

**Dr inż. Hubert Dębski**

Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska  
ul.Nadbystrzycka 36, 20-816 Lublin, Polska  
E-mail: h.debski@pollub.pl

## **Eksperymentalno-numeryczne badania pokrytycznych zachowań kompozytowych kolumn o przekroju omegowym**

**Streszczenie:** Przedmiotem badań jest cienkościenna belka wykonana z kompozytu węglowo-epoksydowego o przekroju otwartym. Zastosowanym materiałem był kompozyt o osnowie żywicy epoksydowej wzmacniany włóknami węglowymi systemu HexPly M12 (Hexcel). System M12 wykorzystywany jest przede wszystkim w strukturach lotniczych i charakteryzuje się wysoką trwałością zmęczeniową oraz dobrymi właściwościami eksploatacyjnymi, przy stosunkowo niskim ciężarze własnym. Badania prowadzono w zakresie obliczeń numerycznych z wykorzystaniem MES oraz badań eksperymentalnych w stanie krytycznym i pokrytycznym. W prowadzonych badaniach do oceny stopnia wyężenia kompozytu wykorzystano kryterium tensorowe Tsai-Wu. Zastosowanym narzędziem numerycznym był program ABAQUS.

**Słowa kluczowe:** *modelowanie numeryczne, cienkościenne struktury, analiza MES, materiały kompozytowe, badania eksperymentalne*

### **1. Wprowadzenie**

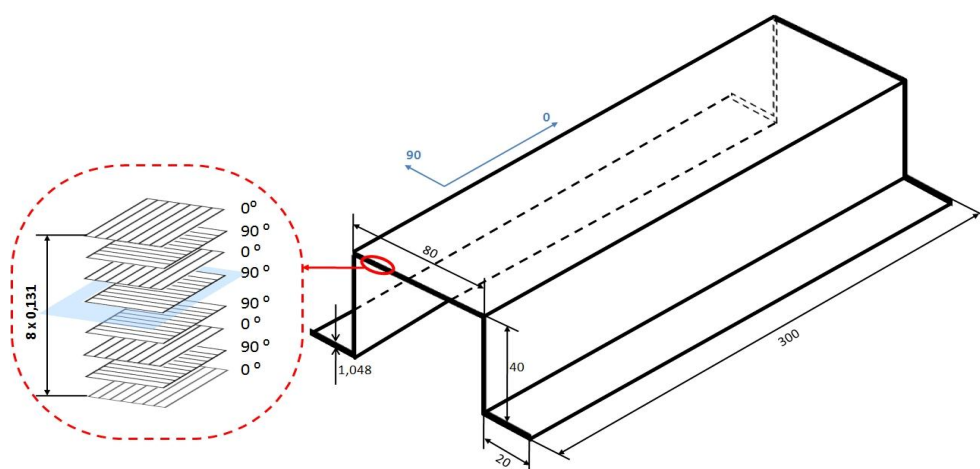
Konstrukcje cienkościenne należą do kategorii ustrojów nośnych o szerokim zastosowaniu w wielu dziedzinach współczesnej techniki. Przykład ich zastosowań mogą stanowić m.in. konstrukcje lotnicze, w stosunku do których stawiane są wysokie wymagania zarówno sztywnościowe, jak i wytrzymałościowe w warunkach obciążeń eksploatacyjnych, przy jednoczesnym dążeniu do minimalizacji masy ustroju. Jednym z podstawowych problemów związanych z projektowaniem konstrukcji cienkościennych są zagadnienia związane z utratą stateczności i nośności elementów ustroju. W ostatnich latach w projektowaniu cienkościennych struktur nośnych obserwowany jest znaczny wzrost udziału nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych – kompozytów na rzecz tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych. Szeroko stosowaną grupą materiałów kompozytowych stanowią kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami: szklanymi, węglowymi oraz kevlarowymi. Zastosowanie tych materiałów warunkuje korzystny stosunek gęstości materiału kompozytowego do jego masy, jak również wysokie właściwości wytrzymałościowe oraz odporność na działanie czynników zewnętrznych. Dostępnych jest wiele prac dotyczących zagadnień stateczności oraz nośności konstrukcji cienkościennych [3,11-14,16,19,25], jednakże w przeważającej większości dotyczą one klasycznych materiałów konstrukcyjnych o właściwościach izotropowych. W ostatnich latach pojawiło się wiele publikacji opisujących właściwości kompozytów włóknistych – laminatów, jednakże w większości przypadków były to modele teoretyczne. Nadal brak jest wyczerpujących informacji dotyczących badań

eksperymentalnych kompozytów warstwowych wzmacnianych włóknami, co zainspirowało autora do podjęcia niniejszej problematyki.

W pracy prezentowane są wyniki badań doświadczalnych cienkościennych kompozytowych słupów o przekroju „omegowym” poddanych działaniu obciążenia ściskającego. Otrzymane z badań wyniki pozwolą na zweryfikowanie wyników otrzymywanych w modelach MES oraz za pomocą własnej metody analityczno-numerycznej opartej na teorii Koitera [10]. Badania doświadczalne obejmowały również wyznaczenie właściwości materiałowych, które wykorzystano w opracowanych modelach numerycznych. Takie podejście pozwoliło na bardziej wiarygodne porównywanie modeli rzeczywistych z numerycznymi, które zazwyczaj stanowią modele konstrukcji idealnych.

## 2. Przedmiot badań

Przedmiot badań stanowiły cienkościennie belki o przekroju „omegowym” wykonane z jednokierunkowej taśmy prepregowej systemu HexPly (Hexcel) kompozytu węglowo/epoksydowego o oznaczeniu M12/35%/UD134/AS7/300. Osnowę kompozytu stanowiła żywica epoksydowa (gęstość:  $1,24 \text{ g/cm}^3$ ;  $T_g$ :  $128^\circ\text{C}$ ;  $R_m$ :  $64\text{MPa}$ ;  $\nu$ :  $0,4$ ;  $E$ :  $5,1\text{GPa}$ ), natomiast wzmocnienie włókna węglowe AS7J12K (gęstość:  $2,5 \text{ g/cm}^3$ ;  $R_m$ :  $4830\text{MPa}$ ;  $\nu$ :  $0,269$ ;  $E$ :  $241\text{GPa}$ ). Nominalny udział objętościowy włókien zbrojących w kompozycie wynosił około 60%. Kompozyty wytworzono techniką autoklawową w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej [5,6,15]. Struktura laminatu złożona była z 8 warstw o jednakowej grubości wynoszącej  $0,131 \text{ mm}$  w symetrycznym układzie  $[0,90]_{2s}$ . Wymiary belki cienkościennej oraz strukturę kompozytu przedstawia rys.1.

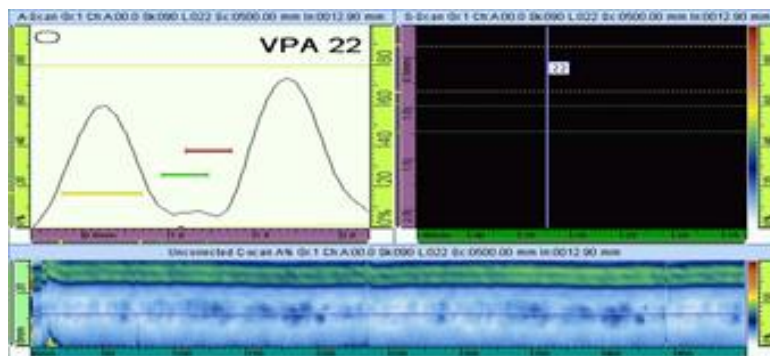


Rys.1 Wymiary słupa kompozytowego z konfiguracją warstw laminatu

Przedmiotowe słupy wykonano techniką autoklawową z wykorzystaniem pakietu podciśnieniowego wykonanego na specjalnej formie odwzorowującej kształt i wymiary wytwarzanych belek. Przygotowany szczelny pakiet zapewniający utrzymanie podciśnienia o wartości ok.  $-0,1 \text{ MPa}$  poddano procesowi polimeryzacji w autoklawie laboratoryjnym, zapewniając wymagany docisk poprzez wytworzenie dodatkowego nadciśnienia w autoklawie o wartości  $0,4 \text{ MPa}$ . W przypadku kompozytu węglowo/epoksydowego zastosowano temperaturę nagrzewania materiału  $135^\circ\text{C}$  w czasie ok.2 godzin, co zapewniło dokończenie procesu polimeryzacji pre-pregu. W celu wyeliminowania niekorzystnych zjawisk mogących występować w trakcie procesu wytwarzania (nadmierny wzrost naprężeń cieplnych w materiale oraz ograniczenie właściwej relaksacji naprężeń pierwotnych i

cieplnych) zastosowano precyzyjne sterowanie prędkością nagrzewania i chłodzenia wynoszącą 0,033 K/s.

Do oceny jakości wykonania struktury laminatu wykorzystano metody nieniszczące NDT oraz mikroskopię optyczną i mikrotomografię rentgenowską. Każdy wytworzony profil podlegał gruntownym badaniom, mającym na celu kontrolę jakości materiału pod kątem występowania ewentualnych wad w postaci porowatości oraz delaminacji. Przeprowadzono badanie jakości poszczególnych ścianek belki omegowej ultradźwiękową metodą echa z zastosowaniem techniki phased array [9] przy wykorzystaniu defektoskopu ultradźwiękowego OmniScan MXU-M z głowicą Olympus 5L64 A12 oraz opóźnieniem typu klin SA12-OL. Zastosowano następujące parametry próby: częstotliwość 5 MHz, prędkość rozchodzenia fali 3100 m/s oraz wzmocnienie 6-8 dB. W prowadzonych badaniach do kontroli jakości wytworzonych laminatów zastosowano obrazowanie A-scan (przetworzony wykres amplitud w czasie rzeczywistym) oraz C-scan (zbiór obrazów B-scan z wielu przetworników w czasie rzeczywistym). Zastosowane metody obrazowania umożliwiły jednoczesne wyznaczenie głębokości wady (A-scan) oraz głębokości położenia wady i szerokość wady w danym kierunku (C-scan). Powyższa procedura pozwala na lokalizację delaminacji oraz skupisk porowatości w strukturze kompozytu [7,18]. Przeprowadzona diagnoza stanu nie ujawniła nieciągłości w strukturze wytworzonych elementów. Otrzymano równomierny poziom odbić wejścia i echa od dna (A-scan) oraz jednorodny obraz typu C-scan. B-scan został wyeliminowany z uwagi przez obniżenie zakresu obserwacji do wartości wykraczających poza możliwości typu B-scan (cienkościenny element) na korzyść dokładności oceny modułem C-scan. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.2.



Rys. 2 Ocena jakości struktury z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych (NDT)

Ponadto do oceny jakości laminatu zastosowano badania mikrostrukturalne z wykorzystaniem mikroskopii optycznej (Nikon MA200, Japan) opartej na komputerowej analizie obrazu (Image Pro Plus, NIS-Elements) oraz mikrotomografii rentgenowskiej (mikrotomograf SkyScan 1174). W szczególności sprawdzano jakość promieni zaokrąglenia profilu ceownika, jako miejsc szczególnie narażonych na występowanie nieciągłości w postaci delaminacji międzywarstwowych. Obserwacje strukturalne oraz badania nieniszczące potwierdziły bardzo dobrą jakość materiałów, przede wszystkim pod względem nieciągłości strukturalnych (porowatości wewnętrznej, delaminacji). Zastosowanie techniki wytwarzania kompozytów w autoklawie umożliwiło uzyskanie struktury posiadającej wysokie właściwości mechaniczne potwierdzone przeprowadzonymi badaniami wytrzymałościowymi oraz minimalną ilość porowatości <1%, a także zapewniło powtarzalność procesu wytwarzania.

W celu wyznaczenia właściwości mechanicznych wytwarzanych laminatów przeprowadzono badania wytrzymałościowe wg normy ISO. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100/SN3A o klasie dokładności 1 w temperaturze otoczenia

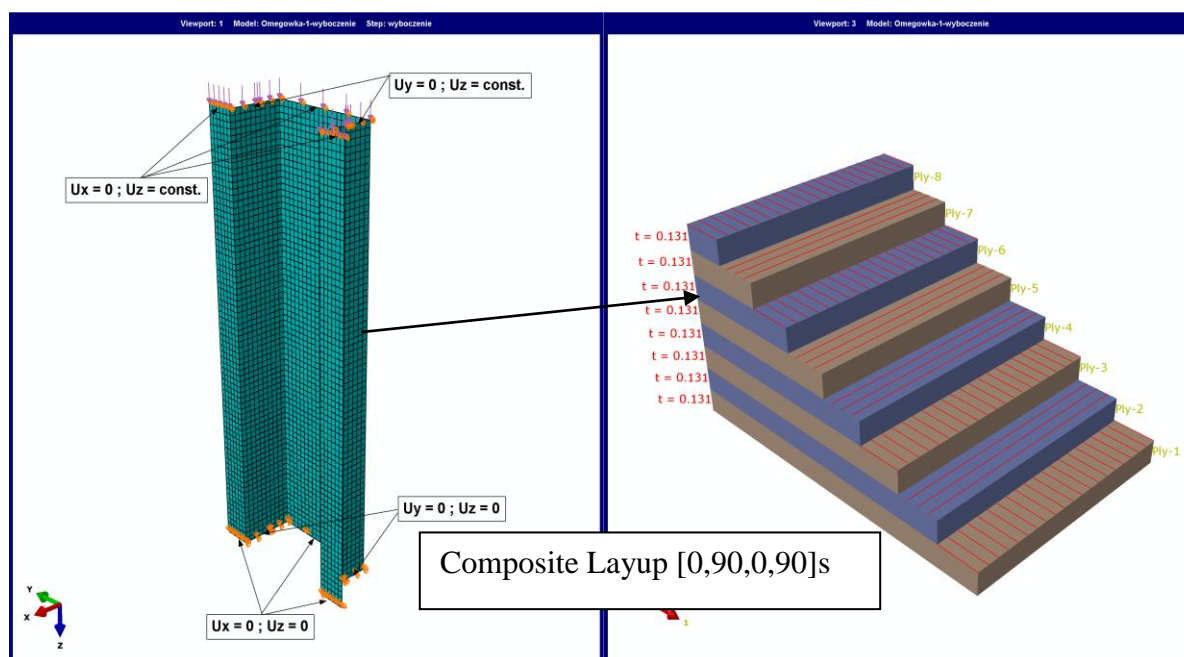
(RT). Na przygotowane próbki naklejono tensometry (VISHAY EA-13-24022-120), natomiast pomiar odkształceń przeprowadzony był z wykorzystaniem systemu pomiarowego MGCplus (Hottinger). Prędkość ruchu trawersy wynosiła 2 mm/min. Wyznaczone eksperymentalnie podstawowe właściwości mechaniczne kompozytu węglowo/epoksydowego zestawiono w tabeli 1. Otrzymane wartości wykorzystane zostały do definicji modelu materiałowego w obliczeniach numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne kompozytu węglowo/epoksydowego

Wytrzymałość na rozciąganie $F_{TU}$ [MPa]		Moduł na rozciąganie $E_T$ [GPa]		Liczba Poissona $\nu$		Wytrzymałość na ścinanie $F_{SU}$ [MPa]	Moduł na ścinanie $G$ [GPa]	Wytrzymałość na ściskanie $F_{CU}$ [MPa]	
0°	90°	0°	90°	0°	90°	±45°	±45°	0°	90°
1867,2	25,97	130,71	6,36	0,32	0,02	100,15	4,18	1531	214

### 3. Obliczenia numeryczne

Dyskretyzację belki cienkościennej oparto na czterowęzłowych elementach powłokowych ze zredukowanym całkowaniem typu S4R-Abaqus oraz elementach ośmiowęzłowych Shell99-Ansys, posiadających po 6 stopni swobody w każdym węźle. Są to cienkościenne elementy powłokowe w których odkształcenia odpowiadające stanowi błonowemu określone są na podstawie przemieszczeń liniowych, natomiast odkształcenia stanu giętnego opisane są na podstawie przemieszczeń kątowych. Do zamodelowania struktury laminatu wykorzystano technikę modelowania *Layup-Ply*, przy pomocy której odwzorowano konfigurację warstw kompozytu w układzie symetrycznym  $[0,90,0,90]_s$  – rys.3.



Rys. 3 Model dyskretny belki kompozytowej

Warunki brzegowe modelu numerycznego odwzorowujące przegubowe podparcie końców belki zdefiniowano poprzez zablokowanie kinematycznych stopni swobody węzłów znajdujących się na krawędziach przekrojów końcowych belki. Obciążenie modelu zrealizowano poprzez równomierne obciążenie krawędzi górnego przekroju belki siłą osiową – rys.3.

Właściwości materiału kompozytowego opisano definiując model materiału ortotropowego w płaskim stanie naprężenia, umożliwiającemu opis własności laminatu na poszczególnych kierunkach, związanych z kierunkiem ułożenia włókien [23] – tabela1. Obliczenia numeryczne w ujęciu MES prowadzono w dwóch etapach. Rozwiązano liniowe zagadnienie stateczności (stan krytyczny) wyznaczając obciążenie krytyczne oraz formę utraty stateczności struktury. Weryfikację otrzymanych wyników przeprowadzono z wykorzystaniem metody analityczno-numerycznej [11], opartej na ogólnej asymptotycznej teorii stateczności układów konserwatywnych Koitera [10]. Obliczenia konstrukcji w stanie pokrytycznym stanowiły statyczną analizę nieliniową z zainicjonowanymi imperfekcjami o wartości 0.05 grubości ścianki profilu omegowego, odpowiadającymi pierwszej formie utraty stateczności belki. Analizę stanu pokrytycznego z uwzględnieniem zagadnienia geometrycznie nieliniowego w programie Abaqus [1] prowadzono z wykorzystaniem przyrostowo-iteracyjnej metody Newtona-Raphsona, natomiast obliczenia polegające na śledzeniu pokrytycznej ścieżki równowagi z wykorzystaniem procedury arc-length (metoda Ricksa) przeprowadzono w programie Ansys [2]. Zakres obliczeń numerycznych obejmował również próbę oszacowania możliwości wystąpienia uszkodzenia materiału kompozytowego w stanie pokrytycznym wg kryterium Tsai-Wu [26]. Wymagało to określenia dodatkowych parametrów badanego materiału, takich jak:  $F_{TU}$  – wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien  $0^0$  i kierunku prostopadłym do włókien  $90^0$ ,  $F_{CU}$  – wytrzymałość na ściskanie w obydwu kierunkach  $0^0$  i  $90^0$  oraz  $F_{SU}$  – wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie warstwy  $\pm 45^0$ , które zostały wyznaczone w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych – tabela1.

#### **4. Badania eksperymentalne**

Badania doświadczalne ściskanych słupów o przekroju ceowym prowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick model Z100/SN3A o klasie dokładności 1 i zakresie pomiarowym do 100 kN. Na maszynie wytrzymałościowej zamocowano specjalnie zaprojektowane uchwyty, które zapewniają osiowe ściskanie próbki - rys.4. Uchwyty osiowano na sworzniach maszyny wytrzymałościowej. Przegub kulisty w uchwycie zapewniał swobodę obrotu uchwytów względem maszyny wytrzymałościowej. Niewielkie niedokładności wykonania przekrojów końcowych belek oraz możliwość wystąpienia lokalnych efektów w przekrojach brzegowych słupów kompensowano poprzez zastosowanie wkładek wykonanych w postaci cienkich płyt z miękkiego tworzywa sztucznego. Przed każdą próbą wstępnie obciążano układ siłą do 15% oczekiwanego obciążenia krytycznego w celu zapewnienia właściwego ułożenia się belki w uchwytach, po czym usuwano elementy ustalające i odciażano próbkę do 0. Na powierzchni próbki w miejscu największych ugięć średnika po obu stronach naklejono dwa tensometry oporowe firmy Vishay w kierunku  $0^0$ . Dodatkowo ugięcia mierzono czujnikiem laserowym optoNCDT 1605 w punkcie największych ugięć średnika lub ramienia.



Rys. 4 Stanowisko do badań eksperymentalnych

W czasie pomiarów rejestrowano: czas trwania pomiaru, siłę ściskającą próbkę, przemieszczanie trawersy, ugięcie (czujnik laserowy) i odkształcenia (tensometry). Badania prowadzono w warunkach normalnych w temperaturze 23°C ze stałą prędkością przemieszczenia trawersy równą 1mm/min. W czasie próby rejestrowano wskazania wszystkich czujników z częstotliwością 1Hz. Próby prowadzono do momentu, gdy obciążenie osiągało wartość równą ok. podwojonej wartości siły krytycznej. Badania obejmowały rejestrację stanu dokrytycznego, krytycznego i zakrytycznego, przy czym w całym zakresie prowadzonych badań nie zaobserwowano żadnych objawów mogących inicjować proces zniszczenia struktury.

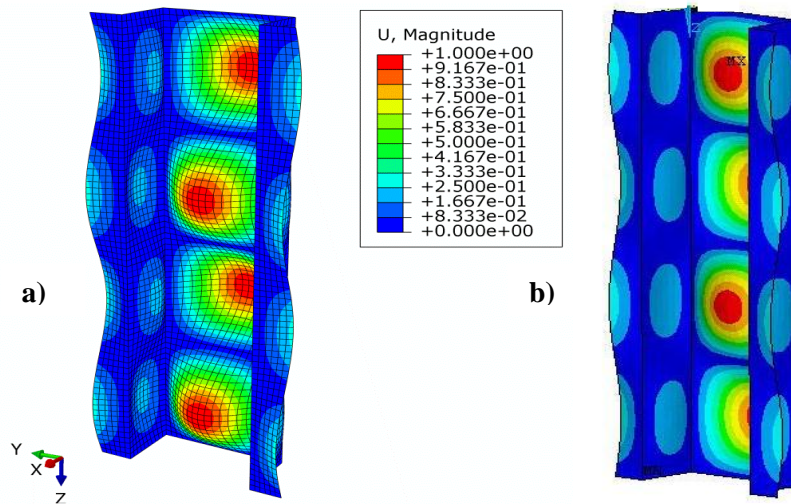
W prowadzonych badaniach doświadczalnych do oceny wartości sił krytycznych zastosowano następujące metody [8,20,21,22,24,27,28]:

- a) metoda stycznej pionowej (metoda odkształceń średnich) – oznaczona K1,
- b) metoda przecięcia prostych na wykresie odkształceń średnich – oznaczona K2,
- c) metoda  $P-w^2$  – oznaczona K3,
- d) metoda punktu przegięcia – oznaczona K4,
- e) metoda Tereszowskiego – oznaczona K5,
- f) metoda Koitera – oznaczona K6.

Badania eksperymentalne prowadzono na 3 próbkach, dla każdej próbki wykonywano 3 pomiary.

## 5. Wyniki badań

Analiza stanu krytycznego ściskanej belki cienkościennej wykazała lokalną formę utraty stateczności, przejawiającą się powstaniem 4 półfal na wszystkich ściankach profilu – rys.5. Dla wszystkich zastosowanych w badaniach narzędzi obliczeniowych (metoda MES, metoda analityczno-numeryczna) otrzymano zgodność jakościową i ilościową wyników obliczeń.



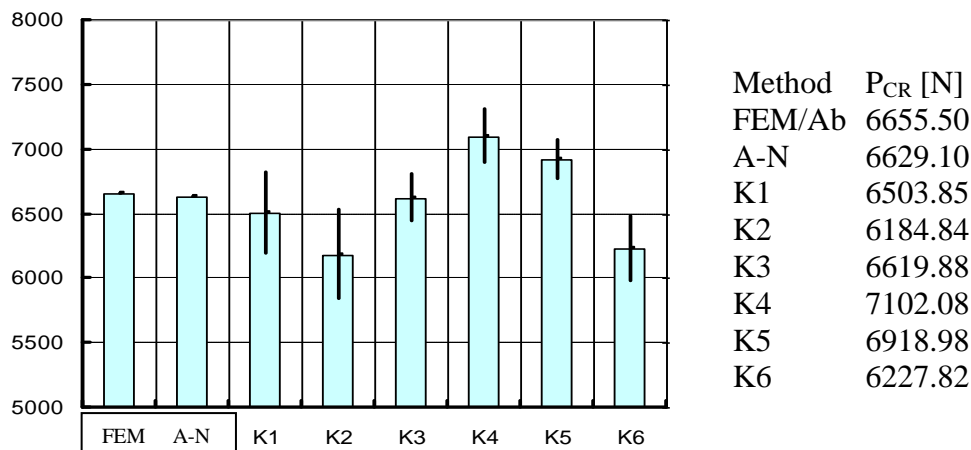
Rys. 5 Pierwsza postać wyboczenia belki: a) wyniki Abaqus; b) wyniki Ansys

Wartości uzyskanych sił krytycznych dla poszczególnych metod zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości obciążenia krytycznego dla pierwszej postaci wyboczenia

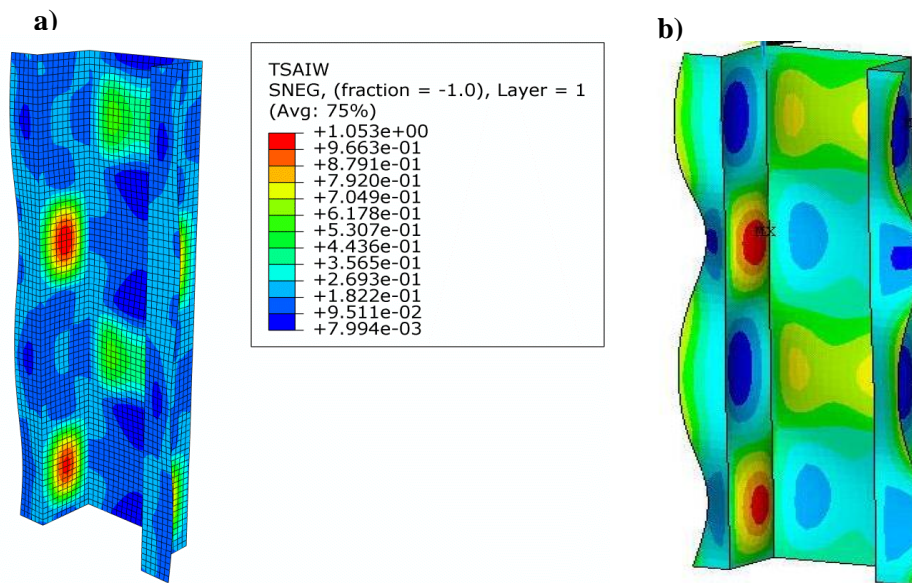
Narzędzie obliczeniowe	Abaqus (MES)	Ansys (MES)	Metoda analityczno – numeryczna (A-N)
Siła krytyczna [N]	$P_{CR/Ab} = 6655$ [N]	$P_{CR/As} = 6565$ [N]	$P_{CR} = 6629$ [N]
Liczba półfal	4	4	4

Wyniki badań eksperymentalnych dla stanu krytycznego przedstawiono w formie wykresów siła-metoda badawcza otrzymanych ze wszystkich pomiarów wykonanych jedną metodą wraz z przedziałem ufności – rys.6.



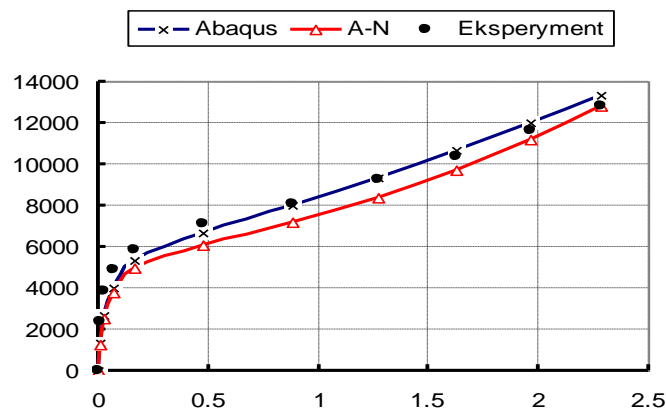
Rys. 6 Porównanie wartości sił krytycznych  $P_{CR}$  [N] wyznaczonych różnymi metodami

Obliczenia nieliniowe umożliwiły analizę formy deformacji ustroju w stanie pokrytycznym, do wartości obciążenia odpowiadającej zniszczeniu struktury laminatu, określonego z wykorzystaniem kryterium Tsai-Wu. Wartość obciążenia niszczącego dla materiału laminatu przyjęto jako wartość siły odpowiadającej osiągnięciu parametru zniszczenia wynoszącego 1 (w skali 0-1). Określone w ten sposób wartości siły niszczącej za pomocą programów Abaqus i Ansys wynoszą odpowiednio  $P_{f/Ab} = 18.6 \text{ kN}$  i  $P_{f/An} = 17.1 \text{ kN}$ , co stanowi odpowiednio 280% i 260% wartości sił krytycznych  $P_{CR/Ab}$  i  $P_{CR/An}$ . Strefy w których osiągnięto krytyczną wartość parametru zniszczenia określają obszary newralgiczne ustroju, dla których istnieje duże prawdopodobieństwo uszkodzenia w tym miejscu niektórych warstw laminatu [4]. Formę deformacji pokrytycznej z naniesionymi mapami kryterium Tsai-Wu dla górnej powierzchni zewnętrznej warstwy laminatu otrzymane w programie Abaqus oraz Ansys odpowiadające sile niszczącej przedstawia rys.7.



Rys. 7 Deformacja pokrytyczna: a) Tsai-Wu – Abaqus; b) Tsai-Wu – Ansys

Rysunek 8 prezentuje zestawienie ścieżek równowagi pokrytycznej siła-przemieszczenie dla węzła znajdującego się w miejscu maksymalnej amplitudy deformacji szerszej ścianki profilu omegowego. Zestawiono wyniki otrzymane różnymi metodami badawczymi: MES (Abaqus), metodą analityczno-numeryczną (A-N) oraz badaniami eksperymentalnymi.



Rys. 8 Ścieżki równowagi pokrytycznej siła-przemieszczenie



## 6. Wnioski

W pracy zaprezentowano badania stanu krytycznego i pokrytycznego cienkościennych belek kompozytowych poddanych ścisłaniu osiowemu. Przeprowadzona analiza wykazała zgodność jakościową i ilościową wyników badań prowadzonych różnymi metodami. Analizując przebieg krzywych pokazanych na rys.8 można stwierdzić dużą zgodność wyników obliczeń z prowadzonymi badaniami eksperymentalnymi zarówno w zakresie dokrytycznym, jak i pokrytycznym, co potwierdza adekwatność opracowanych modeli numerycznych. Przyjęte w artykule metody wyznaczania obciążenia krytycznego na podstawie wyników badań eksperymentalnych – rys.6 pozwoliły określić eksperymentalną wartość siły krytycznej w zakresie  $P_{CR} = 6184 \div 7102$  N – maksymalna różnica pomiędzy zastosowanymi metodami wyniosła 13%. Wartości obciążenia krytycznego wyznaczone metodami obliczeniowymi: MES (Abaqus, Ansys) oraz metodą analityczno-numeryczną (A-N) kształtują się w środku otrzymanego zakresu – tabela 2. W zakresie pokrytycznym otrzymano prawie identyczne ścieżki równowagi siła-przemieszczenie dla metody MES oraz badań eksperymentalnych, wykazując niewielkie różnice ilościowe (ok. 10%) w odniesieniu do metody analityczno numerycznej, przy zachowaniu tego samego charakteru krzywej.

Otrzymane wyniki dają szerokie możliwości obserwacji i analizy stanów deformacji oraz poziomów wytężenia struktury do momentu jej zniszczenia. Pozwala to na identyfikację obszarów szczególnie narażonych na uszkodzenie laminatu [4,17] oraz określenie poziomu obciążenia niszczącego w odniesieniu do wartości siły krytycznej. Analiza pokrytycznej ścieżki równowagi umożliwi ocenę sztywności konstrukcji po utracie stateczności w kontekście zastosowanej konfiguracji warstw laminatu. Otrzymane wyniki dostarczają zatem istotnych informacji w procesie kształtowania i optymalizacji struktury kompozytu w kontekście obciążeń eksploatacyjnych.

**Podziękowania:** Badania realizowane w ramach Projektu Nr N N507 241440 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

1. Abaqus HTML Documentation.
2. Ansys HTML Documentation.
3. Bazant Z.P., Cedolin L.: Stability of structures. Elastic, inelastic, fracture and damage theories. Oxford University Press 1991.
4. Bieniaś J., Dębski H., Surowska B., Sadowski T.: Analysis of microstructure damage in carbon/epoxy composites using FEM, Computational Materials Science, 2012, 64:168–172.
5. Campbell, F.C., Manufacturing Processes for Advanced Composites, Elsevier Ltd, 2004.
6. Campbell F.C., Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, Elsevier 2006.
7. Capitani V., Capriolo M., Sendi D., Characterization of Casting Defects in Composite Carbon Fiber Material Detected by Ultrasonic Inspection, 2011.
8. Coan J.M., Large-Deflection Theory for Plates With Small Initial Curvature Loaded in Edge Compression, ASME, Journal of Applied Mechanics, June 1951, vol. 18:143-151.

9. Habermehl J., Lamarre A., Ultrasonic Phased Array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2008.
10. Koiter W.T. Elastic stability and post-buckling behavior, In: Proceedings of the Symposium on Non-linear Problems, Univ. of Wisconsin Press, Wisconsin, 1963, 257-275.
11. Kolakowski Z., Kowal-Michalska K., (Eds.), Selected problems of instabilities in composite structures, A Series of Monographs, Technical University of Lodz, 1999.
12. Kolakowski, Z., Kubiak, T., Load-carrying capacity of thin-walled composite structures *Composite Structures*, 2005, 67 (4): 417-426,.
13. Kowal-Michalska K. (ed.), *Dynamic Stability of Composite Plate Structures*, (in Polish), WNT, Warszawa, 2007.
14. Królak M. and Mania R.J., (eds.), *Statics, dynamics and stability of structures. Vol. 1. Stability of thin-walled plate structures*, Technical University of Lodz, Series of monographs, Lodz 2011.
15. Mason K., Autoclave Quality Outside The Autoclave?, *High Performance Composites* 3/1/2006.
16. Niezgodziński, T., Kubiak, T., The problem of stability of web sheets in box-girders of overhead cranes, *Thin-Walled Structures*, 2005, 43 (12): 1913-1925.
17. Pałka K., Bieniaś J., Dębski H., Niewczas A., Finite element analysis of thermo-mechanical loaded teeth, *Computational Materials Science*, 2012, 64: 289–294.
18. Schnars U., Henrich R., Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry, Conference on Damage in Composite Materials, Stuttgart, Germany 2006.
19. Simites G.J., Hodges D.H., *Fundamentals of structural stability*. Butterworth-Heinemann 2006.
20. Singer J., Arbocz J., Weller T., *Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Basic concepts, columns, beams, and plates*, Volume 1, John Wiley & Sons Inc. New York 1998.
21. Singer J., Arbocz J., Weller T., *Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Shells built-up structures, composites and additional topics*, Volume 2, John Wiley & Sons Inc. New York 2002.
22. Spencer H.H. Walker A.C., *Technique for Measuring The Critical Loads of Columns and Plates*, Paper No. 2290 A SESA Spring Meeting, 1974.
23. Swanson S.R. *Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials*, Prentice-Hall, Inc., 1997.
24. Tereszkowski Z., An experimental method for determining critical loads of plates, *Archive of mechanical engineering*, 1970, 3: 485-493.
25. Thompson J.M.T., Hunt G.W., *General theory of elastic stability*. Wiley, New York 1973.
26. Tsai S.W. *Introduction to Composite Materials*, Technomic 1980.
27. Van der Heijden A. M. A. (red.), *W.T. Koiter's Elastic Stability of Solids and Structures*, Cambridge University Press, 2009.
28. Venkataramaiah, K.R., Roorda, J., Analysis of local plate buckling experimental data, Sixth international specialty conference on cold-formed steel structures (1982: November 16-17; St. Louis, Missouri), *Missouri S&T (formerly the University of Missouri - Rolla)*, 1982, 45-74.