

Prof. dr hab. inż. Andrzej Buchacz, Dr hab. inż. Andrzej Baier, prof. nzw. w Pol. Śl., dr inż. Krzysztof Herbuś, dr inż. Piotr Ociepka, mgr inż. Łukasz Grabowski, mgr inż. Michał Sobek

Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, Polska

E-mail: andrzej.buchacz@polsl.pl, andrzej.baier@polsl.pl, krzysztof.herbus@polsl.pl,
piotr.ociepka@polsl.pl, lukasz.grabowski@polsl.pl, michal.sobek@polsl.pl

Badania porównawcze wielowarstwowych materiałów kompozytowych na potrzeby weryfikacji modelu paneli kompozytowych stosowanych do renowacji poszycia wagonów towarowych

Słowa kluczowe: materiały kompozytowe, metoda MES, modelowanie, próba zginania

Streszczenie: W pracy przedstawiono sposób postępowania przy modelowaniu wielowarstwowych materiałów kompozytowych z zastosowaniem oprogramowania PLM Siemens NX. Badania wirtualne odnosiły się do próby trójpunktowego i czteropunktowego zginania próbek kompozytowych. Rozważano materiały kompozytowe będące kompozycją żywicy epoksydowej ze wzmocnieniem włóknistym. W ramach prowadzonych badań przeprowadzono wirtualny eksperyment badania próbek kompozytowych będących kompozycją złożoną z 5, 7 i 10 warstw. Następnie dopasowano wirtualny model do wyników otrzymanych na drodze badań stanowiskowych. W wyniku dopasowania modelu materiału kompozytowego uzyskano poprawne wyniki wirtualnego eksperymentu zginania próbek kompozytowych. Zaprezentowany tok postępowania odnośnie modelowania materiału kompozytowego zastosowano do analizy MES pomniejszonego fragmentu zmodyfikowanej burty bocznej wagonu. Modyfikacja polegała na zastosowaniu paneli kompozytowych jako elementów wzmacniających poszycie wewnętrzne wagonu mających na celu wydłużenie jego czasu eksploatacji. Przedstawiony sposób modelowania umożliwił wstępną weryfikację wytrzymałościową zmodyfikowanego fragmentu burty bocznej wagonu towarowego.

1. Wprowadzenie

Konieczność zastosowania tworzyw kompozytowych jako materiałów konstrukcyjnych zmusza do stosowania modeli numerycznych opisujących ich struktury oraz własności. Materiały niejednorodne w skali mikro, takie jak kompozyty, mogą być także rozpatrywane w skali makro jako materiały jednorodne. Do określenia własności wypadkowych materiałów stosuje się min. zasadę mieszanin uwzględniającą objętość składników w całkowitej objętości. Możliwe jest także zastosowanie metod bazujących na aproksymacji niejednorodnego ciała czy też na zasadzie prac wirtualnych [1, 2, 14, 15, 17, 26].

W modelach bazujących na klasycznej teorii materiałów kompozytowych (teorii laminacji) przyjmuje się, że laminat składa się z warstw połączonych ze sobą w sposób nierozzerwalny, a połączenia posiadają nieskończenie małą grubość (mają grubość bliską 0) i nie zezwalają na ścinanie międzywarstwowe. Oznacza to, że odkształcenia przebiegające po grubości kompozytu są ciągłe i żadna warstwa nie może przemieszczać się względem innej. Kompozyt jako całość tworzy makroskopowo jedną warstwę o wartościach będących

wypadkową własności tworzących go warstw. W celu określenia wytrzymałości kompozytu warstwowego potrzebna jest znajomość naprężeń w poszczególnych jego warstwach. W tym celu stosuje się prawo Hooke'a uwzględniając wyznaczone wartości odkształceń. Do określenia zniszczenia modelowanych kompozytów powszechnie stosowane są także kryteria zniszczenia materiałów kompozytowych [3, 11, 12, 17, 29].

Własności kompozytów oraz poprawność stosowanych modeli może zostać zweryfikowana w trakcie przeprowadzanych eksperymentów. Eksperymenty te mogą zostać zrealizowane za pomocą metod niszczących jak i metod nieniszczących. Podczas badań niszczących w strukturze materiału kompozytowego zachodzą niepożądane i nieodwracalne zmiany. Ten aspekt często dyskwalifikuje daną metodę w procesie badawczym. W przypadku badań za pomocą metod nieniszczących obiekt badany nie ulega uszkodzeniu dzięki czemu możliwe jest uzyskanie kluczowych informacji. W procesie badawczym dotyczącym materiałów kompozytowych kluczowymi wartościami są przemieszczenia i naprężenia [3, 11, 12, 17, 27].

Zarówno metody niszczące jak i nieniszczące stosuje się w celu weryfikacji otrzymywanych wyników badań numerycznych. Stosowane są min. metody bazujące na tensometrii oporowej oraz optycznej, metody zginania, zrywania oraz udarności. Ponadto metody nieniszczące stosowane są do analizy wystąpienia uszkodzeń w strukturze kompozytu. Do bardziej wyrafinowanych metod zaliczyć można metody termowizyjne, ultradźwiękowe, radiologiczne oraz badania wizualne [11, 13, 26, 27, 29].

Proces modelowania i weryfikacji elementów wykonywanych z włóknistych materiałów kompozytowych może być wspomagany poprzez analizy numeryczne z zastosowaniem metody elementów skończonych. Podczas modelowania laminatu z zastosowaniem MES wyróżnia się dwa podstawowe podejścia. W pierwszym z nich pod uwagę brana jest wewnętrzna struktura obiektu badanego z uwzględnieniem liczby warstw. Także rozważany jest rodzaj i splot wzmocnienia oraz stopień przesylenia żywicą. Brane pod uwagę są także własności poszczególnych składowych laminatu, czyli własności osnowy oraz pojedynczych pasm tkaniny. Zastosowanie tej metody prowadzi do uzyskania modeli o dużej liczbie zmiennych oraz dużej liczbie stopni swobody. Ze względu na złożoność zagadnienia oraz ograniczoną moc obliczeniową metoda ta znajduje zastosowanie w analizie stosunkowo niewielkich elementów charakteryzujących się nieskomplikowaną postacią geometryczną. W odniesieniu do większych elementów o większej złożoności kształtu obliczenia przeprowadza się na podstawie analizy własności wycinka kompozytu. Na tym etapie wyznaczane są zastępcze stałe materiałowe, które następnie wprowadza się dla całego modelu. W tym przypadku model tworzony jest za pomocą elementów bryłowych o nadanych własnościach materiału kompozytowego. W efekcie bryłom nadawane są specjalne własności zastępcze, charakterystyczne dla uprzednio badanego wycinka, bez wnikania w strukturę wewnętrzną materiału kompozytowego. [2, 10, 12, 16, 20, 23, 25, 26].

Do opisu struktury materiału kompozytowego za pomocą siatki elementów skończonych stosuje się dwie metody. W pierwszej z nich elementom powierzchniowym typu 2W nadawane są parametry mechaniczne oraz wirtualny parametr grubości. W drugiej metodzie stosowane są elementy przestrzenne 3W, dla których znana jest grubość. Następnie jest ona dzielona na liczbę warstw w odniesieniu do których nadawane są własności laminatu. W obu metodach uwzględnia się udziały objętościowe komponentów oraz liczbę warstw i ich orientację względem siebie. Stałe materiałowe określane są za pomocą eksperymentu lub dostarczane są przez producenta danego tworzywa [2, 10, 12, 16, 19, 20, 23, 25, 26, 28].

Podstawowym celem prowadzonych prac badawczych była weryfikacja numerycznych obliczeń wytrzymałościowych w odniesieniu do analizy płyt kompozytowych zastosowanych do renowacji poszycia pudła wagonów towarowych. W pierwszym kroku poddano weryfikacji wytrzymałościowej proste modele MES, aby sprawdzić zbieżność

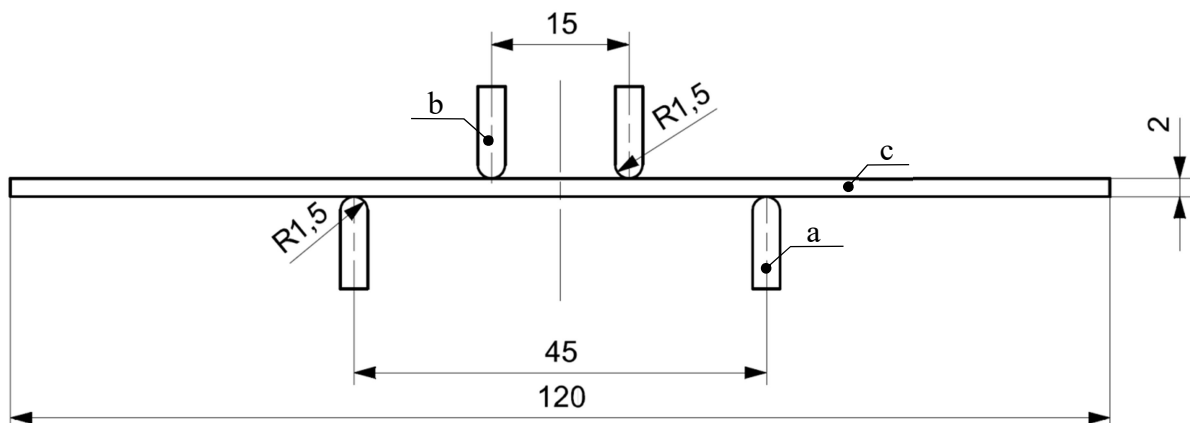
wyników z analiz numerycznych i doświadczalnych. Do porównania i weryfikacji wyników wykorzystano badania eksperymentalne wykonane na maszynie wytrzymałościowej. Były to testy wytrzymałościowe w odniesieniu do próbek kompozytowych poddanych próbie trójpunktowego i czteropunktowego zginania. Następnie utworzono odpowiadające badaniom doświadczalnym modele MES. Weryfikacja wyników pozwoliła na dopasowanie (modyfikację) modeli numerycznych MES w celu uzyskania zbieżnych wyników. W kolejnym etapie przeprowadzono weryfikację wytrzymałościową w odniesieniu do paneli montowanych na burcie wagonu towarowego. Zaplanowano, że wyniki numeryczne będą weryfikowane na stanowisku badawczym zbudowanym w celu prowadzenia badań zachowania się paneli kompozytowych na poszyciu wagonu. W tym celu przeprowadzono analizę numeryczną MES, która pozwoliła wstępnie oszacować oczekiwane wartości naprężeń i przemieszczeń oraz zidentyfikować miejsca w których zamocowane będą czujniki pomiarowe do analizy doświadczalnej. W kolejnym kroku przeprowadzono analizę wytrzymałościową na utworzonym stanowisku badawczym z zastosowaniem tensometrii oporowej i czujników przemieszczenia. Na podstawie doświadczeń zdobytych podczas dopasowywania modeli numerycznych w odniesieniu do prostych testów wytrzymałościowych, dopasowano model MES burty bocznej wagonu towarowego w celu uzyskania wyników zbieżnych do badań na stanowisku. Dopasowane modele stanowią podstawę do prowadzenia dalszych badań związanych z realizowanym projektem.

2. Wyniki badań eksperymentalnych próbek wykonanych z materiału kompozytowego

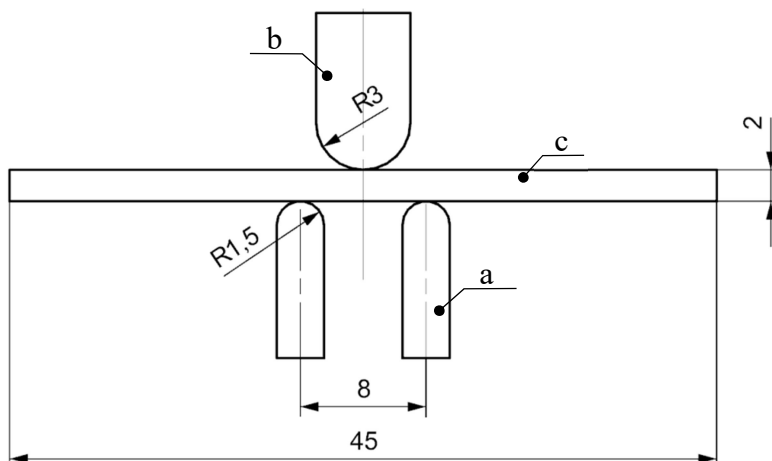
Badania eksperymentalne próbek kompozytowych obejmowały dwa rodzaje prób wytrzymałościowych związanych ze zginaniem:

- badanie wytrzymałościowe na zginanie czteropunktowe próbek wykonanych z żywicy epoksydowej ze wzmocnieniem z włókien węglowych,
- badanie wytrzymałościowe próbek wykonanych z żywicy epoksydowej ze wzmocnieniem z włókien węglowych podczas próby trójpunktowego zginania.

Badania doświadczalne prowadzone były przez Akademię Techniczno-Humanistyczną w Bielsku-Białej w ramach prowadzonego projektu badawczego, natomiast autorzy zajmowali się prowadzeniem analiz numerycznych z zastosowaniem metody elementów skończonych. Na rys. 1 przedstawiono schemat obciążenia i podparcia badanych próbek w odniesieniu do przeprowadzonych prób czteropunktowego zginania. Natomiast na rys. 2 przedstawiono schemat obciążenia i podparcia badanych próbek w odniesieniu do przeprowadzonych prób trójpunktowego zginania.

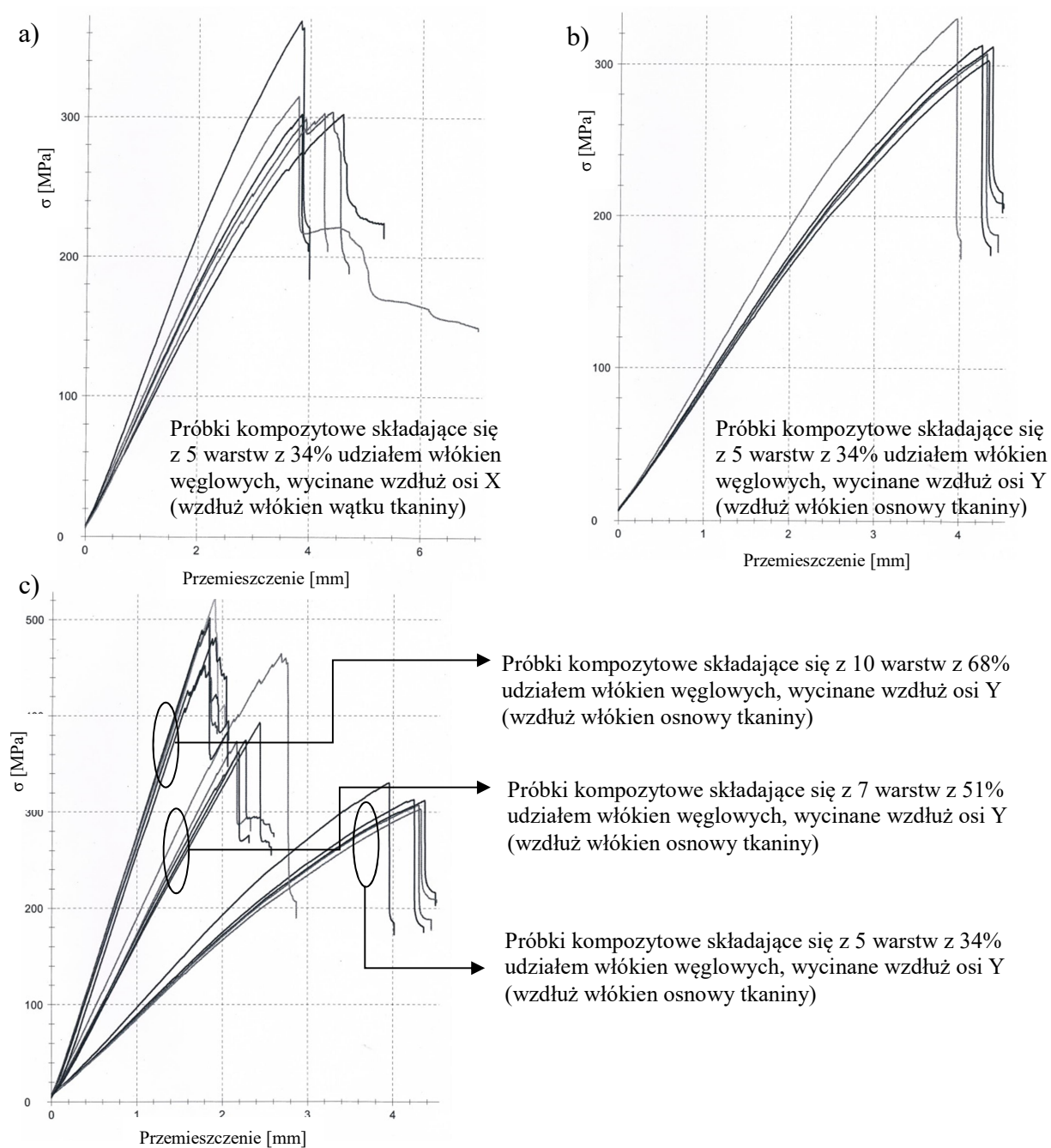


Rys. 1. Schemat podparcia i obciążenia próbek poddanych próbie czteropunktowego zginania:
a – podpora, b – stempel, c – badana próbka



Rys. 2. Schemat podparcia i obciążenia próbek w próbie trójpunktowego zginania:
a – podpora, b – stempel, c – badana próbka

Badania wytrzymałościowe laminatów poddanych próbie czteropunktowego zginania dotyczyły próbek o wymiarach 120 mm x 20 mm x 2 mm. Natomiast badania wytrzymałościowe laminatów poddanych próbie trójpunktowego zginania dotyczyły próbek o wymiarach 45 mm x 4 mm x 2 mm. Grubość badanych próbek mieściła się w zakresie od 2 do 2,25 mm, a szerokość w zakresie od 20 do 20,15 mm. Badania eksperymentalne na maszynie wytrzymałościowej w obu przypadkach dotyczyły próbek wyciętych z płyt kompozytowych wykonanych z żywicy epoksydowej i tkaniny węglowej ze splotem prostym typu „plain”. Panele kompozytowe zostały wykonane w procesie seryjnej produkcji metodą infuzji, gwarantującą uzyskanie założonego stosunku zbrojenia do osnowy. Do badań wybrane zostały panele w 3 wariantach objętościowego udziału włókien węglowych (34%, 51% i 68%). Współczynnik wpływu włókien osnowy w stosunku do włókien wątku wynosił 0.5. Próbkę wycinane były w trzech kierunkach: w kierunku zgodnym z kierunkiem ułożenia włókien osnowy tkaniny węglowej, w kierunku zgodnym z kierunkiem ułożenia włókien wątku tkaniny węglowej i pod kątem 45° w odniesieniu do włókien osnowy tkaniny węglowej. Analizy dotyczyły również próbek wycinanych z płyt kompozytowych stanowiących kompozycję złożoną z żywicy epoksydowej i włókien węglowych ułożonych w jednym kierunku wykonanych w 3 wariantach procentowego udziału włókien węglowych (38%, 51% i 68%). W tym przypadku próbki były wycinane zgodnie z kierunkiem ułożenia włókien i pod kątem 90° w stosunku do kierunku ułożenia włókien w warstwie. Wszystkie warstwy w obrębie struktury materiału kompozytowego danej próbki miały ten sam kąt ułożenia. Wymienione próby wytrzymałościowe przeprowadzone były zgodnie z normą badawczą ASTM D 6272-02 przy prędkości ruchu stempli obciążających równej 2 mm/min.



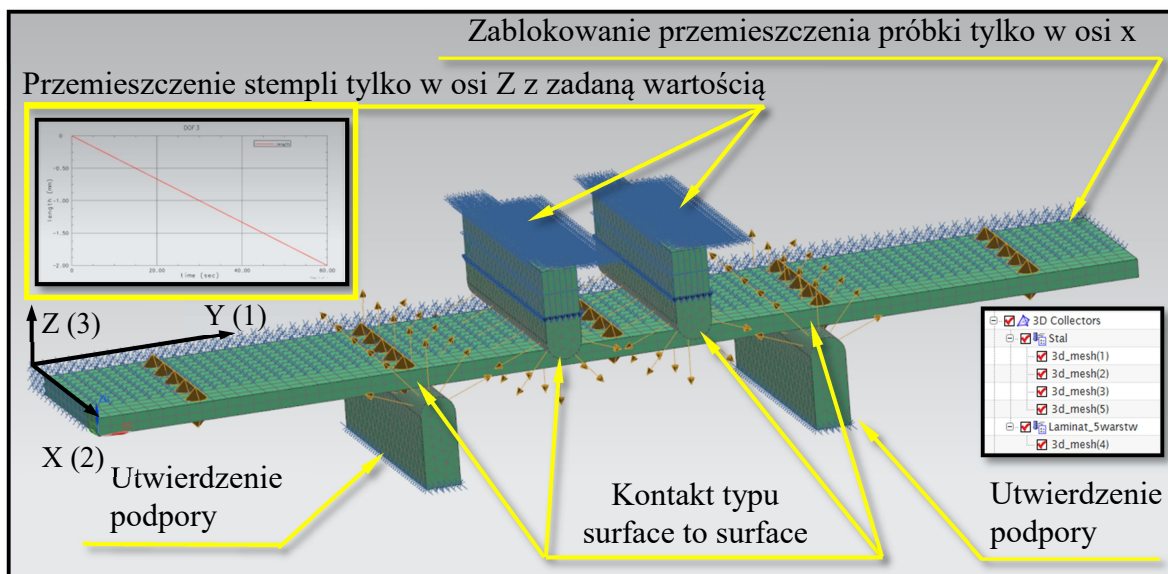
Rys. 3. Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych próbek kompozytowych w odniesieniu do próby czteropunktowego zginania

Na rys. 3. przedstawiono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych, próbek kompozytowych, w odniesieniu do próby czteropunktowego zginania. Na rys. 3a i 3b zamieszczono wyniki próby zginania próbek kompozytowych będących kompozycją składającą się z 5 warstw, gdzie każda warstwa stanowi połączenie żywicy epoksydowej i włókna węglowego ze splotem płóciennym, przy założeniu 34% udziału włókien węglowych w strukturze kompozytu. Na rys. 3a przedstawiono wyniki badań w odniesieniu do próbek wycinanych wzdłuż osi zgodnej z osią ułożenia włókien wątku tkaniny węglowej, natomiast na rys. 3b zaprezentowano wyniki badań w odniesieniu do próbek wycinanych wzdłuż osi zgodnej z osią ułożenia włókien osnowy tkaniny węglowej. Na rys. 3c zebrano wyniki badań w odniesieniu do próbek kompozytowych będących kompozycją składającą się

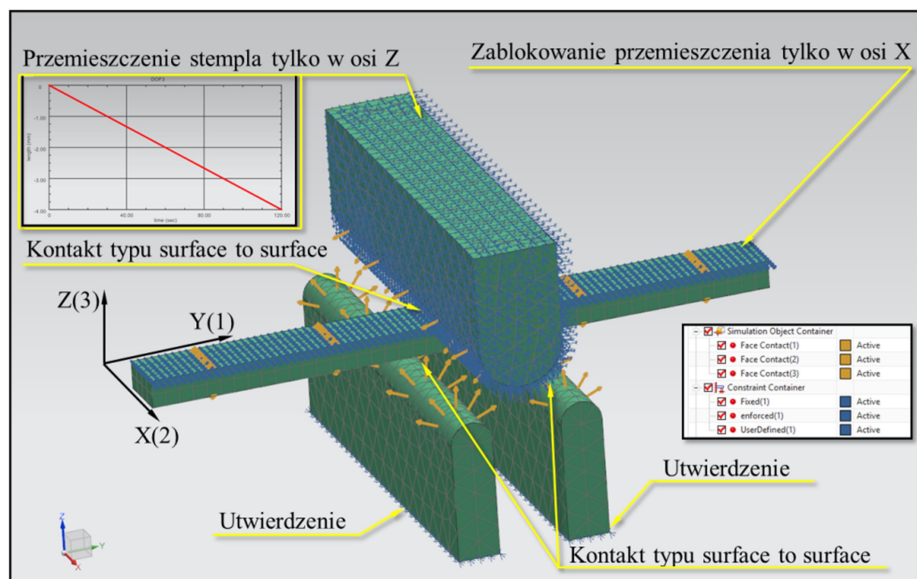
z 5, 7 i 10 warstw, gdzie każda warstwa stanowi połączenie żywicy epoksydowej i włókna węglowego ze splotem płóciennym, przy założeniu odpowiednio do liczby warstw 34%, 51% i 68% udziału włókien węglowych w strukturze kompozytu. Analizując prezentowane wyniki można zauważyć, że w przypadku próbek wyciętych wzdłuż osi włókien wątku tkaniny otrzymano wartości naprężeń o ok. 10% większe w stosunku do próbek z identycznego materiału kompozytowego wyciętych wzdłuż osi włókien osnowy tkaniny, przy tej samej wartości przemieszczenia stempli. Natomiast w odniesieniu do wyników badań próbek kompozytowych składających się z 5, 7 i 10 warstw z odpowiednio 34%, 51% i 68% objętościowym udziałem włókna węglowego, można zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby warstw i procentowego udziału włókien tkaniny w strukturze kompozytu, wzrasta wartość zarejestrowanych naprężeń w próbce przy tej samej wartości przemieszczenia stempli. Na rys. 3c można zaobserwować trzy rozdzielne obszary charakterystyk wytrzymałościowych w zależności od liczby warstw i procentowego udziału włókien.

3. Wirtualne modelowanie testu trójpunktowego i czteropunktowego zginania próbek z zastosowaniem metody elementów skończonych

W celu odwzorowania testu próby zginania trójpunktowego i czteropunktowego w pierwszej kolejności utworzono modele stanowisk testowych wraz z badaną próbką w systemie PLM Simens NX10. Następnie tak utworzone modele bryłowe poddano procesowi dyskretyzacji przez nałożenie siatki elementów skończonych na poszczególne jego elementy. W kolejnym kroku zdefiniowano warunki brzegowe w taki sposób aby badania wirtualne odzwierciedlały badania na rzeczywistym stanowisku badawczym.



Rys. 4. Model MES ze zdefiniowanymi warunkami brzegowymi i wymuszeniem w odniesieniu do prób wytrzymałościowych przy zginaniu czteropunktowym



Rys. 5. Model MES ze zdefiniowanymi warunkami brzegowymi i wymuszeniem w odniesieniu do prób wytrzymałościowych przy zginaniu trójpunktowym

W modelach przygotowanych do analizy MES zdefiniowano następujące warunki brzegowe (rys. 4 i 5): utwardzenie podpór, kontakt typu „surface to surface” pomiędzy badaną próbką a podporami i stemplami, odebranie jednego stopnia swobody próbce związanego z możliwością przemieszczania się wzdłuż osi X, wymuszenie przemieszczania stempli tylko wzdłuż osi Z. Zastosowany typ kontaktu zapewnia możliwość przemieszczania się względem siebie zdyskretyzowanych modeli próbki, podpór i stempli – co jest warunkiem koniecznym aby w prawidłowy sposób odwzorować charakter przemieszczenia badanej próbki. W eksperymencie wirtualnym wymuszenie zdefiniowano jako przemieszczenie stempli w kierunku osi Z z prędkością 2 mm/min. Zastosowane wymuszenie w formie przemieszczenia odzwierciedla ruch rzeczywistych stempli maszyny wytrzymałościowej.

Kolejnym etapem prowadzonych badań było odwzorowanie postaci tworzywowej próbek wykonanych z materiałów kompozytowych poddanych testom wytrzymałościowym na maszynie wytrzymałościowej. Wirtualne badania obejmowały analizy wytrzymałościowe, z zastosowaniem metody elementów skończonych, próbek będących kompozycją złożoną z żywicy epoksydowej i włókna węglowego, o splocie prostym oraz kompozycją złożoną z żywicy epoksydowej i włókien węglowych jednokierunkowych. Przy czym rozpatrywano materiał kompozytowy składający się z 5, 7 i 10 warstw. W celu zdefiniowania materiału kompozytowego w oprogramowaniu PLM Siemens NX 10 w pierwszej kolejności opisano jego pojedynczą warstwę. Bazując na danych pochodzących od producenta w odniesieniu do zastosowanego typu osnowy i włókna zdefiniowano następujące podstawowe warstwy laminatu materiału kompozytowego: 34_Woven_2W_90, 38_Woven_1W, 51_Woven_2W_90, 51_Woven_1W, 68_Woven_2W_90, 68_Woven_1W. W przyjętym oznaczeniu wartości 34, 38, 51 i 68 określają objętościowy stosunek włókna węglowego do żywicy epoksydowej. Co oznacza, że procentowy udział włókna węglowego w jednej warstwie materiału kompozytowego wynosi odpowiednio 34%, 38%, 51% i 68%. Nazwa Woven_2W_90 oznacza zastosowanie w warstwie tkaniny węglowej ze splotem płóciennym, w której włókna wiatku i osnowy plecione są w dwóch kierunkach pod kątem 90°. Natomiast nazwa Woven_1W oznacza zastosowanie w warstwie włókna węglowego ułożonego w jednym kierunku. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry w odniesieniu do komponentów składowych pojedynczej warstwy, natomiast w tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry w odniesieniu do pojedynczych warstw materiału kompozytowego.

Tab. 1. Zestawienie podstawowych parametrów w odniesieniu do komponentów pojedynczej warstwy materiału kompozytowego

Żywica epoksydowa	Włókno węglowe HTA40
gęstość – 1300 kg/m ³	gęstość – 1770 kg/m ³
moduł Younga – 3000 MPa	moduł Younga – 240000 MPa
liczba Poissona – 0,37	liczba Poissona – 0,22

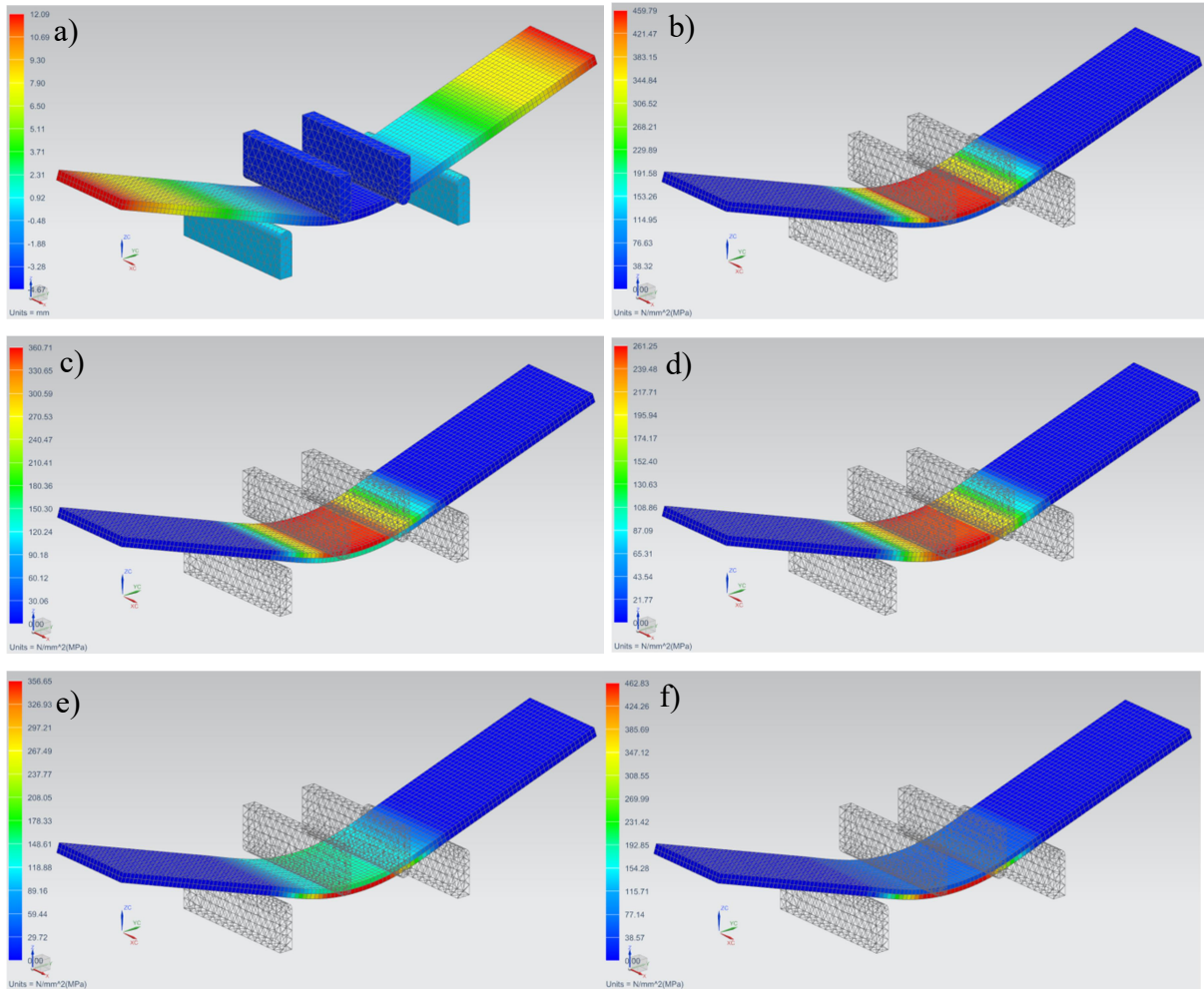
Tab. 2. Zestawienie podstawowych parametrów w odniesieniu do przykładowych pojedynczych warstw materiału kompozytowego

Warstwa 34 Woven 2W 90	Warstwa 38 Woven 1W
materiał osnowy – żywica epoksydowa	materiał osnowy – żywica epoksydowa
udział objętościowy materiału osnowy – 0,66	udział objętościowy materiału osnowy – 0,62
materiał włókna osnowy – włókno węglowe	rodzaj włókna – włókno węglowe
materiał włókna wążku – włókno węglowe	udział objętościowy włókien – 0,38
udział objętościowy włókien – 0,34	moduł Younga E ₁ – 93060 MPa
waga wpływu włókien osnowy i wążku – 0,5	moduł Younga E ₂ – 4802 MPa
kąt ułożenia włókien względem siebie – 90°	moduł Younga E ₃ – 4802 MPa
moduł Younga E ₁ – 44240 MPa	liczba Poissona ν_{12} – 0,313
moduł Younga E ₂ – 44240 MPa	liczba Poissona ν_{13} – 0,313
moduł Younga E ₃ – 3000 MPa	liczba Poissona ν_{23} – 0,37
liczba Poissona ν_{12} – 0,032	moduł ścinania G ₁₂ – 1754 MPa
liczba Poissona ν_{13} – 0,345	moduł ścinania G ₁₃ – 1754 MPa
liczba Poissona ν_{23} – 0,345	moduł ścinania G ₂₃ – 1095 MPa
moduł ścinania G ₁₂ – 1649 MPa	gęstość – 1479 kg/m ³
moduł ścinania G ₁₃ – 1047 MPa	
moduł ścinania G ₂₃ – 879 MPa	
gęstość – 1460 kg/m ³	

Kolejnym etapem modelowania materiału kompozytowego jest odwzorowanie kompozycji materiału kompozytowego badanych próbek. W tym celu zdefiniowano następujące kompozycje (struktury materiału kompozytowego): SL-0_90-34-5warstw, SL-45_45-34-5warstw, SL-0_1W(Y)-38-5warstw, SL-90_1W(X)-38-5warstw, SL-0_90-51-7warstw, SL-45_45-51-7warstw, SL-0_1W(Y)-51-7warstw, SL-90_1W(X)-51-7warstw, SL-0_90-68-10warstw, SL-45_45-68-10warstw, SL-0_1W(Y)-68-10warstw, SL-90_1W(X)-68-10warstw. Łącznie zdefiniowano 12 kompozycji materiału kompozytowego.

Ogólny sposób zapisu utworzonych struktur materiałów kompozytowych z zastosowaniem warstw typu Woven_2W_90 można zapisać w następujący sposób: SL-A_B-C-D. W przyjętym sposobie zapisu symbol SL oznacza, że daną strukturę utworzono jako strukturę laminatu bryłowego, symbol A oznacza miarę kąta ułożenia włókien osnowy warstwy względem głównego kierunku ułożenia włókien, symbol B oznacza miarę kąta ułożenia włókien wążku warstwy względem głównego kierunku ułożenia włókien (kąt pomiędzy włóknami wążku i osnowy w warstwie zawsze równa się 90°), symbol C oznacza procentowy udział włókien w warstwie, symbol D oznacza liczbę warstw w utworzonej strukturze. Natomiast w odniesieniu do struktur materiałów kompozytowych tworzonych z zastosowaniem warstw typu Woven_1W można zapisać w następujący sposób: SL-

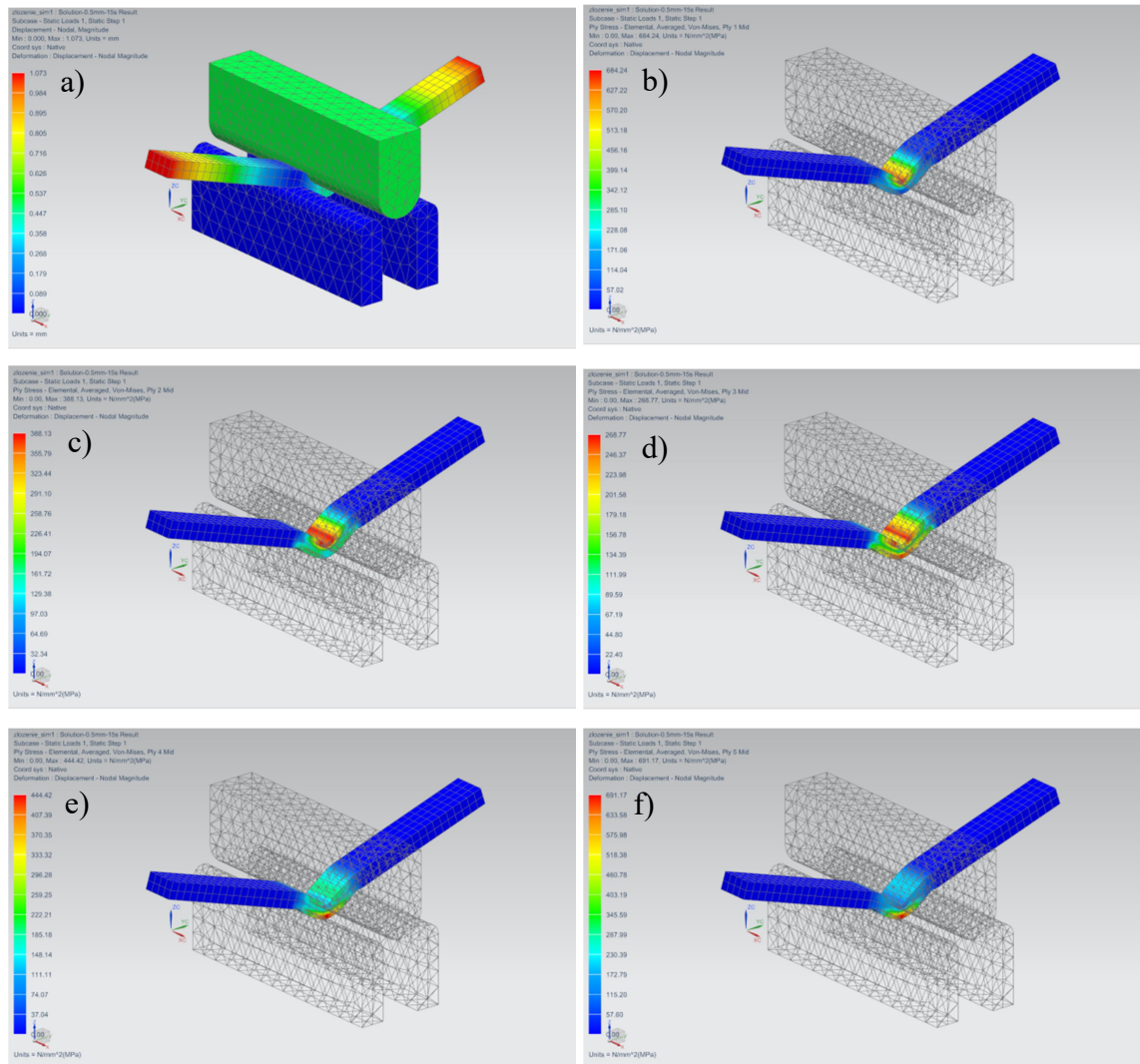
E_F(G)-H-I, gdzie symbol E oznacza kąt ułożenia jednokierunkowych włókien w warstwie względem głównego kierunku ułożenia włókien, symbol F oznacza zastosowanie włókien jednokierunkowych, symbol G oznacza sposób odniesienia ułożenia włókien w warstwie do bezwzględnego układu współrzędnych występującego w modelu, symbol H oznacza procentowy udział włókien w warstwie, symbol I oznacza liczbę warstw kompozycji laminatu.



Rys. 6. Przykładowe wyniki wirtualnego eksperymentu (próba zginania czteropunktowego) z zastosowaniem metody elementów skończonych w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-34-5warstw: a) mapa przemieszczenia, b) mapa naprężeń zredukowanych w pierwszej warstwie, c) mapa naprężeń zredukowanych w drugiej warstwie, d) mapa naprężeń zredukowanych w trzeciej warstwie, e) mapa naprężeń zredukowanych w czwartej warstwie, f) mapa naprężeń zredukowanych w piątej warstwie

Badania wytrzymałościowe próbek kompozytowych z zastosowaniem metody elementów skończonych miały na celu dopasowanie modelu wirtualnego do obiektu rzeczywistego. Dopasowanie to jest niezbędne w celu implementacji własności badanego modelu na inne modele elementów wykonanych z materiałów kompozytowych zastosowanych w konkretnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Model wirtualny dopasowywano do obiektu rzeczywistego poprzez zmianę takich parametrów jak: wielkość elementu skończonego, stopień dopasowania siatki elementów skończonych do postaci geometrycznej modelu bryłowego próbki oraz moduł Younga.

Zdefiniowane w utworzonym modelu warunki brzegowe oraz forma wymuszenia umożliwiły uzyskanie charakteru odkształcenia badanej próbki zgodnego z charakterem odkształcenia rzeczywistej próbki podczas próby zginania czteropunktowego (rys. 6) i trójpunktowego (rys. 7). Na podstawie przeprowadzonego wirtualnego eksperymentu zginania próbek wykonanych z materiału kompozytowego wyznaczono wartości przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w odniesieniu do każdej jego warstwy.



Rys. 7. Przykładowe wyniki wirtualnego eksperymentu (próba trójpunktowego zginania) z zastosowaniem metody elementów skończonych w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-34-5warstw: a) mapa przemieszczenia, b) mapa naprężeń zredukowanych w pierwszej warstwie, c) mapa naprężeń zredukowanych w drugiej warstwie, d) mapa naprężeń zredukowanych w trzeciej warstwie, e) mapa naprężeń zredukowanych w czwartej warstwie, f) mapa naprężeń zredukowanych w piątej warstwie

Na rys. 6 i 7 przedstawiono wyniki analiz z zastosowaniem metody elementów skończonych dopasowanego materiału kompozytowego, będącego kompozycją pięciu warstw, oznaczonego SL-0_90-34-5warstw. Zaprezentowane rysunki przedstawiają mapy przemieszczenia próbki (a), mapy naprężeń zredukowanych występujących w warstwie 1 (b), 2 (c), 3 (d), 4 (e) 5 (f). Wynikiem przeprowadzonego wirtualnego eksperymentu są również mapy wartości wszystkich składowych naprężeń (11(YY), 22(XX), 33(ZZ), 12(YX), 13(YZ), 23(XZ) – zgodnie z przyjętym globalnym układem współrzędnych przedstawionym na rys. 4),

i odkształceń co pozwala w precyzyjny sposób określić wpływ przyjętego obciążenia i warunków brzegowych na założony materiał kompozytowy badanej próbki.

Tab. 3. Przykładowe wyniki wirtualnego eksperymentu dotyczącego analizowanych próbek (próba zginania czteropunktowego)

Oznaczenie materiału	Przem. próbki [mm]	Warstwa nr 1 (σ [MPa])			Warstwa środkowa nr 3, 4 lub 5 (σ [MPa])			Warstwa ostatnia nr 5, 7 lub 10 (σ [MPa])		
		σ_{zred}	σ_{11max}	σ_{11min}	σ_{zred}	σ_{11max}	σ_{11min}	σ_{zred}	σ_{11max}	σ_{11min}
SL-1, t_1	12,1; -4,6	460	48,9	-482,7	261	254,4	-261	463	472	-55,3
SL-2, t_2	7,2; -2,9	420	30,7	-442,8	225	221,8	-224,9	419	424,5	-33,7
SL-3, t_3	5,6; -2,3	455	22	-480	257	207,5	-257,2	450	454,2	-26,4

W tabeli 3 zestawiono przykładowe wyniki analizy MES próbki kompozytowej, gdzie 1 oznacza 0_90-34-5warstw, 2 – 0_90-51-7warstw, 3 – 0_90-68-10warstw, t_1 – 120 s, t_2 – 75 s, t_3 – 60 s.

Tab. 4. Porównanie wyników z analizy MES i z próby zginania czteropunktowego w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-34-5warstw (udział objętościowy tkaniny 34%)

Przemieszczenie stempli [mm]	Czas [s]	Wartość maksymalna naprężeń (analiza MES)	Wartości naprężeń (próba zginania)		Błąd względny
			Zakres	Średnia	
		[MPa]	[MPa]		
0,5	15	55	40 – 50	45	18%
1,0	30	112	80 – 100	90	19%
1,5	45	169	125 – 142	133,5	21%
2,0	60	228	165 – 195	180	21%
2,5	75	287	205 – 238	221,5	23%
3,0	90	347	218 – 270	244	29%

Tab. 5. Porównanie wyników z analizy MES i próby zginania czteropunktowego w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-51-7warstw (udział objętościowy tkaniny 51%)

Przemieszczenie stempla [mm]	Czas [s]	Wartość maksymalna naprężeń (analiza MES)	Wartość maksymalna naprężeń (próba zginania)		Błąd względny
			Zakres	Średnia	
		[MPa]	[MPa]		
0,5	15	83	80 – 95	87,5	5%
1,0	30	167	165 – 190	177,5	6%
1,5	45	252	245 – 290	267,5	6%
2,0	60	339	320 – 380	350	3%

Tab. 6. Porównanie wyników z analizy MES i próby zginania czteropunktowego w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-68-10warstw (udział objętościowy tkaniny 68%)

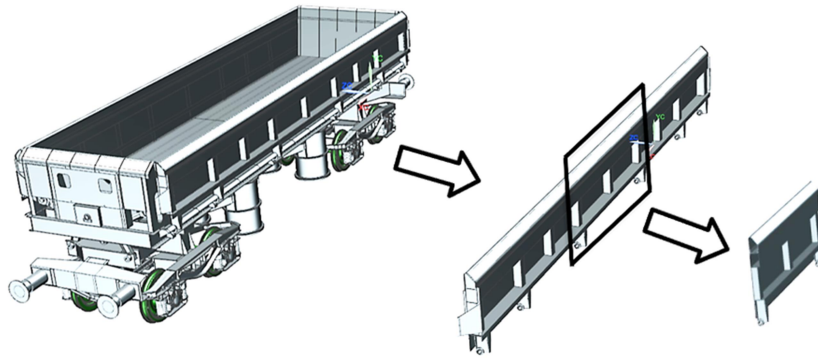
Przemieszczenie stempla [mm]	Czas [s]	Wartość maksymalna naprężeń (analiza MES)	Wartość maksymalna naprężeń (próba zginania)		Błąd względny
			Zakres	Średnia	
		[MPa]	[MPa]		
0,5	15	113	120 – 140	130	15%
1,0	30	227	260 – 270	265	17%
1,5	45	343	390 – 420	405	18%

W tabelach 4 – 6 zestawiono porównanie wyników uzyskanych na podstawie analizy MES i próby zginania czteropunktowego. Najlepszy stopień dopasowania uzyskano w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-51-7warstw (udział objętościowy tkaniny 51%). W tym przypadku maksymalny błąd względny sięgał 6%. W przypadku materiału kompozytowego SL-0_90-68-10warstw (udział objętościowy tkaniny 68%) maksymalny błąd względny wyniósł 18%. Natomiast w odniesieniu do materiału kompozytowego SL-0_90-34-5warstw (udział objętościowy tkaniny 34%) uzyskano maksymalny błąd względny równy 29%. Należy jednak zaznaczyć, że materiał SL-0_90-34-5warstw charakteryzował się dużą nieliniowością charakterystyki naprężeń występujących w próbce w funkcji przemieszczenia stempla w zakresie przemieszczeń większych od 2 mm. We wszystkich analizowanych przypadkach, w modelu MES, uwzględniono ten sam stopień dopasowania siatki do postaci geometrycznej próbki i pozostałych elementów modelu, tę samą wielkość elementu skończonego i te same własności materiałowe.

5. Zastosowanie modelu materiału kompozytowego do analizy wytrzymałościowej pomniejszonego fragmentu burty bocznej wagonu

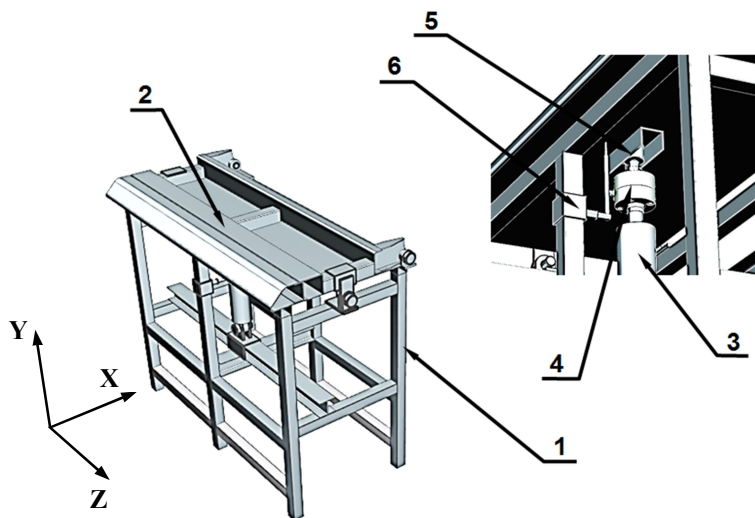
W ramach prowadzonych badań [4 – 9, 18, 21, 22, 24] przez zespół badawczy w zakresie realizacji projektu mającego na celu wydłużenie czasu eksploatacji wagonów towarowych rozpatrywano zastosowanie okładziny wewnętrznej powierzchni pudła wagonu w formie paneli kompozytowych zbrojonych włóknami. Czas eksploatacji wagonu uzależniony jest od stanu poszycia jego pudła, które wykonywane jest z blachy. Uszkodzenie burty bocznej wagonu może nastąpić w wyniku: mechanicznego oddziaływania przewożonego ładunku na blachę wagonu, mechanicznego oddziaływania elementów wykonawczych maszyn ładujących i rozładowujących oraz chemicznego oddziaływania agresywnych substancji zawartych w transportowanym ładunku. W wyniku wymienionych oddziaływań w blasze może wystąpić odkształcenie o charakterze plastycznym oraz miejscowe ubytki w jej grubości. Wymienione zagrożenia w odniesieniu do eksploatacji wagonów towarowych były podstawą doboru materiału kompozytowego zbrojonego włóknami. Jako osnowę zastosowano żywicę epoksydową, natomiast w odniesieniu do włókien rozpatrywano zastosowanie włókna szklanego i węglowego.

W związku z potrzebą przeprowadzenia badań zmodyfikowanego poszycia pudła wagonu wyodrębniono fragment burty bocznej wagonu samowyladowczego typu 418V (rys. 8). Zastosowany sposób wyodrębnienia miał zapewnić możliwość fizycznego wykonania stanowiska badawczego (rys. 9 i rys. 11) i usprawnić proces wykonywania numerycznych analiz wytrzymałościowych oraz ich walidacji.



Rys. 8. Wybrany fragment burty analizowanego wagonu [6]

Na potrzeby prowadzonych badań zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, którego podstawowe elementy przedstawiono na rysunku 9. Stanowisko składa się z ramy nośnej 1 do której zamocowano fragment burty bocznej 2. W dolnej części ramy zamocowano siłownik hydrauliczny 3, który oddziałuje siłą na analizowany fragment burty. Do tłoczyska siłownika przykręcony jest wymienny element dociskowy 4, który dociska do poszycia burty. Wymiana długości i szerokości tego elementu pozwala uzyskiwać różne rodzaje obciążeń (punktowe, powierzchniowe). Opracowano także układ sterowania, który umożliwia płynną regulację siły wymuszenia w zakresie 0 do 30 kN. Dodatkowo siłownik można płynnie przemieszczać w płaszczyźnie X Z, co umożliwi generowanie obciążenia w różnych obszarach burty.

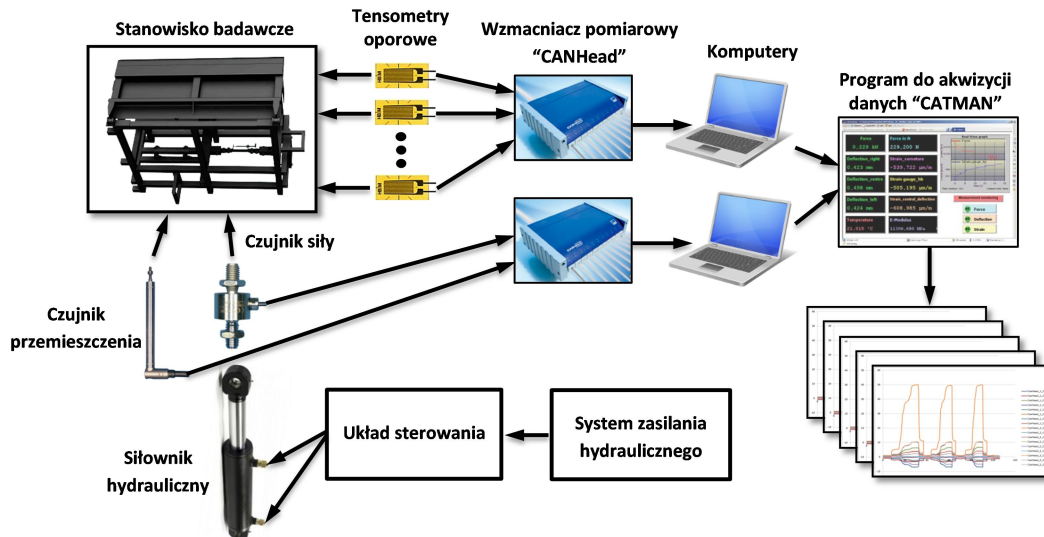


Rys. 9. Model CAD stanowiska do badań [6]

Opracowane stanowisko badawcze uzbrojono w system czujników niezbędnych do przeprowadzenia zaplanowanego cyklu badań. Założono, że analizowany będzie stan naprężeń i przemieszczeń na burcie przed i po zamontowaniu paneli kompozytowych. Do pomiaru odkształceń zastosowano tensometry oporowe o rezystancji 120 Ω . Do pomiaru siły wymuszenia zastosowano przetwornik siły (U2B firmy HBM), który zamocowano na tłoczysku siłownika hydraulicznego. Do pomiaru przemieszczenia burty zastosowano przetwornik przemieszczenia (WA-T firmy HBM) za pomocą którego mierzono przemieszczenia badanego fragmentu burty pod wpływem zadanego wymuszenia.

W celu akwizycji danych i wizualizacji wyników opracowano i zbudowano tor pomiarowy (rys. 10). Sygnały z tensometrów oporowych przesyłano poprzez wzmacniacz

wielokanałowy CANHED do komputera, na którym zainstalowano aplikację CATMAN. Aplikacja ta służy do wizualizacji i akwizycji danych pomiarowych. Uzyskane pakiety danych zapisano w formacie zgodnym z oprogramowaniem MS Excel, a następnie wygenerowano wykresy w odniesieniu do analizowanych wielkości. Analogicznie mierzono i analizowano wartości siły i przemieszczenia. Sygnały z przetwornika przemieszczenia i przetwornika siły przesyłano poprzez wzmacniacz wielokanałowy QuantumX do komputera i za pomocą aplikacji CATMAN zapisano uzyskane pakiety danych.



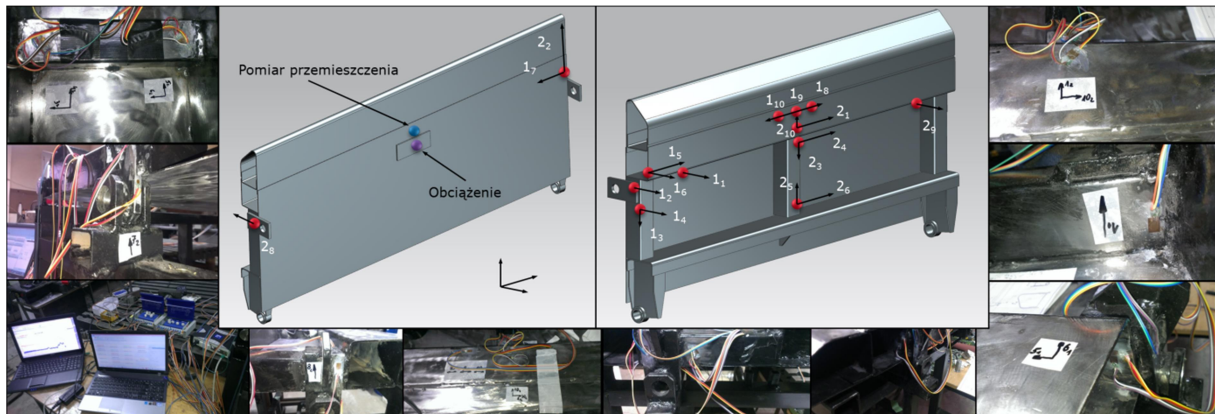
Rys. 10. Tor pomiarowy opracowanego stanowiska [6]

W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę MES pomniejszonego fragmentu burty bocznej wagonu w celu określenia miejsc, w których należy spodziewać się istotnych wartości naprężeń w odniesieniu do obiektu rzeczywistego.



Rys. 11. Model CAD i układ rzeczywisty stanowiska do badań

Następnie w miejscach tych naklejono tensometry na stanowisku badawczym (rys. 12) i dopasowywano model burty bocznej wagonu do obiektu rzeczywistego [6].



Rys. 12. Punkty pomiarowe na analizowanym fragmencie burty

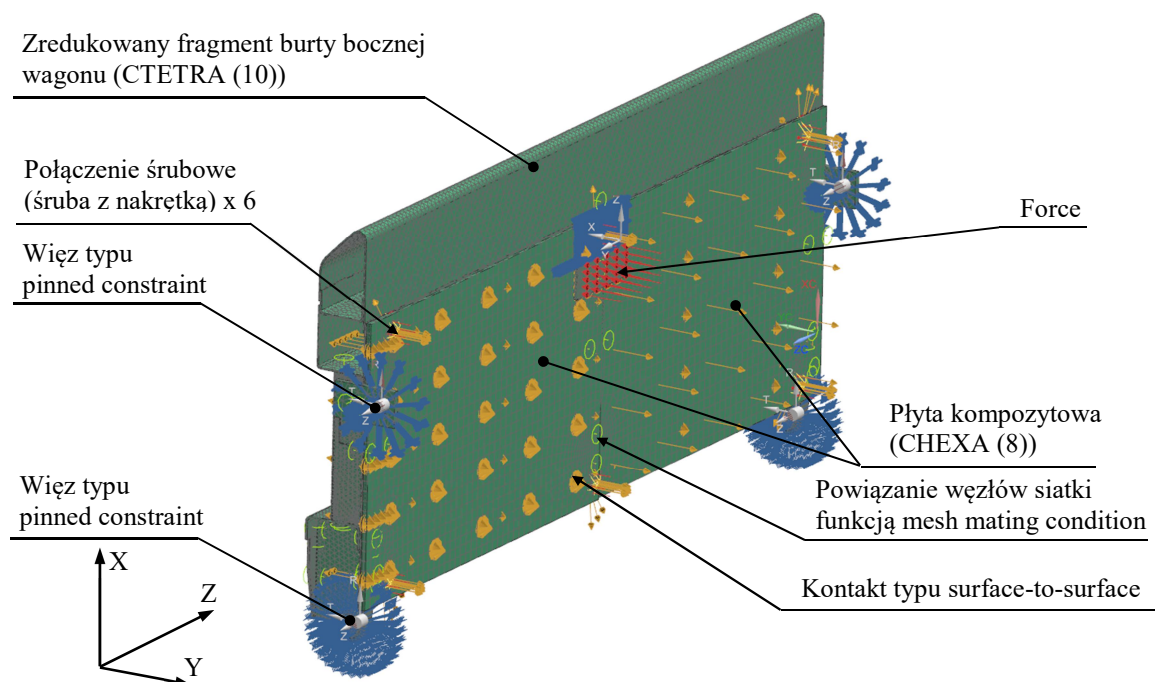
Dopasowanie modelu MES fragmentu burty bocznej wagonu polegało na wprowadzeniu takich modyfikacji w modelu, aby uzyskane wyniki pokrywały się z wynikami uzyskanymi na drodze badań doświadczalnych (tensometrycznych). Dopasowany model numeryczny fragmentu burty bocznej wagonu stał się podstawą do analiz numerycznych z zastosowaniem metody MES zmodernizowanego fragmentu burty wagonu towarowego. W tym przypadku do modelu MES dodano płyty z materiału kompozytowego (rys. 13) i analizowano wartości naprężeń i przemieszczeń w odniesieniu do całego układu pomniejszonego fragmentu burty. Badania numeryczne wykonano w oprogramowaniu PLM Siemens NX. W pierwszym kroku utworzono siatkę elementów skończonych w odniesieniu do elementów stalowych burty bocznej wagonu. W tym przypadku zastosowano elementy skończone typu CTETRA (10 węzłowe tetragonalne elementy skończone). Następnie zdefiniowano siatkę elementów skończonych w odniesieniu do płyt kompozytowych. W tym przypadku zastosowano elementy skończone typu CHEXA (8 węzłowe heksagonalne elementy skończone). Wszystkim elementom poszycia wagonu towarowego przypisano materiał typu stal. Natomiast w odniesieniu do zamontowanych płyt kompozytowych zastosowano opisany wcześniej sposób modelowania wielowarstwowych materiałów kompozytowych. W badaniach numerycznych uwzględniono dwa materiały kompozytowe. Pierwszy materiał kompozytowy zdefiniowano jako kompozycję żywicy epoksydowej i tkaniny włókna węglowego, natomiast drugi jako kompozycję żywicy epoksydowej i włókna szklanego. W odniesieniu do obu materiałów kompozytowych zastosowano kompozycję składającą się z czterech warstw. Podstawowe własności obu kompozycji przedstawiono w tabeli 7.

Tab. 7. Zestawienie podstawowych własności w odniesieniu do warstwy materiału kompozytowego złożonego z żywicy epoksydowej i włókna węglowego oraz włókna szklanego

Warstwa z włóknem węglowym	Warstwa z włóknem szklanym
materiał osnowy – żywica epoksydowa	materiał osnowy – żywica epoksydowa
udział objętościowy materiału osnowy – 0,47	udział objętościowy materiału osnowy – 0,45
materiał włókna osnowy – włókno węglowe	materiał włókna osnowy – włókno szklane
materiał włókna wątku – włókno węglowe	materiał włókna wątku – włókno szklane
udział objętościowy włókien – 0,53	udział objętościowy włókien – 0,55
waga wpływu włókien osnowy i wątku –	waga wpływu włókien osnowy i wątku –

0,5	0,53
kąt ułożenia włókien względem siebie – 90°	kąt ułożenia włókien względem siebie – 90°
moduł Younga E_1 – 67220 MPa	moduł Younga E_1 – 24250 MPa
moduł Younga E_2 – 67220 MPa	moduł Younga E_2 – 22230 MPa
moduł Younga E_3 – 3000 MPa	moduł Younga E_3 – 3000 MPa
liczba Poissona ν_{12} – 0,027	liczba Poissona ν_{12} – 0,079
liczba Poissona ν_{13} – 0,33	liczba Poissona ν_{13} – 0,32
liczba Poissona ν_{23} – 0,33	liczba Poissona ν_{23} – 0,326
moduł ścinania G_{12} – 2283 MPa	moduł ścinania G_{12} – 2329 MPa
moduł ścinania G_{13} – 1110 MPa	moduł ścinania G_{13} – 1118 MPa
moduł ścinania G_{23} – 1189 MPa	moduł ścinania G_{23} – 1443 MPa
gęstość – 1547 kg/m ³	gęstość – 1982 kg/m ³

W odniesieniu do kompozycji zdefiniowano następujące parametry: główny kierunek ułożenia włókien zgodnie z osią Z globalnego układu współrzędnych, kierunek układania warstw zgodnie z osią Y, grubość pojedynczej warstwy równą 1[mm] oraz kąt ułożenia warstwy w obrębie definiowanej kompozycji równy 0°.



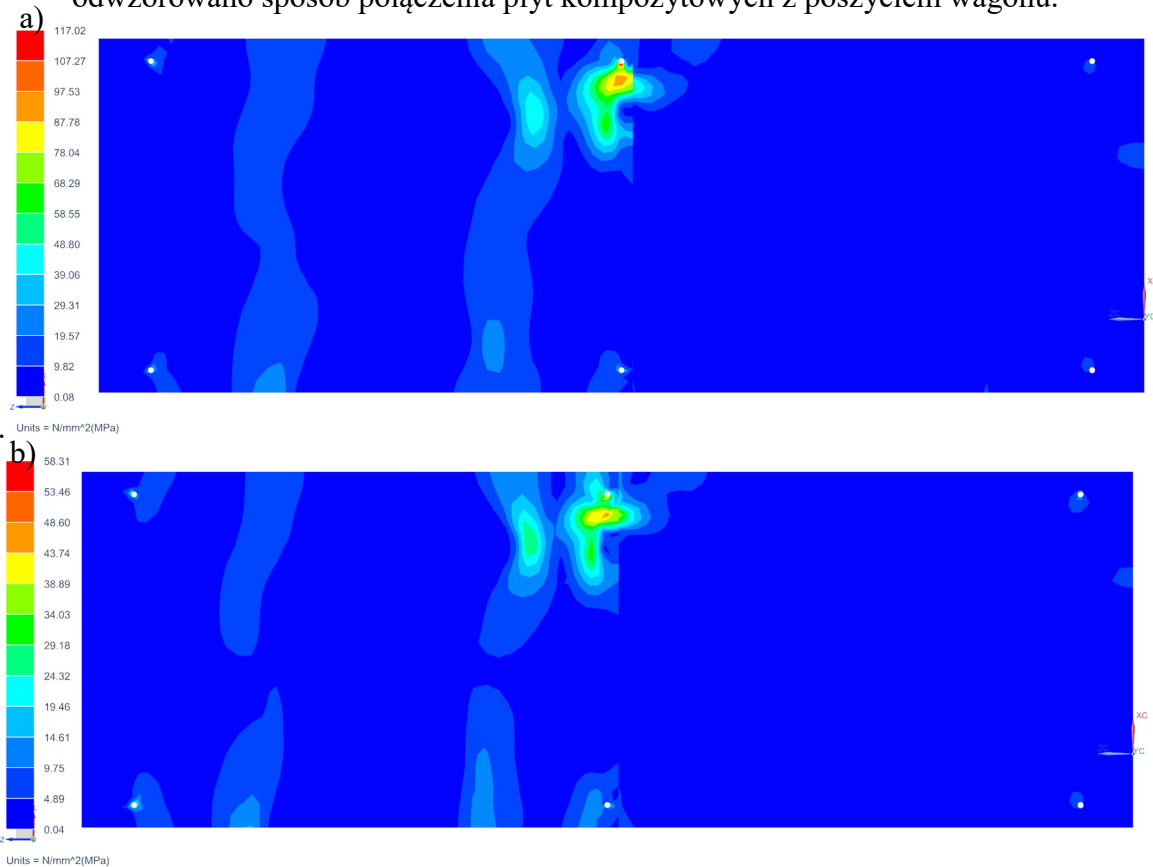
Rys. 13. Model fragmentu burty bocznej wagonu z zamontowanymi płytami kompozytowymi przygotowany do analizy MES

W celu odwzorowania rozpatrywanego zagadnienia zdefiniowano następujące warunki brzegowe:

- więzy typu „pinned constraint” – za pomocą których odwzorowano sposób zamocowania burty bocznej wagonu,
- powiązanie węzłów siatki funkcją „mesh mating condition” – za pomocą której powiązano elementy poszycia wagonu, które są połączone ze sobą na stałe,
- kontakty typu „surface-to-surface” – za pomocą których zdefiniowano charakter oddziaływań, które mają miejsce pomiędzy elementami, które wchodzą w kontakt pod

wpływem występującego obciążenia w układzie (pomiędzy poszyciem wagonu a płytami kompozytowymi),

- połączenia śrubowe (śruba z nakrętką) „bolt connections” – za pomocą, których odwzorowano sposób połączenia płyt kompozytowych z poszyciem wagonu.



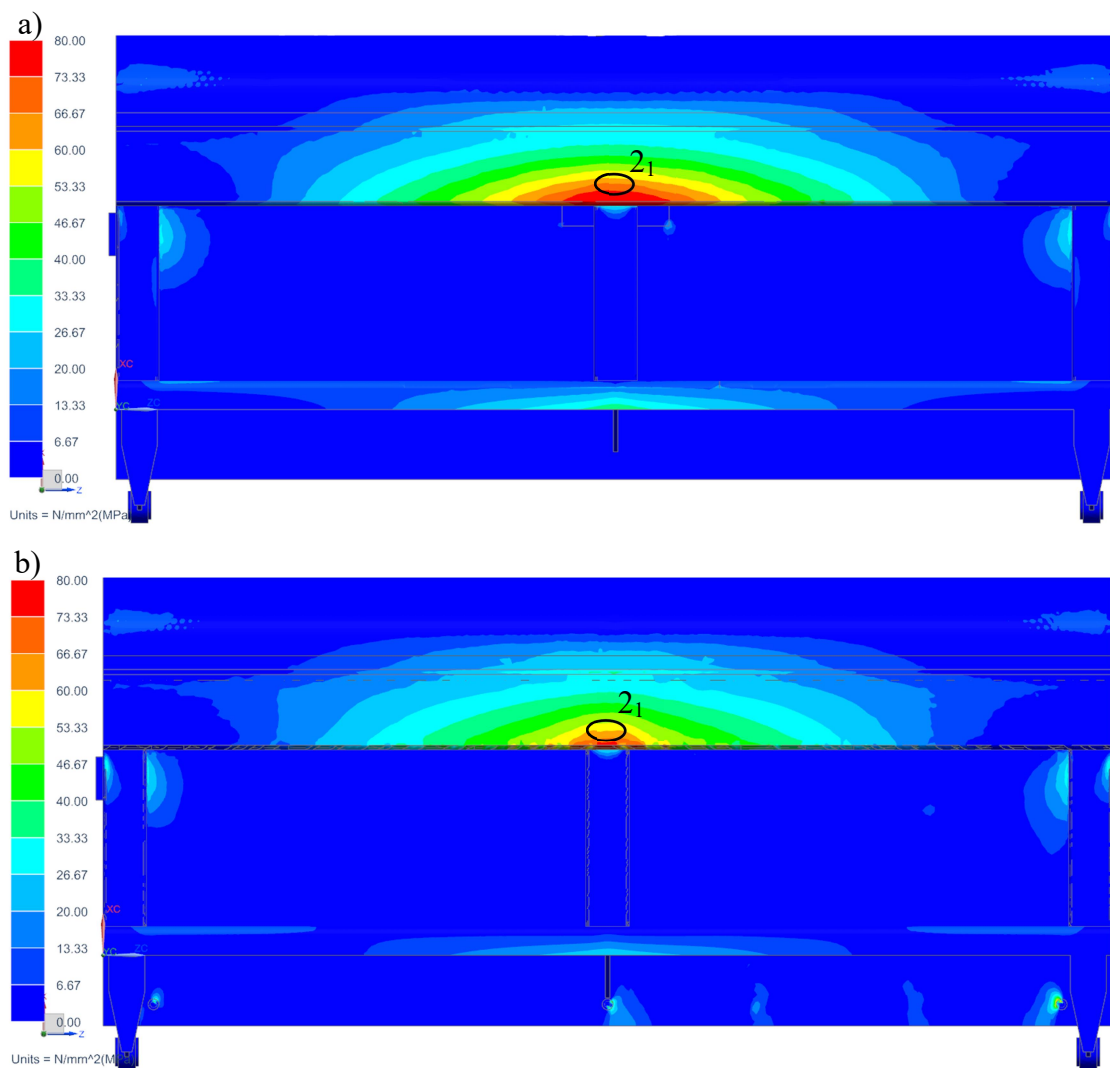
Rys. 14. Rozkład naprężeń występujących w panelach wykonanych z materiału kompozytowego (warstwa 1), będącego kompozycją żywicy epoksydowej i włókien węglowych (a) oraz włókien szklanych (b)

Na podstawie tak przygotowanego modelu przeprowadzono cykl badań wytrzymałościowych z zastosowaniem metody elementów skończonych. W tabeli 8 przedstawiono zestawienie wyników analiz MES w odniesieniu do modelu pomniejszonej burty bocznej wagonu z zamontowanymi płytami kompozytowymi. Na podstawie uzyskanych wyników można przyjąć, że płyty wykonane z materiału kompozytowego będącego kompozycją żywicy epoksydowej i włókien szklanych bądź węglowych, nie zostaną zniszczone w skutek występującego obciążenia pochodzącego od przewożonego przez wagon towarowy ładunku.

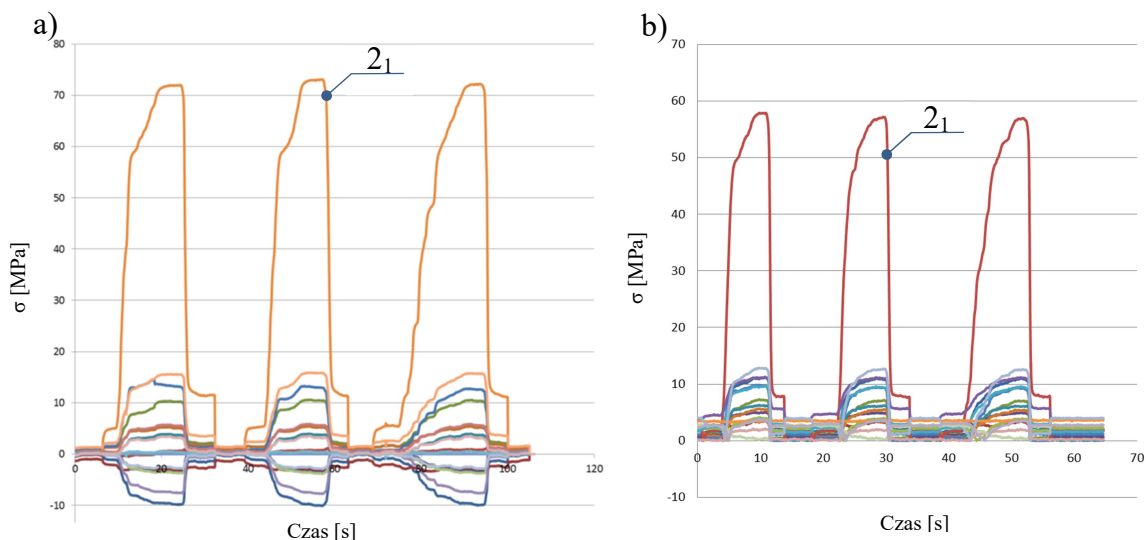
Tab. 8. Zestawienie wyników analiz MES w odniesieniu do modelu pomniejszonej burty bocznej wagonu z zamontowanymi płytami kompozytowymi przy wymuszeniu w postaci siły równej 15 kN

Numer warstwy	Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych w płytach kompozytowych (włókno węglowe)	Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych w płytach kompozytowych (włókno szklane)
	[MPa]	[MPa]
1	117,02	58,31
2	53,94	28,64
3	49,48	47,05
4	109,16	87,99

Ze względów ekonomicznych weryfikacji doświadczalnej poddano pomniejszony fragment burty wagonu z zamontowanymi płytami wykonanymi z materiału kompozytowego złożonego z żywicy epoksydowej i włókien szklanych. Na rys. 15 przedstawiono rozkład naprężeń, w odniesieniu do modelu dopasowanego, na poszyciu zewnętrznym fragmentu burty bocznej wagonu, ze względu na występujące w tym obszarze największe wartości naprężeń. Natomiast na rys. 16 przedstawiono wyniki pomiarów stanowiskowych z zastosowaniem tensometrii oporowej, gdzie wyróżniono tensometr oznaczony numerem 2_1 w którym odnotowano największe wartości naprężeń w analizowanym układzie przy założonym wymuszeniu równym 15 kN. Można zaobserwować, że zastosowanie wzmocnienia powierzchni wewnętrznej pudła wagonu w postaci płyt kompozytowych spowodowało spadek naprężeń składowych na burcie bocznej wagonu w kierunku Z-Z z wartości ok. 76 MPa do wartości ok. 60 MPa. Dopasowywanie modelu MES do wyników badań stanowiskowych polegało na modyfikacji wielkości elementu skończonego, sposobu dopasowania siatki do postaci geometrycznej modelu oraz wartości modułu Younga.



Rys. 15. Rozkład naprężeń w kierunku Z-Z na burcie bocznej pomniejszonego fragmentu burty bocznej wagonu towarowego: bez wzmocnienia (a), ze wzmocnieniem w postaci płyt kompozytowych z włóknem szklanym (b)



Rys. 16. Wyniki pomiarów stanowiskowych na burcie bocznej pomniejszonego fragmentu burty bocznej wagonu towarowego: bez wzmocnienia (a), ze wzmocnieniem w postaci płyt kompozytowych z włóknem szklanym o grubości 4 mm (b)

6. Wnioski

Model opracowany w oparciu o badania weryfikacyjne z użyciem metody akustycznej (ATH) nadaje się do zastosowania w badaniach nieniszczącej paneli kompozytowych stosowanych w wagonach towarowych.

Najlepsze dopasowanie modelu wirtualnego do wyników próbek rzeczywistych uzyskano dla kompozytu siedmiowarstwowego z udziałem tkaniny wynoszącym 51%.

Badania przeprowadzone na stanowisku przedstawionym na rysunku nr 9 korelują w wystarczającym stopniu z badaniami przeprowadzonymi na obiekcie rzeczywistym jakim była burta wagonu towarowego.

Wykresy zamieszczone na rysunku nr 16 pozwalają stwierdzić, iż umieszczenie na burcie wagonu towarowego wzmocnienia w postaci 4mm panelu kompozytowego pozwoli na zredukowanie naprężeń w burcie o około 20%.

Zaprezentowany w pracy sposób postępowania związany z zastosowaniem wspomaganie komputerowego do modelowania próby trójpunktowego i czteropunktowego zginania próbek kompozytowych pozwala na przygotowanie, przeprowadzenie i uzyskanie poprawnych wyników wirtualnego eksperymentu zginania wielowarstwowych próbek kompozytowych.

Zobrazowany sposób opisu materiału kompozytowego umożliwia jego zamodelowanie w postaci kompozycji składającej się z dowolnej liczby warstw. Należy zwrócić szczególną uwagę na możliwość tworzenia i badania próbek wykonanych z materiału kompozytowego, którego poszczególne warstwy mogą stanowić kompozycję różnych tkanin i żywic. Dodatkowo każda z warstw w kompozycji materiału kompozytowego może mieć inne położenie kątowe względem globalnego układu współrzędnych, co implikuje uzyskiwanie różnorodnych własności wytrzymałościowych próbki w różnych kierunkach.

Głównym celem zastosowania okładziny wewnętrznej poszycia pudła wagonu w formie płyt kompozytowych było jej zabezpieczenie przed uszkodzeniami mechanicznymi i chemicznymi. Jednak zastosowana „powłoka” ochronna przy odpowiednim doborze kompozycji materiału kompozytowego i liczby warstw laminatu może również pełnić rolę wzmacniającą pudło wagonu. Jest to bardzo istotne z punktu widzenia regeneracji już uszkodzonych poszyci pudła wagonu (zmniejszona grubość blachy w wyniku korozji).

Pozwoliłoby to na zdecydowane zmniejszenie liczby operacji związanych z wycinaniem uszkodzonej blachy z poszycia wagonu i wstawianiem nowej.

Literatura

1. Beluch W. Metody inteligencji obliczeniowej w zagadnieniach optymalizacji identyfikacji parametrów włóknistych kompozytów warstwowych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
2. Bienias J., Dębski H., Surowska B., Sadowski T. Analysis of microstructure damage in carbon/epoxy composites using FEM, *Computational Materials Science* 2012; 64: 168–172.
3. Boisse P., Borr M., Buet K., Cherouat A. Finite element simulations of textile composite forming including biaxial fabric behavior. *Composites Part B: Engineering Journal* 28B 1997; 453-464.
4. Buchacz A., Baier A., Herbuś K., Majzner M., Ociepka P. Examination of a cargo space of a freight wagon modified with composite panels, *Applied Mechanics and Materials* 2015; 809-810: 944-949.
5. Buchacz A., Baier A., Herbuś K., Majzner M., Ociepka P. Application of programs of the CAD/CAE class for creating the virtual laboratory stand, *Applied Mechanics and Materials* 2015; 809-810: 841-846.
6. Buchacz A., Baier A., Herbuś K., Majzner M., Ociepka P. Investigations of Composite Panels Mounted in the Cargo Space of a Freight Wagon, *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, Dynamical Systems: Modelling* 2016; 181: 97-105.
7. Buchacz A., Baier A., Herbuś K., Ociepka P. An investigation of the influence of a fiber arrangement of a laminate on the values of stresses in the composite panel of a modified freight wagon using the FEM method. *MATEC Web of Conferences* 2017; 112: 04015.
8. Buchacz A., Baier A., Płaczek M., Herbuś K., Ociepka P., Majzner M. A concept of technology for non-destructive testing of modernized freight cars based on analysis of their vibration, *Vibroengineering Procedia* 2016; 10: 333-338.
9. Buchacz A., Baier A., Świder J., Płaczek M., Wróbel A., Herbuś K., Ociepka P, Banaś W., Sobek M., Grabowski Ł, Majzner M. Analytical and experimental tests and determination of Characteristics of components working as assemblies of innovative structures of repaired freight cars, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
10. Cecot W., Oleksy M., High order FEM for multigrid homogenization, *Computers and Mathematics with Applications* 2015; 70: 1391–1400.
11. Chen J., Lussier D. S., Cao J., Peng X. Q. Materials characterization methods and material models for stamping of plain woven composites. *International Journal of Forming Processes* 2001; 4: 269 – 283.

12. Dąbrowski H. Wytrzymałość polimerowych kompozytów włóknistych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
13. Dębski H. Eksperymentalno-numeryczne badania pokrywicznych zachowań kompozytowych kolumn o przekroju omegowym, *Eksploatacja i Niezawodność* 2013; 15; 106-110.
14. Dobrzański L.A. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002.
15. Figueiro R. Fibrous and composite materials for civil engineering applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2011.
16. Folega P., Study of dynamic properties of composite and steel-composite flexsplines of harmonic drives, *Journal Of Vibroengineering* 2015; 17: 155-163.
17. German J. Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001.
18. Herbuś, K., Ociepka, P. A study of an influence of a fiber arrangement of a laminate ply on the distribution and values of stresses in the multi-layered composite material. *MATEC Web of Conferences* 2017; 112: 04022.
19. Jaśkowiec J. Pluciński P., Stankiewicz A., Cichoń Cz. Three-dimensional modelling of laminated glass bending on two-dimensional in-plane mesh, *Composites Part B: Engineering Journal* 2017; 120: 63-82.
20. Martinsa R., Reisa L., Marat-Mendes R. Finite element prediction of stress-strain fields on sandwich composites, *Procedia Structural Integrity* 1, 2016; 066–073.
21. Ociepka P., Herbuś K. Strength analysis of parallel robot components in PLM Siemens NX 8.5 program, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2015; 95: 012101.
22. Płaczek M., Wróbel A., Baier A. Computer-aided strength analysis of the modernized freight wagon *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2015; 95: 012042.
23. Polit O., Gallimard L., Vidal P., D'Ottavio M., Giunta G., Belouettar S. An analysis of composite beams by means of hierarchical finite elements and a variables separation method, *Computers and Structures* 2015; 158: 15–29.
24. Sobek M., Baier A., Buchacz A., Grabowski Ł., Majzner M, Carbon fiber based composites stress analysis. Experimental and computer comparative studies, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2015; 95: 012011.
25. Song W., Zhong Y., Xiang J. Mechanical parameters identification for laminated composites based on the impulse excitation technique, *Composite Structures* 2017; 162: 255–260.

26. Stadnicki J., Tokarz Z. Model obliczeniowy kompozytu warstwowego — kalibracja z wykorzystaniem optymalizacji, *Biuletyn Wat*, Warszawa 2007; LVI: 207-216.
27. Stadnicki J., Tokarz Z. Mesoscale finite element model for calculating deformations of laminate composite constructions, *Advances in Mechanical Engineering* 2016; 8: 1–9.
28. Śledziewski K. Experimental and numerical studies of continuous composite beams taking into consideration slab cracking, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18: 578–589.
29. Venkatesan S., Kalyanasundaram S. Finite element analysis and optimization of process parameters during stamp forming of composite materials, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2010; 10: 012138.

Compression studies of multi-layered composite materials for the purpose of verifying composite panels model used in the renovation process of the freight wagon's hull

Abstract: The paper presents the procedure sequence for modelling multilayer composite materials using PLM Siemens NX software. Virtual studies were referring to three-point and four-point flexural test of composite material samples. Composite materials containing fiber reinforced epoxy resin composites were considered. Within the carried out research, a virtual experiment to test composite samples composed of 5, 7 and 10 layers was conducted. Then the virtual model was matched to the results obtained during the stationary tests. As a result of matching the composite material model to the real model, correct results of the virtual bending experiment of composite samples were obtained. The presented procedure sequence for modelling composite material was used to analyze the MES of the scaled side of the freight wagon. The modification consisted in the use of composite panels as reinforcing elements of the wagon's hull from inside to extend its life. The presented modelling approach enabled the initial strength verification of the modified side of the freight wagon's hull.

Keywords: *composite materials, FEM method, modelling, flexural test*