

Wacław KOLLEK¹
Zbigniew MIRSKI^{2*}
Kazimierz BANYS³
Zbigniew FAŁEK⁴

PROJEKTOWANIE ZBIORNIKÓW CIŚNIENIOWYCH WG PRZEPISÓW ASME BPVC PRZY WSPOMAGANIU MES

W artykule przedstawiono rys historyczny oraz dokonano krótkiego wprowadzenia do amerykańskich przepisów ASME BPVC, dotyczących spawanych kotłów i zbiorników ciśnieniowych oraz urządzeń jądrowych. Na podstawie przepisów ASME Sec. VIII Div. 1 przedstawiono metodykę projektowania spawanego dwupłaszczyznowego zbiornika ciśnieniowego (autoklawu). Ze względu na brak metody obliczeniowej (obliczanie na podstawie wzorów) kompletnego zbiornika ciśnieniowego wg ASME Sec. VIII, Div. 1, obliczenia wykonano metodą numeryczną wg ASME Sec. VIII, Div. 2 Part 5 w oparciu o Code Case 2695, na podstawie przepisów Sec. VIII Div. 1, Introduction U-2 (g). Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach i na rysunkach oraz zobrazowano grafiką wygenerowaną numerycznie.

1. WPROWADZENIE

Kotły i zbiorniki ciśnieniowe używane są na całym świecie w różnych gałęziach przemysłu, a szczególnie w branży energetycznej i gazowej. Dla zapewnienia bezpieczeństwa i wydajności eksploatacyjnej tych zbiorników opracowano regulacje prawne i przepisy, na podstawie których dokonuje się projektowania i wytwarzania oraz przeprowadza niezależną kontrolę i certyfikację w celu uzyskania zgodności. Takie działania mają wpływ na obserwowany, stały wzrost znaczenia i popularności przepisów opracowanych i publikowanych przez American Society of Mechanical Engineers (ASME), jako przepisów międzynarodowych [9].

ASME jest amerykańskim stowarzyszeniem zrzeszającym specjalistów w zakresie inżynierii mechanicznej z siedzibą w Nowym Jorku. Organizację założono w 1880 roku, w odpowiedzi na liczne awarie kotłów parowych, wprowadzanych w tym czasie do

¹ Katedra Logistyki, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Politechnika Wrocławska, Wrocław

² Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, Politechnika Wrocławska, Wrocław

³ Insmaszbud, Przedsiębiorstwo Badawczo-Wdrożeniowe, Wrocław

⁴ Biuro Projektowo-Badawcze MIFA-Projekt, Oława

* E-mail: zbigniew.mirski@pwr.edu.pl

powszechnego użytku w przemyśle [3]. Organizacja zrzesza obecnie ponad 130 000 członków w 158 krajach świata [1].

W oparciu o przepisy ASME, w 1907 r. w Stanie Massachusetts opracowano pierwsze przepisy prawne, dotyczące budowy kotłów parowych. Działanie to miało związek z publicznym oburzeniem społecznym po kilku poważnych eksplozjach kotłów, do których doszło w tym stanie. Najtragiczniejsza w skutkach eksplozja kotła miała miejsce 20 marca 1905r. w fabryce obuwia Grover w Brockton, w wyniku której zginęło 58 osób a dalszych 150 zostało rannych [9].

W 1911r. ASME powołało Komitet Kodeksu Zbiorników Ciśnieniowych, który opracował zasady konstruowania zbiorników stacjonarnych z określeniem wartości ciśnienia dopuszczalnego. Kodeks wydano w 1914 roku a opublikowano w roku następnym [12].

Aktualnie stowarzyszenie publikuje przepisy uznawane w całym świecie dotyczące projektowania, wytwarzania i inspekcji kotłów i zbiorników ciśnieniowych oraz elementów urządzeń jądrowych – ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME BPVC). Inżynierowie i eksperci reprezentujący producentów, instytucje inspekcyjne i użytkowników, pracują na zasadzie wolontariatu w komisjach zajmujących się rozwijaniem, aktualizacją i wprowadzaniem zmian w kolejnych edycjach tych przepisów [11].

2. PRZEGLĄD PRZEPISÓW ASME BPVC

Zbiór przepisów ASME BPVC zawiera 12 sekcji, z których [2]:

- sekcje I, III, IV, VIII, X i XII stanowią wymagania konstrukcyjne, będące podstawą certyfikacji urządzeń,
- sekcje II, V i IX związane są z przepisami konstrukcyjnymi,
- sekcje VI, VII i XI, będące przepisami eksploatacyjnymi, mają zastosowanie dopiero po zainstalowaniu urządzeń u użytkowników.

Przepisy konstrukcyjne:

- ASME BPVC Section I - Rules for Construction of Power Boilers (*Sekcja I – Zasady budowy kotłów energetycznych*),
- ASME BPVC Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components (*Sekcja III - Zasady konstrukcji urządzeń jądrowych*) – Div. 1, 2, 3, 4 i 5,
- ASME BPVC Section IV - Rules for Construction of Heating Boilers (*Zasady budowy kotłów grzewczych*),
- ASME BPVC Section VIII - Rules for Construction of Pressure Vessels (*Przepisy dotyczące budowy zbiorników ciśnieniowych*) – Div. 1, 2 i 3,
- ASME BPVC Section X - Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels (*Zbiorniki ciśnieniowe z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem*),
- ASME BPVC Section XII - Rules for the Construction & Continued Service of Transport Tanks (*Zbiorniki transportowe*).

Przepisy związane z przepisami konstrukcyjnymi:

- ASME BPVC Section II - Materials (*Materiały*) – Part A, B, C i D,
- ASME BPVC Section V - Nondestructive Examination (*Badania nieniszczące*),
- ASME BPVC Section IX - Welding and Brazing Qualifications (*Spawanie i lutowanie twarde*).

Przepisy związane z eksploatacją kotłów i zbiorników ciśnieniowych:

- ASME BPVC Section VI - Recommended Rules for the Care and Operation of Heating Boilers (*Zasady dozoru i eksploatacji kotłów grzewczych*),
- ASME BPVC Section VII - Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers (*Wytyczne dotyczące dozoru kotłów energetycznych*),
- ASME BPVC Section XI - Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components (*Zasady inspekcji i serwisu komponentów elektrowni jądrowych*).

3. HARMONICZNOŚĆ PRZEPISÓW ASME BPVC Z DYREKTYWĄ PED

Dyrektywa 97/23/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 maja 1997r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich dotyczących urządzeń ciśnieniowych (PED) ustaliła reguły, których spełnienie przez producentów oznacza zapewnienie swobodnego przepływu wytwarzanych urządzeń ciśnieniowych na obszarze wszystkich krajów członkowskich Unii Europejskiej. Zastosowanie przepisów ASME BPVC jest również możliwe dla urządzeń ciśnieniowych wymagających certyfikacji znakiem CE. Podstawowym warunkiem jest spełnienie dodatkowych wymagań, wynikających z różnicy w wymaganiach pomiędzy dyrektywą PED a ASME BPVC. Również konieczność spełniania przez amerykańskich producentów wymagań PED, stymuluje stowarzyszenie ASME do wprowadzania zmian harmonizujących przepisy ASME BPVC z wymaganiami europejskimi. Taki kierunek potwierdzają zmiany wprowadzone w 2007r. do przepisów zbiornikowych ASME BPVC Sec. VIII, Div. 2, upodabniające je w swojej strukturze do normy EN 13445 - Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe [10].

Istotna różnica pomiędzy przepisami PED i ASME polega na tym, że norma EN 13445 nie zakłada jednoznacznej metody badań numerycznych, natomiast przepisy ASME BPVC Sec. VIII div 2 Part 5 jednoznacznie i wyczerpująco określają tok postępowania w przyjętej metodzie projektowania. Różnice w podejściu do projektowania polegają również na doborze materiałów konstrukcyjnych, których właściwości mechaniczne w wielu przypadkach nie są porównywalne.

4. PROJEKTOWANIE I OBLICZENIA ZBIORNIKÓW CIŚNIENIOWYCH WG PRZEPISÓW ASME BPVC

Ze zbiornikami ciśnieniowymi na etapie projektowania i obliczania związane są przepisy ASME BPVC Sec. II part A, C i D oraz Sec. VIII Div. 1, 2 i 3.

Przepisy ASME BPVC Sec. II składają się 4 części:

- Part A - Specyfikacja materiałów stalowych (Ferrous Material Specifications),
- Part B - Dane techniczne materiałów kolorowych (Ferrous Material Specifications),
- Part C - Specyfikacje materiałów dodatkowych do spawania (Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals),
- Part D - Właściwości zwyczajowe (Properties Customary),
- Part D - Właściwości w układzie metrycznym (Properties Metric).

Part A obejmuje materiały stalowe, odpowiednie do stosowania w budowie zbiorników ciśnieniowych. W tej części zawarte są specyfikacje materiałowe wyrobów stalowych oraz dane dotyczące właściwości mechanicznych, obróbki cieplnej, skład chemiczny, pobierania próbek do badań oraz metodologii badań.

Part B zawiera dane jak w Part A lecz dotyczy materiałów nieżelaznych.

Part C dotyczy materiałów spawalniczych, elektrod i spoiw stosowanych do budowy zbiorników ciśnieniowych. W tej części zawarte są dane dotyczące właściwości mechanicznych, obróbki cieplnej, składu chemicznego i analizy próbek do badań oraz metodologii badań.

Part D dotyczy właściwości mechanicznych materiałów (E, Re, Rm itp.) ujętych w jednostkach zwyczajowych oraz w jednostkach metrycznych.

Przepisy Sec. VIII Div. 1, 2 i 3 obejmują obowiązkowe wymagania, nakazy oraz wytyczne dla materiałów, projektowania, produkcji, kontroli i badań, oznakowania i sprawozdań, ochrony przed wzrostem nadciśnienia i certyfikacji [5],[6],[7]. Ponadto Div. 1 [5] obejmuje wymagania oparte na tradycyjnym podejściu do projektowania (obliczanie na podstawie wzorów) w odniesieniu do ciśnienia, które przekracza 15 psi (0,1MPa). Szczegółowe wymagania mają zastosowanie do określonych rodzajów materiałów używanych na konstrukcje zbiorników ciśnieniowych, a także metod wytwarzania, takich jak: spawanie, lutowanie i kucie. Zbiorniki ciśnieniowe mogą być opalane lub nieopalane. Ciśnienie może pochodzić od źródeł zewnętrznych, przy zastosowaniu ogrzewania pośredniego lub od źródła bezpośredniego, pochodzącego z procesu reakcji lub dowolnej ich kombinacji.

Przepisy zawarte w Div. 2 [6] mogą być stosowane jako alternatywa dla minimalnych wymagań określonych w Div. 1. Jednakże zasady Div. 2 są bardziej wymagające niż w Div. 1 w odniesieniu do materiałów, konstrukcji i badań nieniszczących, lecz dopuszczają one wyższe wartości naprężeń. W Div. 2 oprócz tradycyjnego podejścia do projektowania, dozwolone jest korzystanie z obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (MES) w odniesieniu do ciśnienia, które przekracza 15 psi (0,1MPa).

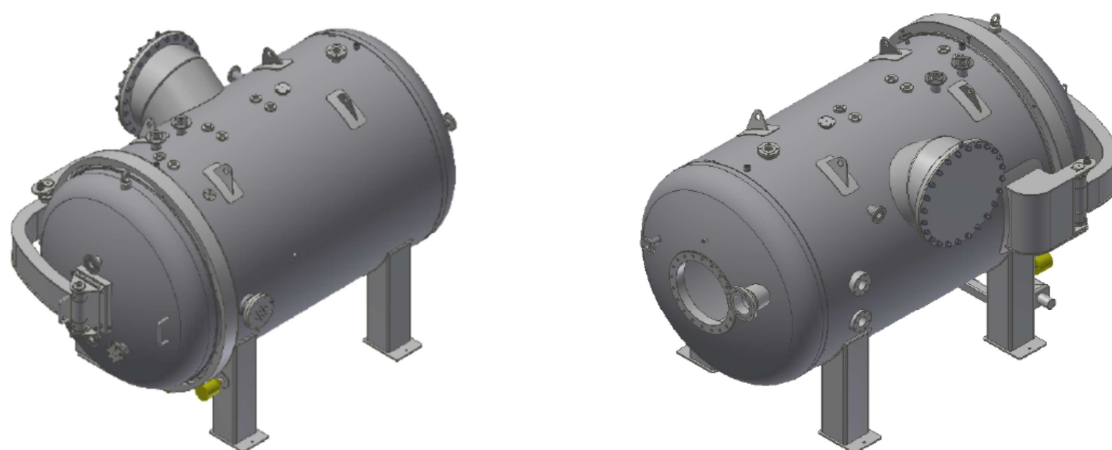
Wymagania Div. 3 [7] mają zastosowanie do zbiorników pracujących pod ciśnieniem wewnętrznym lub zewnętrznym, o wartości powyżej 10 000 psi (69MPa). Div. 3 nie ustanawia minimalnych ani maksymalnych limitów ciśnienia zarówno dla Div. 1, jak i Div. 2 [10].

5. PROCEDURA POSTĘPOWANIA PODCZAS PROJEKTOWANIA

Procedurę postępowania projektowanego pieca przeprowadzono wg [9].

Przedmiotem projektu jest zbiornik ciśnieniowy będący autoklawem o dwupłaszczowej konstrukcji spawanej rys.1. Zbiornik przeznaczony jest jako obudowa pieca próżniowego do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej z wysokociśnieniowym chłodzeniem gazowym.

Piece tego typu mają zastosowanie w procesach próżniowych takich jak: wyżarzanie i hartowanie, lutowanie, spiekanie, nawęglanie i azotowanie oraz w innych specjalistycznych procesach technologicznych. Zastosowanie techniki próżniowej pozwala uzyskać optymalne parametry realizowanego procesu a przy obróbce cieplno-chemicznej, czystą i wolną od nalotu powierzchnię, przy czym strefy krawędziowe pozostają wolne od tlenków.



Rys. 1. Model zbiornika ciśnieniowego zaprojektowany na podstawie wymagań klienta
Fig. 1. Model of pressure vessel designed based on customer requirements

Założenia projektowe pieca próżniowego wg wymagań klienta były następujące:

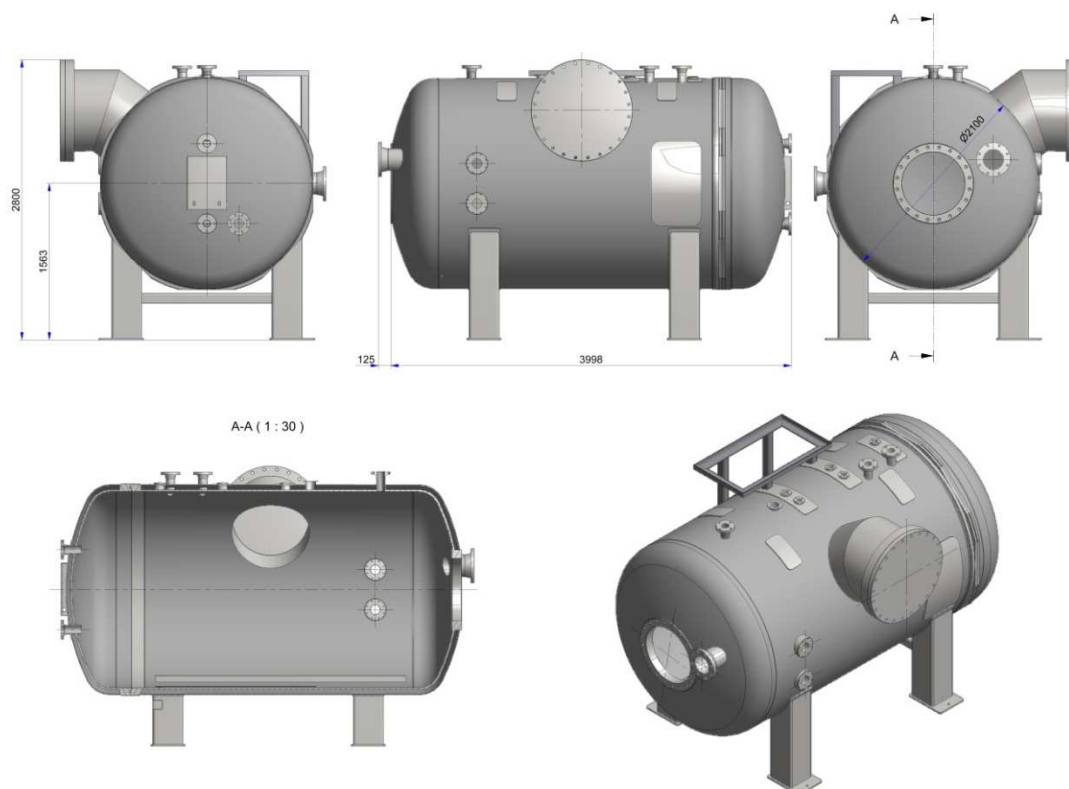
- nośność trzonu – 3Mg,
- wymiary gabarytowe wsadu (max długość x wysokość x szerokość)
– 1200 x 800 x 800mm,
- ciśnienie atmosfery chłodzącej – 10bar,
- ciśnienie medium chłodzącego płaszcz wewnętrzny – 1,5bar,
- maksymalna temperatura elementów zbiornika obciążonych ciśnieniem – 250°C.

Projekt zbiornika ciśnieniowego opracowano na podstawie przepisów ASME BPVC Sec. II, Part D [4] oraz Sec. VIII, Div. 1, Part UG i Part UW [5], wg Sec. VIII, Div. 1, Example Problem Manual PTB-4-2012 [8].

5.1. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I WARUNKI BRZEGOWE DO OBLICZEŃ

Założenia projektowe i obliczenia stanowią istotną część procesu projektowania urządzeń ciśnieniowych. Prawdopodobieństwo założeń projektowych i obliczeń rzutuje na wiele czynników, przede wszystkim jednak na bezpieczeństwo eksploatacyjne konstrukcji. Wybór właściwych metod obliczeniowych determinuje również możliwości technologiczne wykonania wyrobu, co bezpośrednio przekłada się również na wymiar ekonomiczny.

W celu ułatwienia badań numerycznych dokonano optymalizacji geometrii konstrukcji zbiornika – usunięto wspornik zawiasu, zawias i połączenia śrubowe kołnierza zaślepiającego przyłączy pompy dyfuzyjnej. Dokonane zmiany nie mają istotnego wpływu na poprawność wyników – wspornik zawiasu i zawias nie są ustrojami nośnymi konstrukcji przy zbiorniku obciążonym ciśnieniem, natomiast połączenia śrubowe dobierane są wg obliczeń wytrzymałościowych. Wpływ tych elementów jest pomijalny i mieści się w granicy błędu. Ponadto w miejscach istotnych (połączenia spawane obciążone ciśnieniem roboczym) naniesiono wymagane spoiny w celu uwiarygodnienia wyników. Na rys. 2 przedstawiono model obliczeniowy z naniesionymi uproszczeniami.



Rys. 2. Model zbiornika ciśnieniowego z naniesionymi uproszczeniami do badań numerycznych
Fig. 2. Model of pressure vessel with added for testing numerical simplifications

Wygenerowana programem ANSYS 13 sieć modelu dyskretnego zbiornika ciśnieniowego (rys. 3) składa się z 1566153 elementów typu tetrahedron (czworościan foremny) i heksahedron (sześćścian foremny, czyli sześciąt). Wymiar minimalny elementu siatki wynosi 2mm, natomiast przyrost jego wielkości aż do wartości maksymalnej 20mm, wynosi 1,15.

Ze względu na brak metody obliczeniowej opartej na tradycyjnym podejściu do projektowania kompletnego zbiornika ciśnieniowego wg Sec. VIII, Div. 1, za dopuszczeniem Autoryzowanego Inspektora (AI) w oparciu o przepisy Sec. VIII Div. 1, Introduction U-2 (g), wykonano obliczenia numeryczne wg Sec. VIII, Div. 2 Part 5 w oparciu o Code Case 2695.



Rys. 3. Model dyskretny zbiornika ciśnieniowego
Fig. 3. Discrete model of the pressure vessel

Dla zapewnienia tego samego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji jak w przypadku obliczeń zgodnych z Sec. VIII, Div. 1, przyjęto następujące założenia [6]:

- dopuszczalne naprężenia zgodnie z Sec. VIII, Div. 1, UG-23,
- współczynniki połączeń spawanych, zgodnie z Sec. VIII, Div. 1, UW- 11 i UW-12,
- graniczne naprężenia obliczeniowe zgodnie z Sec. VIII, Div. 2, Part 5.2.2,
- zużycie korozyjne zbiornika - 1mm w okresie eksploatacji (ok. 25 lat).

Analizę przeprowadzono dla zakresu liniowo sprężystego materiałów na podstawie Sec. VIII, Div. 2, Part 5.2.2 - dla obliczeń wytrzymałości w próbie ruchowej. Warunek obliczeń końcowych: naprężenia elementów ciśnieniowych zbiornika wykazane na podstawie obliczeń numerycznych, powinny być mniejsze od naprężeń granicznych, ujętych w Sec. VIII, Div. 2, Fig. 5.1.

5.2. WŁAŚCIWOŚCI ZASTOSOWANYCH MATERIAŁÓW

Właściwości materiałów zostały przyjęte wg Sec. VIII Div. 1 UG-4, spełniające warunki zdefiniowane dla materiałów liniowo sprężystych. W tabeli 1 zestawiono właściwości mechaniczne stali w temperaturze pracy 250 °C, zastosowanych na elementy ciśnieniowe, wg Sec. II Part D (Metric) [4].

Tabela 1. Właściwości zastosowanych stali w temperaturze pracy 250°C
Table 1. Properties of the used steel at the operating temperature of 250°C

Nr	Nazwy elementów	Właściwości wg Sec. II Part D ed.2010 Add.2011a						
		Oznaczenie stali	S_m	S_Y	S_{Ya}	S_{Ua}	E	ν
			[MPa]				[GPa]	
1	Kołnierze	SA-105	134	250,0	204,0	483,0	189,0	0,30

2	Dennice i płaszcz	SA-516M Gr.485	138	260,0	216,0	483,0	189,0	0,30
3	Rury króćców	SA-106 Gr.B	128	240,0	198,0	414,0	189,0	0,30
4	Króćce wykonane z prętów	SA-675M Gr.485	132	240,0	198,0	483,0	189,0	0,30

gdzie: S_m - naprężenia dopuszczalne,
 S_Y - granica plastyczności w temperaturze pokojowej,
 S_{Ya} - granica plastyczności w temperaturze pracy,
 S_{Ua} - wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pracy,
 E - moduł sprężystości podłużnej - IID Table TM-1,
 ν - liczba Poissona - IID Table PRD.

5.3. WARUNKI BRZEGOWE DO OBLICZEŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH ZBIORNIKA

Obciążenia przyjęto zgodnie z Sec. VIII Div. 1 UG-22:

- przyspieszenie ziemskie $g_z = 9,81 \text{ m/s}^2$,
- masa transformatora $m_T = 1200 \text{ kg}$,
- masa komory grzewczej wraz z wsadem $m_{GW} = 5000 \text{ kg}$,
- masa wentylatora $m_W = 1700 \text{ kg}$,
- moment wywołany pracą wentylatora w osi OX $M_{OX} = 800 \text{ Nm}$,
- moment wywołany masą wentylatora w osi OZ $M_{OZ} = 13\,600 \text{ Nm}$,
- maksymalna temperatura elementów ciśnieniowych zbiornika w czasie pracy - $T = 250^\circ\text{C}$,
- wewnętrzne ciśnienie obliczeniowe $p = 10 \text{ bar}$,
- nadciśnienie cieczy chłodzącej $p_n = 2,5 \text{ bar}$.

Tabela 2. Wartości naprężeń granicznych dla zastosowanych stali
 Table 2. The values for the border stress of used steel

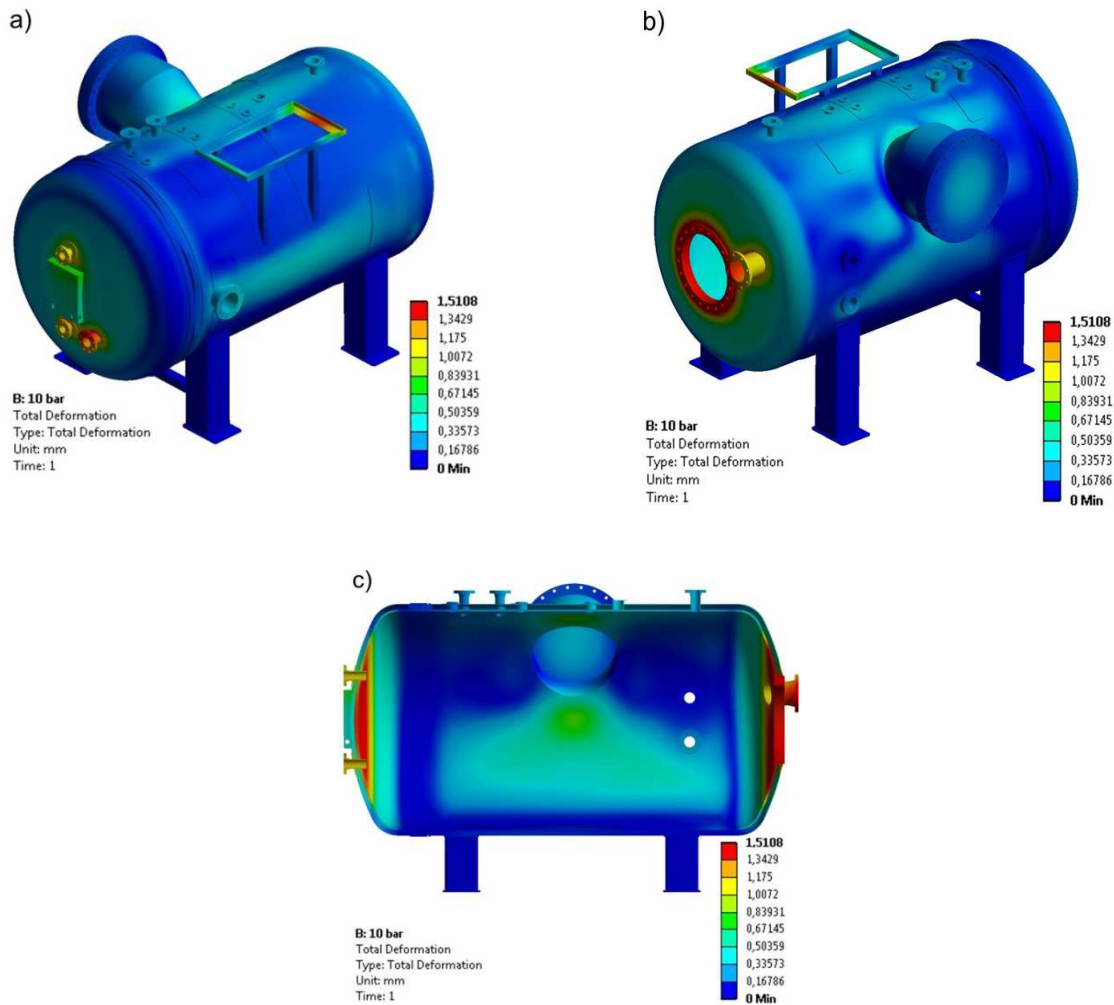
Nr	Nazwa	T [°C]	Stal	Naprężenia graniczne wg Sec. VIII, Div. 2, Figure 5.1		
				P_m	P_L	$P_L + P_b$
				[MPa]		
1	Kołnierze	250	SA-105	134,0	201,0	201,0
2	Dennice i płaszcz	250	SA-516M Gr.485	138,0	207,0	207,0
3	Rury króćców	250	SA-106 Gr.B	128,0	192,0	192,0
4	Króćce wykonane z prętów	250	SA-675M Gr.485	132,0	198,0	198,0

gdzie: P_m - całkowite naprężenia ciśnieniowe, $P_m = S_m$,
 P_L - lokalne naprężenia ciśnieniowe, $P_L = 1,5 S_m$,
 P_b - naprężenia zginające, $P_L + P_b = 1,5 S_m$.

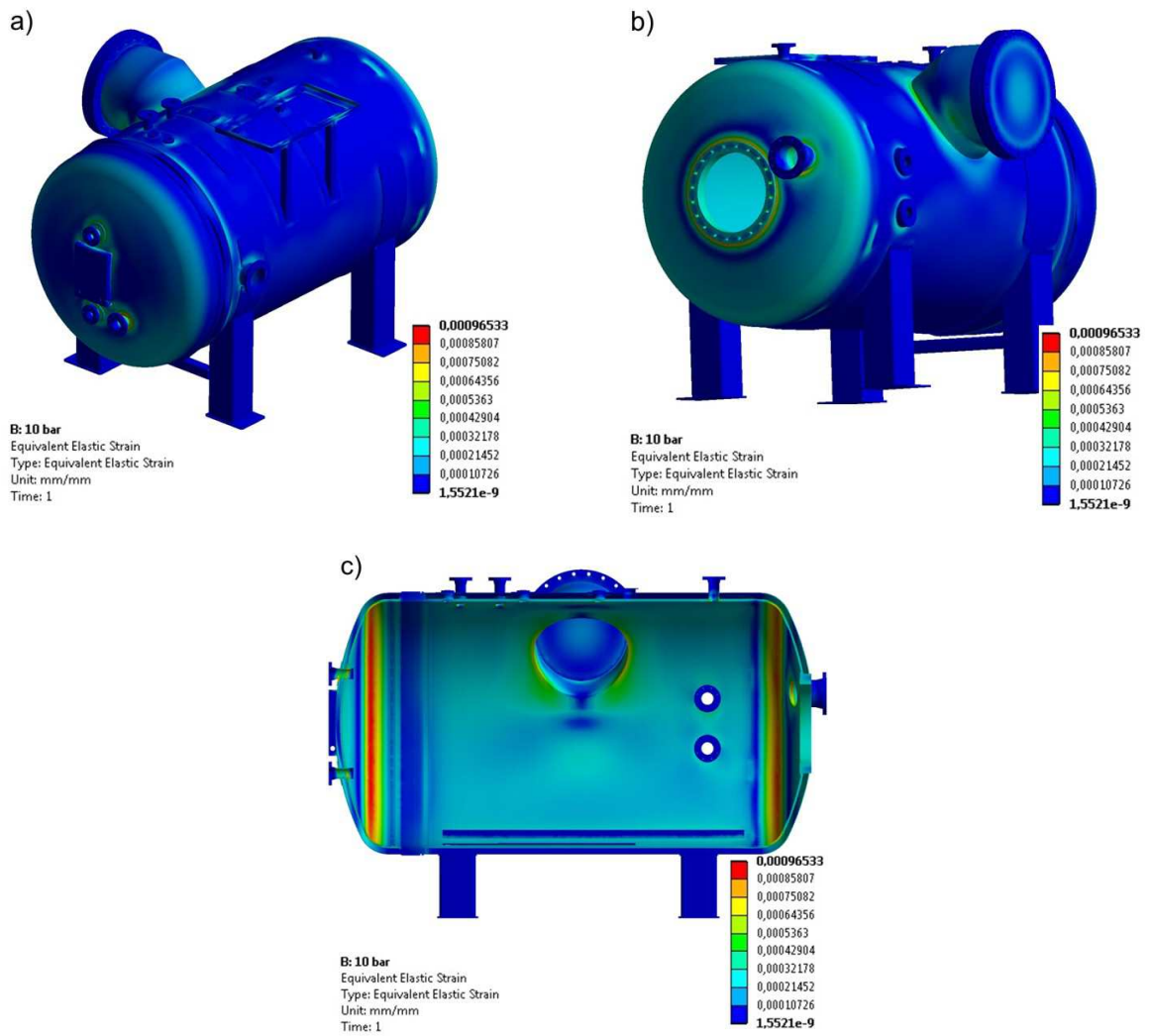
Model matematyczny materiału przyjęto jako liniowo sprężysty wg Sec. VIII Div. 2 Part 5.2.2. Dopuszczalne naprężenia graniczne wyznaczono wg Sec. VIII Div. 2, Fig. 5.1. Wartości naprężeń granicznych dla zastosowanych materiałów zamieszczono w tabeli 2.

5.4. ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ NUMERYCZNYCH W PRÓBIE RUCHOWEJ

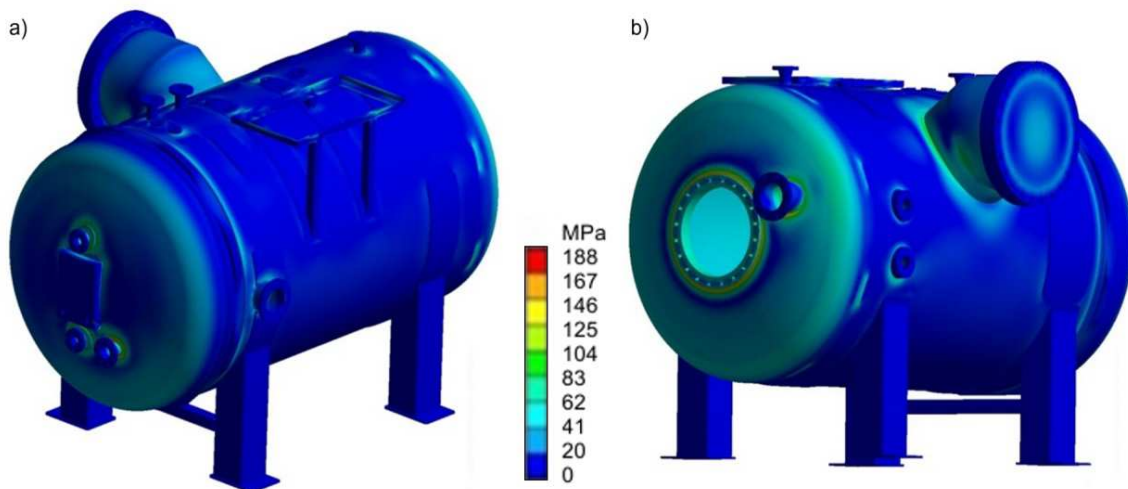
Model zbiornika ciśnieniowego do badań numerycznych (rys. 2) zaprojektowano za pomocą programu INVENTOR 2013. Obliczenia numeryczne oraz grafikę odkształceń i naprężeń (rys. 4 – 7,9 i 11) wygenerowano za pomocą programu ANSYS 13.

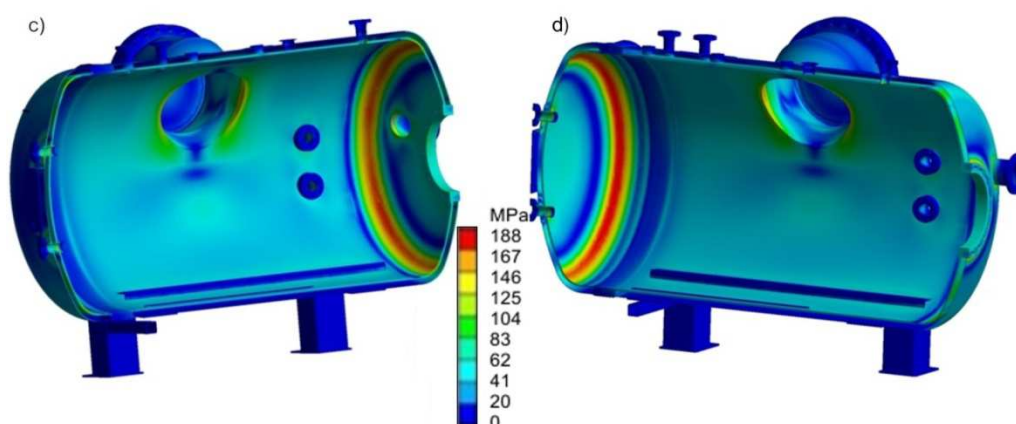


Rys. 4. Odkształcenia całkowite: widok z przodu (a) i z tyłu (b) oraz widok w przekroju (c)
 Fig. 4. The total deformation: front view (a) and back (b) and cross-sectional view (c)



Rys. 5. Względne odkształcenie sprężyste: widok z przodu (a) i z tyłu (b) oraz widok w przekroju (c)
 Fig. 5. The relative elastic deformation: front view (a) and back (b) and cross-sectional view (c)





Rys. 6. Naprężenia zredukowane wg hipotezy von Misesa: widok z przodu (a) i z tyłu (b) oraz widoki w przekroju (c) i (d)

Fig. 6. Reduced stress by von Mises hypothesis: front view (a) and back (b) and cross-sectional views (c) and (d)

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wykresy linearyzacji naprężeń (rys. 8, 10, 12). Wyniki badań numerycznych zestawiono w tabeli 3. Graficzne zestawienie wyników naprężeń (rys. 7, 9 i 11) dotyczą wybranych węzłów, w których poddano analizie strefy występowania naprężeń krytycznych.

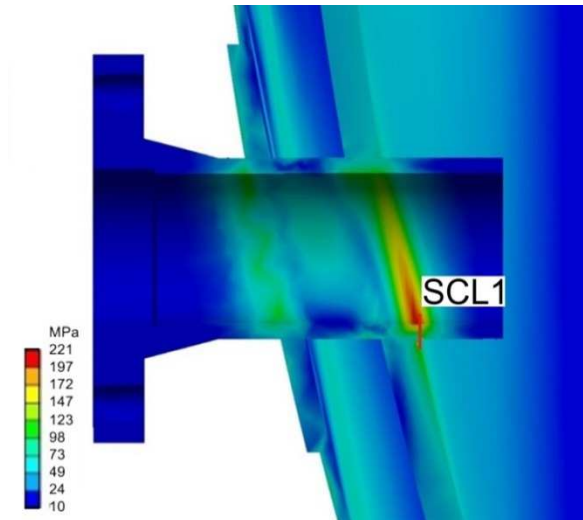
Tabela 3. Zestawienie wyników badań numerycznych
Table 3. Compilation of the results of numerical tests

Nr	Nazwa	T [°C]	Gat. stali	Naprężenia dopuszczalne wg Sec. VIII div.2 Figure 5.1			Wyniki wg Sec. VIII Div. 2, Part 5.2.2.		
				P_m	P_L	$P_L + P_b$	P_m	P_L	$P_L + P_b$
				[MPa]					
1	Kolnierze	250	SA-105	134,0	201,0	201,0	nie określa się	<70	nie określa się
2	Dennice i płaszcz	250	SA-516M Gr.485	138,0	207,0	207,0	nie określa się	151,7	nie określa się
3	Rury króćców	250	SA-106 Gr.B	128,0	192,0	192,0	nie określa się	181,8	nie określa się
4	Króćce wykonane z prętów	250	SA-675M Gr.485	132,0	198,0	198,0	nie określa się	182,0	nie określa się

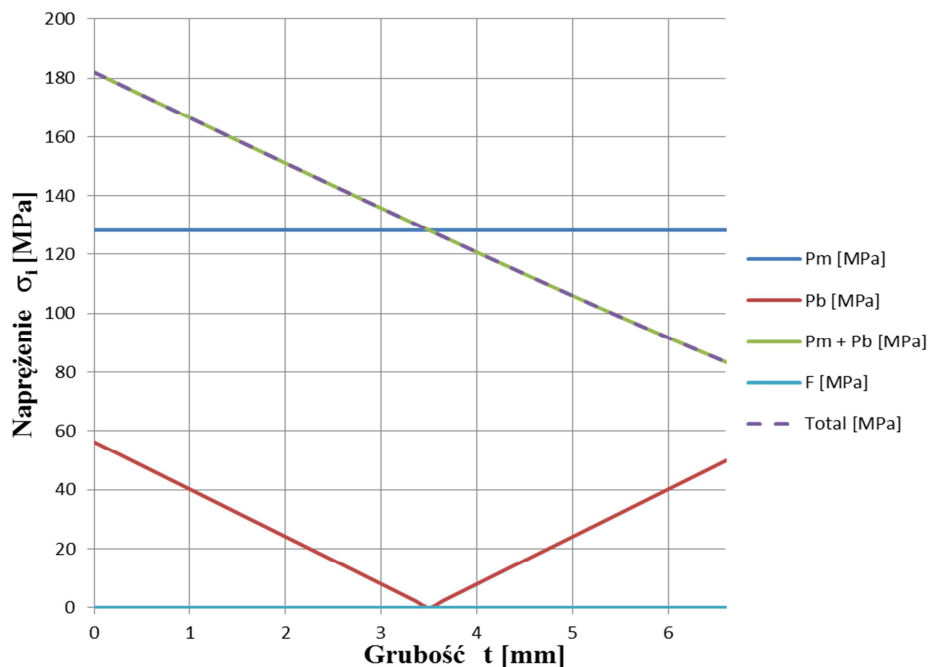
5.5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Obciążenie zbiornika ciśnieniem o wartości 10bar w temperaturze 250°C oraz siłami zewnętrznymi, spowodowało jego odkształcenie całkowite na poziomie 1,51mm – rys 4. Względne odkształcenie sprężyste wyniosło 0,097% – rys 5.

W celu zobrazowania wielkości naprężeń występujących w połączeniach spawanych, w wybranych miejscach krytycznych wyznaczono linię klasyfikacyjną naprężeń - SCL, wg Sec. VIII Div. 2 Annex 5.A. Linearyzacja naprężeń w strefach SCL uwzględnia wartość F – dodatkowe naprężenie wywołane przez koncentrację naprężeń powyżej poziomu naprężeń nominalnych, wynikające z obciążeń eksploatacyjnych.

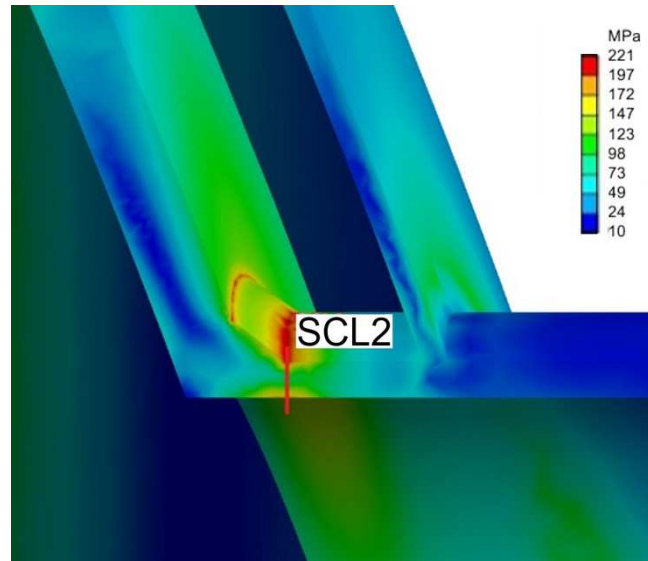


Rys. 7. Lokalizacja naprężeń w strefie SCL1
Fig. 7. The stress location at the SCL1 zone

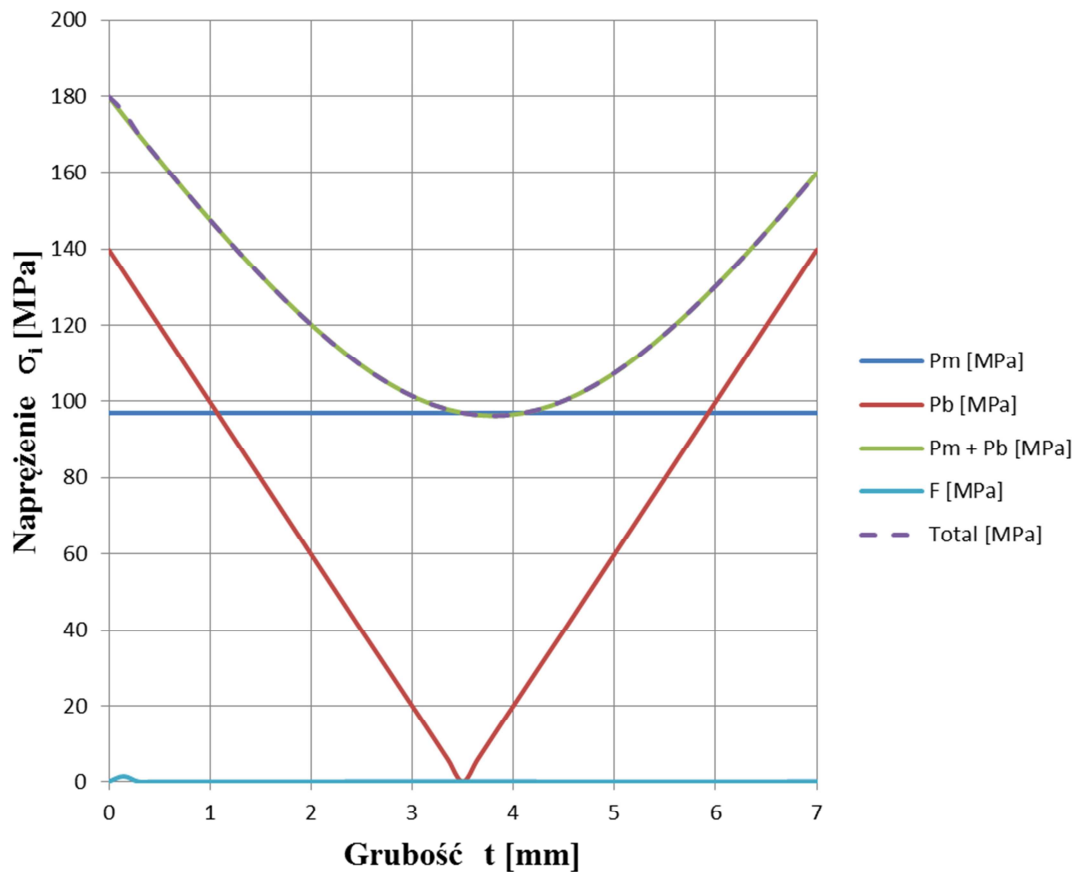


Rys. 8. Zestawienie linearyzacji naprężenia w strefie SCL1 (rys. 7) w miejscu krytycznym dla połączenia spawanego wg rys. 1-D1 (połączenie płaszcz – rura króćca)

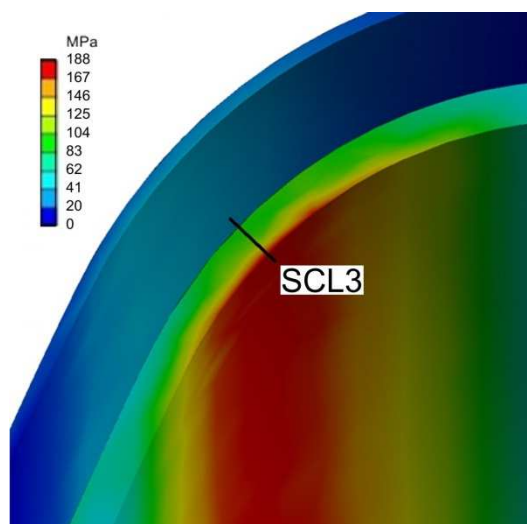
Fig. 8. Compilation of stress linearization SCL1 zone (Fig. 7) at the critical site of weld joint (a joint of water jacket – connector pipe)



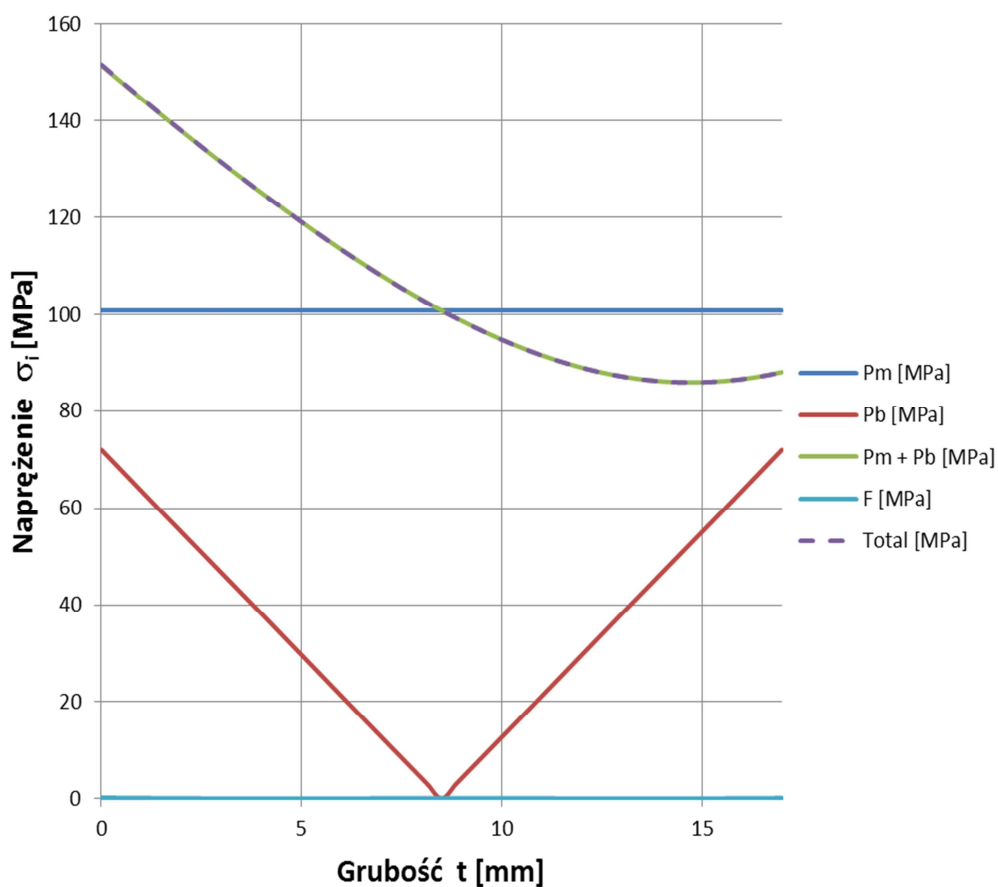
Rys. 9. Lokalizacja naprężeń w strefie SCL 2
 Fig. 9. The stress location at the SCL2 zone



Rys. 10. Zestawienie linearyzacji naprężenia w strefie SCL2 (rys. 9) w miejscu krytycznym dla połączenia spawanego (połączenie płaszcz – rura króćca)
 Fig. 10. Compilation of stress linearization SCL2 zone (Fig. 9) at the critical site of weld joint (a joint of water jacket – connector pipe)



Rys. 11. Lokalizacja naprężeń w strefie SCL 3
Fig. 11. The stress location at the SCL3 zone



Rys. 12. Zestawienie linearyzacji naprężenia w strefie SCL3 (rys. 11) w miejscu krytycznym dla obudowy pieca (dennicy) w miejscu przetłoczenia
Fig. 12. Compilation of stress linearization SCL3 zone (Fig. 11) at the critical site for the furnace casing (dished boiler end) in place of the overpress

Grubość ścianek spawanych rur króćców wynosi $t = 7\text{mm}$. Linearyzacja w przekroju SCL1- rys. 7 wykazała, że wyliczone wartości naprężeń odpowiadają wartościom ujętym w tabeli 3, wiersz 3. W przekroju SCL1 naprężenia pochodzące od wartości F są równe 0, świadczy o tym pokrywanie się linii naprężeń $P_m + P_b$ z linią naprężeń sumarycznych (rys. 8). W przekroju SCL2 (rys. 9), wartość F jest nieznacząca na powierzchni zewnętrznej króćca – działanie karbu (naprężenia o wartości ok. 3MPa wnikają na głębokość ok. 0,3mm rury króćca). Ze względu na nieistotny wpływ tych naprężeń można przyjąć, że w całym przekroju ścianki króćca $F = 0$, ponieważ w tym przypadku linia naprężeń $P_m + P_b$ również pokrywa się z linią naprężeń sumarycznych (rys. 10). Wg linearyzacji w przekroju SCL3 (rys. 11), gdzie grubość ścianki dennicy wynosi 16mm, wyliczone wartości naprężeń odpowiadają wartościom ujętym w tabeli 3, wiersz 2. Są to naprężenia ściskające, osiągające max. wartość na przegięciu, w strefie przejścia powierzchni kulistej w cylindryczną i mają one charakter powierzchniowy. Naprężenia pochodzące od wartości F nie występują (rys. 12).

W pozostałych połączeniach spawanych linearyzację pominięto, ze względu na występowanie niewielkich naprężeń - $P_m + P_b < 70\text{MPa}$.

6. OBLICZENIA ZMĘCZENIOWE

Obliczenia zmęczeniowe wykonano wg Sec. VIII Div. 2 Part 5.5.3. Minimalna ilość cykli pracy dla zbiornika wynosi $n_k = 12\ 000$. Dopuszczalną liczbę cykli dla poszczególnych grup elementów zbiornika określono na podstawie równania wg ASME Section VIII div 2 ed.2011a Equation 3.F.1:

$$N_k = 10^x \quad (1)$$

gdzie: N_k - dopuszczalna liczba cykli,

X - wykładnik potęgi oblicza się wg Sec. VIII div. 2 ed.2011a, Equation 3.F.2.

Kumulację uszkodzeń zmęczeniowych dla cyklu k , określono na podstawie równania – Sec. VIII div. 2 ed.2011a Equation 5.37:

$$D_{f,k} = \frac{n_k}{N_k} \quad (2)$$

gdzie: $D_{f,k}$ - kumulacja uszkodzeń zmęczeniowych,

n_k - minimalna ilość cykli pracy dla zbiornika.

Rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych składników zbiornika są akceptowalne jeśli jest spełniona nierówność – Sec. VIII div. 2 ed.2011a Equation 5.38:

$$D_{f,k} < 1,0 \quad (3)$$

Wyniki obliczeń zmęczeniowych zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki obliczeń zmęczeniowych
Table 4. The results of fatigue tests calculations

Nr	Nazwa	Materiał	X	N_k	$D_{f,k}$	Sprawdzenie
2	Dennice i płaszcz	SA-516M Gr.485	5,86	724436	0,0165	$D_{f,k} < 1,0$
3	Rury króćców	SA-106 Gr.B	5,63	426579	0,0281	$D_{f,k} < 1,0$
4	Króćce wykonane z prętów	SA-675M Gr.485	5,61	407380	0,0295	$D_{f,k} < 1,0$

7. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników badań numerycznych – rys. 4,5,6 oraz tabeli 3, wykresów linearyzacji naprężeń w miejscach krytycznych – rys. 8,10 i 12 oraz obliczeń zmęczeniowych (tabela 4) wykazano, że wyniki obliczeń wytrzymałościowych, zarówno zbiornika ciśnieniowego, jak i połączeń spawanych, wykonane wg przepisów ASME BPVC Sec. VIII Div. 1 ed. 2011a z wykorzystaniem Div. 2 ed. 2011a, Part 5, spełniają założone parametry i wymagane kryteria wytrzymałościowe.

Badania numeryczne zbiornika ciśnieniowego w warunkach próżni nie zostały ujęte w niniejszej pracy, ze względu na uzyskany wynik, nieistotny w odniesieniu do wyników badań nadciśnienia panującego w zbiorniku.

LITERATURA

- [1] About ASME – At a Glance, ASME. Retrieved 7 November 2011.
- [2] An International Code – 2010, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels – Division 1. ASME, July 1, 2011.
- [3] ASME, ASME.org > About ASME, Retrieved 2011-12-27.
- [4] ASME BPVC Section II Part D – Properties (Metric) / ed.2010, Addenda 2011a.
- [5] ASME BPVC Section VIII, Division 1, Rules for Construction of Pressure Vessels / ed.2010, Addenda 2011a.
- [6] ASME Section VIII, Division 2, Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels / ed.2010, Addenda 2011a.
- [7] ASME BPVC Section VIII, Division 3 - Rules for Construction of Pressure Vessels.
- [8] ASME BPVC Section VIII, Division 1, Example Problem Manual PTB-4-2012.
- [9] BALMER R.T., 2010, *Modern engineering thermodynamics*, 13.10, Modern Steam Power Plants, Academic Press, 864.
- [10] JOSZ K., 2012, *Przepisy ASME kluczem na nowe rynki*, Kwartalnik TÜV NORD Polska, lipiec - wrzesień, 4
- [11] MIRSKI Z., BANYŚ K., FAŁEK Z., PIWOWARCZYK T., 2014, *Projektowanie spawanych zbiorników ciśnieniowych wg wytycznych ASME BPVC przy wspomaganii MES*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 5, 116-121.
- [12] VARRASI J., 2009, *To protect and serve - celebrating 125 Years of ASME Codes & Standards*, MEMagazine, June.

PROJECT OF PRESSURE VESSELS ACCORDING TO ASME BPVC BY SUPPORTING MES

Historical background and a brief introduction to the American regulations ASME BPVC on welded boilers and pressure vessels, and nuclear devices are presented in this paper. In addition, under the provisions of the ASME Sec.

VIII Div. 1, a methodology for the design of two-sheath welded pressure vessel (autoclave) is described. Due to the lack of computational method (calculation based on formulas) the complete pressure vessel according to ASME Sec. VIII, Div. 1, numerical calculations were performed according to ASME Sec. VIII, Div. 2 Part 5, pursuant to the provisions Sec. VIII Div. 1, Introduction U-2 (g). The results of the calculations are presented in tables and graphs as well as visualized by graphics generated numerically.

Keywords: *design, calculations, overview of ASME BPVC, directive PED*