

inż. Bartosz Głowacki*)

 dr inż. Monika Chuda-Kowalska¹⁾

Eksperymentalno-numeryczna analiza ortotropii pianki stosowanej jako rdzeń w płytach warstwowych

DOI: 10.15199/33.2017.01.12

Płyty warstwowe są wyrobami budowlanymi bardzo często stosowanymi w nowoczesnych obiektach przemysłowych jako gotowe elementy ścian zewnętrznych oraz pokryć dachowych. Pomimo swojej złożonej budowy (układ trójwarstwowy) są traktowane przez normy europejskie w sposób uproszczony [4, 5]. Zakłada się, iż rdzeń płyty ma te same właściwości mechaniczne w każdym kierunku (materiał izotropowy). W celu potwierdzenia, czy takie podejście jest właściwe, przeprowadzono badania wytrzymałości rdzenia z pianki poliuretanowej i analizie parametrów mechanicznych.

Płyta warstwowa składa się z dwóch cienkich, sztywnych okładzin zewnętrznych oraz konstrukcyjno-izolacyjnego rdzenia o znacznej grubości. Jest ona wyrobem zespolonym, w którym wszystkie elementy są ze sobą ściśle połączone i współpracują w przenoszeniu obciążeń. Dzięki temu płyta warstwowa ma lepsze właściwości niż wyrób jednorodny. Okładziny płyt są wykonane najczęściej z blachy ocynkowanej pokrytej powłokami zewnętrznymi. Mają one najczęściej grubość 0,4–0,6 mm, ale charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie. Rdzeń ma grubość od 40 do 200–250 mm i najczęściej małą gęstość. Zwykle jest wykonany z pianki poliuretanowej PUR/PIR, rzadziej ze styropianu, a w przypadku bardzo wysokich wymagań ogniowych lub akustycznych z wełny mineralnej.

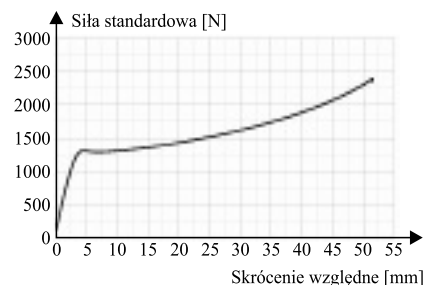
Pianki PIR charakteryzują się zdecydowanie lepszymi parametrami ogniowymi od standardowych wyrobów PUR. Wynika to z zastosowanych surowców i technologii produkcji. Jednocześnie charakteryzują się niewielkim współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz małą chłonnością wody. W celu wykazania różnic w zachowaniu się piankowego rdzenia w trzech głównych kierunkach pracy płyty przeprowadzone zostały badania w Laboratorium

Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Politechniki Łódzkiej. Wykonywane były one na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell oraz niezależnie z wykorzystaniem systemu optycznego „Aramis”. Badaniom poddano 18 próbek sześciennych. Wszystkie zostały dokładnie opisane i zinventaryzowane przed rozpoczęciem doświadczeń. Odstępstwem od zaleceń normowych [4, 5] było oderwanie okładzin metalowych od rdzenia, gdyż badaniu poddano tylko piankowy materiał rdzenia [1].

Badanie wytrzymałości pianki PIR

Badanie wytrzymałości na ściskanie/rozciąganie wykonano w trzech kierunkach X, Y i Z. Do wykonania testów rozciągania wykorzystano dziewięć próbek, przyklejając do nich specjalne uchwyty z tworzywa pozwalające na zamocowanie w maszynie wytrzymałościowej. Badania były przeprowadzane z prędkością 10 mm na minutę do momentu osiągnięcia maksymalnego naprężenia i zerwania próbki. W każdym przypadku uszkodzenie nastąpiło w rdzeniu. Oznacza to, że wytrzymałość połączenia klejowego uchwyty tworzywowe z piankowym rdzeniem była wystarczająca. Ścisaniu poddano również dziewięć sześciennych próbek poliuretanowych, po trzy w każdym kierunku. Analizując zachowanie się pianki w tym procesie, można wyodrębnić trzy charakterystyczne etapy. W pierwszym z nich pianka odkształca się liniowo-sprężysto (odkształcenie ok. 3,5%). Z tego zakresu wyznacza się moduł Younga E_{cc} . W drugim etapie, przy prawie stałej wartości siły, można zaobserwować znaczny przyrost odkształceń. Wynika to z zanikania pęcherzyków powietrza znajdujących się w piance i jest to tzw. okres Plateau. W ostatnim stadium obciążenia następuje wzmocnienie materiału rdzenia [5]. Charakterystyczną krzywą siła-przemieszczenie w przypadku jednej z przeprowadzonych prób ściskania pokazano na rysunku 1.

Jak już wcześniej wspomniano, badania przeprowadzono jednocześnie na dwóch niezależnych aparatach pomiarowych. Jednym z nich jest system „Aramis”, który służy do bezdotykowej trójwymiarowej analizy optycznej odkształceń, przemieszczeń i naprężeń. Dane niezbędne do obliczeń zbiera się przez wykonywanie zdjęć powierzchni badanych próbek dwoma kamerami jednocześnie w równych założonych odstępach czasu. System „Aramis”, oprócz kamer, składa się z wydajnego komputera, niezbędnego do przeprowadzania analizy wyników. Próbkę wykorzystywaną w badaniach muszą być wcześniej odpowiednio przygotowane przez pomalowanie ich powierzchni specjalną farbą spray. Zakropkowana struktura próbki jest następnie skanowana przez system i na tej podstawie tworzony jest jej cyfrowy obraz. Dzięki temu użytkownik może sam zaplanować, które miejsca próbki są istotne do badań lub które przekroje mają być analizowane. Podczas badań system „Aramis” odczytuje siły z maszyny wytrzymałościowej, co umożliwia wykonanie takich samych wykresów zależnościowych, jakie uzyskuje się w przypadku badań za pomocą maszyny wytrzymałościowej. Ponadto system „Aramis” jest w stanie zapisać przebieg badania w postaci filmu, co umożliwia przeanalizowanie w prosty sposób całego procesu destrukcji próbki od początku jej obciążania aż do zniszczenia. Oznacza to, iż można zmienić lokalizację „miejsca” analizy wyznaczanych parametrów, co nie jest możliwe przy analizie z wykorzystaniem tensometrii elektrooporowej.



Rys. 1. Wykres siła-przemieszczenie w próbie ściskania

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

^{*)} Adres do korespondencji:

bartosz.glowacki93@gmail.com

W celu porównania otrzymanych wyników badań, przeprowadzonych z wykorzystaniem dwóch niezależnych aparatów pomiarowych, dokonano zestawienia tabelarycznego wyników prób rozciągania i ściskania (tabele 1 i 2). Zastosowano następujące oznaczenia:

- E_i^S – moduł Younga w kierunku i uzyskany z maszyny wytrzymałościowej;
- E_i^A – moduł Younga w kierunku i uzyskany z zastosowaniem systemu „Aramis”.

Analiza ortotropii odbywała się w trzech głównych kierunkach: X – na długości, Y – na szerokości i Z – na grubości płyty. Największe wartości modułu Younga otrzymano w kierunku X , zarówno podczas rozciągania, jak i ściskania (tabele 1 i 2). Dużo słabsze rezultaty osiągnięto w przypadku rzeczywistego kierunku pracy płyty, czyli Z . Może być to związane z technologią produkcji, gdzie płynny poliuretan jest natryskiwany na przesuwającą się okładzinę. Prowadzi to do osiągnięcia największej gęstości w kierunku podłużnym płyty, a nie na jej grubości. Wyraźnie można zauważyć ortotropową charakterystykę badanego materiału rdzenia. W kierunkach wzajemnie prostopadłych uzyskuje się odmiennie wartości współczynnika sprężystości podłużnej E , czego oczekiwano. Serie pomiarów w danym kierunku mają zbliżone wartości. Zaskakujące są rozbieżne wartości tych samych modułów, otrzymane z maszyny wytrzymałościowej i systemu „Aramis”. W przypadku rozciągania wartość E_x z systemu optycznego jest większa o prawie 95% niż oznaczona za pomocą maszyny wytrzymałościowej. Bliższe rzeczywistych wartości mogą być te uzyskane za pomocą systemu optycznego „Aramis”, gdyż dzięki dużej

Tabela 1. Zestawienie porównawcze wyników z prób rozciągania

Próbka	E_x^S [MPa]	E_x^A [MPa]	E_y^S [MPa]	E_y^A [MPa]	E_z^S [MPa]	E_z^A [MPa]
1	10,91	20,94	5,74	7,19	3,08	6,26
2	10,71	21,65	5,67	7,13	2,82	6,49
3	10,94	20,63	5,56	6,53	2,75	6,50
\bar{k}	10,85	21,07	5,66	6,95	2,88	6,42
σ	0,13	0,52	0,09	0,36	0,17	0,14

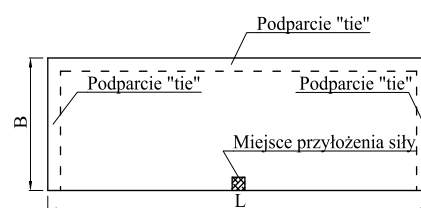
Tabela 2. Zestawienie porównawcze wyników z prób ściskania

Próbka	E_x^S [MPa]	E_x^A [MPa]	E_y^S [MPa]	E_y^A [MPa]	E_z^S [MPa]	E_z^A [MPa]
1	10,57	19,32	4,34	4,83	3,08	5,46
2	11,82	20,74	4,33	4,60	2,96	5,17
3	11,82	20,06	4,43	4,70	2,96	5,16
\bar{k}	11,40	20,04	4,37	4,71	3,00	5,26
σ	0,72	0,71	0,06	0,12	0,07	0,14

rozdzielczości tego systemu możliwe jest przedstawienie dokładnej mapy punktów, które uległy przemieszczeniom wraz z podaniem ich wartości.

Analiza parametryczna

Analiza parametryczna w programie Abaqus polegała na wykazaniu wrażliwości modelu numerycznego na zmianę parametrów materiałowych. Za wartości bazowe przyjęto parametry pianki PIR uzyskane za pomocą optycznego systemu pomiarowego „Aramis”. Stworzony model numeryczny w programie Abaqus ma kształt prostopadłościanu składającego się z trzech warstw: podatnego rdzenia i dwóch cienkich powłok metalowych. Do zamodelowania rdzenia wykorzystane zostały elementy ośmiowęzłowe C3D8, o wymiarach siatki 3 x 3 x 3 cm. Okładziny zewnętrzne są natomiast komponentami czterowęzłowymi S4, o boku siatki 3 x 3 cm. Wykorzystano połączenie „tie” pomiędzy tymi warstwami, które uniemożliwia rozwarstwienie (wymuszona zgodność przemieszczeń węzłów sąsiadujących warstw) [1]. W analizie numerycznej założono, że powłoki wierzchnie są wykonane ze stali o module Younga $E_F = 210$ GPa i współczynniku Poissona $\nu_F = 0,3$. Płyta podparta jest na trzech krawędziach z niesymetrycznie przyłożoną siłą skupioną skierowaną prostopadle do górnej powłoki. Obciążenie przekazywane jest przez sztywną płytkę o wymiarach 100 x 100 mm w środku rozpiętości niezamocowanej krawędzi. Podobny model był analizowany w [2]. Parametry geometryczne płyty przedstawiono na rysunku 2. W przypadku każdego parametru wykonano wstępnie po dwie analizy, obejmujące zmianę jego wartości wynoszącą 50% i 200% w odniesieniu do parametru bazowego, numerując je odpowiednio JOB_1, JOB_2 itd. Sprawdzono zachowanie się modelu w przypadku wartości podstawowych i nazwano tę próbę JOB_0. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, na zmianę którego parametru model jest wrażliwy. Wówczas wykonano dodatkowe dwie symulacje o wartości 75% i 150% parametru podstawowego. Wszystkie analizy kontynuowane były do momentu osiągnięcia 10 cm odkształcenia (niektóre z nich zostały automatycznie przerwane wcześniej, z uwagi na błędy występujące podczas obliczeń). W każdym przypadku można było dostrzec podobny charakter pracy zamodelowanego układu. Największe wartości przemieszczeń otrzy-



$L = 3,0$ m; $B = 1,0$ m; grubość rdzenia $d_c = 79,0$ mm; grubość okładzin metalowych $t = 0,42$ mm

Rys. 2. Schemat podparcia płyty i przyłożonego obciążenia

mywano zawsze w miejscu przyłożenia siły skupionej, a najmniejsze przy podpartych krawędziach.

Podsumowując przeprowadzone analizy, znaleziono trzy parametry mające istotny wpływ na analizowany model. Są nimi E_z , G_{zx} , G_{yz} . W różnym stopniu wpływają one na układ, ale zawsze jest to oddziaływanie proporcjonalne do siły wymuszającej F – zwiększenie/zmniejszenie parametru powoduje zwiększenie/zmniejszenie siły F odczytanej w danym punkcie. Dwie z wymienionych wartości, tzn. E_z i G_{zx} to parametry, o których mówi norma [3]. Pomija ona natomiast wpływ pozostałych parametrów, w tym również G_{yz} , a jak wynika z przeprowadzonych analiz, ten parametr ma znaczny wpływ na zachowanie się konstrukcji warstwowej. Przy wyznaczeniu tych parametrów należy więc zwrócić szczególną uwagę na poprawność i dokładność badań. Pozostałe parametry można nazwać „martwymi”, gdyż nawet pomyłka 100% nie wpływa na odpowiedź analizowanej płyty.

Literatura

- [1] Chuda-Kowalska Monika. 2013. Metodyka eksperymentalnych badań trójwarstwowych płyt z cienkimi okładzinami. Poznań. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [2] Chuda-Kowalska Monika, M. Malendowski. 2015. Sensitivity analysis of behaviour of sandwich plate with PU foam core with respect to boundary conditions and material model, 3rd Polish Congress of Mechanics & 21st Computer Methods in Mechanics. Gdansk, Poland.
- [3] PN-EN 14509:2010 Samonośne izolacyjno-konstrukcyjne płyty warstwowe z dwustronną okładziną metalową. Wyroby fabryczne. Specyfikacje.
- [4] PN-EN 1607:1999 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie wytrzymałości na rozciąganie prostopadle do powierzchni czołowych.
- [5] PN-EN 826:2013 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie zachowania przy ścisnaniu.

Przyjęto do druku: 13.10.2016 r.

Artykuł przygotowano na podstawie pracy inżynierskiej nagrodzonej wyróżnieniem w konkursie zorganizowanym przez Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, Koło nr 4 przy Politechnice Poznańskiej oraz Polski Związek Producentów i Przetwórców Izolacji Poliuretanowych PUR i PIR „SIPUR”.