

Wyznaczanie smukłości płaszczy zbiorników stalowych z wykorzystaniem analiz MNA i LBA

Determination of the slenderness of steel tank shells using MNA and LBA analyses

dr inż. Kamil Słowiński (ORCID: 0000-0002-4225-520X), Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, prof. dr hab. inż. Marek Piekarczyk (ORCID: 0000-0003-0566-4749), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.7197

Streszczenie: W artykule omówiono kwestię interpretacji rezultatów analizy fizycznie nieliniowej (MNA) w zastosowaniu do oceny smukłości względnej powłok w ramach weryfikacji stateczności płaszczy zbiorników otwartych przy użyciu metody obliczeniowej MNA/LBA. Wykazano, że wskaźniki nośności plastycznej wyznaczone z analizy MNA, w oparciu o zapisy normy PN-EN 1993-1-6, mogły być bezpiecznie zastosowane do oceny smukłości względnej jedynie części analizowanych zbiorników. Dowiedziono przy tym, że wystarczająco dokładne było oszacowanie wartości tych wskaźników na podstawie rezultatów analizy liniowej (LA).

Słowa kluczowe: smukłość względna, analiza MNA/LBA, nośność plastyczna, zbiornik, powłoka.

Abstract: The article discusses the issue of interpreting the results of materially non-linear analysis (MNA) for the assessment of relative slenderness of shells as part of the verification of the stability of open tank shells using the MNA/LBA computational method. It was shown that the plastic reference resistance coefficients determined from the MNA analysis, based on the provisions of the PN-EN 1993-1-6 standard, could be safely used to assess the relative slenderness of only some of the analysed tanks. It was also proven that the estimation of the values of these coefficients based on the results of linear analysis (LA) was sufficiently accurate.

Keywords: relative slenderness, MNA/LBA analysis, plastic resistance, tank, shell.

1. Wprowadzenie

Wytyczne ECCS TC8 TWG 8.4 Shells [1] wskazują na metodę MNA/LBA jako potencjalne narzędzie weryfikacji stateczności powłok stalowych w oparciu o zapisy normy PN-EN 1993-1-6 [2]. Jedną z najbardziej problematycznych kwestii związanych z praktycznym wykorzystaniem metody MNA/LBA w projektowaniu płaszczy zbiorników jest interpretacja rezultatów analizy fizycznie nieliniowej MNA w kontekście ich zastosowania – łącznie z rezultatami analizy bifurkacyjnej LBA – do oceny smukłości względnej płaszczy. Trudności te wynikają przede wszystkim z akcentowanego w wytycznych [1], ale nie wyartykułowanego w normie [2], założenia o potrzebie uwzględnienia w procedurze oceny smukłości możliwości wystąpienia interakcji zjawisk wyboczenia i uplastycznienia w powłoce. W takim ujęciu obszary deformacji wyboczeniowych i uplastycznienia (towarzyszącego osiągnięciu plastycznego mechanizmu zniszczenia płaszcza) powinny występować w podobnej lokalizacji na powierzchni płaszcza. Jak się jednak okazuje, taka wzorcowa sytuacja nie zawsze jest regułą w przypadku płaszczy zbiorników cylindrycznych. Wówczas należy zachować ostrożność w przyjmowaniu wartości wskaźnika referencyjnej nośności plastycznej R_{pr} wyznaczonego wprost z MNA wg normy [2]. Wskaźnik ten, obok wskaźnika nośności krytycznej R_{cr} otrzymanego

z LBA, stanowi bowiem kluczową wielkość potrzebną do oceny smukłości względnej powłoki cylindrycznej.

W artykule przedstawiono propozycję sposobu postępowania w sytuacji pojawienia się wątpliwości co zasadności zastosowania rezultatów analizy MNA do celu oceny smukłości względnej płaszczy zbiorników otwartych (np. z dachem pływającym).

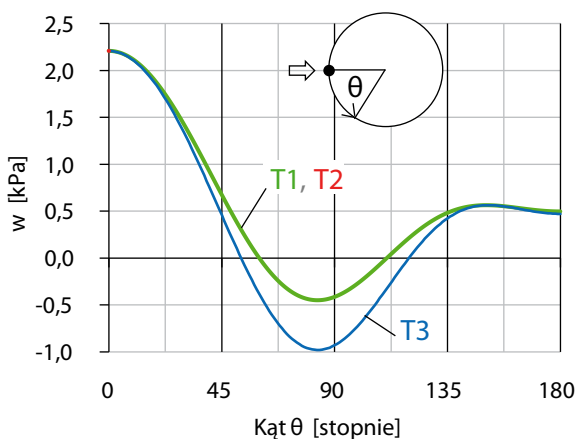
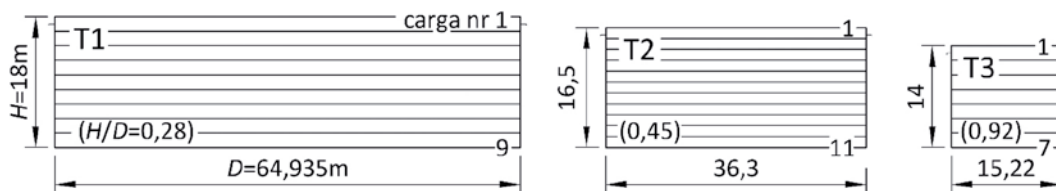
2. Modele obliczeniowe

Analizom poddano zbiorniki o trzech zróżnicowanych wartościach H/D , gdzie H i D oznaczają wysokość i średnicę płaszcza (rys. 1) oraz zmiennej lub stałej grubości ścianek płaszcza (odpowiednio modele TV i TC w tabeli 1). Modele zbiorników wykonano w programie Abaqus [3]. Powłoki cylindryczne odwzorowujące płaszcze zbiorników wyposażono w pierścien wiatrowy o przekroju dobranym wg normy PN-EN 14015:2010, zlokalizowany 1 m poniżej górnej krawędzi powłoki. Do analiz liniowych przyjęto charakterystyki materiałowe jak dla stali konstrukcyjnej według PN-EN 1993-1-1. Analizę fizycznie nieliniową wykonano z użyciem sprężysto-idealnie plastycznej charakterystyki materiału, z granicą plastyczności na poziomie 235 MPa. Powłoki obciążone zostały ciśnieniem o rozkładzie nieliniowym na obwodzie ustalonym według [4], odwzorowującym oddziaływanie wiatru na obszarze brzegowym otwartym na morze zgodnie z [5] (rys. 2).

Tabela 1. Grubości ciał płaszczy analizowanych zbiorników (mm)

Numer ciał	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T1V	17	17	17	19	19	22	22	24	24	-	-
T1C	24	24	24	24	24	24	24	24	24	-	-
T2V	6	6	7	9	11	13	15	16	18	20	22
T2C	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
T3V	5	5	5	5	6	6	8	-	-	-	-
T3C	8	8	8	8	8	8	8	-	-	-	-

Rys. 1. Parametry geometryczne zbiorników [m]



Rys. 2. Rozkład ciśnienia wiatru na obwodzie zbiorników (z uwzględnieniem podciśnienia wewnątrz zbiorników)

3. Wyznaczenie wskaźników nośności krytycznej i plastycznej

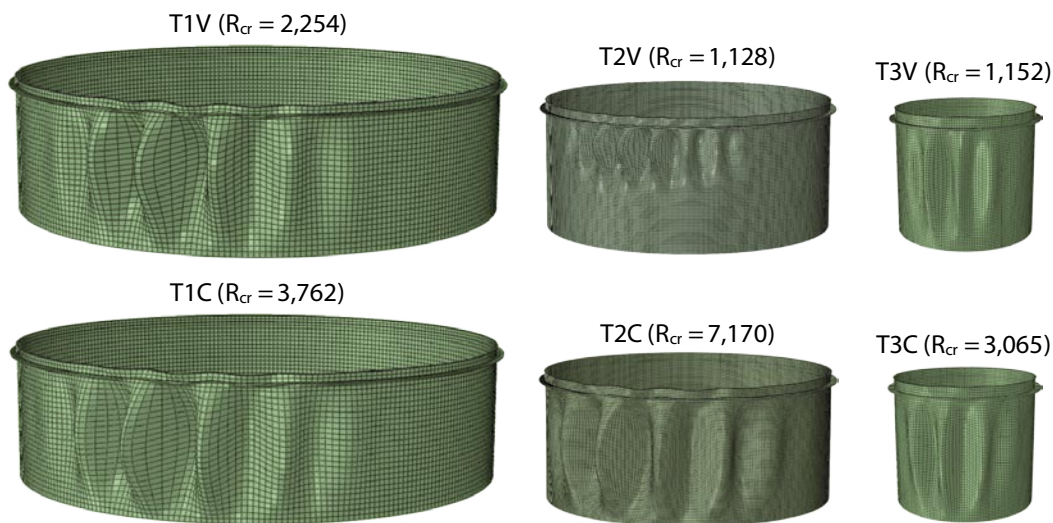
Wskaźniki nośności krytycznej R_{cr} wyznaczone według [2], jako równe najniższej (miarodajnej) wartości własnej otrzymanej z analizy bifurkacyjnej (LBA). Wartości tych wskaźników

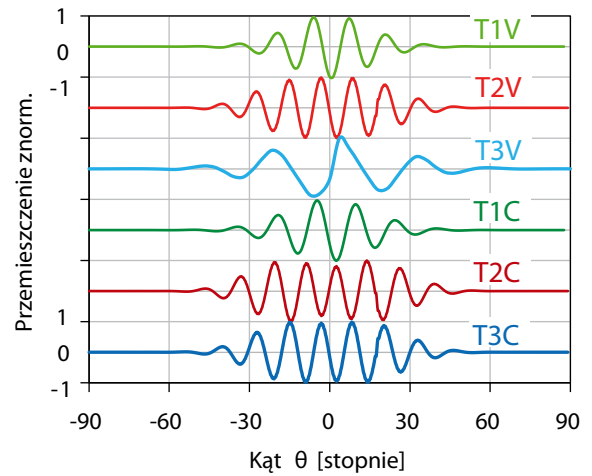
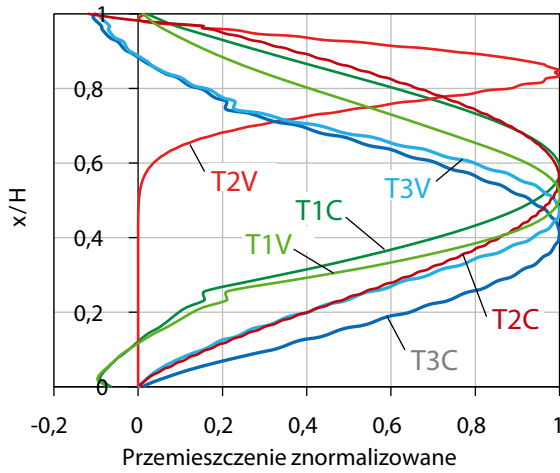
oraz odpowiadające im deformacje wyboeczeniowe przedstawiono na rysunku 3. Można zauważyć, że deformacje wyboeczeniowe obejmowały jedynie obszar ciśnienia zewnętrznego (parcia) po stronie nawietrznej płaszczy (rys. 4). Na potrzeby dalszych rozważań można zaznaczyć, że obszar największych deformacji wyboeczeniowych występował w przedziale od ok. 38 do 85% wysokości płaszczy, licząc od dolnej krawędzi.

Wskaźniki nośności plastycznej R_{pl} wyznaczone z kolei z analizy fizycznie nieliniowej (MNA), jako równe mnożnikom obciążenia, przy których osiągnięty został plastyczny mechanizm zniszczenia powłok. Analizę wykonano z użyciem algorytmu Riksa, stanowiącego modyfikację metody przyrostu długości łuku [3].

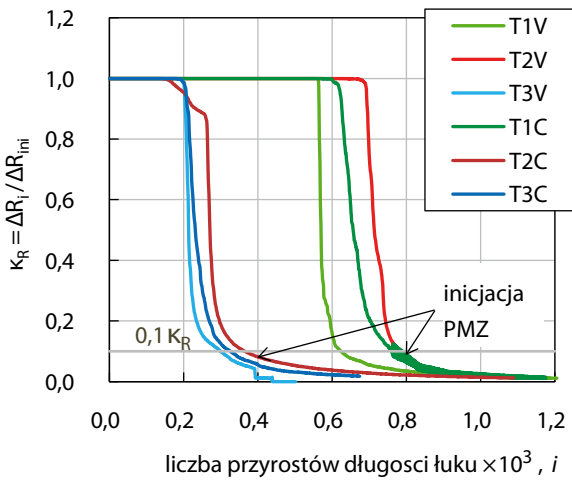
Do celu identyfikacji momentu rozwinięcia się plastycznego mechanizmu zniszczenia powłok wykorzystano autorską metodę [6] w postaci zależności między znormalizowanym mnożnikiem obciążenia κ_R i liczbą przyrostów długości łuku i (rys. 5). W sprężystym zakresie pracy materiału powłok, odpowiadającym poziomemu odcinkowi zależności, przyrost wartości mnożnika obciążenia ΔR_i w i -tym kroku

Rys. 3. Pierwsze postaci wyboeczenia płaszczy wraz z odpowiadającymi im wartościami własnymi R_{cr}





Rys. 4. Deformacje wybočeníowe na kierunku (od lewej) południkowym i obwodowym



Rys. 5. Wykres zależności między znormalizowanym przyrostem mnożnika obciążenia κ_R i liczbą przyrostów długości łuku i

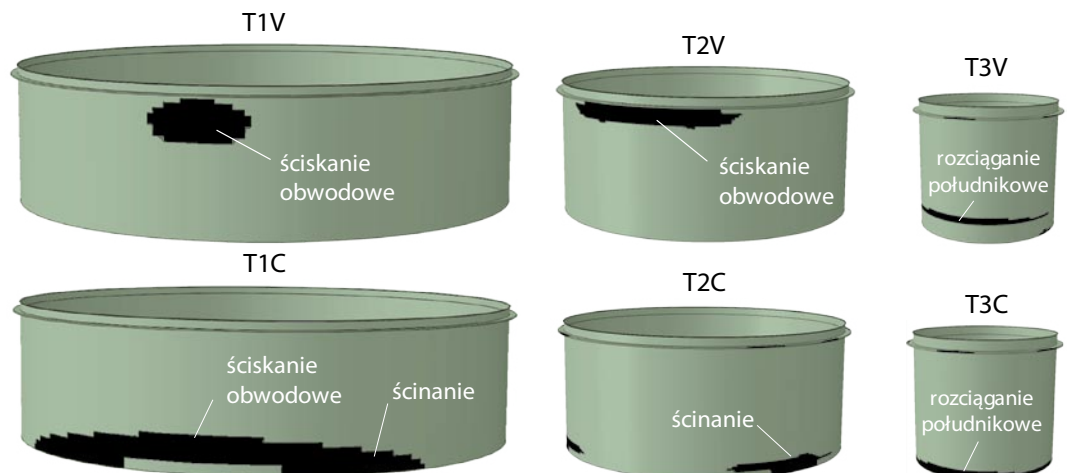
obliczeniowym jest równy początkowej wartości przyrostu (tego) mnożnika, tj. ΔR_{ini} (ustalanej jako różnica między wielkościami otrzymanymi w pierwszym i drugim kroku obliczeniowym). Jak wykazano w [6], rozwój uplastycznienia

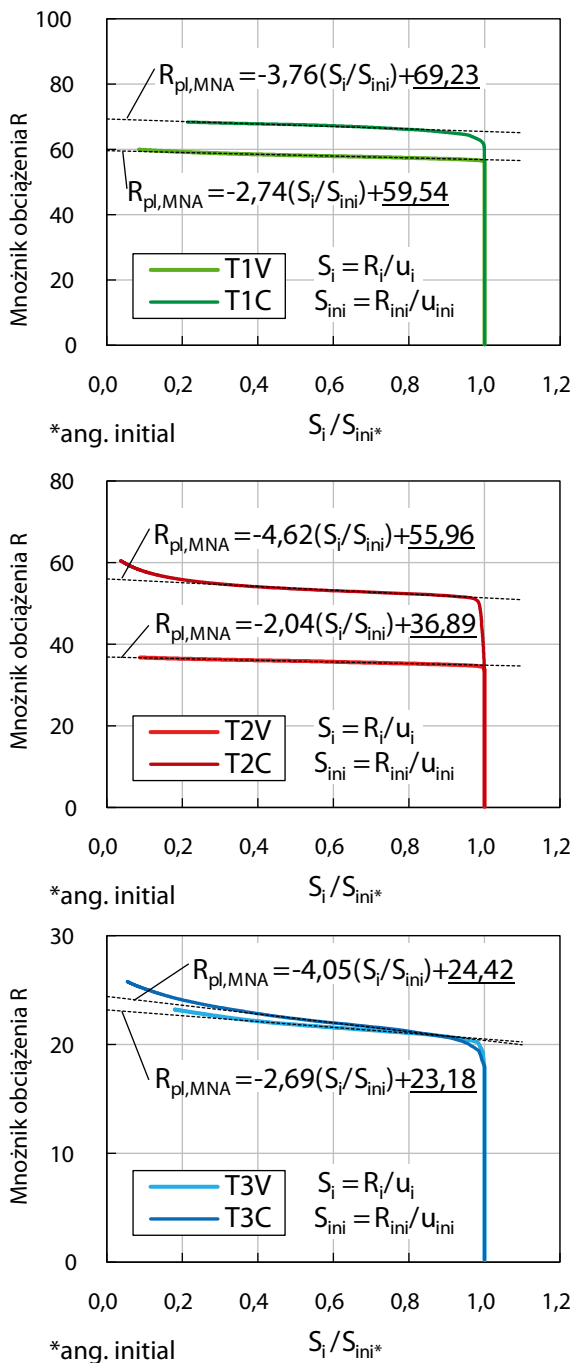
oraz inicjacja plastycznego mechanizmu zniszczenia (PMZ) w powłokach odpowiadają odcinkom zależności, odpowiednio o przebiegu zbliżonym do pionowego oraz w obszarze przejścia do niemalże poziomej części zależności przy $\kappa_R \leq 0,1$. Lokalizację stref uplastycznienia towarzyszących osiągnięciu PMZ oraz dominujące składowe stanu naprężenia w tych strefach pokazano na rysunku 6.

Z uwagi na problemy związane z precyzyjnym wyznaczeniem wartości wskaźników nośności plastycznej wg zaleceń normy [2] (por. [6]), wskaźniki te wyznaczone z wykorzystaniem pomocniczej metody graficznej w postaci zmodyfikowanej zależności Southwella (MS) [7]. Wykresy MS dla wszystkich analizowanych modeli, sporządzone w postaci zależności między mnożnikiem obciążenia R_i i znormalizowaną sztywnością sieczną S_i/S_{ini} określoną w wybranym punkcie płaszcza przedstawiono na rysunku 7. Wartości wskaźników nośności plastycznej $R_{pl,MNA}$ odczytane zostały w miejscu przecięcia się osi rzędnych ze styczną do fragmentu zależności o przebiegu zbliżonym do poziomego.

Na potrzeby dalszych rozważań wskaźniki nośności plastycznej wyznaczone także w sposób uproszczony wg normy [2] z zależności (1):

Rys. 6. Strefy uplastycznienia wraz z dominującymi składowymi stanu naprężenia, zarejestrowane w momencie rozwinięcia się plastycznego mechanizmu zniszczenia





Rys. 7. Wykresy zmodyfikowanej zależności Southwella

$$R_{pl,LA} = t \cdot f_{yk} / \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{x,ED} \cdot n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2 + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (1)$$

gdzie:

f_{yk} – charakterystyczna granica plastyczności,
 t – grubość ścianki płaszczca,
 $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ i $n_{x\theta,Ed}$ – przekrojowe siły błonowe, odpowiednio, południkowe, obwodowe i ścinające, otrzymane z analizy LA. Istotną zmianą w stosunku do zaleceń normy [2] było odczytanie wartości ww. sił w miejscach największych deformacji wyboczeniowych zarejestrowanych w analizie LBA zamiast, zgodnie z [2], w punktach, w których zarejestrowano

maksymalne wartości miarodajnych przy wyboczeniu wypadkowych naprężeń błonowych. Argumentację dla takiego sposobu postępowania przedstawiono w kolejnym punkcie opracowania. Wskaźniki nośności plastycznej wyznaczone z analiz MNA i LA zestawiono ze sobą w tabeli 2.

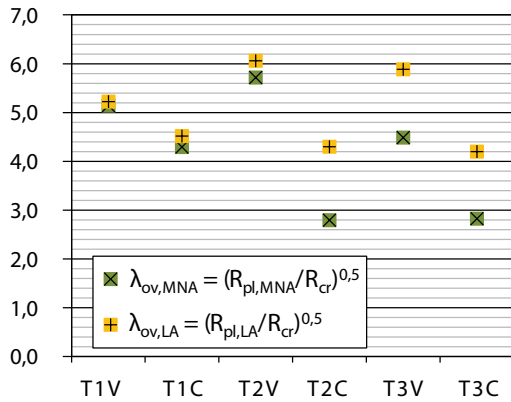
Tabela 2. Wartości wskaźników nośności plastycznej

Model	T1V	T1C	T2V	T2C	T3V	T3C
$R_{pl,MNA}$	59,54	69,23	36,89	55,96	23,18	24,42
$R_{pl,LA}$	61,52	76,72	41,39	132,62	39,90	52,10
$R_{pl,MNA}/R_{pl,LA}$	0,97	0,90	0,89	0,42	0,58	0,45

4. Określenie smukłości względnej

Jak wspomniano we wprowadzeniu, problematyczną kwestią w procesie wyznaczania smukłości względnej powłok może być założenie o możliwości wystąpienia interakcji między zjawiskami wyboczenia i uplastycznienia. Założenie to wynika z dążenia do „powiązania” ze sobą lokalnej postaci wyboczenia powłoki z obszarem uplastycznienia towarzyszącym rozwinięciu się plastycznego mechanizmu zniszczenia tej powłoki. Z porównania rysunków 3, 4 oraz 6 można jednak wyciągnąć wniosek, że powyższe założenie zostało spełnione tylko dla modeli T1V i T1C oraz T2V tj. odpowiednio o najniższym H/D w grupie analizowanych płaszczczy oraz o $H/D = 0,45$ i zmiennej grubości ścianki płaszczca. Co ważne, w obszarach deformacji wyboczeniowych oraz uplastycznienia, zarejestrowanych dla tych modeli, decydującą składową stanu naprężenia było ściskanie na kierunku obwodowym (rys. 3, 6). Z tego względu, otrzymane dla rozważanych trzech modeli, wskaźniki $R_{pl,MNA}$ i $R_{pl,LA}$ (tab. 2), jak i smukłości względne $\lambda_{ov,MNA}$ i $\lambda_{ov,LA}$ obliczone z uwzględnieniem tych wskaźników (rys. 8), osiągnęły zbliżone wartości.

W przypadku pozostałych modeli, tj. T2C oraz T3V i T3C, tj. odpowiednio o $H/D = 0,45$ i stałej grubości ścianki oraz o najwyższym H/D w grupie analizowanych płaszczczy, obszary deformacji wyboczeniowych (rys. 4) i uplastycznienia (rys. 6) były od siebie zauważalnie odseparowane, a w obszarach tych dominowały odmienne składowe stanu naprężenia (rys. 6). To ostatnie tłumaczy zaobserwowane różnice między wartościami, zarówno wskaźników $R_{pl,MNA}$ i $R_{pl,LA}$ (tab. 2), jak i odpowiadającym im smukłości względnych $\lambda_{ov,MNA}$ i $\lambda_{ov,LA}$ (rys. 8). Wartości wskaźników $R_{pl,MNA}$ wskazują bowiem na rzeczywistą nośność plastyczną omawianych zbiorników, natomiast wskaźniki $R_{pl,LA}$ mogą być traktowane jako przybliżenie nośności plastycznej wyboczonego obszaru płaszczca. Dlatego uwzględnienie w procedurze oceny smukłości względnej modeli T2C oraz T3V i T3C założenia o możliwości interakcji zjawisk wyboczenia i uplastycznienia, wymaga przyjęcia do obliczeń wskaźnika wyznaczonego z analizy liniowej (LA). Uwzględnienie rezultatów analizy MNA wiązałoby się natomiast z zauważalnym



Rys. 8. Wartości smukłości względnej obliczone z wykorzystaniem rezultatów analiz MNA i LA

zaniżeniem smukłości względnej płaszczy omawianych zbiorników (rys. 8, tab. 3).

Tabela 3. Relacja między wartościami smukłości względnej obliczonymi na bazie rezultatów analiz MNA i LA

Model	T1V	T1C	T2V	T2C	T3V	T3C
$\lambda_{ov,MNA}/\lambda_{ov,LA}$	0,98	0,95	0,94	0,65	0,76	0,67

5. Podsumowanie

Rezultaty przeprowadzonych analiz wykazały, że wskaźniki nośności plastycznej wyznaczone z analizy fizycznie nieliniowej (MNA), zgodnie z normą PN-EN 1993-1-6, okazały się miarodajne do oceny smukłości względnej płaszczy jedynie dla części analizowanych zbiorników. Wątpliwości co do zasadności wykorzystania rezultatów analiz MNA budziły sytuacje, kiedy obszary dominujących deformacji wybojeniowych i uplastycznienia – otrzymane z analiz, odpowiednio, LBA i MNA – były wyraźnie odseparowane od siebie na powierzchni płaszcza,

a dominujące składowe stanu naprężenia w tych obszarach nie były tożsame. Wykazano, że wskaźniki nośności plastycznej otrzymane z analizy MNA, odpowiadające osiągnięciu plastycznego mechanizmu zniszczenia powłok, stanowiły wówczas od 42% do 58% wskaźników wyznaczonych w sposób uproszczony dla obszaru wybożenia, na podstawie rezultatów analizy liniowej.

W sytuacji kiedy zjawiska wybożenia i uplastycznienia rozwijały się w zbliżonych lokalizacjach na powierzchni płaszcza, przy jednakowych (jakościowo) dominujących składowych stanu naprężenia w tych obszarach, rezultaty analiz MNA i LA były do siebie zbliżone.

Można zatem stwierdzić, że oszacowanie wielkości wskaźników nośności plastycznej na podstawie zaproponowanego podejścia, tj. dla obszaru deformacji wybozeniowych i na bazie rezultatów analizy liniowej (LA), jest wystarczająco dokładne do celów oceny smukłości płaszczy analizowanych zbiorników. Zastosowanie takiego sposobu oceny nośności plastycznej jest szczególnie uzasadnione w przypadku wątpliwości, co do zasadności wykorzystania wyników analizy MNA.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ECCS TC8 TWG 8.4, Shells. Buckling of steel shells. European Design Recommendations, 5th edition, ECCS, Portugal, 2008
- [2] PN-EN 1993-1-6:2009: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych
- [3] Abaqus Standard User's Manual – Version 5.8, Hibbit, Karlsson and Sorenson Inc., 2000
- [4] PN-EN 1993-4-1:2009: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-1: Silosy
- [5] PN-EN 1991-1-4:2008: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru
- [6] Słowiński K., Piekarczyk M., FEM determination of the plastic limit load for cylindrical shells, Czasopismo Techniczne, tom 116, 2019, doi:10.4467/2353737XCT.19.128.11453
- [7] Holst M., Doerich C., Rotter M., Accurate determination of the plastic collapse loads of shells when using finite element analyses, [w:] Fourth International Conference on Advances in Steel Structures, 2005, str. 1789–1794, doi:10.1016/B978-008044637-0/50267-5

StatSoft Polska

XXVIII KONFERENCJA

ZASTOSOWANIE STATYSTYKI I DATA MINING W BADANIACH NAUKOWYCH

17 października 2024 r.

ZAPRASZAMY

prof. Andrzej SOKOŁOWSKI
Katedra Statystyki,
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie
O poprawnym stosowaniu statystyki w publikacjach naukowych
– spojrzenie statystyka

dr hab. Paweł KLEKA, prof. UAM
Zakład Podstaw Badań Psychologicznych,
Wydział Psychologii i Kognitywistyki,
Uniwersytet im. A. Mickiewicza
Julia i Romeo w ogrodzie rozwidlających się ścieżek – nieszczęśliwa miłość psychologów do statystyki

dr Grzegorz MIGUT
Dyrektor Działu Technicznego,
StatSoft Polska
Budowa skutecznych modeli uczenia maszynowego
– co determinuje ich jakość?

dr inż. Maja KĘPNIAK
Instytut Inżynierii Budowlanej,
Polskiego Państwa Wzrostowa
Ustalanie predyktorów oraz planowanie eksperymentu na przykładzie zapraw geopolimerowych o właściwościach termoizolacyjnych

dr Michał BRZÓZOWSKI
Katedra Ekologii i Ochrony Środowiska,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Rola ekologiczna, zastosowanie oraz ochrona ramienic w ekosystemach wodnych w dobie zmian klimatycznych

dr Janusz WĄTROBA
Dyrektor ds. dydaktyki i współpracy naukowej,
StatSoft Polska
Eksploatacja danych i budowa modelu powiązań zmiennych na przykładzie analizy regresji wielorakiej

StatSoft Polska

© StatSoft Polska Sp. z o.o. ul. Kraszewskiego 36 30-110 Kraków ☎ 12 428 43 00 ✉ info@StatSoft.pl

PATRON

PATRONI MEDIALNI

Wiedza i życie

SWIATNAUKI

FORUM

WIADOMOŚCI STATYSTYCZNE

dlaStudenta.pl

budowlany

114

PRZEGLĄD BUDOWLANY 5/2024