

Wyznaczanie stałych materiałowych dla płyt warstwowych z rdzeniem PUR

Dr inż. Monika Chuda-Kowalska, Politechnika Poznańska, prof. dr hab. inż. Andrzej Garstecki, Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

Płyty warstwowe od wielu lat znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, przemyśle kosmicznym, lotniczym, samochodowym, okrętowym, przemyśle sprzętu sportowego oraz w innych gałęziach przemysłu (np. kasków ochronnych). Wynika to z możliwości łączenia materiałów o skrajnie różnych parametrach materiałowych w jedną współpracującą ze sobą konstrukcję. Kluczową rolę odgrywa właściwe połączenie warstw i decyduje o cechach mechanicznych całej płyty. Interesujący przegląd właściwości układów warstwowych wykonanych z rozmaitych materiałów oraz specyfikę różnych zastosowań można znaleźć w pracy [3]. Dodajmy, że płyty warstwowe stosowane w budownictwie, dzięki swej niskiej masie, pozwalają na uzyskanie niskiego kosztu transportu i montażu.

W pracy uwagę skupiono na płytach warstwowych złożonych z dwóch cienkich okładzin stalowych i podatnego rdzenia z pianki poliuretanowej. Dla tej klasy płyt wiele względów przemawia za wyznaczeniem stałych materiałowych na próbkach, które posiadają wszystkie warstwy. Wtedy zachowane są warunki rzeczywistej współpracy różnych materiałów. Na szczególną uwagę zasługuje identyfikacja modułów sprężystości rdzenia, gdyż parametry te mają decydujący wpływ na przemieszczenia płyty oraz nośność przy lokalnej utracie stateczności. Badania autorów [2] wy-

kazały, że zalecane przez normę [6] sposoby identyfikacji modułu Kirchhoffa rdzenia G_C dla rozpastrywanej klasy płyt dają różne wyniki w zależności od zastosowanej metody. W związku z tym istnieje potrzeba prac nad metodyką eksperymentalnych badań płyt. Zaproponowana zostanie alternatywna, oryginalna metoda wyznaczenia modułu G_C rdzenia w testach zginania, która polega na bezpośrednim pomiarze kątów deformacji płyty wynikających ze zginania i ścinania. Dodatkowo, do oszacowania modułu G_C rdzenia zastosowano znane z literatury testy bezpośredniego ścinania oraz skręcania próbki wyciętej z płyty.

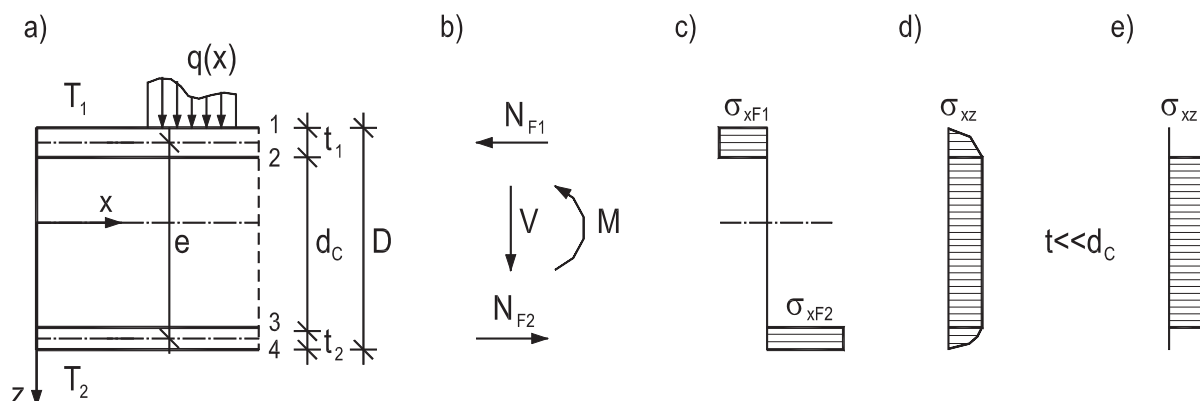
We wnioskach końcowych wskazano przyczyny rozbieżności wyników uzyskiwanych z różnych metod zalecanych przez normę [6]. Sformułowano także zalecenia odnośnie ulepszenia tych metod.

2. Założenia – model belki Timoshenki

Podstawy klasycznej teorii układów trójwarstwowych można znaleźć w wielu pracach, począwszy od klasycznej pozycji [1] po nowsze publikacje np. [5]. Niniejsza praca poświęcona jest metodom badań eksperymentalnych służącym identyfikacji parametrów sztywności materiału rdzenia. Badania te musi cechować prostota i odpowiednia dokładność. Dotyczy to zarówno sposobu przygotowywania próbek, przeprowadzania badań, jak i analizy wyni-

ków. W przypadku płyt warstwowych z miękkim rdzeniem, zadowalającą dokładność uzyskuje się stosując teorię belkową Timoshenki uogólnioną na przekroje warstwowe w normowych testach zginania [6]. W praktyce inżynierskiej model belki warstwowej o okładzinach gładkich lub profilowanych jest często stosowany do wyznaczania przemieszczeń, sił wewnętrznych i naprężeń w ściennej i dachowych płytach warstwowych. Szczegółową analizę tego zagadnienia można znaleźć w pracy [4]. W klasycznej teorii belek warstwowych z cienkimi okładzinami zakłada się, że:

- materiały wszystkich warstw są liniowo-sprężyste, jednorodne i izotropowe,
- przekrój po odkształceniu jest płaski, ale jego punkty nie pozostają na normalnej do odkształceniowej osi podłużnej,
- obowiązuje teoria pierwszego rzędu,
- okładziny są cienkie i wzajemnie równoległe, co pozwala na przyjęcie stałych naprężeń normalnych na grubości okładziny (rys. 1c),
- moduł Younga materiału rdzenia E_C jest mały w porównaniu do modułu E_F okładzin ($E_C/E_F = 5 \text{ MPa}/210000 \text{ MPa} \approx 2,4 \cdot 10^{-5} \Rightarrow \sigma_{xC} \approx 0$), dlatego pomija się naprężenia normalne w rdzeniu (rys. 1c); w konsekwencji zakłada się, że rozkład naprężeń ścinających w rdzeniu jest stały na grubości płyty (rys. 1d),
- zważywszy bardzo małą grubość okładzin w stosunku do grubości rdzenia ($t/d_C = 0,5/100 = 1/200$), pomija się wpływ ich naprężeń po-



Rys. 1. Rozkład naprężeń normalnych i stycznych w belkach warstwowych z miękkim rdzeniem i cienkimi okładzinami

stacjonarnych $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ na przemieszczenia płyty (rys. 1e); w związku z tym można przyjąć, że przekroje okładzin pozostają po odkształceniu płaskie i prostopadłe do osi każdej z nich.

3. Klasyczne metody wyznaczania modułu G_c

W literaturze opisuje się wiele różnych testów prowadzonych na płytach warstwowych z miękkim rdzeniem, w tym również badań mających na celu wyznaczanie modułu Kirchhoffa G_c materiału rdzenia. Szczegółowy opis zalecanych eksperymentów dla rozpatrywanej klasy płyt znajduje się w normie [6]. Moduł G_c wyznacza się metodami pośrednimi, na podstawie testów prowadzonych na płytach. Polegają one na pomiarze ugięcia w testach zginania, wykonywanych na płytach o różnych klasach rozpiętości (płyta krótka, płyta długa). Ugięcie to analizuje się stosując model obliczeniowy belki warstwowej, pozwalający na rozdzielenie wpływów zginania i ścinania

$$w = w_B + w_S \quad (3.1)$$

Składowe w_B i w_S mają ściśle rozwiązania analityczne dla danego schematu obciążenia oraz podparcia płyty. Przykładowo, dla płyty warstwowej rozpatrywanej jako belka swobodnie podparta, równomiernie obciążona składowe ugięcia opisane są wzorami (3.2) i (3.3).

$$w_B = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL^4}{B_S} \quad (3.2)$$

$$w_S = \frac{qL^2}{8 \cdot G_c \cdot A_C} \quad (3.3)$$

gdzie: L – rozpiętość płyty, A_C – pole przekroju rdzenia, G_c – moduł Kirchhoffa materiału rdzenia, a B_S – sztywność płyty na zginanie (która dla belki Bernoullego jest równa EI) wyznaczona ze wzoru (3.4).

$$B_S = \frac{E_{F1} \cdot A_{F1} \cdot E_{F2} \cdot A_{F2}}{E_{F1} \cdot A_{F1} + E_{F2} \cdot A_{F2}} \cdot e^2 \quad (3.4)$$

A_{F1} i A_{F2} oznaczają pola przekroju odpowiednio okładziny górnej i dolnej, natomiast e – odległość pomiędzy środkami ciężkości okładzin. W przypadku płyt symetrycznych, wzór (3.4) redukuje się do znacznie prostszej postaci:

$$B_S = \frac{E_F \cdot A_F}{2} \cdot e^2 \quad (3.5)$$

Z pomiaru doświadczalnego znamy całkowite ugięcie płyty w . Ze wzoru (3.2) obliczamy w_B . Wówczas z (3.1) wyznaczmy ugięcie od ścinania w_S . Następnie przekształcając wzór (3.3) możemy oszacować moduł ścinania G_c .

Eksperymenty tego typu są prostsze od badań z zastosowaniem metod bezpośrednich, prowadzonych na wyciętych z płyty próbkach materiału rdzenia, co stanowi ich główną zaletę.

W pracy zastosowano następujące testy normowe pozwalające oszacować moduł ścinania materiału rdzenia G_c :

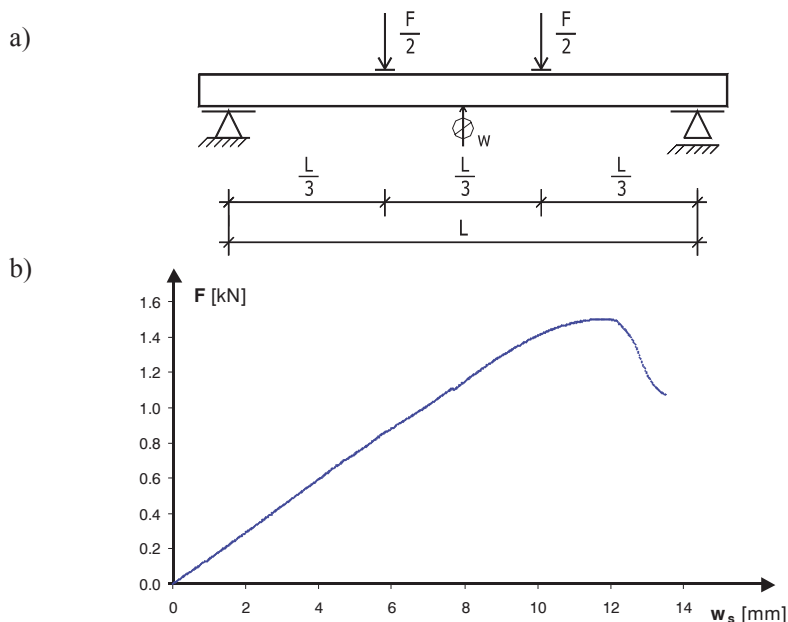
1) Test zginania na płycie długiej (ZgD-w). W badaniach eksperymentalnych zastosowano schemat belki wolnopodpartej z jedną linią obciążenia w środku rozpiętości, tzw. trzypunktowy test zginania. Wtedy obowiązują wzory:

$$w_B = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot B_S} \quad (3.6)$$

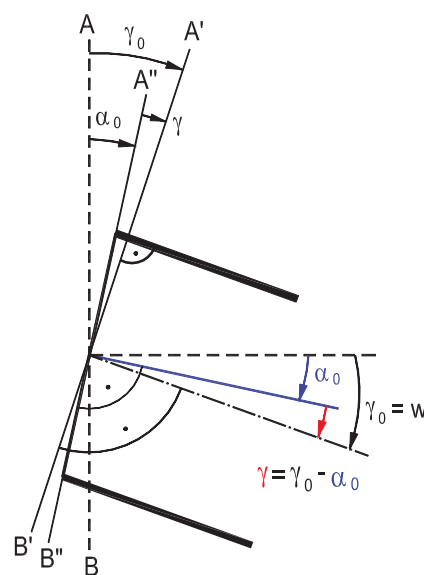
$$w_S = \frac{F \cdot L}{4 \cdot G_c \cdot A_C} \quad (3.7)$$

2) Test zginania na płycie krótkiej (ZgK-w). W tym przypadku stosowany jest schemat płyty swobodnie podpartej obciążonej dwoma liniami sił jak to pokazano na rysunku 2a, zwany czteropunktowym testem zginania. Możliwe są badania na próbkach o szerokości 100 mm (**ZgK₁₀₀-w**) oraz na próbkach o szerokości całej płyty wraz z zamkami (**ZgK_z-w**).

Podczas badania dokonywany jest ciągły pomiar siły F oraz ugięcia występującego w środku rozpiętości przęsła. Przykładowy, uzyskany z badań eksperymentalnych, wykres zależności siły do ugięcia wywołanego ścinaniem płyty w_S przedstawiono na rysunku 2b. Godna uwagi jest liniowa zależność w dużym zakresie obciążenia.



Rys. 2. Czteropunktowy test zginania: a) schemat badania, b) wykres zależności $F - w_s$



Rys. 3. Przekrój poprzeczny płyty po odkształceniu

Przy założeniach opisanych w punkcie 2, teoria Timoshenki uogólniona na przekroje warstwowe prowadzi do wzorów na ugięcia w_B oraz w_s :

$$w_B = \frac{23 \cdot F \cdot L^3}{1296 \cdot B_s} \quad (3.8)$$

$$w_s = \frac{F \cdot L}{6 \cdot G_C \cdot A_C} \quad (3.9)$$

4. Własna metoda wyznaczania modułu G_C

Metoda wyznaczania modułu ścinania materiału rdzenia zaproponowana przez autorów pracy oparta jest na pomiarze dwóch kątów obrotu płyty w teście zginania. Dla tej samej płyty w jednym teście zginania moduł G_C szacowano przy wykorzystaniu równocześnie dwóch metod: normowej z pomiarem przemieszczeń oraz własnej z pomiarem kątów obrotu płyty. Stosując założenia klasycznej teorii belek warstwowych przedstawionych w punkcie 2, otrzymujemy związek geometryczny (3.10) pomiędzy wielkościami przedstawionymi na rysunku 3:

$$\gamma = \gamma_0 - \alpha_0 \quad (3.10)$$

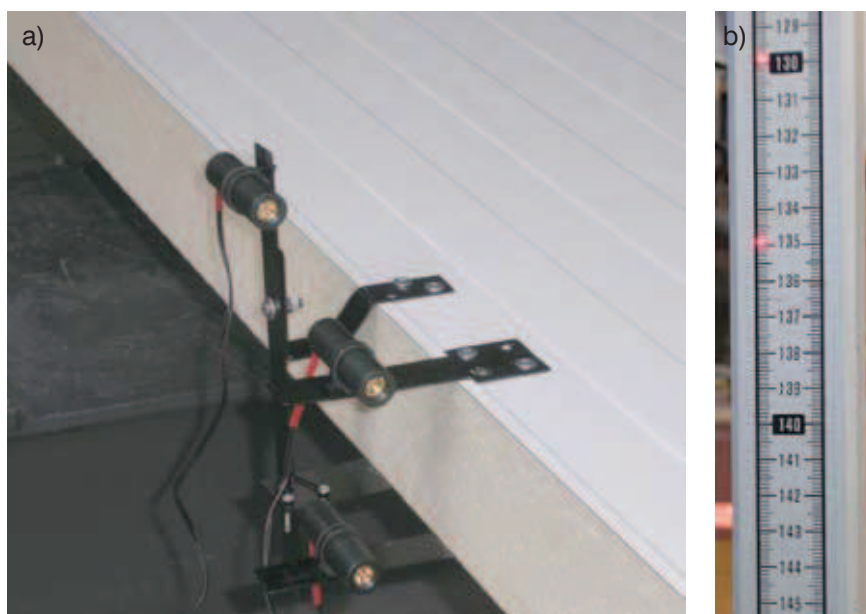
gdzie: γ_0 – kąt AA' – obrót okładzin, α_0 – kąt AA'' – obrót przekroju płyty, γ – kąt $A'A''$ – obrót na skutek ścinania. W proponowanej metodzie mierzone są kąty γ_0 i α_0 . W badaniach przyjmowaliśmy wartość uśrednioną $\gamma_0 = 0,5(\gamma_{01} + \gamma_{02})$. Dla przyjętych założeń moduł odkształcenia postaciowego rdzenia można wyznaczyć ze wzoru (3.11), gdyż kąt γ wynika z pomiaru γ_0 i α_0 .

$$G_C = \frac{V}{\gamma \cdot B \cdot d_C} \quad (3.11)$$

gdzie V oznacza siłę ścinającą w badanym przekroju belki, przy poziomie obciążenia F , dla którego zostały wyznaczone kąty obrotu γ_0 i α_0 .

Procedura badania

Do płyty zamocowano trzy moduły laserowe w sposób poka-



Rys. 4. Aparatura do pomiaru kątów obrotu przekroju płyty: a) moduły laserowe zamocowane na płycie, b) łata geodezyjna z punktami świetlnymi

zany na rysunku 4a. Dwa z nich (środkowy i dolny) zamocowane są do okładzin i mierzą odpowiednio kąty γ_{01} i γ_{02} . Trzeci moduł jest połączony z obiema okładzinami w sposób przegubowy umożliwiając pomiar kąta α_0 .

Znając odległość pomiędzy laserami a tałą pomiarową oraz dokonując odczytu przyrostów wskazań laserów na taśmie geodezyjnej, wyznaczono omawiane kąty, a następnie ze wzoru (3.10) obliczono poszukiwany kąt obrotu γ . Wartość modułu odkształcenia postaciowego G_C wyznaczono ze wzoru (3.11).

5. Dodatkowe metody znane z literatury

5.1. Metoda bezpośredniego ścinania próbki podwójnej

Dwie próbki wycięte z płyty wraz z okładzinami (niewielka ingerencja w strukturę pianki) wklejono pomiędzy trzy sztywne blachy stalowe. Użyto specjalnego kleju na bazie poliuretanów. Schemat próbki oraz ideę badania przedstawiono na rysunku 5.

Próbkę obciążano aż do zniszczenia z prędkością 2,5 mm/min. prowadząc ciągły pomiar siły F i przemieszczenia środkowej blachy sta-



Rys. 5. Bezpośrednie ścinanie próbki podwójnej

lowej w . Zakładając stały rozkład naprężeń ścinających na wysokości przekroju L oraz liniowe związki fizyczne i geometryczne ($\tau = G_C \cdot \gamma$, $\gamma = w/d_C$) wartość modułu ścinania G_C wyznaczono ze wzoru (3.12).

$$G_C = \frac{F \cdot d_C}{2 \cdot B \cdot L \cdot w} \quad (3.12)$$

Wymiary d_C , B i L – to odpowiednio grubość rdzenia oraz szerokość i wysokość próbki.

5.2. Skręcanie próbki o przekroju kołowym

W celu przeprowadzenia testu skręcania autorzy pracy zaprojektowali własne stanowisko badawcze pokazane na rysunku 6. W badaniu tym próbka cylindryczna o promieniu $R = 40$ mm zamocowana jest pomiędzy dwoma sztywnymi stalowymi płytkami. Płytkę z lewej strony jest unieruchomiona, natomiast płytkę z prawej strony doznaje obrotu na skutek wymuszenia zewnętrznego w postaci pary sił dającej moment skręcający M_s . Kąt obrotu przekroju poprzecznego ϕ mierzony jest za pomocą modułu laserowego zamocowanego na ruchomej płytce. Wskazuje on przyrost Δh na taśmie geodezyjnej ustawionej w odległości 3 m od stanowiska badawczego.

Zgodnie z teorią skręcania prętów o przekroju kołowym w zakresie liniowo-sprężystym, moduł ścinania rdzenia wyznacza się z zależności:

$$G_C = \frac{M_s}{I_0 \cdot \varphi'} = \frac{M_s \cdot L}{I_0 \cdot \varphi} \quad (3.13)$$

gdzie: $I_0 = \pi R^4/2$ oznacza biegunowy moment bezwładności przekroju, L – długość pomiarowa próbki równa grubości rdzenia płyty.

6. Badania eksperymentalne – wyniki testów

Do pomiaru przemieszczeń oraz siły wykorzystano przetworniki drogi HBM WA L 20, 50 i 100 mm oraz tensometryczny przetwornik siły



Rys. 6. Stanowisko do testu skręcania

typu C9B/50 o obciążeniu maksymalnym do 50 kN, klasy 0,5. Zapis i analizę wyników przeprowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania HBM Catman 4.5 Professional. Do pomiaru kątów γ_{01} , γ_{02} oraz α_0 wykorzystano moduły laserowe ML-33S-635-1 o średnicy wiązki wyjściowej lasera 2 mm oraz taśmę geodezyjną do pomiarów precyzyjnych z podziałką o dokładności 1 mm – rysunek 4b.

Badaniu poddano płyty warstwowe o okładzinach gładkich oraz mikroprofilowanych wykonanych z blachy stalowej o grubości $t_1 = t_2 = 0,47$ mm (grubość wraz z cynkiem). Dla oszacowania modułu G_C z pomiaru przemieszczeń w konieczne jest analityczne obliczenie w_B . Aby udoskonalić metodę normową [6], wyznaczono eksperymentalnie uśrednione, zhomogenizowane moduły Younga okładziny złożonej z blachy stalowej i dwóch warstw cynku. Zastosowano test rozciągania przeprowadzony na sześciu próbkach blachy ocynkowanej, wyciętej z płyty. Uzyskano wynik $E_F = \sigma/\varepsilon = 195$ GPa. Ten sam wynik E_F uzyskano z analitycznego uśrednienia modułów Younga stali $E_{stal} = 210$ GPa i cynku $E_{cynk} = 84$ GPa wraz z pomierzonymi grubościomierzem elektronicznym rzeczywistymi grubościami warstw stali $t_{stal} = 0,414$ mm oraz cynku $t_{cynk} = 0,057$ mm i z zastosowaniem wzoru:

$$E_F = \frac{E_{stal} \cdot t_{stal} + E_{cynk} \cdot 2t_{cynk}}{t_{stal} + 2t_{cynk}} \quad (3.14)$$

Rdzeń wykonany jest z pianki o gęstości 40 kg/m³. Całkowita grubość płyty D = 98,5 mm.

Czteropunktowy test zginania płyt krótkich przeprowadzono na: próbce o pełnej szerokości modularnej (**ZgK_z-w**, B = 1,1 m, L = 890 mm, okładzina gładka), na próbce po usunięciu podłużnych połączeń brzegowych tzw. zamków (**ZgK-w**, B ≈ 1,0 m, L = 890 mm, próbka z okładzinami gładkimi oraz próbka z okładzinami mikroprofilowanymi) oraz na próbce wąskiej (**ZgK₁₀₀-w**, B ≈ 1,0 m, L = 600 mm, 5 próbek z okładzinami gładkimi).

Trzypunktowy test zginania płyt długich o rozpiętości L = 4,9 m przeprowadzono na 9 próbkach: 3 próbki o pełnej szerokości modularnej (**ZgD_z-w**, **ZgD_z-γ**, B = 1,1 m, okładzina gładka), 6 próbek po usunięciu „zamków” (**ZgD-w**, **ZgD-γ**, B ≈ 1,0 m, 3x z okładziną gładką, 3x z okładziną mikroprofilowaną).

Test bezpośredniego ścinania przeprowadzono na próbkach z okładzinami gładkimi, wymiary 120 x 240 x 500 mm (**Ścinanie-γ**).

Test skręcania (Skręcanie – φ) przeprowadzono na 5 próbkach walcowych z okładzinami gładkimi, promień podstawy walca 40 mm, długość pomiarowa rdzenia 97 mm. Wymiary wszystkich próbek przed badaniem były dokładnie inwentaryzowane.

W tabeli 1 przedstawiono wartości modułu ścinania materiału rdzenia uzyskane z testów zalecanych przez normę [6].

Kolumna 3 przedstawia moduł ścinania G_c wyznaczony zgodnie z zaleceniami normowymi, gdzie uwzględnia się tylko warstwę stali w okładzinach i moduł Younga stali. Warstwy cynku są pomijane. Rozbieżności w wartościach G_c dla płyt krótkich i długich z zamka-

Tabela 1. Wyniki badań GC z testów normowych

Testy zginania pomiar ugięć w	Rodzaj okładziny	G _c [MPa]		
		t _{stal} = 0,414 mm E _{stal} = 210 GPa	t _{stal+cynk} = 0,47 mm E _{stal} = 210 GPa	t _{stal+cynk} = 0,47 mm E _F = 195 GPa
1	2	3	4	5
Płyta krótka L=0,60 m ZgK ₁₀₀ -w	gładka bez zamka B = 0,1 m	3,34	3,31	3,33
Płyta krótka L=0,89 m ZgK _z -w	gładka z zamkami B = 1,1 m	4,74	4,69	4,72
Płyta długa L=4,90 m ZgD _z -w		5,32	4,12	4,73

mi są rzędu 12%. Kolumnę 4 zamieszczono ku przestrodze przed przyjmowaniem E_F = 210 GPa dla łącznej grubości okładzin (stal + cynk) z prostego pomiaru śrubą mikrometryczną. Kolumna 5 pokazuje wyniki przy prawidłowo przyjętym, uśrednionym module E_F wyznaczonym z testu rozciągania blachy okładziny lub ze wzoru (3.14). Wtedy uwzględnione są powłoki cynkowe jako warstwy współpracujące ze stalą. Mają one wpływ na sztywność giętą płyty B_s. Kolumna 5 pokazuje dobrą zgodność z kolumną 3 dla płyt długich i krótkich o pełnej szerokości B (z zamkami). Zauważmy, że prawidłowe przyjęcie modułu E_F znacząco zmieniło wynik G_c dla płyty długiej, gdzie zginanie dominuje nad ścinaniem. Zatem posługiwanie się możliwie najdokładniejszą wartością E_F decydującą o sztywności giętej B_s, jest szczególnie ważne w testach zginania płyt długich. W przypadku płyt krótkich otrzymane rozbieżności związane z wyznaczeniem sztywności B_s są pomijalne. Dodatkowo obserwujemy, że wartości przedstawione w wierszu 1 tabeli 1 są zaniżone w stosunku do wierszy 2 i 3, co zostanie jeszcze omówione.

W celu wyjaśnienia wpływu stosowanej metody badawczej, liniowania okładziny oraz zamków na wartość szacowanego parametru G_c zaplanowano i wykonano szereg badań eksperymentalnych obejmujących zarówno testy

normowe, jak i własne metody badawcze wykorzystujące testy zginania, ścinania i skręcania. W tabeli 2 zestawiono wartości modułu ścinania G_c uzyskane z wszystkich przeprowadzonych typów testów. Są to wartości średnie, każdorazowo z serii trzech testów. W tabeli 2, w testach zginania stosuje się już tylko uśredniony moduł Younga E_F okładzin zgodny z (3.14).

Przeprowadzone badania z zastosowaniem różnych metod identyfikacji parametrów rdzenia wykazały, że metody te prowadzą do różnych wartości modułu ścinania G_c. Za miarodajne wartości G_c można uznać średnią arytmetyczną z testów **ZgK-w**, **ZgD-w** i **ZgD-γ**, która wynosi G_c = 3,81 MPa. Maksymalne odchyłki wynoszą ±0,04 MPa, tzn. 1,0% i mieszczą się w granicach błędów pomiarowego. Wiersz 1 tabeli 1 i 2 przedstawia zaniżone wartości G_c w stosunku do wartości 3,81 MPa. Różnica wynosi 0,48 MPa, tzn. 12,6%. Wynika to stąd, że wiersze te dotyczą testu zginania wąskiego pasma o szerokości B = 10 cm, wyciętego z płyty krótkiej. W tym teście pominięto (z powodu trudności pomiaru) wpływ zgniecenia płyty na podporze, które zwiększa całkowite ugięcie w mierzonej części rozpiętości. Mierzone ugięcie w, wstawiane do wzoru (3.1) jest więc zawyżone, przez co zawyża w_s we wzorze (3.3)

Tabela 2. Wyniki badań eksperymentalnych modułu ścinania rdzenia GC

Rodzaj testu		Rodzaj okładziny	GC [MPa]
Testy zginania	ZgK ₁₀₀ -w	gładka B ≈ 0,1 m	3,33
	ZgK _z -w	gładka z zamkami B = 1,1 m	4,72
	ZgD _z -w		4,73
	ZgD _z -γ		4,71
	ZgK-w	gładka bez zamków B ≈ 1,0 m	3,81
	ZgD-w		3,85
	ZgD-γ		3,77
	ZgK-w	liniowana bez zamków B ≈ 1,0 m	3,79
	ZgD-w		3,88
	ZgD-γ		3,78
Bezpośrednie ścinanie	Ścinanie – γ	gładka bez zamków	3,01
Skręcanie	Skręcanie – φ	gładka bez zamków	2,67

i w konsekwencji zaniża szacowaną wartość G_C . Kolejne trzy wiersze **ZgK_z-w**, **ZgD_z-w** i **ZgD_z-γ** dotyczą płyt z zamkami. Średnia arytmetyczna wartość wynosi $G_C = 4,72$ MPa i jest wyższa od 3,81 MPa o 0,91 MPa, tzn. 23,9%. Wynika to stąd, że zamki zwiększają sztywność giętą płyty. W metodzie normowej ugięcie w_B od zginania obliczone jest z (3.6) jakby nie było zamków. A więc wartość w_B podstawiana do (3.1) jest zawyżona, co skutkuje zaniżeniem w_s i w konsekwencji obserwowanym, znacznym zawyżeniem G_C . Wyniki identyfikacji G_C dla płyt z okładzinami liniowanymi są niemal identyczne jak dla płyt z okładzinami gładkimi. Średnia z trzech serii badań wynosi bowiem 3,82 MPa, więc różnica wynosi 0,01 MPa (0,26%). Analizując wyniki testu bezpośredniego ścinania zauważamy duże zaniżenie wartości G_C . Parametr ten wyznaczano ze wzoru (3.12), u którego podstaw leżały założenia równomierne rozkładu naprężeń stycznych na powierzchni ścinania i pominięcia naprężeń normalnych. Są to powszechnie znane i stosowane założenia testu Volkersena na ścinanie połączenia zakładkowego. Wyniki przedstawione w tabelach 1 i 2 pokazują, że założenia testu Volkersena prowadzą do dużych błędów szacowanego parametru G_C . Zaniżone wyniki G_C uzyskano

z testu skręcania. Przyczyną mogło być naruszenie struktury pianki na poboczniczy walca podczas toczenia próbek. Wycinanie próbek walcowych z płyty jest trudne i pracochłonne, dlatego test ten nie spełnia postulowanego warunku prostoty.

Wyniki badań potwierdzają przydatność testu zginania do identyfikacji G_C , pod warunkiem prowadzenia prób na płytach bez zamków. Konieczne jest również przyjęcie uśrednionego (zhomogenizowanego) modułu Younga okładziny stalowej z warstwami cynku. Metoda proponowana przez autorów cechuje się podobnymi zaletami prostoty testów jak normowe testy zginania z pomiarem przemieszczeń, natomiast nie wymaga trudu wyznaczania wartości modułu Younga okładzin.

Wszystkie rodzaje testów symulowano komputerowo przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, w celu zweryfikowania modułów sprężystości wyznaczonych we wszystkich stosowanych testach.

7. Wnioski końcowe

Test zginania na płycie o pełnej szerokości wraz z zamkami daje możliwość obserwacji zachowania się rzeczywistej konstrukcji. Jednak do identyfikacji parametrów materiałowych rdzenia należy

stosować próbki bez zamków lub uwzględnić odpowiednie (ustalone eksperymentalnie) współczynniki korygujące wpływ zamków na sztywność płyty.

W badaniach zginania płyt dłuższą ważną rolę odgrywa precyzyjne wyznaczenie grubości okładzin oraz ich zhomogenizowanych modułów Younga w celu dokładnego uwzględnienia sztywności giętej płyty B_s . Wszelkie odchyłki w parametrze B_s silnie wpływają na wynik identyfikacji G_C . Tej wady pozbawiona jest metoda zaproponowana przez autorów pracy, w której moduł Kirchhoffa G_C wyznacza się na podstawie kątów obrotu płyty.

W przypadku testów zginania, szczególnie dla próbek o małej rozpiętości, w identyfikacji modułu ścinania rdzenia G_C należy uwzględnić zgniecenie rdzenia na podporach.

Mikroprofilowanie okładzin nie ma wpływu na mierzone ugięcia płyty w teście zginania. W związku z tym, nie zaburza szacowanej wartości modułu ścinania G_C , wyznaczonej na podstawie testu zginania płyty.

Zaproponowana metoda identyfikacji G_C bazująca na pomiarze kątów obrotu płyty ma podobne zalety prostoty testu jak metoda normowa (pomiar w), lecz pozbawiona jest jej wad.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Allen H. G., Analysis and design of structural sandwich panels, Pergamon Press 1969
- [2] Chuda-Kowalska M., Garstecki A., Pozorski Z., Identyfikacja parametrów sztywności układów warstwowych z podatnym rdzeniem, I KMP+CD, Warszawa 2007
- [3] Davies J. M. (Editor), Lightweight sandwich constructions, Blackwell Science Ltd. 2001
- [4] Stamm K., Witte H., Sandwichkonstruktionen, Berechnung, Fertigung, Springer-Verlag, Wien 1974
- [5] Zenkert D., An Introduction to Sandwich Construction, Eastbourne, EMAS 1995
- [6] PN-EN 14509 Self-supporting double skin metal faced insulating panels – Factory made products-Specifications, 2007