

Doświadczalne wstępne badania odkształcalności płyt kompozytowych, wykorzystywanych do budowy przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych

Experimental preliminary studies of the deformability of composite panels used for the construction of ventilation and air-conditioning ducts

KRZYSZTOF KEGLER, ROBERT CICHOWICZ, MARCIN KAMIŃSKI

DOI 10.36119/15.2023.11.6

W artykule przedstawiono zagadnienie odkształcalności przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych z materiałów kompozytowych. Omówiono problematykę badań właściwości mechanicznych przewodów oraz przeanalizowano aktualne wytyczne w tym zakresie. Zaproponowano nową metodykę badań oraz opisano eksperymentalne stanowisko badawcze, które może być wykorzystywane do testowania różnego typu płyt wielowarstwowych, stosowanych do budowy przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Dzięki przeprowadzonej analizie obecnie stosowanych metod wzmocnienia przewodów oraz w wyniku przeglądu stosowanych w budownictwie materiałów kompozytowych, wykonano szereg badań, które doprowadziły do opracowania nowej metody wzmocnień, która cechuje się możliwością znacznego zwiększenia wytrzymałości i niezawodności przy zachowaniu najważniejszych zalet przewodów kompozytowych. Zwiększenie w ten sposób zakresu bezawaryjnej pracy ponad 2,5 krotnie zaowocowało uzyskaniem patentu na wynalazek pt. „Wzmocniona płyta wielowarstwowa, zwłaszcza do budowy przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych”.

Słowa kluczowe: przewody kompozytowe, przewody wentylacyjne, płyty wielowarstwowe, wytrzymałość

The article presents the issue of deformability of ventilation and air conditioning ducts made of composite materials. The problem of testing the mechanical properties of ducts is discussed and the current guidelines in this area are analyzed. A new test scheme was proposed along with an experimental test stand, which can be a starting point for testing various types of multi-layer boards used for the construction of ventilation and air-conditioning ducts. The obtained test results, together with an analysis of currently used methods of duct reinforcement and a review of composite materials used in construction, led to the development of a new method of reinforcement, which is characterized by the possibility of significantly increasing strength and reliability while maintaining the most important advantages of composite ducts. Increasing the range of failure-free operation by more than 2.5 times resulted in obtaining a patent for the invention entitled: “Reinforced multilayer plate, especially for the construction of ventilation and air-conditioning ducts”.

Keywords: composite air ducts, ventilation ducts, multi-layer board, strength, durability

Wstęp

Wśród wielu zalet płyt wielowarstwowych stosowanych do budowy przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, takich jak ich ciepło – i zimnochroność, dźwiękochłonność oraz mała gęstość właściwa zastosowanego materiału (skutkująca niską masą), pozostaje nie do końca dopracowany teoretycznie i doświadczalnie problem ich wytrzymałości i odkształcalności w warunkach eksploatacyjnych. Ze względu na nietypowe zastosowanie płyt z rdzeniem z wełny mineralnej lub pianki PUR/PIR, czyli zastosowania konstrukcyjnego,

literatura jest w tym zakresie dość uboga. Badania przewodów kompozytowych, jeśli już pojawiają się w literaturze, przeważnie koncentrują się na kompozytach bez rdzenia z wełny mineralnej lub pianki PUR/PIR ([1], [26], [31], [35]) albo dotyczą właściwości izolacyjnych lub akustycznych ([2], [7], [9], [29], [32], [33], [34]). Wobec powyższego, główną pozycją literaturową w zakresie badań wytrzymałościowych jest aktualna norma PN-EN 13403:2005 *Wentylacja budynków. Przewody niemetalowe. Sieć przewodów wykonanych z płyt izolacyjnych* [25]. Przewiduje ona dla przewodów wentylacyjnych, wykonanych

z płyt wielowarstwowych, przeprowadzenie szeregu badań umożliwiających sprawdzenie ich wytrzymałości, dopuszczalnych odkształceń i technicznej poprawności wykonania przewodu, jak i zastosowanego do jego budowy materiału. Norma zaleca przeprowadzenie następujących badań [25]:

- odporności ścianek wewnętrznych przewodów na niszczące działanie maksymalnej prędkości strugi przepływu powietrza dopuszczonej przez producenta;
- odkształceń przewodów przy maksymalnym nadciśnieniu dopuszczonym przez producenta;

mgr inż. Krzysztof Kegler krzysztof.kegler@o2.pl <https://orcid.org/0000-0003-3713-5542>, dr hab. inż. Robert Cichowicz prof. PŁ robert.cichowicz@p.lodz.pl <https://orcid.org/0000-0003-3233-2838> – Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka
prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński marcin.kaminski@p.lodz.pl <https://orcid.org/0000-0002-8180-6991> – Katedra Mechaniki Konstrukcji, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka

- utrzymania klasy szczelności przewodu;
- strat energii mechanicznej na długości przewodu;
- klasy sztywności płyt użytych do budowy przewodu;
- klasy pochłaniania wilgoci przez płytę;
- klasy pochłaniania dźwięku;
- współczynnika przewodzenia ciepła lub oporu cieplnego.

Przy czym w rozdziale 7.3 normy [25] dotyczącej odporności na ciśnienie przewodów zbudowanych z płyt wielowarstwowych podano tylko, że powinny one wytrzymać 2,5 krotną wartość nadciśnienia nominalnego deklarowanego przez producenta, lecz nie mniej niż 200 Pa. Natomiast nie podano przez jaki okres przewód wentylacyjny ma wytrzymać to ciśnienie. Nie podano również, czy powinno ono być stałe w czasie badania, czy też powinno narastać, a jeśli tak, to przez jaki czas? Istotną jest tu dynamika pracy przewodu przy uruchamianiu i wyłączaniu instalacji (występują wówczas gwałtowne zmiany ciśnienia). Norma [25] nie podaje również żadnych warunków dopuszczalnego ciśnienia, gdy przewód będzie pracował jako odprowadzający zużyte powietrze, czyli w warunkach podciśnienia. Przekrój badanego przewodu powinien mieć wymiary 300x300 mm. W żadnym wypadku wymiary te nie będą reprezentatywne w przypadku większości elementów instalacji, gdyż stosuje się nawet kilkukrotnie większe wymiary boków. Przewód o wymiarach 300x300 mm będzie cechował się względnie dużą sztywnością i można spodziewać się, iż spełni kryteria stawiane w większości prób wytrzymałościowych, lecz nie będzie to odzwierciedlało typowych warunków pracy. Samo stanowisko badawcze, przedstawione w normie nie jest precyzyjnie opisane. Brakuje określonej liczby podparć i orientacji przewodu, co może wpływać na różnice między badaniami (brak powtarzalności wyników) [12].

Oprócz odporności na ciśnienie, ugięcia ścian przewodów obciążonych panującym wewnątrz ciśnieniem nie mogą przekraczać dopuszczalnych wartości. W tym przypadku norma [25] przewiduje obciążenie ścianek przewodów wewnętrznym podciśnieniem, z zastrzeżeniem, że wybrzuszenie lub wklęsnięcie powierzchni zewnętrznej przewodu nie powinno przekroczyć 3 % szerokości boku przewodu lub 30 mm, dopuszczając większą wartość z tych dwóch warunków.

Są to wszystkie zalecenia dotyczące badań wytrzymałościowych zawarte w normie [25]. Nieliczne wymagania w zakresie badania wytrzymałości oraz mały stopień szczegółowości normy mogą doprowadzić do niewłaściwej oceny końcowej wytrzymałości przewodów.

Wzmocnienie struktury płyt kompozytowych

Chociaż norma [25] zastrzega, że wybrzuszenie lub wklęsnięcie powierzchni zewnętrznej przewodu nie powinno przekro-

czyć 3 % szerokości boku przewodu lub 30 mm, dopuszczając większą wartość z tych dwóch warunków, to w wyniku badań płyt oraz przyczyn ich uszkodzeń należy stwierdzić, iż uszkodzenie którejkolwiek z warstw kompozytu powinno stanowić dopuszczalne kryterium oceny. Wszystkie powyższe elementy skłaniają do znalezienia rozwiązania, które pozwoli na zwiększenie wytrzymałości płyt, nie utrudniając jednocześnie montażu przewodów oraz pozwalając na skorzystanie z największych zalet materiałów kompozytowych, takich jak ich niska masa.

Rozwiązania obecnie stosowane

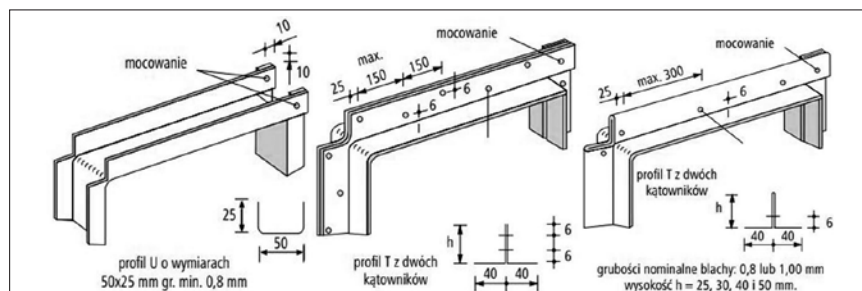
Standardowo zalecane do stosowania przez producentów wzmocnienia przewodów z płyt wielowarstwowych zbudowanych na bazie wełny mineralnej składają się z profili ze stali ocynkowanej o różnych przekrojach (U-kształtne, T-kształtne). Można je stosować w różnych konfiguracjach, w zależności od panującego w przewodzie ciśnienia oraz jego kierunku ułożenia (poziomo, pionowo) [18], [19].

Przy nadciśnieniu wewnętrznym zastosowanie mają wzmocnienia obwodowe (rys. 1). Polegają one na wykonaniu opaski na zewnątrz przewodu. Poszczególne elementy

Analiza możliwości

W budownictwie już od pewnego czasu z powodzeniem wykorzystuje się materiały kompozytowe do wzmacniania konstrukcji, głównie żelbetowych, ale także stalowych ([3-4], [8], [13-15], [16-17], [21-24], [27-28], [30]). Najbardziej obiecującym kierunkiem stało się wykorzystanie materiałów kompozytowych wzmacnianych włóknami (FRP – ang. *fiber reinforced polymers*). Kompozyty FRP są materiałami składającymi się z dwóch składników. Jednym ze składników jest wzmocnienie, które jest osadzone w drugim składniku, ciągłym polimerze zwanym matrycą [27]. Materiał wzmacniający ma postać włókien (w tym przypadku węglowych), które są sztywniejsze i mocniejsze niż matryca. Składniki są łączone na poziomie makroskopowym i nie są rozpuszczalne w sobie. Kompozyty FRP są materiałami anizotropowymi; to znaczy, że ich właściwości nie są takie same we wszystkich kierunkach. W zastosowaniach budowlanych wyróżnia się trzy podstawowe kompozyty, różniące się rodzajem użytych włókien ([6], [10], [11], [36]). Stosowane są następujące oznaczenia tych materiałów:

- CFRP – Carbon Fibre Reinforced Polymers – materiały na bazie włókien węglowych;



Rys. 1. Rodzaje możliwych wzmocnień obwodowych ze stali [18]
Fig. 1. Types of circumferential steel reinforcements [18]

profili należy uprzednio pomierzyć, dociąć na wymaganą długość, a następnie zmontować, używając elementów łączących, takich jak śruby, nakrętki czy wkrety. Przy podciśnieniu wewnętrznym, zalecanym wzmocnieniem jest rura stalowa o średnicy minimalnej $\varnothing 16$ oraz blaszki stalowe. Miejsca mocowania wzmocnień należy przewidzieć już na etapie wycinania przewodów.

Zastosowanie wzmocnień znacząco wydłuża czas montażu z powodu konieczności docinania i łączenia ze sobą kolejnych elementów. Przekłada się to na dodatkowe koszty, a konieczność wykorzystania elementów stalowych zwiększa masę przewodów. Oprócz tego, zastosowanie niektórych rodzajów wzmocnień powoduje przerwanie ciągłości struktury płyt i w tych miejscach występuje potencjalna możliwość występowania nieszczelności. Pracochłonność wykonania takich wzmocnień może również stawiać pod znakiem zapytania opłacalność i zasadność wykorzystania przewodów z płyt kompozytowych. W związku z tym postanowiono poszukać rozwiązania bardziej ekonomicznego.

- GFRP – Glass Fibre Reinforced Polymers – materiały na bazie włókien szklanych;
- AFRP – Aramid Fibre Reinforced Polymers – materiały na bazie włókien aramidowych.

Włókna węglowe są stosowane najczęściej. Połączenie wysokiej wytrzymałości na rozciąganie z bardzo wysokim modułem sprężystości powoduje, że materiały CFRP nadają się do wzmacniania wszystkich rodzajów konstrukcji. Bardzo istotnym aspektem jest fakt, iż kompozyty CFRP wchodzą we współpracę ze wzmacnianą konstrukcją już przy bardzo niewielkich jej odkształceniach. Z uwagi na powyższe, do dalszych badań wybrano taśmy kompozytowe na bazie włókien węglowych.

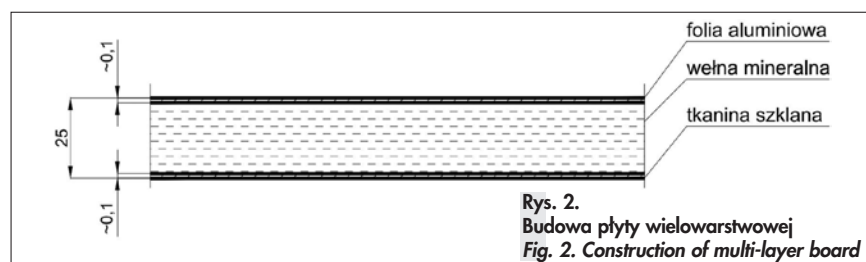
Badania doświadczalne płyt kompozytowych

Badanie kompozytowych przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych jest z natury obciążone błędami wynikającymi z ich sposobu formowania (wycinanie, składanie

i montaż płyt). Wpływ na sposób deformacji ścian mają również podpory podtrzymujące przewód. Ściany przewodu mogą się odkształcać w inny sposób również ze względu na kierunek ułożenia (odkształcenie górne i dolne dla przewodów prowadzonych poziomo, odkształcenia boczne – dla przewodów prowadzonych pionowo). W celu wyeliminowania czynników, mogących wpływać na przebieg badań, zdecydowano się nie badać całego przewodu wentylacyjnego, a jedynie pojedyncze płyty, z których można zbudować kanał. Taki model, prosty geometrycznie, będzie umożliwiał zbadanie odkształceń pod wpływem ciśnienia wewnętrznego.

Analizowane wielowarstwowe płyty izolacyjne służące do budowy kanałów wentylacyjnych, składają się z trzech warstw (przekrój płyty pokazano na rys. 2):

- folii aluminiowej, wzmocnionej włóknem szklanym;

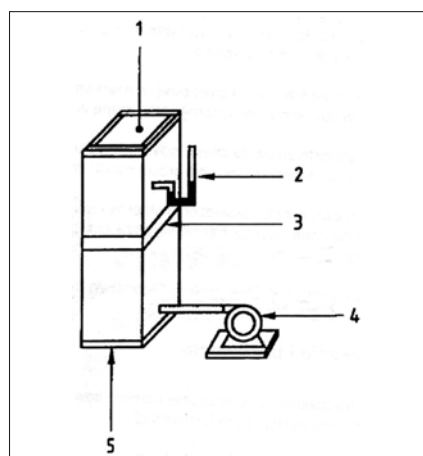


Rys. 2.
Budowa płyty wielowarstwowej
Fig. 2. Construction of multi-layer board

- wełny mineralnej, spojonej żywicą termoutwardzalną;
- tkaniny szklanej, jako wykończenia wewnętrznej powierzchni przewodu.

Stanowisko do badań wytrzymałościowych

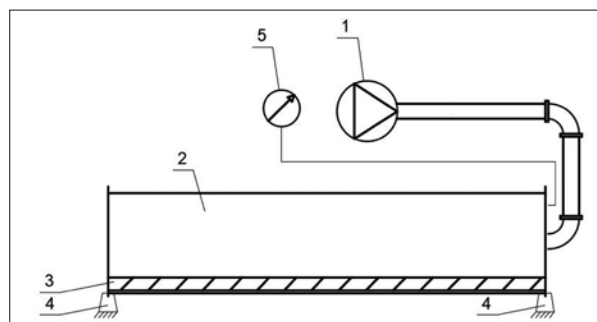
Stanowisko badawcze zgodnie z normą PN-EN 13403:2005 [25] przedstawiono na rys. 3:



Rys. 3.
Stanowisko badawcze zgodnie z normą PN-EN 13403:2005: 1 – uszczelniony przekrój (górny), 2 – manometr, 3 – połączenie, 4 – sprężarka, 5 – uszczelniony przekrój (dolny)
Fig. 3. Test stand in accordance with the PN-EN 13403:2005 standard: 1 – sealed section (top), 2 – pressure gauge, 3 – connection, 4 – compressor, 5 – sealed section (bottom)

W związku z niskim stopniem szczegółowości stanowiska badawczego przedstawionego w normie [25] oraz szeregiem wątpliwości, które zostały opisane we wcześniejszym rozdziale, badania eksperymentalne zostały wykonane na zaprojektowanym od podstaw autorskim stanowisku badawczym, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 4. Takie stanowisko umożliwiło badanie

Rys. 4.
Schemat ideowy stanowiska badawczego: 1 – wentylator, 2 – puszka rozprężna, 3 – płyta wielowarstwowa, 4 – konstrukcja wsporcza, 5 – manometr
Fig. 4. Test stand diagram: 1 – fan, 2 – plenum box, 3 – multilayer board, 4 – support structure, 5 – pressure gauge

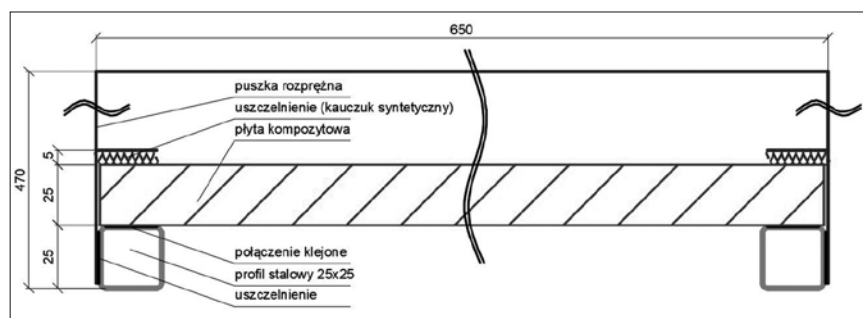


Elementami stanowiska zgodnie z rys. 4 były: wentylator promieniowy średniociśnieniowy wraz z przemiennikiem częstotliwości (1), umożliwiającym płynną zmianę prędkości obrotowej silnika wentylatora. Wentylator umożliwiał wytworzenie nadciśnienia wewnątrz puszki rozprężnej (2), połączonej z badaną płytą (3) oraz konstrukcją wsporcą (4). Do pomiaru nadciśnienia służył ma-

nometr elektroniczny (5) o rozdzielczości równej 1 Pa i dokładności pomiaru większej od ± 6 Pa. Równomierność rozkładu ciśnienia zapewniono stosując puszkę rozprężną o odpowiednio dużej wysokości w celu wyrównania ciśnienia w całej jej objętości oraz zapewniając szczelność pomiędzy wszystkimi elementami stanowiska.

Stanowisko badawcze zaprojektowano w sposób umożliwiający przeprowadzenie badań płyt obciążonych równomiernie ciśnieniem na całej powierzchni. Szczegóły konstrukcji zostały zaprezentowane na rys. 5 i 6.

Rys. 5.
Konstrukcja wsporcza, puszka rozprężna i stanowisko badawcze po zmontowaniu
Fig. 5. Support structure, plenum box and test stand after assembly



Rys. 6.
Przekrój poprzeczny stanowiska badawczego
Fig. 6. Cross-section of the test stand

Stanowisko składa się z konstrukcji wsporczej o wymiarach 1200x650x450 mm (dł. x szer. x wys.), opartej na 4 stopach, przytwierdzonych do podłogi, zapewniając stabilność. Konstrukcja została wykonana z profilu stalowego zamkniętego 25x25 mm. Poszczególne profile łączono poprzez spawanie. W celu utrzymania nadciśnienia w układzie pomiarowym, na płytę spoczywającą na konstrukcji nakładano skonstruowaną specjalnie w tym celu puszkę rozprężną o wymiarach 1200x650x470 mm (dł. x szer. x wys.). Została ona wyposażona w króciec przyłączeniowy $\varnothing 160$ mm umożliwiający połączenie z wentylatorem oraz króciec pomiarowy w celu podłączenia manometru.

Podporę dla płyty i jej utwierdzenia stanowiły profile stalowe konstrukcji. Połączenia pomiędzy nimi wykonano klejąc kauczukiem chloroprenowym. Wsporniki krawędziowe wewnątrz puszki rozprężnej nachodziły na płytę od góry. W celu umożliwienia swobodnego przemieszczania górnej i bocznej powierzchni płyty przy jednoczesnym zachowaniu szczelności, przestrzeń pomiędzy wspornikami a płytą wypełniono za pomocą maty z kauczuku syntetycznego. Kauczuk syntetyczny dzięki wysokiej ścisłości zapewniał szczelność połączenia niezależnie od ruchów płyty. Zapewniony został brak przemieszczeń pomiędzy puszką rozprężną a konstrukcją. Przestrzeń pomiędzy tymi elementami uszczelniono za pomocą kleju silikonowego i taśmy aluminiowej.

Na krótszych bokach, pomiędzy płytą a puszką rozprężną zastosowano gumowe osłony harmonijkowe. Umożliwiały one swobodną pracę płyty w kierunku prostopadłym do jej płaszczyzny poziomej. Łączenie płyty z osłoną wykonano klejąc kauczukiem chloroprenowym (rys. 7).

Pomiaru ugięć dokonywano w pięciu punktach pomiarowych za pomocą czujni-

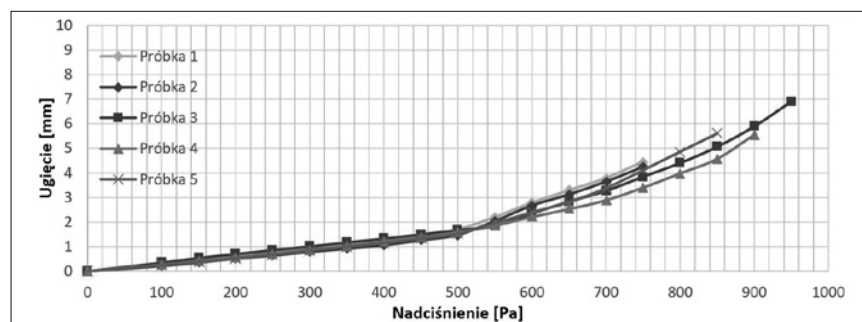
ków zegarowych o dokładności pomiaru 0,01 mm (rys. 8). Czujniki zostały zamontowane na belce przytwierdzonej do konstrukcji wsporczej poprzez spawanie. Badaniom poddane zostały płyty o przekroju 650x25 mm i długości 1200 mm. Szerokość płyty dobrano tak, aby odzwierciedlała średnią szerokość dłuższego z boków przewodów prostokątnych, które są przeważnie stosowane w instalacjach na odcinkach poziomych. Wartość tę dobrano po dokładnej analizie wielu projektów instalacji wentylacyjnych. Montaż oraz badania wykonywano utrzymując stałą temperaturę powietrza w pomieszczeniu oraz temperaturę przetłaczanego czynnika równą 20°C.

Układ pomiarowy umożliwiał w jednym cyklu pomiarowym odczytanie wartości ugięć we wszystkich punktach pomiarowych. Stanowisko uruchamiano włączeniem wentylatora i wymuszeniem przepływu powietrza, co powodowało zwiększenie ciśnienia oddziaływującego na płytę. Przyjęto wstępne założenie, że badania będą prowadzone do osiągnięcia wartości 1000 Pa lub awarii płyty, w zależności od tego co nastąpi pierwsze. W przewodach wentylacyjnych, w których zastosowanie znajdują płyty kompozy-

towe, wartości ciśnienia niezwykle rzadko mogą przekroczyć założoną wartość. Stopniowo (co 50 Pa, rozpoczynając od wartości 100 Pa) zwiększano nadciśnienie, aż do osiągnięcia oczekiwanej wartości. Badaną wartość osiągnęto w czasie nie krótszym niż 45 s, ale nie dłuższym niż 90 s. Po osiągnięciu zadanej wartości nadciśnienia dokonywano odczytów wartości z czujników zegarowych. Następnie zwiększano prędkość obrotową wentylatora aż do osiągnięcia kolejnej wartości nadciśnienia w analogiczny sposób. Badania wykonano na pięciu identycznych płytach (próbkach).

Wyniki badań eksperymentalnych

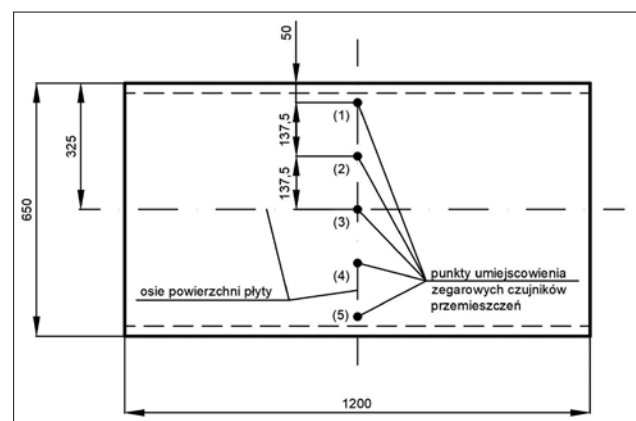
Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że w osi poprzecznej płyty odkształcają się liniowo – sprężysto do nadciśnienia o wartości ok. 450 Pa. Powyżej 450 Pa, wystąpił stan krytyczny pracy. Płyty uległy załamaniu w ich najbardziej wyężonym przekroju, co pokrywało się z oczekiwanymi rezultatami w związku z usytuowaniem podpór względem działającego obciążenia. Dalszy wzrost ciśnienia powodował gwałtowniejszy przyrost ugięć. Pewne różnice w wynikach symetrycznych par punktów (1 i 5, 2 i 4) są



Rys. 9. Ugięcia płyt przy nadciśnieniu wewnętrznym w punkcie pomiarowym nr 1
Fig. 9. Plate deflections at internal overpressure at measurement point no. 1



Rys. 7. Widok krawędzi wolnej płyty z osłoną harmonijkową (w czasie badań)
Fig. 7. View of the free edge of the panel with a concertina cover (during tests)

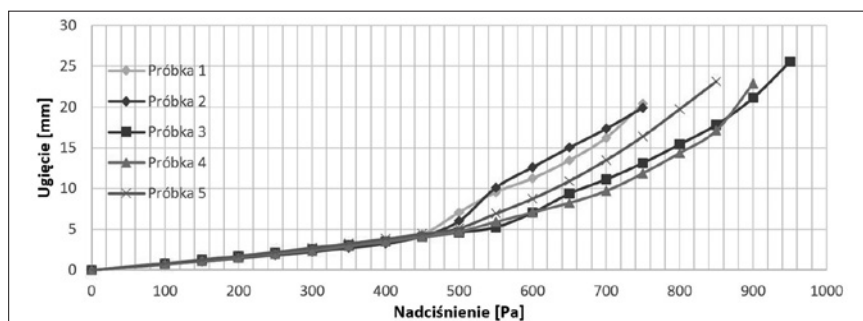


Rys. 8. Usytuowanie punktów pomiarowych
Fig. 8. Location of measurement points

nieuniknioną cechą charakterystyczną płyt izolacyjnych, ze względu na dalekie od ideału ułożenie warstw włókien wełny szklanej. Na rys. 9-13 przedstawiono wyniki ugięcia płyt w zależności od ciśnienia dla każdego z punktów pomiarowych.

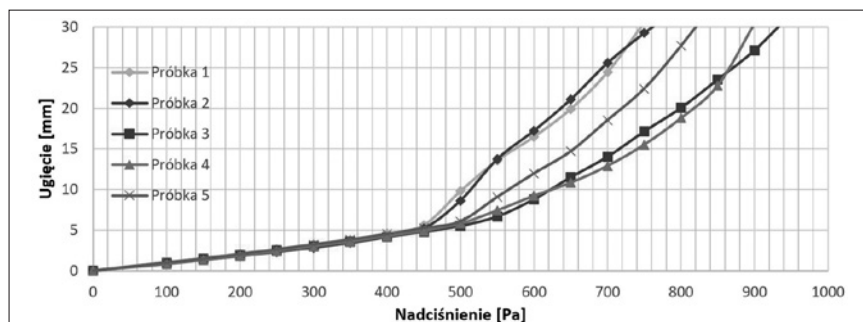
Wnioski z badań

W przypadku badanego kompozytu, z warstwami o diametralnie różnych właściwościach mechanicznych, wyoboczenie warstwy z tkaniny szklanej następuje w kierunku materiału znacznie bardziej podatnego, którym jest wełna mineralna. Z tego powodu, jak również ze względu na kierunek obciążenia wywołującego ściskanie po stronie wewnętrznej przewodu, wszystkie miejsca, w których następowała lokalna utrata stateczności, charakteryzowały się kierunkiem wyoboczenia do rdzenia kompozytu (rys. 14).



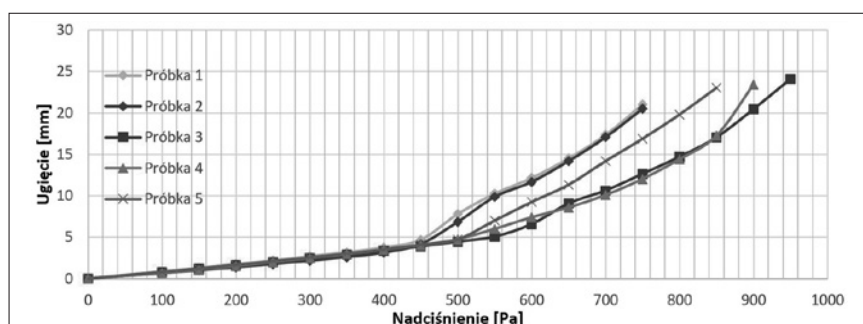
Rys. 10.

Ugięcia płyt przy naciśnieniu wewnętrznym w punkcie pomiarowym nr 2
Fig. 10. Plate deflections at internal overpressure at measurement point no. 2



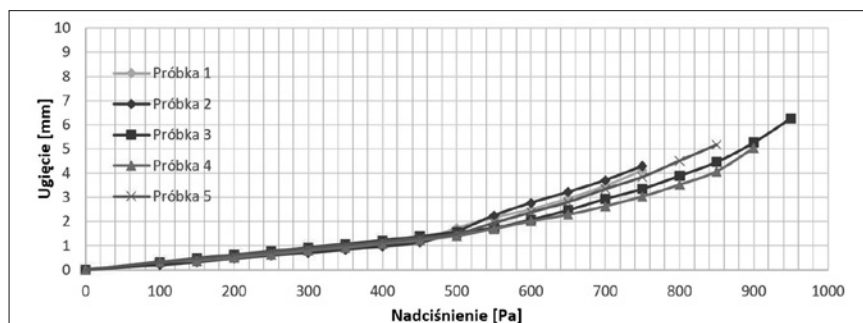
Rys. 11.

Ugięcia płyt przy naciśnieniu wewnętrznym w punkcie pomiarowym nr 3
Fig. 11. Plate deflections at internal overpressure at measurement point no. 3



Rys. 12.

Ugięcia płyt przy naciśnieniu wewnętrznym w punkcie pomiarowym nr 4
Fig. 12. Plate deflections at internal overpressure at measurement point no. 4

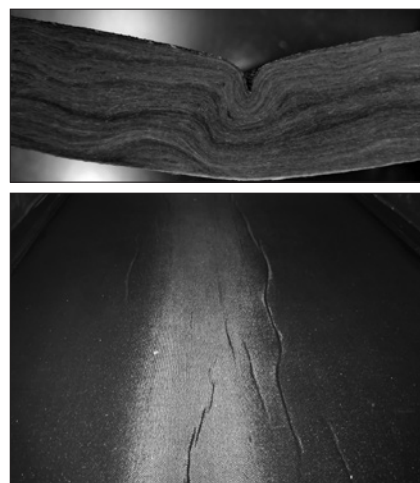


Rys. 13.

Ugięcia płyt przy naciśnieniu wewnętrznym w punkcie pomiarowym nr 5
Fig. 13. Plate deflections at internal overpressure at measurement point no. 5

Przekroczenie wartości naprężeń krytycznych przy ściskaniu powoduje nagłą utratę sztywności warstwy i w konsekwencji zmniejsza sztywność całego kompozytu. Dalsze zachowanie układu jest kwestią sztywności kolejnej warstwy z wełny mineralnej. W zależności od tego, utrata sztywności może

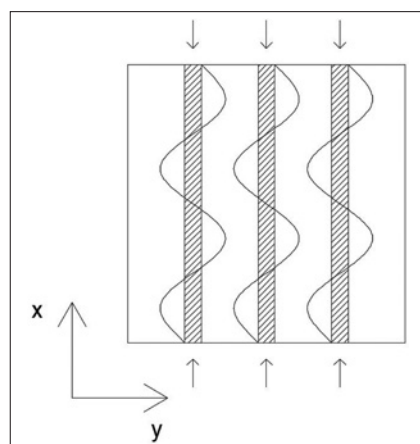
następować w sposób mniej lub bardziej gwałtowny. Do momentu zniszczenia układ pracuje w zakresie liniowo – sprężystym, tak więc proste oszacowania analityczne wynikające z teorii sprężystości wydają się możliwe do wykonania z wystarczającą dokładnością.



Rys. 14.

Uszkodzenie górnej warstwy płyty kompozytowej wskutek obciążenia naciśnieniem: na górze – przekrój, na dole – widok z góry
Fig. 14. Damaged top layer of composite due to overpressure: on the top – cross-section, on the bottom – top view

Na podstawie analizy uszkodzenia badanych płyt oraz jej poszczególnych warstw (rys. 14) wyciągnięto wniosek, że czynnikiem odpowiadającym za utratę sztywności płyty przy oddziaływującym na nią ciśnieniu o wartości powyżej 450 Pa, jest wytrzymałość warstwy ściskanej, tj. tkaniny z włókna szklanego. Przy obciążeniu ściskającym, działającym wzdłuż kierunku włókien, zniszczenie kompozytu jest związane z efektem wybożenia się włókien w płaszczyźnie warstwy kompozytowej (rys. 15).



Rys. 15.

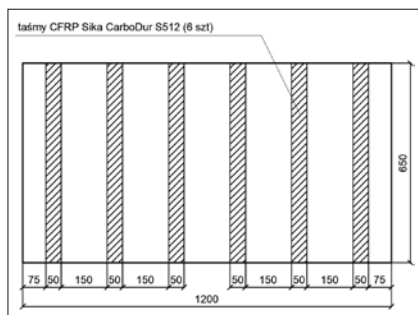
Schemat wybożenia włókien przy ściskaniu warstwy kompozytu [5]
Fig. 15. Scheme of fiber buckling under compression of the composite layer [5]

Eksperymentalny model wzmocnień

Ideą biernego wzmocnienia jest pasywne wbudowanie (naklejanie lub wklejanie) kompozytu FRP w niedozbrojone bądź nadmiernie odkształcone strefy elementu). Współpraca pomiędzy tak wzmocnionym elementem i kompozytem rozpoczyna się w momencie przyrostu odkształceń, np. w wyniku przyłożenia

dodatkowych odkształceń użytkowych. Efektem biernego wzmocnienia zginanego elementu jest poprawa warunków stanu granicznego nośności. Dodatkowo wystąpi pewne zwiększenie sztywności przekroju. Zaletą biernego wzmocnienia jest nieskomplikowana i prosta technologia aplikacji, nie wymagająca uciążliwych prac przygotowawczych, a także specjalistycznego sprzętu, dlatego koszt wykonania takiego wzmocnienia jest relatywnie niski. Właściwości materiałowe oraz metody aplikacji tych materiałów mogą być wykorzystywane nie tylko przy wzmocnianiu konstrukcji betonowych, ale również do wzmocnienia lekkich przewodów wentylacyjnych na bazie wełny mineralnej lub piany PUR i PIR. Podstawowymi metodami wzmocnień konstrukcji wykorzystujące materiały CFRP są wzmocnienia taśmami, dlatego do badań wykorzystano materiały firmy Sika w postaci taśm CFRP, jak również ze względu na bogatą dokumentację produktową oraz doświadczalnie potwierdzone właściwości [20].

Wzmocnienia w formie taśm wklejono na wewnętrzną powierzchnię płyty. Ze względu na orientację podpór założono, że najbardziej korzystnym kierunkiem ułożenia taśm będzie ułożenie poprzeczne (wzdłuż krótszego boku płyty). Do badań wybrano taśmy Sika CarboDur S512 (o szer. 50 mm i grubości 1,2 mm), które przyklejono używając zalecanego przez producenta kleju CarboDur 30. Wzmocnieniami postanowiono pokryć 25% powierzchni płyty, która wynosi 0,78 m². Przy szerokości płyty 0,65 m pokrycie w 25% równało się naklejeniu 6 pasm (rys. 16). Do badań użyte zostało to samo stoisko badawcze, nie zmieniono również metodyki badań.

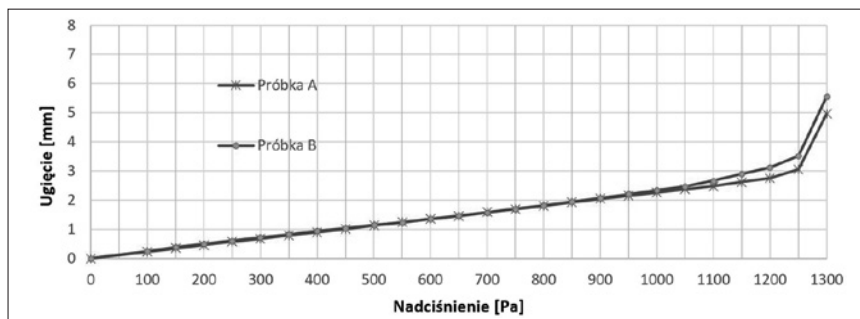


Rys. 16.
Schemat rozmieszczenia taśm wzmacniających
Fig. 16. Schematic of arrangement of reinforcing tapes

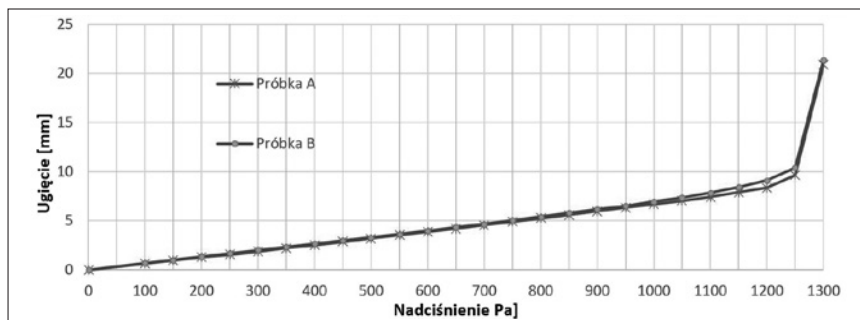
Wyniki badań eksperymentalnych płyt wzmocnionych

Na rys. 17-21 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych płyt ze wzmocnieniami. Badaniom poddano dwie płyty w każdej serii (oznaczone na rysunkach jako próbka A i próbka B). Zastosowano takie same

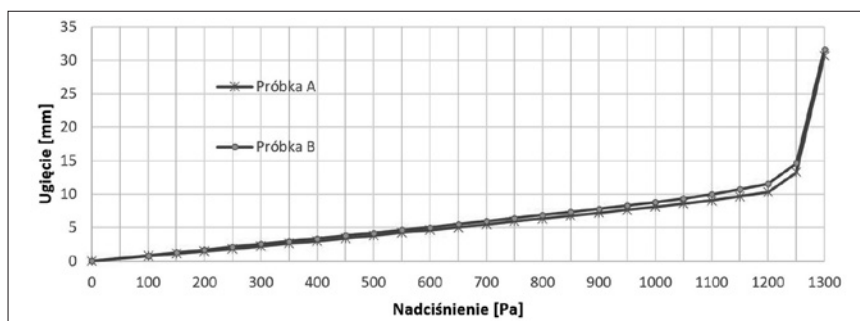
Rys. 21.
Ugięcie płyty ze wzmocnieniami poprzecznymi S512 w punkcie pomiarowym nr 5
Fig. 21. Deflection of the plate with transverse reinforcements S512 at measurement point no. 5



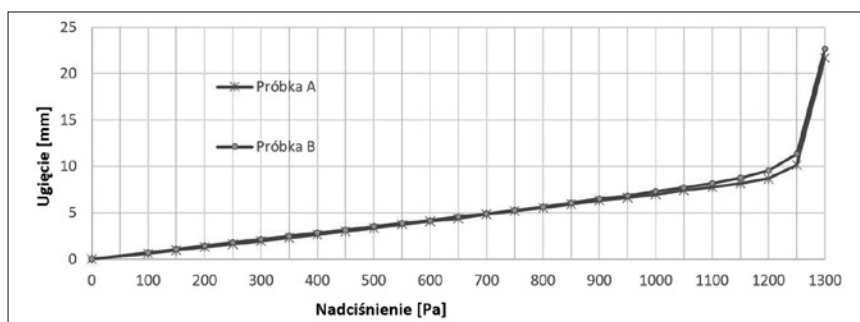
Rys. 17.
Ugięcie płyty ze wzmocnieniami poprzecznymi S512 w punkcie pomiarowym nr 1
Fig. 17. Deflection of the plate with transverse reinforcements S512 at measurement point no. 1



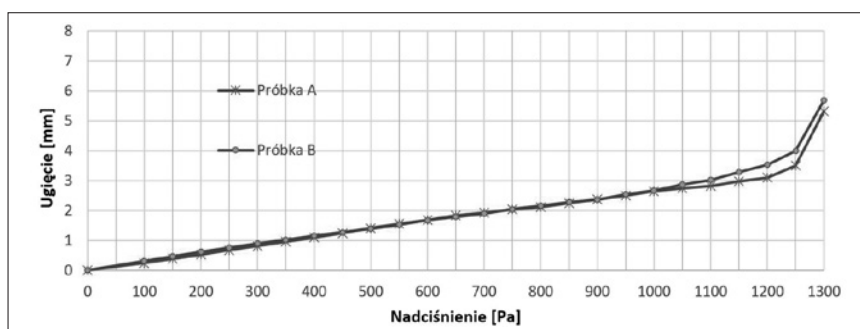
Rys. 18.
Ugięcie płyty ze wzmocnieniami poprzecznymi S512 w punkcie pomiarowym nr 2
Fig. 18. Deflection of the plate with transverse reinforcements S512 at measurement point no. 2



Rys. 19.
Ugięcie płyty ze wzmocnieniami poprzecznymi S512 w punkcie pomiarowym nr 3
Fig. 19. Deflection of the plate with transverse reinforcements S512 at measurement point no. 3



Rys. 20.
Ugięcie płyty ze wzmocnieniami poprzecznymi S512 w punkcie pomiarowym nr 4
Fig. 20. Deflection of the plate with transverse reinforcements S512 at measurement point no. 4



plyty pod względem typu i gabarytów jak przy badaniach płyt niewzmocnionych.

Wnioski z badań wytrzymałościowych płyt wzmocnionych

Analizując otrzymane wyniki badań płyt wzmocnionych i porównując je z płytami niewzmocnionymi widać ponad 2,5-krotne zwiększenie zakresu ciśnień w jakich płyta może pracować bezawaryjnie (do 1100 Pa), a maksymalne ugięcie płyty w zakresie odkształceń sprężystych nie przekroczyło 10 mm. Jak wynika z wykresów, odkształcenia są różne dla poszczególnych punktów. Materiały o strukturze warstwowej mogą ulegać zniszczeniu wskutek wystąpienia rozwarstwienia (delaminacji). Takie pęknięcie utworzone wewnątrz elementu płytowego lub powłokowego może znacznie obniżyć wskaźnik wytrzymałości na zginanie lub sztywność zginania. Delaminacja utworzona w połowie grubości ścianki, czyli dzieląca laminat na dwa sublaminy, obniża dwukrotnie wskaźnik wytrzymałości na zginanie całego przekroju w tym miejscu. Awaria płyt w obydwu przypadkach następowała poprzez nagłe odspojenie warstw wełny mineralnej. Było to spowodowane przekroczeniem wytrzymałości spoiwa łączącej włókna wełny szklanej. Po odspojeniu dolna część płyty wskutek gwałtownego obniżenia sztywności warstwy wełny mineralnej uległa znacznemu ugięciu. Nie stwierdzono odspojenia pomiędzy taśmami a płytą, co świadczy o wystarczających parametrach wytrzymałościowych kleju oraz braku konieczności dodatkowego przygotowania powierzchni płyty przed aplikacją kleju. Do momentu zniszczenia układ, podobnie jak w przypadku płyt niewzmocnionych, pracuje w zakresie liniowo – sprężystym, tak więc proste oszacowania analityczne wynikające z teorii sprężystości wydają się możliwe do wykonania z wystarczającą dokładnością po określeniu sztywności kompozytu. Należy również nadmienić, że wyniki dotyczą tylko układów przewodów prowadzonych poziomo.

Podsumowanie

Udowodniono, że płyty kompozytowe mogą być wzmocnione za pomocą taśm CFRP, zachowując największe zalety płyt wielowarstwowych, takich jak: niska masa, właściwości akustyczne i nieskomplikowany montaż. Ponieważ taśmy CFRP są materiałem stosunkowo drogie, to dalsze badania należałoby ukierunkować na optymalizację liczby wzmocnień lub wykorzystanie materiału tańszego, o zbliżonych cechach wytrzymałościowych. Tym niemniej kierunek badań jest obiecujący, a wzmocnienie struktury płyt kompozytowych w nieskomplikowany technicznie sposób może przyczynić się do popularyzacji przewodów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych budowanych w tej technologii. Wykonane i przedstawione badania eksperymentalne umożliwiają skali-

bowanie modelu numerycznego takiej struktury w ujęciu Metody Elementów Skończonych z wykorzystaniem elementów skończonych powłokowych lub trójwymiarowego stanu naprężenia. Taki model pozwoli na wykonanie symulacji dla płyt o różnych wymiarach oraz na optymalizację liczby wzmocnień.

W wyniku prac nad wzmocnieniami płyt do Urzędu Patentowego RP zostało zgłoszone podanie o udzielenie patentu na wynalazek pt. „Wzmocniona płyta wielowarstwowa, zwłaszcza do budowy kanałów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych”, z nr P.433174. Pozytywna decyzja udzielająca patent została wydana w dn. 16.11.2022 r.

Wyrazy wdzięczności

W tym miejscu Autorzy pragną złożyć wyrazy wdzięczności **Ś.P. prof. dr. hab. inż. Henrykowi G. Sabiniakowi** za cenne rady i wskazówki przekazywane w okresie, kiedy był opiekunem naukowym rozprawy doktorskiej pierwszego autora, dotyczącej płyt kompozytowych.

LITERATURA

- [1] Astashkin, V., Shmatkov, S., Shmatkov, A. Polymer composite rational application field in the gas-escape channel construction of industrial chimneys and ventilation pipes. *Procedia Engineering*, Vol. 150, 2016
- [2] Buska, A. Mačiulaitis, R. The compressive strength properties of mineral wool slabs: influence of structure anisotropy and methodical factors. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(2), 2007.
- [3] Dawood, S. F. Al-Sarraf, S. Z. Influence of anchorage on the behavior of CFRP RC beams in flexure. *Eng. & Tech. Journal*, vol. 28 no. 9, 2010
- [4] Fayyadh, M. Externally bonded applications in RC structures: a state-of-the-art review. *Jordan Journal of Civil Engineering*, April 2021
- [5] German, J. Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996
- [6] Gibson, R. F. Principles of composite material mechanics. McGraw-Hill, Inc., New York, 1994
- [7] Gnip, I. Y., Vaitkus, S., Kersulis, V., Vejelis, S. Experiments for the long-term prediction of creep strain of expanded polystyrene under compressive stress. *Polymer Testing*, Vol. 29, Issue 6, September 2020
- [8] Islam S. M. Ahmed B. Islam S. Ferdous R. Ali, W. FRP-adhesive materials for strengthening of RC beams at flexure and shear region. *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 03 no. 01, June 2019
- [9] Jaworski, M. Thermal performance of building element containing phase change material (PCM) integrated with ventilation system – an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70, Issue 1, September 2014
- [10] Jones, Robert M. Mechanics of composite materials, 1975
- [11] Kaw, A. K. Mechanics of composite materials, CRC Press LLC, Florida, 1997
- [12] Kegler, K. Badania kompozytowych kanałów wentylacyjnych w warunkach nadciśnienia. Współczesne zagadnienia z inżynierii łądowej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020

- [13] Kałuża, M., Wybór odpowiedniej metody wzmocnienia konstrukcji żelbetonowych kompozytami. *Materiały Budowlane*, nr 6/2013
- [14] Kałuża, M., Bartosik T. Wzmocnianie konstrukcji materiałami na bazie włókien węglowych, szklanych i aramidowych. *Materiały budowlane*, nr 414 2/2017
- [15] Kamińska, M. E. Kołtunia, R. Doświadczalne badania żelbetonowych belek wzmocnionych taśmami CFRP, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000
- [16] Kowal, M. Łagoda, M. Wzmocnianie konstrukcji stalowych taśmami kompozytowymi CFRP. *Drogi i Mosty*, nr 16, 2017
- [17] Kubica, J. Hulimka, J. Kałuża, M. Specyfika wzmocniania konstrukcji betonowych i murew materiałami kompozytowymi. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 5-6/2010
- [18] Materiały katalogowe firmy URSA
- [19] Materiały katalogowe firmy CLIMAVER
- [20] Materiały katalogowe firmy SIKA
- [21] Mayer, P. Kaczmar, J. Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych. *Tworzywa Sztuczne i Chemia*, nr 16/2008
- [22] Meier, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. *Construction and Building Materials*, vol. 9 no. 6, 1995
- [23] Nowak, T. Wzmocnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych. *Wiadomości Konserwatorskie* 14/2003
- [24] Piątek, B., Siwowski, T. Nowy system wzmocniania konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP. *Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Sprężone*, Kraków 2018
- [25] PN-EN 13403:2005 Wentylacja budynków. Przewody niemetalowe. Sieć przewodów wykonanych z płyt izolacyjnych
- [26] Prucz, J. C., Shoukry, S. N., Chandramohan, S., Mitchell, S. An analytical model for interactive design of cylindrical composite ducts with upright bolted flanges. *Composite Structures*, Vol. 61, Issue 3, August 2003
- [27] Rabek, J. Współczesna wiedza o polimerach. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005
- [28] Rajczyk, M. Jończyk, D. Wzmocnianie konstrukcji betonowych kompozytami włóknistymi FRP. *Budownictwo*, vol. 21, 2015
- [29] Raymond, J., Bilgen, E. On the thermal and ventilation performance of composite walls. *Energy and Buildings*, Vol. 39, Issue 9, September 2007
- [30] Sakar, G. Tanarlan, H. M. Alku, O. Z. An experimental study on shear strengthening of RC T-section beams with CFRP plates subjected to cyclic load. *Magazine of Concrete Research*, 01/2009
- [31] Semyeong, L., Won, C. Hyunbum, P. A study on design of s-duct structures and air intake for small aircraft applied to high strength carbon-epoxy composite materials. *Materials*, 2022
- [32] Steponaitis, L. Vejelis, S. Strength and deformability of mineral wool slabs under short – term cyclic compression. *Engineering Structures and Technologies*, 2(3), 2010
- [33] Sun, W., Huang, R., Ling, Z., Fang, X. Two types of composite phase change panels containing a ternary hydrated salt mixture for use in building envelope and ventilation system. *Energy Conversion and Management*, Vol 177, December 2018
- [34] Tang, W. C. Stiff light composite panels for duct noise reduction. *Applied Acoustics*, Vol. 64, Issue 5, May 2003
- [35] Thiruvengkatachari, R., Su, S. Carbon fibre composite for ventilation air methane (VAM) capture. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 172, Issues 2 – 3, December 2009
- [36] Whitney, James M. et al., Experimental mechanics of fiber reinforced composite materials, 1982