

Aleksander Muc¹, Rafał Nogowczyk²

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji Maszyn, Zakład Konstrukcji Kompozytowych, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

FORMY ZNISZCZENIA KONSTRUKCJI SANDWICZOWYCH Z OKŁADZINAMI WYKONANYMI Z KOMPOZYTÓW

Konstrukcja sandwichowa składa się z okładzin (wykonanych z materiałów o dobrych właściwościach mechanicznych), oddzielonych od siebie przez rdzeń (wykonany z bardzo lekkich materiałów). W porównaniu z konstrukcją litą o takiej samej wadze konstrukcja sandwichowa charakteryzuje się podobną wytrzymałością na rozciąganie oraz znacznie większą wytrzymałością na zginanie. Naprężenia wywołane poprzez obciążenia błonowe są takie same w obydwu rodzajach konstrukcji, natomiast naprężenia wywołane przez moment zginający są znacznie mniejsze w przypadku konstrukcji sandwichowej. Dzięki znakomitej wytrzymałości na zginanie konstrukcje przekładkowe są obecnie powszechnie stosowane. Jednak konstrukcje te są narażone na różne formy zniszczenia. W niniejszym artykule omówimy cztery z nich: 1) ścinanie rdzenia (rys. 6), 2) delaminację (rys. 7), 3) globalne wyoboczenie, 4) lokalne wgłębienie powierzchni lub wyoboczenie pojedynczej komórki rdzenia (dotyczy tylko konstrukcji z rdzeniem o strukturze siatkowej).

Formy zniszczenia są uzależnione od szeregu elementów. Jako jedno z ważniejszych można wymienić materiał, z którego zostały wykonane okładziny oraz rdzeń. Ze względu na doskonałe właściwości materiały kompozytowe są często stosowane jako okładziny. Z kolei materiały, z których wykonywane są rdzenie, można podzielić na trzy grupy: 1) struktury jednorodne (rys. 2) - np. drewno balsa, 2) struktury siatkowe (rys. 3) - np. struktura plastra miodu, 3) struktury niejednorodne (rys. 4) - np. pianki. W artykule zaprezentujemy wybrane właściwości przykładowych materiałów kompozytowych (tab. 1) oraz właściwości wybranych pianek stosowanych do produkcji wypełniaczy (rys. 5). W konstrukcji z rdzeniem o strukturze siatkowej możemy zaobserwować jeszcze jedną formę zniszczenia - wgłębienie powierzchni lub wyoboczenie pojedynczej komórki. Jednakże w wielu konstrukcjach ta forma może być pomijana.

Niniejszy artykuł stanowi wstęp do dalszych rozważań na temat stosowania teorii 2-W lub 3-W do opisu konstrukcji sandwichowych. Efekty tych rozważań zostaną zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

Słowa kluczowe: konstrukcja sandwichowa, rdzeń, kryterium zniszczenia, materiał kompozytowy, delaminacja, ścinanie rdzenia

FAILURE MODES OF SANDWICH STRUCTURES WITH COMPOSITE FACES

Sandwich construction consists of two faces (made of materials with high mechanical properties), separated by a core (made of lightweight materials). Comparing a monocoque structure with sandwich structure having the same weight one can observe that both structures have similar extensional stiffness but the latter has much higher flexural stiffness. Stresses caused by in-plane loads are the same in both types but bending stresses are much lower in sandwich construction. Thanks to its excellent flexural stiffness sandwich structures with composite faces are commonly used in engineering constructions. However, they are vulnerable to more failure modes than monocoque structures. In the article we present four failure modes: 1) face wrinkling (Fig. 6), 2) core shear instability (Fig. 7), 3) overall buckling, 4) face dimpling or monocell buckling (only in sandwiches with honeycomb core).

The failure modes depend on many conditions. Among them are the material properties of which faces and core are made. Because of their extraordinary mechanical properties, composite materials are often used as faces. As a core, various materials are used. They can be divided into three groups: 1) homogeneous structure (Fig. 2) - i.e. balsa, 2) honeycomb structure (Fig. 3), 3) heterogeneous structure (Fig. 4) - i.e. foam.

In the paper we present properties of some composite materials (Table 1) and foam core materials (Fig. 5). In sandwich structure with honeycomb core fourth mode of failure (face dimpling or monocell buckling) can be observed. However, in many constructions it may be neglected. This paper is an introduction in order to consider whether sandwich constructions may be modeled using 2D or 3D theories. Results of further analysis¹ will be presented in subsequent papers.

Key words: sandwich construction, sandwich core, failure mode, composite, delamination, core shear instability

WPROWADZENIE

Cel pracy

W ostatnim okresie obserwuje się istotny wzrost zastosowań struktur sandwichowych w konstrukcjach inżynierskich. Wywołane jest to przede wszystkim niskim ciężarem struktury sandwichowej przy równocześnie bardzo dobrych właściwościach mechanicznych. Jed-

nakże sama struktura konstrukcji (wypełniacz i okładziny) powoduje, iż w zasadniczy sposób wzrasta liczba możliwych form zniszczenia takiej konstrukcji.

Celem niniejszej pracy jest:

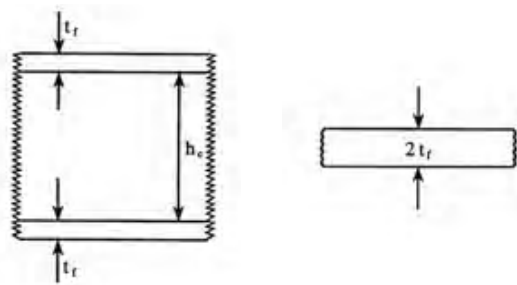
¹ prof. dr hab. inż., ² mgr inż.

- przedstawienie podstawowych struktur tworzących wypełniacz i okładzinę dla sandwicza,
- prezentacja możliwych form zniszczenia konstrukcji sandwiczowej.

Praca niniejsza traktowana jest jako wstęp do oceny, w jaki sposób i czy w ogóle możliwe jest dokładne opisanie form zniszczenia typowych konstrukcji sandwiczowych, jakimi są płyty i panele cylindryczne, za pomocą języka symbolicznego Mathematica. Poprzez porównanie z wynikami otrzymanymi przy użyciu pakietu MES zostanie dokonana ocena dokładności rozwiązań.

Charakterystyka właściwości mechanicznych konstrukcji sandwiczowych

Konstrukcja sandwiczowa składa się z okładzin i wypełniacza, zwanego rdzeniem. Okładziny wykonuje się z materiałów charakteryzujących się dobrymi właściwościami mechanicznymi - np. materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej, a wypełniacz tworzą bardzo lekkie tworzywa o niskich właściwościach mechanicznych (szczególnie istotna jest niska wartość modułu Kirchhoffa poprzecznego ścinania). Okładziny mają za zadanie przenosić główne obciążenia rozciągające lub ściskające (w ten sposób realizowane jest również przenoszenie momentów zginających), a rdzeń przenosi głównie obciążenia poprzeczne. Wypełniacz spełnia w konstrukcji różnorodne funkcje: oddziela od siebie okładziny, zwiększa sztywność konstrukcji w przypadku cienkich okładzin, poprawia właściwości tłumiące i w istotny sposób zmniejsza ciężar konstrukcji przy identycznych jak dla konstrukcji litej właściwościach wytrzymałościowych [1].



Rys. 1. Geometria konstrukcji sandwiczowej i litej

Fig. 1. Sandwich construction and monocoque construction

W przeprowadzonych rozważaniach zakładamy, że zarówno materiały okładziny, jak i rdzenia są liniowo sprężyste, a rdzeń jest jednorodny. W porównaniu z okładzinami rdzeń charakteryzuje się dużą podatnością, zapewniając jednocześnie stały odstęp pomiędzy okładzinami. Siły styczne oraz momenty są przenoszone wyłącznie przez okładziny, jedynie siły ścinające są przenoszone przez rdzeń. Ponadto należy przyjąć, że ugięcie wszystkich warstw oraz przemieszczenie w kierunku normalnym jest identyczne [2].

W celu dokonania porównania właściwości mechanicznych struktury sandwiczowej i konstrukcji wykonanej z materiału jednorodnego obliczymy podstawowe parametry mechaniczne, jakimi są sztywność błonowa i giętą (rys. 1).

W przypadku materiałów izotropowych okładzin charakteryzujących się modułem Younga E_f sztywność błonowa (na rozciąganie) K wyraża się wzorem

$$K = 2E_f t_f / (1 - \nu_f^2) \quad (1)$$

gdzie:

- ν_f - współczynnik Poissona materiału okładziny,
- E_f - moduł Younga materiału okładziny,
- t_f - grubość okładziny.

Zatem oba typy konstrukcji (sandwiczowa i lita) posiadają identyczną sztywność błonową.

Dla konstrukcji litej sztywność na zginanie wyraża się wzorem

$$D_{lit} = \frac{E_f (2t_f)^3}{12(1 - \nu_f^2)} = \frac{2E_f t_f^3}{3(1 - \nu_f^2)} \quad (2)$$

a dla konstrukcji sandwiczowej

$$D_{sand} = \frac{2E_f t_f (h_c / 2)^2}{(1 - \nu_f^2)} = \frac{E_f t_f h_c^2}{2(1 - \nu_f^2)} \quad (3)$$

gdzie h_c - grubość rdzenia.

W konstrukcjach sandwiczowych zawsze zakłada się, iż $t_f/h_c \ll 1$.

Stosunek sztywności na zginanie konstrukcji sandwiczowej do sztywności na zginanie konstrukcji litej wynosi więc

$$\frac{D_{sand}}{D_{lit}} = \frac{3}{4} \left(\frac{h_c}{t_f} \right)^2 \quad (4)$$

Zatem np. gdy $t_f/h_c = 1/20$, to sztywność na zginanie konstrukcji sandwiczowej jest 300-krotnie wyższa niż sztywność konstrukcji litej.

W przypadku porównania konstrukcji obciążonych siłą osiową N

$$\sigma_f = \frac{N}{2t_f} \quad (5)$$

naprężenia błonowe są identyczne dla obu przypadków.

Jeżeli obciążymy konstrukcję litą momentem zginającym M , to otrzymamy wartości naprężeń

$$\sigma_{lit} = \pm \frac{6M}{(2t_f)^2} = \pm \frac{3M}{2t_f^2} \quad (6)$$

a dla konstrukcji sandwichowej

$$\sigma_{sand} = \pm \frac{M}{t_f h_c} \quad (7)$$

Zatem stosunek naprężeń wynosi

$$\frac{\sigma_{sand}}{\sigma_{lit}} = \frac{2t_f}{3h_c} \quad (8)$$

Gdy $t_f/h_c = 1/20$, to naprężenia giętne konstrukcji sandwichowej są 30-krotnie mniejsze niż w przypadku konstrukcji litej.

RODZAJE MATERIAŁÓW STOSOWANE W KONSTRUKCJACH SANDWICZOWYCH

Bardzo istotny wpływ na właściwości konstrukcji mają materiały, z których został wykonany rdzeń oraz okładziny. Rdzenie pierwszych konstrukcji sandwichowych były wykonywane z materiałów organicznych, takich jak drewno korkowe czy balsa [3]. Jednak ze względu na to, że są to materiały naturalne, nie była możliwa ich produkcja na skalę masową. Koszt wykonania konstrukcji był zbyt wysoki.

Obecnie balsa również znajduje zastosowanie jako rdzeń konstrukcji sandwichowych, ale znacznie częściej stosowane są materiały syntetyczne, takie jak np. pianki czy rdzenie komórkowe. Łatwość produkcji i niska cena tych materiałów pozwoliły na znaczne obniżenie kosztów gotowych konstrukcji.

Możemy wyróżnić trzy rodzaje typowych materiałów używanych do produkcji rdzeni:

1. struktury jednorodne - np. balsa (rys. 2),
2. struktury siatkowe (komórkowe) - np. struktura plastra miodu (rys. 3),
3. struktury niejednorodne - np. pianki (rys. 4).

Struktury siatkowe mają zastosowanie w najbardziej obciążonych konstrukcjach. Mogą być produkowane z różnych materiałów, np. aluminium, tworzyw sztucznych itp. Charakteryzują się właściwościami anizotropowymi. Ponadto są łatwe zarówno w wytwarzaniu, jak i w obróbce [3].

Struktury niejednorodne są najlżejszymi i najtańszymi rodzajami rdzeni. Do ich produkcji stosuje się pianki PCV i pianki poliuretanowe. Podobnie jak w przypadku struktur siatkowych, łatwo się je wytwarza oraz obrabia.



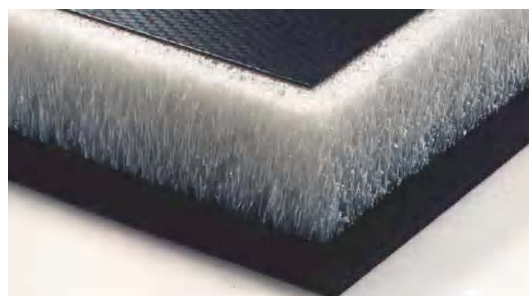
Rys. 2. Przykład rdzenia wykonanego z balsy [4]

Fig. 2. An example of balsa core



Rys. 3. Przykład struktury siatkowej [5]

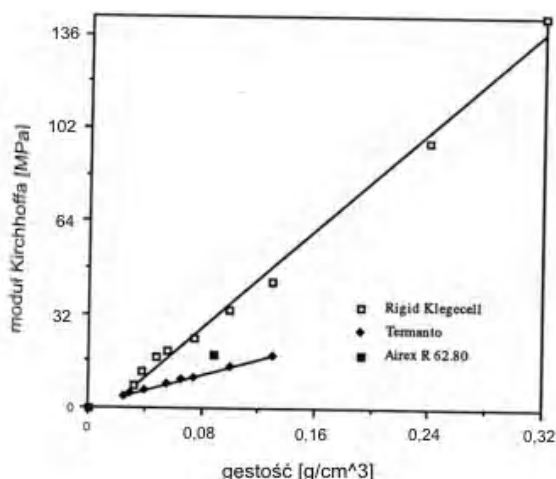
Fig. 3. An example of honeycomb core



Rys. 4. Przykład rdzenia piankowego [6]

Fig. 4. An example of foam core

Właściwości mechaniczne rdzenia o strukturze niejednorodnej zależą przede wszystkim od gęstości zastosowanego tworzywa. Na rysunku 5 przedstawiono zależność modułu Kirchhoffa pianki od jej gęstości dla trzech różnych tworzyw [1]. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, że moduł Kirchhoffa dla pianek wzrasta liniowo wraz ze wzrostem gęstości.



Rys. 5. Wykres zależności modułu Kirchhoffa od gęstości wypełniacza [1]

Fig. 5. Function diagram of Kirchhoff modulus vs. core density

W przypadku wypełniaczy o strukturze siatkowej właściwości mechaniczne zależą zarówno od materiału użytego do jego produkcji, jak i od struktury wypełnia-

cza. Ponadto na właściwości mechaniczne konstrukcji sandwiczowej wpływ ma rodzaj materiału zastosowanego na okładziny. W tabeli 1 przedstawiono wybrane właściwości mechaniczne materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej.

TABELA 1. Porównanie właściwości mechanicznych wybranych materiałów kompozytowych [7]
TABLE 1. Comparing of composite properties

Materiał	Moduł Younga E_1 , GPa	Moduł Younga E_2 , GPa	Moduł Kirchhoffa G_{12} , GPa	Gęstość g/m^3
szkło E	16,8	16,8	3,35	2,715
bor	204	18,5	5,59	2,76
kevlar 49	76	5,5	2,3	1,45
węgiel	74	74	4,55	1,80

FORMY ZNISZCZENIA KONSTRUKCJI SANDWICZOWYCH

Konstrukcje sandwiczowe pomimo wielu istotnych zalet w porównaniu z analogicznymi konstrukcjami jednorodnymi mają także wiele wad, z których jako najistotniejszą można wymienić mnogość i różnorodność form zniszczenia. Konstrukcja sandwiczowa może ulec zniszczeniu poprzez: 1) globalne wyboczenie konstrukcji, 2) delaminację połączoną z lokalnym wyboczeniem okładzin, 3) ścinanie rdzenia, 4) lokalne wgłębienie powierzchni lub wyboczenie pojedynczej komórki (dotyczy tylko konstrukcji z rdzeniem o strukturze siatkowej). Najbardziej istotną kwestią jest możliwość wyznaczenia w sposób dokładny wartości naprężeń krytycznych prowadzących do zniszczenia konstrukcji. Kwestią zasadniczą jest w tym przypadku problem opisu konstrukcji, tzn. poprzez relacje 2-W (stosowane do struktur cienkościennych, takich jak: belki, płyty, powłoki) lub też relacje 3-W. Istotne jest przede wszystkim, w jakim stopniu relacje 2-W opisują w sposób dokładny rozkłady naprężeń poprzecznego ścinania występujące w rdzeniu sandwicza. W celu uzyskania poprawnych rozkładów konieczne jest zastosowanie teorii płyt lub powłok wyższych rzędów [8]. Analiza teoretyczna i doświadczalna wykazuje, iż stosowanie teorii wyższych rzędów obniża wartości obciążeń krytycznych odpowiadających globalnemu wyboczeniu konstrukcji w porównaniu z teorią Love'a-Kirchhoffa. Podobnie do opisu lokalnego wyboczenia okładzin dokładniejsze wyniki uzyskuje się poprzez zastosowanie teorii 2-W wyższych rzędów.

Dyskusja i porównanie wyników otrzymanych w analizie globalnego wyboczenia struktur sandwiczowych zostanie przedstawiona w dalszych pracach. Problematyka ta wymaga bowiem oceny, czy należy zastosować podejście geometrycznie liniowe lub nieliniowe, opis 3-W lub 2-W w ujęciu teorii Love'a-Kirchhoffa,

poprzecznego ścinania pierwszego rzędu lub poprzecznego ścinania wyższych rzędów.

Zniszczenie poprzez delaminację oraz ścinanie rdzenia

Poniżej omówimy jedynie wzory przybliżone stosowane do opisu zniszczenia poprzez delaminację oraz ścinanie rdzenia sandwicza. Ze względu na to, że zarówno delaminacja, jak i ścinanie rdzenia to defekty lokalne, wzory te mogą być stosowane w przypadku płyt, paneli oraz powłok cylindrycznych. Należy tu jednak zaznaczyć, że duży wpływ na własności mechaniczne konstrukcji ma rodzaj zastosowanego wypełniacza.

Naprężenia krytyczne służące do opisu poszczególnych form zniszczenia można obliczyć ze wzorów:

$$1. \text{ Ścinanie rdzenia } \sigma_{kr} = \left[\frac{2t_f E_c E_f}{3h_c (1-\nu_f^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$



Rys. 6. Ścinanie rdzenia [1]

Fig. 6. Face wrinkling [1]

$$2. \text{ Delaminacja } \sigma_{kr} = \frac{G_c h_c}{2t_f} \quad (10)$$

gdzie:

E_c - moduł Younga materiału rdzenia,

G_c - moduł Kirchhoffa materiału rdzenia.

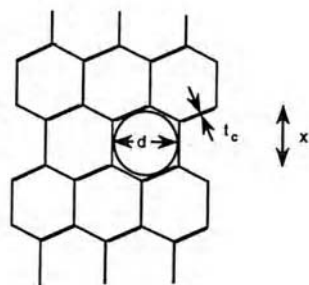


Rys. 7. Delaminacja z lokalnym wyboczeniem [1]

Fig. 7. Core shear instability with buckling [1]

Formy zniszczenia konstrukcji z rdzeniem o strukturze siatkowej

W przypadku wypełniaczy o strukturze siatkowej znaczenie ma również wymiar komórki.



Rys. 8. Struktura plastra miodu [1]

Fig. 8. Honeycomb structure [1]

Ponieważ rdzeń o strukturze siatkowej nie jest materiałem o strukturze jednorodnej, należy obliczyć dla niego zastępcze stałe materiałowe, które z pewnym przybliżeniem pozwolą traktować go jako materiał jednorodny. Do opisu zniszczenia konstrukcji sandwichowej z rdzeniem o strukturze siatkowej stosujemy zastępcze stałe materiałowe (11)-(14), zaproponowane w pracy [1]. Jak można zauważyć, wielkości te są wielkościami empirycznymi bazującymi na podstawowych stałych komórki, jakimi są jej średnica i grubość (rys. 8).

Znając przedstawione na powyższym rysunku wartości, tj. d i t_c , oraz stałe materiałowe materiału użytego do produkcji rdzenia (gęstość ρ_c , moduł Kirchhoffa G_c oraz moduł Younga E_c), zastępcze stałe materiałowe dla wypełniacza obliczamy ze wzorów:

$$\rho'_c = k_2(t_c/d)\rho_c \tag{11}$$

$$G'_{cx} = k_3(t_c/d)G_c \tag{12}$$

$$G'_{cy} = k_4(t_c/d)G_c \tag{13}$$

$$E'_c = k_2(t_c/d)E_c \tag{14}$$

gdzie k_2, k_3, k_4 to odpowiednie współczynniki, mające różne wartości w zależności od struktury wypełniacza (np. sześciokątnej lub kwadratowej).

Współczynniki k_2, k_3, k_4 zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Współczynniki k_2, k_3, k_4 dla wypełniaczy siatkowych [1]

TABLE 2. Values of k_2, k_3, k_4 for honeycomb structures

Rodzaj wypełniacza	k_2	k_3	k_4
komórka sześciokątna (wg Keachele)	8/3	5/3	1
komórka sześciokątna (wg MIL HDBK-23)	8/3	4/3	8/15
komórka kwadratowa (wg Keachele)	2	1	1
komórka kwadratowa (wg MIL HDBK-23)	2	1	1

W przypadku konstrukcji z rdzeniem o strukturze siatkowej do opisu ścinania rdzenia oraz delaminacji stosujemy wzory (9) i (10), jednak stałe materiałowe wypełniacza zostają zamienione poprzez wielkości za-

stępnie wyznaczone wzorami (11)-(14) według schematu: $E_c \rightarrow E'_c$ itp.

Zniszczenie komórki elementarnej wypełniacza o strukturze siatkowej

Dla konstrukcji z rdzeniem siatkowym jedną z możliwych form zniszczenia jest uszkodzenie samej siatki

wypełniacza (nie w wyniku ścinania omawianego poprzednio). Należy zatem wprowadzić czwarte kryterium zniszczenia, charakteryzujące lokalne wgłębienie powierzchni lub wyboczenie pojedynczej komórki rdzenia. Naprężenie krytyczne dla tego kryterium możemy obliczyć ze wzoru [1]

$$\sigma_{kr} = \frac{2E_f}{(1-\nu_f^2)} \left(\frac{t_f}{d} \right)^2 \tag{15}$$

W powyższym wzorze można zauważyć, iż naprężenie krytyczne zależne jest tylko od wymiaru komórki elementarnej (d) oraz właściwości mechanicznych i geometrycznych okładzin, a nie zależy od właściwości mechanicznych rdzenia. W przypadku niektórych konstrukcji defekt ten jest nieistotny.

UWAGI KOŃCOWE

W pracy zwrócono uwagę na mnogość form zniszczenia występujących dla konstrukcji sandwichowych. Zarysowano także problemy występujące w zagadnieniach modelowania form zniszczenia dla tych konstrukcji. Są to jak na razie rozważania wstępne mające ostatecznie prowadzić do wyjaśnienia, czy w konstrukcjach sandwichowych wystarczające jest modelowanie przy użyciu teorii 2-W lub czy jest konieczne zastosowanie pełnych relacji 3-W. Wyniki tych rozważań będą zaprezentowane w dalszych pracach.

LITERATURA

[1] Vinson J.R., The Behaviour of Shells Composed of Isotropic and Composite Materials, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1993.
 [2] Hop T., Konstrukcje warstwowe, Arkady, Warszawa 1990.
 [3] Romanów F., Wytrzymałość konstrukcji warstwowych, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze, Zielona Góra 1995.
 [4] web.ew.usna.edu
 [5] www.versacoreindustrial.com
 [6] Materiały reklamowe Advanced Composite Systems.
 [7] Muc A., Projektowanie kompozytowych zbiorników ciśnieniowych, Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
 [8] Muc A., Mechanika kompozytów włóknistych, Księgarnia Akademicka, Kraków 2003.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński