

dr inż. Dawid Gacki<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0003-2025-3884  
dr inż. Kamil Słowiński<sup>1)\*</sup>  
ORCID: 0000-0002-4225-520X

# Ocena możliwości zastosowania powłoki laminatowej do naprawy i wzmocnienia płaszcza stalowego zbiornika paliwowego o osi pionowej

*Assessment of the possibility of using a laminate coating to repair and strengthen the jacket of a steel fuel tank with a vertical axis*

DOI: 10.15199/33.2024.05.07

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przebieg i rezultaty badań, których celem była ocena wybranych właściwości powłok poliestrowo-szklanych stosowanych do naprawy i wzmocnienia płaszczy stalowych zbiorników cylindrycznych na paliwa płynne. Na podstawie badań doświadczalnych określono ryzyko powstania delaminacji kompozytu stalowo-laminatowego na skutek działania obciążeń o charakterze dynamicznym, a także wpływ zróżnicowanej temperatury, w jakiej pracuje laminat wewnątrz zbiornika, na twardość wykonanej z niego powłoki naprawczej. Dokonano również oceny stabilności wymiarów i kształtu powłoki laminatowej w warunkach wyjątkowych, w których poddawana jest ona ekspozycji na podwyższoną temperaturę. Podjęto także próbę odpowiedzi na pytanie dotyczące wpływu zastosowania powłoki laminatowej na nośność płaszcza zbiornika wzmocnionego z jej użyciem.

**Słowa kluczowe:** zbiornik paliwowy; powłoka cylindryczna; laminat; kompozyt; analiza MES.

**Abstract.** The article presents the course and results of research which purpose was aimed at evaluation of selected properties of polyester-glass coatings used to repair and strengthen the jackets of steel cylindrical tanks with a vertical axis for the storage of liquid fuels. Through experimental research, the issues related to the risk of delamination of the steel-laminate composite as a result of dynamic loads, as well as the impact of different temperatures at which the laminate operates inside the tank on the hardness of the laminate coating were identified. The stability of the dimensions and shape of the laminate coating in exceptional conditions where it is subjected to an exposure to elevated temperature was also assessed. An attempt was also made to answer the question about the impact of the use of a laminate coating on the load bearing capacity of the tank shell strengthened with it.

**Keywords:** fuel tank; cylindrical shell; laminate; composite; FEM analysis.

W związku z pogarszającym się wraz z upływem czasu stanem technicznym eksploatowanych w kraju paliwowych stalowych zbiorników cylindrycznych o osi pionowej niezbędna będzie w niedalekiej przyszłości ich naprawa bądź wymiana na nowe [1]. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest zazwyczaj osłabienie dna i płaszcza zbiornika w związku z postępującymi procesami korozyjnymi. Ze względu na relatywnie duże koszty wymiany zbiornika, rozwiązaniem bardziej ekonomicznym i umożliwiającym znaczne wydłużenie okresu eksploatacji może być jego naprawa. Technologia naprawy powinna uwzględniać obowiązujące obecnie przepisy dotyczące ochrony środowiska, w tym przede wszystkim rozwiązania wymagane w celu zabezpieczenia gruntu

przed skażeniem przez paliwo, które mogłoby wyciec ze zbiornika. Rozwiązaniem, wskazanym w rozporządzeniach [2, 3], jest wyposażenie zbiorników w system monitoringu nieszczelności. Jednym ze sposobów zapewnienia takiego monitoringu może być wykonanie drugiego dna lub aplikacja na dnie zbiornika powłoki laminatowej poliestrowo-szklanej z przestrzenią monitorującą. To drugie rozwiązanie stwarza dogodne warunki do naprawy i wzmocnienia powłoką laminatową również przydennej części płaszcza zbiornika – zazwyczaj najniższej zlokalizowanej części. Laminat aplikowany jest wówczas na wewnętrznej powierzchni tej części, w sposób gwarantujący ciągłość powłok na dnie i płaszczu (fotografia 1).

Laminat poliestrowo-szklany składa się z jednej lub kilku warstw maty przesączonej żywicą poliestrową, wykonanej z włókien szklanych o zróżnicowanej gramaturze. Powłoka laminatowa pełni wówczas funkcję zabezpieczającą



**Fot. 1. Naprawa przydennej części zbiornika stalowego z użyciem laminatu poliestrowo-szklanego**

*Photo 1. Repair of the bottom part of a steel tank using polyester-glass laminate*

i wzmacniającą płaszczyz, na którym jest wykonana. Osnowa żywiczna uzupełnia ubytki (spowodowane korozją) na wewnętrznej powierzchni płaszcza, a także zabezpiecza go przed dalszym rozwojem procesów korozyjnych oraz umożliwia współpracę z matą z włókien szklanych. Mata pełni natomiast funkcję wzmacniającą płaszczy przy przenoszeniu parcia magazynowanego produktu.

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji:  
kamil.slowinski@polsl.pl

Należy podkreślić, że kompozyty zbrojone włóknami uznawane są za najbardziej efektywne spośród materiałów kompozytowych, ponieważ wykazują oczekiwane właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe przy relatywnie niewielkim ciężarze właściwym [4]. Niewątpliwą zaletą omawianej powłoki laminatowej jest również jej zdolność do dopasowania się i ścisłego przylegania do powierzchni płaszcza stalowego, nawet w sytuacji wystąpienia deformacji tej powierzchni, np. w postaci lokalnych wgłębień czy wypukłości.

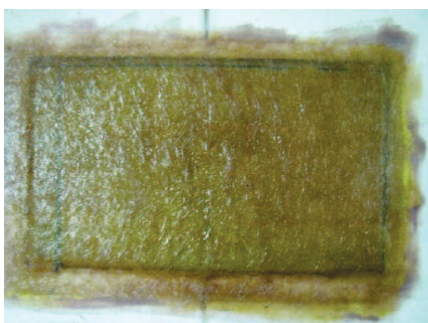
W artykule przedstawiono przebieg i rezultaty badań, których celem była ocena wybranych właściwości powłok poliestrowo-szklanych, nieomówionych w literaturze, a mogących mieć znaczenie w przypadku zastosowania tych powłok do naprawy i wzmacnienia płaszczy zbiorników na paliwa płynne.

W pierwszym etapie, na podstawie badań doświadczalnych, określono ryzyko powstania delaminacji kompozytu stalowo-laminatowego na skutek działania obciążeń o charakterze dynamicznym. W badaniach tych uwzględniono efekty oddziaływań, występujące zarówno w procesie aplikacji powłoki laminatowej, jak i podczas eksploatacji zbiornika, takie jak uderzenia (niezamierzone) w powłokę narzędziami, drabiną itp., a także obciążenia wielokrotne będące efektem oddziaływania zróżnicowanego ciśnienia magazynowanego produktu na wzmacniony płaszczy. Następnie przeprowadzono badania, których celem było określenie wpływu zróżnicowanej temperatury, w jakiej pracuje laminat wewnątrz zbiornika, na twardość powłoki naprawczej wykonanej z jego użyciem. Otrzymane rezultaty pozwoliły na ocenę ryzyka uszkodzenia osnowy żywicznej oraz maty szklanej podczas prac wykonywanych w procesie aplikacji laminatu lub w okresie eksploatacji zbiornika. Za ważną, w kontekście niezawodnej pracy warstwy naprawczej płaszcza, uznano również ocenę stabilności wymiarów i kształtu powłoki laminatowej w warunkach wyjątkowych, w których podawana jest ona ekspozycji na podwyższoną temperaturę. Ponadto, na bazie analiz numerycznych, podjęto próbę odpowiedzi na pytanie o wpływ zastoso-

wania powłoki laminatowej na nośność płaszcza zbiornika wzmacnionego z jej użyciem.

## Badania doświadczalne

Przeprowadzono badania doświadczalne, których zasadniczym celem było określenie zachowania się warstwy kompozytowej wykonanej z użyciem laminatu poliestrowo-szklanego, w kontekście możliwości delaminacji kompozytu pod obciążeniem o charakterze dynamicznym lub w zróżnicowanej temperaturze. W badaniach wykorzystano materiał laminatowy wytworzony w warunkach laboratoryjnych z nienasyconej żywicy poliestrowej o małej emisji styrenu AROPOL M105 TB oraz mat szklanych EM 1002 o gramaturze 150 g/m<sup>2</sup> oraz 225 g/m<sup>2</sup>, wykonanych z kawałków rowingu i połączonych lepiszczem (fotografia 2).

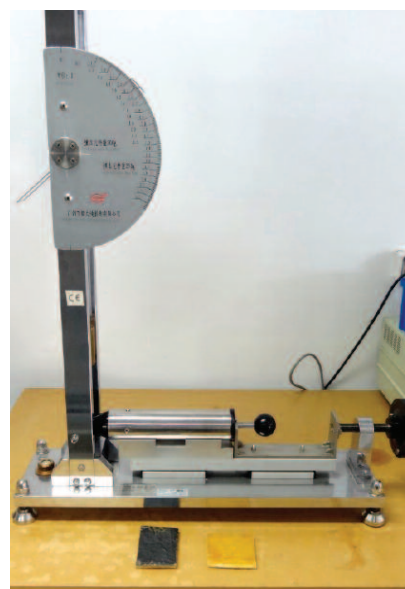


**Fot. 2. Laminat wykorzystany w badaniach**

*Photo 2. Laminate used in the tests*

**Testy udarności.** Celem przeprowadzonych badań było określenie zachowania się laminatu poliestrowo-szklanego w warunkach działania obciążeń dynamicznych o charakterze skupionym. Oddziaływania takie mogą występować zarówno podczas aplikacji powłoki laminatowej na płaszczy zbiornika, jak i w okresie eksploatacji zbiornika i powodować lokalne uszkodzenia i delaminację, tj. utratę połączenia między zbrojeniem a żywicą powłoki laminatowej, zmniejszając tym samym znacznie skuteczność powłoki naprawczej [5, 6].

Badania przeprowadzono z użyciem ręcznego sprężynowego młota udarowego SN2207-M, stosowanego do badania tworzyw sztucznych (fotografia 3). Urządzenie to najczęściej wykorzystywane jest do oceny odporności



**Fot. 3. Młot udarowy o napędzie sprężynowym wraz z urządzeniem do kalibracji**

*Photo 3. Spring – driven hammer with a calibration device*

elementów wykonanych z tworzyw sztucznych na uderzenia spowodowane m.in. aktami wandalizmu. Do badań przygotowano 10 próbek laminatu poliestrowo-szklanego w kształcie kwadratu o boku 100 mm i grubości 3,5 mm. Elementy próbne badane były w temperaturze pokojowej, tj. 21°C. Po każdym uderzeniu grotu młota w powierzchnię próbki dokonywano oceny makroskopowej powstałych uszkodzeń. Badanie powtarzano wielokrotnie w różnych miejscach próbki przy stałej energii uderzenia. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli. Przy energii ude-

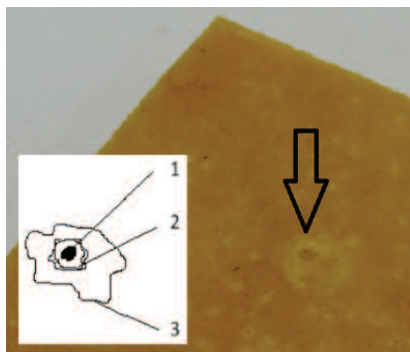
## Wyniki testu udarności laminatu metodą młota sprężynowego

*Results of the laminate impact test using the spring hammer method*

Energia uderzenia	Wynik obserwacji
0,2 J	brak uszkodzeń
0,3 J	brak uszkodzeń
0,4 J	naruszenie powierzchni osnowy kompozytu, brak widocznego wgłębienia w próbce
0,5 J	naruszenie powierzchni osnowy kompozytu, widoczne pod lupą wgłębienie
0,7 J	wyraźne obszary delaminacji, brak uszkodzenia włókien zbrojenia, brak przebiecia na wskroś, wyraźne wgłębienie w miejscu uderzenia
1,0 J	wyraźne obszary delaminacji, brak uszkodzenia włókien zbrojenia, brak przebiecia na wskroś, wyraźne wgłębienie w miejscu uderzenia



zenia 0,4 J zaobserwowano pierwsze spekania osnowy żywicznej. Próbkę zaczęły jednak wykazywać wyraźne oznaki uszkodzeń, przede wszystkim w postaci delaminacji powłoki, przy uderzeniu z energią 0,7 J i większą. Na fotografii 4 pokazano typową w takim przypadku postać zniszczenia próbki. Zaobserwowano dwa obszary delaminacji na próbkach, tj. obszar największych uszkodzeń materiału (poz. 2 na fotografii 4) wokół miejsca uderzenia (poz. 1 na fotografii 4), a także znacznie od niego rozleglejszy obszar uszkodzeń osnowy żywicznej w postaci siatki spekań (poz. 3 na fotografii 4), propagującej radialnie od miejsca uderzenia. Taka odpowiedź materiału jest rezultatem zastosowania zbrojenia typu rowing, dzięki któremu badany laminat poliestrowo-szklany zachowuje się jak materiał izotropowy. W miejscu uderzenia dochodziło do wykruszenia osnowy żywicznej i odsłonięcia maty szklanej. Nie zaobserwowano jednak uszkodzenia samej maty. Wynika z tego, że **laminaty poliestrowo-szklane są odporne na działanie obciążeń skupionych o charakterze dynamicznym**, ponieważ delaminacja występuje przy energii uderzenia znacznie większej od spotykanej podczas eksploatacji powłoki.

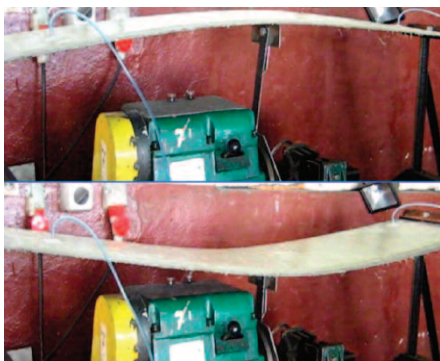


**Fot. 4. Próbkę laminatu po badaniu uderności z wskazaniem obszarów uszkodzeń (opis w tekście)**

*Photo 4. Laminate sample after impact testing with indication of damage areas (description in text)*

**Badanie pod wielokrotnym obciążeniem.** Powłokę laminatową przebadano pod kątem jej trwałości, w kontekście możliwości delaminacji wykonanego z jej użyciem kompozytu w warunkach niskocyklowego obciążenia wielokrotnego oraz sprężystej pracy materiału. Do badań przygotowano jeden element

próbny w postaci prostokątnej płyty ze stali S235JR, o wymiarach boków 1200 mm i 700 mm oraz grubości 3 mm, wzmocnionej warstwą laminatu wykonanego z dwóch warstw maty szklanej w osnowie żywicznej, o łącznej grubości 3,5 mm. Wzmocnienie wykonano metodą ręczną (najczęściej stosowaną przy aplikacji powłok laminatowych na płaszcach zbiorników), z użyciem wałka dociskowego. Element próbny, oparty w sposób przegubowy na podporach w rozstawie 1000 mm, poddany został naprzemiennemu zginaniu. Poruszające się ramię silnika elektrycznego, połączone w sposób przegubowy z płytą stalową (fotografia 5), umożliwiło reali-



**Fot. 5. Badanie elementu kompozytowego pod wielokrotnym obciążeniem**

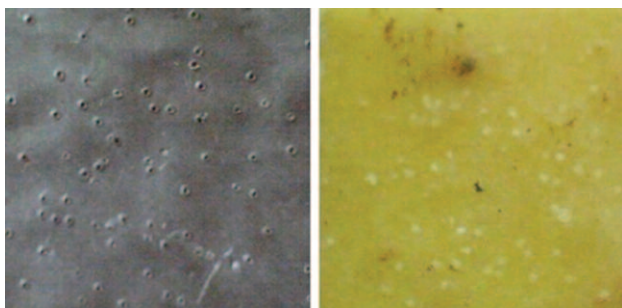
*Photo 5. Testing a composite element under multiple loads*

zację obciążenia cyklicznego. Pionowy zakres ruchu ramienia wynosił 100 mm, co umożliwiało realizację półcykli (umownie) dodatnich i ujemnych o amplitudzie na poziomie 50 mm. Trzeba przy tym podkreślić, że odmiennie niż w typowych niskocyklowych badaniach zmęczeniowych metali, zastosowane wymuszenie miało doprowadzić do powstania w kompozycie jedynie odkształceń sprężystych (co wynika z warunków pracy kompozytów w zbiornikach). Zastosowana również arbitralnie, ze względu na brak wyraźnych wpływów zmęczeniowych w analizowanych zbiornikach, liczba 1920 cykli obciążenia jest zauważalnie mniejsza od stosowanej zazwyczaj w badaniach metali (ok.  $10^5$ ). Wymuszenie realizowano przez 4 h, przy ośmiu cyklach obciążenia na minutę. Po przeprowadzeniu badania element próbny poddano inwentaryzacji pod kątem ewentualnych uszkodzeń, tj. pęknięć osnowy żywicz-

nej oraz przede wszystkim delaminacji kompozytu, mogącej przejawiać się odspojeniem warstwy laminatu od elementu stalowego. Element kompozytowy nie wykazał jednak wymienionych nieprawidłowości.

**Oznaczenie twardości.** Wyniki badania twardości metodą Barcola mogą stanowić podstawę do oceny jakości wykonania i stanu technicznego powłoki laminatowej (por. [7]). Pozwalają bowiem na określenie stopnia utwardzenia żywicy oraz wykrywanie defektów powłoki z niej wykonanej. Metoda ta może być stosowana zarówno na etapie produkcji kompozytów, jak i podczas ich późniejszej eksploatacji w zbiornikach. W tym przypadku najczęściej wykorzystywana jest do wykrywania oznak degradacji materiału ze względu na oddziaływanie agresywnych substancji zawartych w magazynowanym paliwie.

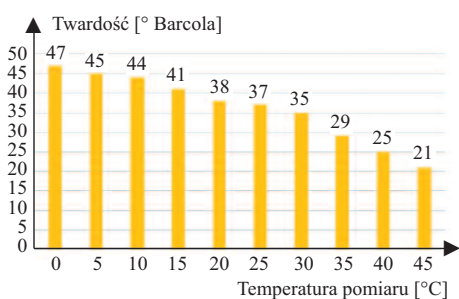
W ramach przeprowadzonych badań metodę Barcola zastosowano do oceny twardości próbek laminatu o zróżnicowanej temperaturze, mającej odzwierciedlać warunki pracy powłok laminatowych wykonanych w zbiornikach paliwowych. Oznaczenia twardości dokonano wg normy PN-EN 59:2016 [8]. Badania przeprowadzono na próbkach laminatu poliestrowo-szklanego w kształcie kwadratu o boku 100 mm i grubości 3,5 mm. Takie wymiary próbek umożliwiły zachowanie wymaganej, minimalnej odległości 3 mm między miejscami wykonania kolejnych pomiarów. Na część próbek naniesiono powłokę z farby odprowadzającej ładunki elektrostatyczne (fotografia 6). Zabieg ten jest powszechnie stosowany w przypadku powłok kompozytowych stosowanych do wzmacniania zbiorników na paliwa płynne. Badaniu poddano próbki o temperaturze  $0 \div 45^\circ\text{C}$ , ze skokiem temperatury co  $5^\circ\text{C}$ . Do momentu przeprowadzenia badania próbki były utrzymywane przez 24 h w urządzeniach laboratoryjnych w zadanej temperaturze, którą sprawdzano tuż przed wykonaniem badania z użyciem pirometru Thermo Hunter PT 200. Badanie przeprowadzono za pomocą twardościomierza Barcola GYZJ 934-1 oraz suwmiarki o dokładności 0,02 mm. Miarą twardości był opór wyrażony



**Fot. 6. Powierzchnia laminatu po badaniu twardości**  
Photo 6. Laminate surface after hardness test

w stopniach Barcola [ $^{\circ}$  Barcola], jaki stawał badany materiał podczas wciskania w jego powierzchnię znormalizowanego wgłębnika, w postaci ściętego stożka o średnicy płaskiego końca wynoszącej 0,157 mm. Ze względu na dosyć duże rozrzuty wyników liczba odczytów w przypadku każdej próbki mieściła się w przedziale  $10 \div 20$  [9].

Otrzymane rezultaty, w postaci zależności między uśrednioną twardością Barcola a temperaturą elementu próbnego, pokazano na rysunku. Wyniki te wyraźnie wskazują, że twardość badanego laminatu maleje wraz ze wzrostem jego temperatury. Analogicznego zachowania się laminatu można zatem oczekiwać m.in. w okresie letnim przy oddziaływaniu promieni słonecznych na płaszczyznę i dach zbiornika.



**Zależność między twardością i temperaturą powłoki laminatowej**

*The relationship between the hardness and temperature of the laminate coating*

**Pomiary deformacji w wysokiej temperaturze.** Uzupełniająco do badań twardościomierzem Barcola zbadano zachowanie się próbek laminatu pod obciążeniem skupionym, w temperaturze znacznie wyższej niż temperatura zastosowana w badaniu twardości. W tym celu zaprojektowano autorskie stanowisko badawcze (fotografia 7), w którym próbka laminatu (o wymiarach jak w ba-

daniu metodą Barcola) umieszczona została na wałku o średnicy 60 mm i grubości 1 mm, co zapewniało jej podparcie radialne. Następnie do powierzchni próbki – w miejscu pokrywającym się z osią walca – przyłożono obciążenie



**Fot. 7. Stanowisko badawcze do określania temperatury ugięcia powłoki laminatowej pod obciążeniem skupionym**

*Photo 7. Test stand for determining the deflection temperature of a laminate coating under concentrated load*

punktowe w postaci wgłębnika o masie 2 kg. W pierwszym kroku przeprowadzono badanie próbek referencyjnych w temperaturze pokojowej, tj. ok  $21^{\circ}\text{C}$ . Następnie badaniom poddano próbki wygrzewane w cieplarni laboratoryjnej w temperaturze  $125^{\circ}\text{C}$  (maksymalna temperatura możliwa do uzyskania w użytej cieplarni) przez 4 h. Przed wykonaniem badania dokonano inwentaryzacji próbek pod kątem ich parametrów geometrycznych, w tym również płaskości powierzchni. Po zdjęciu ze stanowiska badawczego każdą z próbek ponownie poddano inwentaryzacji, z uwzględnieniem przede wszystkim pomiarów deformacji trwałych, mogących być efektem obciążenia lub obciążenia i wysokiej temperatury. Otrzymane w ten sposób wyniki stanowiły wstępną informację na temat wpływu wysokiej temperatury na parametry mechaniczne laminatu oraz miały wskazać kierunek dalszych badań. Jak się okazało, **próbki badane w temperaturze pokojowej oraz w temperatu-**

**rze  $125^{\circ}\text{C}$  nie wykazały oznak trwałych deformacji pod obciążeniem skupionym i wszystkie cechowała stabilność wymiarów oraz kształtu.**

## Analiza numeryczna

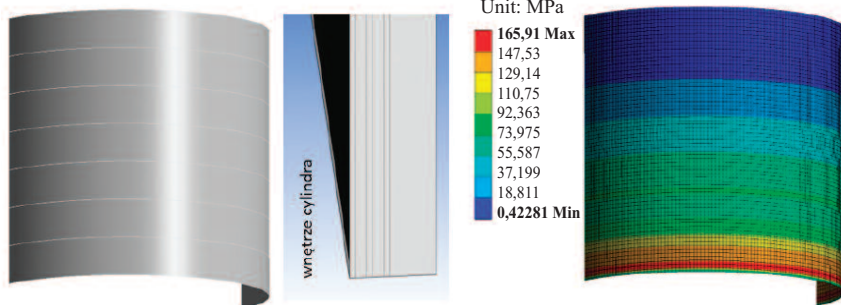
W celu oceny wpływu zastosowania powłoki laminatowej na nośność płaszcza zbiornika wzmocnionego z jej użyciem, przeprowadzono analizę numeryczną stalowego płaszcza zbiornika cylindrycznego o osi pionowej, z dachem stałym, przeznaczonego do magazynowania paliw płynnych, o pojemności nominalnej  $1000\text{ m}^3$ . Średnica wewnętrzna i wysokość płaszcza to odpowiednio 11,83 i 10,5 m. Płaszcz składa się z siedmiu carg (fotografia 8a), wykonanych ze stali S235JR, o nominalnej grubości 6 i 5 mm, odpowiednio 6 mm dla dwóch carg zlokalizowanych najbliżej dna oraz 5 mm w przypadku pozostałych carg. Ze względu na symetrię konstrukcji i oddziaływań wykonano model obejmujący jedynie połowę cylindrycznej części zbiornika, z warunkami podparcia odwzorowującymi pracę kompletnego płaszcza. Połączenie dolnej krawędzi płaszcza z fundamentem zamodelowano jako przegubowe, z ograniczeniem przemieszczeń na kierunkach radialnym i południkowym. Na górnej krawędzi zablokowano przemieszczenia na kierunku radialnym, odwzorowując tym samym stabilizującą rolę dachu połączonego z płaszczem.

Do obliczeń przyjęto ciężar własny płaszcza i dachu oraz obciążenie od parcia hydrostatycznego paliwa lotniczego ( $\rho = 775\text{ kg/m}^3$ ), uwzględnione w ramach kombinacji obciążeń dla trwałej sytuacji obliczeniowej wg [10]. Analizie poddano trzy modele numeryczne, tj. model M1 – referencyjny, w którym zastosowano nominalną grubość ścianek płaszcza, następnie Model M2, uwzględniający redukcję grubości poniżej położonej cargi płaszcza o 2 mm, ze względu na oddziaływanie korozji, a także Model M3, w którym najniższa carga, o zredukowanej grubości (jak w modelu M2), wzmocniona została laminatem poliestrowo-szklanym w postaci dwóch warstw maty z włókien szklanych w osnowie żywicznej. Laminat, o łącznej grubości 3,5 mm, zamode-



lowany został w postaci dwóch warstw z maty szklanej o grubości 1 mm każda, ułożonych na przemian z trzema warstwami żywicy poliestrowej (fotografia 8b). Ze względu na przewidywany stan naprężenia mogący wystąpić w analizowanych powłokach, tj. z dominującą składową w postaci naprężeń radialnych rozciągających, przy największej wartości tych naprężeń poniżej granicy plastyczności, nie zachodziła konieczność uwzględniania w analizach nieliniowości materiałowej i geometrycznej. Dla stali, z której wykonano płaszcz, przyjęto moduł sprężystości  $E = 210$  GPa i współczynnik Poissona 0,3 wg [11]. W modelu M3 zastosowano następujące wartości współczynników odkształcalności podłużnej i poprzecznej warstw z włókien szklanych (Glass) oraz żywicy poliestrowej (Resin):  $E_{\text{Glass}} = 73$  GPa;  $\nu_{\text{Glass}} = 0,22$  oraz  $E_{\text{Resin}} = 3,78$  GPa;  $\nu_{\text{Resin}} = 0,35$ .

a) b)



**Fot. 8. Model numeryczny: a) podział płaszczu na cARGE; b) układ warstw dolnej cARGE w modelu M3; c) mapa naprężeń zredukowanych otrzymanych w modelu M2**

*Photo 8. Numerical model: a) division of the shell into layers of the lower course in the M3 model; c) map of reduced stresses obtained in the M2 model*

W rezultacie zmniejszenia grubości dolnej cARGE w modelu M2, wartość maksymalna naprężeń zredukowanych (fotografia 8c), których główną składową stanowiły naprężenia rozciągające na kierunku obwodowym, zwiększyła się do ok. 150% naprężeń zarejestrowanych w modelu referencyjnym M1. Jak widać na fotografii 8c, wartości maksymalne naprężeń występowały w sąsiedztwie dolnej krawędzi powłoki i stanowiły ok. 71% naprężeń odpowiadających granicy plastyczności materiału. Zastosowanie wzmocnienia dolnej cARGE w postaci laminatu poliestrowo-szklanego pozwoliło na częściowe odtworzenie pierwotnej nośności płaszczu. Wykazano bowiem, że maksymalna war-

tość naprężeń ( $\sigma_{M3, \text{Steel}} = 133,71$  MPa), zarejestrowana na zewnętrznej powierzchni płaszczu stalowego, zredukowana została do ok. 120% naprężeń odczytanych z modelu referencyjnego M1. Maksymalne naprężenia w laminatowej powłoce wzmacniającej ( $\sigma_{M3, \text{Glass}} = 133,71$  MPa) nie przekraczały przy tym 55 MPa.

## Wnioski

W artykule przedstawiono przebieg i rezultaty badań, które pozwoliły na ocenę właściwości powłok laminatowo-szklanych, nieujętych dotychczas szerzej w literaturze. Na podstawie badań doświadczalnych wykazano, że zarówno powłoka laminatowa, jak i kompozyt stalowo-laminatowy mają odpowiednią odporność na zniszczenie wskutek delaminacji oraz lokalne uszkodzenia będące efektem oddziaływań o charakterze skupionym. Do-

c) Type: equivalent (von-Mises) stress  
Unit: MPa

165,91 Max  
147,53  
129,14  
110,75  
92,363  
73,975  
55,587  
37,199  
18,811  
0,42281 Min

wiedziono również, że twardość powłoki laminatowej wyraźnie się zmniejsza wraz ze wzrostem jej temperatury. Może to wskazywać na podatność wzmocnienia laminatowego na lokalne uszkodzenia podczas prac prowadzonych w podwyższonej temperaturze, np. w wyniku oddziaływania promieni słonecznych na płaszcz zbiornika. Jednocześnie jednak nie zaobserwowano wyraźnego wpływu podwyższonej temperatury (125°C) na zachowanie się powłoki laminatowej, w kontekście stabilności jej wymiarów i kształtu pod obciążeniem skupionym. Rezultaty analizy numerycznej wskazały przy tym na możliwość częściowego odtworzenia pierwotnych parametrów wytrzymałościowych płaszczu

przez jego wzmocnienie powłoką laminatową. Nośność wzmocnionego w ten sposób płaszczu okazała się wystarczająca do przeniesienia obciążeń od ciężaru własnego konstrukcji zbiornika oraz ciśnienia wywieranego na płaszcz przez magazynowane paliwo.

Przedstawione wyniki badań, które mogą stanowić uzupełnienie dostępnej już wiedzy na temat zachowania się powłok laminatowych, wskazują na potencjał tych powłok do wykonywania naprawy i wzmocnienia płaszczy zbiorników stalowych na paliwa płynne.

*Fotografie: autorzy*

## Literatura

- [1] Maślak M, Pazdanowski M, Siudut J. Kształtowanie elementów w modernizowanych stalowych zbiornikach paliwowych wynikające ze zmian użytkowych oraz wzrastających wymagań środowiskowych. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*. 2017; DOI: 10.7862/rb. 2017.32.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie (Dz. U. nr 243 z 21 listopada 2005, z późniejszymi zmianami).
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz. U. nr 113 z 18 września 2001, z późniejszymi zmianami).
- [4] German J: Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996.
- [5] Hyla I, Kozioł M. Wpływ struktury układów wielowarstwowych na rozwój procesy zniszczenia laminatów. *Inżynieria Materiałowa*. 2007; 2.
- [6] Huang T, Bobyr M. A Review of Delamination Damage of Composite Materials. *Journal of Composites Science*. 2023; <https://doi.org/10.3390/jcs7110468>.
- [7] Nassar A, Nassar E. Effect of fiber orientation on the mechanical properties of multi layers laminate nanocomposites. *Heliyon* 6 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon. 2020.e03167>.
- [8] PN-EN 59:2016-03 Tworzywa sztuczne ze wzmocnieniem szklanym – Oznaczanie twardości twardościomierzem Barcola.
- [9] Królicka A, Trębacki K. Próby wytrzymałościowe kompozytów polimerowych. *Autobusy*. 2017; 9.
- [10] PN-EN 1993-4-2:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-2 Zbiorniki.
- [11] PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

*Przyjęto do druku: 16.04.2024 r.*