

mgr inż. Tomasz Puszczalo

Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A., Wydział Projektowo-Technologiczny

mgr inż. Karol Sówka

Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A., Zakład Centrum Produkcyjne, Wydział Prefabrykacji Rurociągów

Zastosowanie analizy MES do projektowania den płaskich okrągłych

Application of MES analysis for designing of round flat end caps

Wśród zestawu badań NDT znajduje się próba ciśnieniowa, której celem jest potwierdzenie szczelności układu. W celu przeprowadzenia próby ciśnieniowej niezbędne jest wykonanie kształtek zaślepiających rurociąg, w tym dna płaskie, będące przedmiotem artykułu. Opisane zastosowanie obliczeń MES pozwoliło na sprawdzenie poprawności przyjętej geometrii dna płaskiego ze wzmocnieniem czterema żebrami. Obliczenia MES den wzmocnionych żebrami pozwalają na większą elastyczność w stosowaniu materiałów oraz na optymalizację geometrii elementów ciśnieniowych. Wykazano podobieństwa pomiędzy metodami obliczeniowymi okrągłych den płaskich według trzech różnych standardów.

Słowa kluczowe: optymalizacja geometrii elementów ciśnieniowych, analiza MES do projektowania den płaskich okrągłych, próba ciśnieniowa

One of the NDT tests which aim is to confirm the system tightness is the pressure test. In order to carry out such test it is necessary to prepare fittings for blinding the pipeline, including flat end caps which are the subject of this article. The described application of MES calculations enables to check the accuracy of the accepted geometry of a flat end cap reinforced with four ribs. MES calculations for rib-reinforced end caps allow greater flexibility in application of various materials and optimisation of pressure elements geometry. Shown are similarities between methods of round flat end caps calculations carried out with the use of three different standards.

Keywords: optimisation of pressure elements geometry, MES analysis for designing of round flat end caps, pressure test

Wstęp

Wśród szerokiego zakresu usług oferowanych przez ZRE Katowice S.A. można wymienić m.in. prefabrykację elementów ciśnieniowych na potrzeby wielu dziedzin rodzimego oraz światowego przemysłu, w tym przede wszystkim szeroko pojętej energetyki.

Typowym zleceniem realizowanym w ZRE Katowice S.A. – Zakład Centrum Produkcyjne w Jaworznie jest prefabrykacja rurociągów z wykorzystaniem giętarci indukcyjnej. Jej istotną zaletą jest możliwość wykonywania na rurach łuków przestrzennie zorientowanych względem siebie. Umożliwia to wyeliminowanie części spoin obwodowych, co z kolei pozwala na ograniczenie kosztów oraz skrócenie czasu procesu wytwarzania rurociągów. Nieodzownym elementem wytwarzania rurociągów są badania nieniszczące pozwalające potwierdzić poprawność wytworzonego rurociągu. Wśród zestawu badań NDT realizowana jest próba ciśnieniowa, której celem jest potwierdzenie szczelności układu. W celu przeprowadzenia próby ciśnieniowej niezbędne jest wykonanie kształtek zaślepiających rurociąg, w tym dna płaskie będące przedmiotem niniejszego artykułu.

Jednym ze zleceń pozyskanych przez ZRE Katowice S.A. – Zakład Centrum Produkcyjne była prefabrykacja oraz przeprowadzenie próby ciśnieniowej rurociągu o średnicy OD1016x22,5 w gatunku L485ME do przesyłu gazu wysokiego ciśnienia. Projekt den płaskich wzmocnionych żebrami z odpowietrzeniem wykonany został w Wydziale Projektowo-Technologicznym spółki z siedzibą w Katowicach. W projekcie przyjęto następujący tok obliczeniowy:

- 1) obliczenia dna płaskiego bez wzmocnienia według [1-3],
- 2) obliczenia dna płaskiego wzmocnionego żebrami według [3],
- 3) obliczenia dna płaskiego wzmocnionego żebrami z wykorzystaniem analizy MES z zastosowaniem preferowanej grubości blachy.

Założenia do projektu okrągłego dna płaskiego

Dane rury prostej:

geometria rury	OD = 1016 x 22,5 mm
materiał rury	L485ME
norma materiałowa	PN-EN ISO 3183: 2020 [5]

Dane blachy:

preferowana grubość blachy	e = 40 mm
materiał blachy	P355GH (1.0473)
norma materiałowa	PN-EN 10028-2: 2017 [6]

Założenia do próby ciśnieniowej:

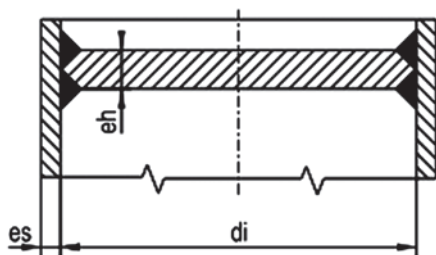
czynnik próby ciśnieniowej	woda
ciśnienie	$p_{\text{test}} = 20,4 \text{ MPa}$
temperatura czynnika	t = 20°C
norma	PN-EN 13480-5 [7]

Dodatkowo przyjęto współczynnik bezpieczeństwa do określenia dopuszczalnych naprężeń $x = 1,05$. Własności wytrzymałościowe materiałów oraz ujemne odchyłki produkcyjne przyjęto zgodnie z odpowiednimi normami [5-7].

Obliczenia wytrzymałościowe okrągłego dna płaskiego

Obliczenia grubości dna płaskiego bez wzmocnienia

Do wykonania obliczeń niewzmoczonego żebrami okrągłego dna płaskiego wykorzystano dwie normy zharmonizowane z dyrektywą ciśnieniową PED 2014/68/UE [4]; PN-EN 12952-3 [1], PN-EN 13480-3 [2] oraz do celów porównawczych wytyczne UDT/UC/2003 wydanie 2017 r. [3].



Rys. 1. Dno płaskie osadzone całkowicie w powłoce bez roztoczenia, spawane spoiną z pełnym przetopem [1]

Minimalna grubość dna płaskiego bez nadadków materiałowych według PN-EN 12952-3 [1] liczona jest zgodnie ze wzorem:

$$e_{ch} = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot d_i \cdot \sqrt{\frac{p_c}{f}}$$

gdzie:

- C_1, C_2, C_3 – współczynniki, $C_2, C_3 = 1$,
- d_i – średnica wewnętrzna rury,
- p_c – ciśnienie obliczeniowe,
- f – dopuszczalne naprężenie materiału dna płaskiego.

Minimalna grubość okrągłego dna płaskiego dla warunków próby ciśnieniowej bez nadadków materiałowych według PN-EN 13480-3 [2] liczona jest zgodnie ze wzorem:

$$e = C_1 \cdot D_i \sqrt{\frac{p_c}{f_1}}$$

gdzie:

- C_1 – współczynnik,
- D_i – średnica wewnętrzna rury,
- p_c – ciśnienie obliczeniowe,
- f_1 – dopuszczalne naprężenie.

Minimalna grubość okrągłego dna płaskiego dla warunków próby ciśnieniowej bez nadadków materiałowych według WUDT/UC/2003 [3] liczona jest zgodnie ze wzorem:

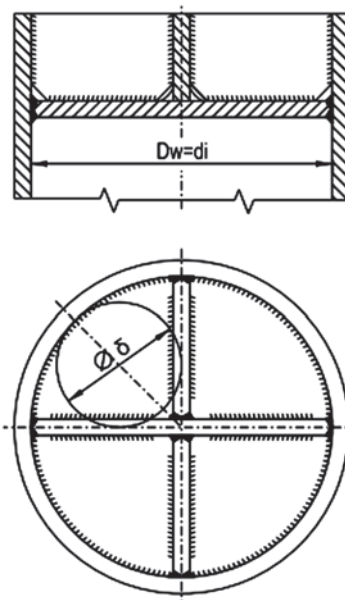
$$g_0 = 0,35 \cdot D_w \cdot \sqrt{\frac{p_0}{k}}$$

gdzie:

- D_w – średnica wewnętrzna rury,
- p_c – ciśnienie obliczeniowe,
- f_1 – dopuszczalne naprężenie.

Obliczenia grubości okrągłego pełnego dna płaskiego wzmocnionego żebrami bez nadadków materiałowych

Do wykonania obliczeń okrągłego dna płaskiego wzmocnionego żebrami wykorzystano wytyczne UDT/UC/2003 [3]. Poniższe obliczenia wykonuje się w celu ograniczenia grubości dna płaskiego.



Rys. 2. Dno płaskie okrągłe wzmocnione żebrami [3]

- Minimalna grubość okrągłego dna płaskiego bez nadadków wzmocnionego dwoma żebrami:

$$g_0 = 0,45 \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{P_0}{k}}$$

gdzie:

- δ – średnica największego koła przechodzącego przez co najmniej trzy punkty usztywnionego dna płaskiego, mm.
- P_0 – ciśnienie obliczeniowe, MPa,
- k – naprężenie dopuszczalne w temperaturze obliczeniowej uwzględniające współczynnik bezpieczeństwa, MPa.

- Obliczenie maksymalnego momentu gnącego powstałego w wyniku działania ciśnienia wewnętrznego w temperaturze obliczeniowej.

Maksymalny moment gnący

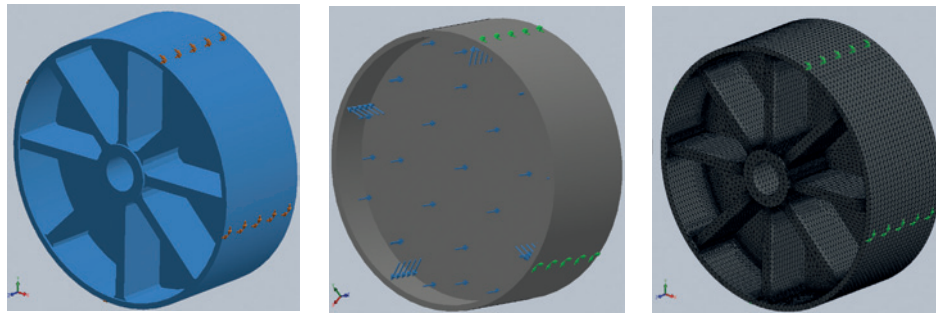
$$M_{max} = P_0 \cdot \pi \cdot \frac{D_w^3}{32}$$

Wymagany wskaźnik wytrzymałości przekroju (dla dwóch żeber) jak pokazano na rysunku 2.

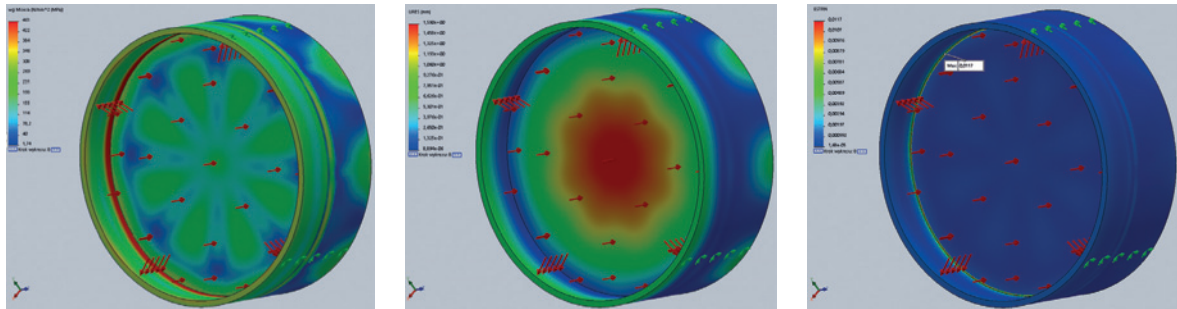
$$W_0 = 0,5 \frac{M_{max}}{1,73 \cdot k} \leq W_{rz}$$

gdzie

- W_{rz} – rzeczywisty, przyjęty wskaźnik wytrzymałości przekroju żebra na zginanie.



Rys. 3. a) model geometryczny dna płaskiego wzmocnionego czterema żebrami, b) przyłożenie ciśnienia p_{test} , c) siatka obliczeniowa



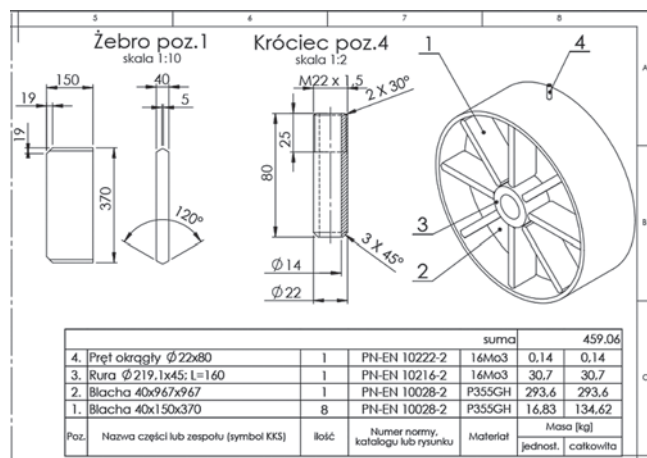
Rys. 4. Wyniki analizy nieliniowej MES

a) naprężenia (wg Misesa), b) przemieszczenie maksymalne = 1,59 mm, c) odkształcenie plastyczne równoważne o wartości 1,17%

W wyniku obliczeń przyjęto grubość dna wzmocnionego żebrami $g_0 = 50$ mm z dwoma żebrami (jak na rys. 2) o dobranym przekroju 50×400 mm. Wyniki obliczeń grubości den płaskich zestawiono w tabeli 1.

Obliczenia okrągłego dna płaskiego wzmocnionego żebrami z zastosowaniem preferowanej grubości blachy, z wykorzystaniem nieliniowej analizy MES

Przestrzenny model geometryczny dna wykonany został na potrzeby przeprowadzenia obliczeń MES po wcześniejszym przyjęciu warunków brzegowych, tzn.:



Rys. 5. Fragment dokumentacji warsztatowej na potrzeby prefabrykacji okrągłego dna płaskiego wzmocnionego żebrami

- zdefiniowanie materiałów poszczególnych elementów dna płaskiego,
- zdefiniowanie punktów utwierdzenia raz zadanie ciśnienia na obciążone powierzchnie,
- zdefiniowanie siatki obliczeniowej, tzw. dyskretyzacja układu.

Model geometryczny wykorzystany został ponadto do wykonania dokumentacji warsztatowej na potrzeby prefabrykacji – rysunek 5.

Wyniki

Tabela 1 zawiera zestawienie wyników obliczeń grubości okrągłych den płaskich dla warunków próby ciśnieniowej z uwzględnieniem nadatków materiałowych. Zastosowanie żeber wzmocniających pozwoliło na znaczne zmniejszenie grubości blachy dna płaskiego.

Różnice pomiędzy wynikami w wierszach 1, 2 i 3 wynikają z różnych wartości współczynników C oraz z różnych wartości granicy plastyczności w 20°C zależnej od grubości blachy.

Tabela 1

Wyniki obliczeń grubości den płaskich

Nr	Wzmocnienie	Norma obliczeniowa	Przyjęta grubość dna płaskiego, mm
1	Bez wzmocnienia	PN-EN 12592-3	109
2		PN-EN 13480-3	
3		WUDT/UC/2003	91
4	Wzmocnienie żebrami	WUDT/UC/2003	50
5		Analiza MES	40

Uzyskana wartość uplastycznienia materiału na poziomie 1,17% mieści się w zakresie dopuszczalnym, który stanowi 5% dla analizy metodą stanów granicznych według PN-EN 1993-1-5 [8].



Rys. 6. Rurociąg DN1000 z przyspawanymi dnami płaskimi przygotowany do próby ciśnieniowej

Wnioski

Zastosowanie obliczeń MES pozwoliło na sprawdzenie poprawności przyjętej geometrii dna płaskiego ze wzmocnieniem czterema żebrami, w którym zastosowano preferowaną grubość blachy = 40 mm. Przeprowadzone badanie modelu z założoną nieliniowością materiału (materiał sprężysto-plastyczny) wykazało uplastycznienie na poziomie 1,17%, co stanowi wartość dopuszczalną.

Obliczenia MES den wzmocnionych żebrami pozwalają na większą elastyczność w stosowaniu materiałów oraz na optymalizację geometrii elementów ciśnieniowych.

Wykazano również podobieństwa pomiędzy metodami obliczeniowymi okrągłych den płaskich według trzech różnych standardów.

PIŚMIENICTWO

- [1] Norma PN-EN 12952-3:2023. Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze – Część 3: Konstrukcja i obliczenia części ciśnieniowych kotła.
- [2] Norma PN-EN 13480-3:2017. Rurociągi przemysłowe metalowe – Część 3: Projektowanie i obliczenia.
- [3] WUDT-UC/2003, wydanie 2017 r.
- [4] Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady PED 2014/68/UE z dnia 15 maja 2014 r.
- [5] Norma PN-EN ISO 3183:2020-03. Przemysł naftowy i gazowniczy – Rury stalowe do rurociągowych systemów transportowych.
- [6] Norma PN-EN 10028-2:2017. Wyroby płaskie ze stali na urządzenia ciśnieniowe – Część 2: Stale niestopowe i stopowe o określonych własnościach w podwyższonych temperaturach.
- [7] Norma PN-EN 13480-3:2017. Rurociągi przemysłowe metalowe – Część 5: Kontrola i badania
- [8] Norma PN-EN 1993-1-5:2008. Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-5: Blachownice.



KOMPLEKSOWE ROZWIĄZANIA DLA ENERGETYKI I PRZEMYSŁU

ul. Gen. Jankego 13, 40-615 Katowice,
tel. +48 32 78 98 212, e-mail: zre@zre.com.pl

www.zre.com.pl

Przygotowani na przyszłość. Polska energetyka jądrowa

Prepared for the future. Polish nuclear power industry

W dobie postępujących zmian klimatycznych oraz w obliczu rosyjskiej agresji na Ukrainę i rosnących cen energii transformacja energetyczna jest koniecznością. Jednym ze sposobów przeciwdziałania zmianom klimatu i zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju jest budowa elektrowni jądrowych. Przedsięwzięcie to jest zarówno wielką szansą, jak i wyzwaniem dla polskiego przemysłu, w tym dla ZRE Katowice S.A.

Transformacja energetyczna

Aktualna *Polityka Energetyczna Polski* zakłada zmniejszenie udziału węgla w wytwarzaniu energii elektrycznej do 56% w roku 2030, a następnie do 28% w roku 2040. Powodem wycofywania jednostek węglowych może być brak możliwości lub zasadności ich dostosowania do konkluzji BAT, ich wiek oraz poziom wyeksploatowania, jak również niski poziom efektywności ekonomicznej spowodowany wysokimi cenami uprawnień do emisji oraz brakiem przychodów w ramach mechanizmu rynku mocy.

Ubytek mocy zainstalowanej w systemie wytwórczym spowodowany planowanymi wyłączeniami źródeł konwencjonalnych opartych na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego ma zostać zastąpiony zwiększeniem mocy odnawialnych źródeł energii oraz uruchomieniem bloków jądrowych. Według przyjętej *Polityki* gaz ziemny ma pełnić jedynie funkcję paliwa pomostowego w czasie transformacji energetycznej, a docelowo system energetyczny ma stać się zeroemisyjny.

Program Polskiej Energetyki Jądrowej zakłada do 2043 roku budowę sześciu bloków jądrowych o łącznej mocy od 6 do 9 GW. Zgodnie z opublikowanym harmonogramem budowa pierwszego bloku ma rozpocząć się już w 2026 roku, a jego uruchomienie jest planowane w roku 2033. *Westinghouse Polska* ocenia, że udział polskich przedsiębiorstw w budowie pierwszej polskiej elektrowni jądrowej może wynieść ponad 50% wartości kontraktu [1].

Nasza misja i cel

Długa perspektywa rozwoju i eksploatacji energetyki jądrowej w Polsce stanowi niepowtarzalną szansę dla polskiego przemysłu. Naszą misją jest świadczenie wysoko wyspecjalizowanych usług dla kluczowych branż związanych z bezpieczeństwem energetycznym dla przemysłu maszynowego oraz transportowego, ze szczególnym uwzględnieniem działań na rzecz środowiska naturalnego, w związku z czym planowaną inwestycję traktujemy nie tylko jako szansę, ale również cel.

Doświadczenie i potencjał

ZRE Katowice S.A. posiada blisko 70-letnie doświadczenie w energetyce zawodowej, w tym zdobyte jako podwykonawca prac montażowych m.in. w zakresie kotłów, turbin parowych i gazowych, rurociągów i urządzeń pomocniczych, ale też jako dostawca rurociągów dla inwestycji związanych z budową nowych bloków energetycznych. Posiadamy również doświadczenie przy realizacji prac remontowych w elektrowniach jądrowych.

Wykonywaliśmy prace demontażowo-montażowe zespołu dwóch generatorów w Finlandii (2018), a chorwacki oddział ZRE Katowice S.A. *Podružnica Servisni Centar* wykonał prace mechaniczne podczas remontu planowego turbiny parowej (2021) oraz przy wymianie części wysokoprężnej i zaworów regulacyjnych turbiny parowej (2022) w słoweńskiej elektrowni jądrowej Krško.

Potwierdzeniem naszego potencjału jako partnera przy budowie polskiej elektrowni jądrowej są podpisane porozumienia o współpracy:

- 22 czerwca 2022 r. – *Electricite de France S.A.*
- 30 czerwca 2022 r. – *KEPCO Engineering & Construction Company Inc.*
- 19 września 2022 r. – *Westinghouse Electric Company LLC.*

Podpisane porozumienia dotyczą współpracy przy budowie polskiej elektrowni jądrowej w zakresie montażu mechanicznego, prefabrykacji i montażu rurociągów oraz produkcji konstrukcji stalowych.

PIŚMIENICTWO

- [1] Ciepiela D., *500 polskich firm może wziąć udział w gigantycznej inwestycji, jakiej jeszcze nie było*, WNP.PL, [dostęp: 19.06.2023] <https://www.wnp.pl/energetyka/500-polskich-firm-moze-wziac-udzial-w-gigantycznej-inwestycji-jakiej-jeszcze-nie-bylo,719454.html>