrednim sąsiedztwie, stosuje się dodatkowo indeks liczbowy, który informuje o ilości warstw danego typu, przykładowo:

$$[0/0/90/90/90/60/ - 60/ - 60/60/0/0]_S = [0_2/90_3/60/ - 60_2/60/0_2]_S$$



Rysunek 13: Wizualizacja orientacji warstw względem układu x, y przyjętego dla laminatu

Cechą charakterystyczną laminatów jest stopień zbrojenia, który określa wielkość udziału włókien w stosunku do całości laminatu. Rozróżnić można udział masowy oraz objętościowy [72]. Udział masowy określany jest jako stosunek masy włókien tworzących kompozyt do masy całego kompozytu, określany jest jako M_f .

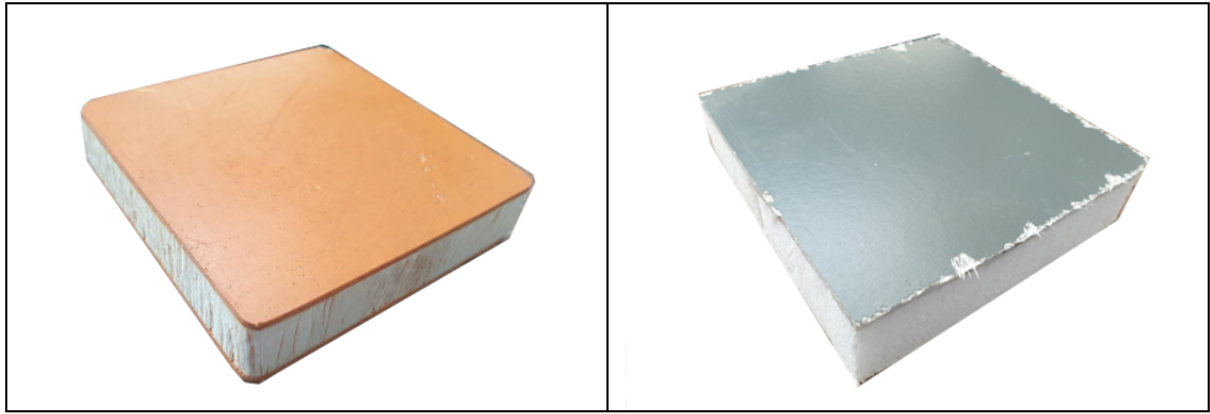
Analogicznie wygląda udział objętościowy, określany jako V_f , który opisuje stosunek objętości wzmocnienia do objętości całego kompozytu. Wartość udziału włókien w kompozycie wpływa w radykalny sposób na parametry wynikowe kompozytu. Biorąc pod uwagę, że włókna jak i osnowa posiadają bardzo zróżnicowane właściwości, istnieją metody pozwalające na wyznaczenie wartości wynikowych dla utworzonego kompozytu z uwzględnieniem udziału włókien w tworzywie.

3.3. Kompozyty przekładkowe

W poprzednim rozdziale omówione zostały kompozyty w postaci laminatów, tworzonych poprzez połączenie kilku warstw - lamin. Kolejną postacią kompozytów stanowią kompozyty przekładkowe (z ang. sandwich), których budowa oparta jest na występowaniu 2 zewnętrznych warstw - laminatów, wypełnionych wewnątrz, pomiędzy sobą, wypełniaczem z materiału lekkiego, zwanego rdzeniem lekkim [96]. Do najpopularniejszych rdzeni zaliczyć można:

- polimery (np. pianki poliuretanowe, polistyren ekspandowany),
- płyty o strukturze plastra miodu (z ang. honeycomb),
- rdzenie z drewna,
- lekkie rdzenie kompozycyjne.

Materiały o tego typu budowie. cechują się wysoką sztywnością oraz małym ciężarem, a ponadto dużą wytrzymałością na ściskanie i ścinanie oraz wysoką wartością modułu sprężystości postaciowej. Kompozyty przekładkowe o rdzeniu z drewna i pianki poliuretanowej przedstawia Rys. 14.



Rysunek 14: Próbki z kompozytów przekładkowych, po lewej stronie kompozyt z rdzeniem drewnianym, po prawej kompozyt z wypełnieniem pianką poliuretanową

3.4. Teoria sztywności kompozytów

Z uwagi na fakt zróżnicowanych własności materiałowych dla osnowy oraz wzmocnienia, bazując na pewnych założeniach opracowane zostały metody obliczania współczynników wynikowych dla kompozytu po homogenizacji.

Metody bazują na założeniu, że wydłużenie (ϵ) w jednokierunkowym kompozycie obciążonym osiowo, jest takie samo zarówno dla włókien, jak i osnowy. W przeciwnym razie może nastąpić pęknięcie oraz oddzielenie włókna od osnowy [80].

Bazując na przyjętym założeniu istnieje możliwość wyznaczenia wynikowych parametrów sztywnościowych takich jak: E_1 - podłużny moduł Younga, E_2 - poprzeczny moduł Younga, ν_{12} - stałą Poissona, G_{12} - moduł Kirchoffa.

Podłużny moduł Younga E_1 :

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (7)$$

Poprzeczny moduł Younga E_2 :

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (8)$$

Stała Poissona w płaszczyźnie ν_{12} :

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (9)$$

Moduł Kirchoffa G_{12} :

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (10)$$

gdzie E_f - moduł Younga dla wzmocnienia(włókien), V_f - objętościowy udział włókien w kompozycie, E_m - moduł Younga dla osnowy, V_f - objętościowy udział osnowy w kompozycie, ν_m - stała Poissona dla osnowy, ν_f - stała Poissona dla wzmocnienia (włókien), G_m - moduł Kirchoffa dla osnowy, G_f - moduł Kirchoffa dla wzmocnienia(włókien).

Oprócz przytoczonych powyżej równań, istnieje wiele różnych metod obliczania współczynników związanych ze sztywnością dla kompozytów po homogenizacji. Wiele z nich przedstawionych zostało w postaci analiz porównawczych w publikacjach: [59] oraz [77].

4. Degradacja kompozytów

Degradacja kompozytów polimerowych jest procesem zmian strukturalnych, będących wynikiem przemian fizycznych lub chemicznych zachodzących w materiale pod wpływem długotrwałego oddziaływania czynników zewnętrznych. Zmiany te wywołują pogorszenie ich pierwotnych własności [72]. Procesy degradacji laminatów polimerowych mogą być uwarunkowane czynnikami należącymi do poniższych grup [10], [3]:

- fizyczne, obejmujące rozwijające się samorzutnie procesy porządkowania struktury materiału na skutek oddziaływania czynników zewnętrznych, takich jak wysoka temperatura otoczenia, wilgotność,
- chemiczne, powodujące zmiany struktury molekularnej kompozytu, na skutek oddziaływania na strukturę substancjami, np. wodą, rozpuszczalnikami, itp.,
- mechaniczne, powodujące degradacje na skutek oddziaływania dużych wartości naprężeń chwilowych.

Degradacja mechaniczna kompozytów polimerowych, będąca następstwem długotrwałych obciążeń stałych lub zmęczeniowych, wiąże się ze zmianami struktury materiału o zasięgu lokalnym lub może obejmować całą objętość bryły. Zmiany te mogą mieć postać nieciągłości takich jak: debonding, pęknięcia osnowy, włókien, delaminacje i wiele innych [3], [62]. Do typowych uszkodzeń struktury kompozytów należą:

- Imperfekcje spoiwa, obejmujące zarówno uszkodzenia w postaci odklejeń na granicy faz, określanych jako debonding oraz rozwarstwienia na granicy warstw. Interesujące źródło wiedzy na ten temat stanowią: [62], [50] oraz [45]. Znaczenie tego przypadku jest szczególnie istotne, ponieważ może doprowadzić do wystąpienia całkowitego zniszczenia kompozytowego elementu konstrukcyjnego. Sposób zachowania się osnowy i proces ich niszczenia opisali: Corigliano [8] i Kelly et al. [11].
- Delaminacja, obejmująca uszkodzenia, które w makroskopowej skali przejawiają się fizycznym rozdzieleniem sąsiadujących warstw prowadzącym do zaniku zdolności przenoszenia pomiędzy nimi naprężeń [72], [69], [53].
- Pęknięcia włókien, powodujące, że przenoszone przez włókna naprężenia są zerowe. Zjawisko szczegółowo opisane zostało w: [50], [49].

Uszkodzenia elementów kompozytowych wzmocnianych włóknami są zazwyczaj trudne do wykrycia, jeśli nie dotyczą degradacji warstwy zewnętrznej lub całkowitej dezintegracji struktury. Często uszkodzenia dotyczą głównie wnętrza tworzywa (np. wspomniane

uszkodzenia na granicy warstw) lub powstają od wewnętrznej strony laminatu, która bezpośrednio graniczy z wypełniaczem. Zewnętrznym objawem zaistniałej degradacji w materiale jest zmiana jego własności w skali makroskopowej [78], [21]. Przeważnie występuje spadek wartości współczynników sprężystości i wskaźników wytrzymałości, a wzrost tarcia wewnętrznego [3].

Podsumowując, nadmierne obciążenie lub przeciążenie elementu może spowodować powstanie uszkodzenia, dlatego też takie ryzyko powinno być uwzględnione w projekcie. Jeśli zadaniem wytworu jest więc przenoszenie obciążeń, to projektant musi zapewnić, aby miał on wystarczającą nośność oraz, aby spełniał swoją funkcjonalność bez utraty integralności przez cały zaplanowany okres eksploatacji [79].

Zaistniałe uszkodzenie jest często efektem pracy wytworu w warunkach, do których nie jest on przystosowany, natomiast do innych przyczyn powstawania uszkodzeń mechanicznych można zaliczyć m.in. błędy konstrukcyjne, wady materiałowe, nadmierne zużycie lub niedotrzymanie technologii produkcji [12].

Stąd, powstałe na skutek powyższych czynników uszkodzenia można podzielić na:

- konstrukcyjne,
- technologiczne,
- eksploatacyjne.

Ponieważ niniejsza praca skupia się na uszkodzeniach powstających na skutek uderzeń zewnętrznych, warto określić w jaki sposób są one dzielone pod kątem energii uderzenia. W zależności od wywoływanych skutków, wyróżnia się dwa zakresy energii impulsu siły [5]:

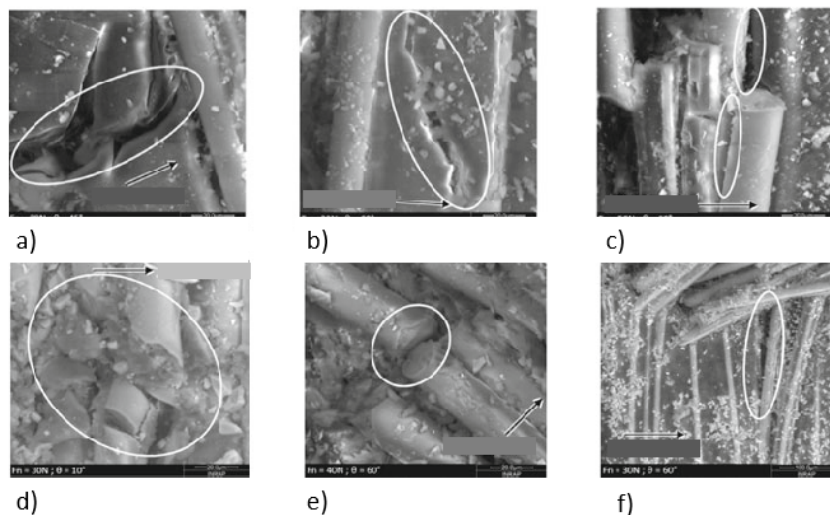
- Uszkodzenia niskoenergetyczne, wewnątrz materiału, w bliskim otoczeniu miejsca uderzenia pojawia się siatka rozwarstwień i poprzecznych pęknięć warstw. Nie obserwuje się przy tego typu uderzeniach masowego pęknięcia włókien. Na powierzchni powstaje niewielki ślad, natomiast po przeciwnej stronie kompozytu uszkodzenie jest rozległe [4]. Uderzenia tego typu charakteryzują się energią impulsu od kilku do kilkudziesięciu J [35].
- Uszkodzenia w zakresie dużych energii, powodujące pęknięcia włókien oraz perforację lub jej inicjację.

4.1. Uszkodzenia powierzchni kompozytów

Oprócz zdefiniowanych podstawowych rodzajów uszkodzeń, jeden rodzaj jest szczególnie istotny z punktu widzenia niniejszej rozprawy. Materiały kompozytowe posiadają bowiem interesujące własności dotyczące zużycia warstw zewnętrznych na skutek kontaktu z elementem poruszającym się po jego powierzchni. Charakterystyka mechaniczna powierzchni jest obecnie głównym wyzwaniem dla wielu sektorów przemysłu takich jak aeronautyka, astronautyka i transport. Charakteryzuje ona lokalne własności mechaniczne

na powierzchni badanego materiału, takie jak elastyczność, tarcie, przyczepność, zużycie powierzchni. Mechaniczna charakteryzacja powierzchni wymaga znajomości testów zadrapań, m.in. testu SST (z ang. single indenter scratch test).

Przeprowadzona przez Kim et al. [91] analiza zużycia wzmocnionego PA12, wykazała, że



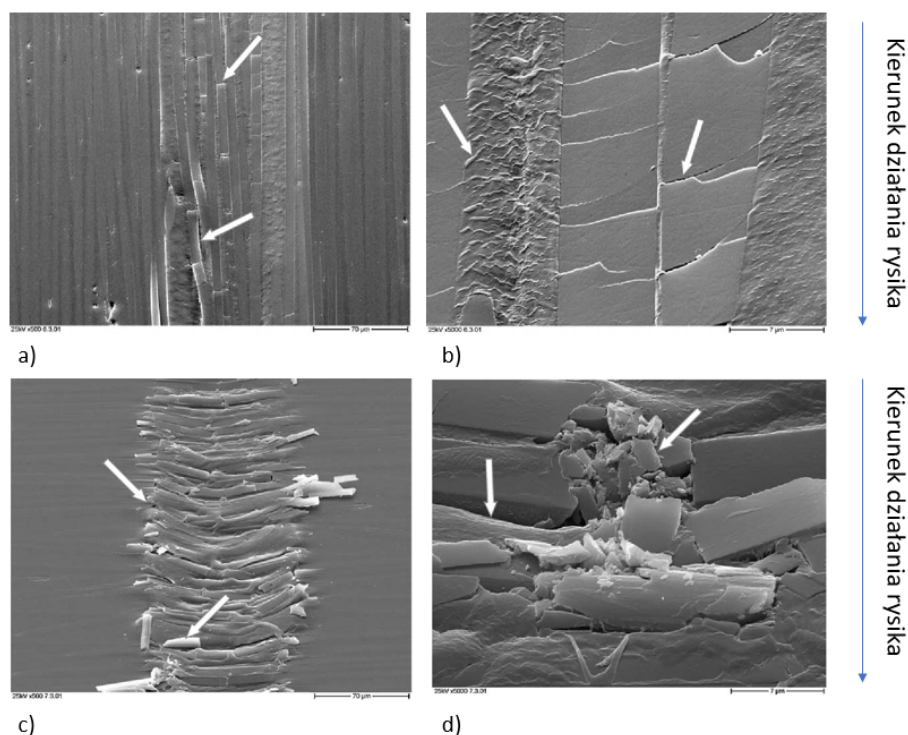
Rysunek 15: Typowe zużycia warstwy zewnętrznej laminatu. a) podłużne pęknięcie matrycy b) poprzeczne pęknięcie matrycy c) odklejenie na granicy faz d) pęknięcie kilku włókien e) pęknięcie pojedynczego włókna f) wyciągnięcie włókna

zużycie erozyjne maleje wraz ze wzrostem zawartości włókien, a wyraźnie lepsze parametry wykazywał materiał zawierający aż 30% udziału masowego włókien szklanych.

Z kolei badanie przeprowadzone przez Quintelier et al. [42] udowodniło, że niezależnie od kierunku włókien w warstwach zewnętrznych, początkowe pęknięcie zawsze następuje w przekroju laminatu. W przypadku prostopadłej orientacji warstwy, początkowe pęknięcie włókna może być spowodowane przez zginanie wprowadzające odkształcenia podłużne, natomiast w przypadku gdy orientacja jest równoległa do kierunku przemieszczenia, przyczyną sił ścinających włókna są wysokie naprężenia. Zauważono jednak zgodnie, że eksperymenty są niewystarczające i niekompletne i aby lepiej zrozumieć zachowanie się materiałów, ze względu na złożoność istniejących zjawisk, konieczna jest analiza numeryczna w celu wsparcia badań eksperymentalnych [85].

Goda et al. [94] oraz Friedrich et al. [46] szczegółowo zbadali i opisali zachowania wewnętrznych warstw kompozytu na skutek ślizgania po niej stalowym rysikiem.

Bazując na przeprowadzonych testach i symulacjach, opracowano możliwe mechanizmy uszkodzeń dla kompozytów wzmocnionych włóknami. W przypadku kierunku ruchu rysika zgodnego z kierunkiem włókien, dominujące okazały się uszkodzenia w postaci odklejenia na granicy włókno-matryca na skutek deformacji ścinających, ponadto zaobserwowano zużycie ślizgowe oraz pocienianie włókien na skutek stycznego oddziaływania rysika. W przypadku włókien poprzecznych, uszkodzenia w postaci odklejeń spowodowanych ścinaniem oraz rozciąganiem/ściskaniem, były mechanizmami dominującymi. Szczegóły uszkodzeń zaprezentowane zostały na Rys. 16 [46].



Rysunek 16: Skutki uszkodzeń spowodowanych przez węglbnik diamentowy pod obciążeniem 3 N. a) podłużny ruch rysika, przybliżenie 500x b) podłużny ruch rysika, przybliżenie 5000x c) poprzeczny ruch rysika, przybliżenie 500x d) poprzeczny ruch rysika, przybliżenie 5000x [46]

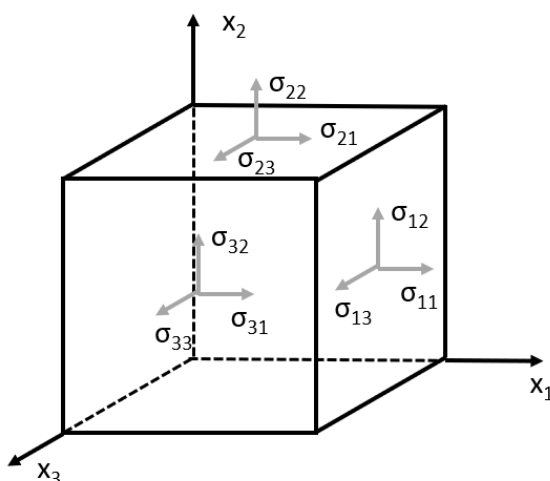
Prawdopodobnie w obu przypadkach odklejenia (debonding) są punktem początkowym w procesie powstania zużycia powierzchni. Odwołując się do weryfikacji eksperymentalnej, zauważono, że występujący mechanizm uszkodzenia zawiera elementy ścierania i osłabień adhezji matrycy. Bazując na powyższym, można wysnuć wniosek, że zapewnienie lepszego wiązania na granicy faz oraz odpowiedni dobór parametrów tworzywa wzmacniającego, może zredukować zakres powstającego uszkodzenia.

4.2. Kryteria zniszczeń kompozytów

Rozpatrując wytrzymałość mechaniczną materiałów izotropowych, problem badań wytrzymałościowych jest stosunkowo prosty i ograniczony do przeprowadzenia standardowej serii prób. Wyznaczenie stałych materiałowych w postaci modułu Younga, liczby Poissona czy modułu Kirchoffa w większości przypadków jest wystarczającym źródłem danych. Ponadto, większość tego typu informacji dostępna jest w katalogach, a dopracowany proces produkcyjny tworzyw izotropowych takich jak stal, aluminium itp. pozwala na utrzymanie parameterów w granicy niewielkiej tolerancji. Izotropia gwarantuje również stosunkowo prosty stan naprężeń, który w wielu przypadkach można rozpatrywać jako superpozycję prostych stanów obciążenia. Z tego powodu, głównie stosowane są hipotezy wytrzymałościowe w postaci maksymalnych naprężeń i maksymalnych odkształceń, pozwalające na weryfikację wytrzymałościową elementów konstrukcyjnych. W przypadku bardziej złożo-

nych przypadków zastosowanie znajduje hipoteza opracowana przez Hubera i Missesa, która redukuje złożony stan naprężenia do tak zwanego naprężenia zredukowanego [96]. Inaczej sprawa wygląda w przypadku materiałów anizotropowych do których zaliczyć można materiały kompozytowe oparte na włóknach kierunkowych. Z uwagi na zróżnicowane własności w zależności od kierunku kompozytu, niezbędne jest do dokonanie minimum 9 pomiarów:

1. wytrzymałość na rozciąganie w 3 osiach,
2. wytrzymałość na ściskanie w 3 osiach,
3. wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie prostopadłej do osi 1,2,3.



Rysunek 17: Składowe stany naprężenia na ścianach elementarnego prostopadłościanu

Z uwagi na fakt, że każde złożenie warstw powoduje powstanie nowej kompozycji o specyficznych właściwościach wytrzymałościowych, konieczne jest weryfikowanie parametrów dla każdego nowo opracowanego kompozytu.

Opracowane zostały hipotezy wytrzymałościowe, które pozwalają na weryfikację spełnienia warunków kryterialnych przyjętych w fazie projektowania na podstawie obliczonego stanu naprężeń [96]. Do najpopularniejszych hipotez należą:

- kryteria maksymalnych naprężeń i odkształceń,
- kryterium Tsai-Hilla,
- kryterium Tsai-Wu.

4.2.1. Kryterium maksymalnych naprężeń i odkształceń

Kryteria maksymalnego naprężenia i maksymalnego odkształcenia są najstarszymi hipotezami wytrzymałościowymi [38].

Hipoteza maksymalnego naprężenia, opiera się na relacjach pomiędzy naprężeniami w głównych kierunkach materiału, a wyznaczonymi wytrzymałościami kompozytu w tych kierunkach. Matematyczny zapis hipotezy dla przypadku rozciągania przyjmuje postać:

$$\sigma_1 < X_r, \sigma_2 < Y_r, |\tau_{12}| < S, \quad (11)$$

,gdzie σ_1 - naprężenia normalne w kierunku 1, σ_2 - naprężenia normalne w kierunku 2, $|\tau_{12}|$ - naprężenia ścinające w płaszczyźnie 1-2, X_r - wytrzymałość na rozciąganie, Y_r - wytrzymałość na ściskanie, S - wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie prostopadłej do osi 3.

W przypadku przekroczenia któregokolwiek z przedstawionych we wzorze numer 11 warunków następuje zniszczenie materiału [80].

Analogicznie wygląda sytuacja w przypadku kryterium maksymalnych odkształceń, a jedyna różnica wynika z zastosowania jako kryterium porównawczego odkształceń zamiast naprężeń.

Matematyczny zapis hipotezy przyjmuje postać:

$$\epsilon_1 < \epsilon_{Xkr}, \epsilon_2 < \epsilon_{Ykr}, |\gamma_{12}| < \gamma_S, \quad (12)$$

,gdzie ϵ_1 - odkształcenia liniowe w kierunku 1, ϵ_2 - odkształcenia liniowe w kierunku 2, $|\gamma_{12}|$ - odkształcenie postaciowe w płaszczyźnie 1-2, ϵ_{Xkr} - wytrzymałość na rozciąganie, ϵ_{Ykr} - wytrzymałość na ściskanie, γ_S - wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie prostopadłej do osi 3.

W przypadku niespełnienia warunków opisanych powyżej, materiał ulega uszkodzeniu.

4.2.2. Kryterium Tsai-Hilla

Hill dokonał adaptacji kryterium wyteżenia Hubera-Miesa-Hencky'ego na materiały ortotropowe w roku 1950 [74], natomiast Tsai [92], przedstawił je w formie dotyczącej wytrzymałość warstwy w kierunkach głównych osi materiałowych. Dla płaskiego stanu naprężenia przyjmuje ono postać:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\sigma_6^2}{S^2} = 1 \quad (13)$$

,gdzie σ_1 naprężenie normalne w kierunku 1, σ_2 naprężenie normalne w kierunku 2, σ_6 - naprężenie styczne.

Kryterium stanowi podstawę do oceny zniszczenia kompozytu analizowanego w płaskim stanie naprężenia określanego przez 4 składowe o dowolnych znakach [72]. Ograniczeniem metody jest przypadek wystąpienia ściskania i rozciągania jednocześnie, np. gdy wzdłuż jednej osi występuje rozciąganie, a wzdłuż drugiej ściskanie. [96]

4.2.3. Kryterium Tsai-Wu

Podstawą powstania kryterium Tsai-Wu było kryterium w postaci nieskończonego wielomianu tensorowego opracowanego przez Malmaister'a [13] przyjmujące postać:

$$F_1\sigma_i + F_{i,j}\sigma_i\sigma_j + F_{i,j,k}\sigma_i\sigma_j\sigma_k\dots = 1 \quad (14)$$

Z uwagi na fakt, iż wyrażenie opisujące funkcję wyężenia materiału musi być skończone, Tsai i Wu zaproponowali kryterium w którym powyższy wielomian został ograniczony do 2 pierwszych wyrazów [93].

Kryterium to przyjmuje postać:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (15)$$

Składowe tensorów wytrzymałości z równania 15 można wyznaczyć ze wzorów:

$$\begin{aligned} F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c} & F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \\ F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} & F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2} & F_6 &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Wyjątek stanowi F_{12} , która jest składową związaną z interakcją naprężeń σ_1 i σ_2 . Przy założeniu, że $\sigma_6 = 0$ oraz $\sigma_1/\sigma_2 = B$ to z równania 15 można otrzymać postać:

$$F_{12} = \frac{1 - BF_{11}\sigma_2^2 - F_{22}\sigma_2^2 - BF_1\sigma_2 - F_2\sigma_2}{2B\sigma_2^2} \quad (17)$$

Wspomniany test jest trudny do przeprowadzenia z uwagi na duży wpływ F_{12} na stabilność kryterium [57]. Przykład eksperymentalnego wyznaczenia kryterium współczynnika F_{12} opisany został szczegółowo przez Benzeggagh et al. w publikacji [67].

5. Uzasadnienie celowości badań

5.1. Stan wiedzy w obszarze badań

Współczesna literatura bogata jest w analizy dotyczące materiałów kompozytowych i ich odporności na uszkodzenia mechaniczne. Pomijając wytrzymałość na obciążenia statyczne, która nie jest przedmiotem uwzględnianym w niniejszej analizie, bardzo liczna grupa publikacji porusza temat odporności materiałów kompozytowych na uderzenia balistyczne. W tego typu analizach rozpatrywany jest przypadek wystrzelenia z dużą prędkością, w kierunku prostopadłym do próbki pocisku zakończonego stożkiem [28], [95], [32], [81]. Badania tego typu mają na celu weryfikację możliwości zastosowania różnych materiałów kompozytowych, w tym hybrydowych, jako specyficznych materiałów kuloodpornych. Prace koncentrują się na omawianiu następujących problemów badawczych: wpływ liczby warstw i rodzaju zbrojenia na odporność, wpływ materiału poszczególnych warstw na wyniki, zgodność wyników badań z wynikami symulacji numerycznych i możliwość ich zastosowania do symulacji innych przypadków. W trakcie tych badań opracowane zostały modele pozwalające przeprowadzić symulacje numeryczne, a fragmenty tych opracowań można również odnieść do specyficznego wariantu uderzenia omawianego w niniejszej rozprawie.

Kolejna liczna grupa publikacji porusza zagadnienie związane z niskoenergetycznymi uderzeniami w elementy kompozytowe [27], [83], [39]. Do tej grupy badań zaliczają się również niskoenergetyczne uderzenia udarowe, a istotność tego problemu określona została jako porównywalna do badań zmęczeniowych materiałów kompozytowych [6]. Badania niskoenergetyczne skupiają się głównie na uderzeniach elementów o stosunkowo gładkim kształcie, niskiej masie i niewielkiej prędkości. Tego typu uderzenia powodują głównie uszkodzenia wewnątrz struktury - rozwarstwienia, stąd są szczególnie niebezpieczne, ponieważ nie są widoczne od strony zewnętrznej. Wspomniane sytuacje zaistnieć mogą chociażby w wyniku uderzenia spadającego narzędzia wypuszczonego przez pracownika podczas serwisowania samolotu, czy padającego na płatek gradu.

Inaczej wygląda dostępność publikacji opisujących badania specyficznego typu uderzeń poruszanego w niniejszej rozprawie. Odnaleziono jedynie 3 pozycje literaturowe poruszające zagadnienie odporności osłon kompozytowych zabezpieczających podwozia pojazdów szynowych: [15], [14], [61]. Jednak pomimo, że zagadnienie dotyczy uderzeń pod niskim kątem względem powierzchni próbki, wszystkie odnalezione publikacje finalnie upraszczają badania do uderzeń skierowanych prostopadle do powierzchni. Stąd można wysnuć wniosek, że informacje te nie zapewniają wystarczającej podstawy do sformułowania odpowiednich założeń projektowo-konstrukcyjnych dla konstruktorów osłon.

Stan wiedzy w obszarze badań, aktualność zagadnień poruszonych w pracy oraz brak w literaturze badań prowadzonych w kontekście omawianego typu uderzeń, nakłonił autora do szerszej analizy tego zagadnienia oraz publikacji wyników. Część wyników prowadzonych badań została przedstawiona w publikacjach [59], [60] oraz na tematycznej konferencji dot. zastosowania materiałów kompozytowych [58].

5.2. Przedmiot i cel badań

Przedmiotem niniejszej pracy jest weryfikacja wpływu wytypowanych czynników na odporność osłon z materiałów kompozytowych na rozpatrywany przypadek uderzenia.

Celem teoretycznym rozprawy jest uporządkowanie i rozbudowanie wiedzy dotyczącej projektowania osłon kompozytowych na podstawie analiz wytrzymałościowych i symulacji numerycznych.

Celem utilitytarnym jest opracowanie modelu numerycznego umożliwiającego przeprowadzenie symulacji omawianego przypadku uderzenia, a także możliwość weryfikacji innych wariantów uderzeń. W celu uzyskania wiarygodnego modelu niezbędne jest wcześniejsze przeprowadzenie badań stanowiskowych, których wyniki pozwolą dostroić model numeryczny. Ponadto badania stanowiskowe przeprowadzone zgodnie z przygotowanym planem eksperymentu pozwolą na ocenę stopnia wpływu przyjętych czynników na wyniki.

Głównym celem podjętych badań jest wskazanie wybranych własności, które powinna posiadać osłona w celu skutecznej ochrony podwozia. Tego typu ogólne wytyczne mogą posłużyć do opracowania osłony zabezpieczającej również przed innymi, zbliżonymi typami uszkodzeń, np. jako zabezpieczenie podwozia pojazdu drogowego.

5.3. Teza pracy

Na podstawie przeprowadzonych badań literatury oraz badań rozpoznawczych obejmujących między innymi analizę skutków incydentów eksploatacyjnych, postawiono następującą tezę pracy:

Zakres uszkodzeń kompozytowych osłon podwozi szybkobieżnych pojazdów szynowych, wywołanych uderzeniami kamieni podrywanymi z torowiska, zależy między innymi od:

1. anizotropii własności osłony.
2. własności tłumiących osłony.
3. współczynnika tarcia powierzchni zewnętrznej osłony.

Wykazanie słuszności powyższej tezy pozwoli na określenie odpowiednich zaleceń dla konstruktorów rozpatrywanych osłon.

5.4. Zadania badawcze

W celu wykazania słuszności postawionej tezy badawczej zaplanowano:

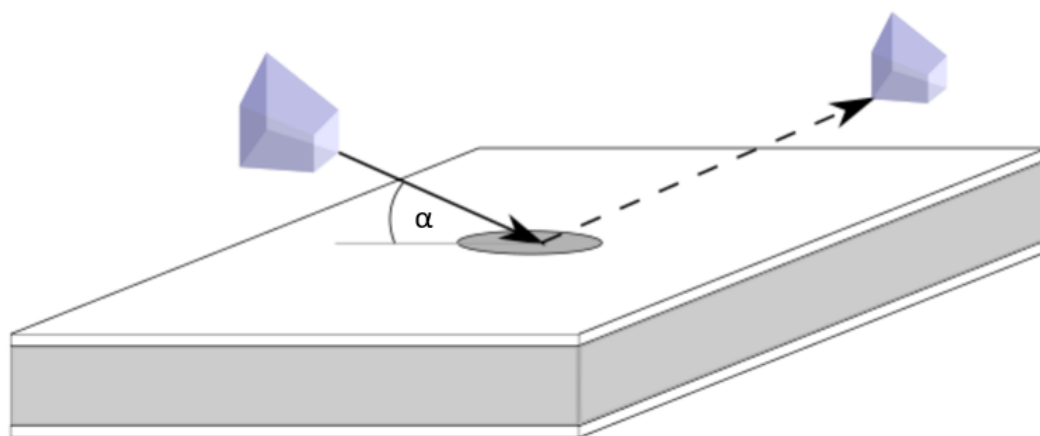
1. Zaprojektować i wykonać dwa niezależne stanowiska badawcze w celu przeprowadzenia niezbędnych badań eksperymentalnych, tj. wyznaczenia współczynnika restytucji przygotowanych próbek oraz pomiar ich odporności na uszkodzenia.
2. Przygotować serię próbek kompozytowych, na których przeprowadzone zostaną testy laboratoryjne.
3. Przeprowadzić badania eksperymentalne, a następnie dokonać weryfikacji powstałych na próbkach uszkodzeń oraz przeprowadzić analizę wyników.
4. Rezultaty przedstawić w formie wniosków.
5. Opracować model numeryczny odwzorowujący rozpatrywane zjawisko uderzenia oraz dokonać jego strojenie na podstawie wyników badań eksperymentalnych.
6. Przeprowadzić analizę numeryczną dla zmienionych parametrów wejściowych, wykorzystując opracowany model.
7. Zdefiniować wnioski wynikające z badań i przedstawić w postaci wytycznych.

6. Model procesu niszczenia osłony

Model procesu prowadzącego do powstania uszkodzenia na osłonach zabezpieczających podwozie powinien pozwolić na odwzorowanie kluczowych elementów zdarzenia, które wielokrotnie zachodzi podczas codziennej eksploatacji pojazdów szynowych. Prawidłowo opracowany model umożliwi dobór odpowiednich badań pozwalających na weryfikację postawionej tezy.

W związku z tym zasada działania opracowanego stanowiska testującego odporność osłon, jest zgodna ze sporządzonym w niniejszym rozdziale modelem fenomenologicznym, a opracowany na jego podstawie model numeryczny, pozwala na weryfikację zgodności otrzymanych wyników.

Pierwszym etapem zastosowanego modelowania wieloskalowego było przybliżenie podstaw zjawiska powodującego podrywanie kamieni z poziomu ziemi w kierunku podwozia pojazdu, które przedstawione zostało w Rozdziale 2.2.1. Na tej podstawie oszacowano energię, prędkość oraz kierunek uderzenia. Następnie opracowano propozycję uproszczonego spojrzenia na fenomen, przedstawioną w postaci uderzenia elementu o nieregularnych kształtach w próbkę odpowiadającą fragmentowi wyciętej osłony. Z uwagi na kształt zewnętrzny kamieni, uderzenie w osłonę może nastąpić na 3 różne sposoby, tj. powierzchnią, krawędzią lub wierzchołkiem. Ponieważ w ostatnim przypadku całkowita energia kamienia zostaje przekazana punktowo powodując największe naprężenia, ten przypadek uznany został jako najgorszy, stąd został przyjęty do dalszych rozważań.



Rysunek 18: Model przedstawiający uderzenie kamienia w próbkę

Przedstawiony na Rys. 18 model, obrazuje uproszczone zjawisko uderzenia pojedynczego elementu o ostre krawędzie w powierzchnię zewnętrzną próbki. Taka postać przyjęta została do dalszej części rozważań i przygotowania modelu fenomenologicznego będącego podstawą do opracowania modelu numerycznego.

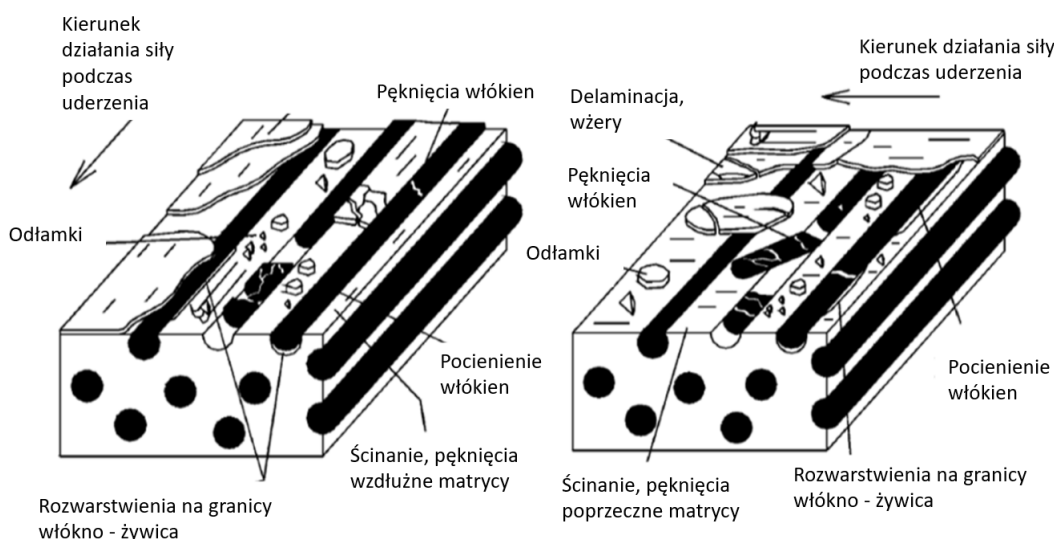
Zgodnie z przyjętą tezą, do kluczowych czynników wpływających na zakres uszkodzenia zaliczone zostały trzy czynniki, tj. zdolności tłumiące próbki, współczynnik tarcia

pomiędzy przedmiotem uderzającym, a próbką oraz kierunek anizotropii materiału, definiowany przez układ warstw w zewnętrznej części kompozytu, bezpośrednio narażonej na uszkodzenie.

Wynikiem przeprowadzonych badań, bazujących na opracowanych w tym rozdziale modelach, jest weryfikacja stopnia wpływu tych czynników na powstałe uszkodzenia, przy jednoczesnym opracowaniu uniwersalnego modelu numerycznego pozwalającego na weryfikację również innych, niż omawiane w niniejszej rozprawie, przypadków uderzenia. Jest to istotne, ponieważ bez ponoszenia kosztów badań stanowiskowych i przygotowania próbek, można zweryfikować wpływ zmiany kąta uderzenia, prędkości uderzenia, czy kształtu elementu uderzającego na powstały obszar uszkodzenia.

6.1. Czynniki uwzględnione w modelu

Zgodnie z przyjętą tezą, pierwszym rozpatrywanym czynnikiem jest kierunkowość anizotropii warstw kompozytu w stosunku do kierunku osi uderzenia. Dzięki zastosowaniu kompozytów polimerowych do budowy osłon, istnieje duża możliwość manipulowania pewnymi cechami gotowego wytworu w celu optymalizacji parametrów. W związku z tym, założono układ konstrukcji warstwy zbrojącej w postaci włókien kierunkowych, które wykazują silne właściwości anizotropowe. Biorąc pod uwagę rozpatrywany, powtarzający się kierunek uderzenia, zasadna jest weryfikacja wpływu ukierunkowania włókien w warstwach zewnętrznych kompozytu na zakres powstałych uszkodzeń. Zmiana układu włókien powoduje zmianę kierunku największej sztywności warstw bezpośrednio narażonych na kontakt z elementem uderzającym. Rys. 19 przedstawia przypadki uderzeń, których oś jest zgodna z kierunkiem przebiegu włókien oraz prostopadła.



Rysunek 19: Wpływ kierunku włókien na powstałe uszkodzenia [46]

Bazując na publikacjach [60], [46] kierunkowość włókien tworzących warstwę zewnętrzną zgodną z kierunkiem poruszania się przedmiotu uderzającego, powinna minimalizować

obszar wpływu uderzenia, poprzez zapewnienia możliwości ześlizgnięcia się elementu uderzającego.

Aby ześlizgnięcie po kontakcie przedmiotu uderzającego z osłoną kompozytową było możliwe, konieczne jest zminimalizowanie współczynnika tarcia μ , którego wartość wpływa na powstanie impulsów stycznych wpływających na zachowanie kamienia podczas uderzenia. Jest to drugi z czynników, który został uwzględniony w eksperymencie. Zgodnie z opisem mechaniki uderzenia przedstawionym w Rozdziale 2.3, na ilość energii, która rozproszona zostaje przez osłonę w trakcie uderzenia, wpływają właściwości tłumiące materiału, których jednym z wyznaczników może być wartość współczynnika restytucji [1].

Współczynnik ten, determinuje oddaną do układu ilość energii w zależności od sztywności elementu uderzanego. Jako, że w przypadku odbicia sprężystego, część energii uderzenia oddana jest elementowi uderzającemu nie wpływając przy tym na zwiększenie zakresu uszkodzeń plastycznych w elemencie uderzanym, wspomniany współczynnik restytucji, został przyjęty jako trzeci czynnik brany pod uwagę podczas przygotowania modelu oraz eksperymentu.

6.2. Budowa modelu fenomenologicznego

Opracowanie modelu fenomenologicznego, rozpocząć należy od przedstawienia problemów istotnościowych, służących do rozwiązania problemu badawczego [23].

Zadaniem modelu jest odwzorowywanie zjawiska zachodzącego w trakcie uderzania elementów o ostrych krawędziach (kamieni) w osłonę wykonaną z kompozytu polimerowego, zabezpieczającą podwozie pojazdu szynowego.

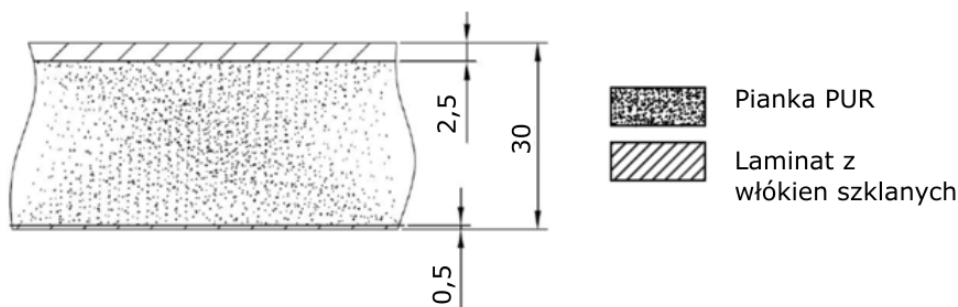
Przygotowując model fenomenologiczny, należy odwzorować istotę zjawiska, odrzucając lub minimalizując wpływ fizycznego wyglądu badanych przedmiotów. Model ten nie musi odnosić się do rzeczywistej postaci geometrycznej. Celem opracowania takiego modelu jest przygotowanie podstaw do utworzenia modelu numerycznego prawidłowo odwzorowującego istotne cechy zachodzącego zjawiska. W tym celu konieczne jest przyjęcie pewnych założeń i uproszczeń.

Z uwagi na wymiary poprzeczne pociągu, płyta kompozytowa będąca przedmiotem badań, w zależności od wariantu, posiada wymiary przekraczające 2000 mm x 2000 mm. Na potrzeby badań próbkę zminimalizowano i przyjęto wymiar 120 mm x 120 mm jako rozmiar, który pozwala odwzorować badane zjawisko bez istotnego wpływu na rezultat. Wynika to z faktu, że w rozpatrywanym przypadku, siła uderzenia osiąga duże wartości powodując duże naprężenia i odkształcenia zlokalizowane w pobliżu punktu uderzenia. Pomimo, iż miejsce to staje się źródłem rozchodzenia się fal obejmujących zasięgiem całą objętość ciała przekształcających się w drgania, to odkształceniom tym towarzyszą mniejsze wyteżenia materiału niż w przypadku odkształceń lokalnych [39].

Wyniki analizy uszkodzeń dokonanych przez kamienie na badanej w Rozdziale 2.4 osłonie, pozwoliły traktować uderzenie jako uderzenie lokalne, z pominięciem wspomnianego wpływu zjawiska drgań. Jako, że próbka reprezentuje jedynie fragment osłony, przyjęto

również uproszczenie kształtu przekroju poprzecznego. Rozpatrywana osłona w rzeczywistości ma delikatnie zaokrąglony kształt (promień zaokrąglenia wynosi $R=10\ 000\text{ mm}$) w kierunku poprzecznym do osi wzdłużnej pojazdu. Jednak z uwagi na rozpatrywanie małego wycinka, przyjęto założenie, że próbka jest całkiem płaska.

Użyte do produkcji osłon kompozyty są tworzywem warstwowym, powstającym wskutek formowania wyrobów kompozytowych z przesyconych polimerem wzmocnień włóknistych i napełniaczy nakładanych warstwowo [96] o budowie przekładkowej. Rozpatrzenia wymaga zamodelowanie prawidłowego przekroju poprzecznego materiału. Przekrój poprzeczny tworzywa, które tworzy istniejącą osłonę, przedstawiony został na Rys. 20. Zgodnie z rysunkiem osłona składa się z nośnych laminatowych warstw skorupowych, a przestrzeń pomiędzy nimi wypełniona jest warstwą dystansową z materiału lekkiego - pianką poliuretanową PUR. Okładziny laminatowe nadają kształt i zapewniają wytrzymałość mechaniczną osłony, podczas gdy pianka umieszczona pomiędzy nimi zapewnia sztywność [60].

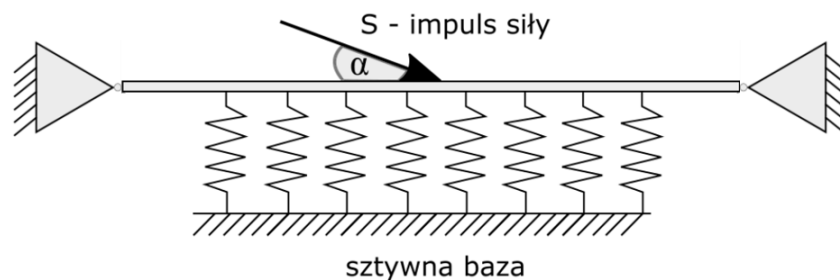


Rysunek 20: Makroskopowy schemat przekroju poprzecznego istniejącej osłony

W celu odwzorowania rozpatrywanego zjawiska uderzenia, szczególnie uwzględnione powinny być warstwy zewnętrzne, bezpośrednio narażone na kontakt i uszkodzenia związane z uderzeniem. W związku z tym, model celowo pomija odwzorowanie geometrii tylnej okładziny. Uproszczony model przedstawiony został na Rys. 21. Wspomniana, zewnętrzna część kompozytu – laminat, rozpatrywany jest w skali makroskopowej, nie zagłębiano się w zagadnienia mikromechaniki, ponieważ relacja na poziomie żywica - pojedyncze włókno, nie jest przedmiotem niniejszych badań. Analizie podlegał makroskopowy model, a badania zostały prowadzone w celu oszacowania oraz przewidywania zakresu, obszaru uszkodzenia powstałego na powierzchni [20].

Elementem uderzającym w rzeczywistych warunkach eksploatacji są kamienie, czyli przedmioty kruche o ostrych krawędziach, uderzające w podwozie z dużą szybkością [15], [47]. W celu odwzorowania uderzenia w sposób powtarzalny i możliwy do zrealizowania również w warunkach eksperymentalnych, jako element uderzający przyjęto przedmiot w kształcie tulei, charakteryzujący się dużą sztywnością. Ponieważ kąt uderzenia $\alpha = 8^\circ$, uderzenie odbywa się za pomocą zewnętrznej krawędzi.

Obliczona w rozdziale 2.2.1 energia rzeczywistego uderzenia wynosi 147 J, co odpowiada energii uderzenia przedstawionej w normie [68] dla klasy K8, czyli 170 J.



Rysunek 21: Model fenomenologiczny procesu uderzenia

7. Metody eksperymentalne i numeryczne stosowane w pracy

W niniejszej rozprawie wykorzystane zostały następujące metody badawcze:

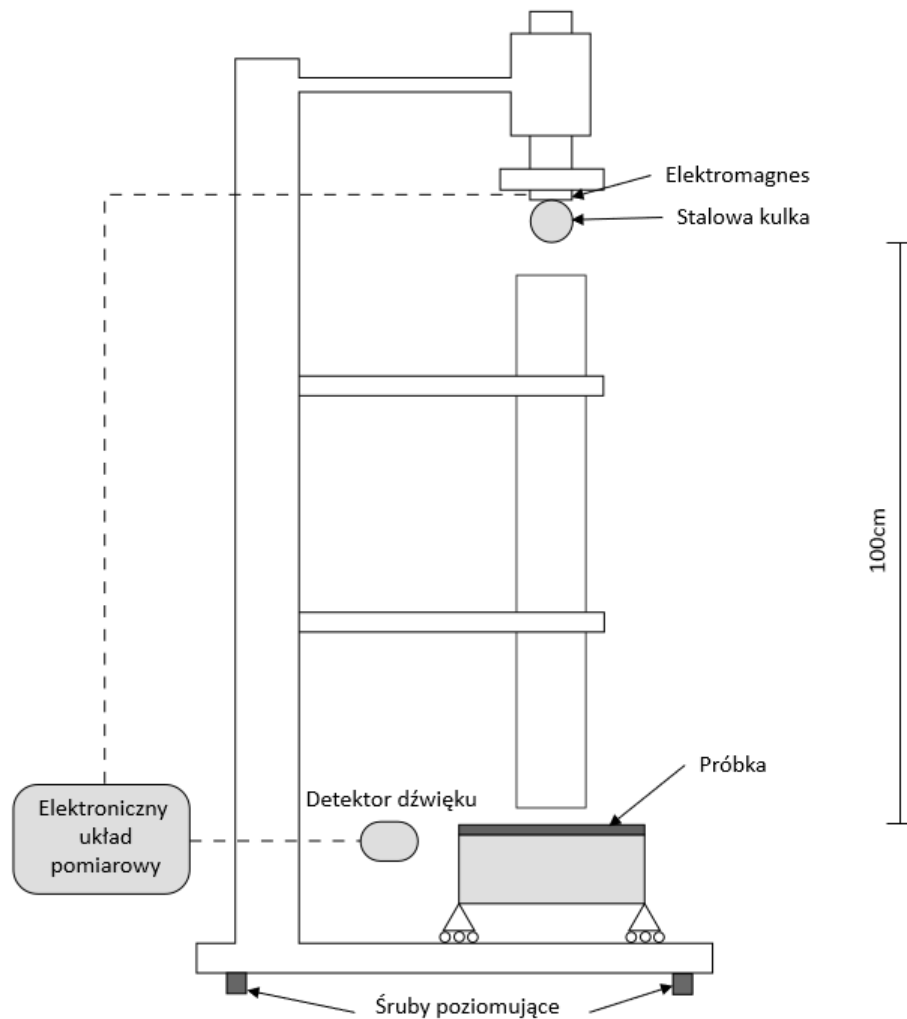
- wyznaczenie współczynnika restytucji próbek na podstawie badań stanowiskowych,
- badania odporności na uderzenia na stanowisku do badań dynamicznych (uderzenia impulsowe),
- metoda elementów skończonych, MES (z ang. Finite Element Method, FEM).

7.1. Współczynnik restytucji

W celu weryfikacji wpływu zdolności materiału do tłumienia energii na odporność na uderzenia kątowe, koniecznym okazało się wyznaczenie współczynnika opisującego sprężystość i właściwości tłumiące badanego materiału. Można tego dokonać na wiele sposobów, jednym z nich jest metoda polegająca na doświadczalnym wyznaczeniu współczynnika restytucji "R" i na jego podstawie określenie współczynnika tłumienia (z ang. damping). O skuteczności tej metody napisał Khatami, Seyed Mohammad, et al. [90].

Zastosowana w niniejszej pracy metoda wyznaczania współczynnika restytucji oparta została na międzynarodowym standardzie dotyczącym badania próbek ceramicznych, jednak w przypadku niniejszej pracy jej ogólna zasada adaptowana została do próbek kompozytowych. W uproszczeniu, badanie polega na pomiarze wysokości odbicia upuszczonej na uprzednio przygotowaną próbkę stalowej kulki. Kulka wykonana została ze stali chromowej, a jej średnica wynosi $19 \pm 0,05$ mm. Schemat stanowiska badawczego utworzonego w celu wyznaczenia współczynnika "R" przedstawiony został na Rys. 22.

W celu dokładnego określenia wartości współczynnika, zrezygnowano z metody pomiarowej opartej na wizualnym pomiarze wysokości odbicia, zastosowano natomiast elektroniczny układ pomiarowy mierzący czas pomiędzy pierwszym, i drugim odbiciem od powierzchni próbki. Wartość współczynnika obliczana została w takim przypadku z zastosowaniem wzoru [1]:



Rysunek 22: Schemat stanowiska do wyznaczania współczynnika restytucji

$$R = \frac{v}{u} \quad (18)$$

gdzie "v" oznacza prędkość tuż po odbiciu, a "u" prędkość tuż przed odbiciem.

A ponieważ:

$$\frac{mv^2}{2} = mgh_2 \quad (19)$$

po dokonaniu przekształceń, możliwe jest obliczenie prędkości "v" znając wysokość odbicia:

$$v = \sqrt{2gh_2} \quad (20)$$

gdzie "m" oznacza masę kulki w gramach, "h₂" jest wysokością odbicia w centymetrach, "g" jest przyspieszeniem ziemskim.

Analogicznie, przeliczając:

$$\frac{mu^2}{2} = mgh_1 \quad (21)$$

możliwe było wyznaczenie prędkości "u" znając wysokość z jakiej spadła kulka:

$$u = \sqrt{2gh_1} \quad (22)$$

gdzie "h₁" jest wysokością z jakiej upuszczona została kulka
Stąd:

$$R = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (23)$$

Jeśli wyznaczenie współczynnika dokonywane jest tak jak w przypadku niniejszego stanowiska badawczego, czyli poprzez umożliwienie kulce dwukrotnego odbicia się od powierzchni i mierzenie upływu czasu pomiędzy nimi, następujące równanie pozwala na wyznaczenie wysokości odbicia:

$$h_2 = u_0t + \frac{gt^2}{2} \quad (24)$$

gdzie "u₀" oznacza prędkość w momencie maksymalnej wysokości po odbiciu (0 m/s), a "t" oznacza połowę interwału pomiędzy kolejnymi odbiciami, stąd ostateczna postać równania:

$$h_2 = 122,6T^2 \quad (25)$$

Podstawiając je pod odpowiednie równanie, możliwe jest wyznaczenie wartości odbicia znając wysokość początkową i czas pomiędzy odbiciami.

Na podstawie obliczonego współczynnika restytucji możliwe jest wyznaczenie współczynnika tłumienia (z ang. damping ratio) określanego przez ξ_{imp} . Do jego wyznaczenia opracowane zostało wiele wzorów, zebranych oraz przeanalizowanych przez Khatami, Sey-ed Mohammad, et al. [90].

Jeden ze wzorów, zaproponowany przez Anagnostopoulou [88], dotyczy obliczania współczynnika tłumienia dla liniowo wiskoelastycznego modelu w którym współczynnik przyjmuje restytucji wartości $0 < R < 1$:

$$\xi_{imp} = -\frac{\ln(R)}{\sqrt{\Pi^2 + (\ln(R))^2}} \quad (26)$$

gdzie "R" jest współczynnikiem restytucji.

Powyższe wzory pomijają wpływ oporów powietrza na wynik, to uproszczenie jest dopuszczalne z uwagi na niski wpływ oporów podczas ruchu kulki na wartość współczynnika restytucji. Badania przeprowadzone przez Marinack et al. w 2013r. [65] i Patil and Higgs w 2017r. [29] dowodzą, że wpływ oporów powietrza na wynik nie przekracza 1%.

7.1.1. Stanowisko badawcze do pomiaru współczynnika restytucji

W celu eksperymentalnego wyznaczenia wartości współczynnika restytucji dla próbek utworzonych z nowo powstałych kompozytów, konieczne było utworzenie nowego stanowiska badawczego. W tym celu zaprojektowano i wykonano od podstaw stanowisko, wg

schematu przedstawionego na Rys. 22. Zdjęcie rzeczywistego stanowiska przedstawia Rys. 23. Projekt części mechanicznej oraz dokumentacja techniczna wykonana została z zastosowaniem projektowania wspomaganego komputerowo (z ang. Computer Aided Design, CAD) w środowisku Catia V5.

Jako element nośny stanowiska badawczego przyjęto płytę z blachy stalowej S235JR o grubości 4mm, lakierowanej proszkowo, natomiast rdzeń trzymający rurę ochraniającą oraz układ zwalniający, wykonany został z profili aluminiowych. Całość oparta została na 4 regulowanych nóżkach umożliwiających wypoziomowanie całego urządzenia.

Do zarządzania układem pomiarowo-sterującym wykorzystano mini komputer Raspberry Pi 3 model B zaprogramowany w języku Python.

Za trzymanie kulki w pozycji początkowej odpowiada elektromagnes trzymający o mocy 2,5 W, który zapewnia utrzymanie masy 2 kg przy standardowym przyspieszeniu ziemskim. Układ pomiarowy oparty został na cyfrowym detektorze, który generuje sygnał po przekroczeniu odpowiedniego poziomu natężenia dźwięku.



Rysunek 23: Stanowisko do wyznaczania współczynnika restytucji

Wszystkie elementy umieszczone zostały w zaprojektowanych obudowach wydrukowanych na drukarce 3D.

Po uruchomieniu układu, aktywowana zostaje cewka umożliwiająca utrzymanie kulki na odpowiedniej wysokości, następnie, po umieszczeniu próbki w prawidłowym położeniu i naciśnięciu przycisku zwalniającego następuje odcięcie zasilania od cewki i wypuszczenie kulki. Po pierwszym uderzeniu o próbkę, kulka emituje hałas wyzwalający sygnał na detektorze dźwięku, od tego momentu układ pomiarowy rozpoczyna liczenie czasu. W momencie, gdy kulka uderzy po raz kolejny, wyzwolenie sygnału na detektorze dźwięku zatrzymuje układ pomiarowy i po odpowiednim przekształceniu przedstawia wynik na wyświetlaczu LCD.

7.2. Pomiar odporności na uderzenia

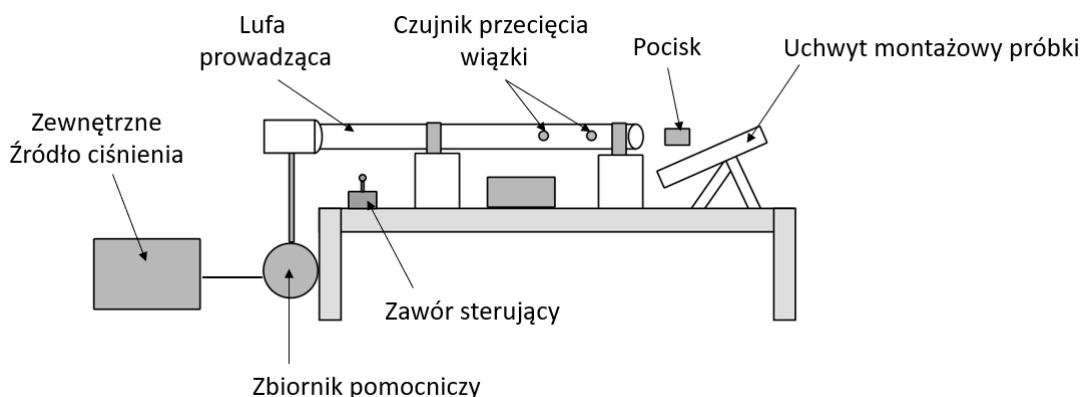
Analiza literatury wykazała istnienie wielu różnych teorii i metod pozwalających na weryfikację postawionych założeń dotyczących odporności zewnętrznych warstw osłony na erozyjny wpływ czynników zewnętrznych. Można do nich zaliczyć na przykład pojedynczy test zarysowania wgłębnikiem (SST) opisany przez Mzali et al. [85], czy też opisana w normie ISO 20567-1 [2] metoda dotycząca badania odporności powłok farb i lakierów metodą testów wielokrotnego uderzenia. Kolejne metody i stanowiska opisane zostały w publikacjach [6][39][19]. Po przeprowadzonej analizie pola możliwych rozwiązań, zdecydowano w procesie koncyptowania konstrukcyjnego na wykorzystanie rozwiązania bazującego na wytycznych zawartych w standardzie NF F07-101 "Railway applications - Simulation shock test ballast projection" [68] przy jednoczesnym wprowadzeniu kilku istotnych modyfikacji.

Norma ta opisuje badania polegające na uderzeniu w próbkę rozpędzonym elementem uderzającym (z ang. impactor), który dzięki nadanej prędkości początkowej posiada energię kinetyczną zgodną z wymaganiami dla odpowiedniej klasy uderzenia. Norma określa klasy uderzenia w zależności od energii w zakresie od 12 J do 285 J.

Profil zewnętrzny elementu uderzającego ma zgodnie z normą kształt zaostrego stożka, co powoduje jego łatwość wnikania w materiał. Kąt uderzenia zdefiniowany został jako wartość z przedziału $0 - 35^{\circ}$.

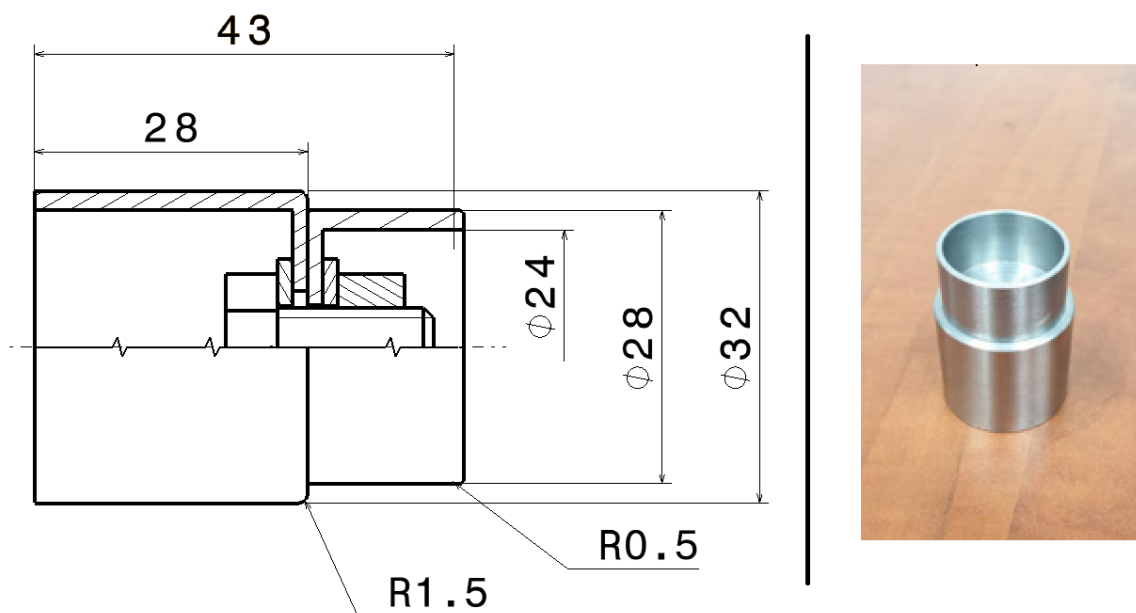
W związku z wytycznymi opracowanymi w procesie budowania modelu fenomenologicznego, wprowadzono modyfikacje w teorii badania, do których zaliczyć można:

- modyfikację kształtu elementu uderzającego w celu umożliwienia weryfikacji postawionych założeń uwzględniających uderzenia wywołane przez ostrą krawędź,
- modyfikację kąta uderzenia, w celu uzyskania zgodności z modelem fenomenologicznym.



Rysunek 24: Schemat stanowiska do badania odporności osłon na uderzenia elementu o ostrych krawędziach

W celu realizacji stanowiska według wyżej opisanych wytycznych opracowano schemat stanowiska przedstawiony na rys. 24.



Rysunek 25: Element uderzający stosowany w pracy. Po lewej stronie przekrój elementu wraz z wymiarami, po prawej stronie rzeczywisty przedmiot

Aby zapewnić powtarzalne wyniki, a przy tym, aby za każdym razem uderzenie odbywało się za pomocą krawędzi, opracowany został specjalny kształt elementu uderzającego przedstawiony na Rys. 25. Szersza średnica odpowiada za prowadzenie w lufie, podczas gdy część o mniejszej średnicy odpowiada za bezpośredni kontakt podczas uderzenia. Taka budowa pocisku umożliwia zmianę części uderzającej przy zachowaniu rdzenia prowadzącego.

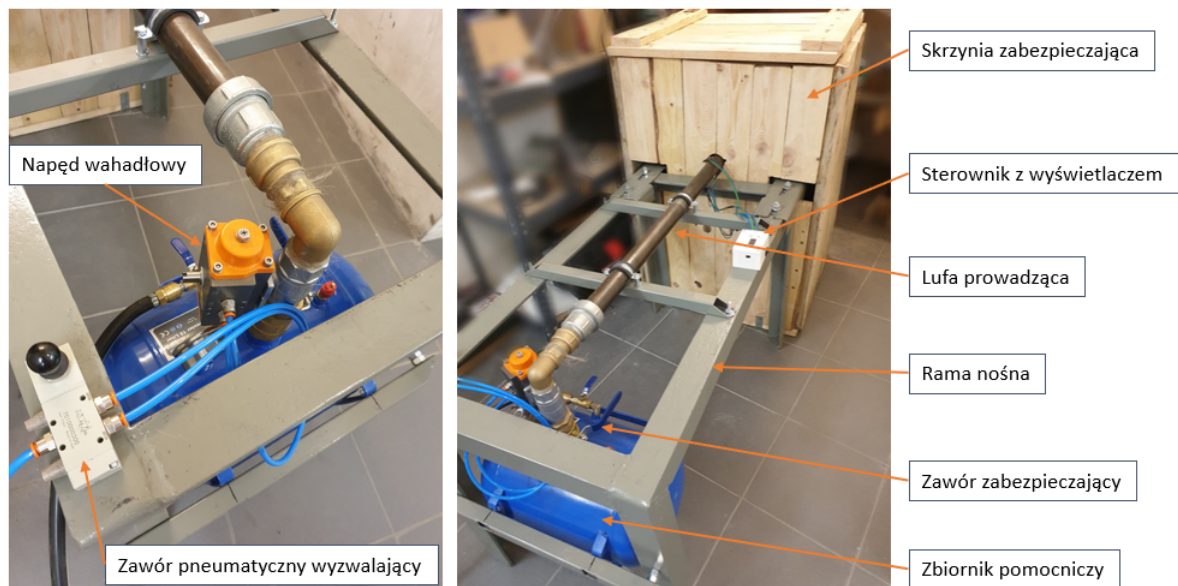
7.2.1. Stanowisko badawcze do weryfikacji odporności na uderzenia impulsowe

Stanowisko badawcze zaprojektowane i skonstruowane zostało od podstaw na potrzeby realizacji niniejszej pracy doktorskiej. Projekt w programie Catia V5 oraz wykonanie zrealizowane zostało w zakresie własnym.

Podstawowy element nośny stanowiska stanowi rama spawana ze stalowych kątowników ekstrudowanych, o grubości 10mm i pomalowana lakierem zabezpieczającym konstrukcję przed korozją. W elemencie tym przygotowano interfejsy do montażu zbiornika pomocniczego, profili nośnych dla lufy oraz wsporników trzymających próbkę pod odpowiednim kątem.

Lufę stanowi honowana rura cylindrowa 32H8x42, wykonana ze stali konstrukcyjnej o podwyższonej wytrzymałości. Jej długość wynosi 1m. Jest ona przymocowana za pomocą obejm stalowych do poprzecznych belek, które przykręcone są do ramy stanowiska. Na jednym końcu stanowiącym wylot lufy, rura jest bosa, natomiast z drugiej strony rura posiada zaciśnięty pierścień uszczelniający, połączony z reduktorem średnicy.

Jako źródło energii zastosowano zbiornik o pojemności 19 l, magazynujący powietrze



Rysunek 26: Widok ogólny stanowiska badawczego wraz ze zbliżeniem na aparaturę sterującą

o ciśnieniu nie przekraczającym 10 bar. Zbiornik posiada przyłącze zasilające 1/4" oraz przyłącze wychodzące 1 1/2". Zamontowany został również manometr w celu kontroli panującego wewnątrz ciśnienia. Zbiornik ten zasilany jest bezpośrednio z zewnętrznego źródła - elektrycznego kompresora tłokowego o ciśnieniu maksymalnym 8 bar.

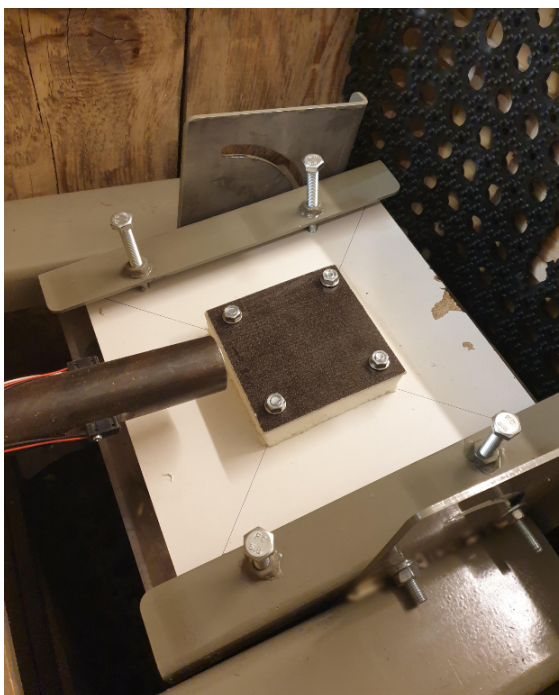
Układ sterowany jest przez zawór pneumatyczny 5/2, monostabilny, sterowany ręcznie przez dźwignię, a elementem wykonawczym jest napęd wahadłowy typu dwuzębatkowego sterujący zaworem kulowym.

Stanowisko wyposażone jest w parę oddalonych od siebie czujników przerywania wiązki IR - LED 5mm. Służą one do pomiaru prędkości pocisku w momencie opuszczania lufy. Z uwagi na małą odległość próbki od wylotu lufy, prędkość ta traktowana jest jako prędkość uderzenia. Czujniki przerywania wiązki podpięte zostały pod komputer Adafruit Feather M0 Proto 32-bit, a za wyświetlanie prędkości odpowiada wyświetlacz OLED 128x32px. Cały układ pomiarowy zamontowany został w wydrukowanej na drukarce 3D obudowie wykonanej z polipropylenu.

Miejsce montażu próbki stanowi rama pomocnicza z łóżem, której zasada działania pozwala na ustawienie dowolnego kąta w płaszczyźnie poprzecznej względem osi uderzenia pocisku. Zakres regulacji wynosi od 8° do 90° . Całość wykonana została ze stali o grubości 4mm. Fragment ramy i łoża z zamontowaną próbką przedstawiona jest na Rys. 27.

Miejsce montażu próbki oraz wylotu pocisku z lufy zabezpieczone zostało skrzynią drewnianą, która zabezpiecza otoczenie przed pociskiem odbitym od badanej próbki. Ponadto, skrzynia wewnątrz zabezpieczona jest gumowymi matami mającymi na celu wyhamowanie pocisku przed uderzeniem w tylną ściankę.

Zasada działania stanowiska polega na nadaniu elementowi uderzającemu energii w wyniku nagłego dostarczenia ciśnienia do komory znajdującej się pomiędzy pociskiem, a początkiem lufy. Uwolniona duża ilość energii w krótkim czasie powoduje wystrzelenie



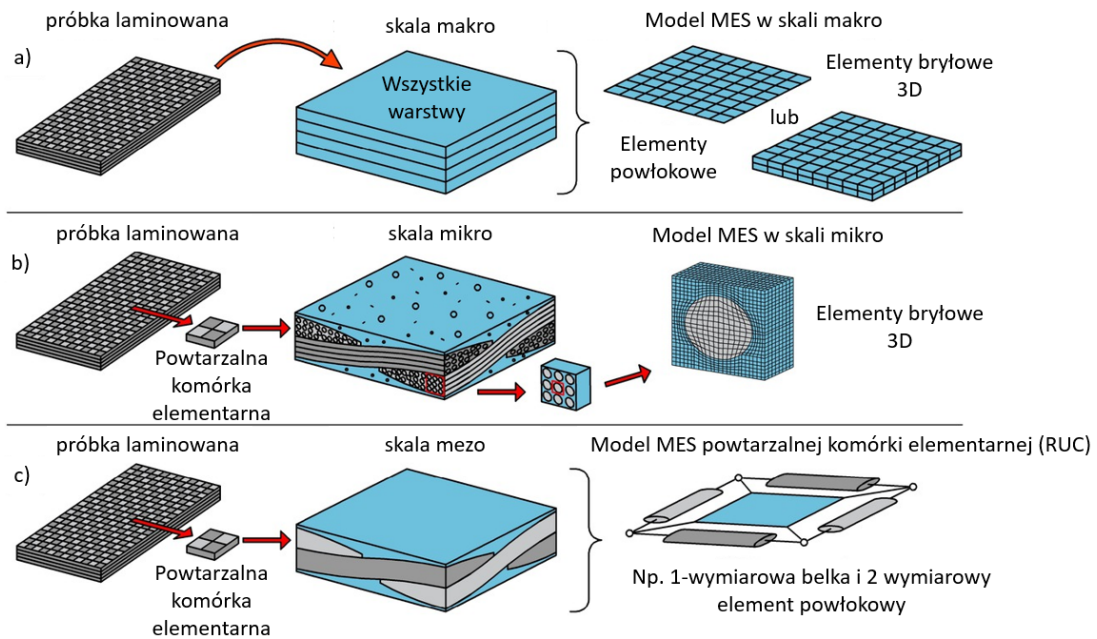
Rysunek 27: Sposób montażu próbki w regulowanej kątowno ramie pomocniczej

pocisku z odpowiednią prędkością, w zależności od ciśnienia.

7.3. Metoda elementów skończonych MES

Własności wytrzymałościowe danego materiału zależne są głównie od jego wewnętrznej budowy, czyli m.in składu chemicznego, fizycznej struktury, czy również, co jest szczególnie istotne w przypadku materiałów kompozytowych - technologii otrzymywania materiału. Z uwagi na duży stopień skomplikowania zależności, nie sposób przewidzieć zachowania materiału w konkretnych warunkach obciążenia. Jednym ze sposobów weryfikacji zachowania danego materiału w określonych warunkach jest przeprowadzenie testów stanowiących odwzorowujących warunki rzeczywiste. Jednakże nie w każdym przypadku jest to możliwe, nawet w sytuacji zastosowania skomplikowanych i drogich urządzeń badawczych [96]. Z tego powodu rozwijane są metody analityczne umożliwiające przewidzenie zachowania się danego materiału bez konieczności przeprowadzania testów rzeczywistych. Omawiane zagadnienie jest jeszcze bardziej skomplikowane, gdy dotyczy materiałów kompozytowych, które z zasady są kompozycją połączonych 2 lub więcej kompletnie różnych tworzyw o różnych właściwościach. Takie połączenie niesie za sobą ryzyko dodatkowych zniszczeń powstałych na skutek m.in spiętrzonych naprężeń na granicy faz, czy złożonego stanu odkształceń [96].

Badanie tych skomplikowanych przypadków, możliwe jest dzięki zastosowaniu metod obliczeniowych, pozwalających na analizę zachowania materiału na poziomie zarówno makro jak i mikroskopowym. Efektem zastosowania metod obliczeniowych jest określenie stanu naprężeń i odkształceń w materiale oraz wyodrębnienie miejsc, w których stany istniejących naprężeń przekraczają wartości dopuszczalne. Modele mikromechaniczne kompozy-



Rysunek 28: Poziomy modelowania kompozytów warstwowych. a) skala makro, b) skala mikro, c) skala mezo [41]

tów opisane zostały szczegółowo w [38], [87], [18].

Bez względu na dokładność metod analitycznych, końcowym etapem powinna pozostać doświadczalna weryfikacja otrzymanych wyników w postaci szczegółowych badań [87]. Najbardziej efektywna metoda doświadczalna oparta jest na metodach niszczących i informacji, że dany element ulega uszkodzeniu przy danym obciążeniu. Opierając się na założeniu, że te same elementy wytworzone w tych samych warunkach posiadają zbliżone parametry wytrzymałościowe, założyć można poprawność działania badanych elementów w warunkach eksploatacyjnych.

Według analiz przeprowadzonych przez Witolda Biedunkiewicza w [96] tok postępowania w procesie analiz wytrzymałościowych powinien składać się z 3 kroków:

1. Przyjęcie modelu mikromechanicznego, akceptacja założeń, stopnia skomplikowania i dokładności otrzymywanych wyników.
2. Analizy sprężysto-wytrzymałościowe elementów z wykorzystaniem modeli makromechanicznych.
3. Powrót do modelu mikromechanicznego w celu weryfikacji wartości maksymalnych lokalnych naprężeń oraz analiza wytrzymałości na granicy faz.

Schemat jest propozycją i nie każda analiza musi odzwierciedlać dokładnie tą procedurę. Najważniejsze jest dostosowanie metod do wymagań stawianych wytworowi w danych warunkach.

Analiza na poziomie makroskopowym, przedstawiona na Rys. 28 a), traktuje laminat jako ciągły, jednorodny materiał o charakterystyce silnie anizotropowej. Modele w skali

makro charakteryzują się dobrą wydajnością numeryczną, mogą one być oparte o dwuwymiarowe lub trójwymiarowe elementy skończone [41]. Wpływ liczby warstw zbrojenia, grubości oraz kierunku ułożenia opisuje teoria zbrojenia [31] i klasyczna teoria laminacji [17]. W rzeczywistości jednak, z uwagi na fakt, że laminat posiada wyraźną budowę mikrostrukturalną wynikającą z oddzielenia fazy osnowy i zbrojenia, jego właściwości wypadkowe nie są sumą właściwości składników. Zaletą modelu w skali makroskopowej oprócz wspomnianej wcześniej wydajności obliczeniowej, jest ograniczona pracochłonność wykonania modeli, nie odbiegająca od pracochłonności przy wykonywaniu modeli MES dla analiz materiałów izotropowych, np. stali. Jednakże, na podstawie badań opublikowanych przez Vinšová et. al [51] oraz Stadnicki et al. [44] analiza pomijająca mikrostrukturę laminatu oraz stosowanie założeń upraszczających, jak wspomniana teoria laminacji czy teoria wzmocnienia, może prowadzić do wyników odbiegających od rzeczywistości. Chcąc ponadto rozszerzyć analizę o uszkodzenia w postaci pęknięcia między warstwami kompozytu, konieczne jest zastosowanie opracowanych metod obliczeniowych, jak np. technika wirtualnego zamykania szczeliny VCCT (z ang. Virtual crack closure technique) [75] [30] lub model obszaru kohezji CZM (z ang. cohesive zone model). W tym celu wprowadzone zostają do modelu dodatkowe warstwy kohezyjne lub wiązania pomiędzy poszczególnymi warstwami, o parametrach spoiwa spajającego całość.

Inaczej wygląda przypadek analizy w skali mikroskopowej, której wydajność numeryczna jest ograniczona z powodu konieczności dyskretyzacji elementami skończonymi o bardzo małych rozmiarach. Analiza mikroskopowa uwzględnia najmniejsze elementy mikrostruktury laminatu w postaci reprezentatywnego elementu objętości (RVE), przedstawionego na Rys. 28 b). Z powodu dużej pracochłonności i małej wydajności, modele w skali mikro nie są wykorzystywane w obliczeniach konstrukcji inżynierskich o dużych rozmiarach [41].

Kompromis pomiędzy dokładnością mikrostruktury, a wydajnością numeryczną i prostotą modelu makroskalowego stanowi model w mezoskali. Model ten upraszcza mikrostrukturę na poziomie zbrojenie - osnowa, co przedstawia Rys. 28 c) . W modelu tym ekstrahowana jest "powtarzalna komórka elementarna" (z ang. RUC), która stanowi najmniejszy element mikrostruktury laminatu [41]. Model ten bazuje na odwzorowaniu zbrojenia i fazy ciągłej w postaci pojedynczych elementów. Mogą one być przedstawione zarówno w postaci jednowymiarowych elementów typu belka [44], jak i postaci powłokowo-belkowych [40]. Opisane powyżej badania, wykazały bardzo dobrą zgodność modeli z wynikami badań eksperymentalnych, jednak konieczność wielokrotnej replikacji komórki elementarnej powoduje, że podejście to nie znajduje na chwilę obecną powszechnego zastosowania w środowisku inżynierskim.

Zaprezentowany w niniejszej pracy model do analizy skutków uderzeń kątowych, najbliższej skorelowany jest z podejściem makroskopowym. Jest on jednak znacznie uszczegółowiony poprzez zamodelowanie każdej pojedynczej warstwy kompozytu jako osobnej warstwy elementów bryłowych. Elementy tworzące każdą warstwę są jednorodne, o wynikowych parametrach wytrzymałościowych, jednak każda warstwa ukierunkowana jest w odpowiednią stronę w celu odwzorowania rzeczywistego kierunku włókien w warstwach.

Jest to istotne w przypadku lamin kierunkowych lub tkanych niesymetrycznie, natomiast w przypadku lamin opartych na cząstkach dyspersyjnych rozdział warstw pod kątem kierunkowości traci sens.

Przebieg analizy MES dotyczący symulacji uderzenia pocisku o niskiej prędkości w próbkę kompozytową szczegółowo opisany został przez Heimbs et al. w [83].

Wyodrębnione w niej zostały współczynniki, które mają istotny wpływ na wyniki symulacji, należą do nich:

- wielkość elementu skończonego,
- liczba warstw powłokowych w przypadku modelu opartego na powłokach,
- wpływ sztywności kontaktu,
- tłumienie, wpływające na rozpraszanie energii,
- typ elementów powłokowych,
- rodzaj przyjętego modelu materiałowego dla laminatu,
- właściwości tworzywa,
- parametry delaminacji w opcjach kontaktu.

Powyższe zalecenia uwzględnione zostały w fazie przygotowania modelu do analiz omawianego w niniejszej pracy problemu badawczego.

7.3.1. Narzędzie do analizy MES

Do przygotowania modelu oraz przeprowadzenia symulacji wykorzystany został pakiet oprogramowania firmy Livermore Software Technology Corp, LSTC w skład którego wchodzi m.in.: LS-DYNA oraz LS-PrePost. Program ten służy do przeprowadzania analizy zjawisk szybkozmiennych wykorzystując metodę elementów skończonych.

Zasada działania oparta jest na wysoce nieliniowej, przejściowej, dynamicznej analizie elementów skończonych z wykorzystaniem jawnej integracji w czasie. Nieliniowość analizy wynika m.in. z występujących zmian warunków brzegowych, takich jak kontakt pomiędzy elementami zmieniający się w czasie lub użycia nieliniowych modeli materiałów.

8. Przebieg badań laboratoryjnych

Celem wykonanych badań laboratoryjnych było przeprowadzenie testów stanowiskowych pozwalających oszacować wpływ określonych w tezie czynników na odporność osłon na uszkodzenia. Ponadto, rezultat badań laboratoryjnych stanowił podstawę do weryfikacji i strojenia modelu numerycznego. W związku z tym, w celu otrzymania wiarygodnych wyników, biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z liczby dostępnych próbek, zdecydowano się zaplanować eksperyment.

8.1. Planowanie eksperymentu

Na podstawie wcześniejszych założeń oraz zdefiniowanej tezy badawczej, wytypowane zostały 3 czynniki podlegające weryfikacji podczas przeprowadzanych badań laboratoryjnych. Zaliczone do nich zostały:

1. Wysokość współczynnika tarcia pomiędzy elementem uderzającym, a warstwą zewnętrzną próbki.
2. Kierunek uderzenia względem kierunku największej sztywności warstw ulegających zniszczeniu (anizotropia).
3. Zdolność materiału do tłumienia energii oparta na współczynniku restytucji.

Łączna liczba wariantów próbek odwzorowujących powyższe czynniki jest duża i wynosi 8, przygotowanie tak dużej liczby próbek w celu umożliwienia przeprowadzenia kilku serii badań jest drogie, a proces eksperymentu skomplikowany. Zdecydowano zatem o przeprowadzeniu planowania eksperymentu, co spowodowało, że uzyskane zostały wyniki, które mają słuszność ze statystycznego punktu widzenia.

W związku z tym zaplanowano doświadczenie czynnikowe $2 \times 2 \times 2$ w którym każdy z trzech czynników a, b i c występuje w dwóch poziomach 0 i 1. Zestawienie poziomu wszystkich czynników daje $2 \times 2 \times 2 = 2^3$ kombinacji, co można przedstawić za pomocą uporządkowania Yatesa [97]:

1. 000 lub a0b0c0.
2. 100 lub a1b0c0.
3. 010 lub a0b1c0.
4. 110 lub a1b1c0.
5. 001 lub a0b0c1.
6. 101 lub a1b0c1.
7. 011 lub a0b1c1.

8. 111 lub a1b1c1.

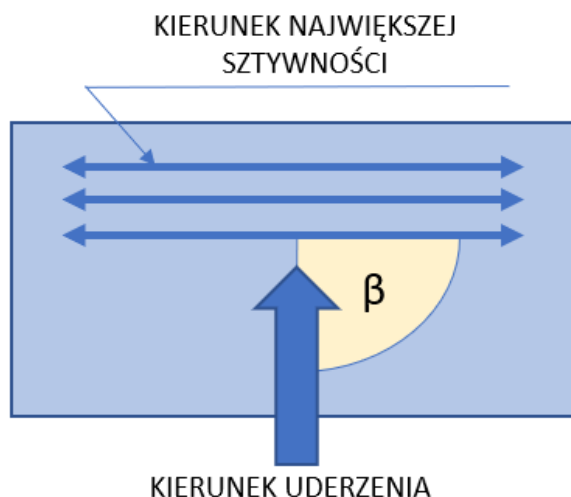
Jako czynnik "a" przyjęto wartość współczynnika tarcia pomiędzy elementem uderzającym, a warstwą zewnętrzną próbki. W celu zbadania jego wpływu na wynik eksperymentu przyjęto:

- a0: niski współczynnik tarcia,
- a1: wysoki współczynnik tarcia.

Czynnik oznaczony jako "b", określa kierunek uderzenia względem kierunku największej sztywności warstw ulegających uszkodzeniu. Oznaczono je następująco:

- b0: $\beta = 0^\circ$,
- b1: $\beta = 90^\circ$.

Kąt β przedstawiony został na Rys. 29. W zaprezentowanym przypadku, kąt wynosi 90° zatem odpowiada wariantowi b1.



Rysunek 29: Prezentacja kąta β określającego kierunek główny sztywności warstw zewnętrznych próbki względem kierunku uderzenia, w przedstawionym przypadku $\beta = 90^\circ$

Ostatni czynnik określa zdolność materiału do tłumienia energii uderzenia i oznaczony został jako "c". Jego podział dokonany został według wartości współczynnika restytucji jaki charakteryzuje odpowiednie grupy próbek. Wyznaczenie ich wartości przedstawione zostało w rozdziale 8.3.1. Czynnik przyjmuje następujący podział:

- c0: niższy współczynnik restytucji,
- c1: wyższy współczynnik restytucji.

Symbol	Współczynnik tarcia "F"		Kąt uderzenia β		Współczynnik restytucji "R"	
	niski	wysoki	0°	90°	niższy	wyższy
000	x		x		x	
001	x		x			x
010	x			x	x	
011	x			x		x
100		x	x		x	
101		x	x			x
110		x		x	x	
111		x		x		x

Tabela 1: Oznaczenie próbek opisujące występujących czynników

Łączna liczba kombinacji wariantów próbek, przedstawiona została w Tab. 1. Każdy wariant, posiadający odpowiedni poziom każdego z 3 czynników, określony został w dalszej części rozprawy w formie zapisu 3 cyfr: 0 lub 1 symbolizujących wystąpienie danego czynnika lub nie.

Przyjęty format ma postać: ***. Przykładowe oznaczenie kodowe: 010 oznacza, że próbka posiada następujące właściwości:

- czynnik "a" występuje w stanie a0, co oznacza próbkę o niskim współczynniku tarcia,
- czynnik "b" występuje w stanie b1, czyli kąt uderzenia $\beta = 90^\circ$,
- czynnik "c" występuje w stanie c0, o oznacza próbkę o niższym współczynniku restytucji.

Powyższy układ czynników odpowiada wariantowi próbki o niskim współczynniku tarcia i rdzeniu o niższym współczynniku restytucji, w której główny kierunek sztywności warstw zewnętrznych skierowany jest w kierunku poprzecznym do osi uderzenia.

8.2. Przygotowanie badań - próbki

Po zaplanowaniu eksperymentu, kolejnym krokiem w badaniach było fizyczne przygotowanie próbek do badań. Do ich budowy wykorzystano tkaniny kierunkowe wykonane z włókien lnianych FlaxDry UD180, a jako matrycę wykorzystano żywicę epoksydową "R&G Epoxy Resin L", wraz z utwardzaczem GL2. Parametry mieszanki żywicznej przedstawione zostały w Tab. 2. Właściwości wynikowe tworzywa utworzonego poprzez połączenie wspomnianych włókien lnianych oraz mieszanki żywicznej przedstawia Tab. 3.

Próbki składają się z 6 warstw zbrojenia w następującym układzie: [0,+20,-20,-70,90,+60]. Jako metodę laminowania wykorzystano metodę próżniowej infuzji żywicy, będącą rozwinięciem metody worka próżniowego. Dzięki odpowiedniemu ułożeniu warstw uzyskano

Parametr	Jednostka	Wartość
Gęstość	g/cm ³	1,2
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	74,8
Wydłużenie przy zerwaniu	%	4,5
Moduł Younga	MPa	3057,0
Wytrzymałość na zginanie	MPa	119,0

Tabela 2: Własności tworzywa osnowy

materiał kompozytowy zgodny z założeniami względem kierunku włókien w odpowiednich warstwach zewnętrznych. Skuteczny rozptył żywicy zapewniony został przez siatkę do infuzji z folią perforowaną.

Każda próbka opisana została w postaci trzycyfrowego kodowania X1.X2.X3, gdzie X1 oznacza numer worka próżniowego, w którym znajdował się panel, X2 oznacza numer panelu w danym worku, X3 określa numer próbki w panelu. Numeracja jest o tyle ważna, gdyż próbki z worka próżniowego X1=1 oraz X1=2 charakteryzują się wyższą chropowatością warstwy zewnętrznej, a tym samym wyższym współczynnikiem tarcia, co wykorzystano podczas późniejszych badań stanowiskowych. Próbki z worka X1=3 oraz X1=4 posiadają gładką powierzchnię zewnętrzną.

Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Gęstość	ρ	kg/m ³	1225,0
Moduł Younga wzdłużny	E1	GPa	35,0
Moduł Younga poprzeczny	E2	GPa	4,7
Moduł Younga prostopadły	E3	GPa	4,7
Moduł odkształcenia postaciowego	G12	GPa	4,5
Wytrzymałość wzdłużna na ściskanie	XC	MPa	318,0
Wytrzymałość wzdłużna na rozciąganie	XT	MPa	1791,1
Wytrzymałość poprzeczna na ściskanie	YC	MPa	158,9
Wytrzymałość poprzeczna na rozciąganie	YT	MPa	22,6
Wytrzymałość na ścinanie	SC	MPa	71,8

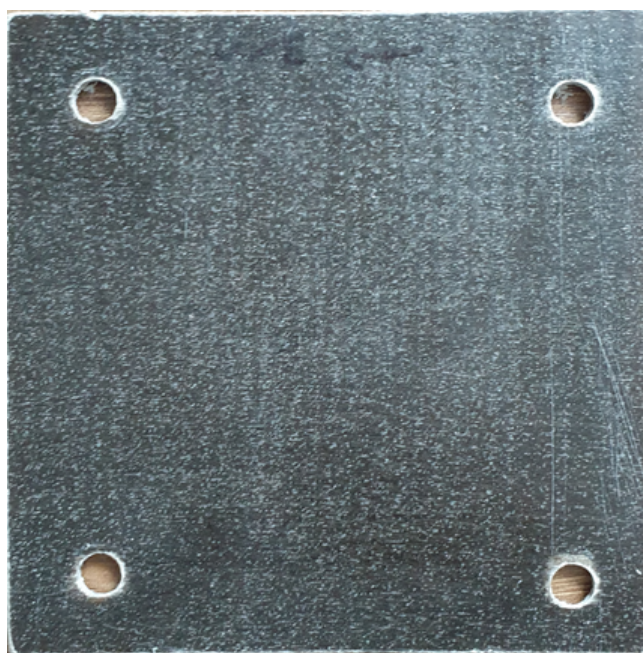
Tabela 3: Parametry laminatu kompozytowego uzyskanego po połączeniu włókien lnianych i mieszanki żywicy

Cały proces tworzenia próbek podzielony został na etapy, przez pierwszą godzinę następowało odpowietrzanie kompozytu z podgrzaniem do 30°, następnie przesykanie kompozytu bez grzania. Kolejnym etapem było ustabilizowanie podciśnienia na poziomie 0,6 bar oraz utrzymywanie tego stanu przez 24 godziny w 17° [48].

Po odłączeniu podciśnienia czas oczekiwania przed rozformowaniem wyniósł 24h. W związku z faktem, że laminowanie włókien naturalnych należy do rzadkości, zaobserwować można było kilka ciekawych zjawisk i odstępstw od standardowych procedur, takich jak brak możliwości podgrzewania kompozytów podczas zasysania żywicy i utwardzania,

z powodu wrzenia cząstek wody zaabsorbowanych we włóknach lnianych. Kolejnym wymogiem była konieczność obniżenia podciśnienia po zassaniu żywicy w celu osiągnięcia niskiej porowatości.

Pojedyncza próbka ma wymiary 120 x 120 mm +/- 0,8 mm oraz grubość 2,1 mm. W narożnikach próbek wykonano otwory montażowe. Otwory te umożliwiły połączenie próbek z rdzeniem piankowym oraz późniejsze osadzenie i mocowanie próbek w stanowisku badawczym.



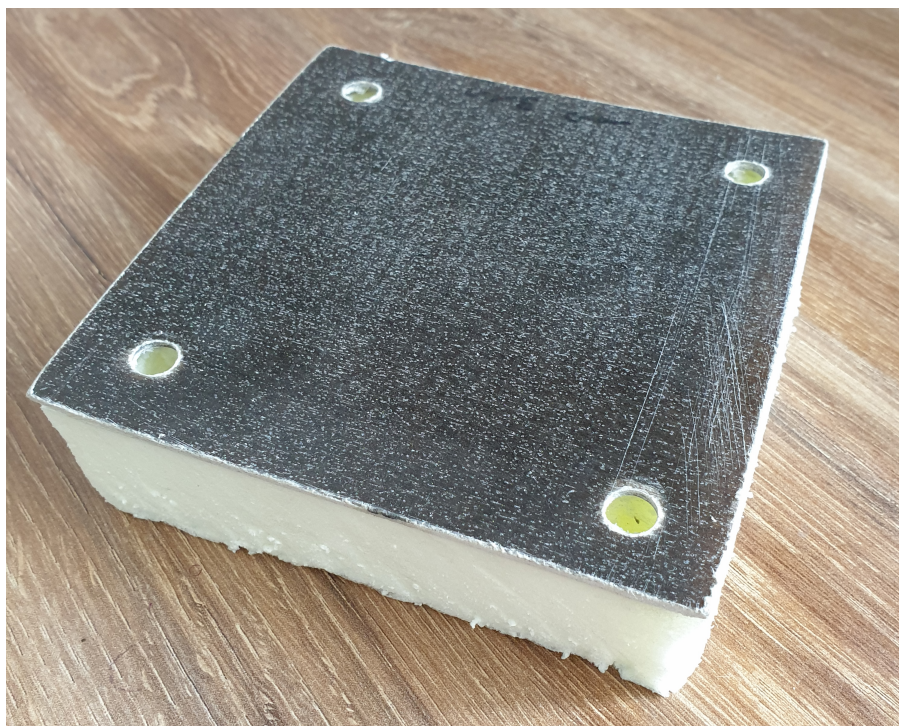
Rysunek 30: Próbka kompozytowa do badań

Każda laminowana próbka została połączona z warstwą nadającą odpowiednią sztywność. Użyto w tym celu dwóch materiałów powszechnie dostępnych na rynku tj. polistyrenu ekspandowanego EPS80 oraz polistyrenu ekstrudowanego XPS, o własnościach opisanych w Tab. 4. Wartości modułu Younga odczytane zostały z wykresu modułu w funkcji gęstości tworzywa, przedstawionego szczegółowo w artykule [89].

	Jednostka	EPS80	XPS
Gęstość	kg/m ³	15	35
Moduł Younga	MPa	3	11

Tabela 4: Parametry tworzyw użytych jako rdzeń

Z powodu ograniczeń technologicznych i konieczności swobody w dobieraniu właściwych parametrów materiałowych, rdzeń nie był sklejonny trwale z laminatem, natomiast próbki były skręcane na stanowisku badawczym do interfejsu trzymającego. Szczegóły montażu można zobaczyć na Rys. 27. W celu uniknięcia deformacji próbki podczas skręcania, każda śruba przykręcona była na odpowiednią wartość momentu, tj. 15 Nm z użyciem klucza dynamometrycznego. Próbkę laminowaną z warstwą wypełniacza przedstawiono na Rys. 31.



Rysunek 31: Próbka kompozytowa z rdzeniem XPS

8.3. Badania eksperymentalne

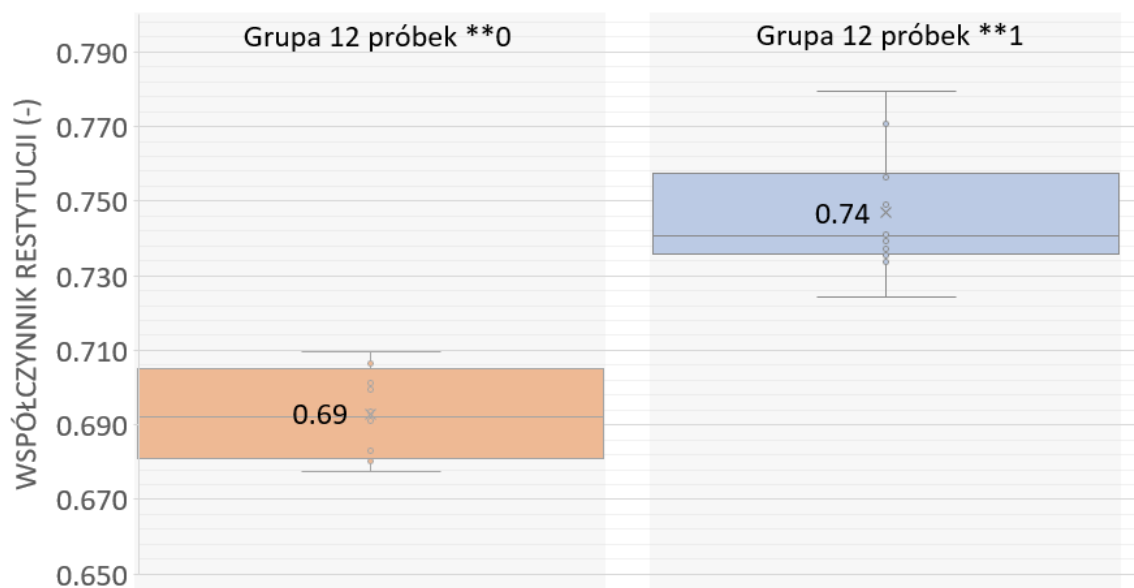
8.3.1. Wyznaczanie współczynnika restytucji

W celu przeprowadzenia badań stanowiskowych służących do wyznaczenia współczynnika restytucji podzielono uprzednio przygotowane 24 próbki według rodzaju rdzenia imitującego wypełnienie konstrukcji przekładkowej w przypadku struktury typu sandwich. Próbki podzielone zostały zgodnie z nazewnictwem wynikającym z rozdziału 8.1 na 2 grupy:

- **0 - rdzeń EPS80,
- **1 - rdzeń XPS.

Przed przeprowadzeniem testów, stanowisko badawcze zostało wypoziomowane oraz skalibrowane za pomocą próbki ceramicznej o określonych w normie [1] parametrach. Po pomyślnie przeprowadzonym procesie kalibracji przystąpiono do testów stanowiskowych docelowych próbek. W celu minimalizacji błędów pomiarowych oraz ewentualnego wpływu czynników zewnętrznych, każda z 24 próbek weryfikowana była dwukrotnie. Wyliczono średnią arytmetyczną wartości współczynnika odbicia dla każdej próbki, a dane przedstawiono w postaci wykresu skrzynkowego, przedstawionego na Rys. 32.

Wykres reprezentujący wartości współczynnika restytucji dla próbek grupy **0 wykazał dużą symetryczność oraz bliskość mediany: 0,693 do wartości średniej arytmetycznej: 0,692. Inaczej wyglądała sytuacja w grupie **1, gdzie wartość średnia: 0,749 (szara linia



Rysunek 32: Wykres skrzynkowy prezentujący rozkład wyników pomiarów współczynnika restytucji dla 24 próbek. Widoczny podział na 2 grupy w zależności od rodzaju rdzenia (**0, **1)

wewnątrz niebieskiej skrzynki) była oddalona od mediany: 0,740. Rozstęp, reprezentowany na wykresie przez poziome odcinki zamykające wykres skrzynkowy, dla grupy **1 przyjął wartość 0,022, co świadczy o stosunkowo dużej rozpiętości wyników.

	Wartość współczynnika "R"
Grupa próbek **0	0,69
Grupa próbek **1	0,74

Tabela 5: Wartość współczynnika restytucji "R" dla obu grup próbek

Na podstawie powyższych informacji obliczono różnicę procentową pomiędzy średnimi obu grup próbek, która wyniosła ok. 7%.

W celu statystycznej weryfikacji istotności wyników przeprowadzono test t-Studenta, który potwierdził istotność różnic pomiędzy obiema badanymi grupami próbek na poziomie $p < 0,001$. Potwierdziło to istotny wpływ rodzaju zastosowanego rdzenia na wartość współczynnika restytucji.

Wartości współczynnika restytucji przyjęte do przeprowadzenia symulacji przedstawione zostały w Tab. 5.

8.3.2. Badanie odporności na uderzenia

W celu weryfikacji odporności osłon na uderzenia, przeprowadzono testy na przygotowanym autorsko stanowisku badawczym.

Proces rozpoczęto od wypoziomowania urządzenia oraz weryfikacji skuteczność działania wszystkich zaworów. W kolejnym kroku wyregulowano ramę pomocniczą trzymającą

próbkę w celu ustawienia kąta uderzenia $\alpha = 8^\circ$, zgodnie z modelem fenomenologicznym.

Następnie, po zamontowaniu próbki testowej w stanowisku i załadowaniu pocisku, ustalono na podstawie testów wartość ciśnienia w zbiorniku głównym, które konieczne jest do wystrzelenia pocisku z odpowiednią szybkością, tj. 60 m/s. Zamontowaną próbkę w stanowisku badawczym przedstawia Rys. 27.

Ustalona wartość ciśnienia konieczna do osiągnięcia odpowiedniej energii uderzenia wyniosła 3,5 bar. W celu powtarzalności wyników taka wartość ustawiona została na reduktorze sprężarki zasilającej układ. Nie mniej jednak podczas testów stwierdzono konieczność powtarzania kalibracji stanowiska co każde 8 oddanych strzałów. Temperatura otoczenia w jakiej odbywały się testy wynosiła $+20^\circ C$.

Próbki przygotowano i posegregowano według wytycznych wynikających z planu eksperymentu opisanego w Rozdz. 8.1, łącznie przetestowano 24 płytki kompozytowe. Każdy z 8 wariantów próbek o różnych kombinacjach wartości czynników "a", "b", "c" przygotowany był w 3 sztukach. Następnie dokonano równomiernego rozłożenia próbek w 3 blokach, tak aby w ramach jednego bloku przetestowane zostały wszystkie warianty po jednym razie. Każdy blok oznaczał jedną serię prób na stanowisku. W celu wyeliminowania wpływu potencjalnej niejednorodności materiału próbek, do każdej próby kierowano próbki z różnych paneli opisanych w Rozdz. 8.2.

8.3.3. Wyniki badań odporności na uderzenia

W celu wizualizacji wyników, w treści rozprawy przedstawiony został jeden przykład uszkodzonej próbki z każdego wariantu, natomiast ilościowy opis wszystkich próbek w postaci wyników pomiarów powstałych uszkodzeń przedstawiony został w Tab. 6.

Rozmiar każdego powstałego uszkodzenia został określony dzięki pomiarom jego pola powierzchni oraz głębokości. Głębokość uszkodzenia została zmierzona za pomocą czujnika zegarowego i oznaczała maksymalną zmierzoną wartość.

Stąd, wyliczona na jej podstawie objętość jest objętością teoretyczną, służącą do porównywania obszarów uszkodzeń pomiędzy próbkami i próbami oraz przeprowadzenia analiz statystycznych.

Na podstawie analizy uszkodzeń powstałych na przebadanych próbkach, wyciągnięto wstępne wnioski dotyczące zależności pomiędzy występowaniem odpowiedniego czynnika, a odpornością osłony na uszkodzenia warstw zewnętrznych. Szczegółowe analizy przeprowadzono po podziale próbek według odpowiednich współczynników. Zostały one opisane w rozdziałach 8.3.4, 8.3.5, 8.3.6.

Całość zakończona została statystycznym badaniem istotności wpływu każdego z czynników na wyniki.

Analiza wyników zaprezentowanych w Tab. 6 pozwoliła zaobserwować dużą różnorodność zakresów uszkodzeń. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że występują warianty, które zasadniczo różnią się wynikiem w ramach tego samego typu próbek. Świadczy to o występowaniu dodatkowych, niezależnych czynników zewnętrznych, które nie są do przewidzenia w czasie trwania testów. Zaliczyć można do nich m.in. niewielkie odchylenie osi pocisku względem próbki, wynikające z faktu braku gwintowania lufy, co możliwe powo-

dować dodatkowe ruchy pocisku w czasie lotu. Jako kolejny niezależny czynnik można przyjąć niewielkie różnice w szybkości pocisku lub minimalne różnice wynikające z pozycji próbek po demontażu i montażu kolejnej sztuki w stanowisku badawczym, wynikające z tolerancji wykonania elementów.

Powtarzalność wyników dla próbek z grup 000, 010, 100 oraz 110 świadczy o ich małej wrażliwości na czynniki zewnętrzne, próbki w ramach przedstawionych grup prezentują bardzo zbliżone obszary uszkodzeń. Wszystkie ze wspomnianych próbek oparte są na rdzeniu o niższym współczynniku restytucji, co pozwala wysnuć wniosek, że rodzaj rdzenia wpływa nie tylko na zakres powstałego uszkodzenia, ale także wrażliwość na czynniki zewnętrzne. W przypadku rdzenia o wyższym współczynniku restytucji, drobna zmiana warunków powoduje znaczny wzrost zakresu powstałych uszkodzeń. Świadczy o tym występowanie w każdym z tych przypadków co najmniej jednej próbki, w której nie doszło do całkowitej perforacji laminatu oraz drugiej, która uległa całkowitej degradacji. W przypadku jednej próbki o oznaczeniu 001 wystąpiło pęknięcie rozchodzące się od osi uderzenia pocisku i przechodzące przez osie otworów montażowych, co zdyskwalifikowało próbkę z uwagi na całkowitą destrukcję. Prawdopodobnie występowała wada materiałowa, która przyczyniła się do powstania tego typu uszkodzenia.

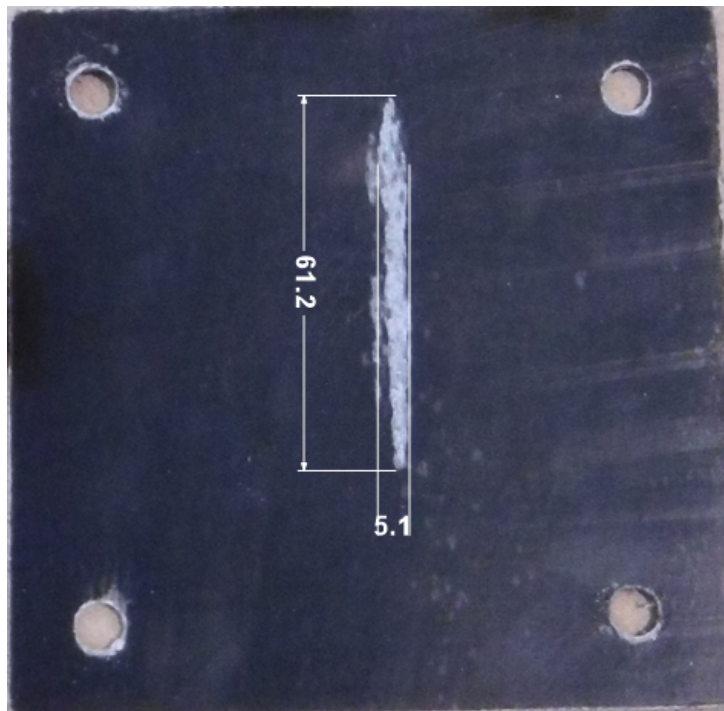
Nieco odmiennie wyglądają uszkodzenia zaobserwowane w próbkach grup 101 oraz 111, których przykład przedstawia Rys. 38 oraz Rys. 40. Próbki te oparte są na sztywnym rdzeniu oraz posiadają wyższy współczynnik tarcia. W tym wypadku zauważyć można kształt uszkodzenia przypominający literę "V", a ponadto, w przypadku obu próbek w końcowej części nastąpiła całkowita penetracja.

Wspomniana różnorodność wyników może pochodzić z różnic w jakości materiałów. W przypadku materiałów kompozytowych laminowanych, nie istnieje bowiem powtarzalność znana z tworzyw takich jak metal.

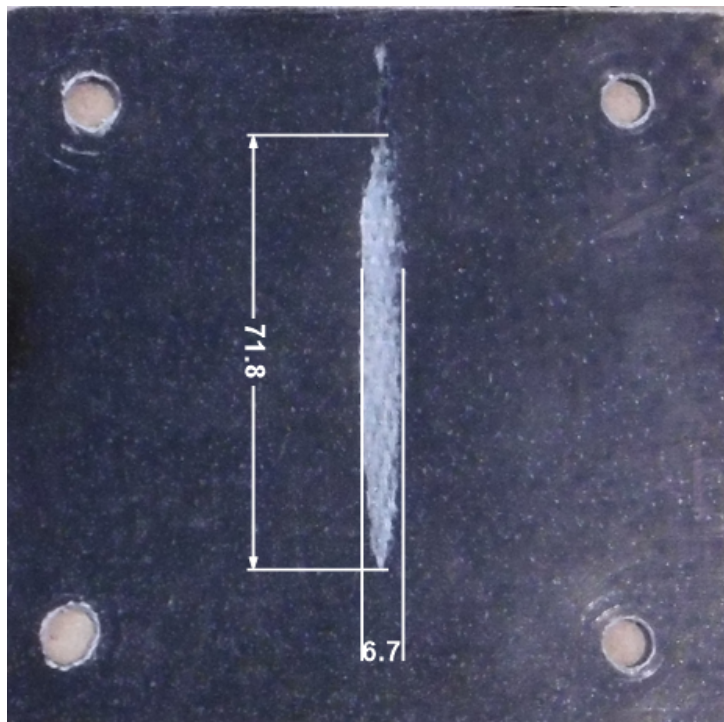
Dokonana analiza głębokości uszkodzeń pozwoliła wytypować warianty o największym uszkodzeniu w głąb materiału. Nie uwzględniając przypadków całkowitej destrukcji, największe głębokości zaobserwowano w przypadku uszkodzeń próbek z grupy 001, 011 i 101. Na tej podstawie można przypuszczać, że taka kombinacja parametrów powoduje największą głębokość penetracji. Wszystkie warianty łączy taki sam typ rdzenia, natomiast różnicuje współczynnik tarcia i kąt uderzenia.

W przypadku próbek z grup 000, 010 oraz 110 zauważono dużą zbieżność wyników, co potwierdziło, że próbki o rdzeniu o niższym współczynniku restytucji są mniej narażone na działanie niezamierzonych czynników zewnętrznych. Ponadto, pomiar głębokości próbek wykazał, że najmniejsza zmierzona głębokość uszkodzenia wystąpiła w przypadku próbki 000 i wyniosła 0,1 mm. W parze z najmniejszą głębokością, próbki tej grupy posiadają również najmniejsze powierzchnie powstałych uszkodzeń, co świadczy o tym, że układ czynników charakteryzujących tą grupę próbek zapewnia najlepszą odporność na rozpatrywane uderzenia.

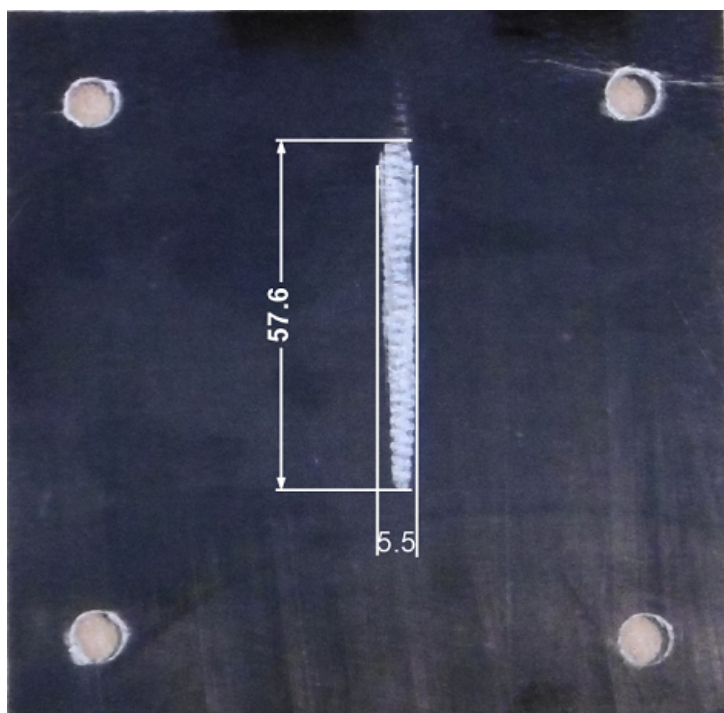
Na podstawie Tab. 6 obliczono średnie objętości uszkodzeń dla każdej z grup próbek. Wartości te posłużyły do porównań powstałych uszkodzeń z rozróżnieniem na czynniki.



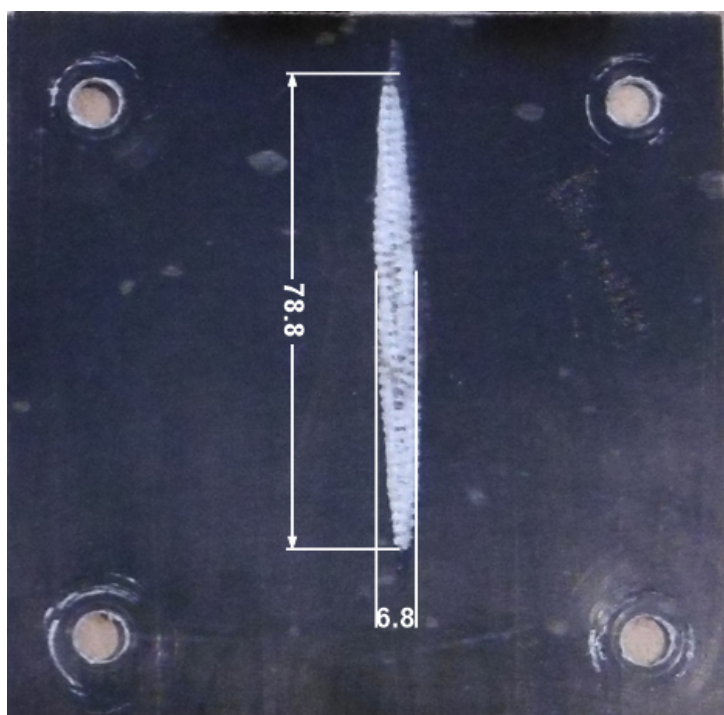
Rysunek 33: Próbką z grupy 000 po uderzeniu



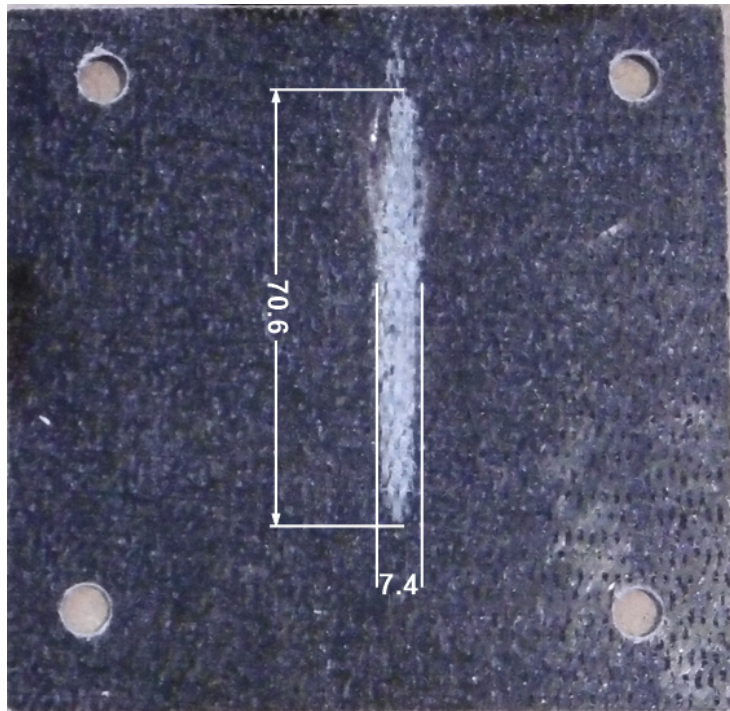
Rysunek 34: Próbką z grupy 001 po uderzeniu



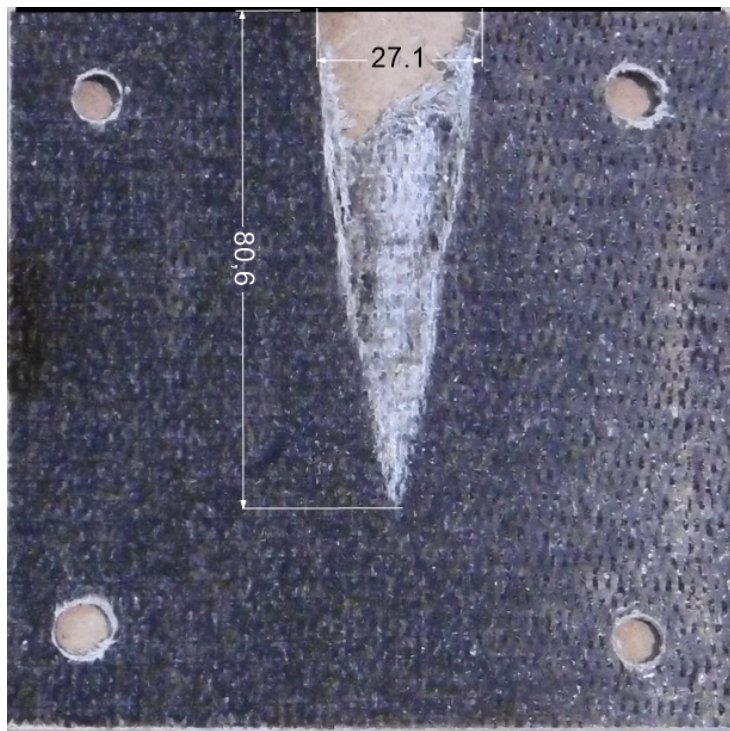
Rysunek 35: Próbka z grupy 010 po uderzeniu



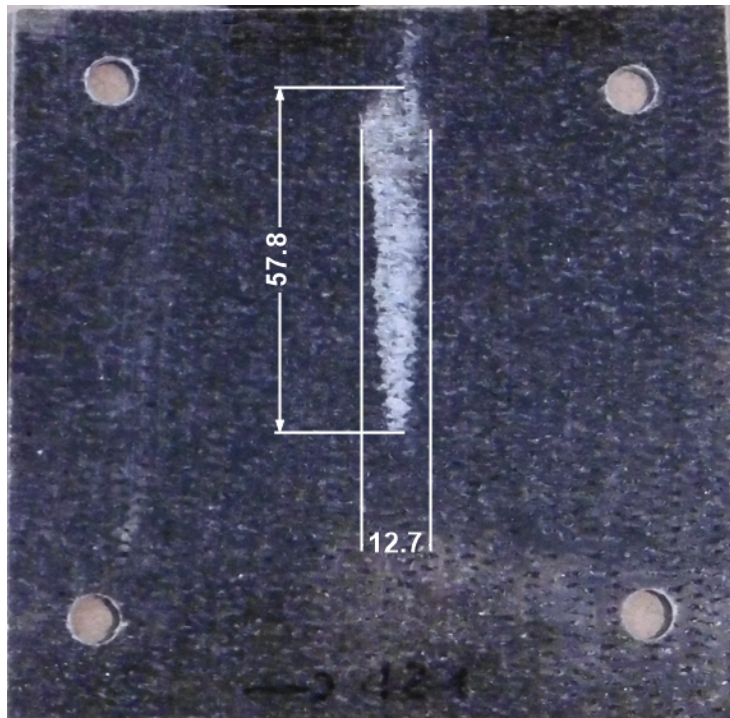
Rysunek 36: Próbka z grupy 011 po uderzeniu



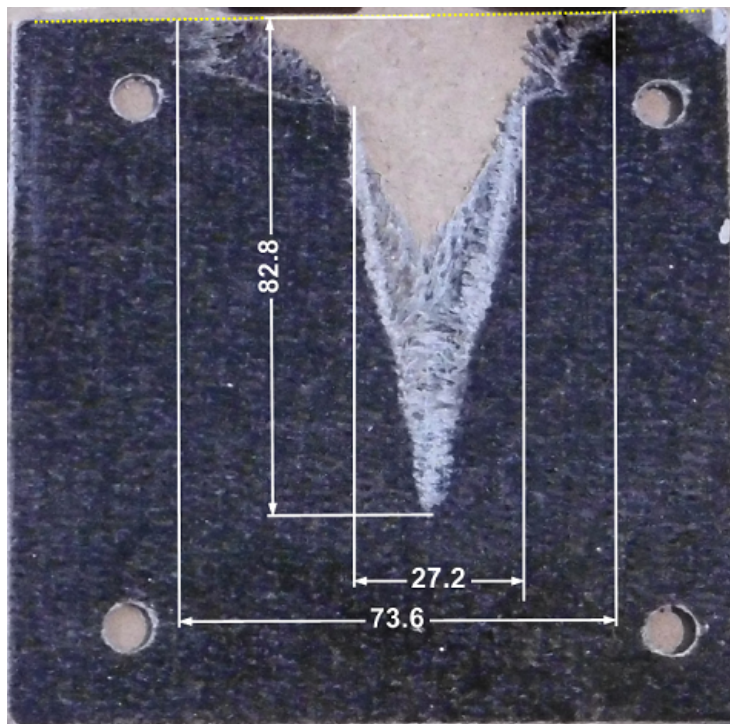
Rysunek 37: Próbką z grupy 100 po uderzeniu



Rysunek 38: Próbką z grupy 101 po uderzeniu



Rysunek 39: Próbką z grupy 110 po uderzeniu



Rysunek 40: Próbką z grupy 111 po uderzeniu

Lp.	Oznaczenie kodowe próbki	Powierzchnia uszkodzenia [mm ²]	Głębokość uszkodzenia [mm]	Objętość uszkodzenia [mm ³]
1)	000	111,0	0,1	11,1
2)	000	221,0	0,2	44,2
3)	000	187,0	0,2	37,4
4)	001	2459,0	Destrukcja	-
5)	001	744,0	0,4	297,6
6)	001	363,0	0,7	254,1
7)	010	236,0	0,5	118,0
8)	010	186,0	0,4	74,4
9)	010	231,0	0,4	92,4
10)	011	997,0	0,4	398,8
11)	011	1761,0	2,1	3698,1
12)	011	391,0	1,3	508,3
13)	100	300,0	0,2	60,0
14)	100	486,0	0,2	97,2
15)	100	380,0	0,5	190,0
16)	101	1327,0	0,3	398,1
17)	101	1087,0	1,5	1630,5
18)	101	386,0	1,2	463,2
19)	110	512,0	0,4	204,8
20)	110	450,0	0,4	180,0
21)	110	521,0	0,4	208,4
22)	111	2251,0	2,1	4727,1
23)	111	675,0	0,5	337,5
24)	111	503,0	0,3	150,9

Tabela 6: Ilościowy opis wyników badań laboratoryjnych w postaci rozmiarów oraz głębokości uszkodzeń

8.3.4. Analiza wpływu współczynnika tarcia na wyniki

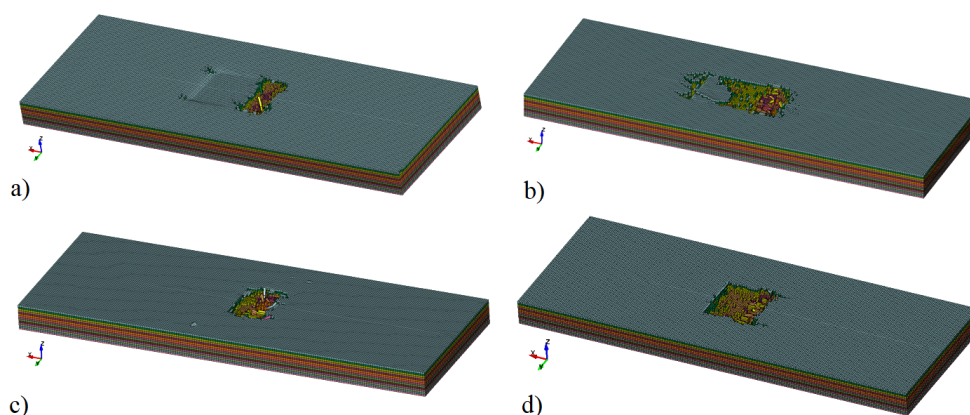
Rozpatrując wpływ współczynnika tarcia na rozmiar powstałego uszkodzenia zauważyć można jego istotny wpływ na wyniki. Rezultat analizy objętości zaobserwowanych w odpowiednich, analogicznych wariantach różniących się wartością współczynnika tarcia, przy takich samych wartościach pozostałych współczynników, przedstawiono w Tab. 7. Wielkość wpływu uzależniona jest od obecności pozostałych czynników, natomiast w przypadku wszystkich kombinacji, uszkodzenia są mniejsze dla wariantu z niższym współczynnikiem tarcia. Największą różnicę zaobserwowano pomiędzy próbkami z grupy 000 i 100, w tym przypadku średnia objętość uszkodzenia zaobserwowana w próbkach grupy 000 jest 73% mniejsza od średniej objętości uszkodzenia próbek z grupy 100. Świadczy to o największym wpływie zmiany wartości współczynnika tarcia w sytuacji, gdy uderzenie jest w kierunku zgodnym z kierunkiem największej sztywności warstw ulegających uszkodzeniu oraz niższym współczynnikiem restytucji.

	Różnica objętości (%)
000 względem 100	73
001 względem 101	67
010 względem 110	52
011 względem 111	12

Tabela 7: Procentowa różnica średniej objętości uszkodzeń próbek różniących się wartością współczynnika tarcia

Obserwacje te pokrywają się z badaniami dotyczącymi wpływu wartości współczynnika tarcia na zakres uszkodzenia opisanymi w materiałach konferencyjnych [58].

Na podstawie załączonego Rys. 41 zaobserwować można, że dla rosnącego kąta uderzenia wpływ współczynnika tarcia na wyniki maleje. W rozpatrywanym przypadku uderzenia pod kątem $\alpha = 8^\circ$ ten wpływ jest wyraźnie zauważalny.



Rysunek 41: Porównanie wyników symulacji uderzenia kąтового dla różnych wartości współczynnika tarcia: a) Kąt uderzenia 30° , $F_S = 0,01$, b) Kąt uderzenia 30° , $F_S = 0,5$, Kąt uderzenia 45° , $F_S = 0,01$, Kąt uderzenia 45° , $F_S = 0,5$ [58]

8.3.5. Analiza wpływu kierunku włókien na wyniki

Zakres wpływu kierunku włókien w warstwie zewnętrznej względem kierunku uderzenia, określono na podstawie analogicznego porównania średnich objętości uszkodzeń wyliczonych dla każdej grupy próbek, jak dokonane to zostało w przypadku tarcia w Rozdz. 8.3.4. Porównanie obejmowało pary grup próbek o zmieniających się wartościach kąta uderzenia " β " przy zachowaniu takich samych wartości pozostałych czynników. Wyniki porównań przedstawione zostały w Tab. 8.

	Różnica objętości (%)
000 względem 010	67
001 względem 011	82
100 względem 110	42
101 względem 111	52

Tabela 8: Procentowa różnica średniej objętości uszkodzeń próbek różniących się kierunkiem ułożenia włókien względem kierunku uderzenia

Na podstawie analizy danych z Tab. 8 stwierdzić można zwiększony obszar uszkodzenia w przypadku próbek o kierunku największej sztywności uszkodzonych warstw prostopadłym do kierunku uderzenia ($\beta = 90^\circ$). Największą różnicę zanotowano dla pary grup próbek 001 i 011. Średnia objętość uszkodzenia próbki z grupy 001 jest o 82% mniejsza, niż średnia objętość uszkodzenia próbki z grupy 011. Obie grupy próbek łączy niska wartość współczynnika tarcia oraz wyższa wartość współczynnika restytucji.

Ponadto, obserwacja obszaru uszkodzenia w przypadku kąta $\beta = 90^\circ$, w niektórych przypadkach wykazała występowanie zjawiska wrywania fragmentów żywicy przez naprężane poprzeczne włókna. Oprócz tego zrywanie oraz ścinanie włókien przyczyniło się do zwiększonego obszaru uszkodzenia. Zjawisko zróżnicowanego poziomu uszkodzeń dla obu przypadków szczegółowo opisał Friedrich K. et al. [46], podczas gdy szczegółowe rozważania na ten temat opisane zostały w [85].

8.3.6. Analiza wpływu tłumienia

Przeprowadzona analiza dotyczyła grup próbek różniących się między sobą wartością współczynnika restytucji.

Dane w Tab. 9, zawierają porównanie średnich objętości uszkodzeń dla par odpowiednich grup próbek. Wnioski wyciągnięte na podstawie zaprezentowanych wyników wykazały wystąpienie pogorszenie odporności wraz ze wzrostem współczynnika restytucji próbki. Zaobserwowane pogorszenie odporności objawia się zwiększonym uszkodzeniem w obu kierunkach w każdym przypadku. Wszystkie pary próbek wykazują bardzo duże zróżnicowanie pod kątem różnicy w średniej objętości zaobserwowanych uszkodzeń. Jednak największa różnica dotyczy pary grup próbek 010 i 011. Średnia objętość uszkodzenia w przypadku grupy 010 jest 94% mniejsza niż w przypadku grupy próbek 011. Próbki te cechuje niski współczynnik tarcia oraz kąt uderzenia $\beta = 90^\circ$.

Z kolei najmniejszą różnicę zaobserwowano pomiędzy parą próbek 100 i 101, które charakteryzują się wysokim współczynnikiem tarcia i kątem uderzenia względem największej sztywności wynoszącym $\beta = 0^\circ$.

	Różnica objętości (%)
000 względem 001	89
010 względem 011	94
100 względem 101	86
110 względem 111	87

Tabela 9: Procentowa różnica średniej objętości uszkodzeń próbek różniących się wartością współczynnika restytucji

Rozszerzone zagadnienie wpływu m.in. sztywności rdzenia na energochłonność osłon opisuje w swoich pracach Kolenda J. [39], a badania eksperymentalne na ten temat przeprowadzone i opublikowane zostały między innymi w publikacjach: [70], [86].

8.3.7. Analiza statystyczna wyników

Analizę przeprowadzono w oparciu o teoretyczny parametr określony jako "Objętość uszkodzenia", będący iloczynem głębokości i powierzchni uszkodzenia, którego wartości przedstawiono w Tab. 6. Jest to parametr teoretyczny, pozwalający na określenie stosunku objętości uszkodzenia pomiędzy próbkami.

Na jego podstawie dokonano statystycznego badania wpływu istotności poszczególnych efektów głównych oraz interakcji na wyniki. W tym celu w pierwszej kolejności dokonano wstępnej analizy wariancji dla przeprowadzonego doświadczenia 2x2x2 założonego metodą bloków kompletnie zrandomizowanych.

Ponieważ wartość funkcji testowej dla kombinacji (między czynnikami) wynosiła więcej niż wartość graniczna odczytana z wykresu, stwierdzona została istotna różnica między kombinacjami z ryzykiem błędu mniejszym niż 1% co pozwoliło na przeprowadzenie badań szczegółowych. Szczegółowa analiza wariancji umożliwiła stwierdzenie, które z siedmiu źródeł zmienności są istotne, a które przypisać można działaniu przyczyn przypadkowych. W tym celu obliczone zostały Sumy kwadratów oraz Średnie kwadraty pomiędzy blokami, oznaczającymi kolejne próby oraz pomiędzy kombinacjami.

Przeprowadzone pod tym kątem analizy wykazały, że źródła zmienności są nieistotne w przypadku: interakcji czynników "b" i "c"; interakcji "a" i "b" i "c"; efektu głównego czynnika "a".

Istotne natomiast przy 1% ryzyku błędu okazały się:

- Efekt główny czynnika "b", informujący, że kierunek uderzenia względem kierunku największej sztywności warstw zewnętrznych, przy przeciętnym poziomie współczynnika restytucji oraz tarcia, istotnie wpływa na zwiększenie zakresu uszkodzenia.

- Interakcja czynników "a" i "b", informująca, że przy przeciętnym poziomie współczynnika restytucji (czynnik "c") efekt działania współczynnika tarcia (czynnik "a") w przypadku uderzeń prostopadłych: $\beta = 90^\circ$ (czynnik "b"), jest istotnie większy, niż w przypadku uderzeń zgodnych z kierunkiem największej sztywności warstw zewnętrznych: $\beta = 0$ (nieobecność "b").
- Interakcja "bc", informująca, że przy przeciętnym poziomie współczynnika tarcia (czynnik "a"), efekt działania kierunku uderzenia względem kierunku największej sztywności warstw zewnętrznych (czynnik "b"), w przypadku próbki o wyższym współczynniku restytucji (czynnik "c") jest istotnie większy, niż w przypadku próbki o niższym współczynniku restytucji (nieobecność "c").

9. Przebieg symulacji numerycznych

Rozpatrywane w niniejszej rozprawie zagadnienie różni się od powszechnie badanych zjawisk, z uwagi na rozpatrywanie bardzo szczególnego przypadku uderzenia, którego kąt wynosi 8° . Pomijając czysto eksperymentalne badania związane z zachowaniem materiałów kompozytowych pod obciążeniem związanym z uderzeniem, rosnące znaczenie w tej dziedzinie inżynierii nabierają metody numeryczne.

Symulacje pozwalają nie tylko na szczegółową analizę rozkładu naprężeń i powstawania uszkodzenia w laminatach w wyniku uderzenia, ale również umożliwiają wydajną analizę parametryczną uwzględniającą geometrię elementów, warunków obciążenia oraz konfiguracji warstw w laminacie. Dla symulacji uderzenia krótkotrwałego, zwykle stosuje się podejście oparte na jawnym schemacie całkowania w czasie, które charakteryzuje się małymi odstępami czasu [83].

W tym celu, opracowano model z użyciem oprogramowania LS-Dyna, a jego dostrojenie przeprowadzono w oparciu o wyniki testów eksperymentalnych, co wpłynęło na zwiększenie dokładności wyników i wiarygodności modelu. Tak opracowany model wykorzystano w dalszej części pracy do analizy innych wariantów uderzenia o zmienionym kącie i prędkości. Pozwoliło to na weryfikację zachowania się próbki w innych, niż przyjęte na początku rozprawy warunkach.

Symulacje przeprowadzone zostały według planu eksperymentu przedstawionego w Rozdz. 8.1, w celu weryfikacji analogicznych wariantów do tych, które poddane zostały testom stanowiskowym.

Do najważniejszych zadań na etapie przeprowadzania pierwszych analiz należało:

- opracowanie postaci konstrukcyjnej i materiałowej,
- dobór odpowiednich kart materiałowych dla odpowiednich części składowych modelu,
- dobór parametrów kontaktu w celu uzyskania stabilności związanej ze zróżnicowanymi materiałami biorącymi udział w symulacji (np. rdzeń z pianki PUR oraz stal),

- dobór czasu trwania symulacji oraz odpowiedniego kroku czasowego,
- dobór rozmiaru i rodzaju siatki w celu osiągnięcia punktu optymalnego pomiędzy dokładnością wyników, a czasem symulacji.

Ponieważ LS Dyna jest oprogramowaniem, w którym użytkownik decyduje o grupie jednostek przyjętych do symulacji, w modelu przyjęto układ jednostek przedstawionych w Tab. 10. Ten układ obowiązuje we wszystkich analizach przeprowadzanych w niniejszej rozprawie.

Masa	Długość	Czas	Siła	Naprężenia	Energia
[g]	[mm]	[ms]	[N]	[MPa]	[Nmm]

Tabela 10: Układ jednostek przyjęty w modelu, zgodnie z wymaganiami programu LS-Dyna

9.1. Budowa modelu MES

Przygotowanie modelu podzielone zostało na etap opracowania postaci konstrukcyjnej i materiałowej próbki oraz elementu uderzającego, w następnej kolejności wybór kryteriów zniszczeń oraz rodzaju kontaktu pomiędzy elementami. Cały proces zakończony został ustawieniem parametrów modelu związanych z krokiem czasowym i klepsydrowaniem, który zapewnił stabilność przeprowadzanych analiz.

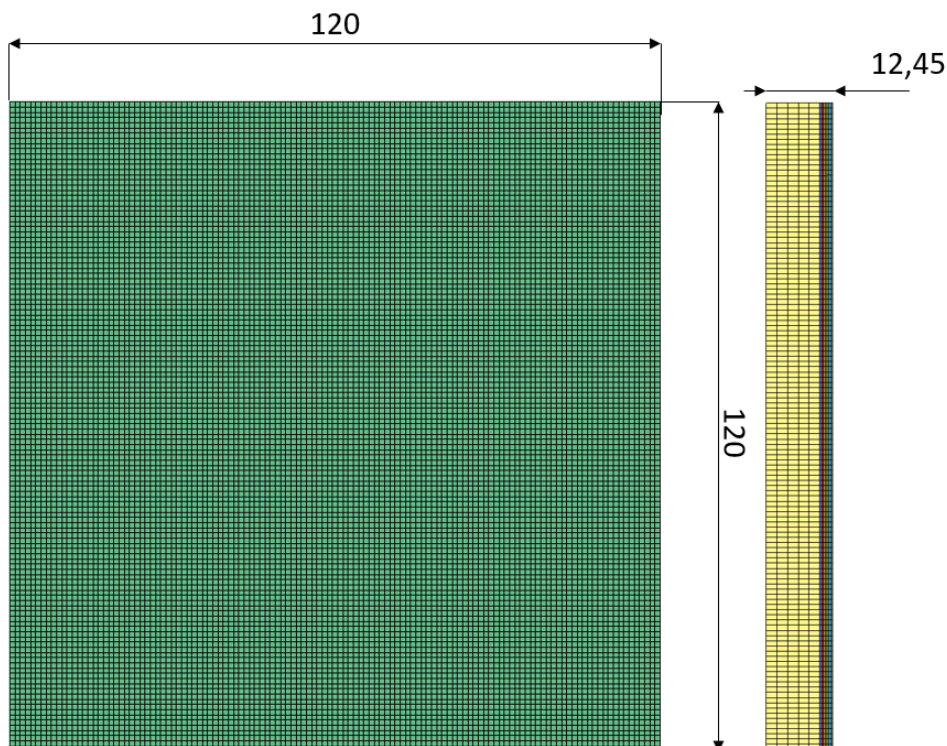
9.1.1. Określenie postaci konstrukcyjnej i materiałowej

Próbka, reprezentująca płytkę kompozytową z badań eksperymentalnych, w modelu zbudowana została z 6 homogenicznych warstw kierunkowych, które odzwierciedlają pojedyncze laminy, czyli warstwy włókien zatopionych w żywicy polimerowej. Wspomniane warstwy tworzą anizotropowy laminat.

Dodatkowo, na laminacie umieszczono pojedynczą warstwę izotropową o właściwościach żywicy nie wzmocnionej włóknami. Podejście to pozwoliło lepiej zwizualizować wyniki uderzenia w przypadku odwzorowania próbek z grupy 000, w których uszkodzenie ma charakter zarysowania, bez uszkodzenia włókien. Ponadto warstwa ta wykorzystana została do wprowadzenia parametrów związanych ze współczynnikiem tarcia pomiędzy elementem uderzającym, a kompozytem.

Od spodu laminatu znajduje się warstwa modelująca rdzeń kompozytu, o znacznej grubości w stosunku do laminatu oraz właściwościach izotropowych. Jej wymiary odpowiadają wymiarom rzeczywistego rdzenia użytego w trakcie testów.

W celu wiernego odwzorowania cech geometrycznych modelu zastosowano podejście bazujące na elementach bryłowych (z ang. solid). Mimo, iż oparcie modelu numerycznego na elementach powłokowych (z ang. shell) pozwoliłoby znacząco usprawnić przebieg obliczeń [54], nie byłoby możliwości tak szczegółowej prezentacji ubytku materiału spowodowanego uszkodzeniem.



Rysunek 42: Model numeryczny próbki w ujęciu makroskopowym wraz z wymiarami gabarytowymi

Zadaniem rdzenia był wpływ na własności tłumiące próbki w zależności od rodzaju zastosowanego materiału tworzącego tą warstwę, zgodnie z zamysłem przyjętym przy tworzeniu planu eksperymentu.

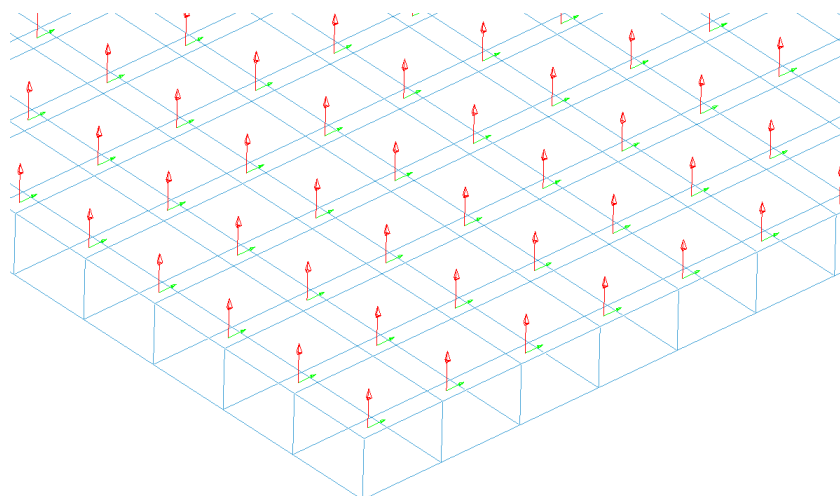
Z bazy dostępnych modeli materiałowych dotyczących kompozytów w LS-Dyna, dla laminatu wybrano liniowo elastyczny model MAT_55 [55]. Dla modelu materiałowego wprowadzono wartości współczynników wytrzymałościowych w oparciu o dane przedstawione w Rozdz. 8.2, a ich wartości przedstawione zostały w Tab. 11.

Gęstość [kg/m ³]	E1 [GPa]	E2 [GPa]	G12 [GPa]	XT [MPa]	XC [MPa]	YT [MPa]	YC [MPa]	SC [MPa]
1225	35	4,7	4,5	1791,1	318,0	22,6	158,9	71,8

Tabela 11: Właściwości homogeniczne kompozytu tworzącego warstwę laminatu

Z uwagi na specyficzną - warstwową budowę materiałów kompozytowych, program umożliwia kilka metod implementacji poprawnego układu warstw do modelu, pozwalając na określenie kierunków zróżnicowanej sztywności i wytrzymałości dla każdej warstwy. W pierwotnym modelu, do budowy układu warstw użyte zostało klasyczne narzędzie do budowy elementów bryłowych, a indywidualne określenie kierunku sztywności w warstwie, zrealizowano określając kierunki główne dla wszystkich elementów skończonych tworzących daną warstwę. Określone kierunki w warstwie zewnętrznej przedstawia Rys. 43. Zielone strzałki prezentują główny kierunek laminy, co odpowiada kierunkowi włókien w

warstwie. W modelu wszystkie warstwy reprezentowane są przez ten sam model materiałowy, ale różnią się pomiędzy sobą kierunkiem głównym, zgodnie z układem warstw przyjętym w Rozdz. 8.2.



Rysunek 43: Układy współrzędnych określające kierunki dla każdego elementu skończonego w pojedynczej laminie

Wybór modelu materiałowego MAT_55, determinowany jest obowiązującym w tym modelu kryterium uszkodzeń, bazującym na kryterium naprężeń określanym od nazwiska autorów jako Tsai-Wu [55]. Kryterium opisane zostało w Rozdz. 4.2.3.

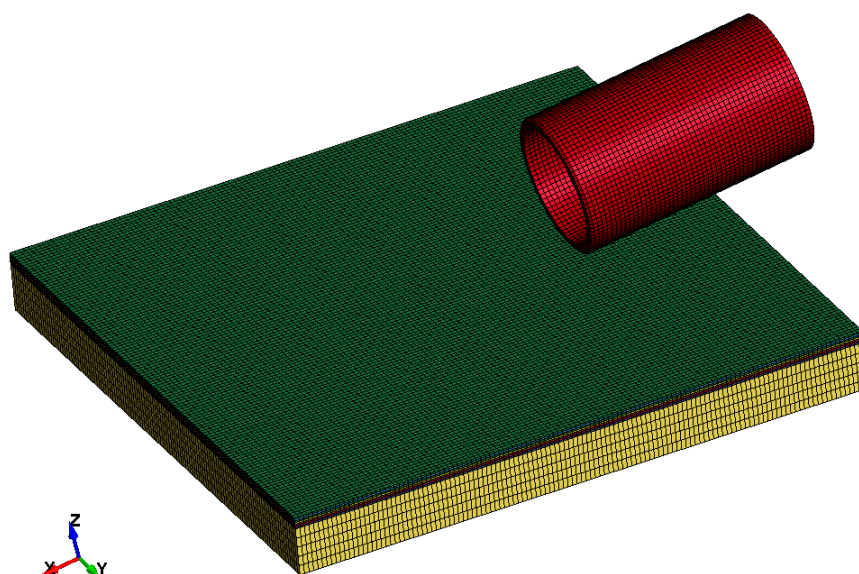
Przyjęty model materiałowy dedykowany jest do anizotropowych materiałów, do których zaliczają się m.in. rozpatrywane w niniejszej rozprawie kompozyty oparte o włókna kierunkowe. Dodatkową zaletą tego materiału jest możliwość wprowadzenia redukcji wytrzymałości węzłów graniczących z elementami, które zostały usunięte na skutek przekroczenia kryterium wytrzymałościowego [55].

W celu symulacji uderzenia próbki zgodnie z kierunkiem głównym sztywności warstw podlegających uszkodzeniu oraz w kierunku poprzecznym, przeprowadzone zostały 2 analizy, zróżnicowane kierunkiem usytuowania elementu uderzającego względem próbki.

Element uderzający został zamodelowany w formie tulei, zgodnie z założeniami przyjętymi w modelu fenomenologicznym. Ciało zostało określone jako sztywne (z ang. rigid) i podobnie jak warstwa odwzorowująca laminat zbudowane zostało z elementów bryłowych. Do zamodelowania elementu uderzającego i jego właściwości wykorzystany został model materiału MAT_020.

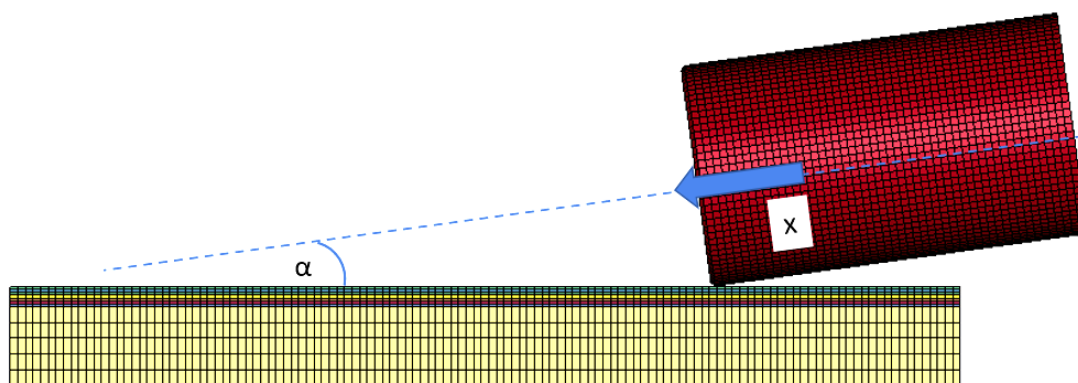
Przybliżone traktowanie ciała odkształcalnego jako sztywne jest preferowaną techniką modelowania w wielu rzeczywistych warunkach [55]. Pozwala to na zaoszczędzenie czasu obliczeniowego z uwagi na pomijanie obliczeń elementów sztywnych i nie rezerwowania przestrzeni na przechowywanie historii zmiennych.

Kąt uderzenia " α " określony został poprzez kierunek, jaki tworzy oś elementu uderzającego w odniesieniu do płaszczyzny powierzchni próbki, a jego wizualizację przedstawia Rys. 45. Oś wyznacza równocześnie kierunek wektora prędkości. W celu osiągnięcia wy-



Rysunek 44: Model odniesienia dla symulacji uderzeń

maganej energii uderzenia oszacowanej na 147 J, przy masie penetratora wynoszącej 81,5 g, ze wzoru na energię kinetyczną wyliczono prędkość, którą powinien poruszać się pocisk: 60 m/s. Taka wartość przypisana została elementowi uderzającemu, a kierunek prędkości określono zgodnie z osią pocisku.



Rysunek 45: Wizualizacja modelu utworzonego do przeprowadzenia symulacji

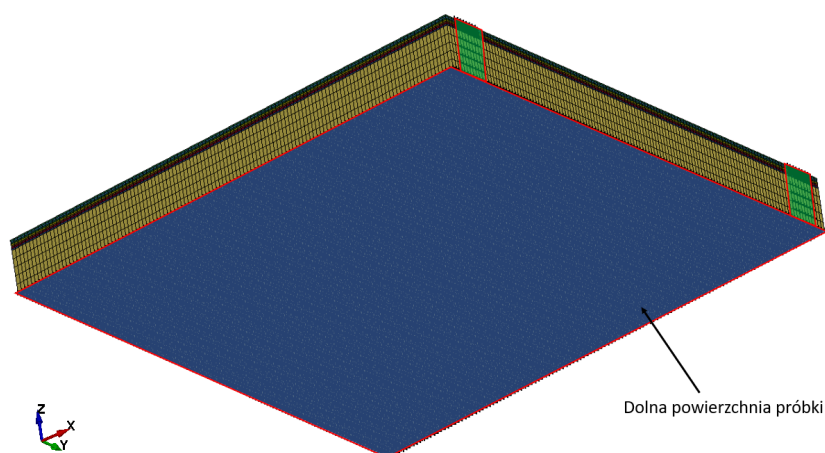
Opracowany model składa się z 201 000 elementów skończonych, w tym 13 500 stanowi elementy sztywne typu rigid. Łączna liczba węzłów w modelu wynosi 319 443. Rozmiar elementu skończonego w postaci długość x szerokość x wysokość, wynosi odpowiednio: 0,96 x 0,96 x 0,35 mm. Jako opcję formułowania elementów przyjęto ELFORM = 1.

9.1.2. Określenie warunków brzegowych

W modelu numerycznym celowo pominięto otwory umożliwiające mocowanie rzeczywistej próbki do stelaża na stanowisku badawczym, z uwagi na założony brak istotnego wpływu na zakres oddziaływania penetratora, w związku z rozpatrywaniem uderzenia jako uderzenie lokalne.

Podczas określania warunków brzegowych, odebrane zostały stopnie swobody na dolnej powierzchni ostatniej warstwy laminatu, w kierunku prostopadłym (z) do powierzchni próbki, co oddawało warunki rzeczywistego montażu próbki w stanowisku badawczym, w którym próbka opiera się o łożo. Powierzchnię tą reprezentuje niebieski obszar zaznaczony na Rys. 46.

Możliwości przemieszczeń próbki w kierunku zgodnym z kierunkiem uderzenia (x), odebrane zostały na przedniej i tylnej ścianie kompozytu, w miejscach, oddalonych od osi symetrii próbki, o wartość równą odległości otworów montażowych w rzeczywistych próbkach. Miejsca te na ścianie przedniej reprezentują zielone obszary zaznaczone na Rys. 46.



Rysunek 46: Warunki brzegowe odzwierciedlające mocowanie próbki

W przypadku elementu uderzającego, ma on odebrane wszystkie stopnie swobody z wyjątkiem ruchu w kierunku wyznaczonym przez oś środkową. Może natomiast odbić się od powierzchni próbki, co odpowiada ruchowi zbliżonemu do rzeczywistego.

9.1.3. Definicja współczynnika tarcia

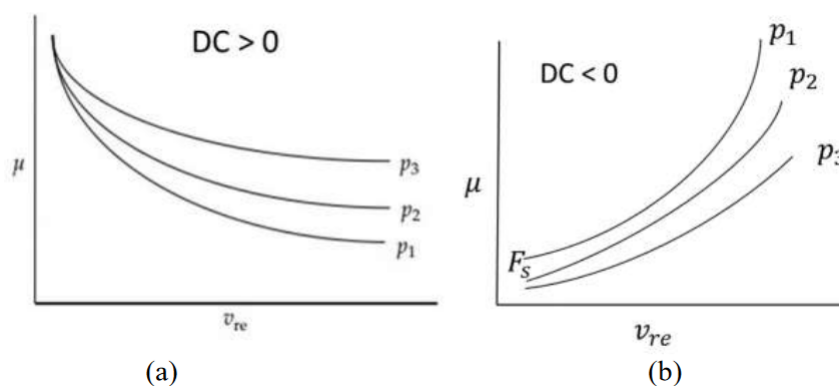
Jako, że jednym z rozpatrywanych w analizie czynników był współczynnik tarcia pomiędzy elementem uderzającym, a warstwą zewnętrzną, wprowadzono go w odpowiednim modelu kontaktu. Jego wartość definiowana jest dla danej pary współpracujących materiałów, jako współczynnik: "FS" – statyczny współczynnik tarcia, oraz "FD" – dynamiczny współczynnik tarcia.

W rozpatrywanym przypadku, całkowite tarcie pomiędzy parą materiałów określone zostało przez wzór [54]:

$$\mu = FD + (FS - FD)e^{-DCv_{rel}} \quad (27)$$

gdzie "FD" - dynamiczny współczynnik tarcia, "FS" - statyczny współczynnik tarcia, "DC" - wykładniczy współczynnik zaniku, określone są matematycznymi parametrami modulującymi współczynnik tarcia.

Zależność pomiędzy współczynnikiem tarcia " μ ", a " v_{rel} ", dla różnych nacisków z dodatnim i ujemnym współczynnikiem DC, przedstawiona została na Rys. 47.



Rysunek 47: Wpływ współczynnika DC na wartość współczynnika tarcia w funkcji różnicy prędkości pomiędzy elementami [54]

9.1.4. Definicja typu kontaktu

Podczas przeprowadzania symulacji, weryfikacji podlegał zakres uszkodzenia warstw zewnętrznych laminatu. Praca wykonana przez penetrator w procesie uszkodzenia erozyjnego laminatu, obok delaminacji, odgrywa ważną rolę w mechanizmie absorbowania energii w uderzeniach niskoenergetycznych. Konieczne w tym celu było zdefiniowanie prawidłowego kontaktu pomiędzy elementem uderzającym, a laminatem oraz pomiędzy poszczególnymi warstwami.

W rozpatrywanym przypadku zastosowano 2 typy kontaktów. Pierwszy z nich: AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE, dotyczył bezpośredniego kontaktu pomiędzy pociskiem, a każdą warstwą kompozytu osobno. Podzielony on został na 8 osobnych kontaktów. Podział taki umożliwił określenie innych parametrów współczynnika tarcia dla warstwy zewnętrznej symulującej np. stan wykończenia powierzchni zewnętrznej. Pozostałe warstwy posiadały jednakową wartość współczynnika tarcia względem elementu uderzającego.

Drugim typem kontaktu był: AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE TIEBREAK. Gwarantował on prawidłowe oddziaływanie pomiędzy warstwami w czasie uderzenia [82]. Ponieważ warstwy w modelu nie zostały połączone ze sobą poprzez łączenie (z ang. merge) węzłów wspólnych, każda warstwa była niezależna. Kontakt typu TIEBREAK zapewnił

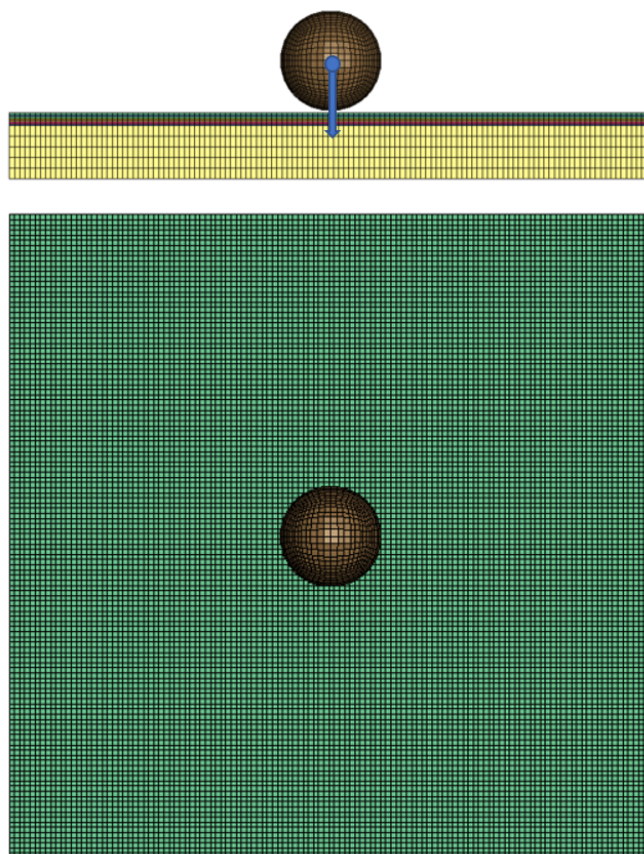
połączenie węzłów sąsiadujących warstw z nadaniem właściwości odpowiadających wytrzymałości żywicy. Odzwierciedlało to rzeczywistą wytrzymałość połączenia na granicy poszczególnych warstw, ponadto umożliwiło wizualizację delaminacji. Kontakt ten nadany został pomiędzy każdą parą pojedynczych warstw - lamin.

9.2. Strojenie modelu MES

Procedura przygotowania modelu wymagała doboru wielu parametrów, których wartości były niemożliwe do określenia na podstawie dostępnych danych materiałowych. Ich dopasowanie nastąpiło w oparciu o wyniki testów rzeczywistych oraz analizę podobnych przypadków w literaturze.

9.2.1. Własności tłumiące układu w modelu numerycznym

Pierwszym elementem podlegającym weryfikacji była zgodność właściwości tłumiących próbki w modelu z wartościami współczynnika restytucji uzyskanymi w wyniku testów stanowiskowych. Wyniki testów eksperymentalnych przedstawione w Rozdz. 8.3.1 umożliwiły łatwą weryfikację zgodności.



Rysunek 48: Model pomocniczy do weryfikacji współczynnika restytucji, strzałka oznacza kierunek działania wektora prędkości przed uderzeniem

Weryfikacja polegała na przygotowaniu modelu pomocniczego, w którym wykorzystano tę samą postać materiałową i konstrukcyjną próbki kompozytowej, która stworzona

została do weryfikacji uszkodzeń w Rozdz. 9.1.1.

Modyfikacja polegała na zamianie elementu uderzającego w kształcie tulei na kulkę stalową odzwierciedlającą kulkę używaną w testach stanowiskowych. Zlokalizowano ją tuż nad powierzchnią zewnętrzną płytki kompozytowej oraz nadano prędkość początkową równą prędkości obliczonej w oparciu o zasadę zachowania energii, na podstawie wzoru nr: 19. Znając wysokość h_2 , z której spadała kulka, w oparciu o wzór nr: 20, obliczono wartość prędkości tuż przed uderzeniem.

Model kulki przygotowany został w postaci sztywnej, nieodkształcalnej bryły typu rigid, ponieważ zweryfikowano, że zastosowane uproszczenie nie powoduje istotnej różnicy w wynikach. Siatka, którą pokryta została kulka, posiada rozmiar zbliżony do rozmiaru elementu skończonego na modelu próbki. Model wraz z zaprezentowanym w postaci niebieskiej strzałki kierunkiem działania wektora prędkości, przedstawiony został na Rys. 48.

Analiza polegała na symulacji upadku kulki na powierzchnię próbki oraz weryfikacji prędkości, którą kulka osiągnęła tuż po zakończonej fazie odbicia. Obliczenie ilorazu tych prędkości pozwoliło na określenie współczynnika restytucji dla rozpatrywanego przypadku na podstawie wzoru nr: 18.

Na podstawie powyższego procesu dostrojono właściwy model w tym zakresie, co pozwoliło zwiększyć zgodność współczynnika restytucji. W tym celu wykorzystano możliwości regulacji tłumienia kontaktu zapewnione przez LS-Dynę. Wykorzystano opcję DAMPING PART MASS SET, określoną przez Heimbs S. et al. w publikacji [83] jako istotnie wpływającą na wyniki symulacji.

Analiza algorytmu wyznaczania tłumienia oraz sztywności kontaktu przez oprogramowanie LS-Dyna, zwróciła uwagę na istotny wpływ typu kontaktu zdefiniowanego pomiędzy elementem uderzającym, a uderzanym.

Na podstawie wniosków opisanych przez Dogan Fatih et al. w publikacji [33] oraz Bala Suri w publikacji [82], przyjęto do analizy 3 typy kontaktów oznaczonych jako SOFT=0, SOFT=1 oraz SOFT=2. Każdy z kontaktów opisany został szczegółowo w [54].

Po przeprowadzeniu analiz wszystkich 3 wariantów, dla rozpatrywanego przypadku, optymalnym okazał się model SOFT=0.

Ten typ kontaktu oparty jest na wykorzystaniu powierzchni styku oraz właściwości materiału do określenia sztywności sprężyny symulującej kontakt i zależy od stałych materiałowych oraz wielkości segmentów [54].

W przypadku SOFT = 0, sztywność kontaktu obliczana jest według wzoru:

$$k = \frac{f_s \cdot A^2 \cdot K}{V} \quad (28)$$

gdzie "A" - obszar kontaktu, "K" - moduł sprężystości, "V" - objętość, $f_s = SLSFAC \cdot SFM$ - w przypadku elementów typu master, $f_s = SLSFAC \cdot SFS$ - w przypadku elementów typu slave, $SLSFAC$ - współczynnik skalujący, SFM oraz SFS - współczynnik skalujący sztywność karną w zależności od typu elementu (slave, master).

Przyjęte wartości kontaktu oraz tłumienia pozwoliły na zbliżenie wartości współczynnika restytucji do wartości odpowiadających wynikom testów stanowiskowych.

9.2.2. Dodatkowe parametry materiałowe

Wybrany typ materiału oznaczony jako MAT_055 "MAT ENHANCED COMPOSITE DAMAGE" zapewnia szereg parametrów optymalizacyjnych, których nie da się bezpośrednio odnieść do danych z kart materiałowych.

W oparciu o wyniki analizy porównawczej uszkodzeń powstałych w trakcie symulacji i badań stanowiskowych, poddano strojeniu następujące parametry: SOFT, FBRT, SOFT2. Ich znaczenie szczegółowo opisane zostało w [54]:

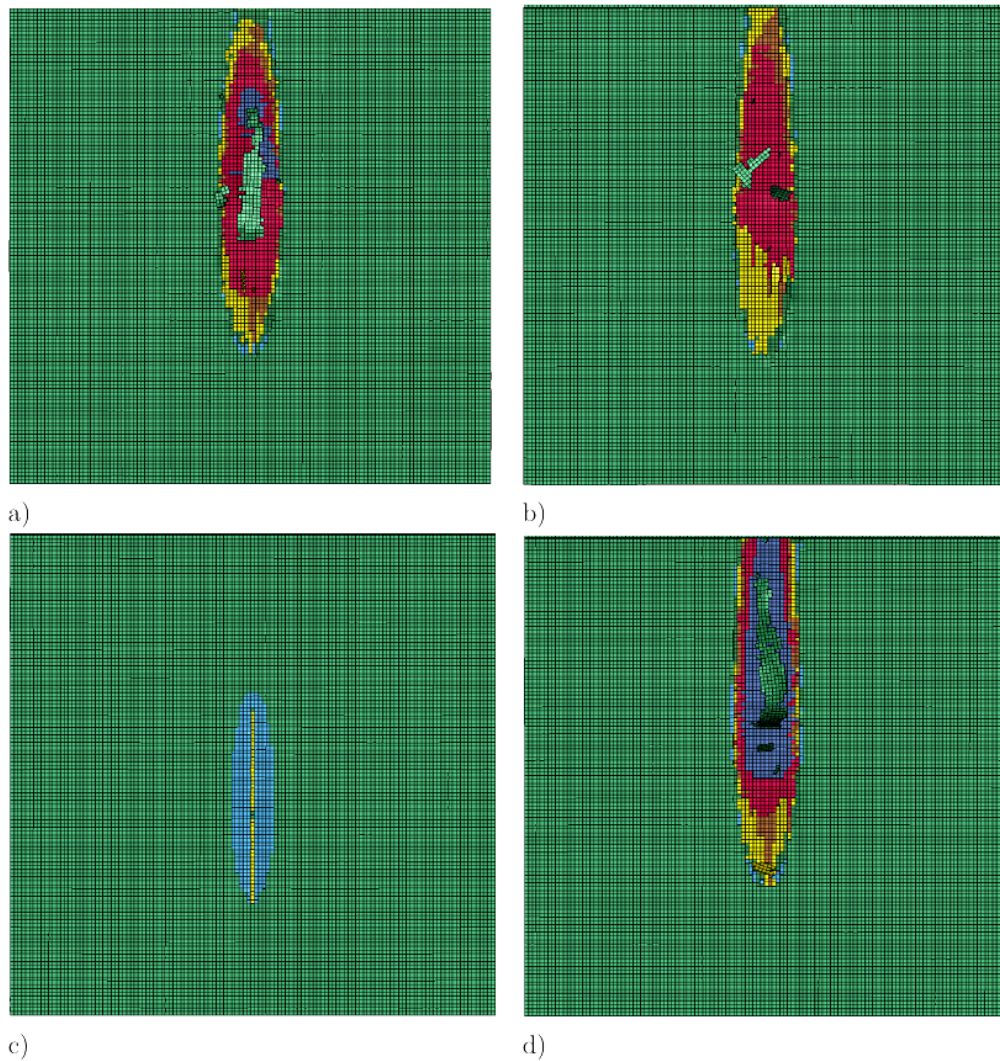
- SOFT, współczynnik redukcji wytrzymałości materiału w elementach poddanych zderzeniu.
- FBRT, współczynnik redukcji wytrzymałości włókien na rozciąganie. Redukuje wartość wytrzymałości włókien na rozciąganie poprzez obliczenie iloczynu: $FBRT * X_t$.
- SOFT2, opcjonalny, ortogonalny współczynnik redukcji wytrzymałości materiałów w elementach poddanych zderzeniu.

Pierwszym krokiem przed rozpoczęciem procedury weryfikacyjnej było zapoznanie z literaturą określającą przedział możliwych wartości przyjmowanych przez dany parametr. Część weryfikacyjna natomiast polegała na analizie wpływu zmiany wartości parametru na wyniki symulacji. Szczególnie istotnym źródłem wiedzy w tym zakresie okazała się analiza publikacji dotyczących modelowania materiałów kompozytowych w oprogramowaniu LS-Dyna [54], która umożliwiła ustalenie zakresu realnych wartości możliwych do osiągnięcia przez rozpatrywany współczynnik w celu zachowania stabilności symulacji.

W kontekście parametrów materiałowych szczególnie istotnym źródłem wiedzy okazała się publikacja [56], gdzie rozpatrzone zostały różne warianty parametrów materiałowych i ich wpływ na wyniki oraz opublikowany przez Haimbs S. et al. w artykule [83] algorytm postępowania w przypadku analizy odporności materiałów kompozytowych na uderzenia, w przypadku gdy próbki znajdują się pod obciążeniem ściskającym.

Przeprowadzono analizę wpływu parametrów redukujących poprzez porównanie wyników zakresu uszkodzenia powstałego po uderzeniu oraz jego zgodności z wynikami testów rzeczywistych. W przypadku parametrów SOFT oraz SOFT2 nie tylko zmiana pojedynczych wartości wpływała w sposób istotny na wyniki, ale również ich odpowiednia kombinacja.

Po przeanalizowaniu wyników symulacji, przedstawionych na Rys. 49, zauważono istotny wpływ zmiany wartości współczynników SOFT/SOFT2 na obszar powstałego uszkodzenia. Do dalszych rozważań przyjęto wartość SOFT/SOFT2: 1,0/1,0 jako dające najbardziej zbliżone do rzeczywistości wyniki. Natomiast współczynnik redukcji FBRT = 0,5.



Rysunek 49: Porównanie wyników symulacji w zależności od przyjętej kombinacji wartości redukujących SOFT/SOFT2: a) 0,1/1,0, b) 1,0/0,8, c) 0,8/1,0, d) 0,1/0,6

9.2.3. Kierunek warstw próbki

Istnieje kilka metod pozwalających na określenie kierunku sztywności poszczególnych warstw tworzących kompozyt. Przebadano wpływ zmiany sposobu definiowania tego kierunku na zakres powstałego uszkodzenia w celu dokonania optymalnego wyboru.

Kierunki warstw określone zostały z użyciem opcji: AOPT, która pozwala określić za pomocą wektorów, kierunki główne dla danego modelu materiałowego.

Rozpatrywano 2 podejścia zgodne z metodologią przygotowywania materiału kompozytowego:

- AOPT = 0.0: osie kompozytu opisane za pomocą kierunków zdefiniowanych poprzez wskazanie odpowiednich węzłów w DEFINE COORDINATE NODES.
- AOPT = 2.0: osie materiału wyznaczone za pomocą wektora zdefiniowanego w materiale MAT 054/055.

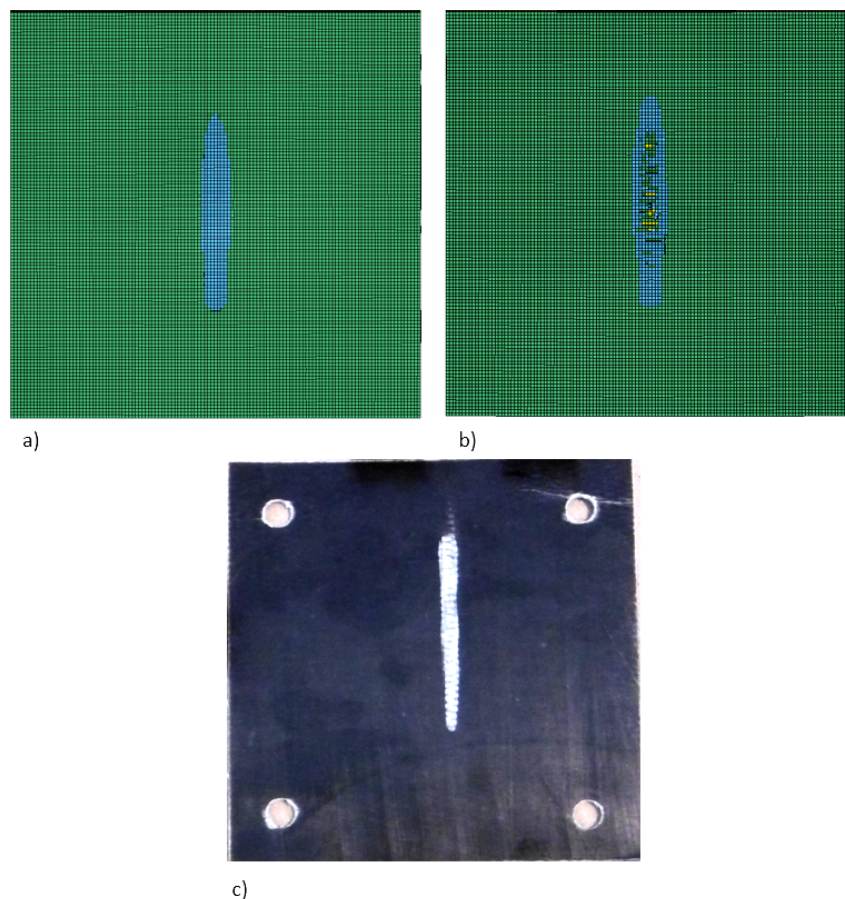
W przypadku metody $AOPT = 2.0$ konieczne było utworzenie takiej ilości wariantów modeli materiałowych, ile występowało warstw w kompozycie, ponieważ każda warstwa posiadała swój odrębny kierunek.

W metodzie $AOPT=0$ wskazano kierunek główny poprzez wskazanie węzłów w opcji `DEFINE COORDINATE NODES` oraz nadano każdemu elementowi skończonemu tworzącemu daną warstwę kierunek odpowiadający układowi włókien w warstwie.

Model przed strojeniem przygotowany był w oparciu o metodę $AOPT=0$, natomiast wyniki porównawcze analiz wykazały lepszą odpowiedź układu na zmiany kierunku uderzenia w przypadku wariantu $AOPT=2$ dlatego też wariant ten został przyjęty w modelu docelowym.

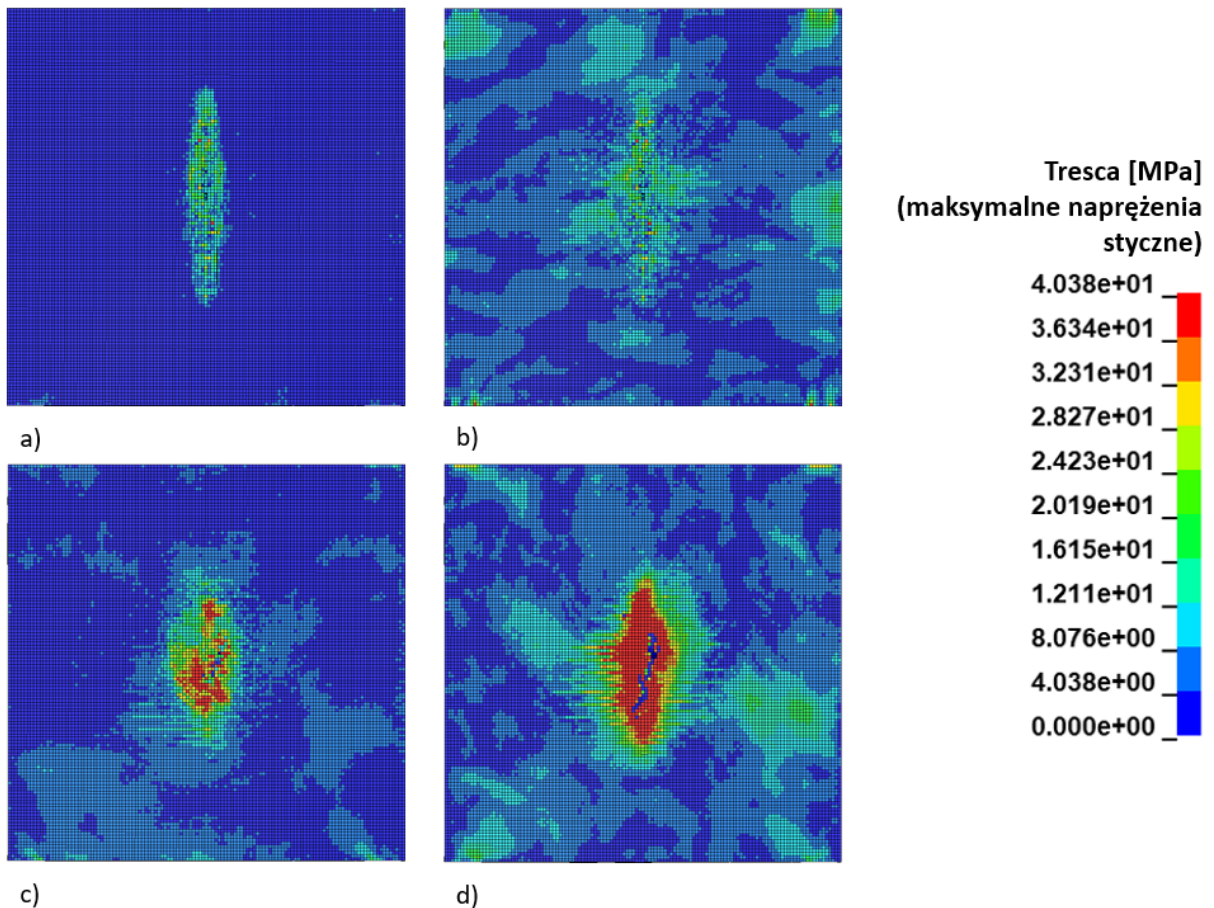
9.3. Omówienie wyników symulacji MES

W wyniku strojenia modelu, otrzymano wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistych. Przykład porównania wyników symulacji przed strojeniem, do wyników po strojeniu modelu, w odniesieniu do testów rzeczywistych przedstawia Rys. 50.



Rysunek 50: Porównanie wyników symulacji dla próbki z grupy 010: a) przed strojeniem modelu, b) po strojeniu modelu, c) uszkodzenie rzeczywiste

Wstępna analiza porównawcza zakresu uszkodzeń, pozwoliła stwierdzić zwiększenie dokładności modelu względem pierwszych symulacji. Powstałe uszkodzenie w przypad-



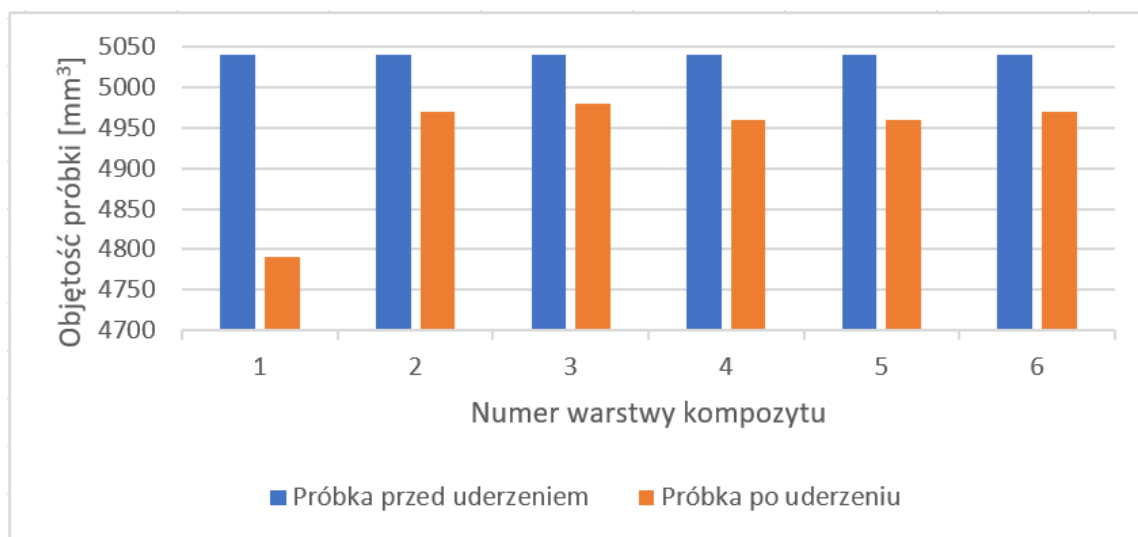
Rysunek 51: Naprężenia styczne wg hipotezy Tresci w wybranych warstwach próbki 010: a) warstwa 1, b) warstwa 2, c) warstwa 4, d) warstwa 6

ku przedstawionym na Rys. 50 b), okazało się dłuższe oraz lokalnie głębsze względem pierwszych wyników Rys. 50 a).

Dalsza analiza próbki 010 oparta była na szczegółowej weryfikacji uszkodzeń w kolejnych warstwach. Na Rys. 51 zaprezentowano rozkład naprężeń w osnowie w wybranych warstwach wg hipotezy maksymalnych naprężeń stycznych Tresci. Wartości naprężeń zredukowanych otrzymywanych wg hipotezy Tresci, są większe od naprężeń wg hipotezy Hubera, stąd, jako bezpieczniejszą przyjmuje się metodę maksymalnych naprężeń stycznych [34]. Zauważono zwiększanie obszaru i wartości naprężeń w miarę obserwacji kolejnych warstw, a największe wartości naprężeń zaobserwowano na ostatniej warstwie poprzedzającej rdzeń kompozytu. Wynika to z faktu, że naprężenia w tej warstwie nie mają możliwości przejścia do kolejnych warstw, a warunki brzegowe spowodowały, że kumulacja nastąpiła właśnie w tej warstwie.

Przygotowany model umożliwił również analizę ubytku objętości kolejnych warstw tworzących kompozyt, który oddaje zakres powstałego uszkodzenia.

Przykład dla próbki 010 przedstawia wykres zaprezentowany na Rys. 52. Jego analiza pozwoliła zauważyć, że największy ubytek nastąpił w 1 warstwie na skutek bezpośredniego oddziaływania elementu uderzającego. Wspomniany kontakt spowodował także niewielkie uszkodzenia w warstwie 2, natomiast w warstwie 3 odnotowano jeszcze mniejszy ubytek.



Rysunek 52: Zmiana objętości poszczególnych warstw na skutek uderzenia

Wynika to z faktu braku bezpośredniego oddziaływania elementu uderzającego na tą warstwę. Sytuacja uległa zmianie w warstwach 4-6, gdzie na skutek oddziaływania sił z poprzednich warstw, nastąpiła kumulacja naprężeń oraz usunięcie elementów o przekroczonych wartościach dopuszczalnych, co spowodowało, że ubytki w tych warstwach są zbliżone objętościowo do ubytków w warstwie 2.

Suma ubytków w poszczególnych warstwach pozwoliła określić całkowity ubytek objętości dla kompozytu. Nie istnieje jednak możliwość porównania tego ubytku z wynikami testów rzeczywistych z uwagi na uwzględnienie zmian objętości we wszystkich warstwach, a nie tylko tych widocznych z zewnątrz.

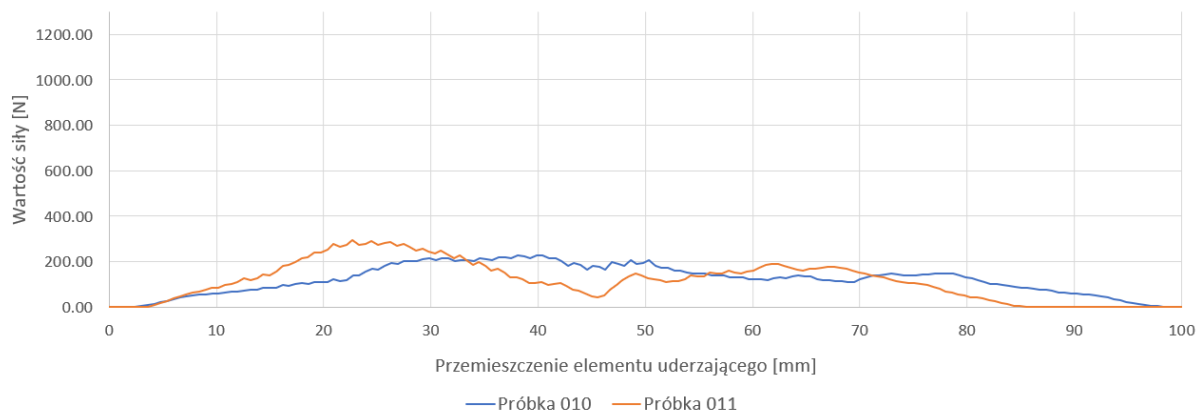
Analogiczne weryfikacje można przeprowadzić dla wszystkich pozostałych przypadków. Ponadto, zastosowanie opracowanego modelu do symulacji uderzeń w wariantach nie popartych badaniami eksperymentalnymi, umożliwia weryfikowanie wielkości powstałych uszkodzeń na podstawie analogicznych analiz, bez konieczności przeprowadzania badań niszczących.

9.3.1. Dodatkowe wnioski z symulacji

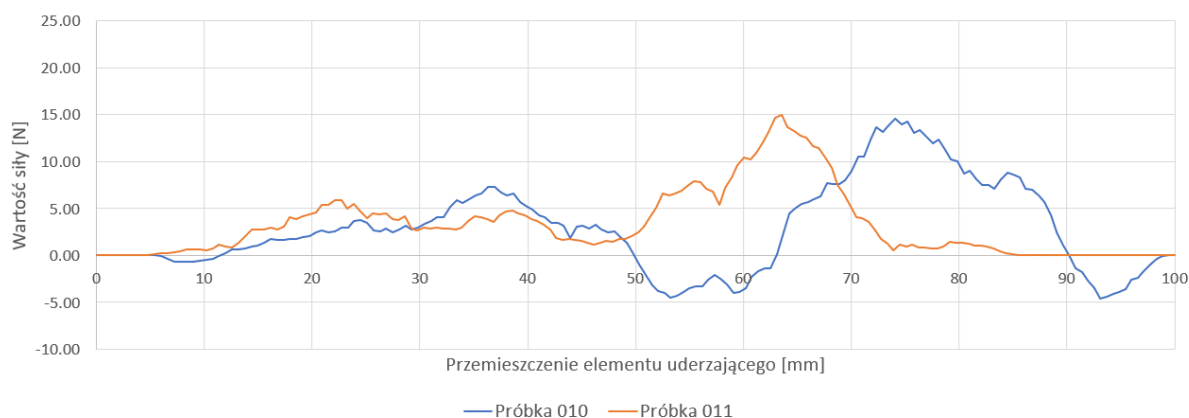
Przeprowadzona analiza porównawcza przypadku 010 opisanego w Rozdz. 9.3 z przypadkiem 011 pozwoliła zweryfikować wpływ współczynnika restytucji na wartości sił działających w trakcie uderzenia. Składowe siły podzielone według 3 osi opisujących kierunek ich działania, zaprezentowane zostały na Rys. 53 - Rys. 55. Przyjęte kierunki działania sił są zgodne z kierunkami zaprezentowanymi na Rys. 44.

Przedstawione wykresy prezentują wartości sił zaobserwowanych pomiędzy elementem uderzającym, a zewnętrzną warstwą próbki, w funkcji przemieszczenia pocisku.

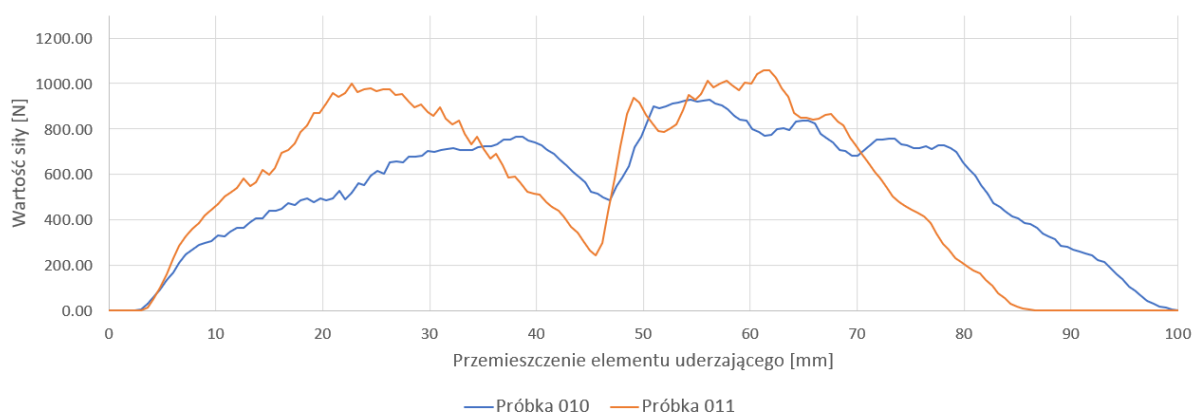
W przypadku składowej siły działającej w kierunku osi uderzenia "x", zaobserwowano bardziej dynamiczne reakcje dla próbki o wyższym współczynniku restytucji (011). Zarejestrowane maksymalne wartości sił były w przypadku tej próbki wyższe, niż dla próbki



Rysunek 53: Wykres sił działających w kierunku "x" w funkcji przemieszczenia elementu uderzającego. Wykres dotyczy warstwy zewnętrznej próbek 010 oraz 011



Rysunek 54: Wykres sił działających w kierunku "y" w funkcji przemieszczenia elementu uderzającego. Wykres dotyczy warstwy zewnętrznej próbek 010 oraz 011



Rysunek 55: Wykres sił działających w kierunku "z" w funkcji przemieszczenia elementu uderzającego. Wykres dotyczy warstwy zewnętrznej próbek 010 oraz 011

010. Próbką o niższym współczynniku restytucji bardziej wytłumiała siły działające w kierunku osi "x", a sam wykres miał charakter bardziej łagodny.

Wykres przedstawiony na Rys. 54 wykazał występowanie również sił poprzecznych do osi uderzenia. Siły te były szybciej wytłumiane w przypadku uderzenia w próbkę 011, natomiast siły powstałe w przypadku próbki 010 wykazywały większą amplitudę wychyleń oraz częstszą zmianę zwrotu wektora sił.

Wykres sił w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki, zaprezentowany został na Rys. 55. Wykres, w obu przypadkach wyraźnie podzielony był na 2 części. Część lewa, od 0 do ok. 48 mm przemieszczenia pocisku, obejmowała oddziaływanie przedniej części elementu uderzającego na próbkę. Równolegle, w tym czasie następowała ciągła zmiana kierunku wektora prędkości pocisku na skutek ześlizgiwania się po materiale. Przy przemieszczeniu równym ok. 48 mm pocisk zaczął oddziaływać na próbkę swoją tylną częścią. Zauważono w tym momencie bardzo dynamiczny wzrost sił działających na próbkę, zwłaszcza w przypadku próbki o wyższym współczynniku restytucji. Wartości sił w funkcji przemieszczenia są wyraźnie przesunięte w czasie pomiędzy próbkami. Siły w przypadku próbki o rdzeniu charakteryzującym się wyższym współczynnikiem restytucji wcześniej osiągają wartości maksymalne, a wykres ma charakter bardziej dynamiczny. W przypadku próbki z grupy 010 przebieg ma charakter bardziej łagodny. Wartości sił szybciej osiągnęły wartość 0 w przypadku próbki o wyższym współczynniku "R".

10. Wykorzystanie opracowanego modelu MES do innych analiz

Celem opracowania modelu do analiz numerycznych było umożliwienie przeprowadzenia analogicznych symulacji powstawania uszkodzeń przy innych warunkach brzegowych oraz parametrach wejściowych. W związku z tym model numeryczny wykorzystany został do przeprowadzenia symulacji uderzenia o innych parametrach względem tych, które rozpatrywane były w badaniach eksperymentalnych. Dostrojony model pozwolił na zaadaptowanie do innych wytycznych, których weryfikacja eksperymentalna była niewykonalna lub ekonomicznie nieuzasadniona. Potwierdzono, że przygotowany model umożliwia przeprowadzenie symulacji dla nieskończonej liczby kombinacji parametrów, bez konieczności wykonywania drogich próbek i narażania wyników na wpływ zewnętrznych czynników niezależnych, takich jak np. jakość wykonania próbek lub powtarzalność strzałów na stanowisku badawczym.

10.1. Określenie nowych parametrów symulacji

Przeprowadzono dodatkowe symulacje w celu weryfikacji wpływu zmiany kąta uderzenia " α " względem powierzchni próbki oraz zmiany prędkości uderzenia na zakres powstałych uszkodzeń. Definicja kąta α przedstawiona została na Rys. 45.

W celu weryfikacji wpływu kąta uderzenia α na wyniki, przeprowadzono symulacje dla 2 kątów:

- d0: kąt uderzenia względem powierzchni próbki 6° ,
- d1: kąt uderzenia względem powierzchni próbki 12° .

Ponadto, w celu zweryfikowania wpływu prędkości uderzenia na wyniki, przeprowadzono symulacje dla 2 dodatkowych prędkości uderzenia:

- e0: prędkość pocisku 40 m/s,
- e1: prędkość pocisku 80 m/s.

Łącznie przeprowadzone zostały 4 dodatkowe symulacje będące wynikiem kombinacji powyższych czynników.

Jako model bazowy dla analizy wykorzystano model opracowany dla wariantu 010, charakteryzujący się zgodnie z opisem w Rozdz. 8.1 następującymi cechami:

- niski współczynnik tarcia,
- kąt uderzenia $\beta = 90^\circ$,
- niski współczynnik restytucji.

Stosując nazewnictwo wariantów przyjęte w rozprawie, warianty oznaczone zostały w sposób następujący: *****_****.

Pierwsze 3 cyfry są oznaczeniami wariantu z poprzednich badań (czynniki a,b,c), natomiast 2 pozostałe określają czynniki d oraz e zdefiniowane w niniejszym rozdziale.

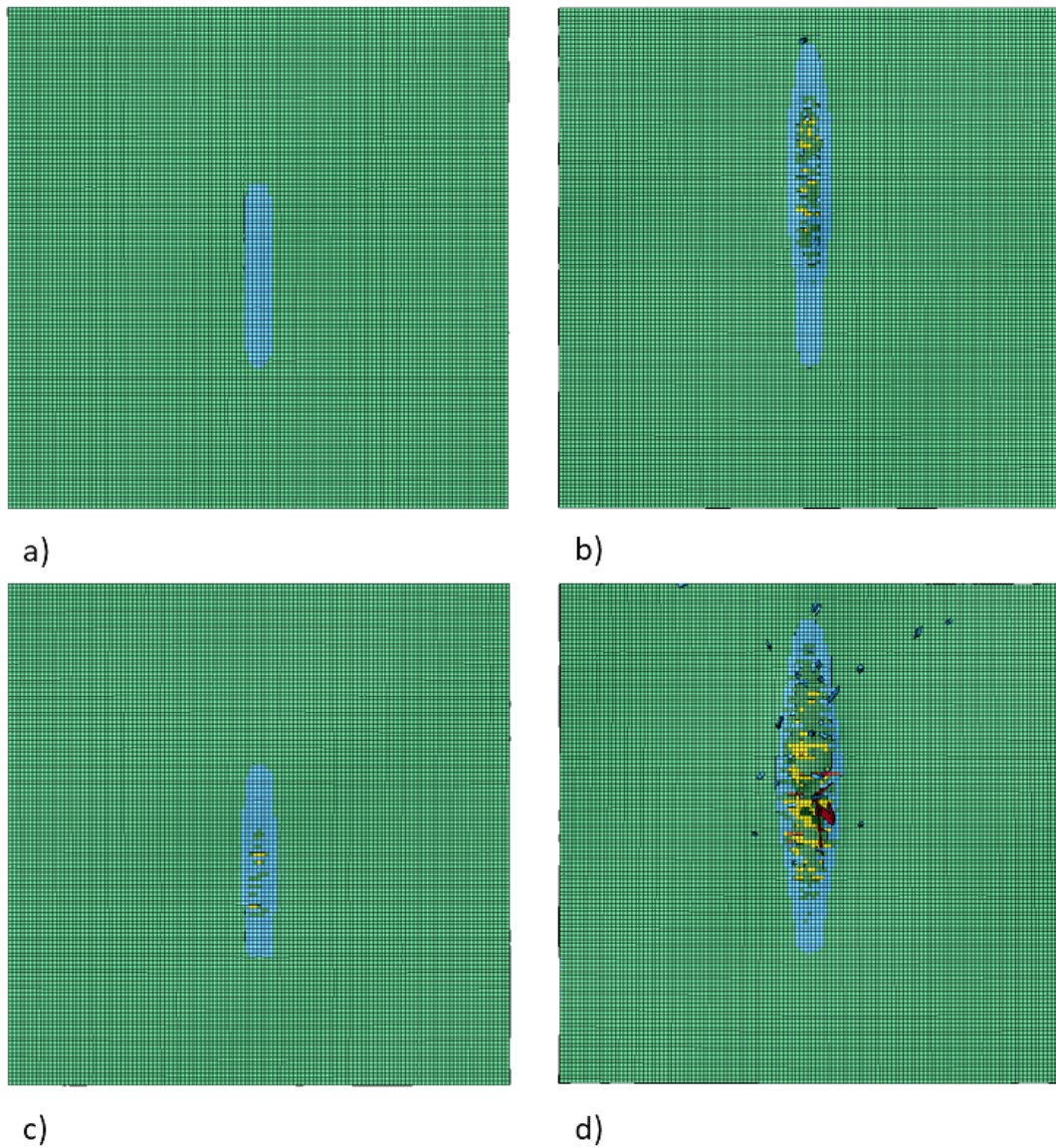
Przykład oznaczony jako 010-00, oznacza wariant o kącie uderzenia $\alpha = 6^\circ$ oraz prędkości 40 m/s.

10.2. Omówienie wyników symulacji MES

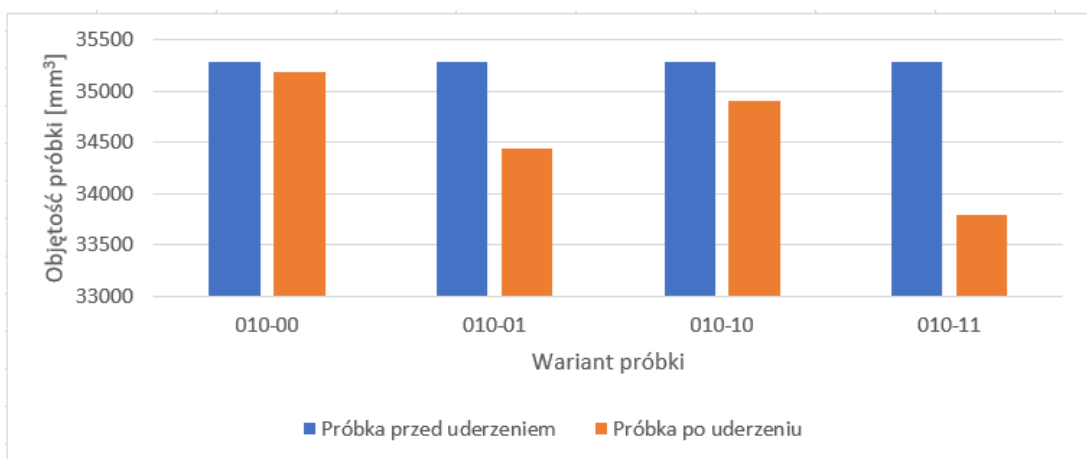
Obszary uszkodzeń powstałe w wyniku przeprowadzonej symulacji numerycznej przedstawione zostały na Rys. 56. Ich analiza pozwoliła stwierdzić istotne różnice w obszarach uszkodzeń w zależności od wariantu próbki.

W przypadku uderzenia o mniejszym kącie i mniejszej prędkości uszkodzenie miało charakter jedynie powierzchniowy, uszkodzona została tylko warstwa zewnętrzna, co przedstawione zostało na Rys. 56 a). Zwiększenie prędkości przy zachowaniu tego samego kąta uderzenia spowodowało znaczne wydłużenie, ale również pogłębienie powstałego uszkodzenia. Wariant ten przedstawiony został na Rys. 56 b). Zauważalne zwiększenie zakresu powstałych uszkodzeń nastąpiło w przypadku zwiększenia kąta uderzenia. Przypadek przedstawiony na Rys. 56 d) został uszkodzony w znaczącym stopniu.

W celu dokładnego określenia wpływu przyjętych parametrów na wyniki przeprowadzono analizę zmiany objętości próbek przed i po uderzeniu. Wyniki analizy ubytku



Rysunek 56: Obszary uszkodzeń powstałych w wyniku symulacji dla nowych parametrów: a) 010-00, b) 010-01, c) 010-10, d) 010-11



Rysunek 57: Wykres zmian objętości całej próbki na skutek uderzenia

objętości zaprezentowane zostały w formie wykresu kolumnowego na Rys. 57.

Dane z wykresu potwierdziły, że najbardziej uszkodzony został przypadek 010-11 przedstawiony na Rys. 56 d). Ubytek objętości w tym przypadku wyniósł 1490 mm^3 , a zakres uszkodzenia objął wszystkie warstwy. Odwrotna sytuacja zaobserwowana została w przypadku próbki przedstawionej na Rys. 56 a), w tym przypadku ubytek objętości po uderzeniu wynosił jedynie 100 mm^3 , a zakres uszkodzenia objął wyłącznie warstwę zewnętrzną.

Powyższe rezultaty potwierdzają uniwersalność opracowanego modelu i prezentują możliwości przeprowadzenia symulacji również dla innych przypadków. Daje to możliwości weryfikacji zachowania się osłon w przypadku uderzeń "nietypowych" lub sprawdzenie możliwości zastosowania opracowanych osłon w innych miejscach narażonych na inne typy uderzeń.

11. Podsumowanie i wnioski

Analiza wniosków ze zrealizowanych w toku niniejszej rozprawy zadań badawczych pozwoliła stwierdzić słuszność postawionej tezy. Przeprowadzone badania oraz uzyskane wyniki umożliwiły zdefiniowanie wybranych wytycznych dla konstruktorów osłon zabezpieczających podwozia pojazdów szynowych. Wytyczne te pozwalają uzupełnić wiedzę dotychczas rozpowszechnioną w standardach pracy biur projektowych o wnioski wynikające z naukowego przeanalizowania problemu poruszanego w trakcie niniejszej rozprawy. Pozytywna weryfikacja tezy dała możliwość określenia zbioru czynników o istotnym wpływie na odporność osłon na uszkodzenia.

W oparciu o analizę wyników dla przeprowadzonych badań eksperymentalnych, wykazano wpływ czynników określonych jako: współczynnik restytucji, kierunek uderzenia względem kierunku włókien w warstwach zewnętrznych oraz współczynnik tarcia, na zakres powstających uszkodzeń.

Na tej podstawie opracowano ogólne wytyczne dla konstruktorów w celu zwiększenia odporności osłon na powstawanie uszkodzeń:

1. Konstruowana osłona powinna cechować się możliwie niską wartością współczynnika restytucji "R".
2. Kierunek największej sztywności materiału powinien pokrywać się z kierunkiem uderzenia. Zapewnić to można poprzez zastosowanie włókien kierunkowych i ich ułożenie w warstwach zewnętrznych kompozytu w kierunku ruchu pojazdu, pamiętając o konieczności zapewnienia również minimalnej wymaganej sztywności poprzecznej.
3. Wartość współczynnika tarcia powinna być w miarę możliwości zredukowana w celu umożliwienia ześlizgnięcia się kamienia w trakcie uderzenia.

Do pomyślnego przebiegu prac w niniejszej rozprawie przyczyniło się zrealizowanie zagadnień opisanych w zadaniach badawczych. Można do nich zaliczyć w szczególności:

1. Dokonanie weryfikacji istniejącego stanu wiedzy na temat obecnie stosowanych osłon zabezpieczających podwozie pojazdów szynowych oraz skondensowane zdefiniowanie najważniejszych wymagań projektowych wobec nich, co pozwoliło na uporządkowanie wiedzy na ten temat.
2. Przeprowadzenie szczegółowej analizy literatury dotyczącej materiałów kompozytowych oraz teorii uszkodzeń kompozytów, której wyniki umożliwiły przedstawienie zwięzłych informacji na temat ogólnej budowy oraz mechaniki materiałów kompozytowych.
3. Przeprowadzenie analizy uszkodzeń zaobserwowanych na otrzymanej do badań osłonie zdemontowanej z elektrycznego zespołu trakcyjnego, która przyczyniła się do wyciągnięcia wniosków w kwestii wymagań stawianych osłonom. W szczególności istotny okazał się jednokierunkowy charakter uszkodzeń, który zwrócił uwagę na możliwość wykorzystania anizotropii materiałów kompozytowych.

4. Dokonanie weryfikacji przyczyn powstawania uszkodzeń na podwoziu pojazdu szynowego oraz analiza teorii mechaniki uderzeń, które pozwoliły na zdefiniowanie czynników podlegających weryfikacji oraz opracowanie ogólnej postaci modelu fenomenologicznego.
5. Zdefiniowanie treści tezy oraz określenie zadań badawczych, co umożliwiło opracowanie niezbędnych metod eksperymentalnych i numerycznych, które przyczyniły się do:
 - zaprojektowania i wykonania autorskiego stanowiska badawczego pozwalającego na weryfikację współczynnika restytucji,
 - zaprojektowania i wykonania układu badawczego do pomiaru odporności struktur kompozytowych na uderzenia skierowane pod kątem " α " względem powierzchni próbki,
 - dokonania analizy z zakresu użyteczności Metody Elementów Skończonych do symulacji uderzeń szybkozmiennych dotyczących materiałów kompozytowych.
6. Opracowanie planu eksperymentu umożliwiającego ograniczenie zakresu kosztów i stopnia skomplikowania przeprowadzonych badań.
7. Wykonanie badań stanowiskowych w celu wyznaczenia współczynnika restytucji, co pozwoliło pogrupować próbki wg. wartości współczynnika " R " na 2 grupy.
8. Przeprowadzenie testów stanowiskowych odporności osłon na rozpatrywany typ uderzenia kąтового, co pozwoliło zebrać materiał do wykonania analiz stopnia zakresu powstałych uszkodzeń, co z kolei przyczyniło się do określenia wpływu rozpatrywanych czynników na zakres uszkodzenia.
9. Opracowanie modelu numerycznego, który został dostrojony na podstawie wyników badań eksperymentalnych.
10. Wykonanie symulacji odzwierciedlających testy stanowiskowe, co pozwoliło na wyciągnięcie wniosków na podstawie szczegółowej analizy sił i objętości powstałych uszkodzeń.
11. Przeprowadzenie symulacji dla innych parametrów wejściowych, których weryfikacja nie była możliwa na stanowisku badawczym oraz zaprezentowanie wniosków wynikających z tej symulacji.

Zrealizowanie przedstawionego powyżej algorytmu umożliwiło zebranie wyników pozwalających na sformułowanie następujących wniosków szczegółowych:

1. Stosowanie materiałów kompozytowych do zabezpieczania podwozi pojazdów szynowych wydaje się być właściwym rozwiązaniem. Pomimo konieczności uwzględnienia przy projektowaniu nietypowych własności wytrzymałościowych, materiały te oferują równocześnie wiele zalet, do których oprócz niskiej masy i korzystnego

stosunku sztywności do masy, zaliczyć można np. dźwiękochłonność czy własności termoizolacyjne.

2. Zaobserwowany kierunkowy charakter uszkodzeń płyt kompozytowych pozwala na wykorzystanie anizotropii materiałów kompozytowych do zwiększenia odporności w kierunku uderzenia. Daje to podstawę do stwierdzenia, że do budowy osłon kompozytowych powinny być stosowane tkaniny kierunkowe.
3. Wykazano, że niewielki wzrost współczynnika restytucji kompozytu, powoduje niewątpliwie zwiększenie podatności na powstanie obszernych uszkodzeń, a nawet całkowitej destrukcji próbki. Ponadto, rosnąca wartość współczynnika "R" wpływa także na zwiększenie różnorodności wyników otrzymanych w ramach testów stanowiskowych. Tego zjawiska nie zaobserwowano dla próbek o niższym współczynniku restytucji, wyniki pomiędzy seriami były do siebie bardzo zbliżone.
4. Udowodniono, że istnieje możliwość opracowania modelu MES do odwzorowania zjawiska uderzenia pod niskim kątem i uzyskania wyników zbliżonych do wyników badań stanowiskowych. Do opracowania wiarygodnego modelu niezbędne jest jednak strojenie modelu na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Jednakże, istnieje możliwość w dalszej kolejności zastosowania tego samego modelu do przeprowadzenia symulacji o zmienionych parametrach, dla których przeprowadzenie testów stanowiskowych z różnych powodów jest niemożliwe lub nieopłacalne.
5. Wykazano przewagę wyników badań numerycznych nad wynikami badań eksperymentalnych polegającą na łatwości obserwacji powstałych uszkodzeń w warstwach wewnętrznych kompozytu. Obserwacje wyników badań eksperymentalnych nie pozwalają bez dodatkowych, skomplikowanych analiz na dokładną weryfikację uszkodzeń na granicy warstw. W przypadku modelu numerycznego istnieje możliwość łatwej weryfikacji, co wykazało swoje zastosowanie w rozpatrywanym przypadku. Sytuacja przedstawiona w części poświęconej analizie wyników MES pokazała, że w szczególnym przypadku uderzenia, pocisk uszkadza płytkę w dwojaki sposób: poprzez bezpośrednie oddziaływanie elementu uderzającego na próbkę co powoduje uszkodzenia w warstwach zewnętrznych oraz pośrednie działanie siły, która przekazywana jest pomiędzy warstwami. To drugie zjawisko powoduje, że uszkodzeniu ulegają również warstwy niemające bezpośrednio kontaktu z penetratorem, a mimo wszystko powstają na nich sporych rozmiarów uszkodzenia.

11.1. Plan dalszych badań

Przeprowadzone w pracy badania dotyczące odporności osłon kompozytowych na uderzenia kątowe oraz wnioski wynikające z realizacji zadań badawczych pozwoliły na określenie możliwości i zakresu kontynuacji prowadzonych badań naukowych. Warto podkreślić, że w związku z rozwojem kolei, zwiększaniem szybkości podróżowania oraz coraz wyższym poziomem komfortu oferowanym dla pasażerów, tematyka rozwoju osłon kompozytowych

jest aktualna i perspektywiczna, stąd dalsze prowadzenie badań mogłoby zostać rozszerzone o następujące zagadnienia:

1. Badanie wpływu zmiany parametrów zastosowanych włókien na odporność osłon na uderzenia kamieni, jako jeden z parametrów można przyjąć podatność włókien na odkształcenia. Badane kompozyty powinny zostać zróżnicowane pod kątem materiału zbrojenia, np. włókna szklane, węglowe, aramidowe, czy naturalne.
2. Przeprowadzenie symulacji dla modelu próbki w skali mezo lub mikro, odwzorowującej pojedyncze włókna w warstwie, w celu weryfikacji wpływu kierunku włókien w zewnętrznej warstwie na zakres powstałego uszkodzenia.
3. Badanie wpływu zastosowania dodatkowej powłoki zewnętrznej w postaci natryskwanego środka ochrony karoserii (z ang. anti gravel primer). Powłoka ta z jednej strony spowoduje niekorzystne zwiększenie współczynnika tarcia, z drugiej strony jednak jest dodatkową warstwą, która może spowodować wytracenie części energii uderzającego elementu.
4. Wykonanie symulacji dla modelu próbki hybrydowej, będącej połączeniem 2 różnych tworzyw, jak np. kompozyt polimerowy z włóknami kierunkowymi stalowymi, poprzecznie wzmocnianymi włóknami szklanymi o zupełnie innych właściwościach.
5. Wykonanie prototypu osłony wg wytycznych opisanych w rozprawie i przeprowadzenie badania polegającego na weryfikacji eksploatacyjnej odporności na uderzenia.

Spis tabel

1	Oznaczenie próbek opisujące występujących czynników	54
2	Własności tworzywa osnowy	55
3	Parametry laminatu kompozytowego uzyskanego po połączeniu włókien lnianych i mieszanki żywicy	55
4	Parametry tworzyw użytych jako rdzeń	56
5	Wartość współczynnika restytucji "R" dla obu grup próbek	58
6	Ilościowy opis wyników badań laboratoryjnych w postaci rozmiarów oraz głębokości uszkodzeń	65
7	Procentowa różnica średniej objętości uszkodzeń próbek różniących się war- tością współczynnika tarcia	66
8	Procentowa różnica średniej objętości uszkodzeń próbek różniących się kie- runkiem ułożenia włókien względem kierunku uderzenia	67
9	Procentowa różnica średniej objętości uszkodzeń próbek różniących się war- tością współczynnika restytucji	68
10	Układ jednostek przyjęty w modelu, zgodnie z wymaganiami programu LS-Dyna	70
11	Właściwości homogeniczne kompozytu tworzącego warstwę laminatu	71

Spis rysunków

1	Podwozie współczesnego pojazdu szynowego obsługującego ruch regionalny, niewyposażonego w osłony zabezpieczające podwozie	10
2	Podwozie pojazdu szynowego przystosowanego na etapie projektowo-konstrukcyjnym do poruszania się po szlakach skandynawskich	11
3	Podwozie pojazdu szynowego wyposażonego w osłony zabezpieczające	12
4	Uproszczony proces iteracyjny procesu projektowania elementów kompozytowych [80]	14
5	Czynniki wpływające na ryzyko poderwania kamieni	16
6	Wizualizacja zjawiska poderwania kamieni na skutek działania sił aerodynamicznych	17
7	Wektorowe przedstawienie zjawiska poderwania kamieni	17
8	Przebieg czasowy siły chwilowej [73]	19
9	Przebieg czasowy odkształceń. a) zderzenie sprężyste b) zderzenie elastoplastyczne c) zderzenie plastyczne [73]	20
10	Osłona z elektrycznego zespołu trakcyjnego wycofana z eksploatacji z powodu licznych uszkodzeń erozyjnych i perforacji. Po prawej stronie szczegółowy widok przykładowych uszkodzeń wraz z wymiarami	21
11	Fragment uszkodzonej osłony poddany obserwacji. a) próbka przygotowana do badań b) Strefa A, pow 100x c) Strefa B, pow. 2500x d) Strefa C, pow. 1500x	22
12	Budowa laminatu. a) Pojedyncze laminy, które po połączeniu tworzą laminat b) Laminat z zaznaczoną płaszczyzną środkową	25
13	Wizualizacja orientacji warstw względem układu x, y przyjętego dla laminatu	26
14	Próbki z kompozytów przekładkowych, po lewej stronie kompozyt z rdzeniem drewnianym, po prawej kompozyt z wypełnieniem pianką poliuretanową	27
15	Typowe zużycia warstwy zewnętrznej laminatu. a) podłużne pęknięcie matrycy b) poprzeczne pęknięcie matrycy c) odklejenie na granicy faz d) pęknięcie kilku włókien e) pęknięcie pojedynczego włókna f) wyciągnięcie włókna	30
16	Skutki uszkodzeń spowodowanych przez wgłębnik diamentowy pod obciążeniem 3 N. a) podłużny ruch rysika, przybliżenie 500x b) podłużny ruch rysika, przybliżenie 5000x c) poprzeczny ruch rysika, przybliżenie 500x d) poprzeczny ruch rysika, przybliżenie 5000x [46]	31
17	Składowe stanu naprężenia na ścianach elementarnego prostopadłościanu	32
18	Model przedstawiający uderzenie kamienia w próbkę	37
19	Wpływ kierunku włókien na powstałe uszkodzenia [46]	38
20	Makroskopowy schemat przekroju poprzecznego istniejącej osłony	40
21	Model fenomenologiczny procesu uderzenia	41
22	Schemat stanowiska do wyznaczania współczynnika restytucji	42
23	Stanowisko do wyznaczania współczynnika restytucji	44

24	Schemat stanowiska do badania odporności osłon na uderzenia elementu o ostrych krawędziach	45
25	Element uderzający stosowany w pracy. Po lewej stronie przekrój elementu wraz z wymiarami, po prawej stronie rzeczywisty przedmiot	46
26	Widok ogólny stanowiska badawczego wraz ze zbliżeniem na aparaturę sterującą	47
27	Sposób montażu próbki w regulowanej kątowno ramie pomocniczej	48
28	Poziomy modelowania kompozytów warstwowych. a) skala makro, b) skala mikro, c) skala mezo [41]	49
29	Prezentacja kąta β określającego kierunek główny sztywności warstw zewnętrznych próbki względem kierunku uderzenia, w przedstawionym przypadku $\beta = 90^\circ$	53
30	Próbka kompozytowa do badań	56
31	Próbka kompozytowa z rdzeniem XPS	57
32	Wykres skrzynkowy prezentujący rozkład wyników pomiarów współczynnika restytucji dla 24 próbek. Widoczny podział na 2 grupy w zależności od rodzaju rdzenia (**0, **1)	58
33	Próbka z grupy 000 po uderzeniu	61
34	Próbka z grupy 001 po uderzeniu	61
35	Próbka z grupy 010 po uderzeniu	62
36	Próbka z grupy 011 po uderzeniu	62
37	Próbka z grupy 100 po uderzeniu	63
38	Próbka z grupy 101 po uderzeniu	63
39	Próbka z grupy 110 po uderzeniu	64
40	Próbka z grupy 111 po uderzeniu	64
41	Porównanie wyników symulacji uderzenia kątownego dla różnych wartości współczynnika tarcia: a) Kąt uderzenia 30° , $F_S = 0,01$, b) Kąt uderzenia 30° , $F_S = 0,5$, Kąt uderzenia 45° , $F_S = 0,01$, Kąt uderzenia 45° , $F_S = 0,5$ [58]	66
42	Model numeryczny próbki w ujęciu makroskopowym wraz z wymiarami gabarytowymi	71
43	Układy współrzędnych określające kierunki dla każdego elementu skończonego w pojedynczej laminie	72
44	Model odniesienia dla symulacji uderzeń	73
45	Wizualizacja modelu utworzonego do przeprowadzenia symulacji	73
46	Warunki brzegowe odzwierciedlające mocowanie próbki	74
47	Wpływ współczynnika DC na wartość współczynnika tarcia w funkcji różnicy prędkości pomiędzy elementami [54]	75
48	Model pomocniczy do weryfikacji współczynnika restytucji, strzałka oznacza kierunek działania wektora prędkości przed uderzeniem	76

49	Porównanie wyników symulacji w zależności od przyjętej kombinacji wartości redukujących SOFT/SOFT2: a) 0,1/1,0, b) 1,0/0,8, c) 0,8/1,0, d) 0,1/0,6	79
50	Porównanie wyników symulacji dla próbki z grupy 010: a) przed strojeniem modelu, b) po strojeniu modelu, c) uszkodzenie rzeczywiste	80
51	Naprężenia styczne wg hipotezy Tresci w wybranych warstwach próbki 010: a) warstwa 1, b) warstwa 2, c) warstwa 4, d) warstwa 6	81
52	Zmiana objętości poszczególnych warstw na skutek uderzenia	82
53	Wykres sił działających w kierunku "x" w funkcji przemieszczenia elementu uderzającego. Wykres dotyczy warstwy zewnętrznej próbek 010 oraz 011 .	83
54	Wykres sił działających w kierunku "y" w funkcji przemieszczenia elementu uderzającego. Wykres dotyczy warstwy zewnętrznej próbek 010 oraz 011 .	83
55	Wykres sił działających w kierunku "z" w funkcji przemieszczenia elementu uderzającego. Wykres dotyczy warstwy zewnętrznej próbek 010 oraz 011 .	83
56	Obszary uszkodzeń powstałych w wyniku symulacji dla nowych parametrów: a) 010-00, b) 010-01, c) 010-10, d) 010-11	86
57	Wykres zmian objętości całej próbki na skutek uderzenia	86

Literatura

- [1] International Organization for Standardization: 10545-5. Ceramic tiles—part 5: Determination of impact resistance by measurement of coefficient of restitution. *BSI Standards Ltd*, 1998.
- [2] International Organization for Standardization: 20567-1:2017. Paints and varnishes - determination of stone-chip resistance of coatings - part 1: Multi-impact testing. 2017.
- [3] Bełzowski A. Metoda oceny stopnia uszkodzenia kompozytów polimerowych. *Kompozyty (Composites)*, 4, 2002.
- [4] Bełzowski A., Stasięńko A. O wpływie poprzecznych obciążeń udarowych na własności polimerowych kompozytów konstrukcyjnych. *Przegląd Mechaniczny*, (13):13–18, 2000.
- [5] Bełzowski A., Rechul Z., Stasięńko J. Uszkodzenia udarowe w laminacie wzmocnionym tkanina szklana. *Kompozyty (Composites)*, 2:394–399, 2002.
- [6] Bełzowski A., Rechul Z., Stasięńko J. Wpływ niskoenergetycznych uszkodzeń udarowych na wytrzymałość laminatu wzmocnionego tkaniną. *Diagnostyka*, 30, 2004.
- [7] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S. Kompozyty. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*, 2003.
- [8] Corigliano A. Damage and fracture mechanics techniques for composite structures. 2003.
- [9] García-Carpintero A., Van den Beuken BNG., Haldar S., Herráez M., González C., Lopes CS. Fracture behaviour of triaxial braided composites and its simulation using a multi-material shell modelling approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 188:268–286, 2018.
- [10] Katunin A. *Degradacja cieplna laminatów polimerowych*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji-PIB, 2012.
- [11] Kelly A., Zweben C. Comprehensive composite materials. *Materials Today*, 2(1):20–21, 1999.
- [12] Komorek A., Przybyłek P. Naprawa uszkodzeń kompozytowych elementów lotniczych wywołanych niskoenergetycznym obciążeniem udarowym. *Technologia i Automatyzacja Montażu (4)*, 35:39, 2011.
- [13] Malmeister A. Mekh. *Polimerov*, 2(4):324–331, 1966.
- [14] Onder A., O'Neill C., Robinson M. Flying ballast resistance for composite materials in railway vehicle carbody shells. *Transportation Research Procedia*, 14:595–604, 2016.

- [15] Sakly A., Laksimi A., Kebir H., Benmedakhen S. Experimental and modelling study of low velocity impacts on composite sandwich structures for railway applications. *Engineering Failure Analysis*, 68:22–31, 2016.
- [16] Quinn A-D., Hayward M., Baker C-J., Schmid F., Priest J-A., Powrie W. A full-scale experimental and modelling study of ballast flight under high-speed trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(2):61–74, 2010.
- [17] Kaw AK. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2005.
- [18] Wilczyński AP. *Polimerowe kompozyty włókniste: własności, struktura, projektowanie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1996.
- [19] ASTM International:. D7136/d7136m, measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event.
- [20] ASTM International:. *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-weight Impact Event*. ASTM International, 2007.
- [21] Harris B. Fatigue behaviour of polymer-based composites and life prediction methods. *AIB-Vinçotte Leerstoel*, 2, 1996.
- [22] Mordike BL., Cahn RW., Haasen P., Kramer EJ. Materials science and technology. *Weinheim*, 15:111, 1993.
- [23] Jerzy Brzeziński. *Metodologia badań psychologicznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [24] Esveld C. *Modern railway track*, wolumen 385. MRT-productions Zaltbommel, Netherlands, 2001.
- [25] Esveld C. Recent developments in slab track. *European railway review*, 9(2):81–85, 2003.
- [26] Zhang C., Binienda WK. A meso-scale finite element model for simulating free-edge effect in carbon/epoxy textile composite. *Mechanics of Materials*, 76:1–19, 2014.
- [27] Lopes CS., Sádaba SS., Camanho PP., González C. Advanced simulation of low velocity impact on fibre reinforced laminates. *4th International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures (ICCILS 2014), at Cape Town, South Africa*, 2014.
- [28] Ma D., Manes A., Amico SC., Giglio M. Ballistic strain-rate-dependent material modelling of glass-fibre woven composite based on the prediction of a meso-heterogeneous approach. *Composite Structures*, 216:187–200, 2019.

- [29] Patil D., Higgs C-F. A coefficient of restitution model for sphere–plate elastoplastic impact with flexural vibrations. *Nonlinear Dynamics*, 88(3):1817–1832, 2017.
- [30] Rybicki EF., Kanninen MF. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. *Engineering fracture mechanics*, 9(4):931–938, 1977.
- [31] Barbero EJ. *Introduction to composite materials design*. CRC press, 2017.
- [32] Gellert EP., Cimpoeru SJ., Woodward RL. A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites. *International Journal of Impact Engineering*, 24(5):445–456, 2000.
- [33] Dogan F., Hadavinia H., Donchev T., Bhonge PS. Delamination of impacted composite structures by cohesive zone interface elements and tiebreak contact. *Central European Journal of Engineering*, 2(4):612–626, 2012.
- [34] Klepacki F. Porównanie stosowanych hipotez wyężeniowych oraz różnych konstrukcji króćców w odniesieniu do obliczeń wytrzymałościowych walczaka (artykuł dyskusyjny). *Dozór Techniczny*, 2007.
- [35] Sarasini F., Tirillò J., D’Altilia S., Valente T., Santulli C., Touchard F., Chocinski-Arnault L., Mellier D., Lampani L., Gaudenzi P. Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 91:144–153, 2016.
- [36] Jing G., Ding D., Liu X. High-speed railway ballast flight mechanism analysis and risk management—a literature review. *Construction and Building Materials*, 223:629–642, 2019.
- [37] Kress G., Lines Delta Air. Design criteria. *Composites. ASM Handbook*, 21:857–871, 2001.
- [38] Hyla I., Ślęziona J. *Kompozyty: elementy mechaniki i projektowania*.
- [39] Kolenda J. Stanowiska do badania energochłonności osłon. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 50:33–40, 2009.
- [40] Marszałek J., Stadnicki J. Durability assessment of composite structural element reinforced with fabric due to delamination. *Autex Research Journal*, 1(ahead-of-print), 2020.
- [41] Marszałek J., Stadnicki J., Danielczyk P. Finite element model of laminate construction element with multi-phase microstructure. *Science and Engineering of Composite Materials*, 27(1):405–414, 2020.

- [42] Quintelier J., De Baets P., Samyn P., Van Hemelrijck D. On the sem features of glass–polyester composite system subjected to dry sliding wear. *Wear*, 261(7-8):703–714, 2006.
- [43] Sobczak J., Wojciechowski S. Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych. *Kompozyty (Composites)*, 2(3):24–37, 2002.
- [44] Stadnicki J., Tokarz Z. Mesoscale finite element model for calculating deformations of laminate composite constructions. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(2):1687814016633604, 2016.
- [45] Wells JK., Beaumont PWR. Debonding and pull-out processes in fibrous composites. *Journal of Materials Science*, 20(4):1275–1284, 1985.
- [46] Friedrich K., Varadi K., Goda T., Giertzsch H. Finite element analysis of a polymer composite subjected to a sliding steel asperity part ii: Parallel and anti-parallel fibre orientations. *Journal of materials science*, 37(16):3497–3507, 2002.
- [47] Kawashima K., Iikura S., Endo T., Fujii T. Experimental studies on ballast-flying phenomenon caused by dropping of accreted snow/ice from high-speed trains. *RTRI Reports*, 17(8):31–36, 2003.
- [48] RG Technologie Kompozytowe. Raport dla Politechnika Śląska 01/01.
- [49] De Luca L. *Numerical implementation of damage and fracture models for progressive damaging simulation in composite material structures*. Praca doktorska, University of Naples Federico II, 2013.
- [50] Maio L. Numerical implementation of damage and fracture models for progressive damaging simulation in composite material structures. 2013.
- [51] Vinšová L., Urban T. Testing of mechanical properties of thick-walled carbon fiber composite for fem simulations. *Materials Today: Proceedings*, 4(5):5989–5994, 2017.
- [52] Dobrzański LA. *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo: materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
- [53] Canal LP., Pappas G., Botsis J. Large scale fiber bridging in mode i intralaminar fracture. an embedded cell approach. *Composites Science and Technology*, 126:52–59, 2016.
- [54] Livermore Software Technology (LST). *LS-DYNA Keyword User’s Manual, Volume I*. LSTC, 2020.
- [55] Livermore Software Technology (LST). *LS-DYNA Keyword User’s Manual, Volume II*. LSTC, 2020.

- [56] Andersson M., Larsson E. Benchmarking study of steel-composite structures in car crash applications. Praca magisterska, 2016.
- [57] Hebda M. Zastosowanie energetycznego kryterium wytrzymałościowego do analizy wytrzymałościowej kompozytów włóknistych. *Biblioteka Cyfrowa Politechniki Krakowskiej, Kraków*, 2006.
- [58] Juzuń M., Pawlak M. Influence of impact angle and coefficient of friction on high velocity polymer composite damage. *4th International MERGE Technologies Conference IMTC 2019 Lightweight Structures*, strony 119–120, 2019.
- [59] Juzun M. Influence of selected method to estimate composite material elasticity properties on results of finite element analysis. *Compos. Theory Pract*, 19:34–39, 2019.
- [60] Juzuń M., Cholewa W. Recommendation for the design of composite covers which protect the chassis of a rail vehicle.
- [61] Rachik M., Cheng P., Laksimi A. Ballast impact effect on fatigue resistance of composite based carbodyshells in railways.
- [62] Rojek M. Methodology of diagnostic testing of polymeric matrix laminate composite materials. *Open Access Library*, 2:1–148, 2011.
- [63] Vašíček M. Computational prediction of the mechanical properties of a 2d triaxially braided composite. *Journal of Middle European Construction and Design of Cars*, 12(2):10–16, 2015.
- [64] Saat M-R., Jacobini F., Tutumluer E., Barkan CPL. Identification of high-speed rail ballast flight risk factors and risk mitigation strategies. Raport instytutowy, 2015.
- [65] Marinack MC., Musgrave RE., Higgs III CF. Experimental investigations on the coefficient of restitution of single particles. *Tribology Transactions*, 56(4):572–580, 2013.
- [66] Ashby MF., Cwajna J., Ciszewski A., Radomski T., Wojciechowski S. *Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.
- [67] Benzeggagha ML., Khellil K., Chotard T. Experimental determination of tsai failure tensorial terms f_{ij} for unidirectional composite materials. *Composites science and technology*, 55(2):145–156, 1995.
- [68] Afnor: NF F07-101. Railway applications - shock test by throwing up ballast simulation. 2006.
- [69] Czarnocki P. Methods adopted for the determination of the interlaminar toughness of polymeric laminates. *Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne*, strony 77–99, 2010.

- [70] Rybak P., Borkowski W., Michałowski B., Hryciów Z. Badanie osłon ochronnych pojazdów specjalnych. *X Konferencja „Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania”*, strony 13–16, 2007.
- [71] Gautier P-E. Slab track: Review of existing systems and optimization potentials including very high speed. *Construction and Building Materials*, 92:9–15, 2015.
- [72] Bielawski R. Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych. 2016.
- [73] Grybós R. *Teoria uderzenia w dyskretnych układach mechanicznych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1969.
- [74] Hill R. *The mathematical theory of plasticity*, wolumen 11. Oxford university press, 1998.
- [75] Krueger R. Virtual crack closure technique: history, approach, and applications. *Appl. Mech. Rev.*, 57(2):109–143, 2004.
- [76] Pampuch R. Kompozyty ceramiczne. *Kompozyty (Composites)*, 2(3):10–14, 2002.
- [77] Piekarski R. Porównanie wybranych teorii sztywności kompozytów* frp. *KOMPOZYTY (COMPOSITES)*, 6:1, 2006.
- [78] Talreja R. *Fatigue of composite materials*. 1987.
- [79] Talreja R., Singh CV. *Damage and failure of composite materials*. Cambridge University Press, 2012.
- [80] Jones RM. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 1998.
- [81] Abrate S. *Impact on composite structures*. Cambridge University Press, 2005.
- [82] Bala S. Contact modelling in ls-dyna, part 2–contact parameters: Default and recommended values. *FEA Information International News. Livermore, CA: FEA Information Inc*, strony 6–11, 2001.
- [83] Heimbs S., Heller S., Middendorf P. Simulation of low velocity impact on composite plates with compressive preload. *Proceedings of The 7th German LS-DYNA Forum*, 2008.
- [84] Iikura S., Kawashima K., Endo T., Fujii T. Evaluation of snow accretions under the car body using the digital pictures. *RTRI report*, 16(8):47–52, 2002.
- [85] Mzali S., Elwasli F., Mkaddem A., Mezlini S. Fe modeling of wear mechanisms in ud-gfrp composites using single-indenter scratch test: A micromechanical approach. *Advances in Acoustics and Vibration*, strony 269–279. Springer, 2017.

- [86] Ochelski S., Bogusz P., Michałowski B., Hryciów Z. Zdolność pochłaniania energii różnych struktur konstrukcji energochłonnych. *X Konferencja „Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania”*, strony 13–16, 2007.
- [87] Ochlewski S. „metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych” wnt-warszawa 2004.
- [88] Anagnostopoulos S.A. Pounding of buildings in series during earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 16(3):443–456, 1988.
- [89] Bartlett SF., Neupane R. Seismic evaluation of expanded polystyrene (eps) geofam bridge support system for overpass structures. Raport instytutowy, 2017.
- [90] Khatami SM., Naderpour H., Barros RC, Jakubczyk-Gałczyńska A., Jankowski R. Effective formula for impact damping ratio for simulation of earthquake-induced structural pounding. *Geosciences*, 9(8):347, 2019.
- [91] Kim SS., Shin MW., Jang H. Tribological properties of short glass fiber reinforced polyamide 12 sliding on medium carbon steel. *Wear*, 274:34–42, 2012.
- [92] Tsai SW. Strength theories of filamentary structure. *Fundamental aspects of fiber reinforced plastic composites*, 1968.
- [93] Tsai SW., Wu EM. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of composite materials*, 5(1):58–80, 1971.
- [94] Goda T., Váradi K., Friedrich K., Giertzsch H. Finite element analysis of a polymer composite subjected to a sliding steel asperity part i normal fibre orientation. *Journal of materials science*, 37(8):1575–1583, 2002.
- [95] Phadnis VA., Pandya KS., Naik NK., Roy A., Silberschmidt VV. Ballistic damage in hybrid composite laminates. *Journal of Physics: Conference Series*, wolumen 628, strona 012092. IOP Publishing, 2015.
- [96] Królikowski W. *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa, Poland, 2012.
- [97] Oktaba W. *Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.