

ZASTOSOWANIE PROGRAMU ANSYS DO ANALIZY ZNISZCZENIA CIENKOŚCIENNYCH PROFILI Z MATERIAŁU TYPU FML

Dominik BANAT, Radosław MANIA

Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Politechnika Łódzka

Referat dotyczy badań doświadczalnych cienkościennych konstrukcji kompozytowych typu Fiber Metal Laminate. Analizie zostały poddane profile o przekroju poprzecznym w kształcie zetownika oraz ceownika wykonane z laminatów metalowo-włóknistych (FML). W odniesieniu do oceny stateczności i stanu pokrytycznego tych profili przeprowadzono analizę stanu naprężenia przy zastosowaniu kryteriów zniszczenia dla materiałów warstwowych. Eksperymentalne wyznaczenie stałych materiałowych i wytrzymałości na różne stany obciążenia pozwoliło na implementację kryteriów zniszczenia w analizie numerycznej z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS. Porównanie zastosowania kryteriów zniszczenia w metodzie elementów skończonych przeprowadzono dla osiowo ściskanych 7-warstwowych profili FML typu 3/2 - w stanie krytycznym i pokrytycznym. Analiza porównawcza została wykonana dla kryterium Hubera-Misesa-Hencky-ego w warstwach materiału izotropowego natomiast dla materiału ortotropowego zastosowano kryteria Tsai-Wu, Hashin'a i Puck'a. Implementacja wymienionych kryteriów pozwoliła także na ocenę wpływu położenia warstwy na stan naprężenia i proces zniszczenia. Składowe tensora naprężenia zostały zastosowane również dla oceny stopnia ich wpływu na kryterialną ocenę zniszczenia w badanych konstrukcjach.

1. WSTĘP

Kompozyty są obecnie jednym z najczęściej stosowanych materiałów konstrukcyjnych w wielu dziedzinach przemysłu. Jednym z ich rodzajów są laminaty metalowo-włókniste (ang. Fibre Metal Laminate - FML), które są typem kompozytów hybrydowych utworzonych z naprzemiennych warstw metalu oraz laminy wzmacnianej włóknami. Omawiane w niniejszej pracy badania zostały przeprowadzone dla materiału typu FML z zastosowaniem warstw aluminium oraz żywicy epoksydowej wzmacnianej włóknem szklanym (GFRP). To połączenie daje wiele korzyści w porównaniu do konstrukcji metalowej z uwagi na stosunek masy materiału do parametry wytrzymałościowe - np. jak większa odporność na uderzenia. Zastosowanie laminatu wzmocnionego włóknem szklanym gwarantuje także lepsze właściwości zmęczeniowe oraz dobrą sztywność konstrukcji. Materiał typu FML charakteryzuje się także stosunkowo wysoką odpornością na korozję i ogień, co znacznie zwiększa jego trwałość [1]. Kompozyty wielowarstwowe wzmacniane włóknem mogą być zaprojektowane z najwyższą wytrzymałością w określonym kierunku, co daje inżynierom wiele możliwości do konkretnych zastosowań przemysłowych. Tytułem przykładu, w przemyśle lotniczym, profile z materiałów typu FML są elementami usztywnienia kadłuba samolotu stąd możliwość oceny ich stateczności i nośności ma istotne znaczenie.

Jedną z głównych właściwości materiałowych branych pod uwagę przez konstruktorów przy doborze materiału jest stosunek wytrzymałości do masy. Prowadzi to do licznych optymalizacji w analizie wytrzymałościowej celem znalezienia tzw. złotego środka. To

podjęcie tłumaczy m.in. szerokie zastosowanie w procesie projektowania konstrukcji inżynierskich kryteriów zniszczenia. Wspomniana optymalizacja i dobra właściwości zmęczeniowych skutkują obniżaniem grubości elementów typu FML, co sprawia, że problem stateczności konstrukcji tego typu ma istotne znaczenie.

Cienkościenne konstrukcje kompozytowe narażone są również na różne formy wyboczenia. W wielu przypadkach wartość krytyczna obciążenia, przy którym następuje wyboczenie charakteryzuje również nośność całej konstrukcji. Stateczność konstrukcji cienkościennych w zakresie krytycznym i pokrytycznym została niejednokrotnie poddana badaniom eksperymentalnym i analizie numerycznej [2-4]. Niemniej jednak, istnieje stosunkowo niewiele prac poświęconych zastosowaniu wytrzymałościowych kryteriów zniszczenia do analizy wyboczeniowej profili cienkościennych. Dlatego też, wykonana na potrzeby tych badań analiza wyboczeniowa z implementacją kryteriów zniszczenia może stać się efektywnym narzędziem do oceny nośności konstrukcji cienkościennych.

2. OBLICZENIA NUMERYCZNE

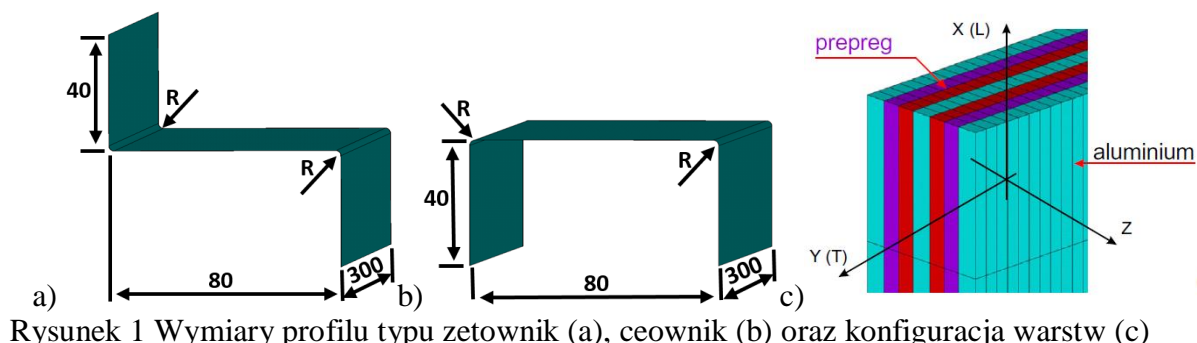
2.1. Geometria modelu i warunki brzegowe

Model numeryczny MES został stworzony w oprogramowaniu ANSYS za pomocą elementu SHELL181. Wybrany element powłokowy jest szczególnie dedykowany do modelowania konstrukcji płytowych, gdzie zachodzą lokalne efekty wyboczenia. Badany profil FML składał się z naprzemiennych warstw stopu aluminium Al 2024-T3 oraz prepregu - żywicy epoksydowej wzmacnianej włóknem szklanym (TVR 380 M12/26%/R-glass). Właściwości materiałowe aluminium i prepregu oraz proces wytwarzania wielowarstwowego laminatu zostały poddane szczegółowej analizie przez producenta [5,6]. Na potrzeby tych badań zaadoptowano jedynie wybrane właściwości mechaniczne w głównych kierunkach ortotropowych, gdzie oś 1 wskazuje na kierunek ułożenia włókna (Tabela 1). Dodatkowo w testach eksperymentalnych wyznaczono wytrzymałość na odpowiednie stany obciążenia, które były wykorzystane przy stosowaniu wskazanych kryteriów wytrzymałościowych.

Tabela 1 Właściwości materiałowe warstw aluminium oraz prepregu [7]

Al 2024-T3	[GPa]	TVR 380 M12/26%/R-glass	[GPa]
E	72	$E_{L(1)}$	46.43
ν	0.33	$E_{T(2)}$	14.92
G	$E/2(1 + \nu)$	$E_{(3)}$	14.92
$R_{0.2}$	359×10^{-3}	G_{12}	5.233
E_{tang}	$E \times 10^{-3}$	G_{23}	3.570
		G_{13}	5.233
		ν_{12}	0.269
		ν_{23}	0.400
		ν_{13}	0.269

Geometria modelu odpowiadała rzeczywistym parametrom profili badanych w testach laboratoryjnych (Rysunek 1a,b). Profil 7-warstwowy został zamodelowany za pomocą funkcji section lay-up, która pozwoliła zdefiniować właściwości każdej z warstw z osobna (Rysunek 1c). W rezultacie możliwe było stworzenie różnych konfiguracji modelu dla poszczególnych ułożeń włókien (Tabela 2).



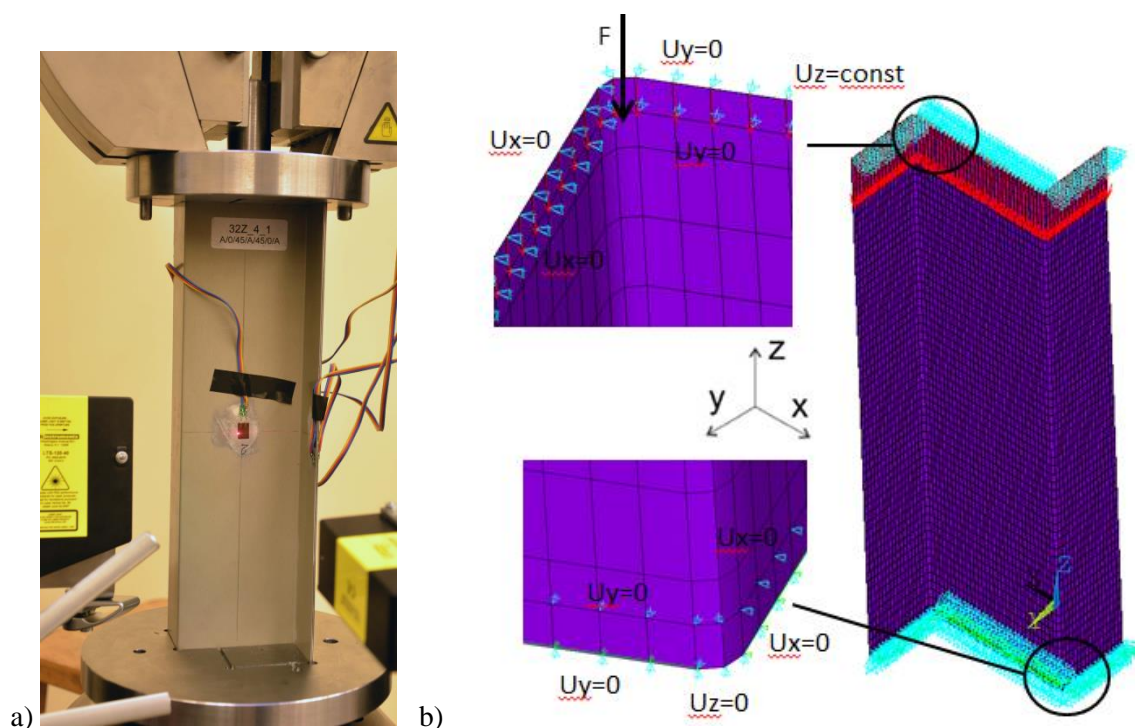
Rysunek 1 Wymiary profilu typu zetownik (a), ceownik (b) oraz konfiguracja warstw (c)

Tabela 2 Konfiguracje ułożenia włókien kompozytu

Nr	Konfiguracja
1	Al/0/90/Al/90/0/Al
2	Al/90/0/Al/0/90/Al
3	Al/45/0/Al/0/45/Al
4	Al/0/45/Al/45/0/Al
5	Al/0/0/Al/0/0/Al
6	Al/25/0/Al/0/25/Al
7	Al/0/25/Al/25/0/Al

Kolejnym etapem tworzenia modelu numerycznego było modelowanie warunków brzegowych. Podczas testów eksperymentalnych profile były ściskane za pomocą elektromechanicznej maszyny do testów wytrzymałościowych firmy Instron, z oprogramowaniem sterującym Zwick/Roel. Maszyna o zakresie 200kN była wyposażona w specjalnie zaprojektowane krażki umożliwiające jednokierunkowe ściskanie osiowe. Dodatkowo podczas eksperymentu profile umieszczono we frezowanych rowkach (Rysunek 2a). W modelu numerycznym takie warunki brzegowe zostały zamodelowane za pomocą unieruchomienia dolnej krawędzi ($u_z = 0$), podparcia przegubowego odpowiednich krawędzi ($u_x = 0$, $u_y = 0$) oraz sprzężenie węzłów (coupling $u_z = \text{const}$) zapewniające osiowe ściskanie [7]. W analogiczny sposób zostały odwzorowane w modelu numerycznym sfazowane rowki na wysokości 1 mm od krawędzi poprzecznych profilu (Rysunek 2b).

W modelu numerycznym aluminium zdefiniowano jako materiał biliniowy ze wzmocnieniem izotropowym, a warstwy kompozytu włóknistego jako materiał liniowo-sprężysty w całym zakresie obciążenia. Parametry kompozytu dla opisu 3D ustalono według znanych reguł dla materiałów wzmacnianych włóknami.



Rysunek 2 Stanowisko pomiarowe (a) oraz warunki brzegowe w modelu numerycznym (b)

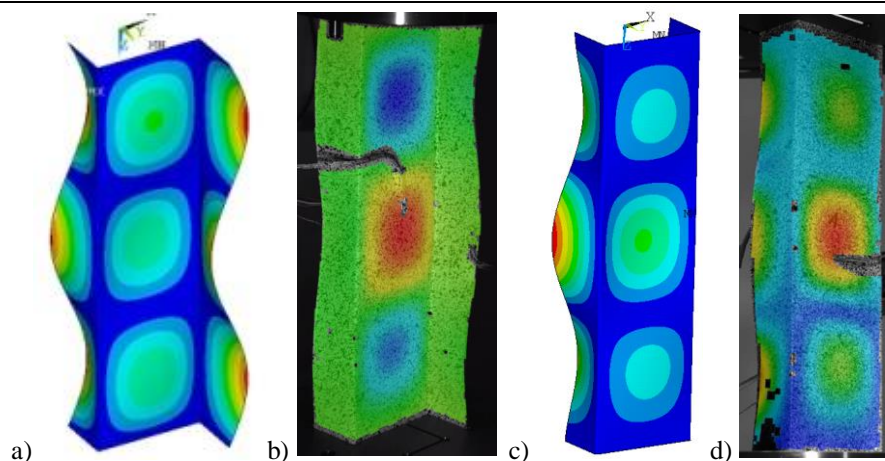
2.2. Analiza wyboczeniowa oraz implementacja kryteriów wytrzymałościowych

Analiza wyboczeniowa ściskanych profili za pomocą MES została przeprowadzona w dwóch etapach. Początkowo przy użyciu analizy eigen-buckling wyznaczono obciążenie krytyczne i kolejne postacie wyboczenia. Następnie, analiza nieliniowa pozwoliła na ocenę stateczności konstrukcji w zakresie pokrytycznym. Efektem tej analizy było wyznaczenie nośności konstrukcji oraz ścieżek równowagi pokrytycznej. Kolejnym etapem analizy była próba oszacowania zniszczenia w rozważanym 7-warstwowym laminacie FML. Do oceny stanu naprężenia w warstwach aluminium użyto kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego. Warstwy prepregu zamodelowane jako materiał ortotropowy, zostały oszacowane przy użyciu zaimplementowanych kryteriów Tsai-Wu, Hashin'a oraz Puck'a. Współczynniki zniszczenia wyliczono dla obciążenia krytycznego i obciążenia odpowiadającego granicznej nośności całego laminatu. Wspomniane kryteria wykorzystano również w analizie nieliniowej do wyznaczenia trendu zmiany współczynników zniszczenia przy narastającym obciążeniu. Dodatkowo wyznaczono poszczególne składowe tensora naprężenia oraz ich wpływ na zniszczenie konstrukcji FML.

3. DYSKUSJA WYNIKÓW

3.1. Analiza wyboczeniowa

Analiza liniowa eigen-buckling przy użyciu MES, zarówno dla zetownika jak i ceownika, wykazała pierwszą postać wyboczenia w postaci 3 półfal wzdłuż środka i półek - co jest zgodne z wynikami eksperymentalnymi (Rysunek 3).



Rysunek 3 Pierwsza postać wyboczenia dla zetownika (a,b) oraz ceownika (c,d)

Dla porównania przeprowadzono nieliniową analizę wyboczenia z zastosowaniem MES oraz metody analityczno-numerycznej opartej na ogólnej teorii Koiter'a [8]. Obie analizy pozwoliły oszacować siłę krytyczną. Przykładowo, dla zetownika w konfiguracji Al/0/0/Al/0/0/Al obciążenia te wyniosły odpowiednio 29.9 kN, a nośność graniczna 41.9 kN. Obie wartości odpowiadały wynikom testów eksperymentalnych co pozwoliło stwierdzić na tym etapie zgodność modelu numerycznego z rzeczywistym.

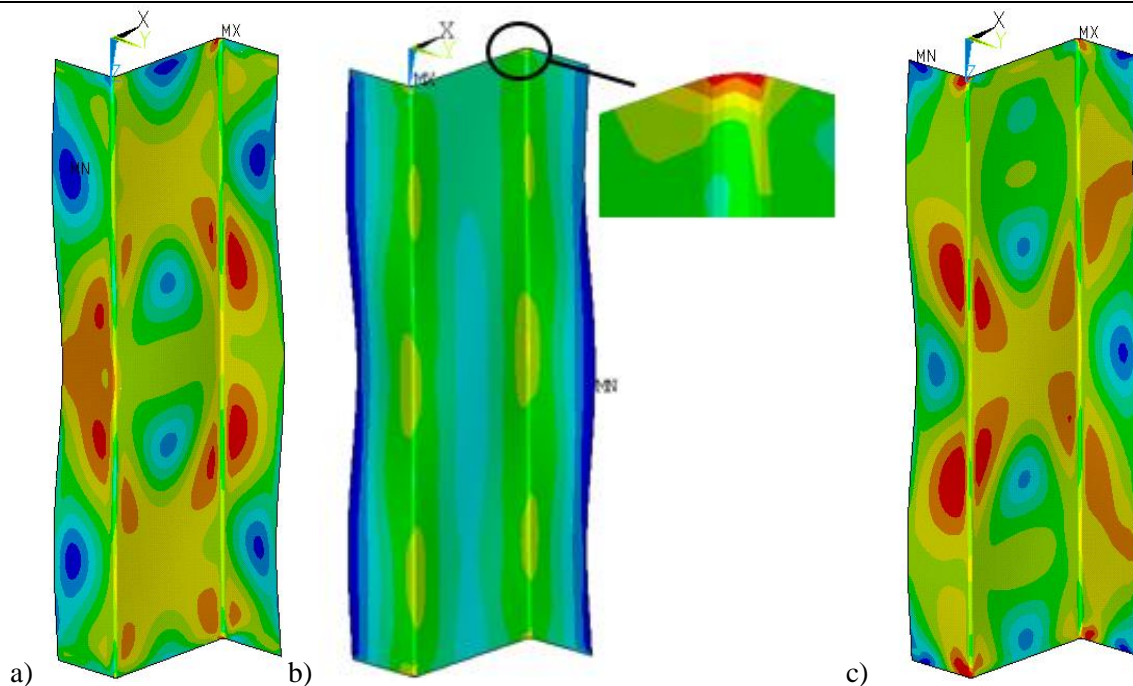
3.2. Analiza wytrzymałościowa warstw aluminium

Analiza wytrzymałościowa dla warstw aluminium (warstwy 1,4,7) o właściwościach izotropowych została przeprowadzona przy użyciu kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego. Dla każdej z warstw wyliczono naprężenia zredukowane (EQVS) oraz zestawiono je z granicą plastyczności (Tabela 3). Analiza ta pozwoliła stwierdzić, że naprężenia zredukowane w warstwach aluminium dla siły krytycznej są poniżej granicy plastyczności, jednak przekraczają tę granicę dla obciążenia odpowiadającego nośności konstrukcji.

Tabela 3 Zestawienie naprężeń zredukowanych EQVS z granicą plastyczności dla aluminium

Numer warstwy	EQVS - obciążenie krytyczne [MPa]	EQVS- graniczna nośność [MPa]	Granica plastyczności [MPa]
1	180	360	359
4	178	390	
7	186	362	

Naprężenia zredukowane wyznaczone z kryterium H-M-H dla wszystkich elementów modelu wskazują największą podatność na zniszczenie obszarów położonych na zagięciu pomiędzy średnikiem i półką profilu (Rysunek 4). Dodatkowo szczegółowa analiza składowych tensora naprężenia pozwoliła stwierdzić, że do zniszczenia warstw aluminium przyczyniają się głównie naprężenia ścinające (σ_{xy}).



Rysunek 4 Naprężenia zredukowane EQVS dla warstw: a) 1, b) 4, c) 7

3.3. Analiza wytrzymałościowa laminy wzmacnianej włóknem

Do oceny wytrzymałości warstw kompozytu (warstwy 2,3,5,6 modelu) - o właściwościach ortotropowych, zastosowano kryteria Tsai-Wu, Hashin'a oraz Puck'a, których implementacja w ANSYS'ie pozwala wyliczyć następujące współczynniki zniszczenia:

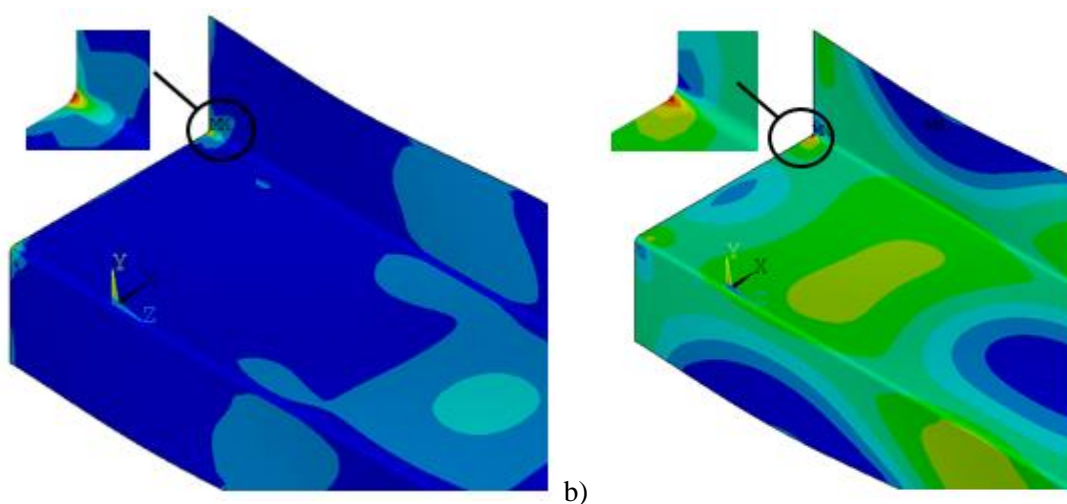
- TWSI - Tsai-Wu strength index,
- TWSR - inverse of Tsai-Wu strength ratio index,
- HFIB - Hashin fiber failure criterion,
- HMAT - Hashin matrix failure criterion,
- PFIB - Puck fiber failure criterion,
- PMAT - Puck inter-fiber (matrix) failure criterion.

Warto zaznaczyć, że współczynnik zniszczenia większy od 1 sugeruje zniszczenie materiału. W przypadku kryterium Tsai-Wu, tylko jedna postać współczynnika TWSR odpowiada pozostałym kryteriom. Współczynnik TWSI ma inną formę, dlatego też w późniejszych analizach nie jest porównywany z pozostałymi kryteriami [9]. Dodatkowo, kryterium Hashin'a oraz Puck'a rozróżnia współczynniki wskazujące na zniszczenie osnowy (MAT) oraz włókna (FIB). W konsekwencji współczynniki zniszczenia zostały wyznaczone dla każdej warstwy kompozytu w 3 pozycjach - górna, środkowa i dolna (Top, Middle, Bottom). Niemniej jednak, jako przykład, Tabela 4 pokazuje, że każde z kryterium daje różne wyniki dla wybranej warstwy struktury FML przy tym samym obciążeniu odpowiadającym granicznej nośności kompozytu. Kryteria Hashin'a oraz Puck'a dla zniszczenia włókna (HFIB oraz PFIB) określają najniższe współczynniki, co sugeruje, że proces zniszczenia kompozytu inicjowany jest głównie przez zniszczenie osnowy.

Tabela 4 Porównanie współczynników zniszczenia dla wybranej warstwy kompozytu

Warstwa	Pozycja	Kryteria zniszczenia					
		TWSI	TWSR	HFIB	HMAT	PFIB	PMAT
2	Top	4.570	2.260	0.157	5.724	0.334	2.072
	Middle	5.011	2.372	0.14	6.112	0.366	2.219
	Bottom	5.539	2.485	0.159	6.51	0.398	2.366

Współczynniki zniszczenia wyliczono dla wszystkich elementów modelu, aby wskazać miejsca szczególnie narażone na uszkodzenia. Otrzymane wyniki, podobnie jak w przypadku aluminium, sugerują, że obszary w narożnikach są znacząco podatne na zniszczenie. Dla przykładu przedstawiono wyniki obliczeń dla kryterium Puck'a uwzględniającego zniszczenie matrycy - PMAT (Rysunek 5a) oraz włókna - PFIB (Rysunek 5b). Podobne wyniki koncentracji naprężeń w narożnikach uzyskano w badaniach dotyczących stateczności i nośności ściskanych profili cienkościennych typu CFR [10].



Rysunek 5 Współczynniki kryterium Puck'a na zniszczenie osnowy (a) oraz włókna (b)

Ponadto, wybrane kryteria zniszczenia zostały wzajemnie porównane na podstawie przeprowadzonych analiz takich jak wzrost współczynników zniszczenia dla narastającego obciążenia, wpływ położenia warstwy na wskazania kryteriów, udział poszczególnych składowych tensora naprężenia w zniszczeniu warstwy kompozytu. Szczegółowe, wyniki tych analiz zostaną zaprezentowane na konferencji.

4. WNIOSKI

Praca ta dotyczy analizy wyboczeniowej i wytrzymałościowej profili cienkościennych typu FML. Wyniki liniowej i nieliniowej analizy wyboczeniowej potwierdzają pomiary zebrane podczas badań doświadczalnych, zarówno w stanie krytycznym jak i pokrytycznym. Analiza wytrzymałościowa w MES została przeprowadzona przy użyciu kryteriów zniszczenia, zaimplementowanych w oprogramowaniu ANSYS. Wszystkie z wybranych kryteriów potwierdzają zniszczenie materiału dla obciążenia odpowiadającego nośności kompozytu. Najniższe wartości współczynników zniszczenia zostały wyznaczone przez kryteria Hashin'a i Puck'a dla uszkodzeń włókna (PFIB oraz HFIB). Potwierdza to główną zaletę jednokierunkowo wzmocnionego kompozytu, który może przenosić znaczne obciążenia w

kierunku równoległym do włókien.

Porównanie kryteriów wytrzymałościowych pokazuje, że wartości współczynników zniszczenia różnią się między sobą dla poszczególnych kryteriów. Dany stan obciążenia może być różnie interpretowany, w zależności od wybranego kryterium. W związku z tym, dla materiałów ortotropowych kryteria zniszczenia powinny być traktowane z pewną dozą nieufności, a sama analiza wytrzymałościowa powinna uwzględniać wszystkie możliwe czynniki, które wpływają na zachowanie konstrukcji. Warto również zauważyć, że na potrzeby tej pracy, obliczenia kryteriów wytrzymałościowych ograniczają się do estymacji zniszczenia pierwszej warstwy (ang. First Ply Failure). Przyszła analiza oraz badania mają na celu uwzględnienie formy zniszczenia poszczególnych obszarów laminatu podczas zwiększania obciążenia. Dlatego też, konieczne jest stworzenie modelu degradacji kompozytu oraz implementacja progresywnej analizy zniszczenia.

LITERATURA

- [1] Chang PY, Yeh PC, Yang JM. Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates. *Mater Sci Eng A* 2008;496:273–80.
- [2] Debski H, Teter A, Kubiak T. Numerical and experimental studies of compressed composite columns with complex open cross-sections. *Compos Struct* 2014;118:28–36. doi:10.1016/j.compstruct.2014.07.033.
- [3] Debski H, Kubiak T, Teter A. Experimental investigation of channel-section composite profiles' behavior with various sequences of plies subjected to static compression. *Thin-Walled Struct* 2013;71:147–54. doi:10.1016/j.tws.2013.07.008.
- [4] Kołakowski Z, Mania RJ. Semi-analytical method versus the FEM for analysis of the local post-buckling of thin-walled composite structures. *Compos Struct* 2013;97:99–106.
- [5] Bienias J. Fibre Metal Laminates - some aspects of manufacturing process, structure and selected properties. *Compos Theory Pract* 2011;11:39–43.
- [6] Bienias J, Mania RJ, Jakubczak P, Majerski K. The issues of manufacturing of geometrically complicated elements by using FML laminates. *Compos Theory Pract* n.d.
- [7] Mania RJ, Kolakowski Z, Bienias J, Jakubczak P, Majerski K. Comparative study of FML profiles buckling and postbuckling behaviour under axial loading. *Compos Struct* 2015;134:216–25. doi:10.1016/j.compstruct.2015.08.093.
- [8] Koiter WT. Elastic stability and post-buckling behavior. *Proc. Symp. Non-linear Probl.*, 1963, p. 257–75.
- [9] Barbero EJ. *Finite Element Analysis of Composite Materials*. second. CRC Press; 2007.
- [10] Dębski H. *Badania numeryczne i doświadczalne stateczności i nośności kompozytowych słupów cienkościennych poddanych ściskaniu*. 1161st ed. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej; 2013.