



Porównanie energochłonności konstrukcji przekładkowych typu sandwicz z wypełnieniem oraz cienkościennych struktur falistych

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ BOGUSZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy opisano badania eksperymentalne konstrukcji energochłonnych. Dokonano porównania wyników zdolności pochłaniania energii uderzenia struktur typu sandwicz z wypełnieniem z tworzywa spienionego oraz cienkościennych konstrukcji energochłonnych z rdzeniem z powłoki falistej. Wykonano próbki z użyciem kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną, tkaniną szklaną i tkaniną węglową. Struktury faliste ze wzmocnieniem włóknami węglowymi wykazały najwyższą wartość względnej energii absorpcji.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, konstrukcje energochłonne, względna energia absorpcji, konstrukcje przekładkowe, tworzywo spienione

Symbole UKD: 624.04

1. Wprowadzenie

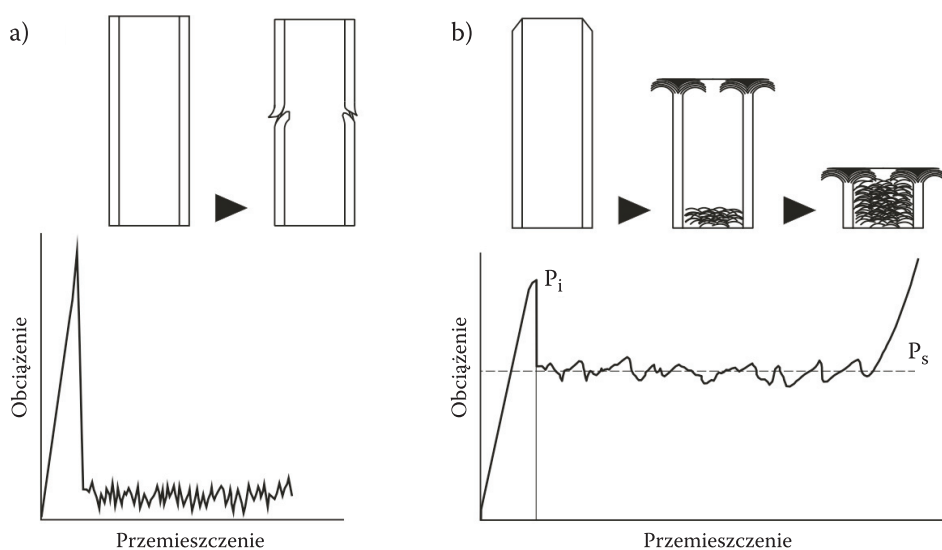
Konstrukcje energochłonne są zdolne do przejścia w czasie uderzenia energii kinetycznej, której ujemny przyrost jest równoważny pracy niszczenia (kruszenia łamania) konstrukcji. Kompozyty polimerowe spośród materiałów konstrukcyjnych mają nie tylko największy stosunek wytrzymałości i sztywności do masy właściwej (R/ρ , E/ρ), ale także największą względną energię absorpcji (WEA — energię zaabsorbowaną odniesioną do masy). Z tego względu są chętnie stosowane w konstrukcjach rdzeni struktur energochłonnych.

Aby konstrukcje energochłonne jak najlepiej absorbowwały energię uderzenia, niszczenie ich nie może odbywać się w sposób gwałtowny, ale powinno odbywać

się w sposób progresywny, tak aby każda objętość próbki była pokruszona na najmniejsze cząstki (rys. 1). Energia absorbowana podczas niszczenia jest proporcjonalna do pola powierzchni pod wykresem obciążenie-przemieszczenie. Oblicza się ją z zależności:

$$EA = \int_0^l P dl,$$

gdzie: P — siła niszcząca; dl — elementarne przemieszczenie (skrócenie).



Rys. 1. Wpływ zastosowania inicjatora na mechanizm niszczenia: a) niszczenie katastroficzne (gwałtowne); b) niszczenie progresywne

Struktury energochłonne budowane są z kompozytów w postaci rdzeni przyklejonych pomiędzy warstwami cienkich powłok. Rdzenie mogą mieć różną budowę i w zależności od zastosowań wykonywane są z: rurek, stożków ściętych, kształtowników, cienkościennych powłok falistych, struktur plastra miodu, struktur przekładkowych typu sandwich z wypełniaczem z tworzywa spienionego. Poszczególne elementy konstrukcji energochłonnych wykonywane są z elementów cienkościennych, ponieważ muszą one niszczyć się przy stosunkowo niewielkiej sile, aby nie narażać konstrukcji na duże przeciążenia. Elementy cienkościenne podczas ściskania są narażone na wyboczenie i gwałtowne niszczenie. Można temu zapobiec, podpierając element cienkościenny w miejscu jego potencjalnego wyboczenia. W tym celu wprowadza się pomiędzy ścianki lekkie tworzywa porowate lub nadaje się elementom rdzenia odpowiedni kształt np.: rurki, płyty falistej,

stożka ściętego, elementu o przekroju krzyżowym. Proces progresywnego niszczenia rdzeni konstrukcji energochłonnych, zależy nie tylko od ich kształtu i geometrii, ale także — w przypadku wykorzystania do budowy materiałów kompozytowych — od właściwości mechanicznych: włókien, rodzaju osnowy, orientacji włókien w warstwie, sekwencji ułożenia warstw, zawartości włókien w kompozycie.

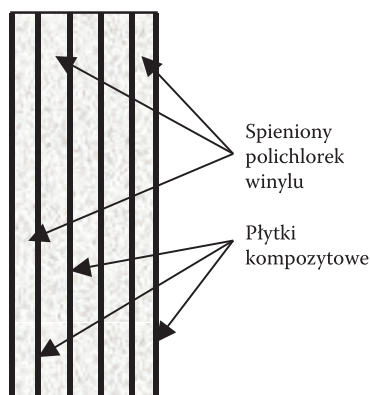
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki własnych badań wpływu rodzaju rdzenia konstrukcji energochłonnej na jej zdolność pochłaniania energii. Do porównania przyjęto dwa typy struktur energochłonnych:

- konstrukcję przekładkową typu sandwicz z rdzeniem płyt kompozytowych z wypełnieniem z tworzywa spienionego,
- konstrukcję energochłonną z rdzeniem z cienkościennej powłoki falistej.

2. Zdolność pochłaniania energii konstrukcji przekładkowej typu sandwicz z wypełnieniem z tworzywa porowatego

Tworzywo spienione stosowane jako wypełniacz rdzeni konstrukcji energochłonnych można otrzymać z różnych materiałów, takich jak: polimery, metale, ceramiki i szkła. Charakteryzują się one dużą porowatością, dzięki czemu otrzymuje się materiał o niskiej gęstości. Podczas ściskania tworzywa spienionego mogą wystąpić różne mechanizmy deformacji, wśród których należy wymienić: kruche pękanie oraz plastyczne odkształcenie. Materiały porowate wykazują jednorodną zależność pomiędzy obciążeniami i odkształceniami oraz małą wrażliwość na kierunek obciążenia (uderzenia).

Do badań przyjęto konstrukcję przekładkową z rdzeniem z płyt kompozytowych z wypełnieniem z tworzyw polimerowych, które są stosowane do budowy sprzętu lotniczego (rys. 2). Jako wypełniacz przyjęto spieniony, niepalny polichlorek



Rys. 2. Konstrukcja przekładkowa typu sandwicz z rdzeniem wypełnionym tworzywem porowatym

winyłu o grubości 10 mm (właściwości podano w tabeli 1 [1]), który znajdował się pomiędzy cienkościennymi płytkami z kompozytu epoksydowego o grubości 1 mm, wzmocnionego tkaninami szklanymi. Przebadano dwa rodzaje struktur okładzin: z tkaniną ułożoną pod kątem 0° do osi próbki $[(0/90)_T]_n$ — próbki nr 1 w tabeli 3) oraz z tkaniną pod kątem $\pm 45^\circ$ $[(\pm 45)_T]_n$ — próbki nr 2 w tabeli 3).

TABELA 1

Właściwości mechaniczne spienionego polichloroku winylu [1]

Lp.	Właściwości		Wartość	Jednostka
1	E^+	Moduł sprężystości wzdłużnej przy rozciąganiu	92,43	[MPa]
2	R^+	Wytrzymałość na rozciąganie	1,82	[MPa]
3	ν^+	Współczynnik Poissona przy rozciąganiu	0,262	[-]
4	E^-	Moduł sprężystości wzdłużnej przy ściskaniu	80,63	[MPa]
5	R^-	Wytrzymałość na ściskanie	1,62	[MPa]
6	ν^-	Współczynnik Poissona przy ściskaniu	0,260	[-]
7	G	Moduł sprężystości poprzecznej	34,0	[MPa]
8	T	Wytrzymałość na ścinanie	1,32	[MPa]

TABELA 2

Właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych na bazie żywicy epoksydowej

Lp.	Właściwości		Tkanina szklana/ epoksyd	Mata szklana/ epoksyd	Tkanina węglowa/ epoksyd	Jednostka
1	E_1^+	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 1	19,54	6,8	46,4	[GPa]
2	E_2^+	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 2	19,54	6,8	46,4	[GPa]
3	E_1^-	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 1	19,33	9,2	50,6	[GPa]
4	E_2^-	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 2	19,33	9,2	50,6	[GPa]
5	ν_{12}	Współczynnik Poissona w płaszczyźnie 1-2	0,143	0,27	0,14	[-]
6	G_{12}	Moduł sprężystości poprzecznej w płaszczyźnie 1-2	2,42	3,8	2,91	[MPa]
7	R_1^+	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 1	311,7	83,5	468,6	[MPa]
8	R_2^+	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 2	311,7	83,5	468,6	[MPa]
9	R_1^-	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 1	306	170,9	375,2	[MPa]

cd. tabeli 2

10	R_2^-	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 2	306	170,9	375,2	[MPa]
11	T_{12}	Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie 1-2	38,4	83,3	57,03	[MPa]
12	ϵ_1^+	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,018	0,018	0,0101	[-]
13	ϵ_2^+	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 2	0,018	0,018	0,0101	[-]
14	ϵ_1^-	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,016	0,019	0,0074	[-]
15	ϵ_2^-	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 2	0,016	0,019	0,0074	[-]
16	γ_{12}	Odształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	-	0,029	0,0034	[-]

TABELA 3

Zestawienie średnich wyników z badań 5 próbek konstrukcji przekładkowej typu sandwich z wypełniaczem z tworzywa spienionego [2]

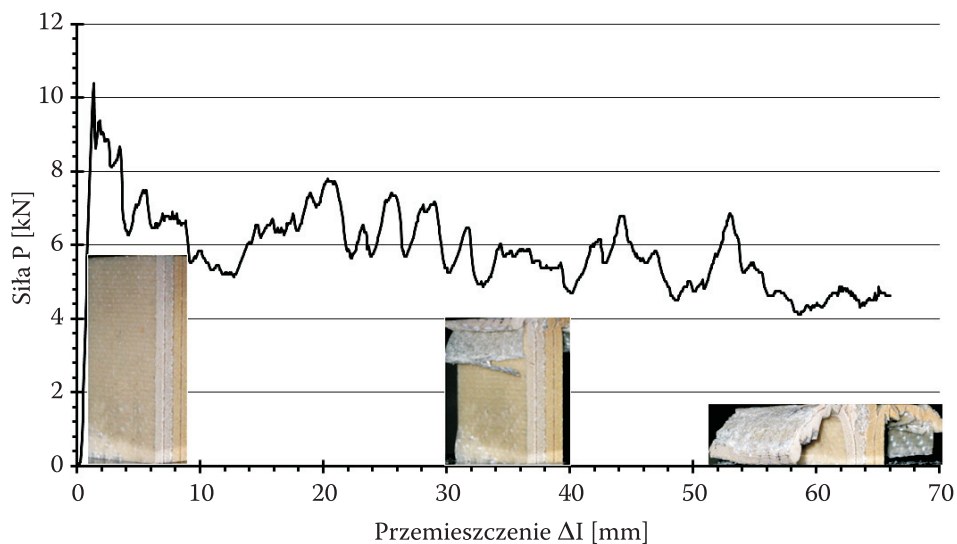
Nr próbki	Rodzaj kompozytu	Struktura płytek	t [mm]	h [mm]	b [mm]	m [g]	P_{sr} [kN]	EA [J]	WEA [kJ/kg]
1	S/E	$[(0/90)_T]_n$	44	95	46	26	5,8	551	21,2
2	S/E	$[(\pm 45)_T]_n$	44	45	99	26,5	10,7	482	18,2

gdzie: t – grubość próbki; h – wysokość; b – szerokość próbki; m – masa; P_{sr} – średnia siła niszcząca; EA – energia absorbowana; WEA – względna energia absorbowana.

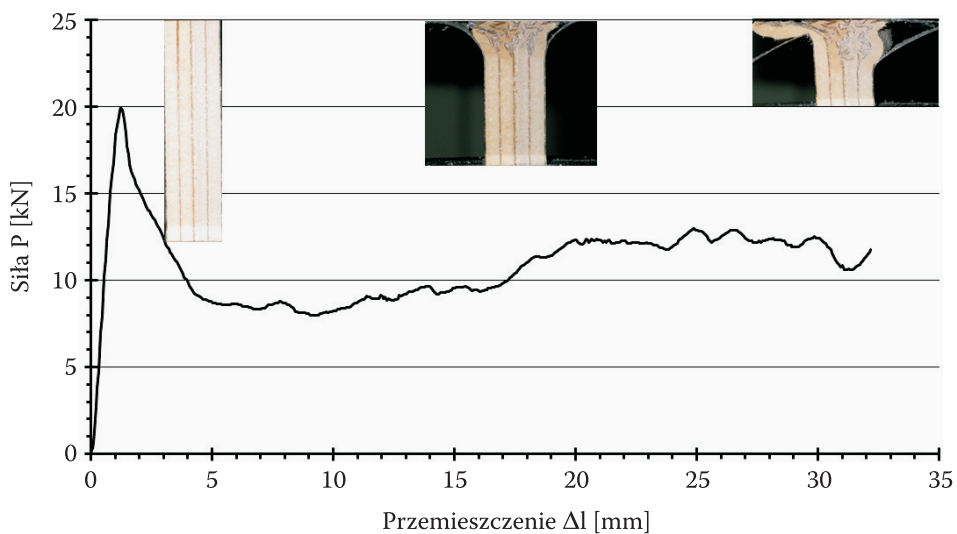
Niepalny, spieniony polichlorek winylu marki PChW-1, o gęstości 115 kg/m^3 , który był przedmiotem badań, jest powszechnie stosowany jako wypełniacz konstrukcji przekładkowych lub jako płyty warstwowe w lotnictwie. Właściwości mechaniczne płytek z kompozytu epoksydowego zostały podane w tabeli 2.

Badania energochłonne przy ścisaniu przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8802, przy stałej prędkości obciążenia równej 40 mm/min . Podczas próby rejestrowana była przez maszynę wartość obciążenia niszczącego w funkcji przemieszczenia (skrócenia próbki), z częstością próbkowania 10 Hz . Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3. Zarejestrowane zależności obciążenie-skrócenie ilustrują rysunki 3 oraz 4 (na podstawie pracy [2]).

Z otrzymanych wyników można stwierdzić, że struktury typu sandwich z płytami cienkościennymi wykonanymi z kompozytu wzmocnionego tkaniną o strukturze $[(0/90)_T]_n$ wykazały większą zdolność pochłaniania energii uderzenia niż przy wykorzystaniu płytek ze wzmocnieniem tkaniną o strukturze $[(\pm 45)_T]_n$. Względna energia absorpcji dla tego typu konstrukcji wynosi do 20 kJ/kg . Więcej informacji można znaleźć w pracy [2].



Rys. 3. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia dla konstrukcji przekładkowej typu sandwich z cienkościennymi przegrodami kompozytowymi wzmocnionymi tkaniną szklaną $[(0/90)_T]_n$



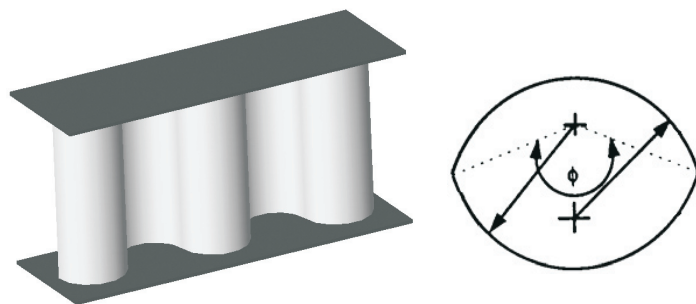
Rys. 4. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia dla konstrukcji przekładkowej typu sandwich z cienkościennymi przegrodami kompozytowymi wzmocnionymi tkaniną szklaną $[(\pm 45)_T]_n$

Konstrukcje tego typu mogą niszczyć się przez globalne wyboczenie, wykazując małą względną energię absorbowaną lub progresywnie — osiągając znacznie większe WEA . Niekorzystny mechanizm niszczenia może być spowodowany

lokalnymi defektami struktury lub niezachowaniem właściwej geometrii próbki. W przypadku gdy większa część próbek niszczy się przez globalne wyboczenie, należy zmniejszyć grubość cienkich płyt przekładkowych, przy niezmiennych właściwościach rdzenia piankowego.

3. Konstrukcja energochłonna z rdzeniem w postaci cienkościennych powłok falistych

Hanagud i inni [3] badali zdolność absorpcji energii przez struktury w postaci pofalowanej powłoki wykonanej z kompozytu grafit/epoksyd (rys. 5). Zaletą takiego rdzenia jest duża sztywność na wyboczenie, przy stosunkowo cienkiej powłoce. Od kąta Φ zależy wartość amplitudy fali, z których otrzymuje się rdzeń o przekroju falowym. Dla $\Phi = 180^\circ$ (rys. 5) otrzymuje się próbkę o przekroju kołowym. W badaniach zaobserwowano niewielką zmianę zaabsorbowanej energii przy zmianie kąta Φ w zakresie 180° - 90° .



Rys. 5. Rdzeń o przekroju falistym

Do badań przyjęto kompozyt epoksydowy wzmocniony: włóknami szklanymi w postaci maty i tkaniny oraz tkaniną węglową. W elementach falistych przyjęto kąt $\Phi = 150^\circ$. Stwierdzono, że wysoką absorpcję energii otrzymano w wyniku rozwarstwiania i zginania warstw oraz kruszenia ścianki, natomiast małą jej wartość przy globalnym wyboczeniu, które występuje przy kącie Φ z zakresu 60° - 90° oraz w przypadku struktur o bardzo cienkich ściankach. Badano wpływ liczby fal w próbce i stwierdzono, że mają tylko drugorzędny wpływ na naprężenia powodujące niszczenie.

Przebadaliśmy dwa rodzaje struktur falistych. Pierwszy rodzaj próbek (pozycje 1-4 w tabeli 4) składał się z pojedynczej fali (patrz rysunek 5). Próbki te zostały wzmocnione różnymi typami włókien: tkaniną szklaną $[(\pm 45)_T]_n$, tkaniną szklaną $[(0/90)_T]_n$, tkaniną węglową $[(0/90)_T]_n$ oraz matą szklaną. Drugi rodzaj próbek (pozycja 5 w tabeli 4) to struktura energochłonna z rdzeniem złożonym z grupy cienkościennych powłok falistych przytwierdzonych pomiędzy dwie płaskie płyty

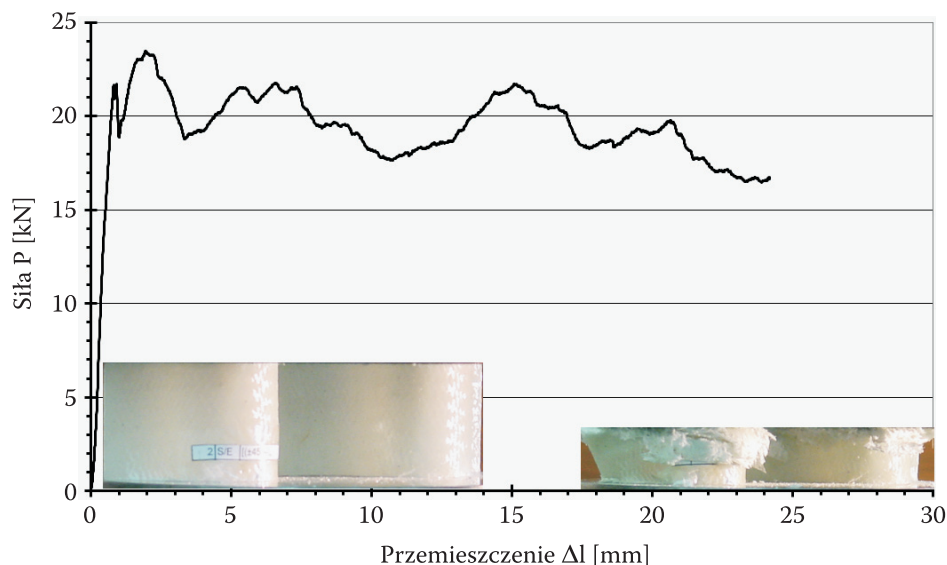
(patrz zdjęcie na rysunku 10). Kompozyt został wzmocniony matą szklaną — podobnie jak w próbce nr 4.

TABELA 4

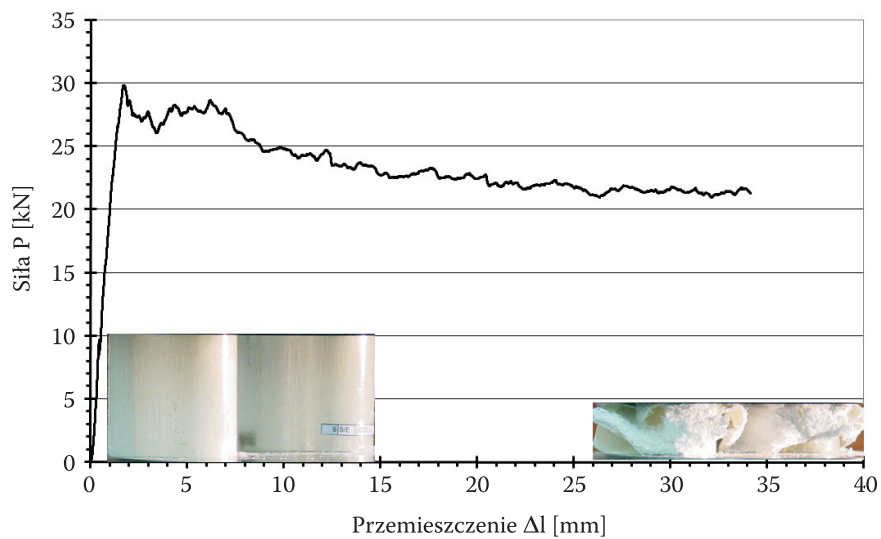
Zestawienie średnich wyników z badań 5 próbek z cienkościennych powłok falistych

Lp.	Kompozyt	Struktura	Grubość [mm]	Wys. [mm]	Masa [g]	P_{\max} [kN]	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]
1	S/E	$[(\pm 45^\circ)_T]_n$	1,7	40,4	24,0	23,48	0,47	32,45
2	S/E	$[(0/90)_T]_n$	1,8	57,5	30,0	29,55	0,70	39,28
3	C/E	$[(0/90)_T]_n$	1,8	39,6	18,0	37,33	0,70	72,29
4	S/E	Mata szklana	1,7	100	55,3	22,02	1,29	33,61
5	S/E	Konstrukcja przekładkowa mata szklana	1,6	80	112,36	–	1,44	32,30

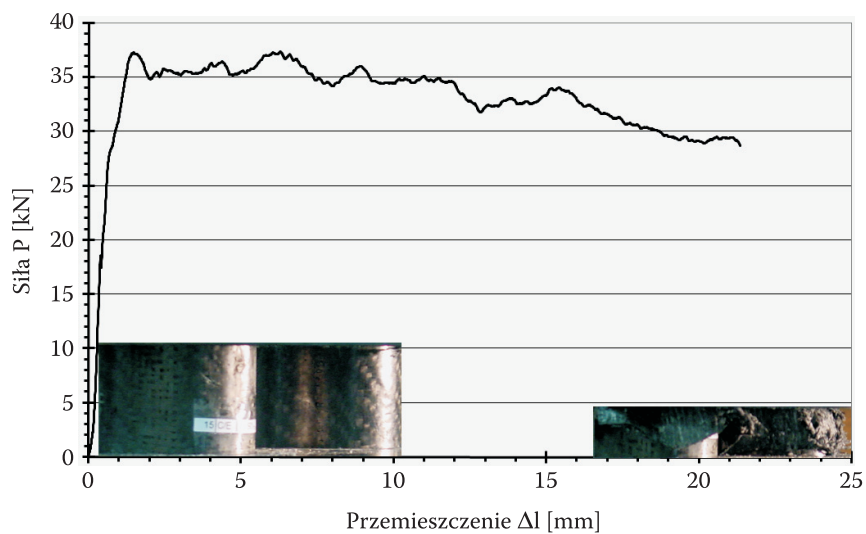
Badania energochłonne przy ściskaniu próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8802, przy stałej prędkości obciążenia równej 40 mm/min. Podczas próby rejestrowana była przez maszynę wartość obciążenia niszczącego w funkcji przemieszczenia (skrócenia próbki), z częstością próbkowania 10 Hz. Wyniki badań powłok falistych przedstawiono w tabeli 4 i na rysunkach 6-10.



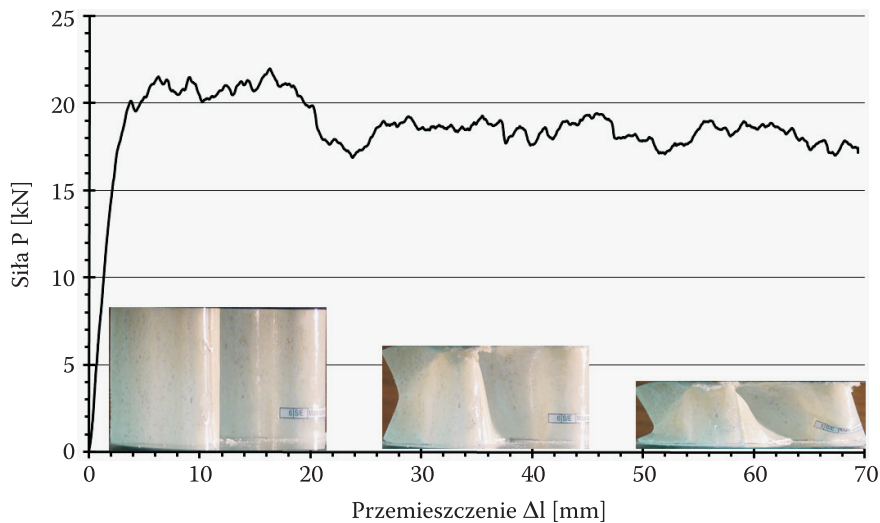
Rys. 6. Wykres obciążenie-odkształcenie dla powłoki falistej szkło-epoksyd ze wzmocnieniem z tkaniny szklanej o strukturze $[(\pm 45)_T]_n$



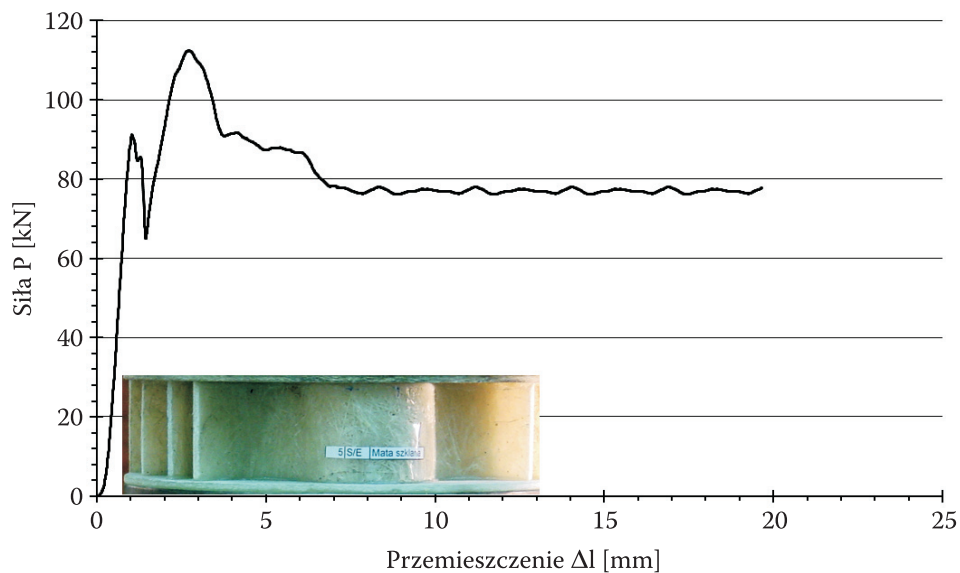
Rys. 7. Wykres obciążenie-odkształcenie dla powłoki falistej szkło-epoksyd ze wzmocnieniem z tkaniny szklanej o strukturze $[(0/90)_T]_n$



Rys. 8. Wykres obciążenie-odkształcenie dla powłoki falistej węgiel-epoksyd ze wzmocnieniem z tkaniny szklanej o strukturze $[(0/90)_T]_n$



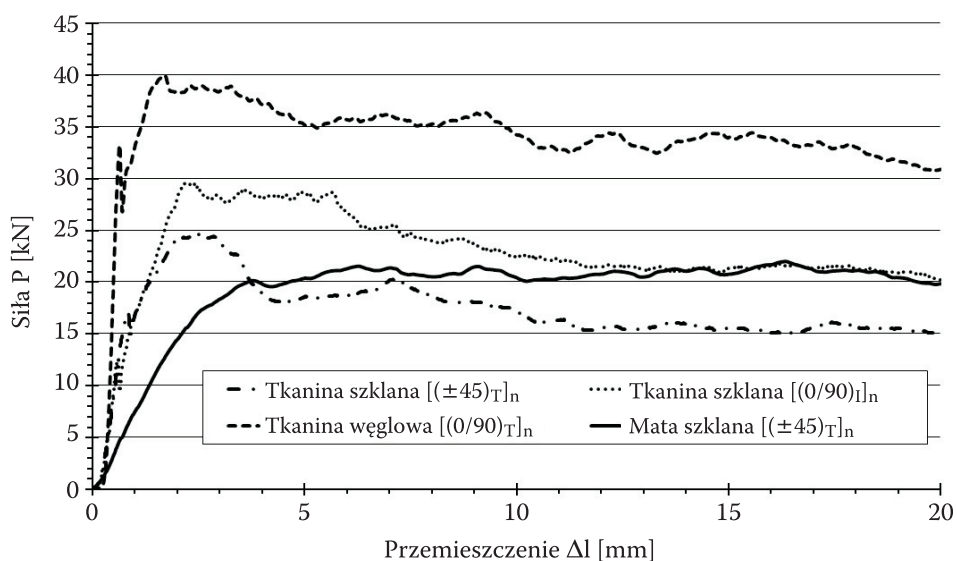
Rys. 9. Wykres obciążenie-odkształcenie dla powłoki falistej węgiel-epoksyd ze wzmocnieniem z maty szklanej



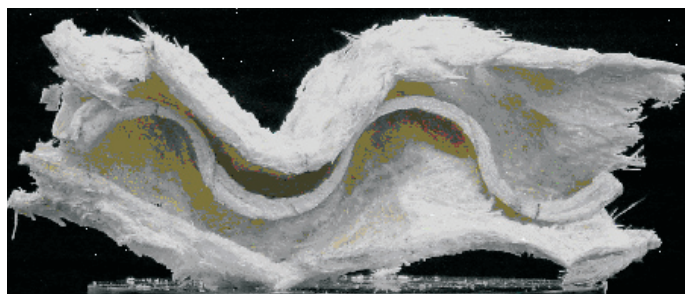
Rys. 10. Wykres obciążenie-odkształcenie dla konstrukcji energochłonnej szkło-epoksyd z rdzeniem z cienkiej ścianki falistej wzmocnionej matą szklaną

Z porównania próbek nr 4 oraz 5 można zaobserwować, że zaabsorbowana energia EA konstrukcji energochłonnej jest proporcjonalna do całkowitej długości struktury falistej. Natomiast energia absorbowana odniesiona do masy dla obydwu rodzajów próbek pozostaje stała. Więcej danych można znaleźć w pracy [4].

Największą zdolność pochłaniania energii odniesioną do masy (WEA) równą 73,1 kJ/kg otrzymano z badań powłok wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaniną węglową. Dla kompozytu epoksydowego wzmocnianego tkaniną szklaną o strukturze $[(0/90)_T]_n$ otrzymano 39,8 kJ/kg. Z kolei najmniejsze wartości WEA wykazały kompozyt wzmocniony matą szklaną oraz tkaniną szklaną o strukturze $[(\pm 45^\circ)_T]_n$. Na rysunku 11 przedstawiono zestawienie krzywych obciążenie-przemieszczenie dla przebadanych struktur falistych.



Rys. 11. Porównanie krzywych obciążenie-odkształcenie dla przebadanych cienkościennych struktur o przekroju falistym



Rys. 12. Przekrój zniszczonej powłoki falistej (widok w kierunku krawędzi)

Spadek siły niszczącej w zależnościach P- Δl rdzeni w postaci powłok falistych jest spowodowany wyboczeniem krawędzi bocznych powłok podczas obciążenia.

4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że zarówno dla konstrukcji typu sandwich z wypełnieniem z tworzywa spienionego, jak i dla struktur z rdzeniem z cienkościennych powłok falistych można zaobserwować podobne zależności pomiędzy rodzajem zastosowanego kompozytu a energochłonnością. Kompozyt epoksydowy wzmocniony tkaniną szklaną o strukturze $[(0/90)_T]_n$ wykazuje lepszą zdolność pochłaniania energii uderzenia od kompozytu ze wzmocnieniem tkaniną o strukturze $[(\pm 45^\circ)_T]_n$.

Wyniki badań przedstawione w tabeli 5 dotyczą porównania wartości względnej energii absorpcji (WEA) dla konstrukcji energochłonnych typu sandwich (pozycja 1 i 2), a także struktur energochłonnych z powłok falistych (pozycja 3 oraz 4), o identycznych typach wzmocnień kompozytu. Na podstawie przedstawionych wyników badań wnioskuje się jednoznacznie, że konstrukcja z rdzeniem z powłok falistych ma większą zdolność pochłaniania energii niż struktura typu sandwich. Bezpośrednie porównanie pozycji 1 oraz 3 (kompozyt wzmocniony tkaniną $[(0/90)_T]_n$) wykazuje 85,3% wzrost pochłanianej energii na jednostkę masy na korzyść struktury falistej. Natomiast próbki 4 wykazują większą o 78,3% WEA niż próbki o strukturze 2.

Również konstrukcja energochłonna z rdzeniem w postaci struktury falistej ze wzmocnieniem z maty szklanej (rys. 10) osiągnęła większą zdolność pochłaniania energii niż struktury sandwich z wypełnieniem z tworzywa spienionego.

TABELA 5

Porównanie wartości zaabsorbowanej energii dla przebadanych konstrukcji energochłonnych

Lp.	Struktura rdzenia	Rodzaj kompozytu	Struktura płytek	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]
1	Płytki kompozytowe z wypełnieniem z tworzywa spienionego	S/E	$[(0/90)_T]_n$	0,55	21,2
2	Płytki kompozytowe z wypełnieniem z tworzywa spienionego	S/E	$[(\pm 45)_T]_n$	0,48	18,2
3	Cienkościenna struktura falista	S/E	$[(0/90)_T]_n$	0,70	39,28
4	Cienkościenna struktura falista	S/E	$[(\pm 45)_T]_n$	0,47	32,45
5	Cienkościenna struktura falista	C/E	$[(0/90)_T]_n$	0,70	72,29

Większą zdolność pochłaniania energii dla konstrukcji cienkościennych ze struktur falistych tłumaczyć można tym, że posiadają one większą sztywność niż struktura typu sandwich. Tworzywo spienione zapobiega wyboczeniom płytek kompozytowych, między którymi się znajduje, jednak samo tworzywo spienione jedynie w niewielkim stopniu absorbuje energię uderzenia, natomiast zwiększa (choć nieznacznie) masę konstrukcji.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] S. OCHELSKI, A. KICZKO, *Badania właściwości mechanicznych spienionego polichloru winylu*, Biul. WAT, 52, 3, Warszawa, 2003.
- [2] S. OCHELSKI i in., *Sprawozdanie z pracy badawczej zleconej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego*, nr 176, WAT, 2004.
- [3] S. HANAGUD, I. CRAIG, P. SRIRAM, W. ZHOU, *Energy Absorption Behaviour of Graphite Epoxy Composite Sine Webs*, Journal of Composite Materials, vol. 23, 1989, 448-459.
- [4] S. OCHELSKI, P. BOGUSZ, *Zdolność pochłaniania energii różnych struktur fragmentów konstrukcji energochłonnych*, KONES Programy MES w Komputerowym Wspomaganiu Analizy, Kazimierz Dolny, 2007.

S. OCHELSKI, P. BOGUSZ

Comparison of energy-absorbing capability of sandwich structures with a core filled with foamed material and thin-walled waved structures

Abstract. The work presents experimental studies of energy absorbing structures. The presented investigation covers absorbing impact energy capability results of sandwich structures with a core made of composite plates filled with foamed material (PVC) and composite thin-walled waved constructions. The specimens were made of glass mat, glass fabric, and carbon fabric reinforced with epoxy resin. The waved thin-walled energy absorbing structures reinforced with carbon fabric proved to be the best.

Keywords: polymer composites, energy absorbing structures, specific energy absorption, sandwich structures, PVC foam

Universal Decimal Classification: 624.04

