

Problemy z oceną jakości wykonania walcowych powłok stalowych



dr hab. inż.
EUGENIUSZ HOTAŁA, PROF. PWR
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0003-2286-8436



mgr inż.
DAMIAN KOZIKOWSKI
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0002-3410-9595

W pracy wykazano, że istniejące normowe oraz literaturowe zasady oceny klasy jakości wykonania powłok i wynikające z takich ocen wartości nośności wybojeniowych mogą w wielu przypadkach dawać znacznie zaniżone wartości w stosunku do realnych nośności, wyznaczonych na podstawie indywidualnych analiz GMNIA.

Wprowadzenie

Prawidłowa ocena jakości wykonania stalowych walcowych powłok silosów i zbiorników to zagadnienie, które ma bezpośredni wpływ na ocenę bezpieczeństwa eksploatacji takich konstrukcji. Imperfekcje w postaci lokalnych promieniowych wgłębień w_0 blach powłok mają bardzo duży wpływ na ich nośność przy ściskaniu południkowym, determinowaną utratą stateczności, szczególnie w powłokach o dużej smukłości r/t . Powszechnie stosowane uproszczone pomiary imperfekcji nie uwzględniają wielu parametrów, w tym realnej geometrii wgniecia, co ma bezpośredni wpływ na błędnie oszacowaną nośność powłoki. Ocena jakości wykonania powłok powinna opierać się na szczegółowej analizie kształtu oraz intensywności imperfekcji, które to parametry są pomijane w procedurach spotykanych w literaturze i normach. Niniejsza praca ma na celu zwrócenie uwagi na potrzebę rewizji aktualnie stosowanych metod pomiarowych od-

chylek wykonawczych stalowych powłok cylindrycznych oraz sposobu ich uwzględniania w ocenie nośności tych powłok. Zaprezentowane analizy ograniczono do przypadku pomiarów imperfekcji cylindrycznej powłoki stalowej w postaci wgłębień, mierzonych jedynie w kierunku południkowym.

Imperfekcje w powłokach rzeczywistych

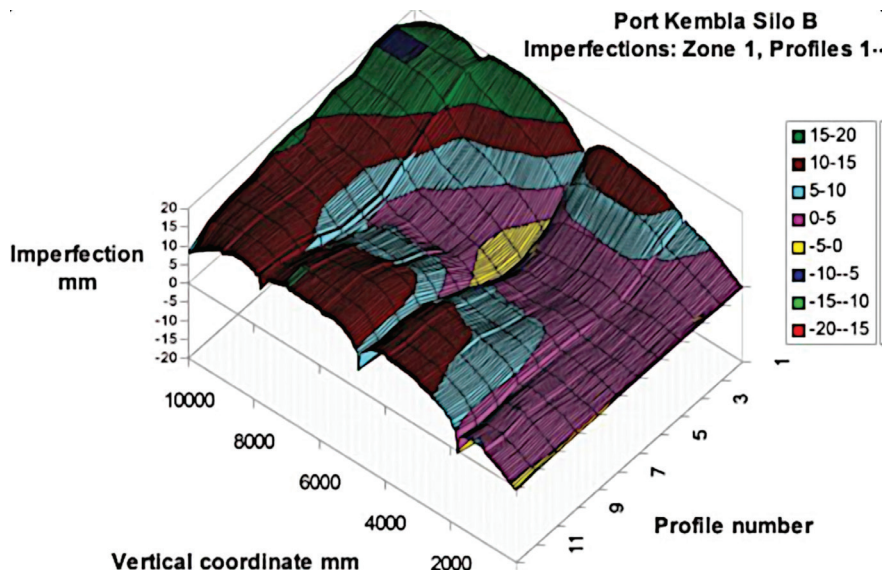
Zjawisko występowania imperfekcji w stalowych powłokach jest ściśle związane z metodą ich wytwarzania. Proces spawania powłoki z arkuszy blach powoduje powstanie w niej zrównoważonego pola naprężeń. Część tych naprężeń przekracza wartość granicy plastyczności stali, co skutkuje trwałą deformacją powłoki [1]. Przy okazji wielu badań, mających na celu pomiar konstrukcji spawanych z cienkich blach, zauważono, że imperfekcja obwodowa w miejscu występowania spoiny jest wyraźnie zauważalna. Jest ona do tego stop-

nia reprezentatywna dla powłoki, że może posłużyć do przybliżenia geometrii wynikającej z procesu realizacji konstrukcji [2]. Obwodową imperfekcją spawalniczą można wyraźnie zauważyć na trójwymiarowym skanie stalowej powłoki spawanej, wykonanej przez Rottera i innych przy okazji badania silosu w Port Kembla [3]. Uzyskany w tych badaniach wykres, przedstawiający realną geometrię wykonanej powłoki, zaprezentowano na rys. 1.

Jako pierwsi systematycznego opisu takiej imperfekcji spawalniczej dokonali Rotter i Teng w 1989 roku w pracy [4]. Zaproponowany przez nich model deformacji spawalniczej zdobył dużą popularność oraz przez lata podlegał dalszym badaniom i modyfikacjom. Dokonywano kalibracji tego modelu na podstawie pomiarów wykonanych na powłokach rzeczywistych [5]. Ostatecznie imperfekcję spawalniczą można określić na podstawie wzoru:

$$\Delta w = \Delta w_0 e^{-\left(\frac{\pi x}{0,97 \lambda_0}\right)^2} \left[\cos \frac{\pi x}{0,97 \lambda_0} + 0,49 \cdot \sin \frac{\pi x}{0,97 \lambda_0} \right] \quad (1)$$

gdzie: x to współrzędna osiowa, w_0 to amplituda imperfekcji mierzona względem powierzchni środkowej, a $\lambda_0 = 2,44(rt)^{1/2}$ to długość wybojeniowej półfali południkowej. Nośność ściskanych osiowo powłok cylindrycznych diametralnie spada, gdy wprowadzone są do nich imperfekcje osiowosymetryczne. Jako pierwszy tego odkrycia dokonał Koiter w 1945 roku w pracy [6]. Zarzucano mu wtedy, że rozpatrywane przez niego imperfekcje w postaci sinusoidalnych fal osiowosymetrycznych nie znajdują odzwierciedlenia w powłokach rzeczywistych, więc nie jest zasadne ich rozpatrywanie przy ocenie nośności powłoki. Imperfekcje zaproponowane przez Rottera i Tenga wywołują w powłoce porównywalne obniżenie nośności, a jednocześnie biorą swoje źródło w badaniach na powłokach rzeczywistych.



Rys. 1. Wyniki pomiaru geometrii cylindrycznej powłoki stalowego silosu w Port Kembla [3]

Pomiar imperfekcji w powłokach rzeczywistych

Na podstawie źródeł literaturowych i powszechnie znanych wytycznych oceny jakości wykonania powłoki dokonuje się za pomocą prostych pomiarów z użyciem przymiarów geometrycznych. Takie podejście można znaleźć w obowiązującej normie projektowej [7], a także w starej polskiej normie dotyczącej projektowania silosów [8] opartej na normie DIN [9], jak również w podręczniku Samuelsona i Eggwertza [10]. Nie udało się ustalić, skąd dokładnie bierze swoje źródło ta metoda pomiarowa, jednak z dużym prawdopodobieństwem wynika ona z rozwiązania klasycznego liniowo-sprężystej teorii wyboczeniowej [11]. Przymiar geometryczny o założonej długości $l_{gx} = 4(rt)^{1/2}$ ma dać możliwość sprawdzenia, czy zaobserwowane w powłoce imperfekcje nie są zbliżone do jej klasycznej formy wyboczeniowej. Przez wiele lat taka właśnie forma deformacji wstępnej była uważana za najbardziej niekorzystną dla powłoki ściskanej. Dodatkowo w świetle przedstawionych badań nad imperfekcjami spawalniczymi powłokę w miejscach występowania połączeń blach należy zmierzyć przymiarem o długości $l_{gw} = 25t$. Jest to rozszerzenie wytycznych co do oceny jakości wykonania powłoki, które można znaleźć w normie [7].

Skalibrowany model imperfekcji spawalniczej wg wzoru (1) postanowiono poddać analizie, używając dwóch różnych przymiarów geometrycznych, by sprawdzić, w jaki sposób ta deformacja przyczynia się do oceny jakości wykonania powłoki. W tym celu przyjęto powłokę walcową o następującej geometrii: promień $r = 1,5$ m, wysokość $H = 6,0$ m i grubość ścianki $t = 0,003$ m. Założono, że bezwymiarowa amplituda imperfekcji wynosi $w_0/t = 1$. Przymiary o długości l_{gx} i l_{gw} przykładano do powłoki względem współrzędnej osiowej x , jak zostało to przedstawione na rys. 2. Obwodowa imperfekcja spawalnicza (wglębienie) występuje w środku wysokości powłoki $x = 0,5H$.

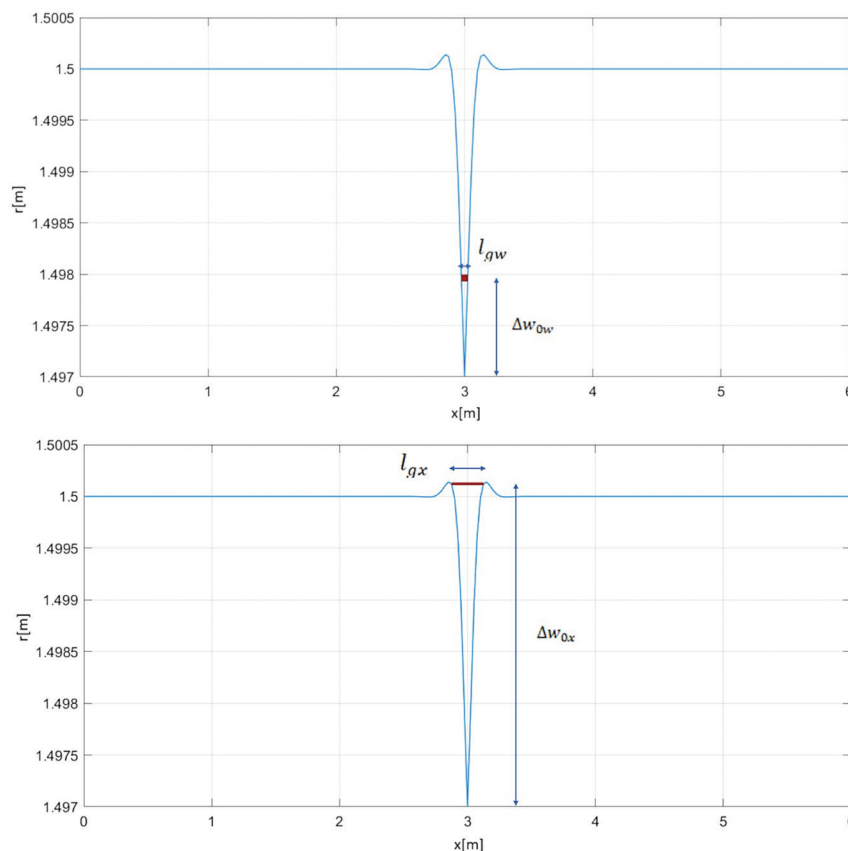
Obowiązująca norma projektowania [7] pozwala na sklasyfikowanie powłoki, w której dokonano takiego pomiaru. Odbywa się to przez wyznaczenie maksymalnej wartości parametru jakości U_{ox} oraz U_{ow} z zależności:

$$U_{0x/w} = \frac{\Delta w_{0x/w}}{l_{gx/w}} \quad (2)$$

gdzie Δw_{0x} i Δw_{0w} jest zmierzona głębokością wglębienia, stosując odpowiednio przymiar l_{gx} lub l_{gw} . W wyniku pomiaru otrzymano dwie wartości parametru jakości $U_{ox} = 0,0116$ i $U_{ow} = 0,0128$, które pozwoliły sklasyfikować rozpatrywaną powłokę do klasy C, czyli „normalnej” jakości wykonania. Można zauważyć, że dodatkowy przymiar geometryczny l_{gw} brany pod uwagę w normie PN-EN 1993-

Tab. 1. Wartości parametrów imperfekcji spawalniczej o zróżnicowanej amplitudzie

$\Delta w_0/t$ [-]	U_{0x} [-]	U_{0w} [-]
0.1	0.0012	0.0013
0.5	0.0058	0.0064
1.0	0.0116	0.0128
2.0	0.0233	0.0257



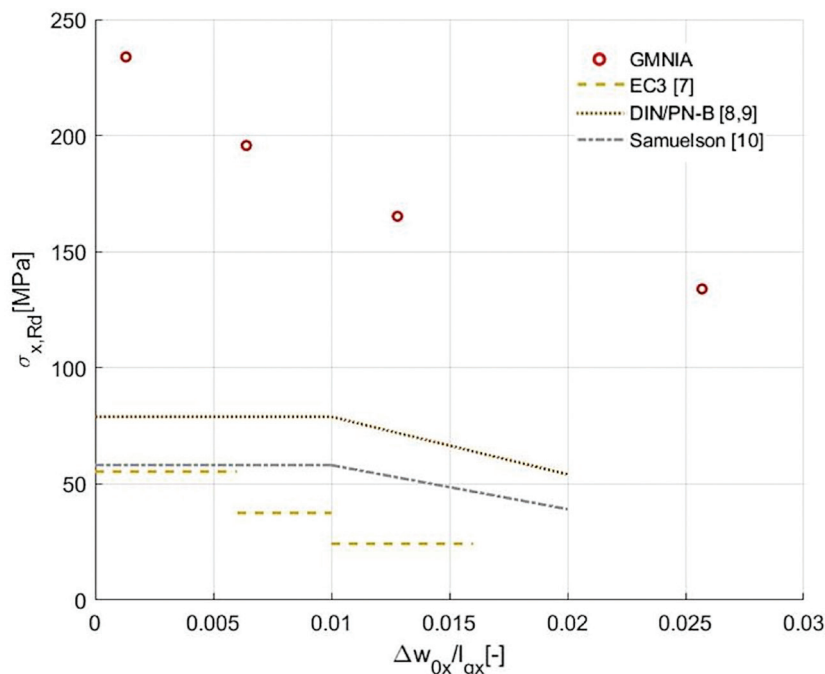
Rys. 2 Sposób pomiaru imperfekcji spawalniczej przy użyciu przymiarów o długościach: a) $l_{gw} = 25t = 75$ mm, b) $l_{gx} = 4(rt)^{1/2} = 0,268$ m

1-6 [7] jest bardziej restrykcyjny wobec imperfekcji spawalniczych. Stosunek zmierzonej głębokości wglębienia do długości zastosowanego przymiaru w każdej ze wspomnianych procedur przekłada się na szacowaną nośność powłoki. Zatem im w danej ocenie gorsza jakość wykonania powłoki, tym jej nośność jest niższa.

Wpływ oceny jakości wykonania na nośność powłoki

W istniejących walcowych powłokach stalowych występują różne odchyłki wykonawcze od stanu idealnego, takie jak owalizacja, mimośrodowość i lokalne wglębienia blach, szczególnie w miejscach spoin. Wszystkie te odchyłki sprowadza się do reprezentatywnego lokalnego wglębienia promieniowego Δw_0 . W przypadku pomiarów lokalnych wglębień w kierunku południkowym określa się ich wartość w stosunku do długości liniowej listwy pomiarowej południkowej l_{gx} i l_{gw} , a uzyska-

ny wynik jest nazywany parametrem wglębnienia U_{ox} lub U_{ow} i pozwala zakwalifikować mierzoną powłokę do jednej z trzech klas jakości wykonania. Zgodnie z [7] stosuje się 2 długości listw o wartościach: $4(rt)^{1/2}$ i $25t$ w miejscach spoin (lecz nie więcej niż 500 mm), gdzie r jest promieniem, a t grubością powłoki. Odpowiednie procedury analityczne, zawarte m.in. w normie [7], pozwalają po ustaleniu klasy jakości na dokonanie oszacowania m.in. wartości obliczeniowych naprężeń wyboczeniowych $\sigma_{x,Rd}$ przy ściskaniu południkowym. Oprócz standardowej procedury wymiarowania na podstawie stanu naprężeń można wg [7] zastosować zaawansowane analizy nieliniowe GMNIA do bezpośredniego wyznaczenia nośności ściskanych powłok. Nieliniowa analiza metodą elementów skończonych stanowi aktualnie główne narzędzie, które pozwala na symulację rzeczywistego zachowania powłoki pod obciążeniem [12]. Zaprezentowany w tej pracy mo-



Rys. 3 Nośność powłoki z imperfekcją spawalniczą ($r = 1,5$ m, $t = 0,003$ m, $H = 6$ m)

del imperfekcji spawalniczej, który został skalibrowany poprzez pomiary wykonane w powłokach rzeczywistych, może posłużyć jako geometria deformacji wstępnej wprowadzona do modelu numerycznego w analizie GMNIA. W procesie projektowania konstrukcji zakłada się, że powłoka ma zostać wykonana z określoną dokładnością, a więc parametry wgłębień U_0 nie będą przekraczały wartości granicznych dla danej klasy jakości wykonania. Parametry wgłębień o wartości granicznej są wprowadzane do modelu numerycznego niezależnie od tego, czy wszystkie realnie występujące wgłębienia mają jednakową, tak dużą wartość, równą wartości granicznej $U_{0,max}$ i niezależnie od rzeczywistej liczby tych wgłębień. Takie podejście, stosowane powszechnie w analizach GMNIA, powoduje, że amplitudy imperfekcji reprezentatywnych w zadanej klasie jakości wykonania mogą być większe niż w realnej powłoce. Ma to oczywiście wpływ na rozbieżności pomiędzy realną nośnością powłoki a nośnością obliczoną na podstawie [7].

Wytyczne służące do projektowania stalowych konstrukcji powłokowych [7] ustalają dla danej klasy jakości maksymalną wartość stosunku pomierzonej amplitudy wgłębienia do długości wykorzystanego przymiaru. Podano analizie cztery powłoki o takiej samej geometrii (r, t) jak w poprzednim przykładzie, w których przyjęto model skalibrowanej imperfekcji spawalniczej o zróżnicowanej wartości amplitudy Δw_0 odniesionej do powierzchni środkowej powłoki. Następnie wyznaczono parametry imperfekcji U_{0x} i U_{0w} , stosując przymiary geometryczne o długościach $l_{gx} = 4(rt)^{1/2}$ i $l_{gw} = 25t$, a wyniki tych pomiarów przedstawiono w tab. 1.

Można zauważyć, że gdyby imperfekcja (wgłębienie spawalnicze) o największej rozpatrzonej amplitudzie Δw_0 została stwierdzona w powłoce rzeczywistej, spowodowałoby to uznanie jej za pozaklasową na podstawie normy [7]. Stanowi to pewien problem w ocenie nośności powłoki, w której zaobserwowano taką odchyłkę geometryczną. Nie jest możliwe w takim przypadku zastosowanie żadnej z wcześniej wspomnianych procedur analitycznych opartych na źródłach literaturowych. Postanowiono zatem przeprowadzić indywidualną analizę GMNIA dla każdej z rozpatrywanych powłok w celu weryfikacji ich nośności. Nie uwzględniano naprężeń rezydualnych.

Geometria powłoki pozostaje niezmienną w modelu numerycznym, przyjmując dodatkowo, że granica plastyczności stali wynosi $f_y = 235$ MPa, a jej moduł sprężystości jest równy $E = 210$ GPa. Powłoka została podparta zgodnie z warunkami oznaczonymi w normie [7] jako BC2f, opisanymi jako: radialnie nieprzesuwny, południkowo swobodny, obrotowo swobodny. Zastosowano wyidealizowany model nieliniowego zachowania materiału: sprężysto-idealnie plastyczny. Do rozwiązania nieliniowych równań równowagi zastosowano iteracyjny algorytm Riksa [13], który jest uznany za dający poprawne wyniki przy okazji wielu badań numerycznych. W celu odczytania nośności powłoki ze ścieżki równowagi statycznej posłużono się algorytmem, który zaproponował Sadowski i inni [14]. Przyjęto pojedynczą imperfekcję powłoki, przedstawioną na rys. 2., a więc obwodowe wgłębienie w miejscu spoiny w środku wysokości powłoki. Wyniki analiz, przedstawione na rys. 3., pokazują nośność powłoki w odniesieniu do $\Delta w_{0x}/l_{gx}$. W nomenklaturze normowej stosunek $\Delta w_{0x}/l_{gx}$

jest określany parametrem jakości. Na tym samym wykresie przedstawiono oszacowania nośności wyoboczeniowej $\sigma_{x,Rd}$ ściskanej południkowo powłoki cylindrycznej wg własnych analiz GMNIA oraz wyznaczonej na podstawie norm [7], [8], [9] i pracy [10] z uwzględnieniem zmierzonej obwodowej imperfekcji spawalniczej Δw_{0x} za pomocą przymiaru l_{gx} .

Można zauważyć, że analiza GMNIA daje znacznie większe wartości nośności powłoki niż pozostałe metody analityczne oparte na źródłach literaturowych. Wszystkie z zastosowanych procedur w podobny sposób oceniają jakość wykonania powłoki poprzez pomiar wgłębień przymiarem geometrycznym. Otrzymany w pomiarach wynik przekłada się bezpośrednio na nośność powłoki, wyznaczoną z procedury opartej na wzorach analitycznych (metoda stanu naprężeń). W przypadku analizowanej powłoki, do której wprowadzono imperfekcję o największej wartości $\Delta w_{0x}/l_{gx}$, w analizie numerycznej otrzymano nośność o wartości $\sigma_{x,Rd} = 134,1$ MPa. Pomimo iż ta powłoka na podstawie normy [7] byłaby nieklasyfikowana, a względem pozostałych wytucznych znalazłaby się poza ograniczeniami procedury, wykazuje ona nośność, która w dalszym ciągu może być wystarczająca do bezpiecznego przenoszenia obciążeń. Mimo wyraźnie przekroczonej wartości parametru jakości dla klasy C powłoki wg [7] jej nośność wyznaczona w analizie GMNIA przekracza wartość analityczną dla klasy A. Należy dodatkowo zaznaczyć, że na rys. 3. przedstawiono wartości nośności w stosunku do $\Delta w_{0x}/l_{gx}$, natomiast z wykorzystaniem przymiaru o długości l_{gw} parametr jakości U_{0w} przyjmuje większą wartość, co pokazano w tab. 1. Na rys. 3. pokazano również wartości nośności uzyskane wg wcześniejszych norm [8] i [9] oraz pracy [10].

Wnioski końcowe

Właściwa ocena jakości wykonania stalowej powłoki jest istotną w kontekście odbiorów konstrukcji przeznaczonych do użytkowania. Na jej podstawie dokonuje się oszacowania zdolności powstałego silosu lub zbiornika do bezpiecznego przenoszenia obciążeń przez cały okres eksploatacji. Przytoczone źródła literaturowe i normowe proponują zastosowanie przymiarów geometrycznych do oceny jakości wykonania powłoki. Wyniki przeprowadzonych pomiarów geometrii zrealizowanej powłoki są następnie wykorzystane w procedurze analitycznej, pozwalającej wyznaczyć nośność konstrukcji silosu lub zbiornika. Niskie wartości nośności, otrzymane w przedstawionych procedurach normowych, z uwzględnieniem pomiarów lokalnej pojedynczej imperfekcji w postaci wgłębienia spawalniczego, mogą być spowodowane ekstrapolacją tego lokalnego pomiaru do oceny jakości wykonania całej powłoki. Uzyskane w ten sposób wartości południkowej nośności wyoboczenio-

wej stanowią wprowadzenie bezpieczne oszacowanie, ale takie podejście może być nieuzasadnione ekonomicznie. Dodatkowo, jeśli w powłoce wystąpi imperfekcja o dużej amplitudzie, zastosowanie przedstawionych normowych metod analitycznych nie będzie możliwe. W takich indywidualnych przypadkach przekroczenia dopuszczalnych wartości odchyłek w lokalnych wgłębieniach warto zastosować indywidualną analizę GMNIA, która jest sprawdzona w badaniach naukowych i w praktyce inżynierskiej. Trzeba jednak dobrze zinventoryzować taką lokalną imperfekcję. W związku z powyższym konieczna jest rewizja powszechnie stosowanych metod pomiarowych w celu zaproponowania oceny jakości, która pozwoli na dokładniejsze oszacowanie nośności realnej powłoki.

Literatura

- [1] M. Pircher, P.A. Berry, X.L. Ding, R.Q. Bridge, The shape of circumferential weld-induced imperfections in thin-walled steel silos and tanks, *Thin-Walled Struct.* 39 (2001) 999–1014.
- [2] X. Lin, J.G. Teng, Iterative Fourier decomposition of imperfection measurements at non-uniformly distributed sampling points, *Thin-Walled Struct.* 41 (2003) 901–924.
- [3] X.L. Ding, R.D. Coleman, J.M. Rotter, Technique for precise measurement of large-scale silos and tanks, *J. Surv. Eng. ASCE Am. Soc. Civ. Eng.* 122 (1996) 14–25.
- [4] J.M. Rotter, J.G. Teng, Elastic Stability of Cylindrical Shells with Weld Depressions, *J. Struct. Eng.* 115 (1989) 1244–1263.
- [5] P.A. Berry, J.M. Rotter, R.Q. Bridge, Compression Tests on Cylinders with Circumferential Weld Depressions, *J. Eng. Mech.* 126 (2000) 405–413.
- [6] W.T. Koiter, *On the Stability of Elastic Equilibrium* (in Dutch), Delft University, 1945.
- [7] PN-EN 1993-1-6. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych, Comité Européen de Normalisation, CEN, Bruksela, 2007.

[8] PN-B-03202:1996 Konstrukcje stalowe – Silosy na materiałach sypkich – Obliczenia statyczne i projektowanie, Polski Komitet Normalizacyjny, PKN, 1996.

[9] DIN 18800-4:2008-11 – Stahlbauten – Teil 4: Stabilitätsfälle – Schalenbeulen, n.d.

[10] L. Samuelson, S. Eggwertz, *Shell Stability Handbook*, II, Elsevier Applied Science, London & New York, 1990.

[11] C.Y. Song, J.G. Teng, J.M. Rotter, Imperfection sensitivity of thin elastic cylindrical shells subject to partial axial compression, *Int. J. Solids Struct.* 41 (2004) 7155–7180. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.05.040>.

[12] J.M. Rotter, The new method of Reference Resistance Design for shell structures, in: *SDSS 2016, Int. Colloq. Stab. Ductility Steel Struct.*, 2016: pp. 623–30.

[13] E. Riks, An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *Int. J. Solids Struct.* 15 (1979) 529–551. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(79\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(79)90081-7).

[14] A. Sadowski, O.K. Fajuyitan, J. Wang, A computational strategy to establish algebraic parameters for the Reference Resistance Design of metal shell structures, *Adv. Eng. Softw.* 109 (2017) 15–30.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.7825

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
Kozikowski Damian, Hotała Eugeniusz, 2022, Problemy z oceną jakości wykonania walcowych powłok stalowych, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.7825

Streszczenie: Realne powłoki stalowe mają odchyłki od idealnego kształtu, które powstają przede wszystkim na etapie procesu spawania arkuszy blach. Dotychczasowe obserwacje i pomiary stalowych cylindrycznych powłok rzeczywistych pozwoliły na stworzenie modelu spawalniczej imperfekcji reprezentatywnej. Odchyłki od idealnej geometrii cylindrycznej powłoki w postaci promieniowych lokalnych wgłębień mierzone są w praktyce za pomocą przyrządów geometrycznych, których długość jest określona w wytycznych literaturowych

i normowych. W pracy wykazano, że istniejące normowe oraz literaturowe zasady oceny klasy jakości wykonania powłok i wynikające z takich ocen wartości nośności wyboczeniowych mogą w wielu przypadkach dawać znacznie заниżone wartości w stosunku do realnych nośności, wyznaczonych na podstawie indywidualnych analiz GMNIA.

Słowa kluczowe: konstrukcja stalowa, stateczność powłok, odchyłki wykonawcze

Abstract: PROBLEMS IN EVALUATING THE QUALITY OF FABRICATION OF STEEL CYLINDRICAL SHELLS. Fabricated steel shells contain deviations from the ideal shape, which arise primarily during the sheet welding process. Previous observations and measurements of real steel cylindrical shells have made it possible to create a model of representative welding imperfection.

Deviations from the ideal geometry of a cylindrical shell in the form of radial local indentations are measured in practice using geometric gauges, the length of which is specified in literature and standard guidelines. It was shown in this paper that the existing standard and literature principles of shells fabrication quality class evaluation and the resulting buckling load values may in many cases give significantly lower values in relation to the real load capacity, determined on the basis of individual GMNIA analyses.

Keywords: steel structure, stability of shells, fabrication deviations

REKLAMA

Ruukki
Building your tomorrow.

Pakiet Ruukki® Energy dla szczelnej obudowy
– niższe koszty energii, mniejsze emisje CO₂

www.ruukki.pl