



STATECZNOŚĆ I STANY
GRANICZNE ŚCISKANYCH
CIENKOŚCIENNYCH PROFILI
KOMPOZYTOWYCH

Plan prezentacji

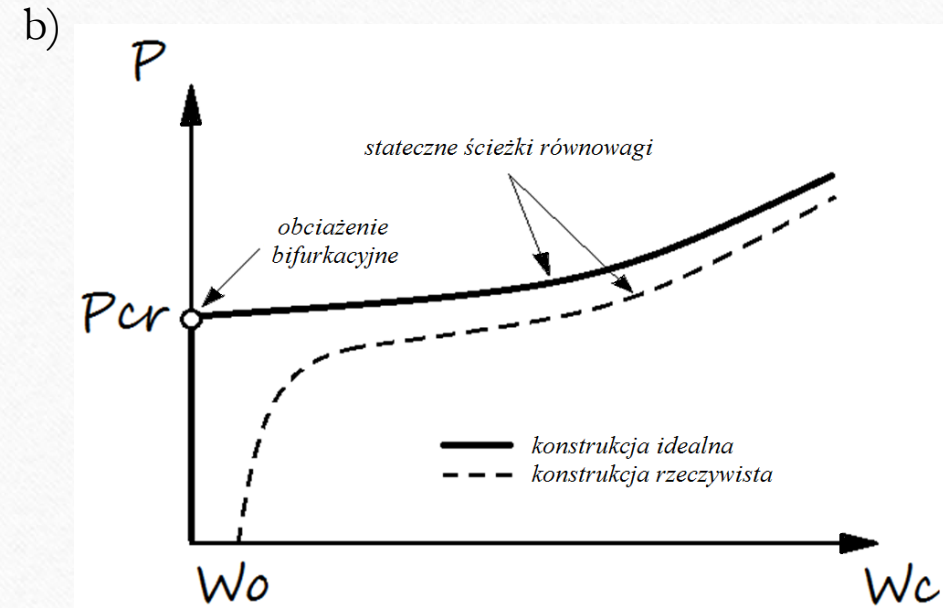
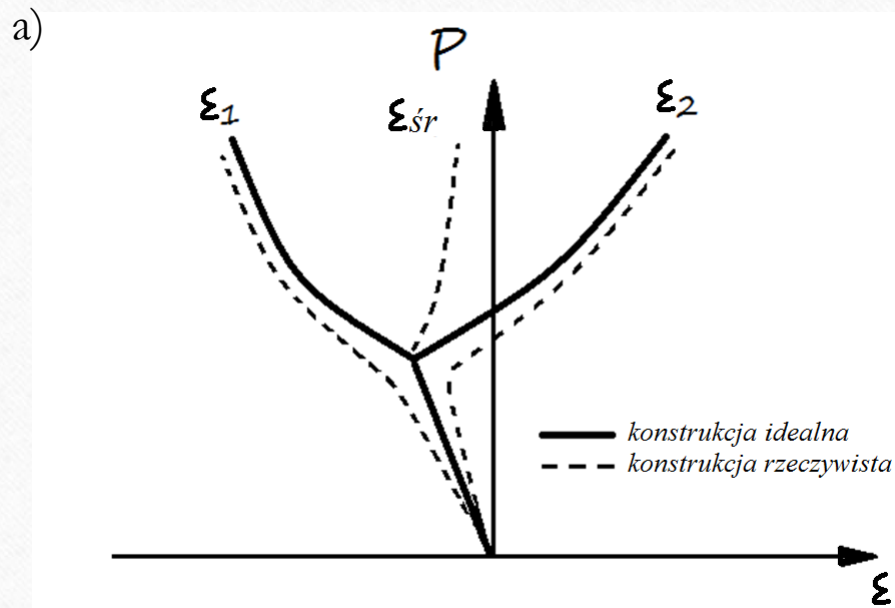
- **Geneza tematu**
- **Cel i teza pracy**
- **Przedmiot oraz metodyka badań**
- **Wyniki**
- **Podsumowanie**



Geneza tematu

Struktury cienkościenne: - niska masa własna
- wysoka sztywność

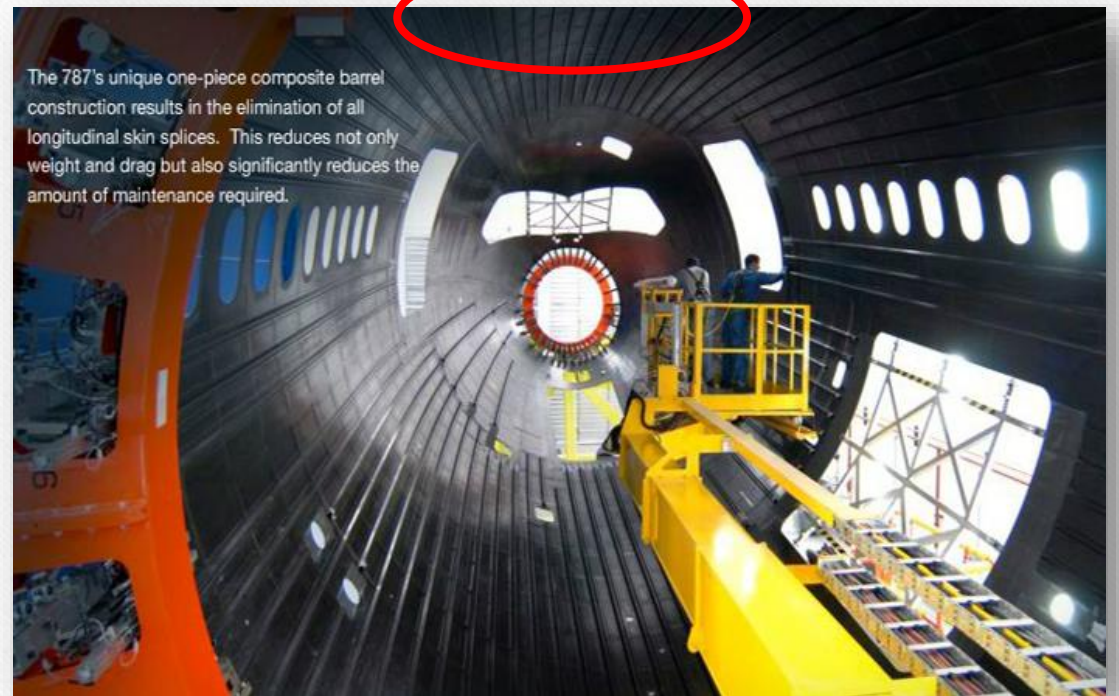
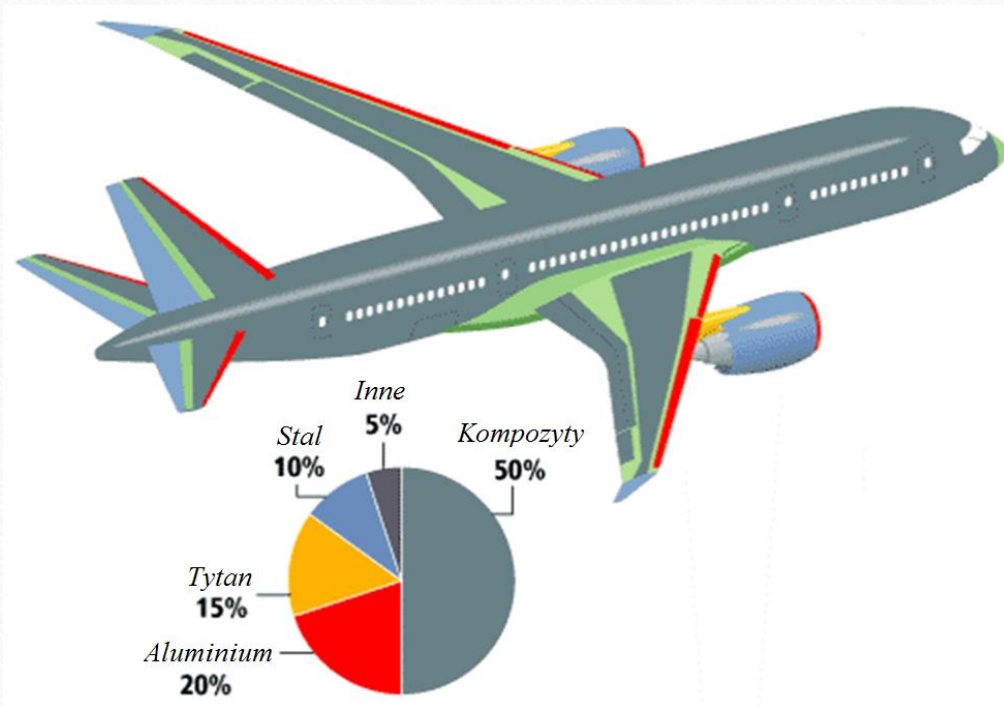
Zaleta: wysoki poziom wytrzymałości i nośności
Wada: wyboczenie



Rys. 1. Charakterystyka cienkościennej konstrukcji – obiektu rzeczywistego i idealnego:
a) siła-odkształcenie, b) siła-ugięcie [1]

Geneza tematu

Przykład zastosowania cienkościennych struktur kompozytowych: Boeing 787 Dreamliner



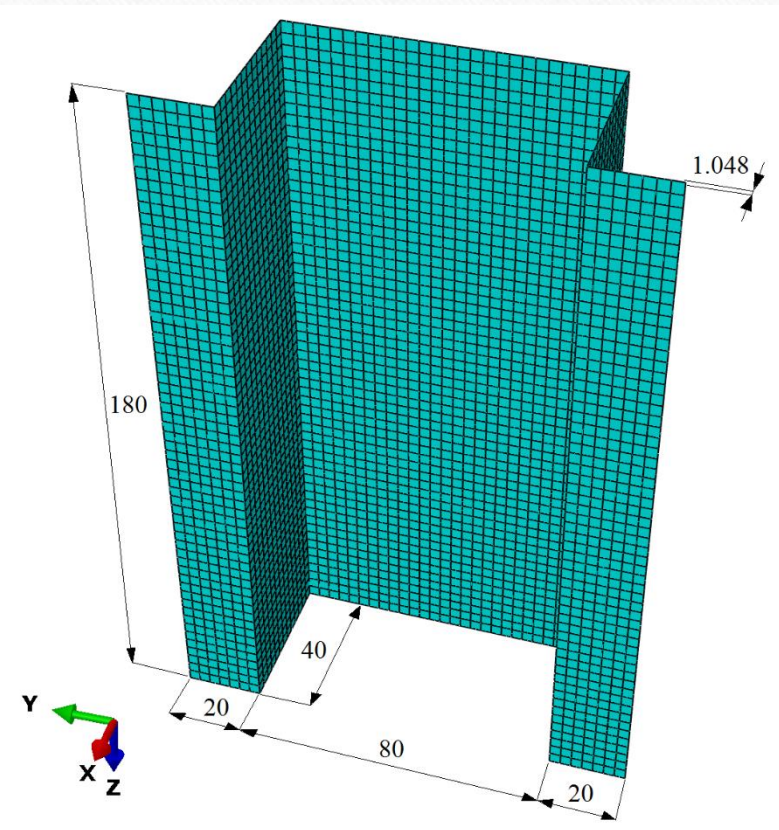
Rys. 2. Konstrukcja samolotu Boeing 787 [źródło: www.boeing.com]

Cel i teza pracy

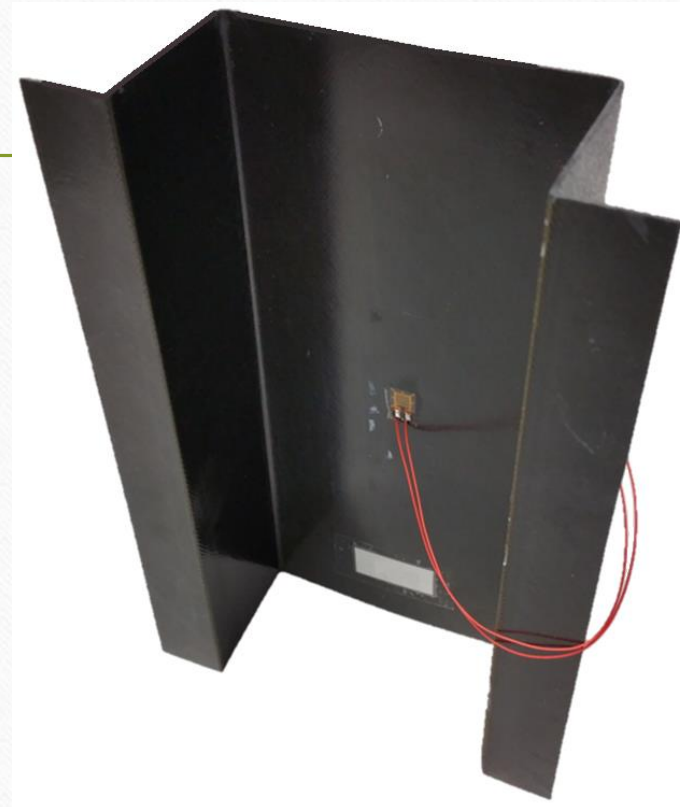
- **Celem pracy** jest analiza stanów granicznych oraz opis zjawiska zniszczenia ściskanych cienkościennych słupów kompozytowych o przekroju omegowym, wykonanych z kompozytu węglowo-epoksydowego.
- **Postawiono tezę**, że możliwy jest opis mechanizmów zniszczenia cienkościennych struktur kompozytowych, z wykorzystaniem modeli numerycznych zweryfikowanych doświadczalnie.
- Odpowiedni dobór konfiguracji warstw laminatu może mieć istotny wpływ na stateczność i nośność ściskanych cienkościennych słupów kompozytowych.

Przedmiot badań

a)

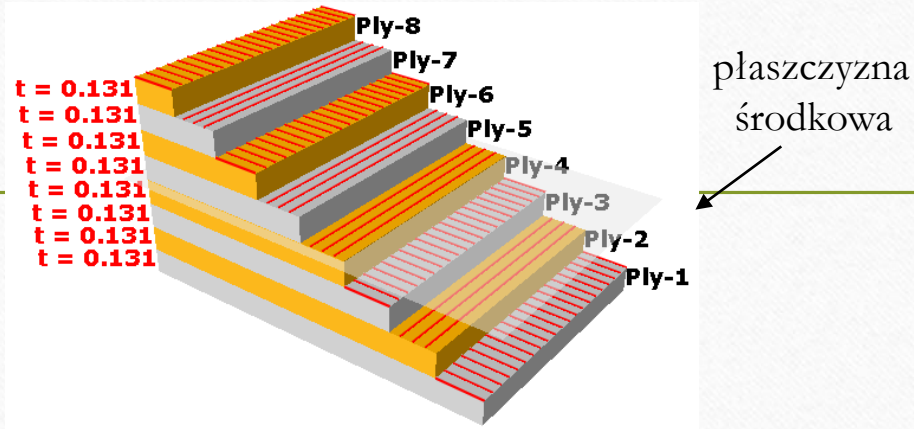


b)



Rys. 3. Przedmiot badań: a) model numeryczny, b) próbka rzeczywista

Przedmiot badań



Rys. 4. Graficzna prezentacja przykładowej konfiguracji warstw laminatu $[0/90/0/90]_s$

Tab. 1. Oznaczenie konfiguracji warstw kompozytu

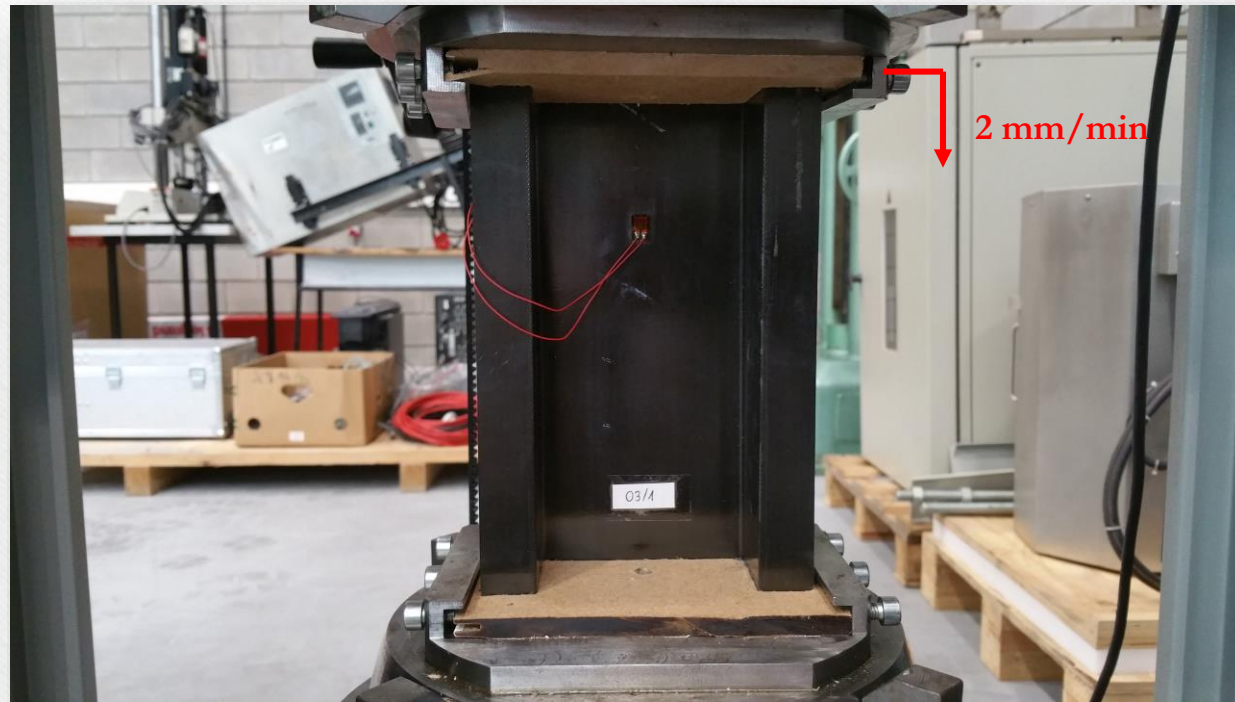
Oznaczenie modelu	Konfiguracja Warstw
O1 (2 próbki)	$[0/-45/45/90]_s$
O2 (1 próbka)	$[90/-45/45/0]_s$
O3 (3 próbki)	$[0/90/0/90]_s$

Tab. 2. Właściwości wytrzymałościowe kompozytu węglowo-epoksydowego

Wytrzymałość na rozciąganie MPa		Moduł Young'a MPa		Współczynnik Poisson'a	Wytrzymałość na ścinanie MPa	Moduł Kirchhoff'a MPa	Wytrzymałość na ściskanie MPa	
0°	90°	E_1 (0°)	E_2 (90°)	ν_{12} (0°)	$\pm 45^\circ$	G_{12} ($\pm 45^\circ$)	0°	90°
1867	26	131700	6360	0,32	100	4180	1531	214

Metodyka badań-testy doświadczalne

Badania doświadczalne zrealizowano w Katedrze Mechaniki Stosowanej na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100.



Rys. 5. Stanowisko do badań eksperymentalnych

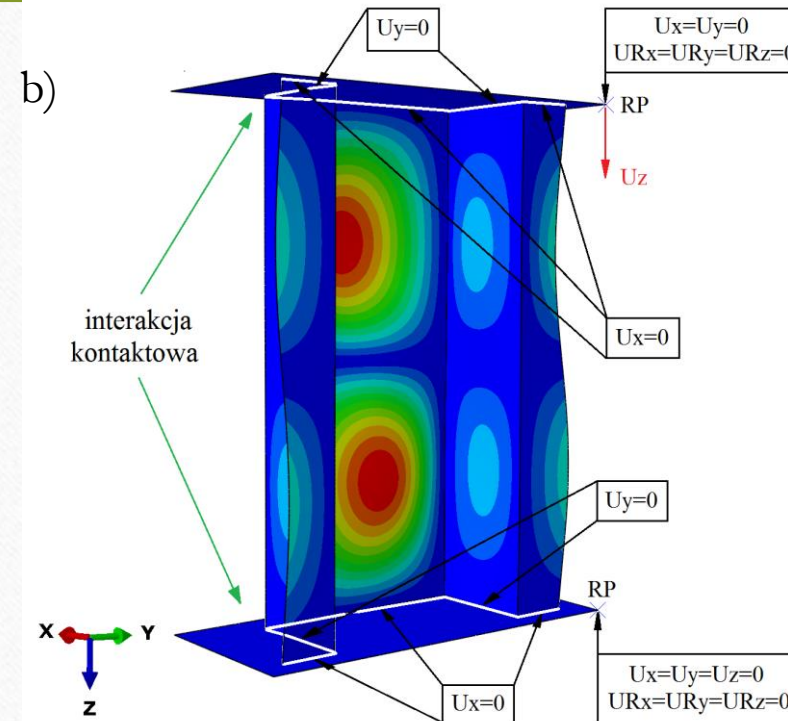
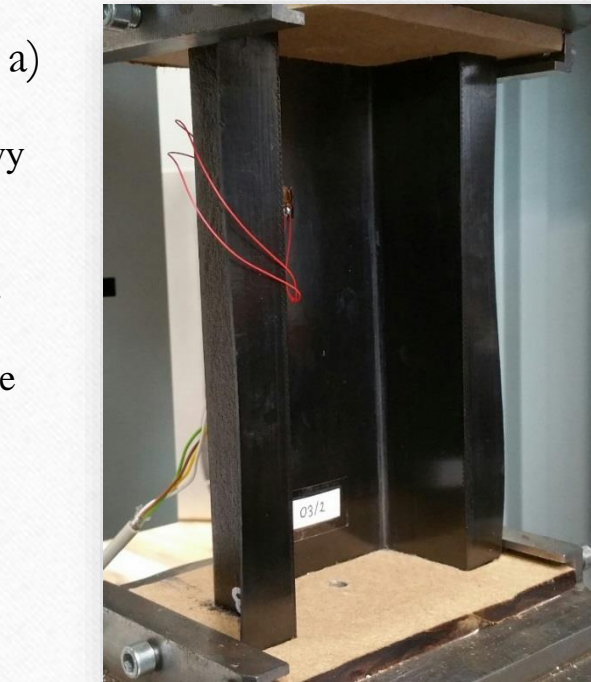
Metodyka badań-stan krytyczny

Badania doświadczalne
(pomiar odkształceń)

Utrata stateczności

Badania numeryczne – MES
(rozwiązanie liniowego zagadnienia własnego)

- układ pomiarowy MGCplus (Hottinger) z autokalibracją tensometrów
- oprogramowanie testXpert II + CatMan
- tensometry oporowe

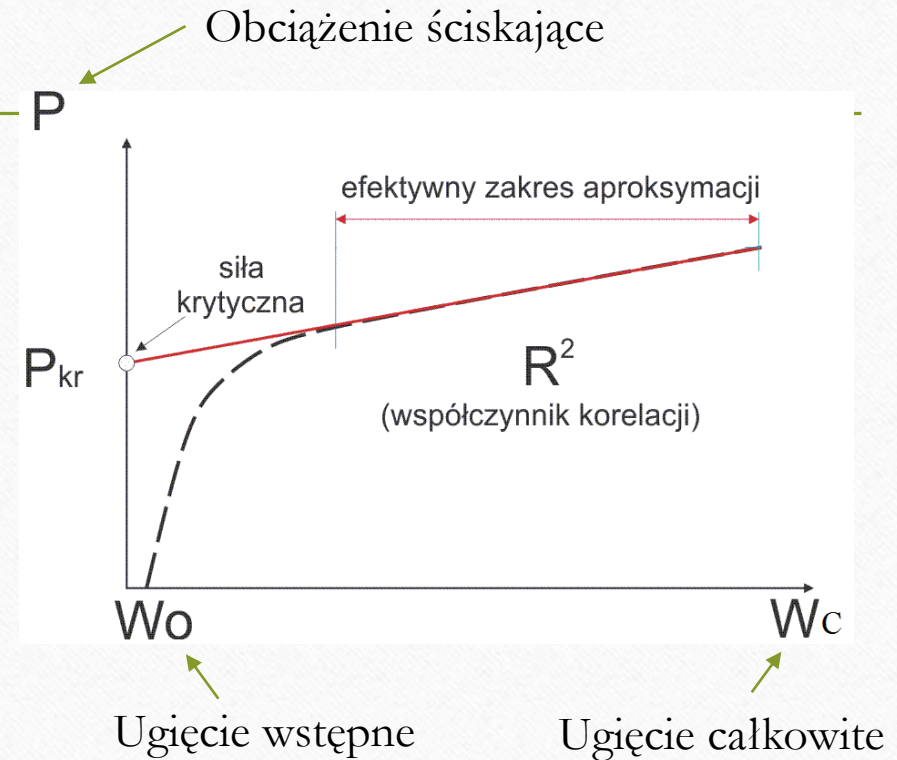


Rys. 6. Warunki brzegowe (próbka O3): a) badania eksperymentalne, b) badania numeryczne.

Metodyka badań-stan krytyczny

W ramach doświadczalnej analizy stanu krytycznego możliwe było wyznaczenie obciążeń krytycznych, przy których konstrukcja traci stateczność [2]:

- **Metoda Koiter'a** [3, 4]
- **Metoda P-w²** [5]
- **Metoda P-w³** [5]



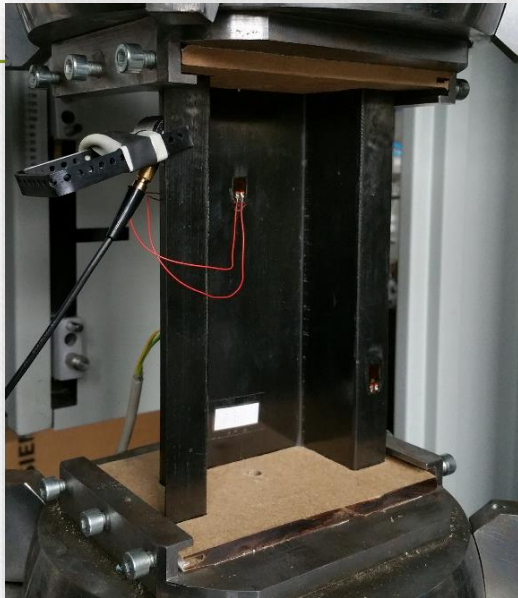
Rys. 7. Graficzna prezentacja wyznaczania obciążenia krytycznego na podstawie charakterystyki doświadczalnej.

Metodyka badań-stan pokrytyczny

Badania doświadczalne – MEA

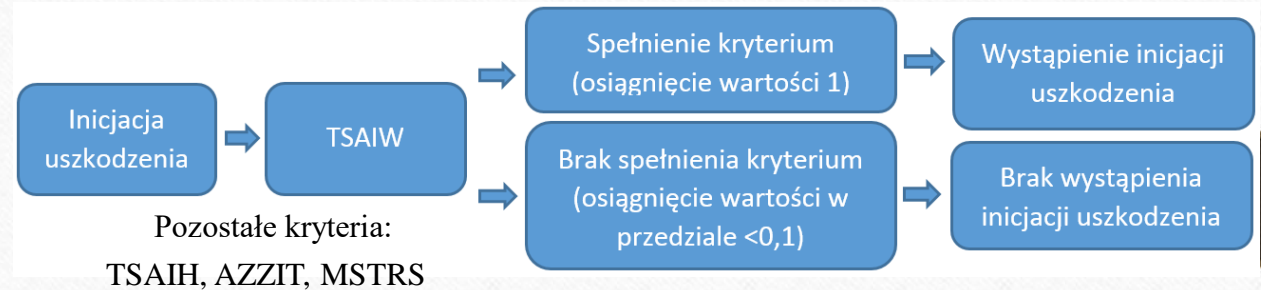
Inicjacja uszkodzenia

Badania numeryczne – MES
(nieliniowa analiza stateczności)

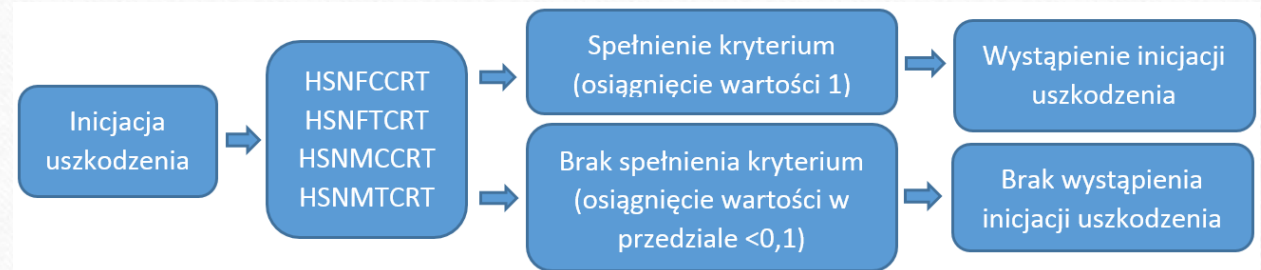


- zestaw pomiarowy AMSY-5
- oprogramowanie Visual AE
- czujnik piezoelektryczny

Rys. 8. Próbkę badawczą z czujnikiem piezoelektrycznym.



Rys. 9. Schemat inicjacji uszkodzenia wg kryterium Tsai-Wu.



Rys. 10. Schemat inicjacji uszkodzenia wg kryterium Hashin'a.



Metodyka badań-stan graniczny

Badania doświadczalne

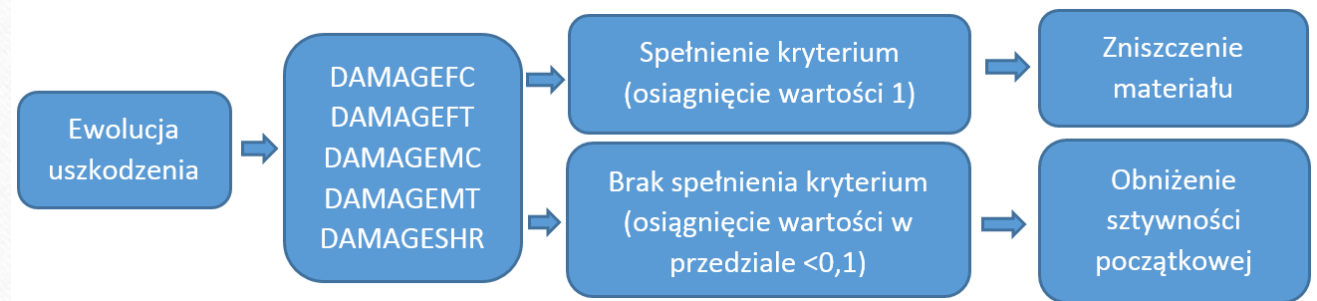
Zniszczenie konstrukcji

Badania numeryczne – MES
(progresywna analiza zniszczenia)

dwie metody badawcze:

- MEA
- Pomiar odkształceń

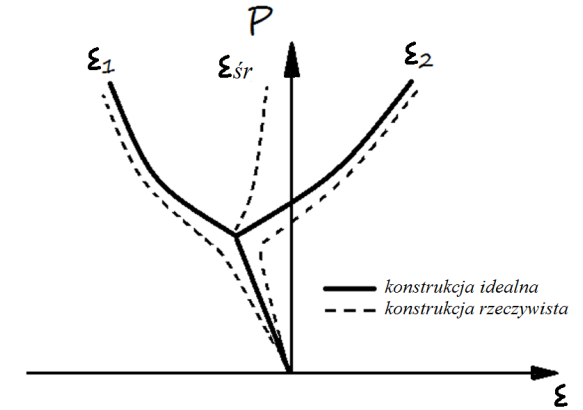
Proces ewolucji uszkodzenia zrealizowano z wykorzystaniem progresywnego modelu zniszczenia (kryterium energetyczne).



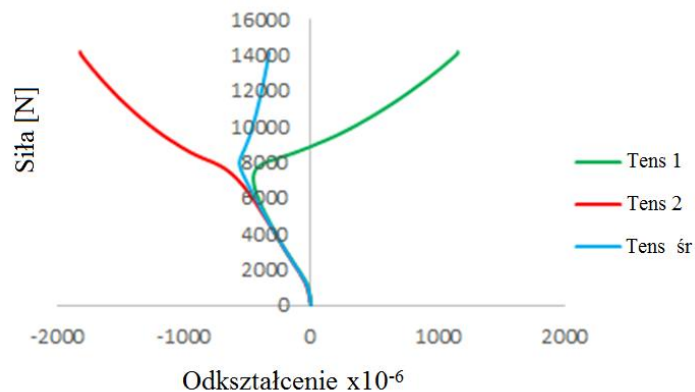
Rys. 11. Schemat ewolucji uszkodzenia w progresywnej analizie zniszczenia.

Wyniki-stan krytyczny

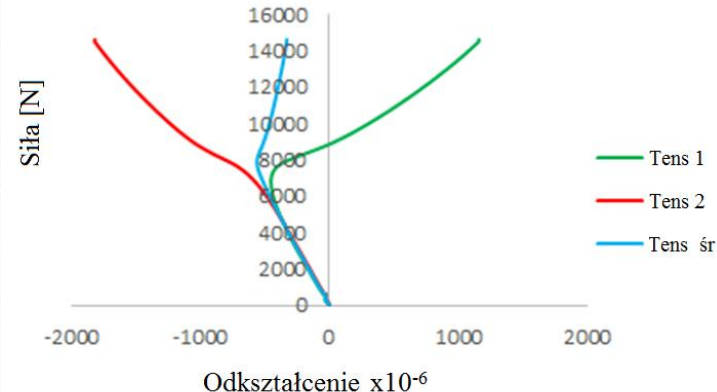
Przedstawione rezultaty badawcze stanu krytycznego dotyczą przykładowej próbki o konfiguracji ułożenia warstw O3:[0/90/0/90]s



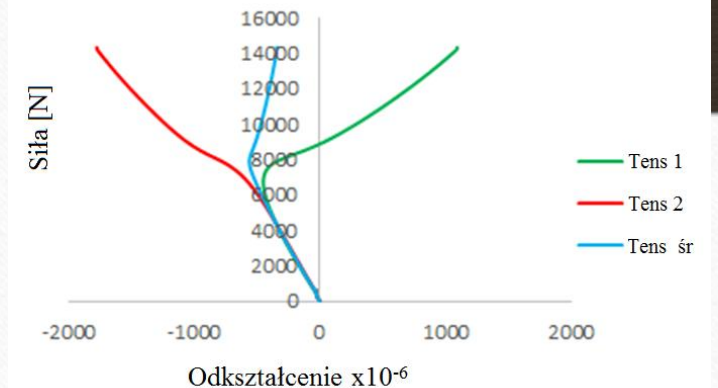
a)



b)



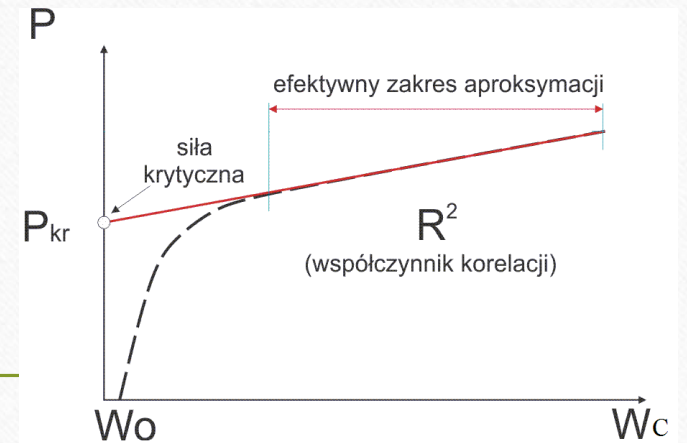
c)



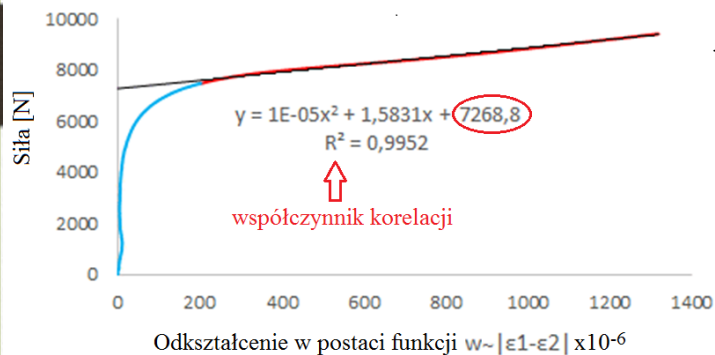
Rys. 12. Doświadczalnie wyznaczone charakterystyki obciążenie - odkształcenie:
a) próba pierwsza, b) próba druga, c) próba trzecia

Wyniki- stan krytyczny

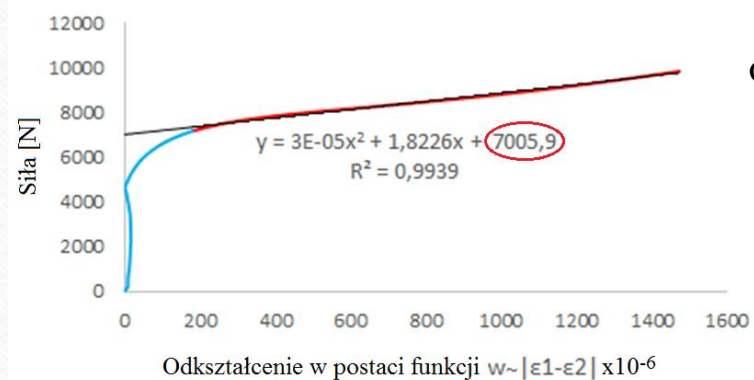
Wyznaczenie obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej – metoda Koiter'a (konfiguracja O3 [0/90/0/90]_s)



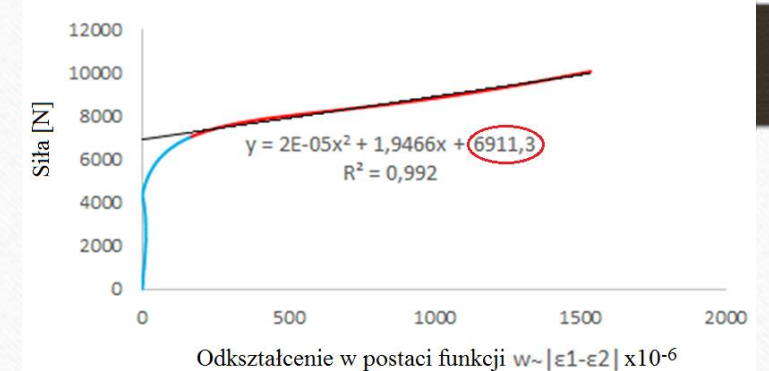
a)



b)



c)

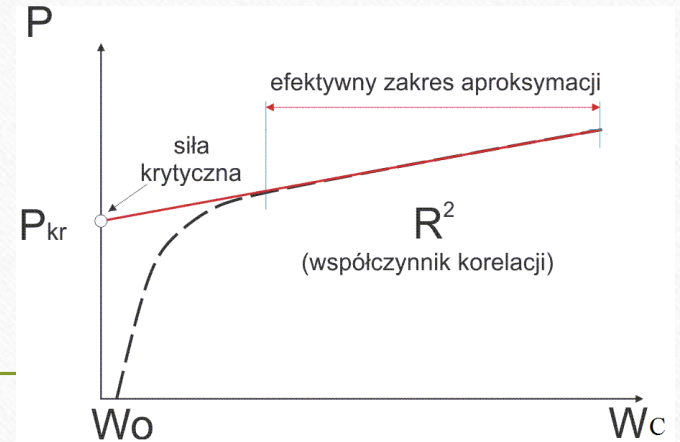


Rys. 13. Aproksymacja pokrytycznej ścieżki równowagi struktury na podstawie metody Koiter'a:
a) próba pierwsza, b) próba druga, c) próba trzecia

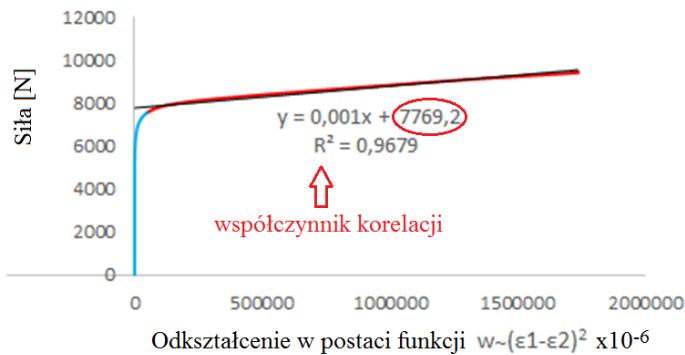


Wyniki-stan krytyczny

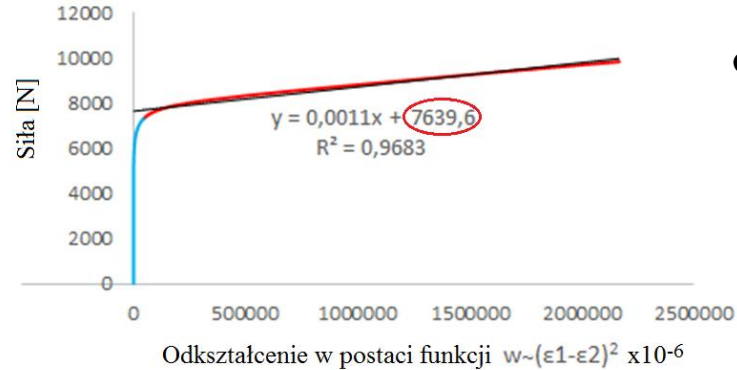
Wyznaczenie obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej – metoda $P-w^2$ (konfiguracja O3 [0/90/0/90]_s)



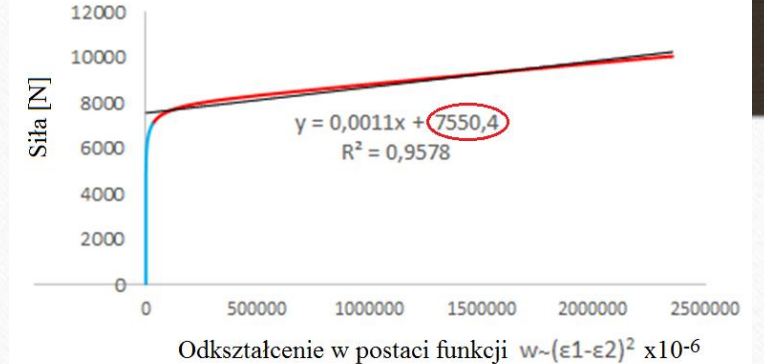
a)



b)



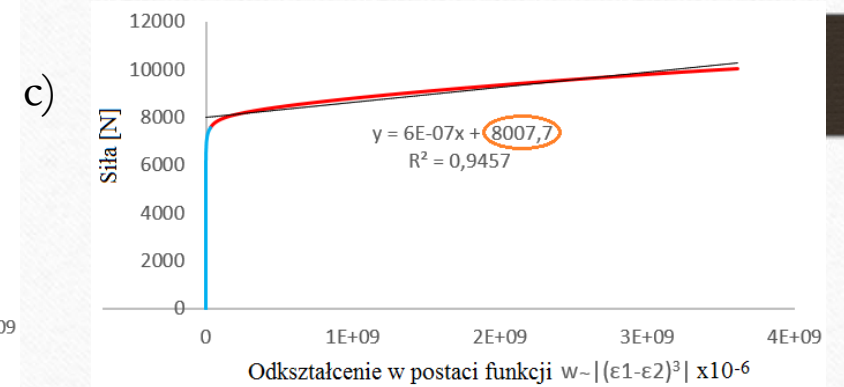
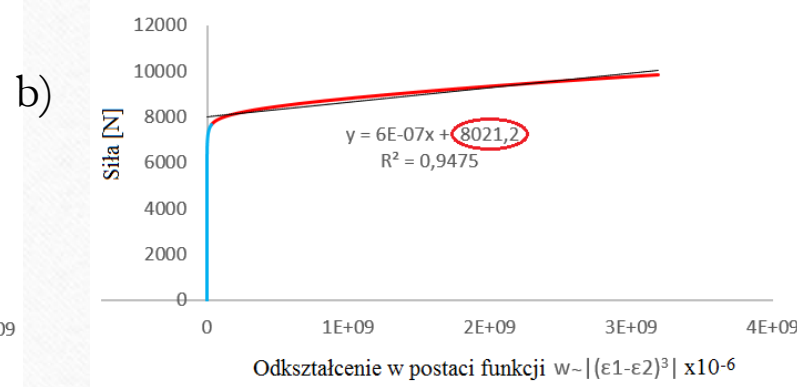
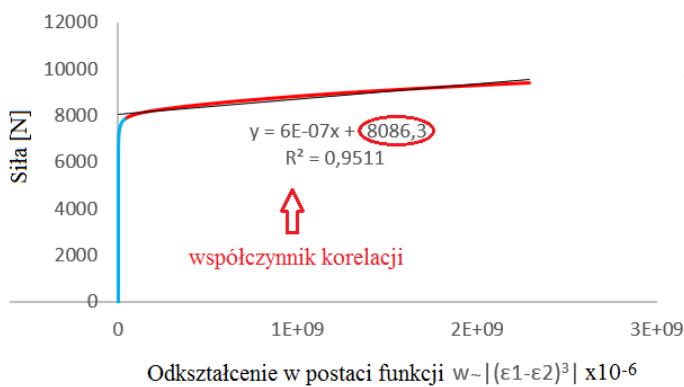
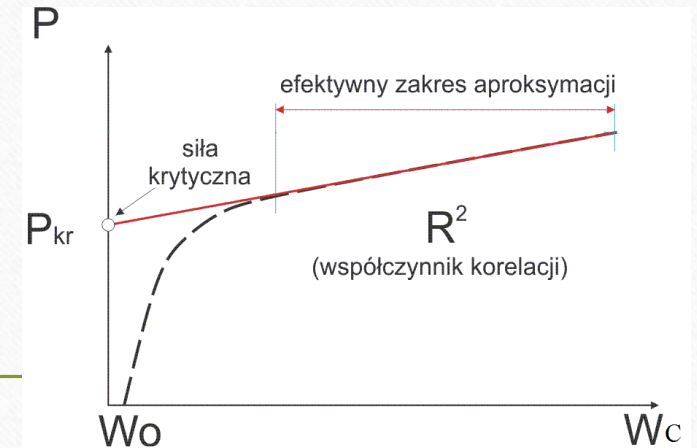
c)



Rys. 14. Aproksymacja pokrytycznej ścieżki równowagi struktury na podstawie metody $P-w_c^2$:
a) próba pierwsza, b) próba druga, c) próba trzecia

Wyniki- stan krytyczny

Wyznaczenie obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej – metoda $P-w^3$ (konfiguracja O3 [0/90/0/90]_s)

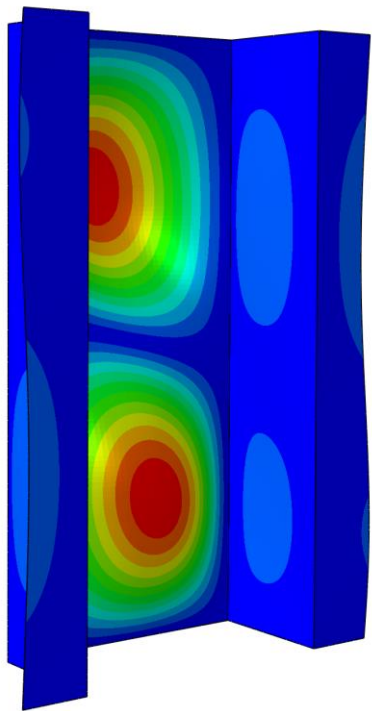


Rys. 15. Aproksymacja pokrytycznej ścieżki równowagi struktury na podstawie metody $P-w_c^3$:

a) próba pierwsza, b) próba druga, c) próba trzecia

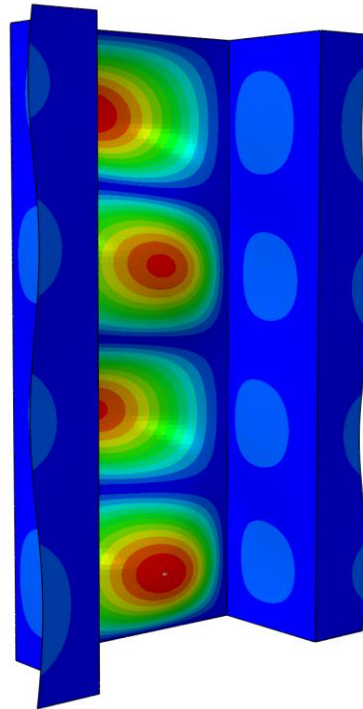
Wyniki-stan krytyczny

a)



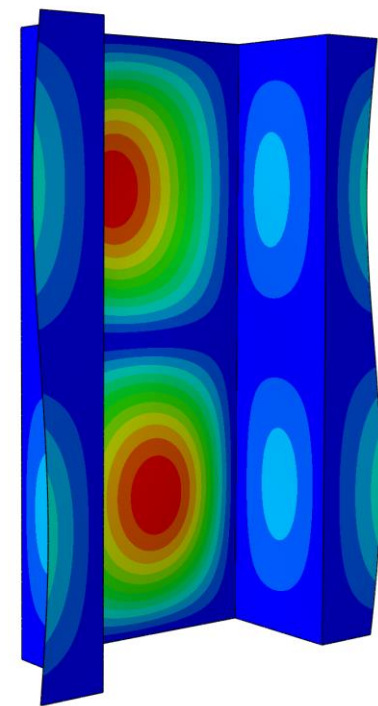
Mode 1: EigenValue = 6870.2 N

b)



Mode 1: EigenValue = 6903.4 N

c)



Mode 1: EigenValue = 6880.0 N

Rys. 16. Utrata stateczności konstrukcji – wynik obliczeń numerycznych (pierwsza postać utraty stateczności):
a) model o konfiguracji O1, b) model o konfiguracji O2, c) model o konfiguracji O3

Wyniki- stan krytyczny (podsumowanie)

Tab. 3. Zestawienie wartości obciążeń krytycznych wyznaczonych w badaniach doświadczalnych oraz obliczeniach MES

Układ	Próbka	Próba	Koiter	MES/Koiter	R ²	P-w ²	MES/P-w ²	R ²	P-w ³	MES/P-w ³	R ²	MES
			N	%		N	%		N	%		N
O1	1	1	7154,3	3,97	0,99	7561,2	9,14	0,96	7689,1	10,65	0,97	6870,2
		2	7065,7	2,77	0,99	7437,1	7,62	0,97	7577,4	9,33	0,98	
		3	6978,8	1,56	0,98	7355,5	6,60	0,97	7491,3	8,29	0,98	
	2	1	7099,6	3,23	0,99	7501,2	8,41	0,97	7623,4	9,88	0,96	
		2	7023,8	2,19	0,98	7444,7	7,72	0,98	7521,2	8,66	0,96	
		3	6943,7	1,06	0,98	7313,8	6,07	0,98	7448,9	7,77	0,97	
O2	1	1	7376,1	6,41	0,97	7634,6	9,58	0,98	7773,2	11,19	0,99	6903,4
		2	7303,6	5,48	0,98	7538,4	8,42	0,98	7672,8	10,03	0,98	
		3	7142,6	3,35	0,98	7388,6	6,57	0,98	7500,2	7,96	0,98	
O3	1	1	7195,8	4,39	0,99	7780	11,57	0,97	8065,9	14,70	0,95	6880
		2	7006,8	1,81	1,00	7273,7	5,41	1,00	7521,5	8,53	0,97	
		3	6905,2	0,36	1,00	7132,9	3,55	0,99	7454,4	7,71	0,96	
	2	1	6978,7	1,41	0,99	7321,8	6,03	0,97	8085	14,90	1,00	
		2	6897,7	0,26	0,99	7411,8	7,18	0,97	7980,6	13,79	1,00	
		3	6897,7	0,26	0,99	7461,8	7,80	0,97	7846	12,31	1,00	
	3	1	7268,8	5,35	1,00	7769,2	11,45	0,97	8086,3	14,92	0,95	
		2	7005,9	1,80	0,99	7639,6	9,94	0,97	8021,2	14,23	0,95	
		3	6911,3	0,45	0,99	7550,4	8,88	0,96	8007,7	14,08	0,95	

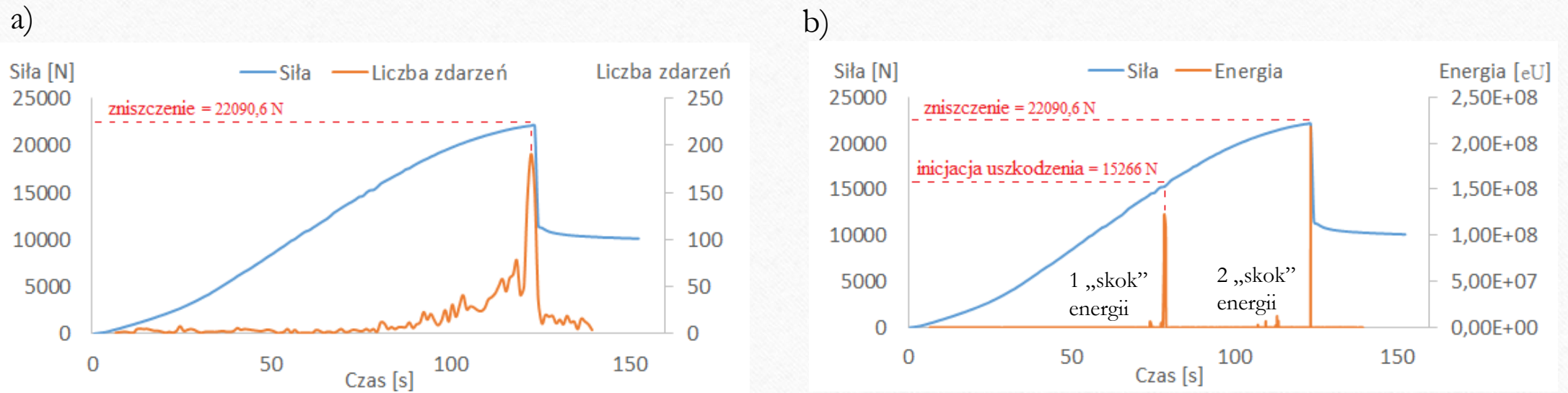
metoda Koiter'a wykazała największą zbieżność wyników z obliczeniami MES, gdzie różnica wyników nie przekraczała 6,5 %

maksymalna różnica wyników otrzymanych w badaniach doświadczalnych (metoda P-w³) oraz obliczeniach MES, wynosi około 15 %



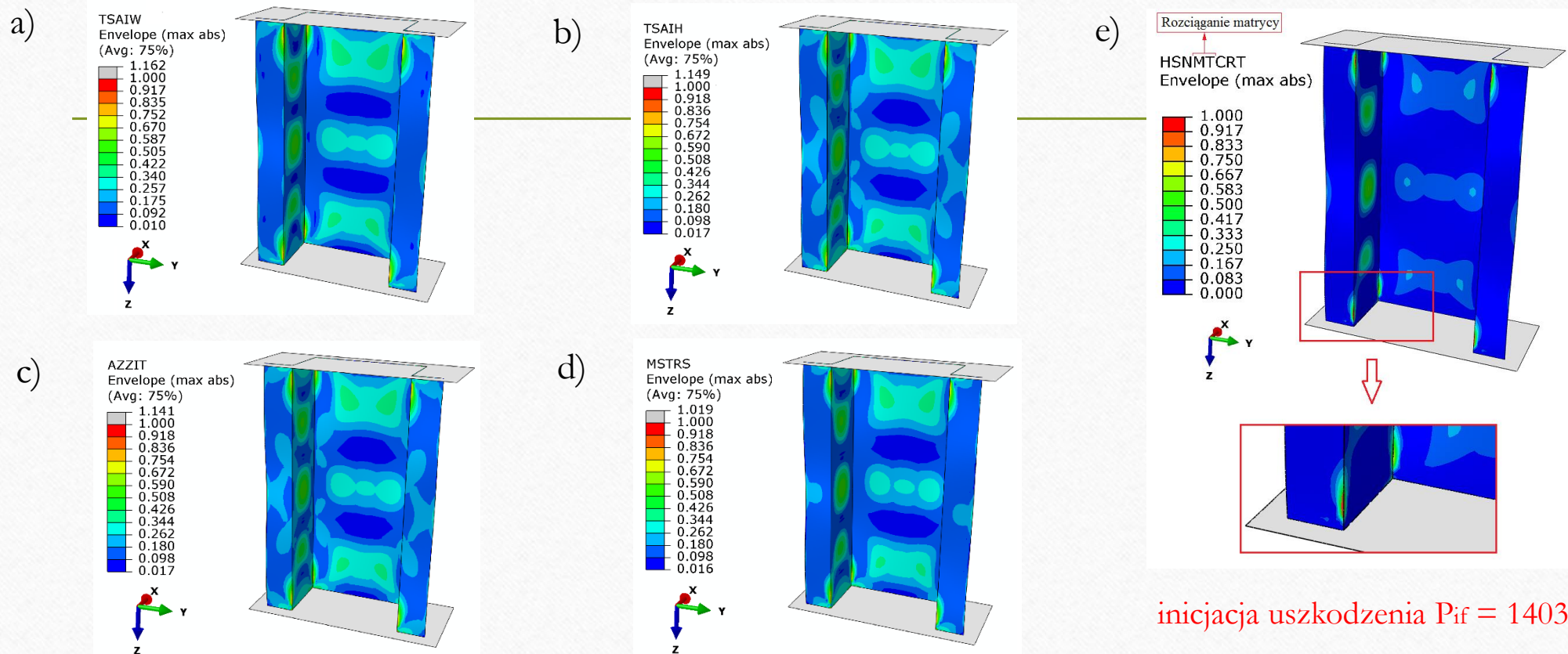
Wyniki-stan pokrytyczny

Występowanie lokalnych sygnałów emisji akustycznej w ramach stanu pokrytycznego, umożliwia wyznaczenie wartości obciążenia inicjującego uszkodzenie pierwszej warstwy kompozytu.



Rys. 17. Zależność siły ściskającej i parametrów MEA w czasie rzeczywistym – próbka 1 (O3): a) liczba zdarzeń, b) energia.

Wyniki-stan pokrytyczny



Rys. 18. Porównanie wyników inicjacji uszkodzenia w przypadku zastosowanych kryteriów inicjacyjnych – model O3:

a) TSAIW, b) TSAIH, c) AZZIT, d) MSTRS, e) HSNMTCRT.

Wyniki- stan pokrywczy (podsumowanie)

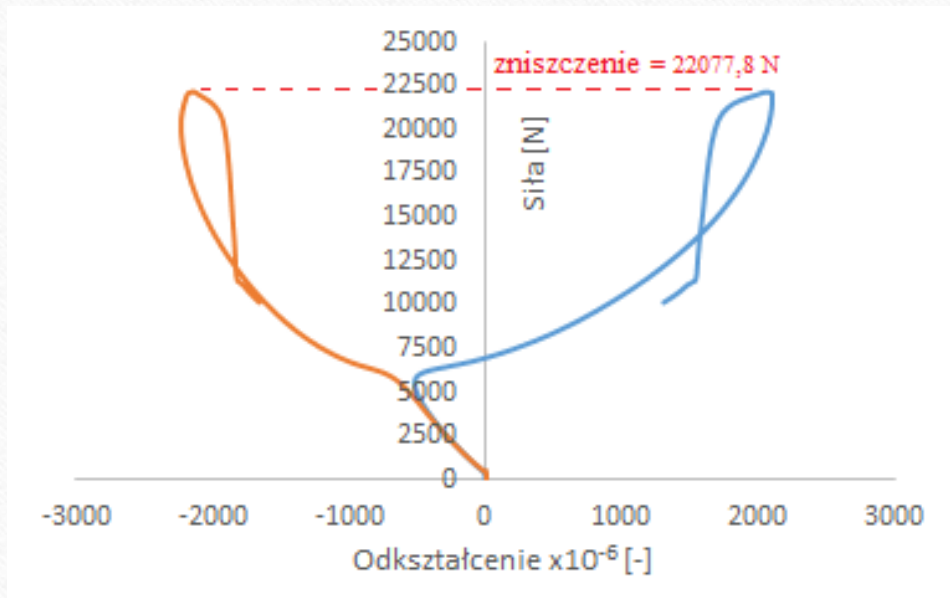
		MEA	MES	MES/MEA
Układ	Próbka	N	N	%
O1	1	10606	9579	9,68
	2	10638		9,95
O2	1	5334	4852	9,04
O3	1	15266	14032	8,08
	2	14613		3,98
	3	15031		6,65

maksymalna różnica wyników otrzymanych w badaniach doświadczalnych oraz obliczeniach MES nie przekracza 10% - co świadczy o wysokiej zbieżności rezultatów

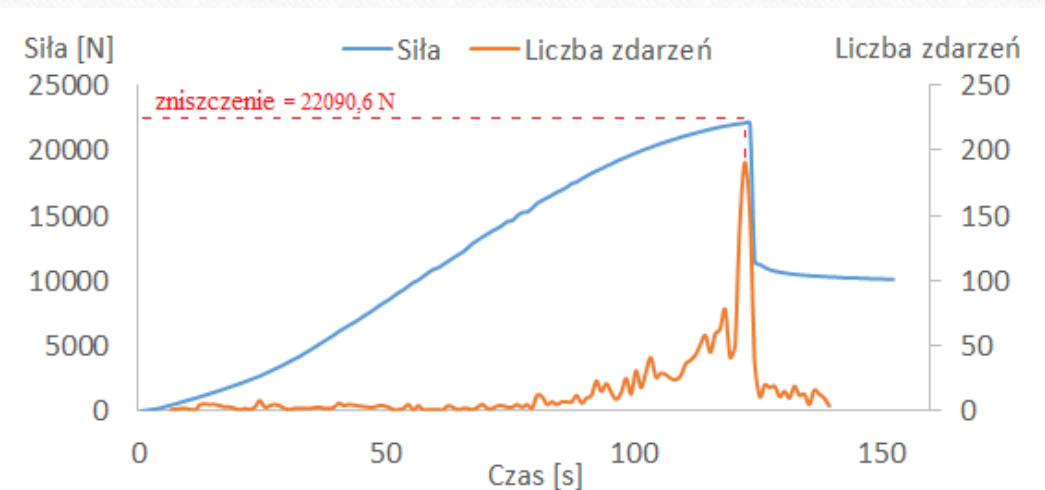
Tab. 4. Wartości obciążeń inicjujących uszkodzenie kompozytu

Wyniki-stan graniczny

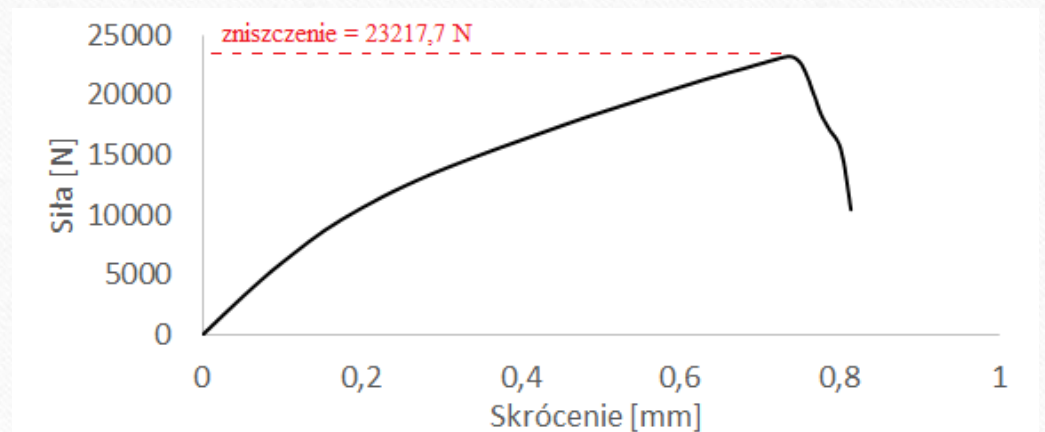
a)



b)



c)

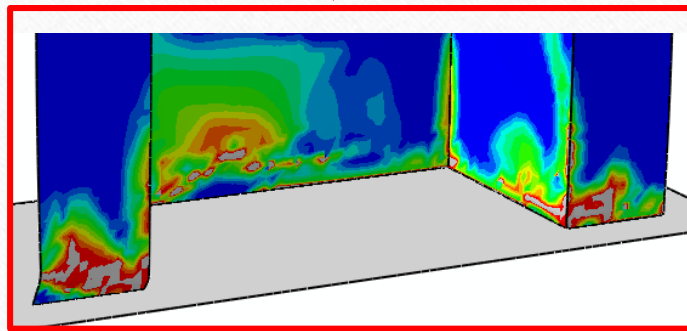
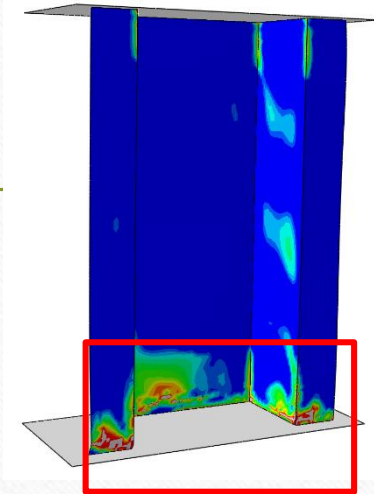


Rys. 19. Porównanie wyników stanu granicznego przykładowej konstrukcji (O3):

- a) pomiar odkształceń,
- b) pomiar parametrów MEA,
- c) wynik obliczeń MES.



Wyniki-stan graniczny



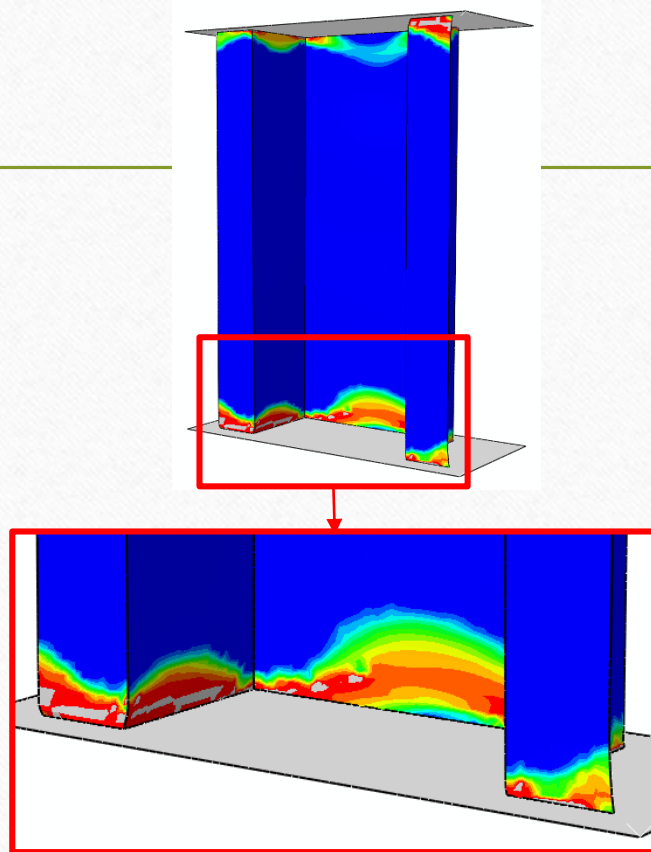
zniszczenie konstrukcji

(wysoka zgodność
jakościowa
obszaru zniszczenia)

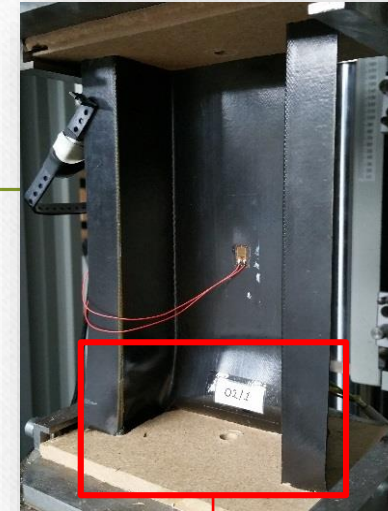


Rys. 20. Porównanie wyników stanu granicznego konstrukcji (O1): obliczenia MES (mapa DAMAGESHR) – badania doświadczalne

Wyniki- stan graniczny

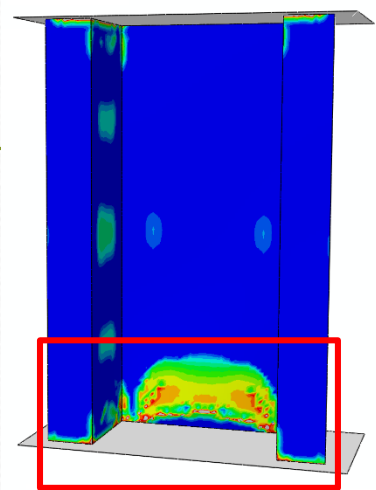


zniszczenie konstrukcji

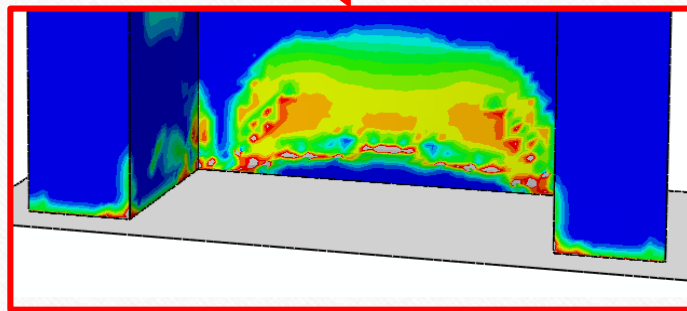
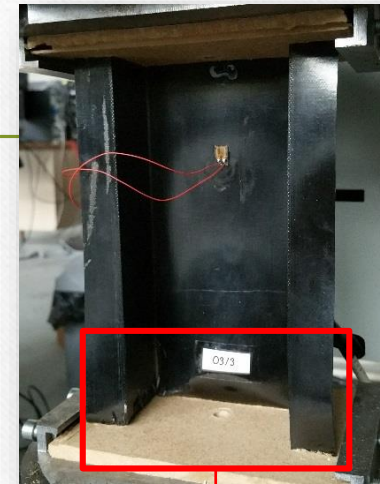


Rys. 21. Porównanie wyników stanu granicznego konstrukcji (O2): obliczenia MES (mapa DAMAGESHR) – badania doświadczalne

Wyniki-stan graniczny



zniszczenie konstrukcji



Rys. 22. Porównanie wyników stanu granicznego konstrukcji (O3): obliczenia MES (mapa DAMAGESHR) – badania doświadczalne

Wyniki- stan graniczny (podsumowanie)

		MEA	EKSP	MES
Słup	Próbka	N	N	N
O1	1	20906,9	20891,1	20828,7
	2	20165,6	20138,9	
O2	1	18734,4	18697,2	19723,1
O3	1	22090,6	22077,8	23217,7
	2	19712,5	19672,9	
	3	21006,3	20989,9	
		15,2 %	15,3 %	15,1 %

Tab. 5. Wartości obciążeń niszczących

maksymalna różnica
wyników otrzymanych
w badaniach
doświadczalnych oraz
obliczeniach MES
wynosi około 15 %

wpływ układu warstw kompozytu na zniszczenie badanych
słupów, wynosi niewiele ponad 15 % (maksymalna różnica)

Wnioski

- Do oceny wartości obciążenia krytycznego konstrukcji rzeczywistej, niezbędne jest wykorzystanie kilku niezależnych metod aproksymacyjnych. Pozwala to na dobór właściwej metody oceny, w zależności od analizowanych próbek.
- Analizy numeryczne wykorzystujące inicjacyjne kryteria uszkodzenia, umożliwiają określenie wartości obciążeń oraz lokalizację obszarów rozpoczynających zniszczenie laminatu. Zostało to pozytywnie zweryfikowane wynikami pomiarów MEA.
- Wykorzystanie w obliczeniach numerycznych progresywnej analizy zniszczenia, umożliwia oszacowanie obciążenia niszczącego, przy którym konstrukcja traci nośność oraz przeprowadzenie szczegółowego opisu mechanizmów zniszczenia materiału kompozytowego.
- Wykazano, iż możliwe jest opracowanie numerycznego modelu, uwzględniającego opis ewolucji uszkodzenia materiału kompozytowego, który zweryfikowano wynikami badań doświadczalnych, co potwierdziło słuszność postawionej tezy.



Publikacje wykorzystane w prezentacji

1. Rhodes J, Zaras J. *Determination of critical loads by experimental methods*, chapter. In: Kołakowski Z, Kowal-Michalska K, editors. *Statics, dynamics and stability of structural elements and systems*. Lodz: Lodz University of Technology, a series of monographs; 2012. p.477–99.
2. Paszkiewicz M., Kubiak T.: *Selected problems concerning determination of the buckling load of channel section beams and columns*. *Thin-Walled Structures*, vol. 93, 2015, p.112-121.
3. Van der Heijden AMA.: *W.T. Koiter's Elastic Stability of Solids and Structures*. Cambridge University Press, 2009.
4. Koiter WT.: *Elastic stability and post-buckling behaviour*. In: *Proceedings of the Symposium on Nonlinear Problems*, Univ. of Wisconsin Press, Wisconsin, 1963.
5. Venkataramaiah KR, 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, 45-74, (1982).
6. Tsai SW., Wu EM.: *A general theory of strength for anisotropic materials*. *Journal of Composite Materials*, vol. 5, no 1, 1971, p.58–80.
7. Hashin Z.: *Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites*. *Journal of Applied Mechanics*, t. 47, June 1980, p. 329-334.
8. Rozylo P, Teter A, Debski H, Wysmulski P, Falkowicz K. *Experimental and numerical study of the buckling of composite profiles with open cross section under axial compression*. *Appl Compos Mater* 2017, vol. 24, p.1251–64.



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

*Stateczność i stany graniczne ściskanych
cienkościennych profili kompozytowych*

POLITECHNIKA LUBELSKA
Katedra Podstaw Konstrukcji
Maszyn i Mechatroniki
dr inż. Patryk Różyło

Projekt „Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

