



Wpływ inicjatora niszczenia na wartość energii absorbowanej

ROMAN GIELETA, TADEUSZ NIEZGODA, STANISŁAW OCHELSKI

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

Streszczenie: W pracy opisano wyniki badań wpływu inicjatora niszczenia elementów energochłonnych zastosowanych na rdzenie konstrukcji przekładkowych na zdolność pochłaniania energii uderzenia. Wykazano, że inicjatory zapewniają niszczenie progresywne elementu podczas ściskania, co wpływa na wartość pochłanianej energii. Przedstawiono różne rodzaje inicjatorów dla różnych kształtów elementów oraz określono, że elementy w postaci sfer, konstrukcji przekładkowej i stożków ściętych o kącie wierzchołkowym większym od 20° nie wymagają inicjatora niszczenia.

Słowa kluczowe: właściwości mechaniczne, energia absorbowana, kompozyty polimerowe, mechanika doświadczalna

Symbole UKD: 539.3

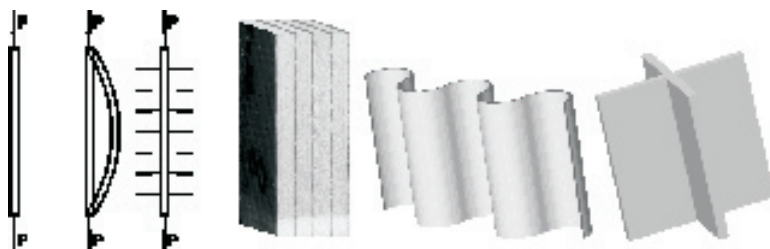
1. Wstęp

Konstrukcje energochłonne są zdolne do przejścia energii kinetycznej w czasie uderzenia, której ujemny przyrost jest równoważny pracy niszczenia (kruszenia, łamania) konstrukcji. Obecnie konstrukcje energochłonne mają szerokie zastosowanie między innymi: w przemyśle lotniczym (minimalizują skutki lądowań awaryjnych), w konstrukcji pojemników przeznaczonych do zrzutu z samolotu, w systemach ochrony przed skutkami eksplozji ładunków wybuchowych, w przemyśle samochodowym (w szczególności samochody wyścigowe), w kolejnictwie oraz stosowane są między innymi na zbiorniki do przewozu paliw lub środków żrących. W lotnictwie do budowy konstrukcji energochłonnych, ze względu na wymaganą lekkość konstrukcji, wykorzystuje się kompozyty polimerowe, różnych rodzajów i postaci wzmocnienia. Kompozyty polimerowe mają nie tylko najwięk-

szy stosunek wytrzymałości i sztywności do masy właściwej (R/ρ , E/ρ), ale także największą względną energię absorpcji (WEA, energię absorpcji odniesioną do masy), w porównaniu do metali i ich stopów.

Aby konstrukcje energochłonne jak najlepiej absorbowały energię uderzenia, niszczenie ich nie może odbywać się w sposób gwałtowny, jak w przypadku niszczenia belki podczas globalnego wybożenia, natomiast niszczenie powinno odbywać się w sposób progresywny tak, aby każda objętość próbki była zniszczona (pokruszona) na najmniejsze cząsteczki.

Na konstrukcje energochłonne należy stosować elementy cienkościenne, ponieważ muszą się one niszczyć przy stosunkowo niewielkiej sile. Sposób obciążenia elementów cienkościennych podczas niszczenia powoduje, iż są one narażone na wybożenie i gwałtowne niszczenie. Aby temu zapobiec, należy elementom cienkościennym nadać kształt, który zapewni większą sztywność poprzeczną: rurka, ścięty stożek, płyta falista, element o przekroju krzyżowym oraz powłoka w kształcie sfery. Poprzez wprowadzenie lekkiego tworzywa porowatego w miejsce potencjalnego wybożenia można zabezpieczać przed wybożeniem cienkie płyty (konstrukcja typu sandwich — rys. 1).



Rys. 1. Kształty próbek zapewniające niszczenie progresywne elementów smukłych

2. Mechanizmy inicjujące progresywne niszczenie próbek

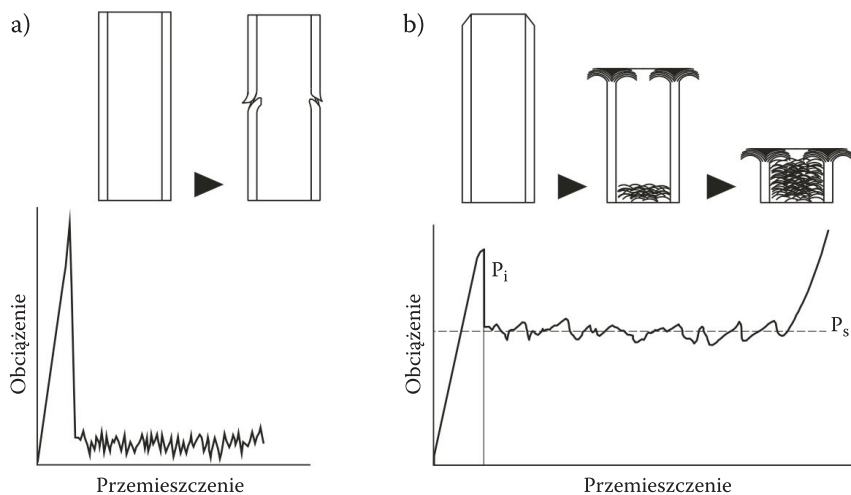
Próbki z kompozytów polimerowych wymagają mechanizmu rozpoczynającego stabilne, progresywne niszczenie, o wysokiej pracy niszczenia (kruszenia), różne od typu niszczenia gwałtownego (rys. 2). Typowy mechanizm inicjujący niszczenie próbek uzyskuje się przez modyfikację końca próbki (rys. 3).

Energia absorpcji podczas niszczenia jest proporcjonalna do pola powierzchni pod wykresem obciążenie-przemieszczenie, czyli obliczona jest ze wzoru:

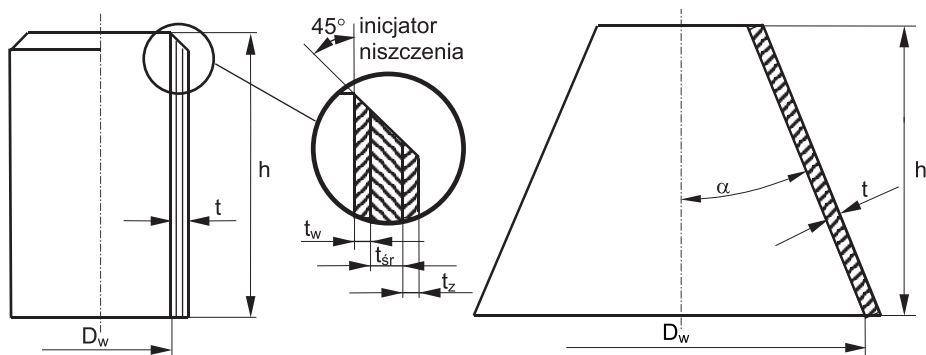
$$EA = \int_0^l P dl, \quad (1)$$

gdzie: P — siła niszcząca;

dl — elementarne przemieszczenie (skrócenie).



Rys. 2. Wpływ zastosowania inicjatora na mechanizm niszczenia: a) niszczenie katastroficzne (gwałtowne); b) niszczenie progresywne

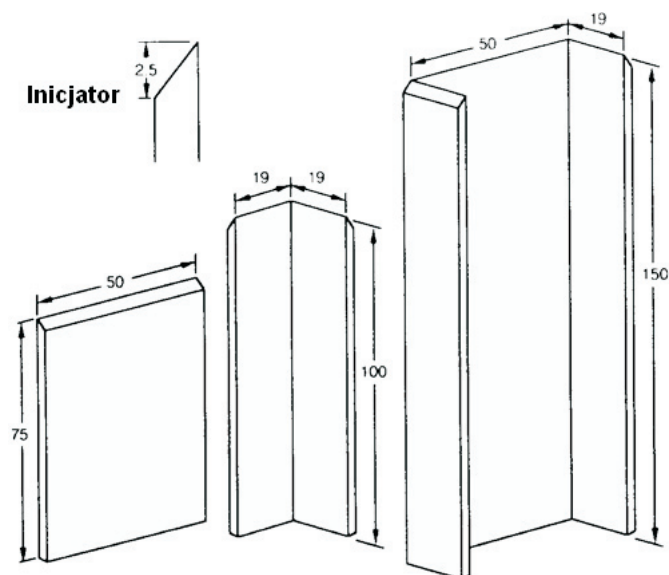


Rys. 3. Inicjatory niszczenia na elementach o przekrojach kołowych

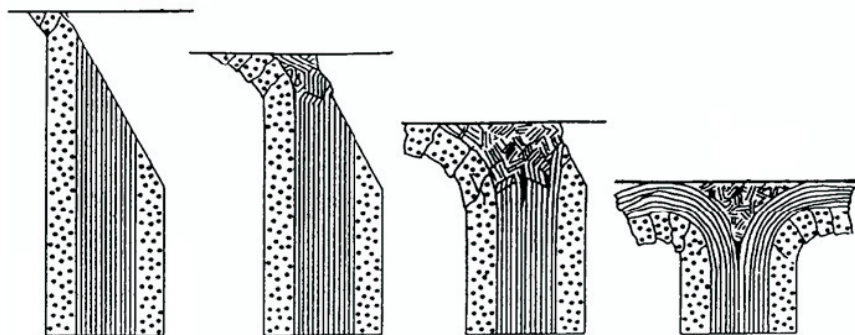
Zmodyfikowany koniec próbki powoduje powstanie obszaru o wysokich naprężeniach, w którym rozpoczyna się stabilne kruszenie przechodzące przez całą długość próbki, powodujące powstanie dużej EA. Nie wymagają inicjatorów próbki w kształcie ściętych stożków o kącie wierzchołkowym większym od 20° i próbki w postaci płyt przekładkowych typu sandwich oraz elementy w kształcie sfer.

Stopniowe niszczenie krawędzi ścianki rurki z inicjatorem pokazano na rysunku 5.

Wymagany jest mechanizm rozpoczynający niszczenie stabilne, progresywne, o wysokiej pracy kruszenia (niszczenia) elementu energochłonnego wykonanego z kompozytów polimerowych, w odróżnieniu od niszczenia gwałtownego (rys. 2).



Rys. 4. Kształt i wymiary próbek w postaci płyty, ceownika i kątownika z inicjatorami [1]

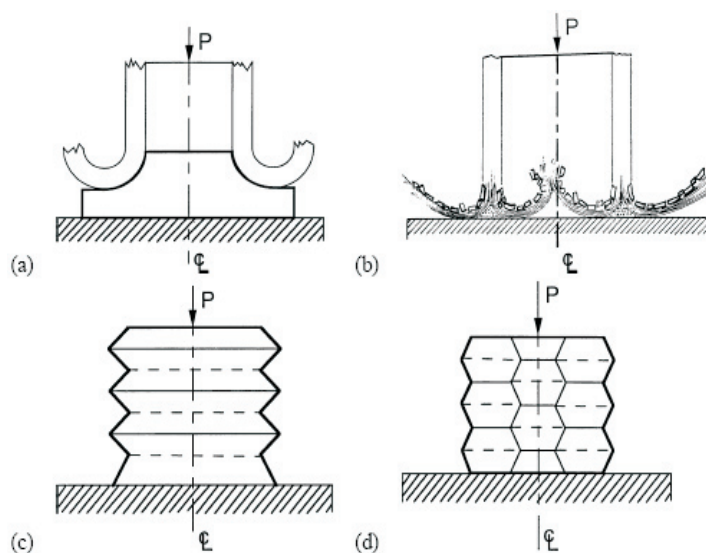


Rys. 5. Postępujące niszczenie próbki z inicjatorem

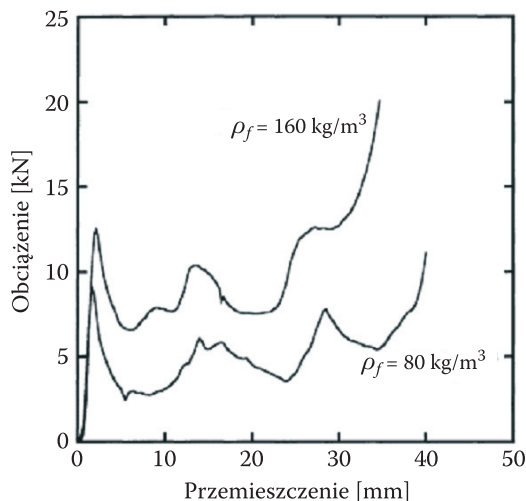
Typowy mechanizm inicjujący niszczenie próbek uzyskuje się przez modyfikację końca próbki — fazowanie krawędzi, co powoduje redukcję piku siły na wykresie $P-\Delta l$ oraz wpływa na podtrzymywanie progresywnego procesu niszczenia.

W pracach [2, 3] przedstawiono inne sposoby, od ścięcia na krawędzi ścianki, zapewniające progresywne niszczenie, które zobrazowano na rysunku 6.

Na rysunku 6a przedstawiono podporę wymuszającą niszczenie przez zginanie ścianki rurki, natomiast na rysunku 6b — niszczenie progresywne próbki z inicjatorem wykonanym w postaci fazy na krawędzi. Kształty próbek przedstawione na rysunkach 6c i 6d powodują podczas ściskania progresywne niszczenie przez fałdowanie ścianek próbek.

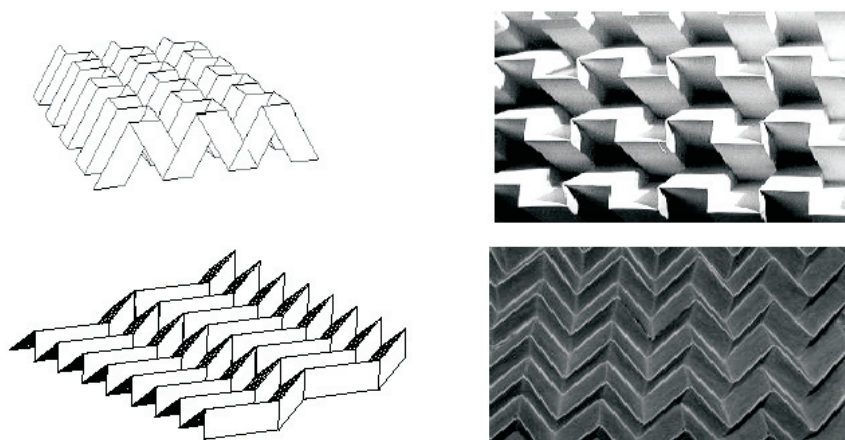


Rys. 6. Osiowe ściskanie elementów cylindrycznych: a) niszczenie przez zawijanie ścianki; b) niszczenie progresywne; c) osiowo symetryczne wyboczenie; d) wyboczenie kształtów romboidalnych



Rys. 7. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia dla próbek przedstawionych na rysunku 6c

Wyniki badań przedstawione na rysunku 7 dotyczą ściskania osiowego próbek wykonanych z kompozytu polimerowego, wypełnionych tworzywami spienionymi: poliuretanowym o gęstości 80 kg/m^3 i akrylowym — 160 kg/m^3 . Niewymagający inicjatorów niszczenia, ciekawy w formie materiał na rdzenie konstrukcji przekładkowych, przedstawiono w pracy [3] (rys. 8).



Rys. 8. Schemat struktury pofałdowanej jodełki w trzech kierunkach [3]



Rys. 9. Obciążenie prostopadłe i wzdłuż krawędzi zestawu struktur pofałdowanych [3]

Materiał na struktury pofałdowane (na rdzenie konstrukcji przekładkowej) ma wysoką wytrzymałość i sztywność oraz małą gęstość. Struktury mogą być wykonywane z kompozytów polimerowych, jak również z metali, w szczególności stopów aluminium. Zaletą struktury pofałdowanej jest prawie stała wartość WEA przy osiowym obciążeniu w trzech prostokątnych kierunkach.

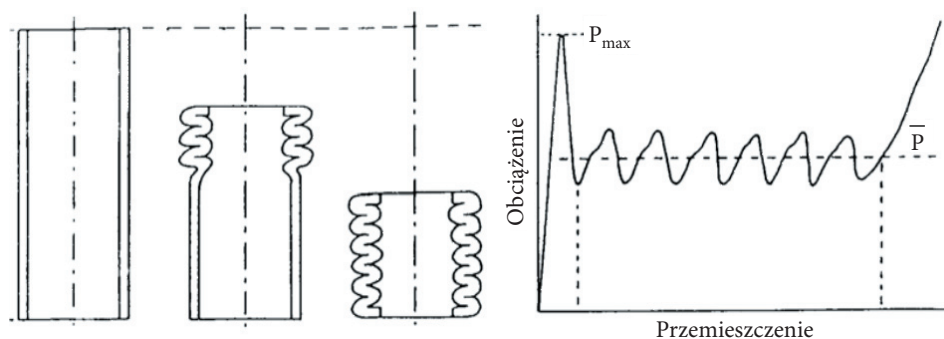
Badania wykazały, że niektóre kształty próbek bez inicjatora niszczą się progresywnie, do tej grupy można zaliczyć: stożki o kącie wierzchołkowym większym niż 20° , rurki o przekroju falistym, konstrukcję przekładkową typu sandwich z tworzywem spienionym oraz półsferę. Element o kształcie ściętego stożka powinien zacząć niszczyć się od przekroju mniejszej średnicy, gdzie podczas osiowego ściskania wystąpią największe naprężenia. Natomiast wymagają wykonania inicjatora próbki

o kształcie: rurek, cienkich prostopadłościów, słupków o przekroju teowym, dwuteowym, ceowym, krzyżowym i rurek o przekroju prostokątnym.



Rys. 10. Wybrane kształty próbek zastosowanych na rdzenie konstrukcji przekładkowych

Niszczenie przez progresywne sfałdowanie ścianki próbki występuje w przypadku próbek wykonanych z materiałów plastycznych — metali, a także z kompozytów polimerowych z włóknami na przykład aramidowymi. Kruche włókna węglowe i szklane z osnową polimerową także wykazują progresywne sfałdowanie, w przypadku gdy naprężenia międzywarstwowe są mniejsze od wytrzymałości osnowy oraz osnowa jest plastyczna i ma większe odkształcenia niszczące od odkształceń niszczących włókien (rys. 11).

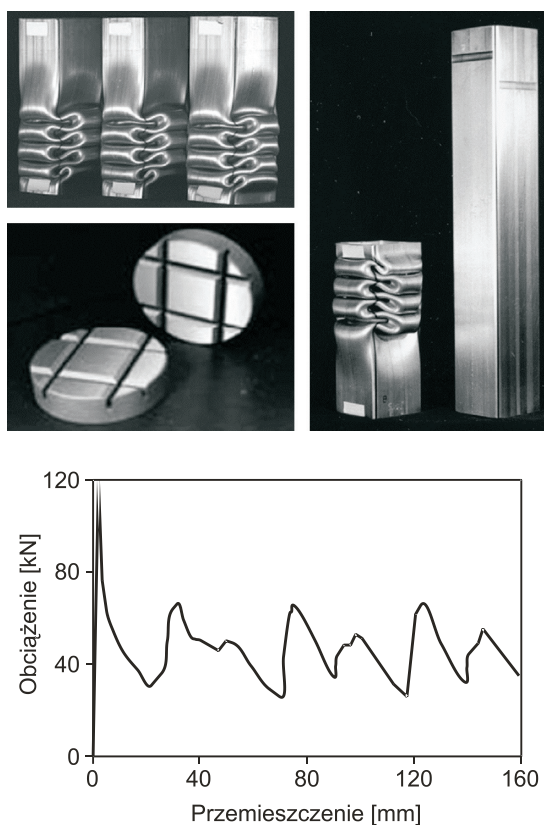


Rys. 11. Mechanizm niszczenia przez postępujące sfałdowanie ścianki rurki

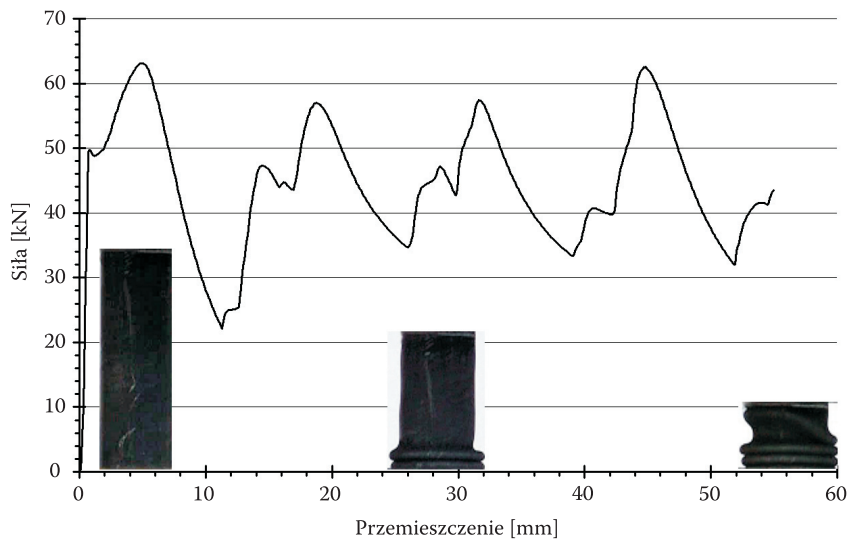
W pracy [4] przedstawiono badania elementów energochłonnych w postaci rurek o przekroju kwadratowym, wykonanych ze stali nierdzewnej. Na przeciwnych powierzchniach bocznych rurek wykonano inicjatory, w postaci rowków

rozmieszczonych w zależności od grubości ścianki. Podczas próby ściskania próbkę mocowano w specjalnych płytach — patrz rysunek 12. Piki na wykresie P- Δ l odpowiadają liczbie fałd powstałych na próbce.

Wyniki własnych badań, niszczenia progresywnego sfalowania ścianki, rurek wykonanych ze stali niskowęglowej, bez inicjatora przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 12b. Rurka miała średnicę zewnętrzną 32 mm i długość 80 mm oraz grubość ścianki 1,6 mm.



Rys. 12a. Widok próbek przed zniszczeniem i po zniszczeniu oraz zależność P- Δ l elementów wykonanych ze stali [4]



Rys. 12b. Zależność przemieszczenia od obciążenia dla próbki stalowej o średnicy 32 mm

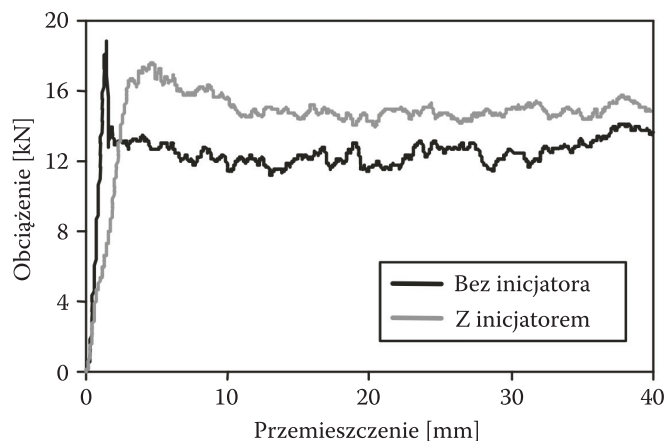
TABELA 1

Zestawienie wyników badań rurki stalowej

Nr próbki	Kształt	$V_{\text{śred}}$	P_{max}	$P_{\text{śred}}$	Δl	EA	m	H	t	Dzew.	WEA
		[mm/s]	[kN]	[kN]	[mm]	[kJ]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kJ/kg]
1	Rurka stalowa	0,67	63,1	44,3	55,0	2,43	95,0	80,0	1,6	32,0	37,3

3. Wpływ inicjatora na zdolność pochłaniania energii

Na rysunku 13 przedstawiono wyniki badań próbek w kształcie rurek, wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami szklanymi, z inicjATOREM i bez inicjatora. Wartość WEA próbek z inicjATOREM była większa o 21% w porównaniu z wynikami próbek bez inicjatora. Otrzymane z badań różne WEA należy tłumaczyć dużym P_{max} na wykresie $P_{\text{nisz}}-\Delta l$, w przypadku badania próbki bez inicjatora, która powoduje wstępne mikroniszczenie całej objętości próbki, w wyniku czego podczas dalszej próby siła niszcząca jest mniejsza, a więc mniejsza jest również WEA.

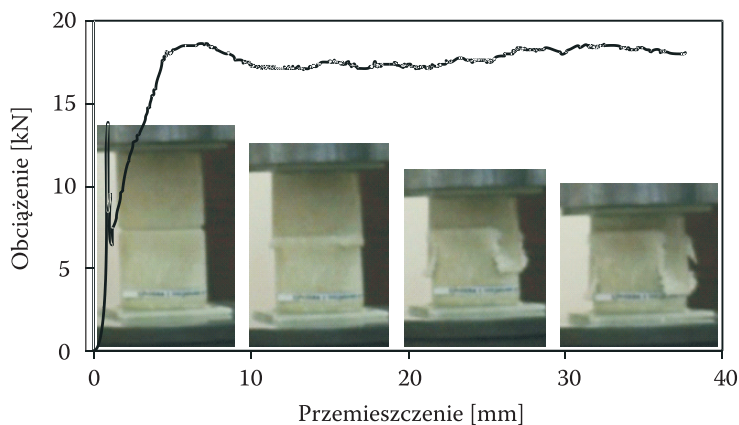


Rys. 13. Wpływ zastosowania inicjatora niszczenia na zależność P- Δl próbek w kształcie rurek wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaniną szklaną

TABELA 2

Wyniki badań rozmieszczenia inicjatora na rurce wykonanej z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną

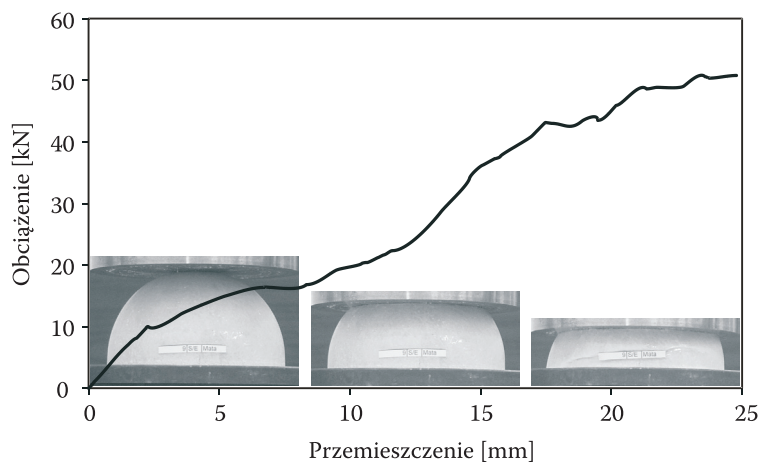
Lp.	Opis	D_w [mm]	P_{max} [kN]	P_{sr} [kN]	H [mm]	Δl [mm]	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]
1	Próbka z inicjatorem na krawędzi	39,4	45,90	28,30	93	39,29	1,11	42,18
2	Próbka z inicjatorem na środku	39,4	18,1	16,32	93	39,86	0,65	24,53



Rys. 14. Zależności P- Δl z próby ściskania rurki wykonanej z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną z inicjatorem na środku wysokości rurki

Inicjator rozmieszczony na środku wysokości rurki powoduje, iż rurka niszczy się od inicjatora, a następnie niszczy się przez ścinanie wzdłuż pobocznic, co widać na rysunku 14. WEA otrzymana z badań rurki z usytuowanym inicjatorem po środku jest o 42% mniejsza od WEA próbki z inicjatorem rozmieszczonym na krawędzi rurki.

Elementy energochłonne w kształcie sfery nie wymagają inicjatorów niszczenia. W pierwszym etapie niszczenia elementu w kształcie powłoki sferycznej występuje niewidoczne niszczenie. Sprężysta energia absorbowana jest spowodowana pękaniem osnowy (żywicy) w wierzchołku czaszy. Następnie, gdy wzrasta siła niszcząca, występuje utrata spójności pomiędzy włóknami i osnową, co powoduje powstanie mikrowybočenja. W tym stanie powierzchnia czaszy półkulistej stykająca się z płaszczyzną podpory powiększa się, co jest pokazane na rysunku 15 (niszczony jest większy przekrój sfery wraz ze wzrostem przemieszczenia). Wpływ na EA mają: pęknięcia w osnowie, niszczenie adhezji pomiędzy włóknami i osnową, mikrowybočenja w powłoce próbki, wybočenje powłoki, kruszenie powłoki oraz tarcie pomiędzy krawędzią próbki a powierzchnią podpory maszyny wytrzymałościowej.



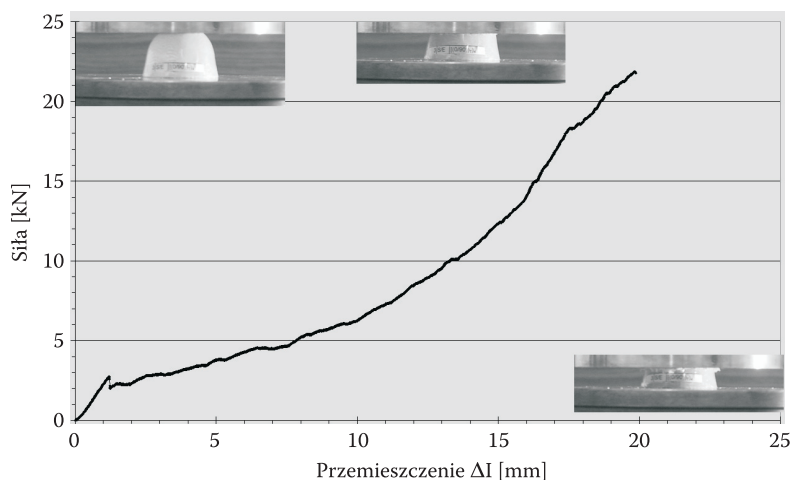
Rys. 15. Zależność P- Δl dla próbki w kształcie sfery o średnicy podstawy 100 mm wykonanej z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną

Wykres P- Δl struktury wykonanej z 2 czasz przyklejonych wierzchołkami żywicą, symetrycznie po obydwu stronach okrągłej płytki — próbka nr 2 — przedstawiono na rysunku 18.

TABELA 3

Średnie wyniki z badań pięciu struktur z rdzeniem w postaci sfer — kompozyt szkło/epoksyd [(0/90)_T]

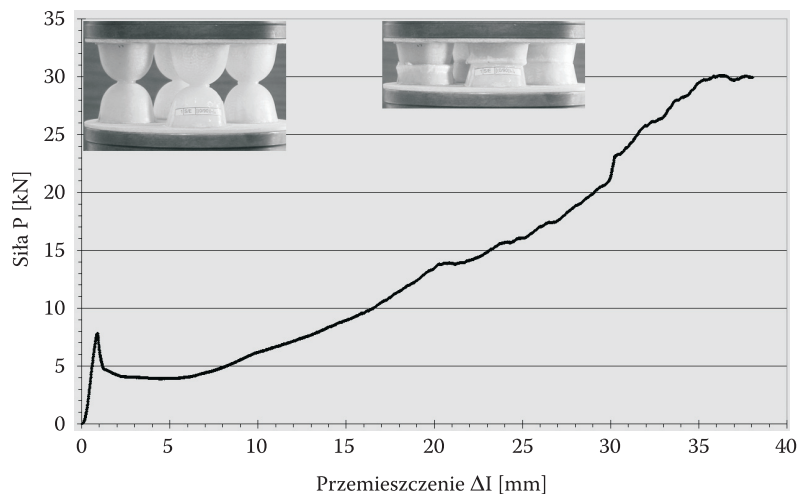
Lp.	Opis	t [mm]	h [mm]	m [g]	P _{max} [kN]	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]
1	Struktura wykonana z 8 czasz sklejonych parami wierzchołkami i przyklejonych żywicą do płyt	3,0	63,4	91,0	30,2	0,52	9,60
2	Struktura wykonana z 2 czasz przyklejonych wierzchołkami żywicą, symetrycznie po obydwu stronach okrągłej płytki	2,7	65,4	20,2	20,6	0,33	27,57



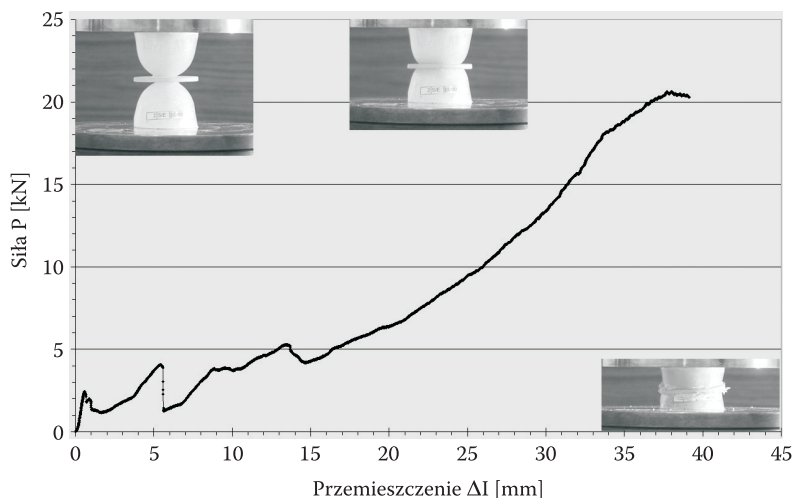
Rys. 16. Wykres P- ΔI sfery wykonanej z żywicy epoksydowej wzmocnionej tkaniną szklaną o średnicy podstawy 40 mm

Z wykresu przedstawionego na rysunku 20 wynika, że sfera wykonana z kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaniną szklaną o strukturze warstw [(0/90)_T] zorientowanych pod kątami 0, 15, 30 i 45°, ma średnio większą WEA o 100% od sfery wzmocnionej matą szklaną.

Ściskany element energochłonny w kształcie płyty falistej wykazuje dużą sztywność poprzeczną, która zapobiega wyboczeniu. Od kąta Φ zależy wartość amplitudy fali, z której otrzymuje się rdzeń o przekroju falowym. Dla $\Phi = 180^\circ$ (rys. 21) otrzymuje się próbkę o przekroju kołowym. Zaobserwowano niewielką zmianę EA przy zmianie kąta Φ w zakresie 180°-90°.

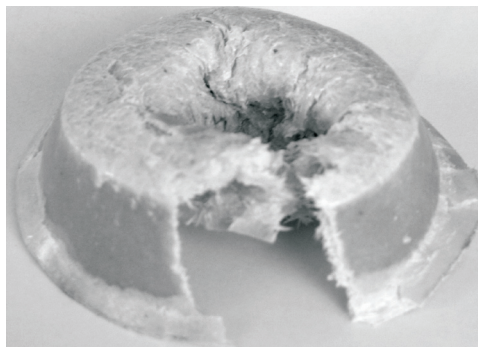


Rys. 17. Zależność P- ΔI dla konstrukcji przekładkowej z rdzeniem w postaci ośmiu sfer sklejonych parami wierzchołkami i przyklejonych do płyty

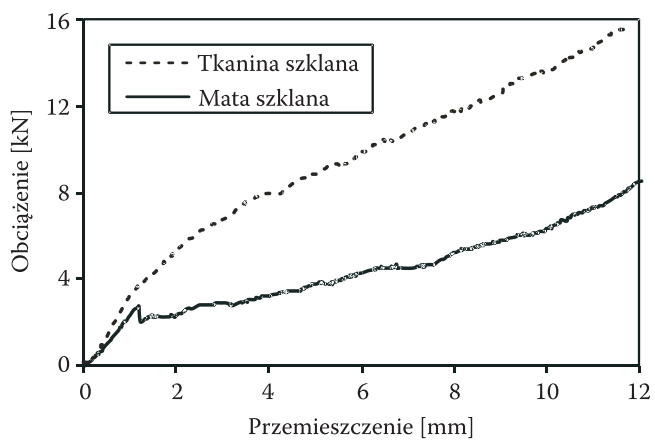
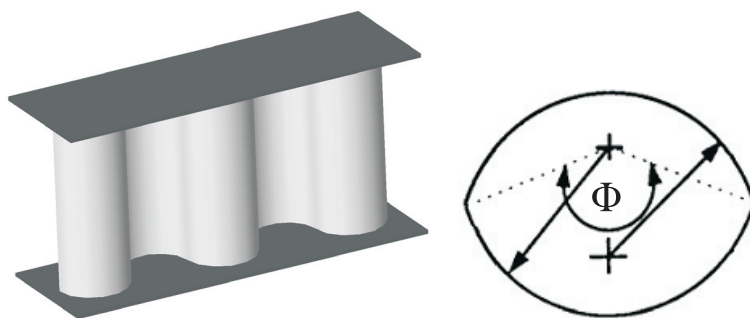


Rys. 18. Zależność P- ΔI struktury wykonanej z 2 sfer sklejonych wierzchołkami żywicą, symetrycznie po obydwu stronach okrągłej płytki

Do badań przyjęto kompozyt epoksydowy wzmocniony włóknami szklanymi w postaci maty i tkaniny oraz tkaniną węglową. W elementach falistych przyjęto kąt $\Phi = 150^\circ$. W badaniach stwierdzono, że wysoką EA otrzymano w wyniku zginania warstw i kruszenia ścianki, natomiast małą EA przy globalnym wyboczeniu, które występuje przy kącie Φ z zakresu 90° - 60° i przy bardzo cienkich ściankach.



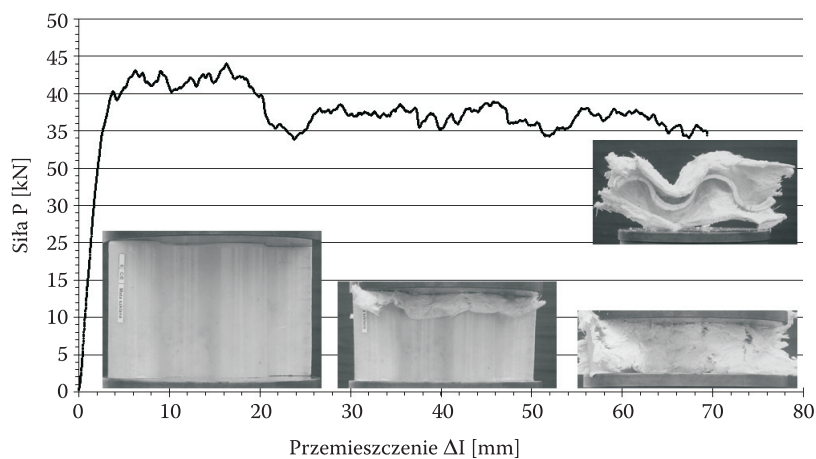
Rys. 19. Próbką zniszczona przez zginanie ścianki do wewnątrz sfery

Rys. 20. Zależności P- Δl dla sfer wykonanych z maty i tkaniny szklanej

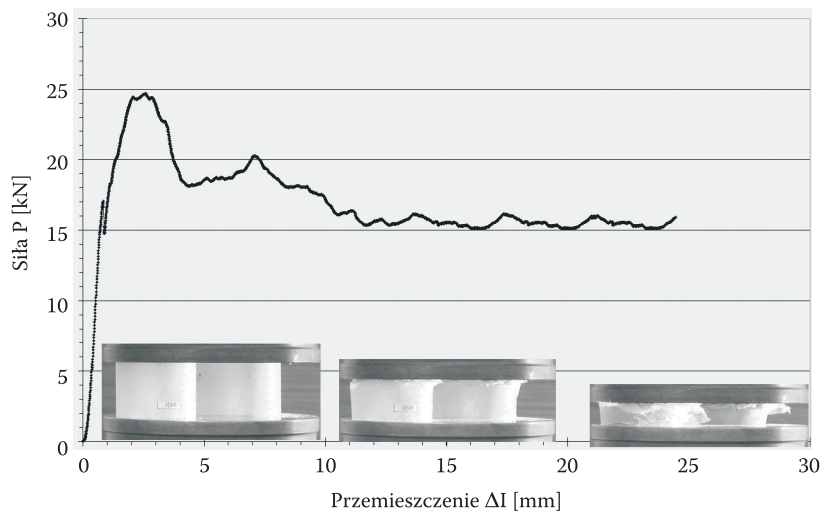
Rys. 21. Płyta przekładkowa z rdzeniem o przekroju falistym

Badano wpływ liczby fal w próbce i stwierdzono, że mają tylko drugorzędny wpływ na naprężenia powodujące niszczenie.

Wyniki badań powłok falistych przedstawiono na rysunkach 22 i 23.



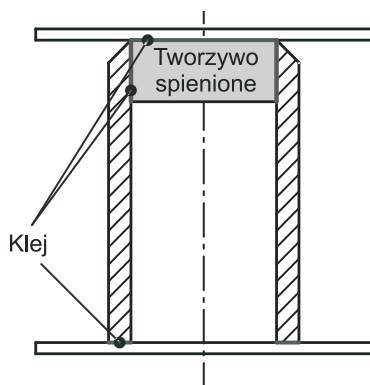
Rys. 22. Wykres P-Δ z próby ściskania powłoki falistej wykonanej z żywicy epoksydowej wzmocnionej matą szklaną z inicjatorem niszczenia



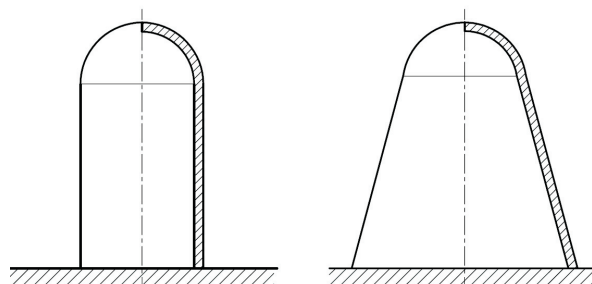
Rys. 23. Wykres P-Δ dla powłoki falistej wykonanej z żywicy epoksydowej wzmocnionej matą szklaną bez inicjatora niszczenia

4. Konstrukcje przekładkowe zapewniające niszczenie progresywne

Dla elementów energochłonnych przeznaczonych na rdzenie energochłonnych konstrukcji przekładkowych, które wymagają inicjatora niszczenia, takich jak: rurki, kształtowniki, stożki ścięte o małym kącie wierzchołkowym i płyty pofalowane, można przyjąć rozwiązanie łączenia rdzenia z okładziną, które przedstawiono na rysunku 24. Nie wymagają też inicjatora niszczenia elementy energochłonne powstałe w wyniku połączenia rurki ze sferą lub stożka ściętego ze sferą, przedstawionych na rysunku 25.



Rys. 24. Schemat połączenia rdzenia w postaci rurki z okładzinami

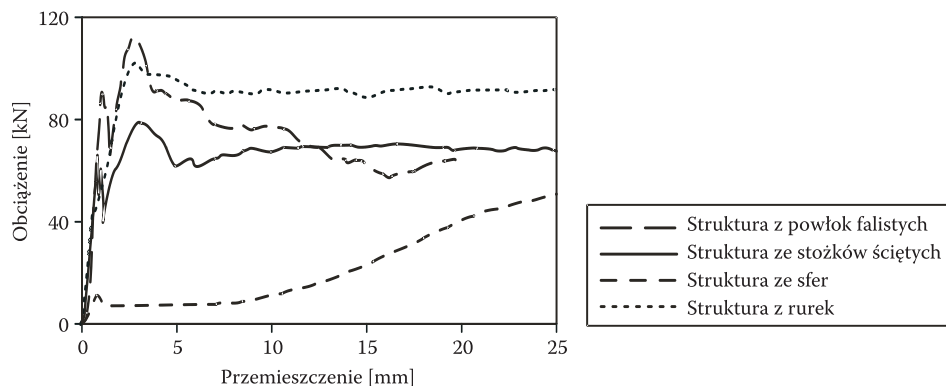


Rys. 25. Elementy powstałe z połączenia rurki i ściętego stożka ze sferą

5. Podsumowanie

Wyniki badań elementów w postaci rurek, stożków ściętych, sfer i powłok falistych przedstawione na rysunku 26, wykazują różne przebiegi P- Δ . Siła niszcząca podczas próby sfery, wraz ze wzrostem przemieszczenia rośnie, a jej wzrost wynika z mechanizmu niszczenia. Przebieg zależności P- Δ elementów w postaci sfer powo-

duże znaczne zmniejszenie piku przyspieszenia podczas uderzenia. Przedstawione na rysunku 26 zależności dla różnych kształtów próbek miały różną grubość ścianki, dlatego nie można porównywać wartości sił niszczących.



Rys. 26. Porównanie zależności P- Δ dla różnych struktur wykonanych z maty S/E

Zastosowanie w elementach inicjatorów niszczenia powoduje wzrost WEA. Badane elementy bez inicjatorów wykazują bardzo duży pik siły w pierwszej fazie niszczenia, który powoduje mikroniszczenie całej objętości elementu i dlatego w dalszej fazie niszczenia siła niszcząca jest znacznie mniejsza od siły progresywnej elementu z inicjatorem (rys. 13).

Badania fragmentów konstrukcji przekładkowej, w których jako rdzenie przyjęto po cztery rurki, stożki ścięte, powłoki faliste i sfery wykazały, że w przybliżeniu można przyjąć, że WEA fragmentu konstrukcji składającej się z czterech elementów jest nieznacznie mniejsza od sumy WEA otrzymanych z badań pojedynczych elementów. Najlepszą zdolność pochłaniania energii podczas badań wykazały płyty przekładkowe, z rdzeniem w postaci rurek wypełnionych tworzywem spienionym z inicjatorem.

W podsumowaniu mechanizmów niszczenia kompozytów warstwowych, w pracy [5] stwierdza się, że dominującą rolę w absorbowaniu energii mogą mieć mechanizmy niszczenia przez poprzeczne ścinanie, zginanie warstw i kruche pękanie. Główną rolę w sposobie niszczenia odgrywa mikromechanizm niszczenia, który zależy od rodzaju włókien i osnowy oraz orientacji włókien. W pracy [6] stwierdza się, że poprzeczne ścinanie absorbuje więcej energii od zginania warstw.

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

LITERATURA

- [1] A. O. BOLUKBASI, D. H. LAANANEN, *Analytical and experimental studies of crushing behavior in composite laminates*, Journal of Composite Materials, 29, (8), 1995, 1117-1139.

- [2] A. M. HARTE, N. A. FLECK, M. F. ASHBY, *Energy absorption of foam-filled circular tubes with braided composite walls*, European Journal of Mechanics, 19, (1), 2000, 31-50.
- [3] B. B. BASILY, E. A. ELSAYED, *Dynamic axial crushing of multi-layer core structures of folded chevron patterns*, IIE Annual Conference and Exhibition, 2004, 759.
- [4] B. P. DI PAOLO, J. G. TOM, *A study on an axial crush configuration response of thin-wall, steel box components: The quasi-static experiments*, International Journal of Solids and Structures, 43, (25-26), 2006, 7752-7775.
- [5] D. HULL, *Unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes*, Composites Science and Technology, 40, (4), 1991, 377-421.
- [6] G. L. FARLEY, *Effect of fiber and matrix maximum strain on the energy absorption of composite materials*, Journal of Composite Materials, 20, (4), 1986, 322-334.

R. GIELETA, T. NIEZGODA, S. OCHELSKI

Influence of crush initiator on energy absorption capability

Abstract. The paper presents experimental results of the crush initiator influence on the energy absorption capability in the energy absorbing elements used in sandwich structure cores. It was proved, in the carried out compression tests, that crush initiators assure progressive crush which affects the absorbed energy. Many kinds of initiators with different shapes of elements were investigated. It was found that spherical elements, sandwich structures, and truncated cones with the vertex angle greater than 20° require no crush initiators.

Keywords: mechanical properties, absorbed energy, polymer composites, experimental mechanics

Universal Decimal Classification: 539.3