

Modelowanie i walidacja wytrzymałościowa kompozytowej skorupy nośnej fotela kolejowego

Łukasz GOŁĘBIEWSKI¹, Marcin SIWEK², Marcin CIESIELSKI³, Andrzej ZAGÓRSKI⁴,
Sławomir KRAUZE⁵, Radosław MAJEWSKI⁶

Streszczenie

Przedmiotem prac modelowych i badań doświadczalnych jest kompozytowa skorupa nośna fotela kolejowego. Zaprojektowano kształt geometryczny i strukturę materiałową konstrukcji oraz dobrano materiały. Do budowy skorupy wykorzystano kompozyty włókniste o osnowie polimerowej (kompozyty FRP – *Fiber Reinforce Polimer*), które są lżejsze w porównaniu ze stalą i jednocześnie zapewniają odpowiednie standardy z zakresu wytrzymałości i bezpieczeństwa. Opracowano obliczeniowy model skorupy i przeprowadzono analizę wytrzymałościową zgodnie z wytycznymi branżowej normy oraz hipotezami wytrzymałościowymi dotyczącymi kompozytów FRP. Obliczenia przeprowadzono za pomocą oprogramowania ANSYS (*ANSYS Composite PrepPost*), bazującego na metodzie elementów skończonych. W artykule przedstawiono analizę wytrzymałościową zoptymalizowanego modelu kompozytowej skorupy nośnej fotela. Na podstawie wytycznych z prac modelowych wytworzono model fizyczny (walidacyjny), w technologii laminowania próżniowego na gorąco. Walidację doświadczalną modelowania z wynikiem pozytywnym przeprowadzono na stanowisku badawczym firmy S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski.

Słowa kluczowe: konstrukcja fotela kolejowego, kompozyt FRP, test wytrzymałościowy, modelowanie MES, walidacja doświadczalna

1. Wprowadzenie

Fotele kolejowe powinny spełniać wymagania dotyczące standardów i norm w zakresie bezpieczeństwa przeciwpożarowego, ergonomii oraz wytrzymałości. Wyposażenie taboru kolejowego jest jednocześnie jednym z podstawowych elementów mających wpływ na analizy ekonomiczne oparte na metodyce kosztu cyklu życia pojazdu kolejowego (LCC – *Life Cycle Cost*). W analizie uwzględniono nie tylko koszt zakupu, ale także koszty jego późniejszej eksploatacji. O koszcie eksploatacji w zasadniczym stopniu decydują cechy rozwiązań konstrukcyjnych, zapewniających wytrzymałość oraz obniżenie masy pojazdu. Konstrukcyjne elementy foteli z konwencjonalnych materiałów, takich jak stal stanowią istotną masę w wagonie. W celu zapewnienia pasażerom wymaganego komfortu i nadania produktowi odpowiedniego wzornictwa, producenci nakładają na konstrukcję

nośną fotela warstwę elastycznej pianki poliuretanowej oraz tapicerkę. Do konstrukcji są również montowane inne elementy fotela takie, jak podłokietnik i stolik. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy fotel kolejowy typu XCR, zaprojektowany przez firmę S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski dla przewoźników regionalnych.

Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji nowej i lżejszej konstrukcji fotela, spełniającej odpowiednie wymagania wytrzymałościowe. Przy obciążonych elementach, gdy istotna jest wytrzymałość właściwa (stosunek wytrzymałości do gęstości), kompozyty z osnową polimerową dobrze sprawdzają się i zapewniają wysoki poziom wytrzymałości przy niskim poziomie gęstości. Cenionym surowcem, szczególnie przy produkcji kompozytów FRP, jest żywica epoksydowa ze względu na jej amorficzną strukturę, nietoksyczność i minimalny skurcz w przypadku materiałów termoutwardzalnych, a także doskonałą

¹ Dr inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, e-mail: lukasz.golebiowski@pw.edu.pl.

² Dr inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, e-mail: marcin.siwek@pw.edu.pl.

³ Dr inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej.

⁴ Dr inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej.

⁵ Dr inż.; S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski, Dyrektor ds. rozwoju technologicznego.

⁶ S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski, Kierownik Działu Kompozytów i Rozwoju.

przyczepność do większości materiałów, takich jak metal, szkło i ceramika. Właściwości materiałowe kompozytów FRP oraz technologie laminowania umożliwiają zaprojektowanie nowych siedzeń w pociągach (w postaci skorupy nośnej). Taka konstrukcja zmniejsza masę siedziska o około 30–40% (szacunki własne) w porównaniu z typowymi rozwiązaniami, w których jest stosowana sklejka.



Rys. 1. Przykładowy fotel kolejowy typu XCR produkcji TAPS z podziałem na elementy funkcjonalne [źródło: <https://taps.com.pl>]

W przemyśle szklowniczym, kolejowym i budowlanym elementy kompozytowe o skomplikowanych kształtach są wytwarzane w jednym procesie laminowania. Przykładowo, w technologii infuzji próżniowej można wykonać nawet bardzo duże elementy konstrukcyjne mostów [9]. Należy także wyróżnić metodę laminowania próżniowego na gorąco opracowaną przez firmę S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski. Ta metoda polega na łączeniu kompozytowych prepregów z tkanin szklanych i sproszkowanej żywicy epoksydowej w temperaturze sieciowania polimeru [7, 8, 10].

Wytyczne do projektowania kształtu foteli kolejowych określają powszechnie przyjęte wymiary i krzywizny opisane w normie [4], opracowane w wyniku wieloletnich doświadczeń związanych z ergonomią i komfortem pasażerów. Kształt geometryczny fotela kolejowego opisują dwa podstawowe wymiary: wysokość oparcia powinna wynosić co najmniej 770 mm, a głębokość siedziska co najmniej 450 mm. Promienie krzywizn w określonych strefach fotela zapewniają odpowiednie wyprofilowanie krzywizny oparcia i podparcia w strefie lędźwiowej kręgosłupa pasażera, a kształt konstrukcji nośnej nadaje kształt fotelowi kolejowemu.

W trakcie projektowania konstrukcji foteli kolejowych, należy także uwzględnić rozwiązania techniczne dotyczące montażu elementów wyposażenia fotela (stół, podłokietniki), jak również montażu fotela do konstrukcji wagonu. W przypadku konstrukcji z kompozytów FRP należy przewidzieć odpowiednią powierzchnię współpracy elementów montażowych ze strukturą kompozytu, aby uniknąć inicjacji i propagacji mechanizmów zniszczeń takich, jak: delaminacje, ścinanie włókien lub pęknięcie osnowy epoksydowej [3].

2. Hipotezy wytrzymałościowe kompozytów FRP

Ze względu na niejednorodność materiału, mechanika uszkodzeń materiałów kompozytowych jest bardziej złożona w porównaniu do materiałów jednorodnych, których właściwości są zazwyczaj izotropowe. Anizotropia kompozytów powoduje, że orientacja uszkodzeń i ich rozwój zależy nie tylko od obciążenia, kształtu geometrycznego i warunków brzegowych, ale również od budowy materiału. W kompozytach FRP uszkodzenie rozwija się przy udziale, co najmniej kilku mechanizmów. Warstwa może się niszczyć przez pęknięcie włókien podczas rozciągania lub przez ich wyboczenie przy ściskaniu. Zniszczenie warstwy może również nastąpić na skutek uszkodzenia osnowy, co może być wynikiem działania naprężeń ścinających w płaszczyźnie warstwy lub prostopadłych do kierunku ułożenia włókien. Zniszczeniu może również ulec warstwa między włóknem i osnową. Oczywiście zniszczenie warstwy może również następować w wyniku działania kombinacji wszystkich lub niektórych z opisanych sposobów uszkodzenia.

Wpływ właściwości mechanicznych poszczególnych warstw na właściwości całego laminatu opisuje klasyczna teoria laminacji, inaczej zwana klasyczną teorią płyt laminowanych [2]. Wykorzystywany jest w niej model składający się z warstw o określonej grubości i kierunku ułożenia włókien. Zatem laminaty są modelowane jako materiały o właściwościach ortotropowych, liniowo elastycznych i kruchych. Rozważane w artykule kompozyty FRP, zbrojone tkaniną szklaną o orientacji włókien 0/90, są odpowiednikami jednorodnego materiału ortotropowego o trzech kierunkach ortotropii 1, 2, 3 pokrywających się kolejno z orientacjami włókien i z grubością warstwy. Każda warstwa jest opisana przez 9 sprężystych stałych materiałowych:

E_i – moduł Younga w kierunku i ,

ν_{ij} – współczynnik Poissona w płaszczyźnie ij , gdzie $ij = 12, 23, 31$,

G_{ij} – moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie ij , gdzie $ij = 12, 23, 31$ oraz

9 wytrzymałościowych stałych materiałowych:

R_{it}, R_{ic} – wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie dla głównych kierunków ortotropii, gdzie $i = 1, 2, 3$,

S_{ij} – wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie ij , gdzie $ij = 12, 23, 31$.

Wytrzymałość warstw kompozytów FRP, które poddano wieloosiowym obciążeniom określa się na podstawie różnych przyjętych hipotez zniszczeń, w tym: maksymalnych naprężeń, Tsai-Wu, Hashina, Tsai-Hilla, Hoffmana i innych. Kryteria naprężeń są oparte na koncepcji wskaźnika zniszczenia, który określa

efektywną (nieuszkodzoną) część przekroju badanego materiału. Parametr przyjmuje wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$, gdzie 0 oznacza stan bez defektów, a 1 oznacza moment, w którym materiał jest uszkodzony [5]. Autorzy artykułu zdecydowali się na zastosowanie następujących kryteriów identyfikujących występujące mechanizmy uszkodzeń materiałowych: kryterium maksymalnego naprężenia oraz kryterium Hashina. W obu przypadkach konieczne jest wyznaczenie naprężeń występujących w badanym materiale kompozytowym za pomocą elementów tensorowych naprężeń: σ_i, σ_{ij} , gdzie $i, j = 1, 2, 3$. Następnie, w przypadku hipotezy Hashina obliczane są następujące składowe F [6]:

- rozciągania włókien w kierunku 1 dla $\sigma_1 > 0$:

$$F_1 = \left[\left(\frac{\sigma_1}{R_{1t}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

- ściskania włókien w kierunku 1, $\sigma_1 < 0$:

$$F_2 = \left[\left(\frac{\sigma_1}{R_{1c}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

- rozciągania włókien w kierunku 2, $\sigma_2 > 0$:

$$F_3 = \left[\left(\frac{\sigma_2}{R_{2t}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

- ściskania włókien w kierunku 2, $\sigma_2 < 0$:

$$F_4 = \left[\left(\frac{\sigma_2}{R_{2c}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

- rozciągania osnowy, $\sigma_3 > 0$:

$$F_5 = \left[\left(\frac{\sigma_3}{R_{3t}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

- ściskania osnowy, $\sigma_3 < 0$:

$$F_6 = \left[\left(\frac{\sigma_3}{R_{3c}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

gdzie: $\sigma_i, \sigma_{ij}, i, j = 1, 2, 3$ – elementy tensora naprężeń.

Parametry zniszczenia R_i (ang. *failure index*) dla hipotezy Hashina, które określają wyężenie warstwy, oblicza się zgodnie z następującym wzorem:

$$R_i = \sqrt{F_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

W przypadku hipotezy maksymalnych naprężeń, składowe F_i i F_{ij} oblicza się dla każdego elementu tensora naprężeń [11]:

$$F_i = \begin{cases} \frac{\sigma_i}{R_{it}} & \text{dla } \sigma_i > 0 \\ -\frac{\sigma_i}{R_{ic}} & \text{dla } \sigma_i < 0 \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$F_{ij} = \frac{|\sigma_{ij}|}{S_{ij}}, \quad ij = 12, 23, 31 \quad (9)$$

Parametry zniszczenia R_i dla hipotezy maksymalnych naprężeń, określające wyężenie warstwy, są równe składowym F_i i F_{ij} :

$$R_i = F_i, \quad R_{ij} = F_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

Ponadto, wprowadza się następujące założenie:

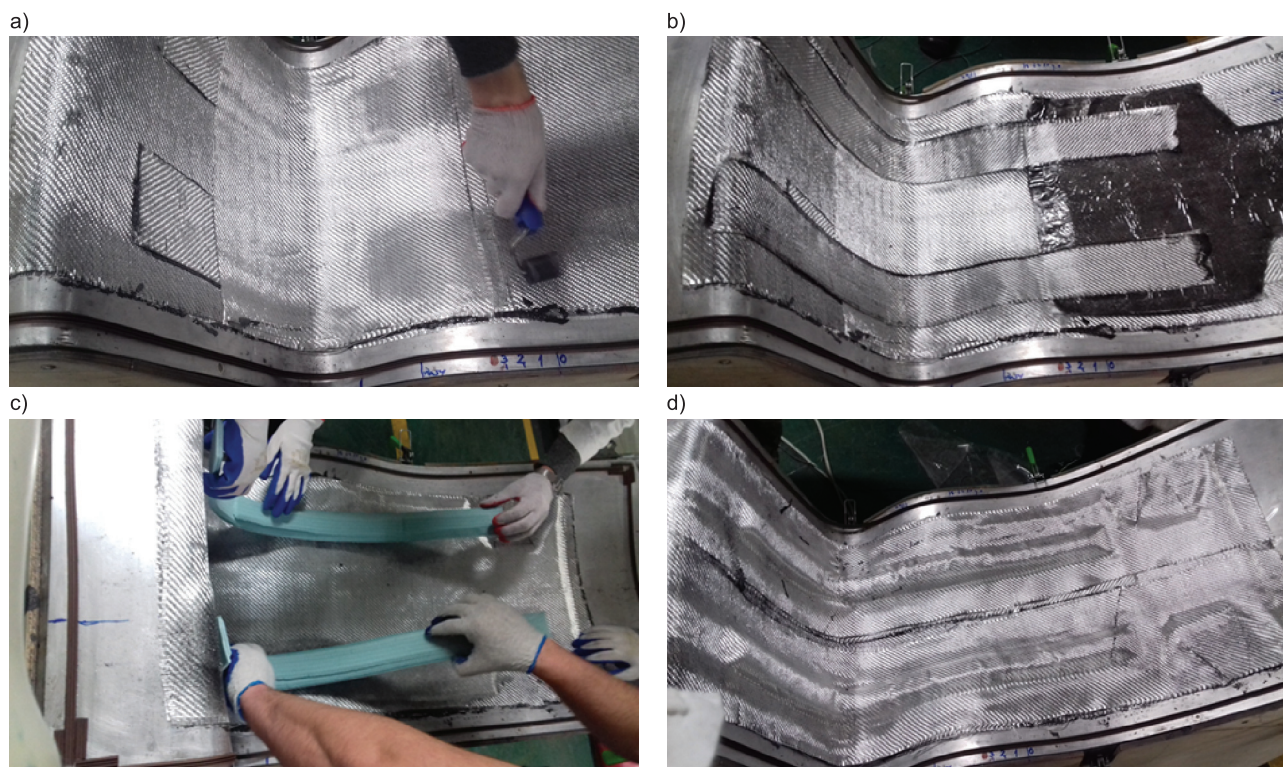
$$R_4 = R_{12}, \quad R_5 = R_{23}, \quad R_6 = R_{31} \quad (11)$$

Wartość parametrów zniszczenia R_i dla włókien oraz osnowy określa poziom bezpieczeństwa konstrukcji kompozytowej. Wartość tego parametru nie może przekraczać 1 w żadnym z opisanych stanów naprężenia. W przeciwnym razie może dojść do uszkodzenia warstwy kompozytu, a nawet całkowitego zniszczenia całej konstrukcji.

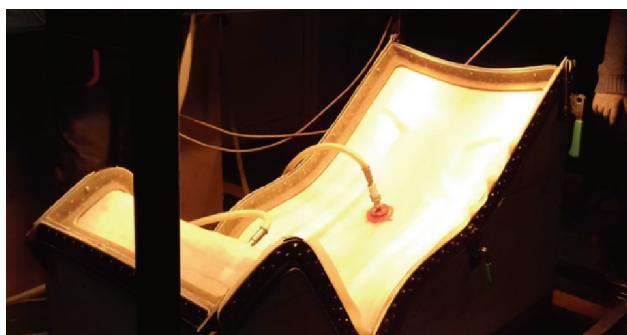
3. Wytwarzanie oraz doświadczalny test modelu walidacyjnego

Na podstawie wytycznych z prac modelowych wytworzono prototyp (model walidacyjny) skorupy nośnej fotela w skali 1:1. Na stanowisku technologicznym firmy S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski, metodą laminowania próżniowego na gorąco, połączono epoksydowo-szklane prepregi (rys. 2, 3), uniepalnione za pomocą cząstek „płatkowego grafitu”. Grafit płatkowy nadaje skorupie czarny kolor.

Model walidacyjny o masie 6 kg poddano następnie próbie wytrzymałości w celu weryfikacji modelu obliczeniowego. Warunki obciążenia zgodne z normą [4] odwzorowano na maszynie wytrzymałościowej będącej wyposażeniem firmy S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski. Obiekt badań osadzano na stelażu stanowiska badawczego. Obciążenie realizowano w dwóch oddzielnych próbach dwoma obciążeniami F_{1max} (na zewnątrz) i F_{2max} (do środka) o dopuszczalnej wartości 1500 N, przyjętej przez S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski, których środek przyłożenia znajdował się w odległości 50 mm od górnej krawędzi oparcia kom-



Rys. 2. Przykładowe etapy układania kompozytowych prepregów w formie odzwierciedlającej kształt zewnętrzny skorupy nośnej fotela; a) warstwy zewnętrzne i warstwy w strefie lędźwiowej, b) pianka poliuretanowa w strefie zagłówka (na zdjęciu czarny kolor) oraz pierwsze warstwy stanowiące żebra, c) wkładki poliuretanowe tworzące kształt żebra, d) warstwy wewnętrzne – koniec układania [fot. autorów]



Rys. 3. Proces laminowania na gorąco kompozytowej skorupy nośnej fotela [fot. autorów]

pozytywnej skorupy fotela (rys. 4, 5). Ten rodzaj obciążenia został wybrany jako najbardziej wymagający dla konstrukcji. Ze względu na kombinację siły działającej na dużym ramieniu, pojawia się znaczna wartość momentu zginającego. Mimo, że norma określa inne przypadki obciążeń są one stosowane do kompletnego fotela i oddziałują na elementy konstrukcji takie jak podłokietnik, stolik lub podnózek. Również wartości sił i momentów zginających w tych przypadkach są odpowiednio mniejsze.

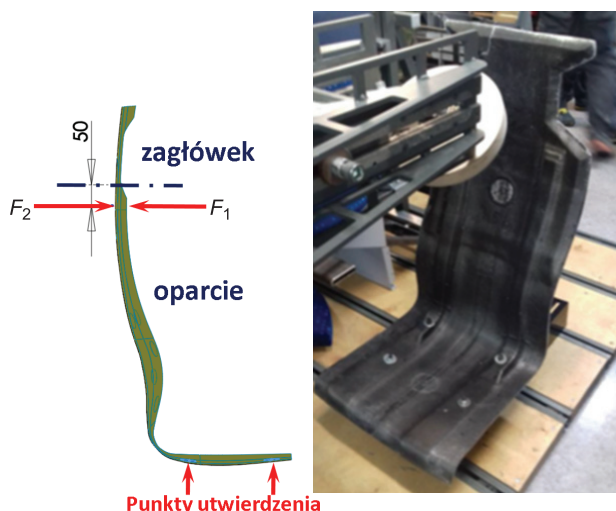
Ogólną praktyką dla tego rodzaju konstrukcji jest sprawdzenie najbardziej wymagającego przypadku obciążenia struktury nośnej. Obciążanie było realizowane

przez nacisk przesuwającego się tłoka na stempel. W zależności od sposobu przyłożenia maksymalnego obciążenia o sile 1500 N, oparcie przemieściło się o 120 mm przy sile F_{1max} oraz o 75 mm przy sile F_{2max} , bez trwałego odkształcenia po zdjęciu obciążenia. Pomiarów siły dokonywano z krokiem 10 N. Przemieszczenia były



Rys. 4. Punkt przyłożenia siły podczas testu wytrzymałości (50 mm poniżej górnej granicy oparcia) [opracowanie autorów]

mierzone za pomocą taśmy mierniczej z dokładnością 1 mm. Na podstawie wyników doświadczalnych stwierdzono, że zaprojektowana kompozytowa konstrukcja skorupy spełnia wymagania narzucone przez normę [4].



Rys. 5. Kompozytowa skorupa nośna zamontowana na stanowisku badawczym stanowiącym wyposażenie firmy S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski [fot. i rys. autorów]

W dalszych pracach prowadzonych w celu redukcji masy kompozytowej skorupy fotela, zdecydowano się na modyfikację polegającą na wycięciu otworów przetłokowych z miejsc najmniej wyężonych (rys. 6). Po tym zabiegu model fizyczny ważył 5,2 kg i z wynikiem pozytywnym przeszedł próbę wytrzymałościową. Będą również zaprezentowane wyniki analiz numerycznych dla „odchudzonej” wersji fotela.



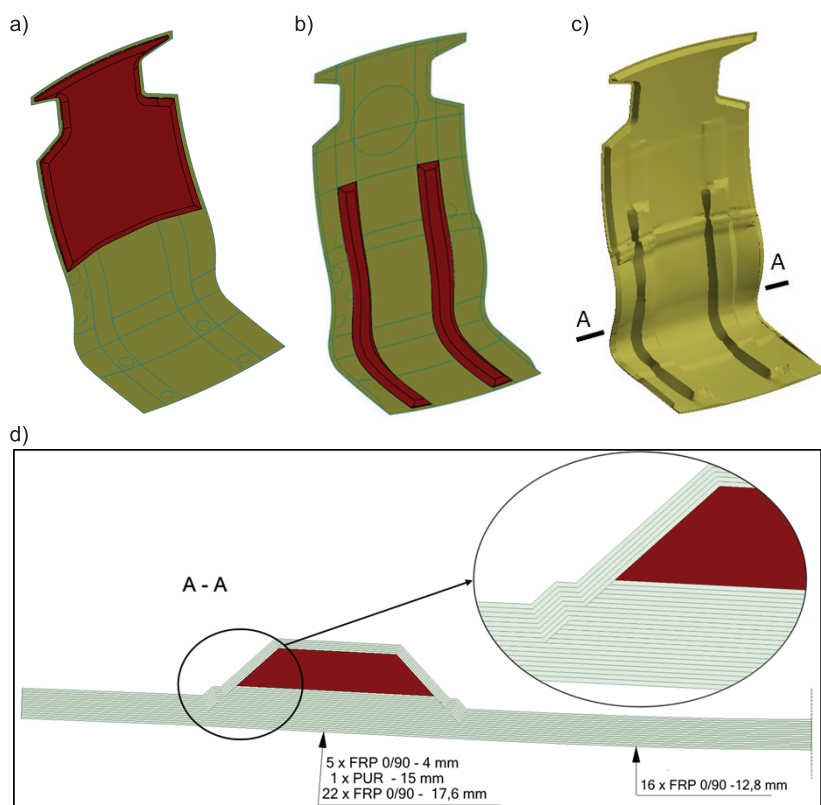
Rys. 6. Kompozytowa skorupa nośna fotela z wyciętymi otworami [fot. autorów]

4. Numeryczna symulacja testu wytrzymałościowego

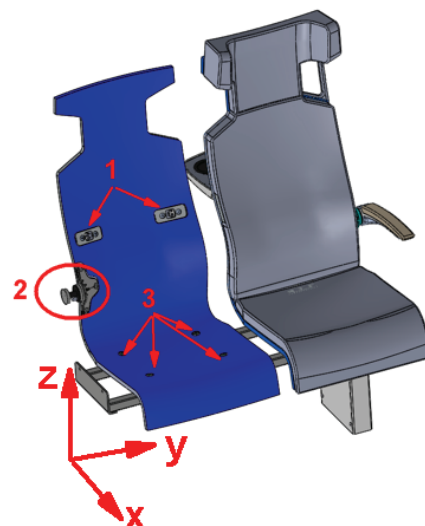
Przed wykonaniem prototypu, opracowano numeryczny (obliczeniowy) model kompozytowej skorupy nośnej fotela, składający się z modelu kształtu geometrycznego, zbioru właściwości materiałowych oraz warunków brzegowych zgodnych z normą [4]. Obliczenia wykonano za pomocą oprogramowania ANSYS [ang. *Ansys Composite PrepPost*], bazującego na metodzie elementów skończonych. Zanim opracowano ostateczne rozwiązanie konstrukcyjne kompozytowej skorupy, na etapie modelowania podjęto wiele prób poszukiwania najlepszego rozwiązania, gdzie zmiennymi były m.in.: gramatura tkaniny szklanej, rozmieszczenie i liczba warstw kompozytu, usztywniające elementy oraz problemy technologiczne.

Kształt przestrzenny skorupy nośnej był odwzorowany na podstawie autorskiego projektu siedziska kolejowego firmy S.Z.T.K. TAPS – Maciej Kowalski, natomiast finalny kształt skorupy nośnej fotela jest wynikiem kilkietapowej optymalizacji modeli obliczeniowych, walidowanych modelami doświadczalnymi. W modelu kształtu geometrycznego grubość nadają warstwy kompozytowe (załaminowane w żywicy epoksydowej tkaniny szklane o orientacji 0/90) oraz wypełnienia z pianki poliuretanowej (rys. 7a). W zależności od strefy fotela i liczby warstw kompozytowych (od 3 do 34), grubość ta jest różna. Założono, że grubość pojedynczej warstwy kompozytowej wynosi 0,8 mm, natomiast liczba warstw kompozytu wynika z charakteru pracy konstrukcji pod zadaniem obciążeniem. Najwięcej warstw występuje między oparciem i siedziskiem, w strefie narażonej na wysokie wartości naprężeń. Dodatkowo skorupę wzmocniono dwoma usztywniającymi żebrami, których kształt zapewniły wkładki z pianki poliuretanowej. Kształt żeber został tak wyprofilowany, aby umożliwić swobodne rozłożenie tkanin podczas wytwarzania oraz przeciwdziałać koncentracjom naprężeń, które mogą powstawać w wyniku gwałtownych zmian przekroju (rys. 7b-d). W projektowaniu modelu kształtu skorupy nośnej fotela uwzględniono również sposób montażu stolika i podłokietników. Wykorzystano do tego komercyjne elementy ustawcze (KVT *Bighead*) o dużej powierzchni czynnej, wykorzystywane do konstrukcji z kompozytów FRP (rys. 8).

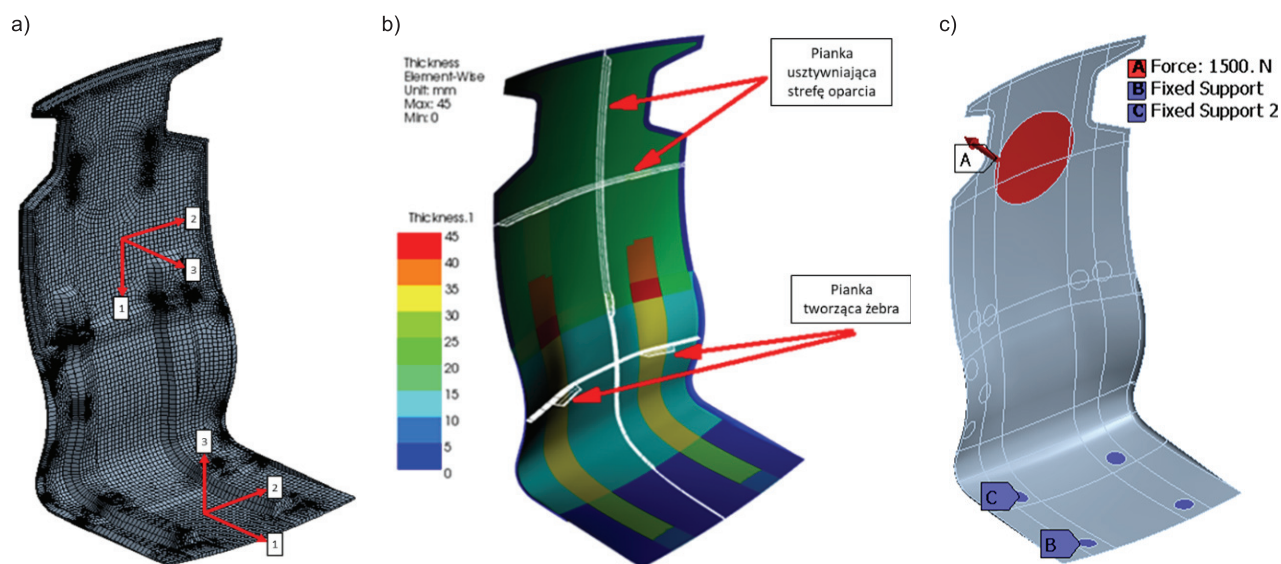
Obliczeniowy model podzielono na czterowęzłowe elementy powłokowe w trójwymiarowej przestrzeni (rys. 9a). Globalny układ współrzędnych 1, 2, 3 reprezentował zarówno kształt geometryczny modelu, jak i kierunki właściwości ortotropowych kompozytu FRP, gdzie osie 1 i 2 pokrywają się z płaszczyzną tworzoną przez krzywizny geometryczne skorupy, natomiast oś 3 definiuje grubość modelu (rys. 9b). Warun-



Rys. 7. Budowa skorupy nośnej fotela: a) warstwa pianki PUR w górnej strefie oparcia, b) wkładki z pianki PUR kształtujące żebra, c) ostateczny kształt geometryczny modelu, d) półprzekroju w strefie lędźwiowej pasażera [opracowanie autorów]



Rys. 8. Elementy montażowe wyposażenia na skorupie nośnej fotela: 1) stolika, 2) podłokietnika, 3) widoczne punkty zamocowania do konstrukcji wagonu [opracowanie autorów]



Rys. 9. Numeryczny model skorupy nośnej fotela: a) siatka elementów skończonych z oznaczonymi kierunkami ortotropii kompozytu FRP, b) mapa rozkładu grubości oznaczona kolorami, c) warunki brzegowe [opracowanie autorów]

ki podparcia i sposób wprowadzenia siły w modelu pokazuje rysunek 9c.

W obliczeniach wykorzystano stałe materiałowe kompozytów FRP wyznaczone empirycznie na podstawie badań własnych (testy wytrzymałościowe na rozciąganie, ściskanie i ścinanie). W konstrukcji fotela zastosowano tkaniny o orientacji włókien 0/90 i dlatego założono, że poszczególne właściwości materiałowe kompozytów FRP są sobie równe (tabl. 1). W obliczeniach uwzględniono również właściwości materiałowe pianki Airex T90 PU na podstawie specyfikacji producenta (tabl. 2) [1].

Tablica 1
Właściwości materiałowe kompozytu FRP do modelowania skorupy nośnej fotela

Parametr [MPa]	Wartość
Moduł Younga	$E_1 = E_2$ 7350
	E_3 1750
Moduł Kirchhoffa	G_{12} 3040
	$G_{23} = G_{13}$ 2040
Współczynnik Poissona [-]	ν_{12} 0,28
	$\nu_{13} = \nu_{23}$ 0,4
Wytrzymałość na rozciąganie	$R_{1t} = R_{2t}$ 256
	R_{3t} 31
Wytrzymałość na ściskanie	$R_{1c} = R_{2c}$ 195
	R_{3c} 100
Wytrzymałość na ścinanie	S_{12} 50
	$S_{23} = S_{13}$ 35

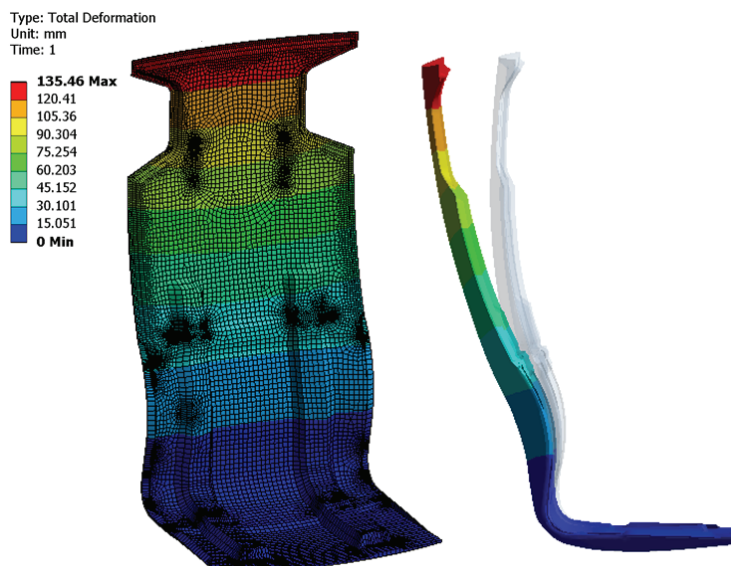
[Opracowanie autorów].

Tablica 2
Właściwości pianki Airex T90 do modelowania skorupy nośnej fotela [1]

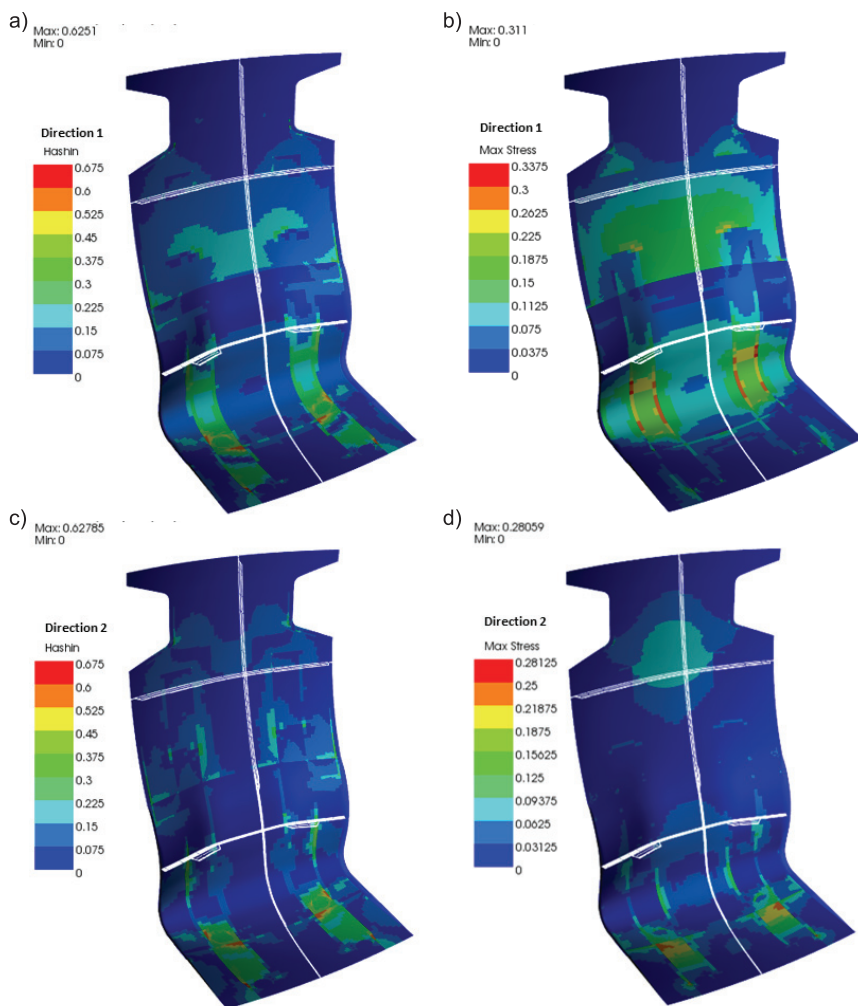
Parametr [MPa]	Wartość
Moduł Younga	65
Moduł Kirchhoffa	44
Współczynnik Poissona [-]	0,3
Wytrzymałość na rozciąganie	1,5
Wytrzymałość na ściskanie	0,8

Wyniki wytrzymałościowego testu kompozytowej skorupy fotela w skali 1:1 pokazały, że maksymalne wartości przemieszczenia skrajnego punktu zagłówka nieznacznie przekraczają 135 mm (rys. 10) i zawierają się w przedziale dopuszczonym przez normę [4]. Zgodnie z wybranymi hipotezami wytrzymałościowymi: maksymalnych naprężeń oraz Hashina, przeprowadzono również analizę wytrzymałości zastosowanego kompozytu FRP. Wyniki przedstawiono w postaci map rozkładu parametru zniszczenia R_i (rys. 11).

W analizowanym modelu największe wyężenie materiału występuje w pobliżu punktów mocowania ze stelażem wagonu, a maksymalna wartość parametru zniszczenia zgodnie z hipotezą Hashina w tych miejscach wynosi 0,63. Następną strefą o podwyższonym wyężeniu, gdzie R_i jest równe około 0,3, jest strefa między siedziskiem i oparciem. Jest to obszar o maksymalnym momencie gnącym dla zadanego obciążenia. Gdy $R_i < 1$ oznacza to, że analizowany model nie uległ zniszczeniu.



Rys. 10. Przemieszczania całkowite modelu skorupy [opracowanie autorów]

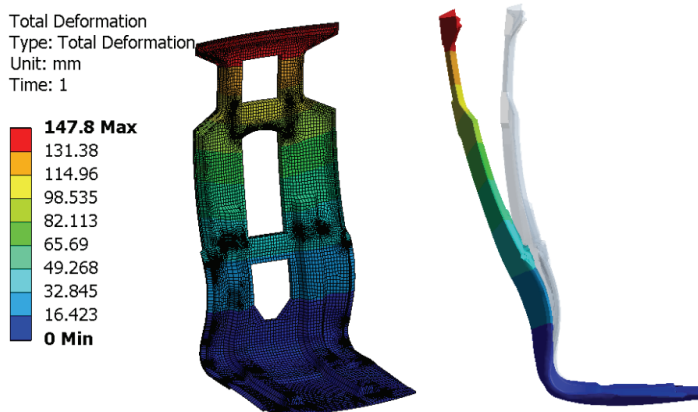


Rys. 11. Rozkład parametru uszkodzenia R kompozytowego modelu skorupy dla dwóch kierunków ortotropii 1 i 2 oraz dla dwóch hipotez wytrzymałościowych: a i c) Hashina, b i d) maksymalnych naprężeń [opracowanie autorów]

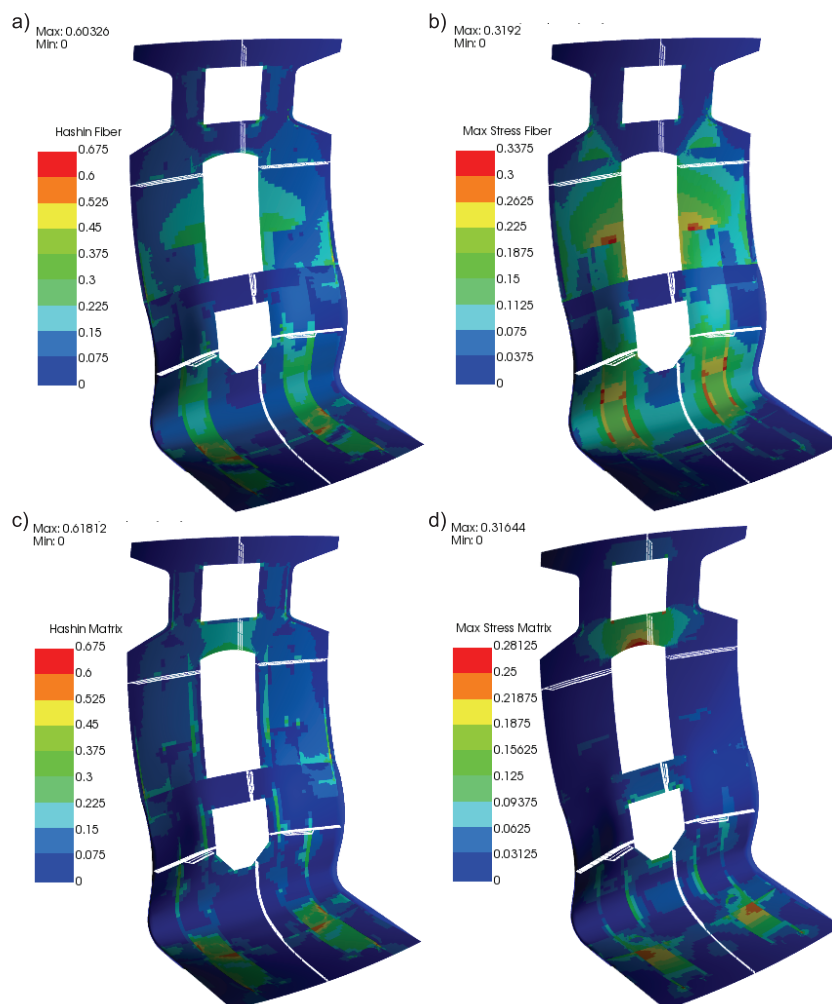
W przypadku zmodyfikowanego typu siedziska otrzymano podobne wartości według kryteriów maksymalnych naprężeń i Hashina. „Odchudzona” wersja kształtu geometrycznego (rys. 12) wykazuje przemieszczenia większe o 11 mm. Wartości parametru uszkodzenia R_i są znacznie mniejsze od 1. Najwyższy wskaźnik zniszczenia dla kryterium Hashina wynosi odpowiednio 0,6 i 0,618 dla kierunku ortotropowego

1 i 2. W przypadku kryterium maksymalnych naprężeń wartości te wynoszą 0,32 i 0,316.

Maksymalne różnice parametru uszkodzenia pomiędzy dwoma prezentowanymi typami foteli są mniejsze od 0,04 i dotyczą kryterium maksymalnych naprężeń. Niewielkie różnice w wartościach, a także w rozkładzie parametru zniszczenia, potwierdzają że zmodyfikowana konstrukcja jest w stanie wytrzymać obciążenie 1500 N.



Rys. 12. Przemieszczania całkowite modelu skorupy [opracowanie autorów]



Rys. 13. Rozkład parametru uszkodzenia R_i kompozytowego modelu skorupy dla dwóch kierunków ortotropii 1 i 2 oraz dla dwóch hipotez wytrzymałościowych: a i c) Hashina, b i d) maksymalnych naprężeń [opracowanie autorów]

Wyniki analizy przedstawiono w postaci wykresów rozkładu parametru uszkodzenia R_i (rys. 13).

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kompozytową skorupę nośną fotela kolejowego składającą się z połączonych ze sobą prepregów kompozytowych epoksydowo-szklanych oraz wypełnień w postaci pianki poliuretanowej. W wyniku prac modelowych i badań doświadczalnych stwierdzono zbieżność numerycznego modelu skorupy nośnej fotela z wytworzonym modelem walidacyjnym w przypadku działania obciążenia krytycznego. Na potrzeby prac koncepcyjnych i szybkiego prototypowania kompozytowych elementów konstrukcyjnych foteli stworzono metodykę modelowania i analiz wytrzymałościowych, natomiast przeprowadzenie weryfikacji doświadczalnej zapewni zachowanie jakości z zakresu wytrzymałości i bezpieczeństwa. Przedstawiony program prac modelowych i badań doświadczalnych może przyczynić się do wprowadzenia w pojazdach kolejowych lekkich i wytrzymałych foteli

o konstrukcji skorupowej, zbudowanych z nowych materiałów na bazie kompozytów FRP. Zaproponowana procedura projektowania i numerycznej optymalizacji struktury nośnej kompozytu pokazała zdolność do obniżenia liczby prototypów. Ponadto, dobrany kompozyt zredukował masę siedziska o około 30–40% w porównaniu z typowymi rozwiązaniami, w których jest stosowana sklejka drewniana.

Literatura

1. Core materials Airex, WWW <http://sicomin.com/datasheets/product-pdf1139.pdf> [accessed on: 11.2016].
2. German J., Mikulski Z.: *Zastosowanie koncepcji uszkodzeń kontynualnych do opisu progresywnego zniszczenia laminatów kompozytowych*, Czasopismo Techniczne Mechanika, T. R 107, z. 3-M, 2010, s. 27–41.
3. Gołębiowski Ł. et.al.: *Damage impact on the load-carrying strength of the fiber reinforced polymers composites to be used in bridge engineering*, Composites Theory and Practice, T. R 15, nr 1, 2015, s. 3–7.

4. Grundlagen für die Konstruktion und Prüfung von Fahrgastsitzen in Schienenfahrzeugen Deutsche Bahn AG, VTZ 221, 04103 Leipzig, Stand: 2017.
5. Kachanov L.M.: *The theory of creep* (English translation edited by Kennedy A.J.), National Lending Library, Boston Spa, 1958.
6. Marc 2008.r1, Volume A: Theory and User Information, MSC.Software Co., Santa Ana, CA, USA.
7. Oliwa R. et.al.: *Fire resistant glass fabric-epoxy composites with reduced smoke emission*, Polimery, T. 64, nr 4, 2019, s. 290–293.
8. Pilawka R., Gorący K.: *Nowe materiały na preplegi przechowywane w temperaturze pokojowej*, Przetwórstwo Tworzyw, T. R. 19, nr 4(154), 2013, s. 395–396.
9. Siwowski T. et.al.: *Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP*, Inżynieria i Budownictwo, nr 10/2016, s. 534–538.
10. Stanik R. et.al.: *Integracja układów elektronicznych w strukturze materiału kompozytowego*, Przetwórstwo Tworzyw, T. 21, nr 5(167), 2015, s. 419–427.
11. Sun C.T.: *Comparative evaluation of failure analysis methods for composite laminates*, NASA, DOT/FAA/AR-95/109, 1996.

Projekt był finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, nr POIR.01.01.01-00-0158/16 pt. „Badania przemysłowe i prace rozwojowe w zakresie opracowania i wykonania prototypów opcjonalnego typoszeregu innowacyjnych foteli przeznaczonych do wyposażenia szynowych środków transportu do masowego przewozu osób”, 2020.