



**GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA

Stanisław Kisielewski

Dyscyplina naukowa: Budownictwo

ROZPRAWA DOKTORSKA

Diagnostyka Zbiorników Stalowych

Diagnostics Of Steel Tanks

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Jerzy Ziółko	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
<Stopień, imię i nazwisko>	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>

Gdańsk, 2016

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	4
SUMMARY.....	5
WYKAZ SKRÓTÓW	6
WPROWADZENIE	7
ROZDZIAŁ 1 STAN ZAGADNIENIA. TYPY ZBIORNIKÓW NA PALIWA NAFTOPOCHODNE, OCENA ICH STANU TECHNICZNEGO ORAZ PROCESÓW DEGRADACJI	8
1.1. Typy zbiorników magazynowych	9
1.1.1. Naziemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej z dachem stałym	9
1.1.2. Naziemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej z dachem pływającym	10
1.1.3. Naziemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej z pokryciem pływającym i z lekkim zadaszeniem stałym w kształcie kopuły	11
1.1.4. Podziemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej	11
1.1.5. Zbiorniki walcowe o osi głównej poziomej (naziemne i podziemne).....	12
1.1.6. Zbiorniki kropłokształtne	13
1.2. Materiały stosowane w konstrukcji zbiorników magazynowych.....	14
1.3. Zmiany reologiczne właściwości mechanicznych stali konstrukcyjnych	15
1.3.1. Procesy degradacyjne zachodzące w materiałach konstrukcji zbiorników	15
1.3.2. Wady technologiczne, powstałe podczas wykonania oraz eksploatacji zbiorników.....	17
1.3.3. Zmęczenie połączeń spawanych.....	20
1.4. Uszkodzenia korozyjne zbiorników	22
1.4.1. Charakterystyka uszkodzeń korozyjnych zewnętrznych powierzchni zbiorników magazynowych	22
1.4.2. Charakterystyka uszkodzeń korozyjnych wewnątrz zbiorników magazynowych na ropę naftową oraz paliwa płynne.....	22
1.4.3. Strefy zbiornika najbardziej narażone na korozję	27
1.5. Metody oceny stanu technicznego zbiorników magazynowych	32
1.5.1. Metody pomiarów grubości blach płaszczy, den oraz dachów zbiorników magazynowych	33
1.5.2 Metody sprawdzania szczelności den zbiorników.....	37
1.5.3. Badania zbiorników magazynowych metodą emisji akustycznej	39

1.5.3.1. Zastosowanie metody AE do badań dna zbiorników magazynowych	43
1.5.3.2. Zastosowanie metody AE do okresowego badania płaszczy zbiorników magazynowych	47
PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 1	50
ROZDZIAŁ 2 CEL, ZAKRES I TEZA NAUKOWA PRACY DOKTORSKIEJ.....	51
ROZDZIAŁ 3 REOLOGIA WŁASNOŚCI TECHNICZNYCH STALI STOSOWANYCH NA ZBIORNIKI W DRUGIEJ POŁOWIE XX WIEKU.....	53
3.1. Charakterystyka zbiornika, cel i zakres przeprowadzonych badań	54
3.2. Analiza składu chemicznego stali płaszcza zbiornika	57
3.3. Badania metalograficzne stali płaszcza zbiornika	58
3.4. Badanie udarności stali płaszcza zbiornika	60
3.5. Pomiar twardości stali płaszcza zbiornika.....	62
3.6. Badania wytrzymałości stali na rozciąganie.....	62
3.7. Badania wytrzymałości stali na rozciąganie z zastosowaniem metody emisji akustycznej	64
PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 3	76
ROZDZIAŁ 4 ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA WALCOWYCH ZBIORNIKÓW STAŁOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WAD- BLACH PŁASZCZA.....	77
4.1. Skrótowy zarys mechanizmu powstawania rozwarstwień w wyrobach walcowanych	77
4.2. Analiza numeryczna MES pola naprężeń w płaszczu zbiornika magazynowego z wadą typu rozwarstwienie	82
4.2.1. Zakres i cel obliczeń MES.....	82
4.2.2. Dane techniczne modelowanych zbiorników	82
4.2.3. Modele obliczeniowe zbiorników	84
4.2.4. Wyniki analizy MES	90
PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 4	106
ROZDZIAŁ 5 UZUPEŁNIENIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ NOWYMI ELEMENTAMI TECHNOLOGICZNYMI ROZSZERZAJĄCYMI ZAKRES JEJ STOSOWANIA.....	107
5.1. Badanie metodą AE dna zbiornika magazynowego z wewnętrzną instalacją grzewczą	107
5.2. Badanie metodą AE pierwszego pierścienia płaszcza oraz strefy przydennej zbiornika magazynowego z wewnętrznymi grzejnikami	111
5.3. Badanie metodą AE nieszczelności w podwójnym dnie zbiornika magazynowego	114

5.3.1. Wykrywanie nieszczelności w podwójnym dnie zbiornika – zbiornik pusty (Wariant I).....	114
5.3.2. Wykrywanie nieszczelności w podwójnym dnie – zbiornik napełniony (Wariant II)	116
PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 5	118
WNIOSKI KOŃCOWE.....	119
LITERATURA	122

STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia związanego z wieloletnim okresem eksploatacji stalowych zbiorników o osi głównej pionowej służących do magazynowania lub komponowania produktów naftowych. Scharakteryzowano typy zbiorników i zagadnienia z nimi związane w oparciu o dostępną literaturę, normy przepisy i rozporządzenia dotyczące tego tematu. Dokonano analizy przyczyn obniżających dalszą przydatność zbiorników do eksploatacji, wskazano strefy najbardziej narażone na wystąpienie utraty własności i nośności konstrukcji. Dokonano przeglądu technik, sposobów i metod oceny stanu technicznego zbiorników.

W dysertacji podjęto próbę oceny rozwarstwień blach, zwłaszcza płaszcza zbiornika. Wykonano analizę wyżeń elementów konstrukcji zbiorników metodą MES. Istotnym elementem omawianym w pracy jest metoda Emisji Akustycznej stosowana do wstępnej oceny i lokalizacji miejsc najbardziej zagrożonych w płaszczu i dnie zbiornika. Jest to jedyna dotychczas metoda pozwalająca na wykrycie zagrożeń spowodowanych uszkodzeniami, np. procesami korozyjnymi bez wyłączenia zbiorników z eksploatacji. Daje informację na temat wad oraz ewentualnej ich propagacji zagrażającej dalszej bezpiecznej pracy.

Zaproponowane w niniejszej pracy zmodyfikowane metodyki oceny stanu technicznego z wykorzystaniem metody Emisji Akustycznej pozwoliły na skuteczne przeprowadzenie badań diagnostycznych rzeczywistych zbiorników magazynowych o różnych pojemnościach i konstrukcjach

SUMMARY

The doctoral dissertation concerns an issue connected with long time in service of aboveground steel tanks with a vertical axis used for storage or compose petroleum products. Described the different types of tanks and problems related to them based on the standards and rules, available literature and regulations relating to this subject. It was performed an analysis of the causes of decrease the quality and usefulness of tanks into service, as well indicated zones most at risk of degradation of property of structure material and the integrity of the structure. It was made a review of techniques, ways and methods to assess of the technical condition of the tanks.

Attempt to assess the delaminations of sheets, especially the tank shell. Performed stress analysis of structural elements of tanks using FEM method. An important element of the present work is the acoustic emission method used for the preliminary assessment and locations of zones most at risk in the shell and on the bottom of the tank. This is so far the method allowing to detect risk caused by damage, eg. corrosion processes and without necessity of taking out of service the tanks. This method gives information about defects and their possible development, what could threaten further safe operation.

Proposed in this work modified methodology for the assessment of technical state of the tanks using acoustic emission method allowed for the successful conduct diagnostic tests of storage tanks with different capacities and the constructions.

WYKAZ SKRÓTÓW

AE – emisja akustyczna

AT – badania metodą emisji akustycznej

HB – twardość w skali Brinella

HBW – twardość w skali Brinella z wykorzystaniem wgłębnika z węgla spiekanego

MES – metoda elementów skończonych

NDT – badania nieniszczące

PMS –przenośna mikroskopia świetlna

SWC – strefa wpływu ciepła

UT – badania metodą ultradźwiękową

UTT – pomiar grubości metodą ultradźwiękową

VT – badania wizualne

WPROWADZENIE

Na terenie polskich przedsiębiorstw przemysłu petrochemicznego i rafineryjnego eksploatowane są setki zbiorników magazynowych o różnej pojemności, przeznaczonych do przechowywania oraz komponowania ropy naftowej lub komponowania produktów ropopochodnych (mieszanie różnych gatunków ropy naftowej pozyskiwanej od różnych dostawców). Większość ww. zbiorników jest eksploatowana od ponad kilkudziesięciu lat. Materiały konstrukcji, zwłaszcza ich głównych elementów nośnych: płaszczy oraz den na skutek wieloletniej pracy w warunkach atmosferycznych (z zewnątrz) oraz medium chemicznego (od strony wewnętrznej) ulegają degradacji, która polega głównie na wystąpieniu procesów korozyjnych, powodujących znaczne ubytki materiałów ich ścianek. Istotny wpływ na te procesy degradacyjne, a głównie na ich wystąpienie, mają również istniejące w stali różnego typu wady technologiczne, takie jak mikropustki, nieciągłości, niejednorodności zarówno strukturalne, jak i chemiczne, zanieczyszczenia struktury poprzez wtrącenia związków siarki i in., które powstały na skutek niedoskonałości ówczesnych technologii wytwarzania stali konstrukcyjnych, lub przykładowo na skutek odstępstw od technologii w trakcie budowy zbiornika. Rozwój wymienionych wyżej defektów do wymiarów krytycznych może doprowadzić do powstania ich niestabilnego stanu (pod wpływem obciążeń roboczych), którego efektem będzie utrata nośności lub stateczności konstrukcji, a w konsekwencji awaria obiektu, co może doprowadzić do znacznych strat finansowych oraz skażenia środowiska naturalnego. Na skale problemu wskazują dane statystyczne [1], zgodnie z którymi spośród wszystkich instalacji petrochemicznych najczęściej dochodzi do wystąpienia awarii w konstrukcjach zbiorników magazynowych – sumarycznie ok. 58 %, gdzie awarie zbiorników bezciśnieniowych o osi pionowej to – ok. 14 % od wszystkich zdarzeń.

W związku z powyższym, w celu podniesienia bezpieczeństwa eksploatacji oraz niezawodności wieloletnio eksploatowanych zbiorników magazynowych jest coraz bardziej aktualnym opracowanie nowych algorytmów oceny ich stanu technicznego oraz określenia warunków dalszej eksploatacji lub wykonania czynności skierowanych na przedłużenie ich okresu pracy (przeprowadzenie niezbędnych napraw remontowych, monitoringu stanu). Niniejsza praca jest próbą rozwiązywania tego typu problemów.

ROZDZIAŁ 1

STAN ZAGADNIENIA. TYPY ZBIORNIKÓW NA PALIWA NAFTOPOCHODNE, OCENA ICH STANU TECHNICZNEGO ORAZ PROCESÓW DEGRADACJI

Ważną częścią polskiego przemysłu petrochemicznego jest magazynowanie oraz komponowanie ropy naftowej i innych produktów ropopochodnych. Dane procesy technologiczne realizowane są z wykorzystaniem stalowych zbiorników magazynowych o różnej konstrukcji i pojemności. Większość z nich została wybudowana w drugiej połowie XX wieku i jest eksploatowana od ponad kilkudziesięciu lat. Na skutek wieloletniej pracy materiały elementów konstrukcji zbiornika ulegają procesom degradacyjnym, co prowadzi do wystąpienia uszkodzeń, a głównie znacznych ubytków korozyjnych materiału ich blach. Aktywność procesów degradacyjnych zależy głównie od typu zbiornika, warunków eksploatacji, rodzaju magazynowanego w nim medium oraz okresu eksploatacji.

W pierwszym rozdziale pracy doktorskiej opisano typy zbiorników magazynowych, podano informacje o materiałach stosowanych na ich konstrukcje, określono procesy degradacyjne oraz najczęściej spotykane uszkodzenia, a także przedstawiono metody badań nieniszczących (NDT), aktualnie stosowane w celach określenia stanu technicznego zbiorników.

1.1. Typy zbiorników magazynowych

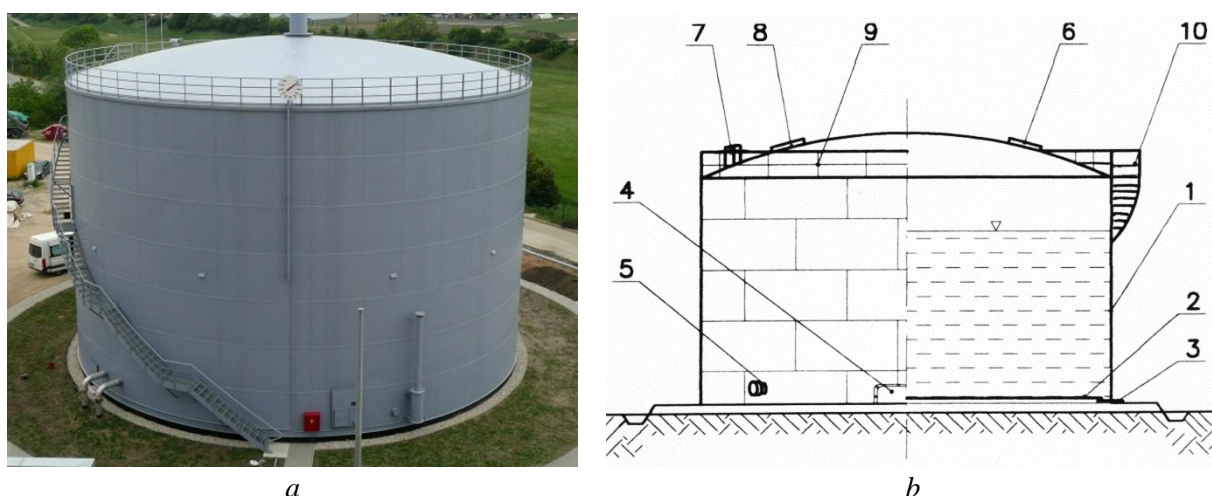
Zbiorniki w przemyśle petrochemicznym w zależności od ich przeznaczenia można podzielić na: zbiorniki roboczo-technologiczne i zbiorniki magazynowe, a w zależności od rozmieszczenia w stosunku do poziomu gruntu na: naziemne i podziemne.

Stalowe zbiorniki magazynowe do przechowywania ropy naftowej i produktów naftowych ze względu na konstrukcję można podzielić na następujące typy [2, 3]:

- walcowe o osi pionowej (jednopłaszczkowe, dwupłaszczkowe, z dachem stałym, z dachem pływającym, a także z dachem stalowym i pokryciem pływającym). Zbiorniki dwupłaszczkowe mają dwa koncentrycznie umieszczone płaszcze. Płaszcz wewnętrzny zapelnia pojemność magazynową, płaszcz zewnętrzny i podwójne dno zabezpieczają teren bazy magazynowej przed skażeniem gruntu w przypadku awarii zbiornika
- walcowe o osi poziomej,
- kroplokształtne.

1.1.1. Naziemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej z dachem stałym

Zbiorniki z dachem stałym (rys. 1.1) mają najczęściej pojemność nie przekraczającą 30 000 m³. Stosuje się je głównie jako zbiorniki rotacyjne w procesie technologicznym przerobu ropy naftowej a także do magazynowania olejów napędowych i opałowych, ponieważ te produkty ropopochodne charakteryzują się ograniczoną skłonnością do parowania. Zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej budowane są obecnie jako jedno lub dwupłaszczkowe. Stanowią one zasadniczą liczbę eksploatowanych i nowo budowanych zbiorników ze względu na prostotę konstrukcji i łatwość wytwarzania powłok jednokrzywiznowych (blachy płaszcza mogą być wygięte na wymaganą krzywiznę walcowaniem).

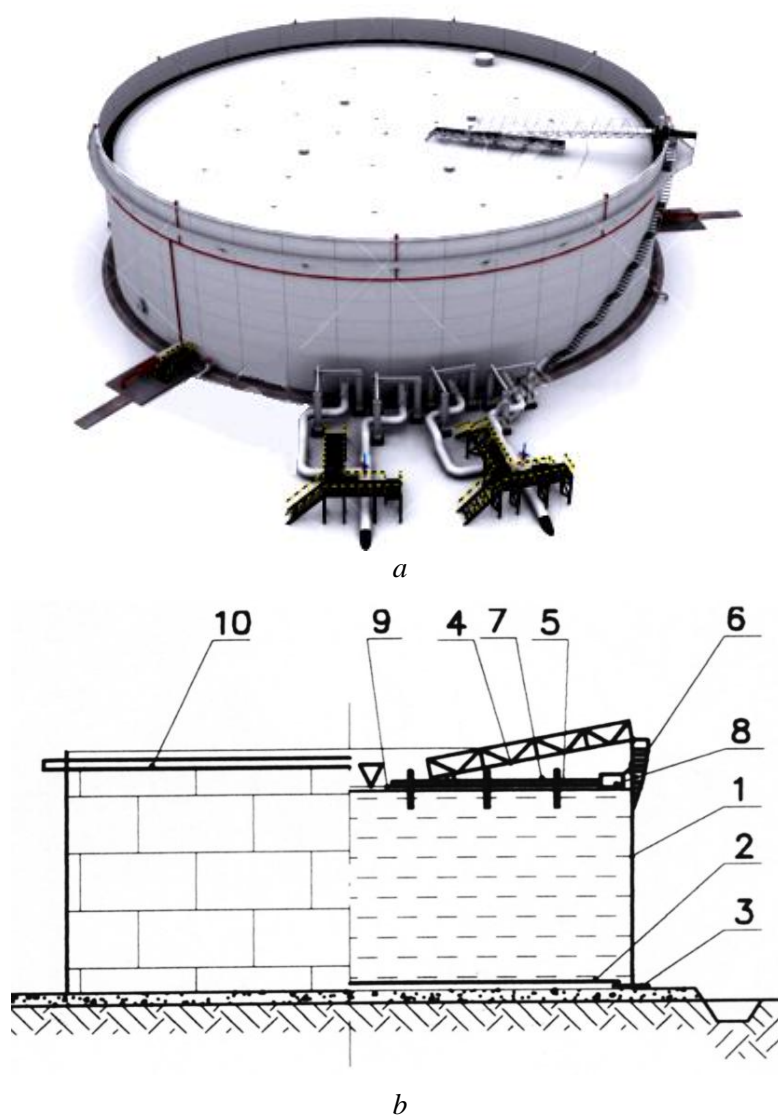


Rys. 1.1. Widok ogólny (a) oraz schemat konstrukcji (b) typowych zbiorników z dachem stałym:

1 – płaszcz zbiornika, 2 – dno wewnętrzne, 3 – dno zewnętrzne, 4 – właz wyczystkowy, 5 – króciec produktowy, 6 – dach, 7 – króciec dachowy, 8 – właz dachowy, 9 – barierka ochronna, 10 – schody prowadzące na dach [4]

1.1.2. Nazemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej z dachem pływającym

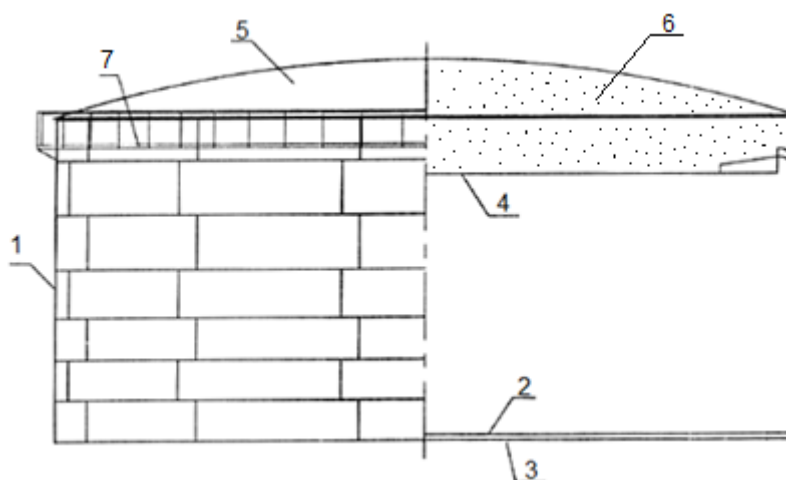
Zbiorniki z dachem pływającym (rys. 1.2) budowane są przede wszystkim do magazynowania ropy naftowej i benzyn. Ich zaletą jest brak przestrzeni parowo-powietrznej pomiędzy dachem a lustrem magazynowanego paliwa. Wyklucza to możliwość parowania lekkich frakcji ropy naftowej lub benzyn. W zależności od rodzaju magazynowanego produktu mają one zróżnicowane pojemności: dla benzyn ok. 10 000 m³, a dla ropy naftowej nawet 100 000 m³ (w Polsce), a za granicą budowano takie zbiorniki nawet o pojemności 150 000 m³ i większych.



Rys. 1.2. Widok ogólny (a) oraz schemat konstrukcji (b) typowych zbiorników z dachem pływającym: 1 – płaszcz zbiornika, 2 – dno wewnętrzne, 3 – dno zewnętrzne, 4 – schody przesuwne, 5 – podpierał dachowy, 6 – schody zewnętrzne, 7 – bieżnia schodów przesuwnych, 8 – ponton, 9 – membrana dachowa, 10 – pierścień stężenia wiatrowego [4]

1.1.3. Nazemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej z pokryciem pływającym i z lekkim zadaszaniem stałym w kształcie kopuły

Dany rodzaj zbiorników (rys. 1.3) łączy zalety dwóch poprzednio omówionych: pokrycie pływające zabezpiecza przed parowaniem magazynowego paliwa, a dach stały chroni je przed zawodnieniem wodą deszczową spływającą po wewnętrznej stronie płaszcza zbiornika i przenikającą w miejscach lokalnego nieprzylegania uszczelnienia dachu do płaszcza (np. w miejscach lokalnych deformacji płaszcza spowodowanych niedoskonałościami technologii wykonania). Zbiorniki z dachami stałymi i pokryciami pływającymi stosuje się np. do magazynowania paliw lotniczych, które nie mogą zawierać nawet śladowych ilości wody.



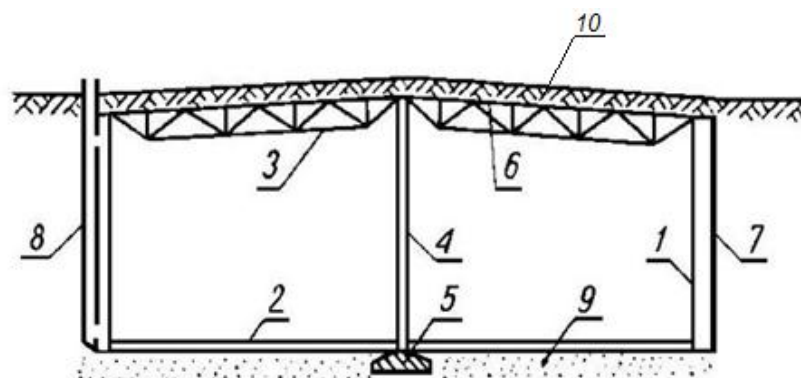
Rys. 1.3. Schemat konstrukcji zbiornika z pokryciem pływającym i lekkim zadaszaniem w kształcie kopuły: 1 – płaszcz zbiornika, 2 – dno zewnętrzne, 3 – dno wewnętrzne, 4 – przykrycie pływające, 5 – zewnętrzny dach kopulisty, 6 – strefa parowo-powietrzna w zbiorniku, 7 – podest okrężny [4]

1.1.4. Podziemne zbiorniki walcowe o osi głównej pionowej

Zbiorniki podziemne (rys. 1.4) stosowane są głównie w dwóch celach:

1. zamaskowania zbiornika ze względów militarnych,
2. wyeliminowania parowania magazynowanego paliwa wywołanego wahaniami temperatury powietrza.

Konstrukcja oraz usytuowanie ww. zbiorników zapewnia prawie stałą temperaturę magazynowanego medium, zlikwidowanie strat tzw. „małego oddechu”. Żywotność takich zbiorników można znacznie wydłużyć przez zwiększenie liczby powłok ochronnych (np. technologia Con Vault – na stalową ściankę wewnętrzną nakłada się cienką warstwę pianki styropianowej, na nią polietylen i zewnętrzną warstwę żelbetu). Zbiorniki wykonywane są w żelbetowych obudowach, których zadaniem jest przyjęcie parcia poziomego gruntu. Dach zbiornika, często ma w centralnej części podparcie wykonane w postaci kolumny lub słupa, pokryty jest warstwą izolacji termicznej oraz gruntem.



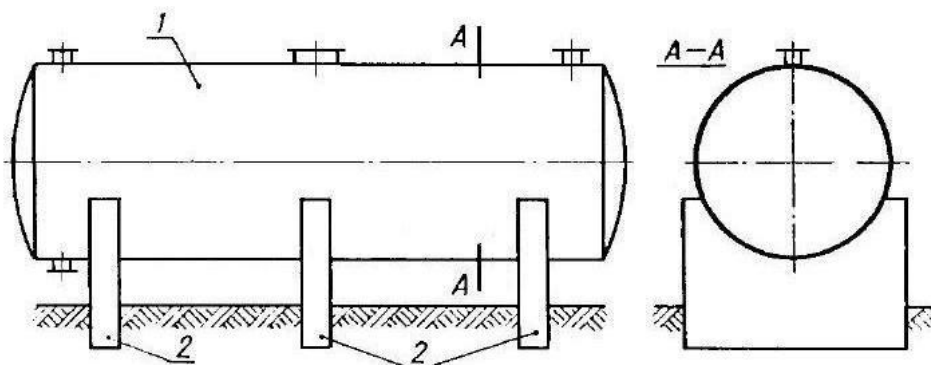
Rys. 1.4. Schemat konstrukcji podziemnego zbiornika walcowego o osi głównej pionowej. 1 – płaszcz zbiornika, 2 – dno zbiornika, 3 – więzary dachowe, 4 – słup środkowy, 5 – fundament słupa środkowego, 6 – pokrycie dachowe, 7 – obudowa żelbetowa, 8 – kanał wentylacyjny, 9 – fundament dna zbiornika, 10 – izolacja termiczna i warstwa gruntu

1.1.5. Zbiorniki walcowe o osi głównej poziomej (naziemne i podziemne)

Zbiorniki o osi głównej poziomej są przeznaczone do magazynowania małych ilości paliw płynnych (najczęściej mają pojemność od 5 do 100 m³). Mogą one być zarówno naziemne (rys. 1.5), jak i podziemne (rys. 1.6). W tym drugim przypadku muszą mieć wzmocnioną konstrukcję płaszcza. Zbiorniki o osi głównej poziomej stosowane są w małych bazach paliw, głównie w stacjach dystrybucyjnych paliw płynnych.

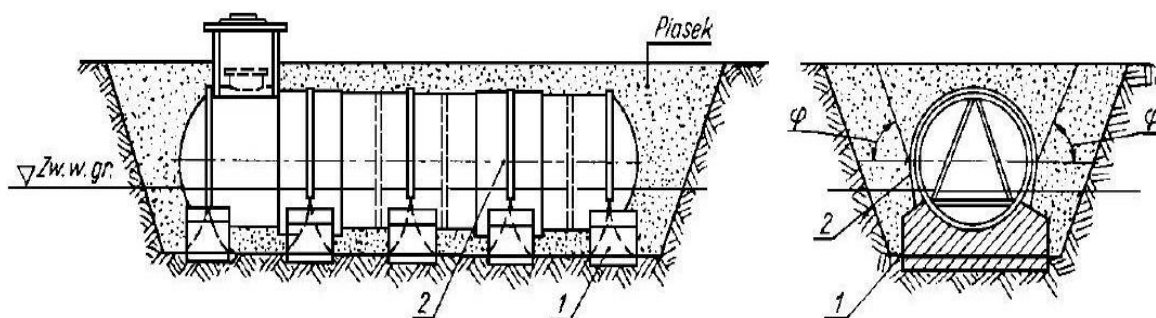


a



b

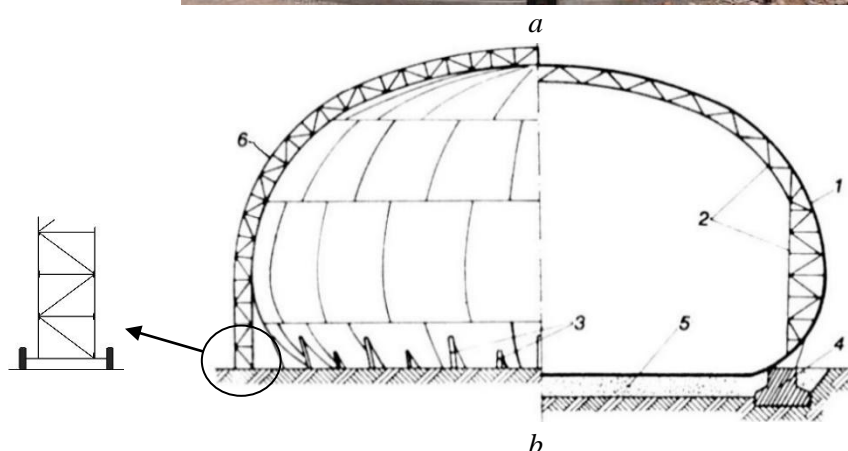
Rys. 1.5. Widok ogólny (a) oraz schemat konstrukcji (b) naziemnego zbiornika walcowego o osi głównej poziomej: 1 – zbiornik, 2 – podpory [4]



Rys. 1.6. Schemat konstrukcji podziemnego zbiornika walcowego o osi głównej poziomej posadzonego poniżej poziomu wód gruntowych: 1 – bloki fundamentowe, 2 – stalowe obejmy kotwiące zbiornik w blokach fundamentowych

1.1.6. Zbiorniki kroplokształtne

Charakterystyczną cechą zbiorników kroplokształtnych (rys. 1.7) jest równomierne wyężenie blach powłoki we wszystkich kierunkach. Dany efekt można osiągnąć wyłącznie przy całkowitym wypełnieniu zbiornika. Natomiast w warunkach częściowego wypełnienia blachy w strefie przydennej ulegają znacznym obciążeniom zginającym, co wymaga wzmocnienia konstrukcji poprzez wykonanie usztywnienia. Zbiorniki kroplokształtne są bardzo trudne w prefabrykacji, dlatego obecnie nie są stosowane w praktyce przemysłowej.



Rys. 1.7. Widok ogólny (a) oraz schemat konstrukcji (b) zbiornika kroplokształtnego z usztywnieniem płaszczu 1 – płaszcz zbiornika, 2 – kratowe usztywnienia wewnętrzne, 3 – żebra podporowe, 4 – fundamenty pod zewnętrznymi żebrami i wewnętrznymi usztywnieniami płaszczu, 5 – fundament piaskowy pod dnem zbiornika, 6 – obrotowy pomost roboczy

1.2. Materiały stosowane w konstrukcji zbiorników magazynowych

Do budowy zbiorników magazynowych ropy naftowej oraz innych produktów ropopochodnych stosowano niskowęglowe, spawalne stali gatunków: St3S, St3SY, St3SX i 18G2A. Wymagania dotyczące właściwości mechanicznych ww. materiałów określone są w normie [5], obowiązującej w drugiej połowie XX wieku, kiedy wybudowano znaczną część zbiorników magazynowych polskiego przemysłu petrochemicznego. Obecnie ww. gatunki zastąpiono stalami S235 i S355, a wymagania dotyczące ich składu chemicznego oraz właściwości mechanicznych określone są w nowej normie [6].

W tabelach 1.1. i 1.2. podane są składy chemiczne oraz właściwości mechaniczne ww. stali konstrukcyjnych.

Tabela 1.1. Skład chemiczny stali konstrukcji zbiorników na ropę naftową i produkty naftowe [5-6].

Pierwiastki chemiczne, [%]	Gatunki stali					
	St3	St3SY	St3SX	18G2A	S235	S355
C	0,22	max 0,22	max 0,12	0,16	0,25	0,22
Si	-	0,1÷0,35	max 0,05	0,32	-	0,55
Mn	-	1,1	0,9÷1,3	1,12	1,4	1,6
P	-	max 0,05	0,04÷0,08	0,04	0,045	0,035
S	-	max 0,05	0,24÷0,34	0,02	0,045	0,035
N	-	-	-	-	0,009	-

Tabela 1.2. Właściwości mechaniczne stali konstrukcji zbiorników na ropę naftową i produkty naftowe [5-6]

Parametr	Gatunki stali					
	St3	St3SY	St3SX	18G2A	S235	S355
R_m , [MPa]	375	340÷520	380÷510	490	410	470
R_{es} , [MPa]	215	185÷235	390	355	235	215
A, [%]	23÷26	19÷26	8	23	21÷24	22÷24
HB	125	142	140	135	140	137

1.3. Zmiany reologiczne właściwości mechanicznych stali konstrukcyjnych

1.3.1. Procesy degradacyjne zachodzące w materiałach konstrukcji zbiorników

W celu prowadzenia bezpiecznej długotrwałej eksploatacji konstrukcji pracujących w przemyśle petrochemicznym (rurociągi, zbiorniki i in.) wymagany jest określenie bieżących właściwości mechanicznych eksploatowanych stali, a także ustalenie kierunków rozwoju i stopnia nasilenia przyszłych zmian degradacyjnych oraz ich wpływu na właściwości mechaniczne [7]. A więc pojawia się także potrzeba wypracowania nowych wskaźników diagnostycznych umożliwiających rzetelną ocenę stopnia zdegradowania materiału. Typowe objawy degradacji mikrostrukturalnej w stalach niskowęglowych niestopowych to:

- postępujący rozpad obszarów perlitu lub bainitu na ferryt i węgliki,
- postępujące procesy wydzieleniowe (azotków i węglików),
- tworzenie lokalnych siatek wydzieleni na granicach ziarn ferrytu,
- zmiany morfologii wydzieleni.

Wymienione wyżej procesy zwane są głównie starzeniem stali oraz mają istotny wpływ na ich właściwości wytrzymałościowe. Dotychczasowe prace badawcze pokazały [8], że ww. zmiany powodują m.in.:

- wzrost twardości materiału,
- wzrost granicy plastyczności R_e i wytrzymałości na rozciąganie R_m ,
- obniżenie ciągliwości,
- spadek udarności i podwyższenie temperatury przejścia plastyczno-krucho (nawet do dodatniej temperatury),
- pogorszenie właściwości zmęczeniowych,
- spadek odporności na pękanie i wzrost ryzyka krucho pękania.

Stale produkowane w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, a więc te z których wykonano konstrukcję najstarszych zbiorników magazynowych w polskim przemyśle rafineryjnym, charakteryzują się drobnoziarnistą ferrytyczno-perlityczną strukturą, która zawiera często dużą ilość zanieczyszczeń w postaci wtrąceń niemetalicznych o kształcie wydłużonym zgodnie z kierunkiem walcowania blachy.

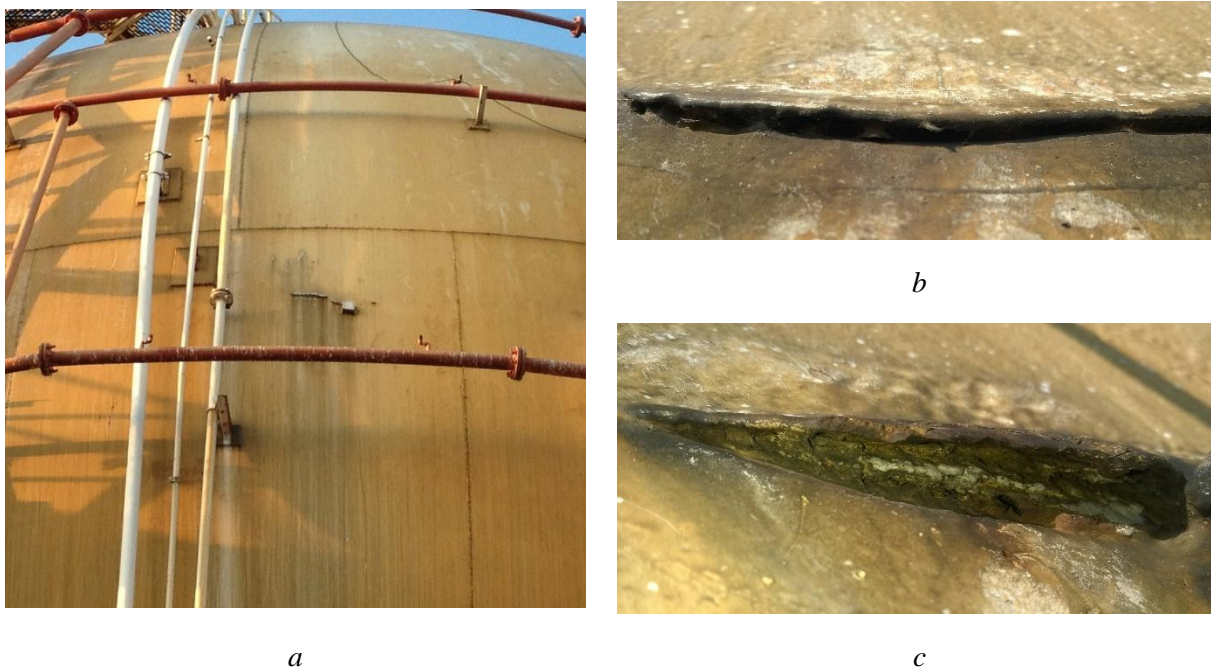
Jednym z przejawów zmian reologicznych w stalach zbiorników jest ujawnienie się na powierzchni ich płaszczy rozwarstwień o różnych wymiarach. Rozwarstwienia te wykryto m.in. w płaszcach zbiorników walcowych o pojemnościach $V = 5000 \text{ m}^3$ i $V = 10000 \text{ m}^3$ oraz zbiornika kulistego $V = 3300 \text{ m}^3$ eksploatowanych w jednym z zakładów rafineryjnych

przemysłu petrochemicznego. Przyczyną powstania takich rozwarstwień mogą być odstępstwa od technologii wytwarzania blach (stosowanych w budowie ww. zbiorników) na skutek czego ich stale mają nieprawidłową strukturę lub zawierają nadmiar szkodliwych składników stopowych, takich jak siarka i fosfor. Późne wykrycie ww. defektów można wiązać z faktem braku, lub nadmiernego ograniczenia, badań blach na rozwarstwienia w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Rozwarstwienia mogą również być wynikiem wydzielania się azotków i tlenków na granicach ziaren stali, co jest przejawem jej starzenia się, a więc zmian reologicznych. Odpowiedź na te pytania będzie można uzyskać po analizie wyników badań materiałów wycinków pobranych z blach płaszczy ww. zbiorników, podczas ich postojów remontowych [7].

Warto zaznaczyć, że pośród defektów płaszczy ww. zbiorników, wykrytych poprzez badania wizualne i ultradźwiękowe szczególnie niebezpieczne są te rozwarstwienia, które rozwijają się od środka grubości blachy i wyklinowują się na jej powierzchnię (rys. 1.8. i rys. 1.9). Analizując charakter pracy zbiorników można stwierdzić, że mniej niebezpieczne są te rozwarstwienia, których kierunek propagacji oraz główna płaszczyzna są równoległe do linii pola naprężeń, wywołanych obciążeniem elementu konstrukcyjnego. Natomiast te rozwarstwienia, które rozwijają się od środka grubości blachy wychodząc na jej powierzchnię, mogą doprowadzić do utraty stateczności lub wytrzymałości konstrukcji, a więc muszą być usunięte poprzez wycięcie fragmentu płaszcza z wadą i spawanie, spoinami czołowymi, wstawki z nowego materiału.



Rys. 1.8. Rozwarstwienie blachy od strony wewnętrznej płaszcza zbiornika walcowego o osi pionowej ($V = 10000 \text{ m}^3$)



Rys. 1.9. Rozwarstwienia o długości 400 mm na płaszczu zbiornika kulistego ($V=3300 \text{ m}^3$, rok budowy 1978):
a – widok ogólny; *b*, *c* – widok z przybliżeniem

1.3.2. Wady technologiczne, powstałe podczas wykonania oraz eksploatacji zbiorników

Na niezawodność oraz bezpieczną eksploatację zbiornika mają wpływ zarówno wady technologiczne (powstałe na skutek odstępstw od technologii podczas budowy zbiornika) jak i uszkodzenia powstałe w trakcie pracy konstrukcji. Wady technologiczne to głównie są odchyłki od projektowego kształtu konstrukcji zbiornika oraz wady wykonania spoin.

Zbiorniki stalowe o osi pionowej są konstrukcjami powłokowymi o dużych wymiarach i niewielkiej sztywności ścianek. Przykładowo jeden z aktualnie eksploatowanych zbiorników o pojemności $V = 32000 \text{ m}^3$ ma następujące wymiary:

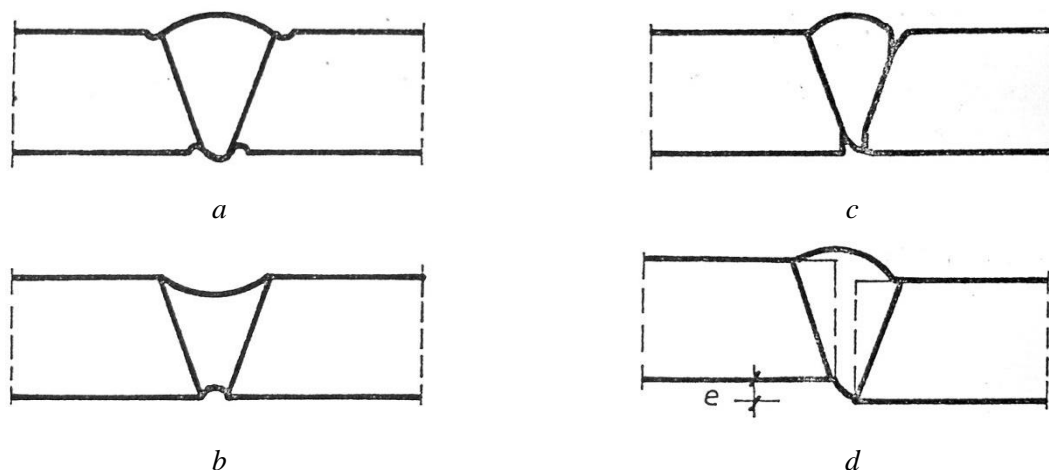
- średnica płaszczu $d_w = 51900 \text{ mm}$,
- wysokość płaszczu $h = 18010 \text{ mm}$,
- grubość blach pierścieni płaszczu $t = 19, 18, 17, 16, 15, 14, 11, 9, 8 \text{ mm}$,
- powierzchnia dna 2114 m^2 .

Stosunek średnicy płaszczu do grubości ścianki takiego zbiornika wynosi $d_w/t = 3460$ (zakładając grubość pierścienia 15 mm znajdującego się w środku wysokości płaszczu). Trudne jest bezdefektowe wykonanie tak dużej konstrukcji o znacznej długości spoin, które wywołują deformacje na skutek oddziaływania spawalniczych naprężeń resztkowych. Ponadto, fundament piaskowy zbiornika rzadko jest idealnie wyrównany i zagęszczony, a więc często pod wpływem

masy wypełnionego zbiornika może wystąpić nierównomierne osiadanie jego fundamentu powodujące lokalne deformacje płaszcza i dna. Dodatkową niedogodnością jest też to, że ostateczne zagęszczenie fundamentu następuje w trakcie pierwszego napełniania zbiornika wodą (próby hydraulicznej), co jest realizowane w relatywnie krótkim czasie, w stosunku do okresu budowy. Dzieje się tak dlatego, że masa pustego zbiornika jest stosunkowo mała w porównaniu do masy zbiornika wypełnionego wodą lub magazynowanym produktem (dla zbiornika $V = 32000 \text{ m}^3$ stosunek masy pustego w porównaniu do wypełnionego wodą wynosi 1,97 %) [7].

Wielkość dopuszczalnych odchyłek kształtu płaszcza zbiornika reguluje norma [2], przy czym dopuszcza ona odchyłki lokalne w postaci wybrzuszeń lub wklęsłości w obrębie jednego pierścienia płaszcza $\pm 20 \text{ mm}$ i odchylenia tworzącej płaszcza od pionu w wielkości $0,0050 h$ (gdzie h – wysokość płaszcza) przy średnicy $d_w \leq 50000 \text{ mm}$ lub $0,0045 h$ przy większych średnicach. Przykładowo, w przypadku ww. zbiornika $V = 32000 \text{ m}^3$ ($h = 18010 \text{ mm}$) maksymalnie dopuszczalna odchyłka może wynosić 81 mm. Ta stosunkowo duża wartość jest często przekraczana w praktyce przemysłowej. Istnienie takich wad kształtu płaszcza powoduje, że w trakcie napełniania i opróżniania zbiornika występują gwałtowne przeskoki jego blach – przechodzenia wybrzuszeń we wklęsnięcia i na odwrót przy różnym poziomie medium.

Przepisy odbiorcze dopuszczają również istnienie wad spawalniczych, które można podzielić na: zewnętrzne i wewnętrzne. Na rysunku 1.10. pokazane są najczęściej spotykane zewnętrzne wady spoin.



Rys. 1.10. Zewnętrzne wady doczołowych połączeń spawanych, *a* – podtopienia, *b* – wklęsnięcia lica i grani, *c* – brak przetopu, *d* – przesunięcie łączonych elementów

Możliwe jest występowanie następujących zewnętrznych wad:

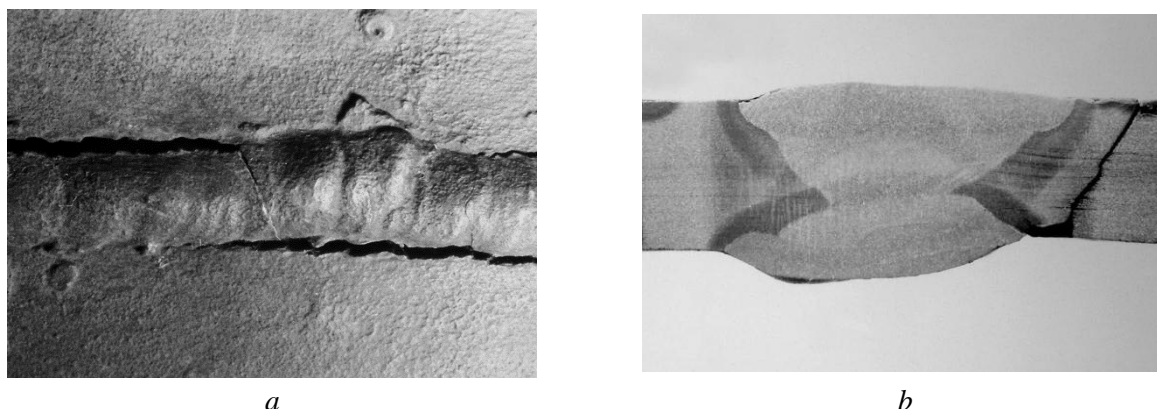
1. podtopienia lica lub grani,
2. wklęsnięcia lica i grani,
3. brak przetopu,
4. przesunięcia (ekscentryczność) łączonych elementów.

Dopuszczalna wielkość i intensywność pierwszych trzech rodzajów wad (rys. 1.10) określają ówczesne normy spawalnicze (zastąpione później normami [9, 10]), obowiązujące w latach 60-80. ubiegłego wieku, a przesunięcia łączonych elementów – norma [11]. Ówczesne przepisy odbiorcze dopuszczały dla spoin czołowych pionowych oraz obwodowych w elementach o grubości płaszcza $t > 20$ mm występowanie podtopień o głębokości do 20 % grubości blachy i intensywności do 30 % odcinka normalnego. Wklęsnięcie grani i brak przetopu mogły wynosić do 20 % grubości blachy przy stopniu nasilenia do 30 %. Przesunięcie e względem siebie lica łączonych elementów (rys. 1.10 *d*) zależy od grubości łączonych blach i mogło wynosić:

- dla blach grubości 8 mm $e = 0,25 \times 8 = 2$ mm,
- dla blach grubości 10 mm $e = 0,25 \times 10 = 2,5$ mm,
- dla blach grubości 14 mm $e = 3$ mm.

Jednoczesne wystąpienie kilku dopuszczalnych wad kształtu płaszcza oraz dopuszczalnych wad spawalniczych przy uwzględnieniu cykliczności obciążenia może doprowadzić do sytuacji groźnych dla bezpieczeństwa konstrukcji po pewnym okresie eksploatacji.

Przykładowo, na skutek wystąpienia w konstrukcji tego samego płaszcza zbiornika magazynowego jednocześnie kilka takich wad, jak podtopienia spoiny oraz wad kształtu płaszcza, wydarzył się szereg awarii (lata 1985-1990), do których doszło po około 10 letnim okresie eksploatacji zbiorników. Na rys. 1.11. pokazano pęknięcie pionowej spoiny płaszcza, przyczyną wystąpienia którego były podtopienia znajdujące się w strefie „przeskoków blach”.



Rys. 1.11. Pęknięcie spoiny czołowej z podtopieniami: *a* – widok pęknięcia, *b* – widok pęknięcia na makrostrukturze przekroju poprzecznego złącza spawanego [12]

1.3.3. Zmęczenie połączeń spawanych

Przy badaniu i odbiorze spoin obowiązują zasady, które dopuszczają istnienie wad niemających istotnego wpływu na bezpieczeństwo pracy elementu konstrukcji [13]. Proces spawania jest na tyle złożony, że trudnym jest uniknięcie pewnego rodzaju defektów. Można w związku z tym, założyć, że każda spawana konstrukcja jest obciążona pewnymi błędami wykonawczymi, których usunięcie byłoby, z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego, nieuzasadnione. Konstrukcje, pracujące w warunkach obciążeń cyklicznych są o wiele bardziej wrażliwe na wady spawalnicze niż konstrukcje poddawane obciążeniom statystycznym. Przy ocenie wad spawalniczych na pracę konstrukcji należy wziąć pod uwagę: nieciągłości i pęknięcia (gorące, zimne, lamelarne); pory (pęcherze); wtrącenia niemetaliczne, błędy geometryczne (rys. 1.10) i in. [14].

Z wyjątkiem pęknięć, które nie mogą występować w konstrukcjach w żadnej formie, pozostałe wady są częściowo dopuszczalne. Stopień nasilenia tych wad ujęty jest w odpowiednich przepisach [9, 10]. Wpływ tych wad na wytrzymałość zmęczeniową był przedmiotem wielu badań.

Znane są prace badawcze [15] poświęcone ocenie wpływu wad na wytrzymałość poprzecznych spoin czołowych. Stwierdzono, że największy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma efekt geometryczny karbu. Wpływ wysokości nadlewu był przedmiotem badań [16, 17]. Średnia wytrzymałość zmęczenia spoiny wynosi w zależności od rodzaju karbu (wady) około 44% ÷ 81 % wytrzymałości zmęczeniowej metalu rodzimego przy obciążeniu o cyklu tętniącym. Dla cyklu odzerowego ta wytrzymałość nie przekracza 55 %. Nawet małe wady nieosłabiające przekroju przy rozciąganiu statycznym wpływają w istotny sposób na wytrzymałość zmęczeniową i dają proporcjonalnie większy spadek tego parametru niż wady znacznie większe.

Wpływ wady, która obniża R_m o 5 % (np. porowatość) może w zależności od jej charakteru i usytuowania zmniejszyć wytrzymałość zmęczeniową od 30 % do 45 %. Dotychczas nie ustalono jednoznacznego wpływu wad wewnętrznych na wytrzymałość niskocyklową. Próby takiej dokonano w pracach [18, 19], gdzie rozdzielono w zależności od natężenia porów i wtrąceń obszar wytrzymałości w zakresie 10^4 ÷ 10^7 cykli i podano dla obszarów natężenia wad wykresy „naprężenie – ilość cykli”. Stwierdzono również, że im wyższa wytrzymałość materiału tym większy jest wpływ wad. Przy ocenie wpływu wad istotne jest ich rozmieszczenie w stosunku do grubości elementu. Im bliżej powierzchni elementu znajduje się wada tym większy wpływ ma ona na wytrzymałość zmęczeniową. Autorzy oceniają tę różnicę na 40 %. W pracy [20] zbadano wpływ podtopień i żużli pasmowych na zmęczenie złączy ze stali o podwyższonej

wytrzymałości. Stwierdzono, że przy tej samej wielkości wady wpływ żużli pasmowych na wytrzymałość zmęczeniową jest większy.

Modele matematyczne opisujące procesy zmęczenia połączeń spawanych przedstawiono w pracy zbiorowej [21], w której m.in. podano sposoby obliczania współczynników koncentracji naprężeń dla ww. przypadków. Sposoby naprawy spoin zawierających defekty opisano w pracach [22, 23], które polegają na zlikwidowaniu przyczyny czyli ułożeniu napoiny lub szlifowaniu.

Jako żywotność zmęczeniowa elementu N_f przyjmuje się dwa kryteria [24, 25]:

$$N_f = N_i \quad \text{lub} \quad N_f = N_p. \quad (1.1)$$

gdzie: N_i – okres inicjacji pęknięcia, N_p – okres propagacji pęknięcia,

lub model będący powiązaniem dwóch poprzednich:

$$N_f = N_i + N_p \quad (1.2)$$

Kryterium inicjacji pęknięcia jest też przyjmowane jako samodzielne kryterium badania [26]. Okres inicjacji N_i oceniany jest zwykle na podstawie teorii niskocyklowej a okres propagacji N_p na podstawie metod mechaniki pęknięcia [26] (choć możliwa jest także ocena obydwu okresów metodami opartymi także na podstawie metod mechaniki pęknięcia [17]).

Przy krótszych okresach żywotności elementu, poddanego obciążeniom, N_p jest proporcjonalnie do N_f oraz dłuższe od N_i , a to oznacza, że pęknięcie powstaje stosunkowo szybko ale okres propagacji jest dłuższy.

Podobnie przy dłuższych żywotnościach N_p jest większe od N_i gdy mamy do czynienia z elementem z karbem ostrym, podczas gdy w przypadku karbu łagodnego jest odwrotnie. Powyższe zależności stali na proporcję N_i/N_p nie zostały dokładnie stwierdzone, uzyskiwano przeciwstawne sobie wyniki [25]. Stwierdzono, że udział N_i w ogólnym okresie zmęczeniowym N_f rośnie wraz z podwyższeniem współczynnika asymetrii cyklu. W pracy [24] dla przypadku wewnętrznych defektów wyróżniają dwa okresy: inicjacji i propagacji. W okresie inicjacji istniejąca w spoinie wada szybko rośnie oraz staje się aktywnym pęknięciem, które następnie propaguje. Okres powyższy to około 50 % żywotności połączenia.

W przypadku stalowych zbiorników walcowych pionowych, stosowanych w przemyśle petrochemicznym, można rozważać tylko zmęczenie niskocyklowe, gdyż liczba cykli podczas 50-letniej eksploatacji takiego zbiornika jest znacznie mniejsza niż 10 000 cykli nawet przy bardzo intensywnej eksploatacji (z napełnienia i opróżnienia zbiornika w ciągu tygodnia), a napełnienie i opróżnianie zbiornika następuje w sposób statyczny a nie dynamiczny.

1.4. Uszkodzenia korozyjne zbiorników

1.4.1. Charakterystyka uszkodzeń korozyjnych zewnętrznych powierzchni zbiorników magazynowych

Charakter i szybkość korozji zewnętrznych powierzchni zbiorników naziemnych uzależnione są od rejonu geograficznego i zanieczyszczeń atmosfery (mikroklimatu). Powierzchnie te podlegają przede wszystkim narażeniom klimatycznym, jak: zmienne temperatury, zmienne wilgotności powietrza, kondensacja wilgoci na skutek dobowych zmian temperatur, opady oraz promieniowanie słoneczne. Obok wymienionych czynników klimatycznych agresywność korozyjną atmosfery zwiększają zanieczyszczenia powietrza, bodźce mechaniczne i erozyjne. Istotnymi stymulatorami korozji w atmosferze przemysłowej, charakterystycznej dla przemysłu naftowego, są dwutlenek siarki, siarkowodór, tlenki azotu, dwutlenek węgla, opary węglowodorów. Generalnie można stwierdzić, że korozyjne zniszczenia zewnętrznych powierzchni płaszczy zbiorników są umiarkowane w porównaniu z dachami zbiorników, gdzie czynnikiem destruktywnym jest zalegająca woda z opadów z rozpuszczonymi w nich zanieczyszczeniami jonowymi z atmosfery. Na zewnętrznych powierzchniach (powierzchni przylegającej do fundamentu piaskowego) den zbiorników nie obserwuje się wzmoczonej korozji. Według badań przeprowadzonych w Przedsiębiorstwie Eksploatacji Rurociągów Naftowych „Przyjaźń” S. A. na około 90% powierzchni blach środkowej części dna po 23 latach eksploatacji zbiornika, stwierdzono brak jakichkolwiek śladów korozji lub jedynie powierzchniowy nalot. Bardziej uszkodzone były blachy obrzeża dna. Na nich wystąpiły też lokalne koncentracje wżerów o głębokości do 3 mm, natężeniu do kilkunastu sztuk na 1,0 m² i wielkości powierzchniowej od 1 do 50 mm² [7, 27].

1.4.2. Charakterystyka uszkodzeń korozyjnych wewnątrz zbiorników magazynowych na ropę naftową oraz paliwa płynne

Korozja zbiornika stalowego na *paliwa płynne* przybiera zróżnicowaną formę nie tylko na głównych jego elementach konstrukcyjnych (dno, płaszcz, dach), a także w obrębie poszczególnych stref tych elementów. Jest to związane z bardzo zróżnicowanym środowiskiem korozyjnym, które działa we wnętrzu zbiornika z *dachem stałym*. Można tu wydzielić cztery charakterystyczne strefy [7, 12, 27]:

1. *gazowa* – obejmuje ona konstrukcję dachową i najwyższą część płaszcza oraz jest wypełniona parą nasyconą węglowodorami w powietrzu. Mieszanka ta ma różny stopień wilgotności i różne stężenie czynników korozyjnych H₂O, O₂, CO₂ w zależności od ich stężenia występującego w powietrzu w miejscu lokalizacji



- zbiornika. Elementy konstrukcji stalowej zbiornika, znajdujące się w tej strefie przez cały okres eksploatacji, są powyżej poziomu lustra paliwa płynnego;
2. *strefa objętości zbiornika czynnej podczas eksploatacji* – obejmuje ona zasadniczą część powierzchni płaszcza, która okresowo znajduje się pod działaniem płynnego paliwa naftowego (gdy zbiornik jest pełny) lub mieszanki oparów paliwa i powietrza (gdy zbiornik jest opróżniony). Ponadto gdy podczas opróżniania zbiornika napłynie do niego duża ilość wilgotnego powietrza w omawianej strefie blachy płaszcza mogą być poddane działaniu emulsji wody w węglowodorach zawierającej dużo rozpuszczonego H_2S i tlenu;
 3. *strefa „martwej” objętości w zbiorniku* – jest to część płaszcza poniżej poziomu króćca ssącego. Jest ona podczas eksploatacji zawsze wypełniona paliwem płynnym i wodą pod produktową oddzielającą się grawitacyjnie od węglowodorów. Woda ta zawiera różne czynniki korozyjne, bywa mocno zanieczyszczona związkami siarki i chlorkiem sodu a także bakteriami beztlenowymi redukującymi siarczany. Agresywne działanie w tej strefie zależy od częstotliwości i skuteczności odprowadzania wody pod produktowej oraz od częstotliwości i stopnia jej uzupełniania z zewnątrz,
 4. *powierzchnia dna zbiornika*, na której gromadzi się szlam i osady, a także spadające z dachu produkty korozji, w tym siarczki i tlenki.

Granica dwóch pierwszych stref nie znajduje się na stale ustalonym poziomie lecz waha się w bardzo szerokim zakresie w zależności od warunków eksploatacji, zwłaszcza w zależności od częstotliwości napełniania i opróżniania zbiornika.

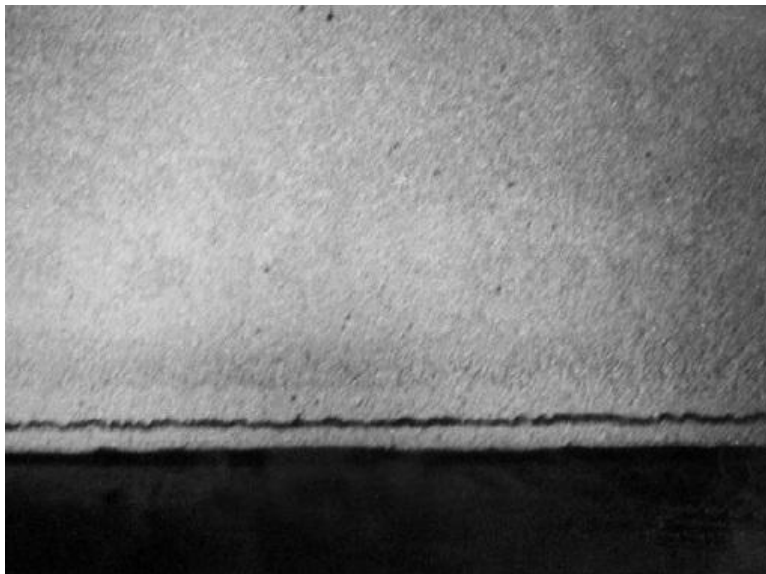
We wnętrzu zbiornika z *dachem pływającym* można wydzielić analogiczne strefy korozyjne z wyjątkiem strefy gazowej, którą wyklucza sama koncepcja konstrukcji takiego zbiornika. Natomiast w strefie „martwej objętości” dość intensywnie uzupełniana jest woda pod produktowa poprzez przenikanie pod uszczelnieniem dachu pływającego wody deszczowej spływającej po płaszczu.

Największe zagrożenie szczelności zbiornika powstaje w wyniku uszkodzeń korozyjnych dna i „martwej” strefy płaszcza. Występuje tu głównie korozja wżerowa, której rozwojowi sprzyjają zalegające na dnie i na pewnej wysokości płaszcza szlam i osady wytrącające się z ropy naftowej, zwłaszcza przy jej długotrwałym magazynowaniu, a także osady siarczków i tlenków spadające z korodującego dachu zbiornika. Pod warstwą osadów powstają wyjątkowo sprzyjające warunki do tworzenia się korozyjnych mikro ogniw galwanicznych – wytwarzają się bowiem obszary o nierównomiernym dostępie tlenu z wody pod produktowej. Miejsca o mniejszym dostępie tlenu stają się bardziej anodowe i wówczas dochodzi do zarodkowania i

gwałtownego rozwoju wżerów korozyjnych w punktach niejednorodności powierzchni blachy (np. na granicy ziaren stali, wtrąceń niemetalicznych (rys. 1.12), zaburzeń struktury wywołanej spawaniem (rys. 1.13) lub niejednorodną obróbką plastyczną).



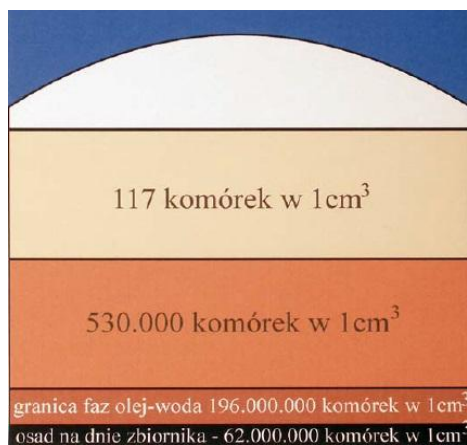
Rys. 1.12. Wżer korozyjny w dnie zbiornika w miejscu zawalcowania wtrąceń niemetalicznych (siarczków)



Rys. 1.13. Wżer korozyjny w strefie wpływu ciepła spoiny łączącej pierwszy pierścień płaszczu z dnem zbiornika

Takie anody o bardzo małej powierzchni koncentrują cały korozyjny prąd mikro ogniwa galwanicznego co powoduje intensywną reakcję i rozpuszczania stali. Występowanie w wodzie pod produktowej, będącej elektrolitem ogniwa, chlorków i siarkowodoru silnie przyspiesza rozwój korozji wżerowej. Jony chloru, a także siarkowodor wbudowują się w warstewkę pasywną na stali, zmniejszają się jej właściwości ochronne, a także gromadząc się wewnątrz wżerów zwiększają agresywność znajdującego się tam roztworu, a tym samym przyspieszają pogłębianie się wżerów.

Szybkość pogłębiania się wżerów w dnie i strefie przydennej płaszczu zbiornika może być 2÷3 krotnie większa niż na zasadniczej części płaszczu. Przyczyną tak szybkiej korozji są bakterie beztlenowe redukujące siarczany. Rozmieszczenie bakterii w zbiorniku oleju opałowego o pojemności 4 000 m³ opisano w pracy [28] (rys. 1.14).



Rys. 1.14. Liczba bakterii beztlenowych w różnych strefach zbiornika magazynowego wypełnionego olejem opałowym [28]

Rozwój mikroorganizmów w zbiorniku jest ściśle związany z obecnością wody, która zalega w strefie przydennej pod magazynowanym produktem naftowym. Na granicy fazy woda – paliwo zachodzą procesy związane z formowaniem się tak zwanego biofilmu i tworzeniem odpowiednich warunków dla szybkiego wzrostu mikroorganizmów. Gdy ich wzrost nie jest eliminowany lub ograniczany, następuje z czasem odkładanie się zanieczyszczeń (osadu dennego) oraz zachodzą procesy korozji. Są one wynikiem działania produktów metabolicznych mikroorganizmów (biogenne kwasy i siarczki), mikrobiologicznej absorpcji tlenu, depolaryzacji katodowej wywołanej przez enzymy z grupy hydrogenaz. Mikroorganizmy mogą wywoływać biodegradację powłok ochronnych, które nie zawsze są odporne na rozkład mikrobiologiczny, ponadto pogarszają jakość paliwa naftowego magazynowanego w zbiorniku. Przy wyjątkowo niekorzystnych warunkach eksploatacji zbiorników na paliwa płynne szybkość korozji w strefie przydennej może wynosić $0,7 \div 1,0$ mm/rok.

W tabeli 1.3. podano głębokości wżerów korozyjnych, wykrytych w zbiornikach z dachami pływającymi. Zbiorniki te służą do długoterminowego magazynowania ropy naftowej przy trasie rurociągu magistralnego w Polsce.

Tabela 1.3. Głębokość wżerów korozyjnych w zbiornikach na ropę naftową [12]

Pojemność zbiornika, m ³	Okres nieprzerwanej eksploatacji, lata	Grubość blach, mm		Największa stwierdzona głębokość wżerów korozyjnych, mm	
		dno – obwód I część środkowa	dolny pierścień płaszcz	dno	płaszcz na wysokości do 300 mm ponad dnem
12 000	30	9,0 i 7,0	11,0	2,0	10,0
12 000		9,0 i 7,0	11,0	1,5	7,0
12 000		9,0 i 7,0	11,0	3,0	5,0
32 000		13,0 i 8,0	19,0	3,8	8,0
32 000		13,0 i 8,0	18,0	2,5	5,0
50 000		17,0 i 8,0	24,0	1,5	6,0

We wszystkich zbiornikach wymienionych w tabeli 1.3. wewnętrzne powierzchnie dna i płaszcz nie były zabezpieczone antykorozyjnie podczas budowy ani w okresie późniejszym.

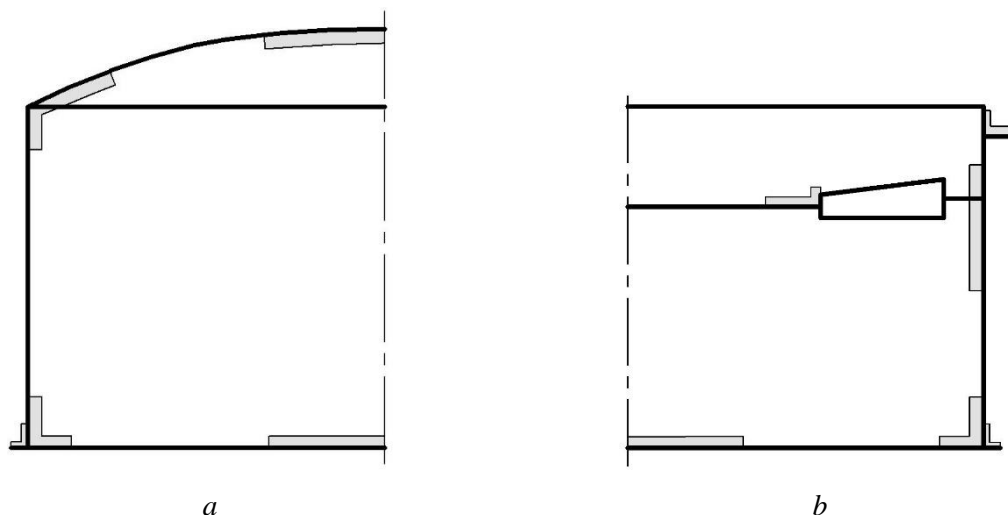
Stwierdzone uszkodzenia korozyjne są szczególnie duże w dolnej strefie płaszcz, a stan pierwszego ze zbiorników o pojemności $V = 12\ 000\ m^3$ należało określić jako przed awaryjny zarówno ze względu na głębokość wżerów jak i intensywność ich występowania (rys. 1.15).



Rys. 1.15. Uszkodzenia korozyjne płaszcz zbiornika ($V = 12\ 000\ m^3$) w strefie połączenia płaszcz z dnem [12]

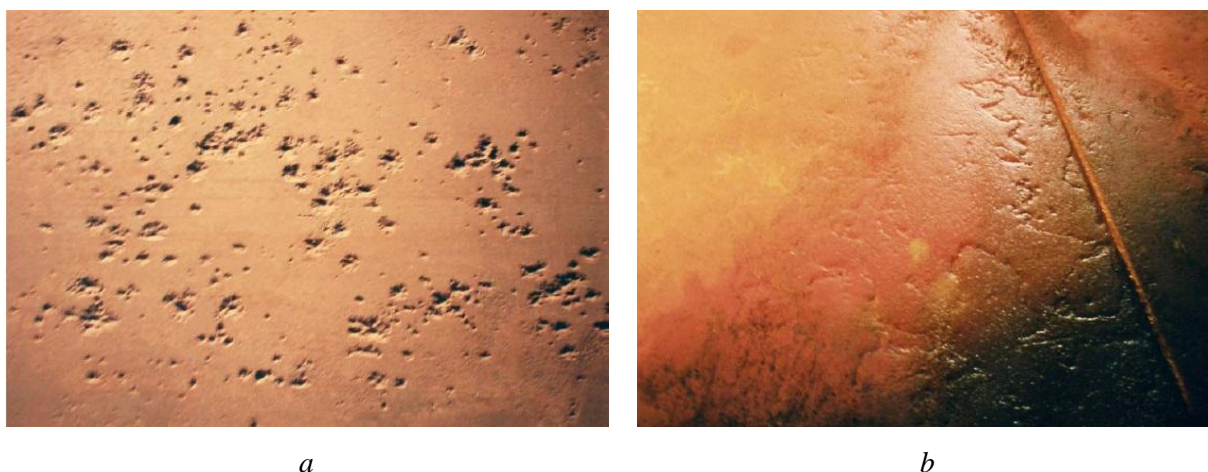
1.4.3. Strefy zbiornika najbardziej narażone na korozję

Analiza uszkodzeń korozyjnych w zbiornikach eksploatowanych przez 20-40 lat pozwala na wskazanie stref ich konstrukcji, w których korozja rozwija się ze szczególną intensywnością. Miejsca te schematycznie pokazano na rysunku 1.16.

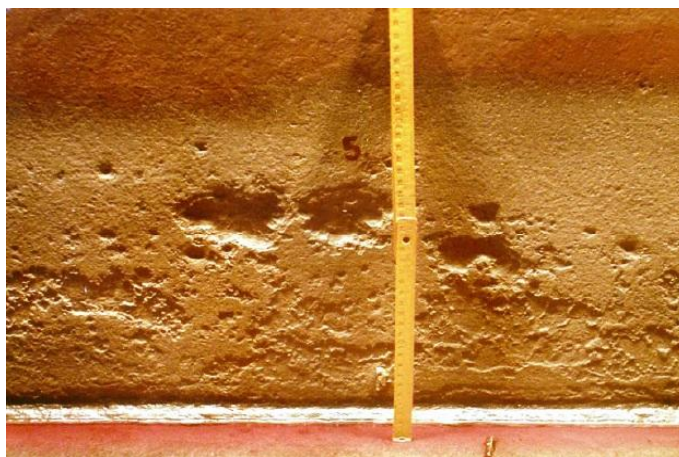


Rys. 1.16. Strefy występowania najintensywniejszej korozji w zbiorniku:
a – z dachem stałym, *b* – z pływającym (strefy oznaczono na szaro)

Powtarzalnym jest zjawisko, że największe uszkodzenia korozyjne są obserwowane na dnie zbiornika (rys. 1.17) i na płaszczyźnie na odcinku około 300 mm ponad jego połączeniem z dnem (rys. 1.18). Wynika to z faktu, że w strefie tej gromadzą się szlam, osady i wszystkie zanieczyszczenia rozpuszczalne w wodzie [7].



Rys. 1.17. Wżery korozyjne na dnie zbiornika: *a* – punktowe, *b* – ognia równomiernej korozji [12]



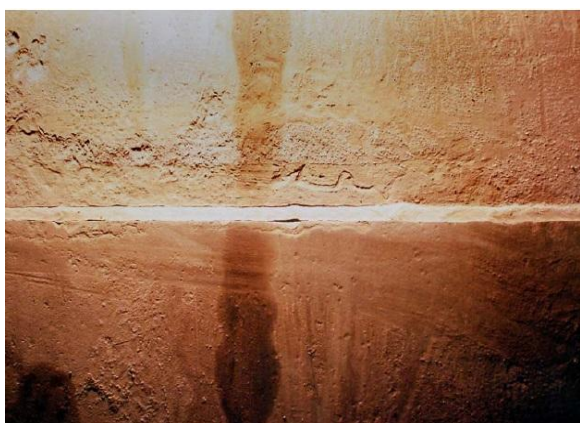
Rys. 1.18. Wżery korozyjne w płaszczu zbiornika magazynowego na odcinku około 300 mm ponad dnem [12]

Typową dla wieloletnio eksploatowanych zbiorników magazynowych na ropę naftową jest również wżerowa korozja pod osadową, rozwój której przyspiesza obecność bakterii redukcyjnych siarczany (rys. 1.19).



Rys. 1.19. Wżery korozyjne pod osadowe na dnie zbiornika, wywołane bakteriami redukującymi siarczany [12]

W przypadku źle dobranej lub źle realizowanej technologii spawania wżery w dnie i przydennej strefie płaszczu powstają także w strefie wpływu ciepła (SWC) przy spoinach (rys. 1.20).



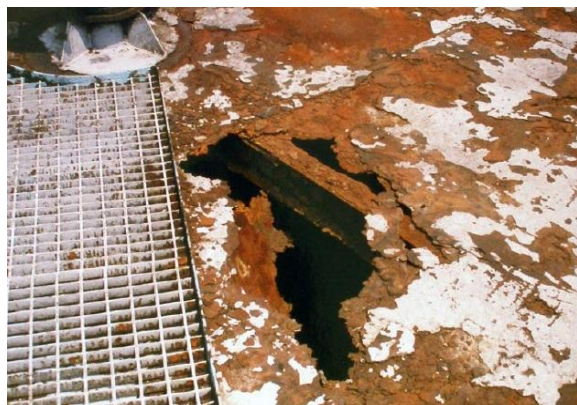
a



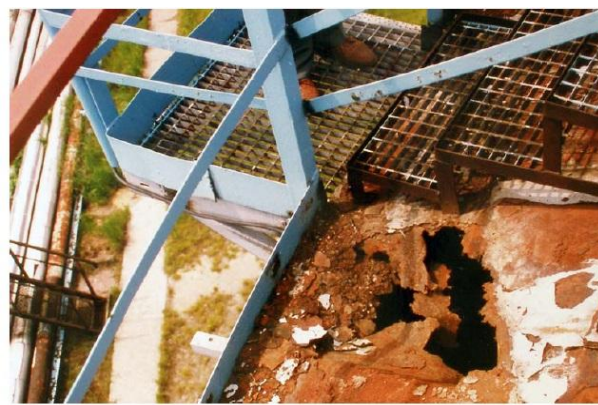
b

Rys. 1.20. Wzory korozyjne przy spoinach łączących: *a* – blachy dna, *b* – płaszcz z dnem zbiornika [12]

W zbiornikach z dachem stałym najczęściej spotykane są znaczne ubytki korozyjne materiału wierzchołka kopuły dachowej i przy połączeniu dachu z płaszczem (rys. 1.21).



a



b

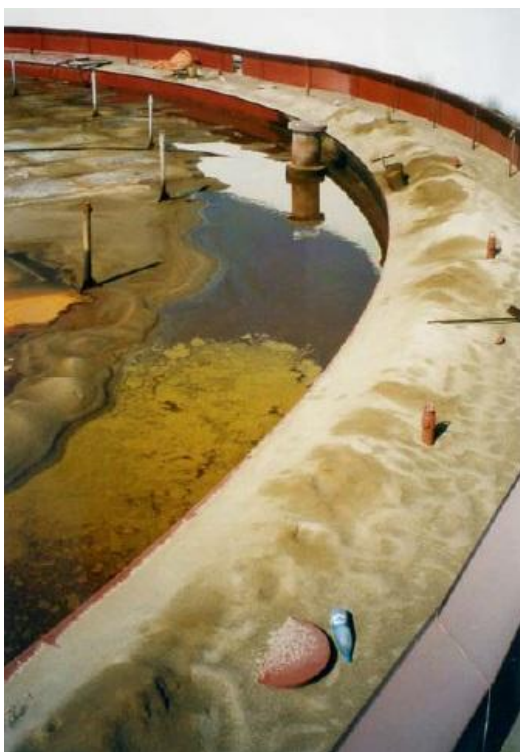
Rys. 1.21. Zniszczenia korozyjne dachu stałego: *a* – w wierzchołku kopuły, *b* – w strefie połączenia dachu z płaszczem zbiornika [12]

W zbiornikach z izolowanym płaszczem i nieizolowanym dachem w ww. strefach występuje kondensacja wilgoci, na skutek czego materiał pokrycia dachu stałego ulega degradacji korozyjnej, która występuje również w obszarach często otwieranych króćców pomiarowych lub włazów (rys. 1.22).

Materiał membrany dachu pływającego jest szczególnie intensywnie niszczone przez korozję w strefach lokalnych zagłębień oraz na styku membrany z pontonem, ponieważ ww. strefach zalega woda z opadów atmosferycznych (rys. 1.23).



Rys. 1.22. Zniszczenia korozyjne blach pokrycia dachu stałego zbiornika w strefie często otwieranego króćca [12]



Rys. 1.23. Wywołująca korozję woda z opadów atmosferycznych zalegająca przy połączeniu membrany dachu pływającego z pontonem [12]

Płaszcz zbiornika z dachem pływającym najczęściej ma największe ubytki korozyjne na górnym pierścieniu w miejscu połączenia z podestem okrężnym (rys. 1.24) – powód jest identyczny jak podany przy uszkodzeniach membrany dachu pływającego.



Rys. 1.24. Korozja górnego pierścienia płaszczu zbiornika z dachem pływającym w miejscu lokalnego wklęśnięcia w pierścieniu wiatrowym (podeście dla personelu) [12]

Płaszcz zbiorników izolowanych często zawierają intensywne ogniska korozji wżerowej (rys. 1.25) na blachach pierwszej cangi od strony zewnętrznej (na odcinku kilkudziesięciu centymetrów ponad dnem). Przyczyną wystąpienia tych uszkodzeń jest woda deszczowa, która przedostaje się przez styki blach osłaniających od zewnątrz izolacyjną wełnę mineralną. Woda ta nawilżała wełnę mineralną zalegając w niej przez długi okres. Dodatkowym czynnikiem intensyfikującym korozję jest podwyższona temperatura płaszczu nagrzewanego przez magazynowany, podgrzewany produkt ropopochodny.



a



b

Rys. 1.25. Wżery na płaszczu zbiornika, powstałe w wyniku zacieku wody pod izolację [12]

1.5. Metody oceny stanu technicznego zbiorników magazynowych

Kontrola stanu technicznego zbiorników jest bardzo ważną czynnością mającą na celu zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji oraz niezawodność konstrukcji. Szczegółowe warunki jakie powinny spełniać bazy paliw, na których znajdują się zbiorniki z produktami naftowymi określa Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 listopada 2005 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowania [29].

Rodzaje zbiorników magazynowych oraz warunki ich dozoru technicznego wyszczególnione w następujących aktach prawnych: §1 pkt 2 Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 7 grudnia 2012 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu (Dz. U. 2012 nr 0 poz. 1468) [30]; Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki beciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz.U. Nr 113, poz. 1211 z późn. zm.) [31]; Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 31 marca 2008 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki beciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz. U. Nr 60, poz. 371) [32] oraz Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki beciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów trujących lub żrących (Dz.U. Nr 63, poz. 572) [33].

Wymienione wyżej akty prawne regulują stosowanie odpowiednich metod nadzorowania, terminy i rodzaje okresowych kontroli oraz badań, jak również ich zakresy – okresowa ocena stanu technicznego obiektu.

Aktualnie nadzorowanie takich obiektów bazuje głównie na następujących czynnościach: rewizji zewnętrznej, rewizji wewnętrznej oraz standardowych metodach badań NDT, takich jak badania wizualne (VT), ultradźwiękowe (UT) lub radiograficzne (RT). Metody te charakteryzują się szeregiem zalet, ale mają również swoje ograniczenia, głównie związane z brakiem możliwości badania całego dużego obiektu, czy też badania urządzenia podczas ich eksploatacji.

Przywołane wyżej rozporządzenia wskazują również na możliwości zastosowania innych technik i metod badawczych takich jak: badania metodą emisji akustycznej (AT), ocena stanu mikrostruktury metodą przenośnej mikroskopii świetlnej (PMS), pomiar twardości materiału i in., które mogą być zastosowane po uprzednim zaakceptowaniu i weryfikacji przez właściwy Odział Urzędu Dozoru Technicznego (któremu podlega urządzenie), a także pozwalają na zastąpienie lub uzupełnienie podstawowych czynności i badań dozorowych (rewizja zewnętrzna,

rewizja wewnętrzna). W przypadku zbiorników i instalacji po wieloletniej eksploatacji, zwłaszcza tam, gdzie mamy do czynienia z wyraźną degradacją materiału, w kolejnych latach ich pracy kontrole i badania okresowe powinny być coraz bardziej dokładne, a ich zakresy poszerzane. Pozwoliłoby to na kompleksowe i wieloparametrowe monitorowanie stanu technicznego całych obiektów. Istotnym jest w takim przypadku, aby stosować te metody badawcze, które pozwalają poszerzać wiedzę w zakresie stanu materiału i jego postępującej degradacji. Niektórzy autorzy m.in. M. Wojas [34] wydzielają dwie kategorie metod badań stanu technicznego zbiorników:

- *Badania niszczące* – przeprowadza się na specjalnie przygotowanych próbkach (pobranych z elementu konstrukcyjnego), które w trakcie badania ulegają zniszczeniu.
- *Badania nieniszczące* – stanowią grupę metod badań, które dostarczają informacji o właściwościach przedmiotu badanego bez pozbawienia go wartości użytkowych, tzn. bez zmiany jego eksploatacyjnej przydatności.

Dla określenia stanu technicznego eksploatowanych zbiorników magazynowych najczęściej stosuje się następujące metody NDT: wizualną, pomiary grubości metodą ultradźwiękową (UTT) oraz badania metodą emisji akustycznej.

1.5.1. Metody pomiarów grubości blach płaszczy, den oraz dachów zbiorników magazynowych

Pomiar grubości blach metodą ultradźwiękową jest realizowany według wytycznych normy [35]. Ultradźwiękowe pomiary grubości obiektów są wykonywane zarówno podczas procesów wytwarzania jak i podczas eksploatacji. Warunkiem koniecznym do realizacji pomiaru jest znajomość prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w badanym materiale, a zakres tej prędkości jest bardzo szeroki i wynosi od ułamków milimetra do kilkunastu centymetrów.

Zasada pomiaru grubości, podobnie jak lokalizacja nieciągłości obiektów wykrytych z wykorzystaniem podłużnych fal ultradźwiękowych, polega na pomiarze czasu przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej przez obiekt. Grubość obiektów jest obliczana z zależności:

$$t = \frac{c_L(T - T_0)}{2} \quad (1.3)$$

gdzie:

t – grubość mierzonego obiektu,

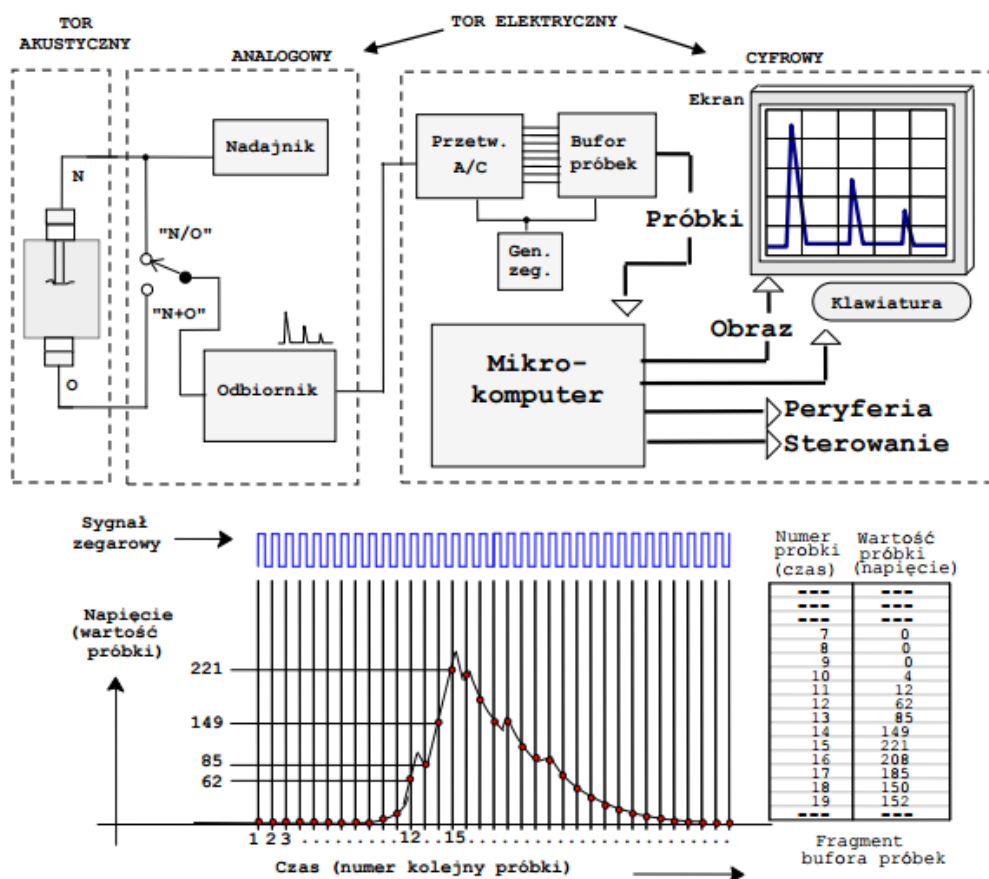
c_L – prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej,

T – mierzony czas przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej,

T_0 – składowa korekcyjna, umożliwiająca uwzględnienie opóźnienia fali w warstwie ochronnej głowicy.

Aby wynik pomiaru był wiarygodny konieczna jest niezmienna prędkość rozchodzenia się fali. W przypadku obiektów ze stali, także mające różne domieszki stopowe, warunek ten jest spełniony. W przypadku innych materiałów (np. metale kolorowe, tworzywa sztuczne) prędkość fali ultradźwiękowej podlega większym zmianom wpływając w sposób widoczny na dokładność pomiarów. Istotny wpływ na dokładność pomiaru grubości UTT mają *jednorodność struktury* oraz *temperatura badanego materiału*.

Pomiary grubości UTT realizują za pomocą defektoskopów ultradźwiękowych oraz odpowiednich głowic piezoceramicznych (kątowych, powierzchniowych, podwójnych, uniwersalnych). Schemat typowego defektoskopu przedstawiono na rys. 1.26.



Rys. 1.26. Schemat blokowy defektoskopu z ilustracją idei przetwarzania analogowo-cyfrowego [36]

W prezentowanym na rys. 1.26. schemacie mamy do czynienia z tzw. „defektoskopem cyfrowym”, w którym zobrazowanie sygnału jest oparte na zamianie sygnału analogowego na ciąg „próbek” (liczb) w przetworniku A/C a następnie wyświetlenie na ekranie wykresu przez mikrokomputer.

Nowoczesne grubościomierze cyfrowe umożliwiają pomiar grubości z dokładnością $\pm 0,01$ mm przy czym są one wyposażone w automatyczny układ do skalowania uwzględniający prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w badanym materiale [36].

W praktyce przemysłowej do pomiaru grubości UTT stosuje się następujące metody: *echa* oraz *rezonansową*.

W *metodzie echa* wykorzystuje się jedną głowicę, która początkowo stanowi nadajnik impulsów, a następnie odbiornik. Sygnał wysłany przez głowicę do materiału, odbija się od nieciągłości (wady) lub od przeciwległej powierzchni i wraca do głowicy. Mierząc czas upływający od momentu wysłania impulsu do momentu jego powrotu i odebrania przez głowicę, możemy określić, znając prędkość fali ultradźwiękowej w materiale, odległość głowicy od nieciągłości. Na podstawie wysokości echa na ekranie defektoskopu, można określić jej przybliżony wymiar. Do pomiarów UTT stosuje się głowice prostą, która generuje fale ultradźwiękowe wchodzące w badany przedmiot pod kątem prostym.

Najlepsze grubościomierze cyfrowe umożliwiają pomiar grubości z dokładnością $\pm 0,01$ mm przy czym są one wyposażone w automatyczny układ do skalowania uwzględniający prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w badanym ośrodku.

Metoda rezonansu oparta jest na zjawisku odbicia fal ultradźwiękowych od wady materiałowej lub powierzchni ograniczających, jednak podczas gdy w metodzie echa odbicie od wady obserwuje się oddzielnie od obrazu fal wysyłanych, to w metodzie rezonansu ma miejsce nakładanie się na siebie fal padających i odbitych. Jeżeli fala wysyłana jest zgodna w fazie z falą odbitą od wady lub powierzchni ograniczającej, wówczas wytwarza się fala stojąca i obserwujemy rezonans. Zjawisko rezonansu zachodzi wtedy, gdy grubość badanego elementu jest całkowitą wielokrotnością połowy długości fali:

$$t = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c}{2f} \quad (1.4)$$

gdzie:

- t – grubość badanego elementu,
- λ – długość fali,
- c – prędkość fali ultradźwiękowej,
- f – częstotliwość drgań,
- n – liczba połówek długości fali.

Aby wyznaczyć grubość materiału na podstawie kolejnych częstotliwości przy których zachodzi rezonans stosujemy zależność:

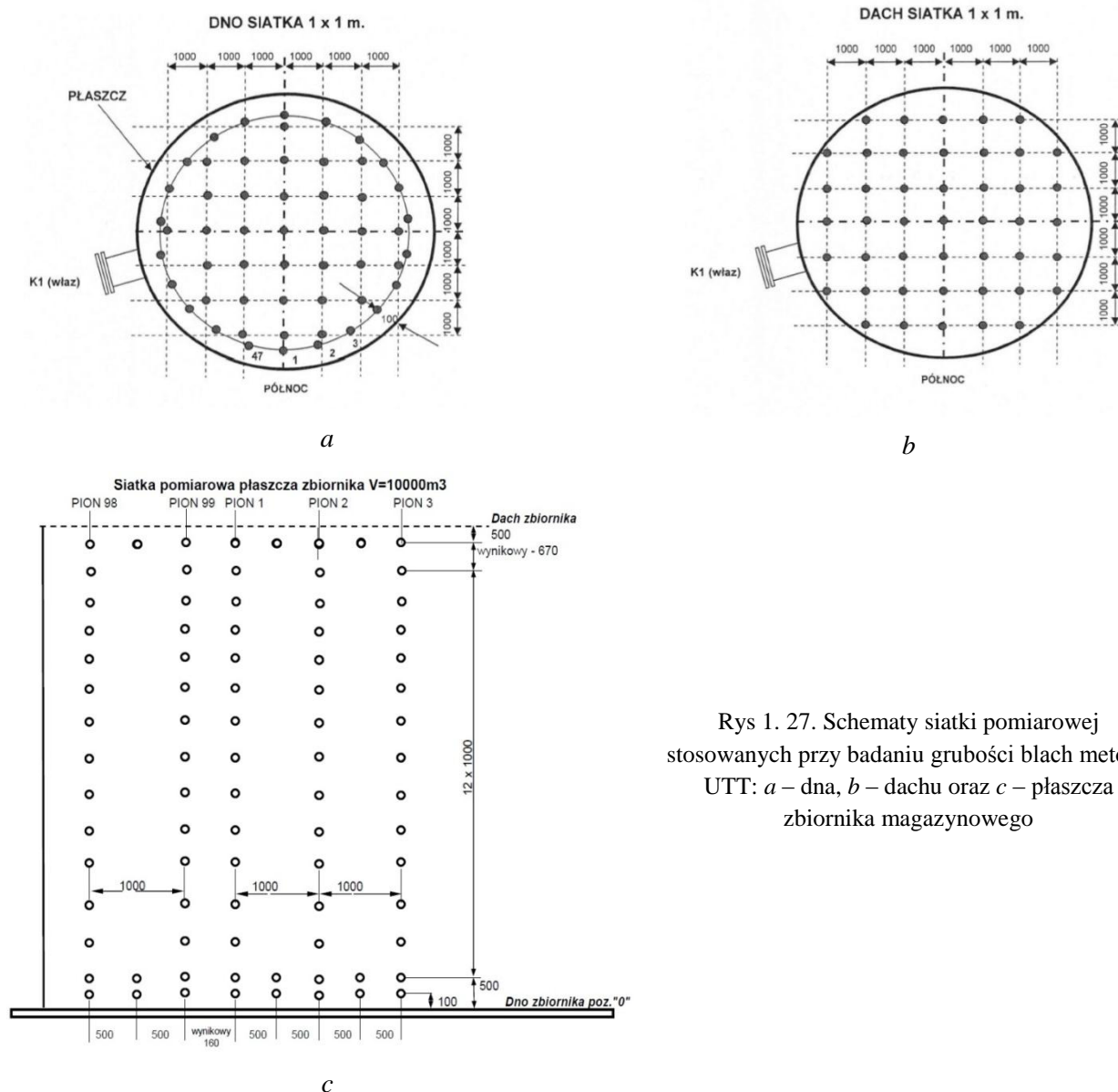
$$t = \frac{c}{2(f_{n+1} - f_n)} \quad (1.5)$$

$f_{n+1} - f_n$ – oznacza różnicę dwóch kolejnych częstotliwości, przy których zachodzi rezonans.

Jeżeli podczas pomiaru grubości pomiędzy dwoma częstotliwościami ułoży się k rezonansów to grubość ścianki określamy ze wzoru:

$$t = k \frac{c}{2(f_{n+k} - f_n)} \quad (1.6)$$

Na rys 1. 27. pokazano schematy siatki pomiarowej stosowanej przy pomiarze grubości blach różnych elementów zbiornika magazynowego.



Rys 1. 27. Schematy siatki pomiarowej stosowanych przy badaniu grubości blach metodą UTT: *a* – dna, *b* – dachu oraz *c* – płaszczu zbiornika magazynowego

1.5.2 Metody sprawdzania szczelności den zbiorników

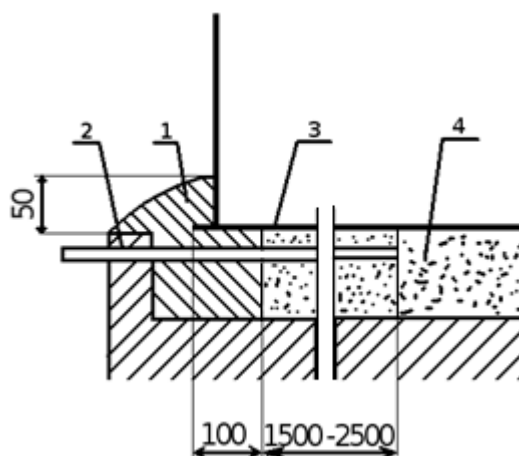
Badaniom szczelności podlegają zbiorniki bez względu na sposób ich zainstalowania, przy przekazaniu ich do eksploatacji i po każdym remoncie lub naprawie. Zbiorniki przeznaczone do magazynowania produktów naftowych podlegają okresowym badaniom szczelności w terminach do 30 lat eksploatacji – badanie co 10 lat oraz po upływie 30 lat eksploatacji – badanie co 6 lat [37].

W przemyśle rafineryjnym i petrochemicznym stosuje się najczęściej następujące metody oceny szczelności den zbiorników magazynowych: chemiczną, próżniową, emisji akustycznej.

Metoda chemiczna jest stosowana do sprawdzania szczelności den spawanych bezpośrednio na piaskowych poduszkach fundamentowych. Polega ona na wytworzeniu pod uszczelnionym plastyczną gliną obwodem stalowego dna zbiornika środowiska gazowego (1÷3 % amoniaku) i obserwacji spoin od strony wewnętrznej zbiornika. Mieszanka powietrzna i amoniaku wtłaczana jest pod dno rurkami o średnicy 25 mm i długości ok. 4,0÷5,0 m. Przy zbiornikach o średnicy ok. 25,00 m wystarczającym jest zamontowanie 4 takich rurek rozmieszczonych w rozstawie co 90°, natomiast przy badaniu zbiorników większej średnicy liczbę rurek należy zwiększyć do 6÷8 [37].

Wewnątrz zbiornika spoiny należy pokryć wodno-spirytusowym roztworem fenoloftaleiny (roztwór ten ma kolor biały). O nieszczelności dna świadczą czerwone lub czerwono-fioletowe plamy. W przypadku wystąpienia takich plam (nieszczelności) spoiny należy wyźłobić, zaspawać ponownie, a badanie powtórzyć.

Na rys. 1.28. pokazano schemat uszczelnienia obwodu dna zbiornika podczas przeprowadzenia próby szczelności spoin metodą chemiczną.



Rys. 1.28. Uszczelnienie obwodu dna zbiornika w celu przeprowadzenia próby szczelności spoin metodą chemiczną: 1 – plastyczna glina szczelnie ubita, 2 – rurki do tłoczenia mieszanki powietrza i amoniaku, 3 – dno zbiornika, 4 – fundament piaskowy

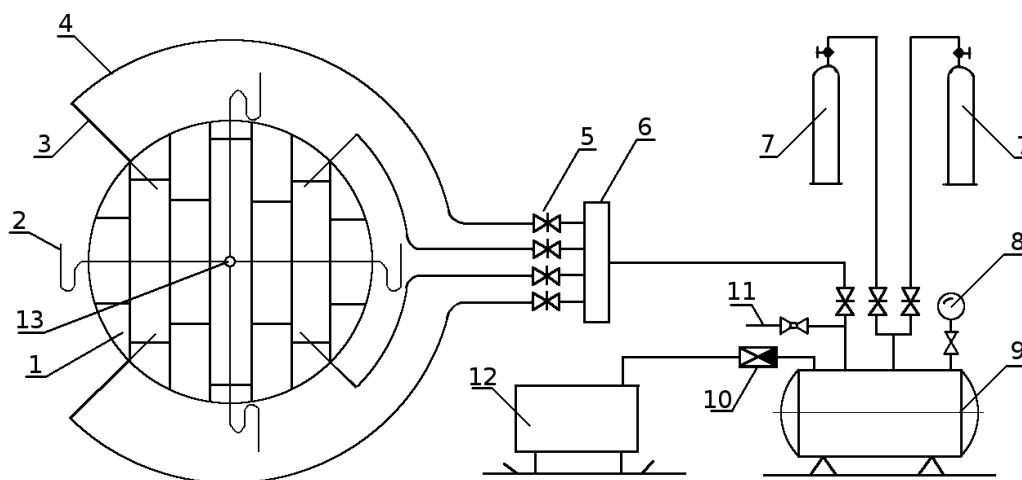
W celu sprawdzenia prawidłowości rozprowadzenia amoniaku o odpowiednim stężeniu dopuszcza się wywiercenie w dnie zbiornika kilki otworów kontrolnych. W przypadku gdy we wszystkich tych otworach stwierdzi się aktywne działanie mieszanki powietrzno-amoniakalnej na fenoloftaleinę, można rozpocząć próbę, tj. zwilżanie spoin roztworem kontrolnym. Roztwór ten powinien mieć następujący skład: 4 części wagowe bezbarwnej krystalicznej fenoloftaleiny, 40 części wagowych spirytusu rektyfikowanego lub surowego, 56 części wagowych wody.

W przypadku przeprowadzenia próby w okresie zimowym roztwór kontrolny ma inny skład: 10 części wagowych fenoloftaleiny, 90 części wagowych gliceryny technicznej.

Roztwór kontrolny reaguje także z zasadowymi zanieczyszczeniami takimi, jak przykładowo resztki otuliny drutu elektrod użytych do spawania, dlatego przed próbą należy spoiny:

- a) dokładnie wyczyścić,
- b) wytrawić przez 12÷24 godzin 20 % kwasem fosforowym,
- c) zmyć ciepłą wodą.

Na rys. 1.29. pokazano schemat instalacji do realizacji prób szczelności dna zbiornika metodą chemiczną.



Rys. 1.29. Schemat instalacji do prób szczelności dna zbiornika metodą chemiczną:

1 – dno zbiornika, 2 – manometr cieczowy wraz z rurką stalową, 3 – rura stalowa doprowadzająca pod dno mieszankę powietrzno-amoniakalną, 4 – przewód stalowy lub elastyczny, 5 – zawór odcinający, 6 – kolektor rozdzielczy, 7 – butle z amoniakiem, 8 – manometr, 9 – zbiornik mieszalnikowy, 10 – zawór zwrotny, 11 – kurek probierczy, 12 – sprężarka, 13 – otwór probierczy

Metoda próżniowa. W przypadku gdy fundament zbiornika magazynowego został wykonany w postaci nasypu z tłucznia, to do sprawdzenia szczelności jego dna nie może być użyta opisana powyżej metoda chemiczna. W takich przypadkach stosują *metodę próżniową*. Na spoinach nawilżonych wodą mydlaną ustawia się skrzynka próżniowa z przyłgami wykonanymi z doskonale elastycznej gumy (rys 1.30). Z chwilą rozrzedzenia powietrza znajdującego się pod skrzynką do $5,0 \div 20$ kPa w miejscach, gdzie spoiny są nieszczelne, pojawiają się bańki na wodzie mydlanej. Wieko skrzynki wykonane jest ze szkła organicznego, można więc przez nie dobrze obserwować badaną spoinę. W niektórych skrzynkach próżniowych wmontowane jest dodatkowe oświetlenie. Skrzynka próżniowa podłączona do agregatu próżniowego przewodem gumowym długości 30–35 m, a zatem agregat można także ustawić na zewnątrz zbiornika. Jeden pracownik może skontrolować skrzynką próżniową w ciągu ośmiu godzin ok. 100 m spoiny, a zatem próba szczelności zbiornika o pojemności $V = 50\,000\text{ m}^3$ trwa ok. 25 dni. Omówiona metoda nie należy więc do wydajnych.



a

b

Rys. 1.30. Badania szczelności spoin dna zbiornika metodą próżniową:
a – widok sprzętu badawczego, *b* – proces sprawdzania szczelności

1.5.3. Badania zbiorników magazynowych metodą emisji akustycznej

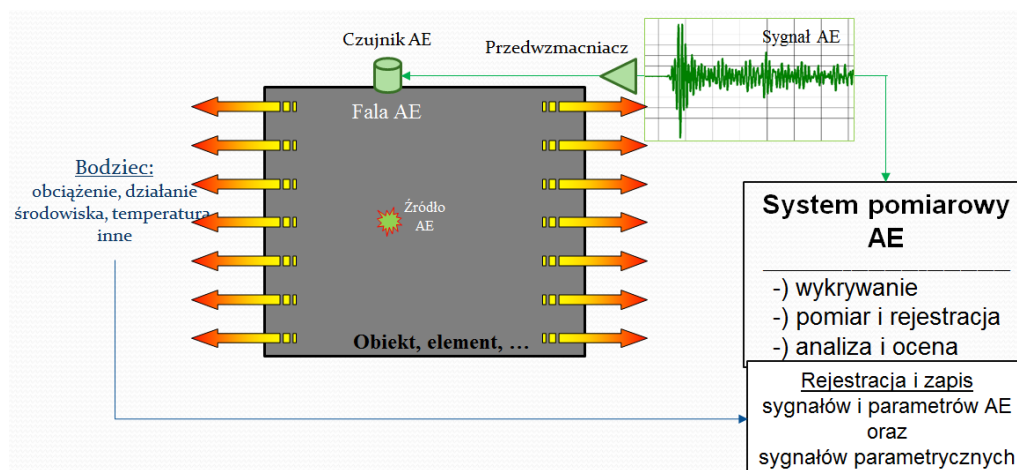
Emisja akustyczna jest jedną z metod badań nieniszczących uwzględnionych w normie [38], a opisana i zdefiniowana w [39] i [40]. Według [39] Emisja Akustyczna (AE) jest terminem stosowanym w przypadku rejestracji i analizy chwilowych fal sprężystych wywołanych przez wyzwolenie energii w miejscu defektu w badanym materiale.

AE jest coraz szerzej stosowaną i szybko rozwijającą się metodą badawczą, znaną i wykorzystywaną na świecie również do okresowego badania zbiorników magazynowych [42, 43, 55÷57]. Jej rozwój zwłaszcza w ostatnich latach, związany jest z bardzo szybkim postępem w dziedzinach technologii i techniki komputerowej oraz analiz numerycznych.

Metoda AE, co istotne jest pasywną metodą badań nieniszczących. Główne zalety tej metody badawczej to:

- możliwość globalnej inspekcji dużych elementów i konstrukcji – możliwość badania i monitorowania całego obiektu,
- możliwość lokalizacji źródła sygnałów AE generowanych przez wady lub uszkodzenia,
- możliwość prowadzenia badań ciągłych,
- możliwość monitorowania procesów w czasie i miejscu ich występowania.

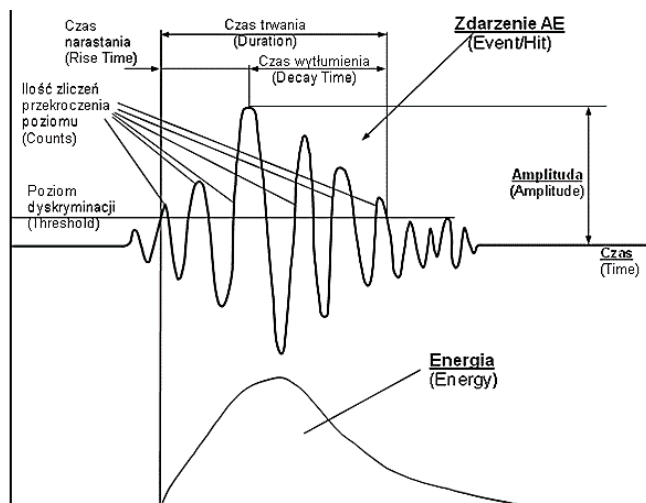
Bodźcem wywołującym wyzwolenie energii i powstanie fal sprężystych (rys.1.31) może być działanie obciążenia, środowiska czy zmiana temperatury, a procesy którym towarzyszy emisja akustyczna to zarówno zmiany na poziomie mikro jak i makro, takie jak: odkształcenie plastyczne, pękanie materiału, korozja, przecieki (nieszczelności), przemiany strukturalne i fazowe, reakcje chemiczne, delaminacja, pękanie włókien i osnowy w kompozytach, itd.



Rys.1.31. Ogólne zasady powstawania fal emisji akustycznej oraz ich rejestracja i przetwarzanie

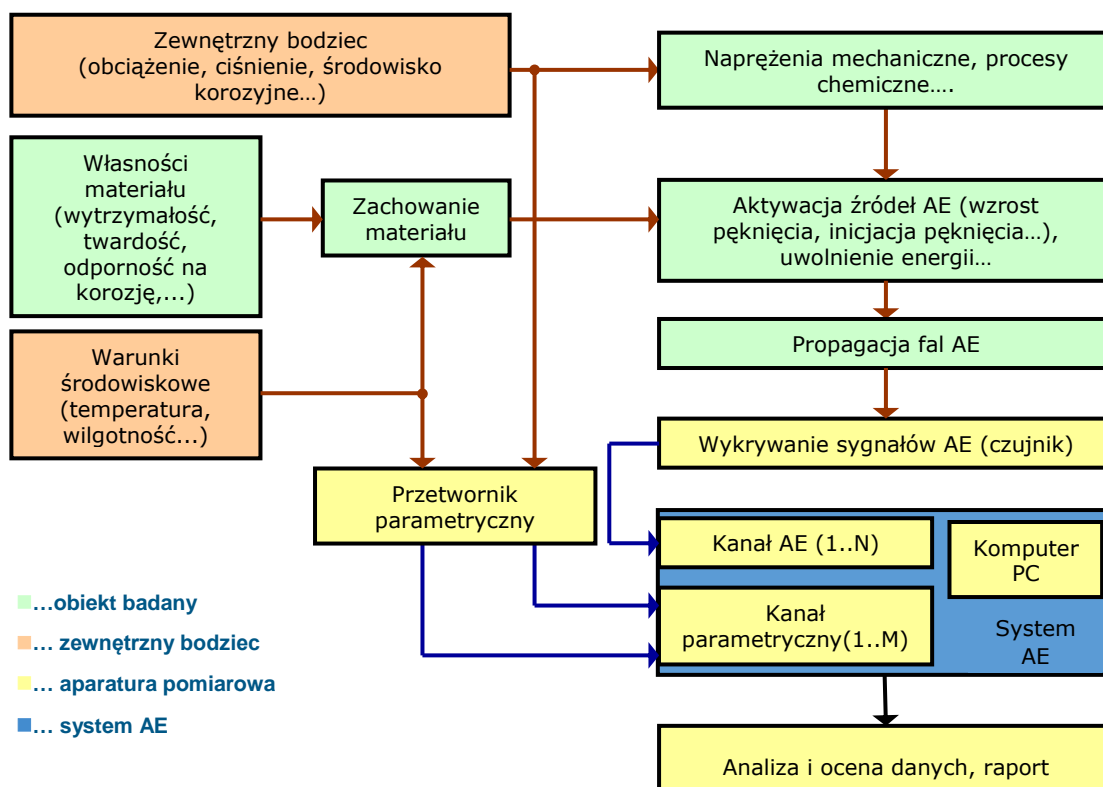
Fale akustyczne propagują we wszystkich kierunkach od źródła, mogą więc być rejestrowane przez jeden lub więcej czujników zamocowanych na obiekcie lub elemencie. W czasie propagacji fale AE ulegają wyłumieniu, co ogranicza dystans, na jakim mogą one być wykrywalne. Dystans ten jest uzależniony od wielu czynników, w tym przede wszystkim od własności materiału, geometrii obiektu i poziomu zakłóceń pochodzących z tła akustycznego.

Sygnał AE (rys. 1.32) charakteryzowany jest za pomocą szeregu zdefiniowanych w [39] parametrów takich jak: amplituda, energia, czas narastania, czas trwania, liczba przekroczeń progu dyskryminacji.



Rys.1.32. Sygnał AE wraz z zaznaczeniem jego parametrów

Metoda AE polega na rejestracji fal sprężystych za pomocą czujników piezoelektrycznych, które zamieniają fale na sygnał elektryczny transmitowany dalej do systemu pomiarowego (rys. 1.31. i rys. 1.32). Wszystkie elementy badania metodą AE pokazano schematycznie na rys. 1.33.



Rys. 1.33. Schematyczne przedstawienie badania metodą AE

Oprogramowanie systemu AE umożliwia wizualizację zarejestrowanych danych pomiarowych w czasie prowadzenia pomiaru, a także ich zapis (w czasie rzeczywistym) w celu późniejszej analizy. W przypadku zastosowania kilku czujników oraz oprogramowania z odpowiednimi algorytmami lokalizacji możliwe jest zlokalizowanie źródła AE na podstawie różnicy czasu dojścia fali do poszczególnych czujników [65].

Możliwość wykrywania fal generowanych poza strefą przetwornika, możliwość lokalizacji źródła oraz możliwość wykonania badań w trakcie eksploatacji urządzeń sprawia, że obecnie metoda ta jest na świecie uznawana za odpowiednią do badań okresowych dużych urządzeń, między innymi w przemyśle petrochemicznym [42÷44]. Jest również metodą, która bardzo dobrze uzupełnia się z innymi metodami badań nieniszczących, co pozwala na weryfikację i dokładniejszą ocenę wykrywanych uszkodzeń [42÷45, 73 78].

Główny celem zastosowania metody AE jest określenie stanu technicznego obiektów przemysłowych, takich jak zbiorniki ciśnieniowe i bezciśnieniowe, mosty, statki, dna i płaszcze zbiorników magazynowych oraz szereg innych obiektów [41÷78]. W literaturze prace na temat wykorzystania AE do badań zbiorników magazynowych prezentowane są już od szeregu lat [47, 66÷78]. W tym aspekcie badania metodą AE mają na celu określenie klasy źródeł AE generowanych przez powierzchniowe i wewnętrzne wady lub ocenę źródeł AE powodowanych aktywnymi procesami korozyjnymi lub przeciekami. Znane są badania laboratoryjne [60, 63, 66÷78], mające na celu określenie charakterystyk sygnałów i parametrów AE pochodzących z różnych typów uszkodzeń. Podejmowane są również próby symulowania różnych typów wad i uszkodzeń w sposób jak najbardziej zbliżony do rzeczywistości, z jednoczesnym pomiarem emisji akustycznej. Poprzez rejestrację danych pomiarowych z takich badań gromadzone są i budowane bazy danych [43, 46, 60, 63, 72, 73, 78], które wykorzystuje się do dalszych analiz i badań.

W pracach [41, 42, 45, 46, 53, 55, 56, 60, 78] przedstawiane są wyniki badań AE na obiektach rzeczywistych, gdzie mamy do czynienia z różnymi uszkodzeniami. Wyniki są następnie weryfikowane, a uzyskane bazy danych wykorzystywane są w następnych badaniach.

W praktyce badań metodą AE rzeczywistych obiegów przemysłowych [41, 46, 53, 57, 60, 67÷71, 75, 78] powszechnie używanym jest następujący schemat postępowania:

1. realizacja badań laboratoryjnych mających na celu symulację uszkodzeń, wad czy też procesów występujących na obiektach rzeczywistych (przemysłowych),
2. analiza otrzymanych wyników,
3. przeprowadzenie badań na obiekcie rzeczywistym,
4. weryfikacja i ocena otrzymanych wyników.

Prezentowane są również prace z badań prowadzonych bezpośrednio na obiektach rzeczywistych, bez uprzednich badań laboratoryjnych. Weryfikacja wyników uzyskanych z badań AE, polega na późniejszej ocenie i badaniu obiektu głównie innymi metodami nieniszczącymi (np. badania wizualne, pomiar grubości, analiza osadów, itp.) [49÷51]. Korzyści z takich badań to rejestracja sygnałów AE pochodzących z uszkodzeń w warunkach

rzeczywistych i jednoczesna korelacja ze stanem faktycznym wad i degradacji materiału. Jednak w tym przypadku, weryfikacja nie zawsze jest możliwa ze względu na koszty związane z wyłączeniem z eksploatacji badanego obiektu (zbiornika). Dodatkowo ocena aktywności AE i korelacja z dynamiką rozwoju uszkodzeń jest w takim przypadku trudniejsza i wymaga długotrwałych pomiarów i niejednej weryfikacji.

W przypadku zbiorników magazynowych (parków – baz zbiornikowych) efektywny czas eksploatacji (pracy) jest ściśle związany z kosztami i dochodami jego użytkownika, co wymusza określony sposób zarządzania i kontroli stanu technicznego zbiorników. Wynika to oczywiście w głównej mierze z przepisów prawa i przepisów dozorowych, jak również z przepisów dotyczących ochrony środowiska [54]. Dlatego tak wiele miejsca w literaturze poświęca się monitorowaniu i ocenie stanu technicznego den zbiorników magazynowych pod kątem uszkodzeń korozyjnych i przecieków z wykorzystaniem metody AE [47÷63].

1.5.3.1. Zastosowanie metody AE do badań den zbiorników magazynowych

Obecnie prowadzone badania zbiorników metodą AE, zarówno w kraju jak i za granicą, są badaniami okresowymi dającymi w wyniku ocenę stanu technicznego w odniesieniu do momentu badania [55÷57, 60]. Badania te wymagają każdorazowo odpowiedniego przygotowania obiektu według wymagań [40]. Główną zaletą tej metody w stosunku do innych metod jest możliwość badania obiektu bez konieczności jego wyłączenia z eksploatacji.

Badanie metodą AE zbiornika magazynowego o osi pionowej polega na wykrywaniu i lokalizacji źródeł AE na podstawie fal generowanych z dna lub płaszcza zbiornika, a rejestrowanych przez czujniki odpowiednio rozmieszczone na zewnętrznej stronie jego pobocznicy. Czujniki rejestrują fale generowane przez źródła AE, przetwarzają je na sygnał elektryczny, który po wzmocnieniu jest przesyłany do systemu pomiarowego, gdzie jest on parametryzowany i rejestrowany.

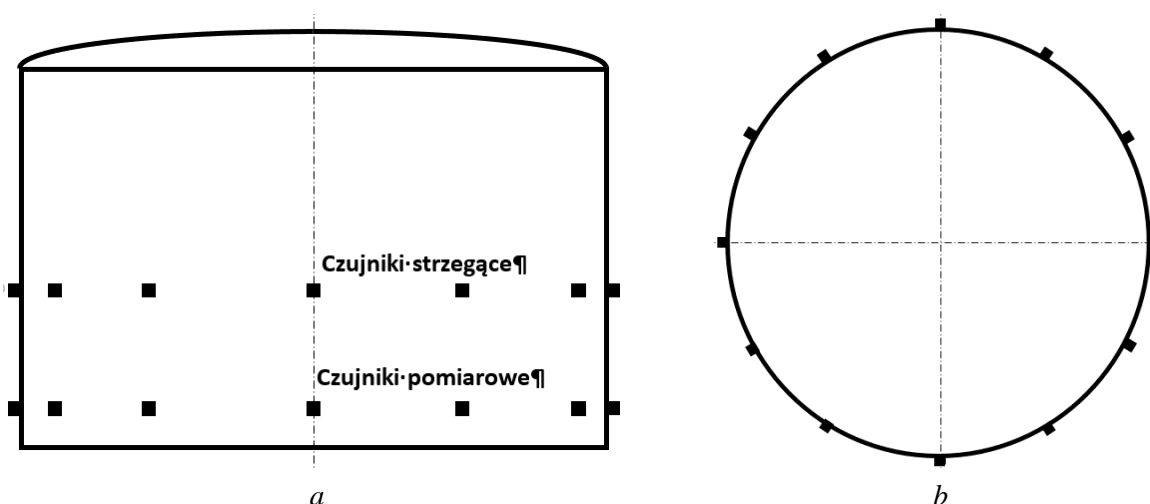
Badanie dna zasadniczo różni się od badania płaszcza zarówno metodyką pomiarową, jak również zakresem i celem. Badanie dna ma na celu wykrycie i zlokalizowanie źródeł AE powodowanych aktywnymi procesami korozyjnymi lub przeciekami oraz ich ocenę dla potrzeb klasyfikacji stanu technicznego zbiornika. Badanie to obejmuje dno i strefę przydenną (strefa połączenia płaszcza z dnem) zbiornika bezpośrednio stykającą się z magazynowanym produktem. Stosuje się w tym przypadku czułe niskoczęstotliwościowe czujniki o płaskiej charakterystyce (np. VS30-SIC).

Natomiast badanie płaszcza zbiornika magazynowego ma na celu wykrycie, zlokalizowanie i określenie klasy źródeł AE generowanych przez powierzchniowe i wewnętrzne wady w spoinach i blachach. W tym przypadku badanie obejmuje płaszczyz i jego elementy, które

podlegają działaniu obciążenia podczas pomiarów. Badanie płaszcza umożliwia ujawnianie wad i uszkodzeń aktywnych w trakcie obciążania, takich jak: pęknięcia i ich wzrost oraz inne nieciągłości w strukturze materiału (np. rozwarstwienia), lokalne deformacje plastyczne, czy też degradacje materiału na skutek korozji powodującej miejscowe osłabienie struktury materiału zbiornika. W tym przypadku stosowane są głównie czujniki o wyższej częstotliwości rezonansowej w zakresie 100÷300 kHz (np. VS150-RIC).

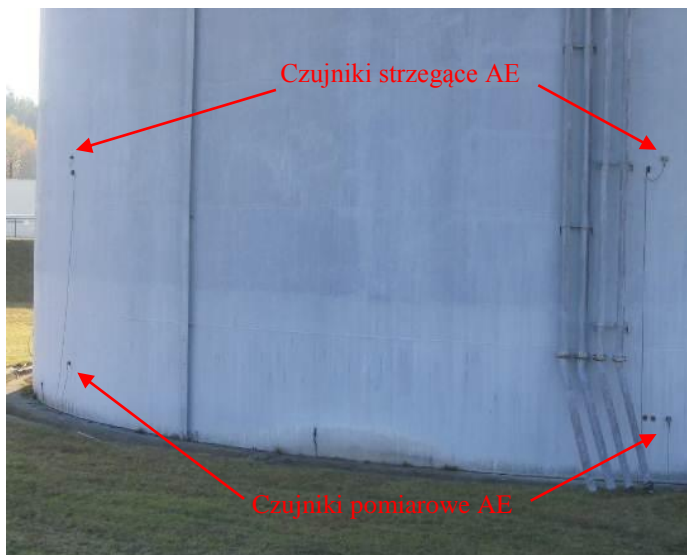
Badania te przeprowadzane są według specjalnie opracowanych do tego celu procedur badawczych, gdzie przewidywane jest zastosowanie odpowiedniej ilości i rozmieszczenia czujników.

W badaniu dna stosuje się do dwóch rzędów czujników AE rozmieszczonych, tak jak pokazano na rysunkach 1.34. i 1.35. Wymagane jest napełnienie zbiornika magazynowanym produktem do poziomu maksymalnego roboczego. Czujniki pomiarowe mają za zadanie rejestrować sygnały AE generowane z dna, a czujniki strzegące służą do odfiltrowywania sygnałów (zakłóceń) generowanych z dachu, z powierzchni magazynowanego produktu (skropliny) lub górnej części zbiornika [60, 63].

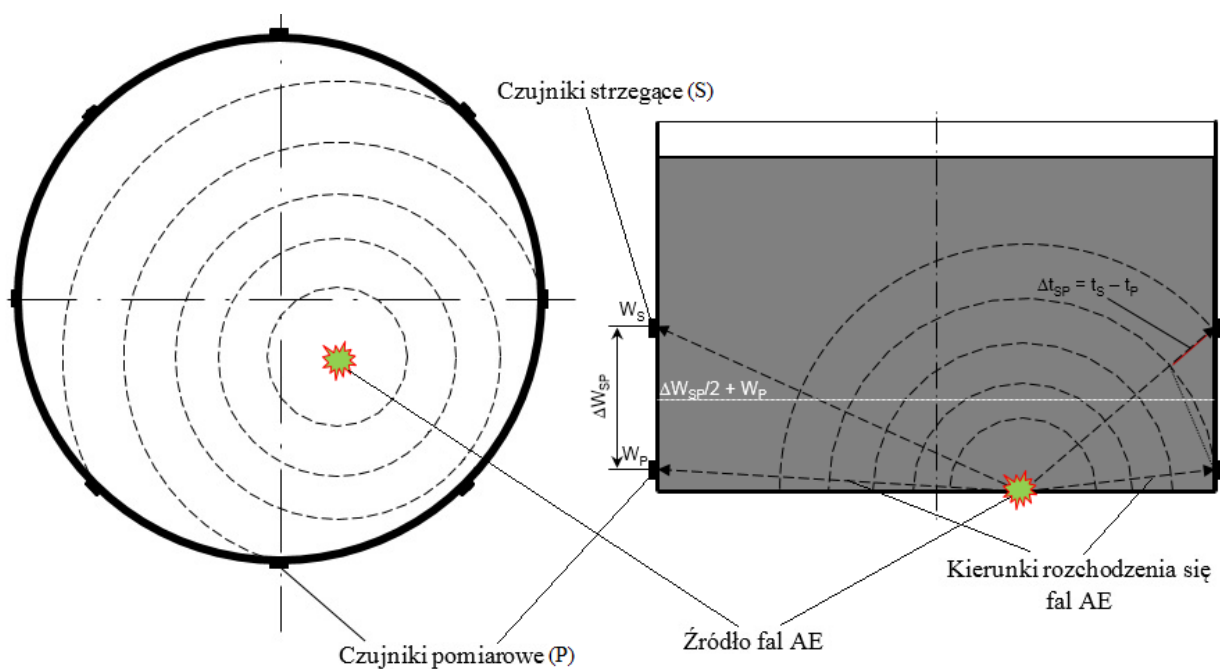


Rys. 1.34. Rozmieszczenie czujników AE na płaszczu podczas badania dna zbiornika magazynowego:
a – widok z boku, *b* – widok z góry

Propagacja fal AE oraz zarejestrowane sygnały są podstawą do lokalizacji źródeł AE (rys. 1.36) będących między innymi skutkiem występowania procesów korozyjnych lub przecieków. Wieloparametrowa analiza i filtracja zarejestrowanych sygnałów AE umożliwia identyfikację, a następnie ocenę zlokalizowanych źródeł AE w celu klasyfikacji stanu technicznego dna zbiornika.



Rys. 1.35. Przykład rozmieszczenia czujników AE na płaszczy zbiornika magazynowego podczas badania szczelności dna



t - czas rejestracji przez czujniki strzegące (S) lub pomiarowe (P) sygnałów AE pochodzących od źródła fali AE,
 Δt_{SP} - różnica czasu rejestracji sygnałów AE pomiędzy czujnikami strzegącym (S) i pomiarowym (P),
 $\Delta t_{SP} > 0$ - źródło fal AE znajduje się poniżej poziomu $[\Delta W_{SP}/2 + W_P]$,
 $\Delta t_{SP} < 0$ - źródło fal AE znajduje się powyżej poziomu $[\Delta W_{SP}/2 + W_P]$ (fala pochodzi np. ze źródła na powierzchni cieczy od skroplin),

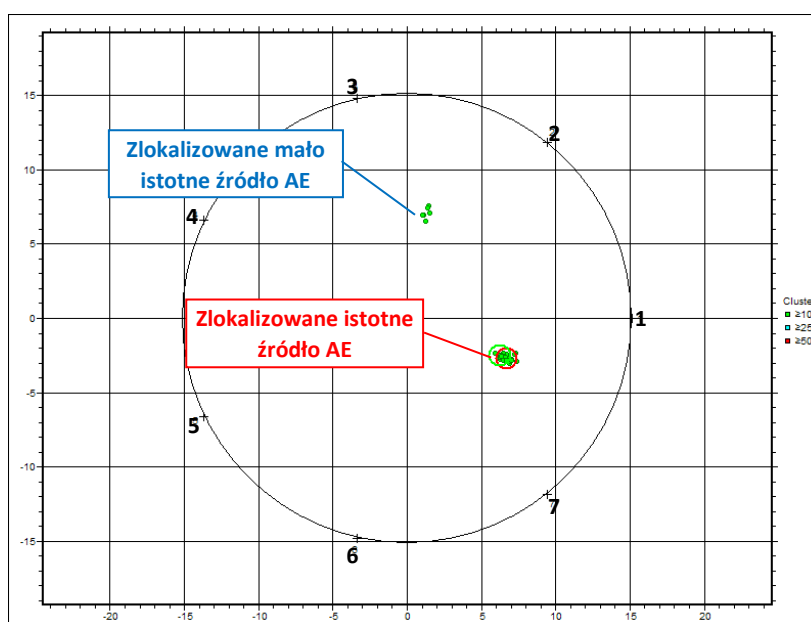
Rys. 1.36. Lokalizacja źródła fal AE na dnie zbiornika – propagacja fal AE oraz zastosowanie czujników strzegących do identyfikacji źródeł fal AE pochodzących z dna zbiornika magazynowego

Sposób identyfikacji i separacji sygnałów AE pochodzących od procesów korozji oraz od przecieków zawiera procedura badawcza przedstawiająca szczegółowo metodykę badania, w której wykorzystywane jest do tego celu specjalistyczne oprogramowanie do lokalizacji i wieloparametrowej analizy sygnałów AE [65].

Analiza sygnałów polega na ocenie przebiegu i kształtu fali AE oraz jej częstotliwości, a także zastosowania tych parametrów do selekcji w indywidualne grupy podobnych przebiegów fal.

Wzorce sygnałów odpowiadające charakterystycznym rodzajom uszkodzeń korozyjnych lub przeciekom opracowywane są w badaniach laboratoryjnych. Są one podstawą numerycznej bazy danych wzorców, sukcesywnie rozbudowywanej oraz uzupełnianej i weryfikowanej w miarę wykonywania kolejnych badań obiektów rzeczywistych [60].

Specjalistyczne oprogramowanie w oparciu o powyższą bazę wzorców umożliwia tworzenie klasyfikatorów zawierających reguły wytypowania poszczególnych sygnałów AE w odpowiednie grupy (klasy), które są wykorzystywane do identyfikacji źródeł AE, odpowiadających danemu rodzajowi uszkodzenia (rys. 1.37), a następnie do klasyfikacji stanu technicznego dna zbiornika.



Rys. 1.37. Przykład lokalizacji źródła AE spowodowanego uszkodzeniem korozyjnym w dnie zbiornika po analizie i identyfikacji (+ – czujniki AE)

Na podstawie uzyskanych wyników badań i analiz oraz klasyfikacji źródeł, dno zbiornika zostaje sklasyfikowane do jednej z czterech klas opisanych w tabeli 1.4. zgodnie z [79].

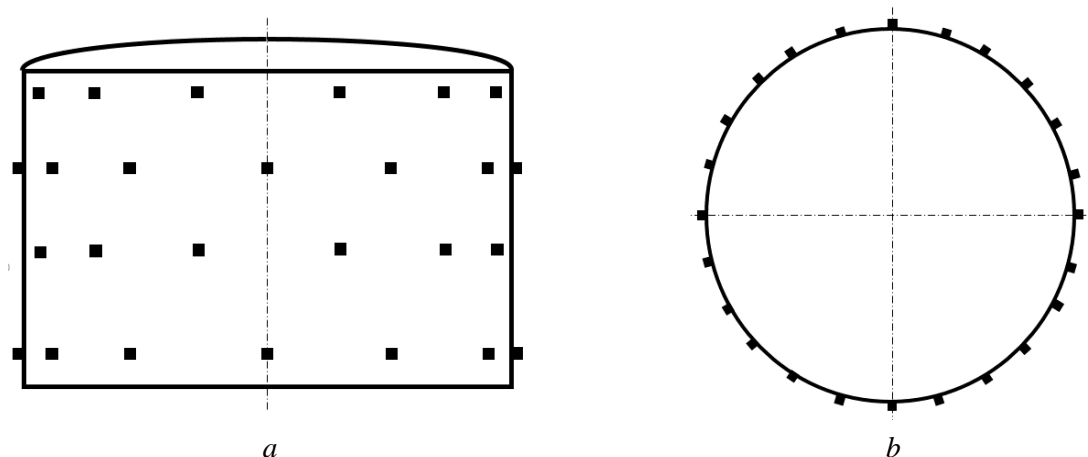
Tabela. 1.4. Klasyfikacja jakościowa zbiorników magazynowych

Opis stanu badanego obiektu	Klasa zbiornika
Dno zbiornika w dobrym stanie, bez aktywnych uszkodzeń.	A
Dno zbiornika z małymi uszkodzeniami - wczesne stadium równomiernej korozji powierzchniowej z możliwością wystąpienia niewielkiej ilości korozji wżerowej.	B
Dno zbiornika ze średnimi uszkodzeniami – zaawansowana równomierna korozja powierzchniowa oraz wyraźna korozja wżerowa.	C
Dno zbiornika z dużymi uszkodzeniami lub przeciekami – przeciek lub zaawansowana równomierna korozja powierzchniowa oraz korozja wżerowa w stadium mogącym w krótkim czasie doprowadzić do perforacji dna.	D

1.5.3.2. Zastosowanie metody AE do okresowego badania płaszczy zbiorników magazynowych

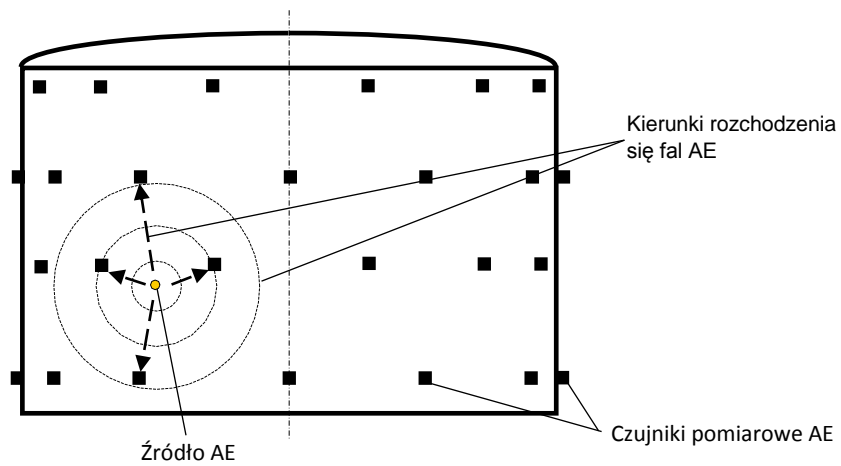
W przypadku badania płaszcza stosuje się taką ilość odpowiednio rozmieszczonych czujników AE, aby objąć badaniem jego część lub całość. Przykład rozmieszczenia czujników AE pokazano na rys. 1.38., a przykład lokalizacji źródeł AE pokazano na rys. 1.39. Czujniki pomiarowe mają za zadanie rejestrować sygnały AE generowane przez powierzchniowe i wewnętrzne wady w spoinach, elementach płaszcza zbiornika, podlegających działaniu obciążenia w trakcie badania. Podczas badania zbiornik magazynowy obciążany jest magazynowanym produktem do poziomu maksymalnego dopuszczalnego.

Samo badanie polega na jednoczesnej rejestracji podczas próby obciążeniowej sygnałów AE, w badanych strefach obejmujących całość płaszcza zbiornika lub ich części oraz na lokalizacji źródeł AE (rys. 1.39), a następnie na przeprowadzeniu wieloparametrowej analizy sygnałów mającej na celu określenie klasy źródeł (rys. 1.40), zgodnie z postanowieniami norm [40, 80].

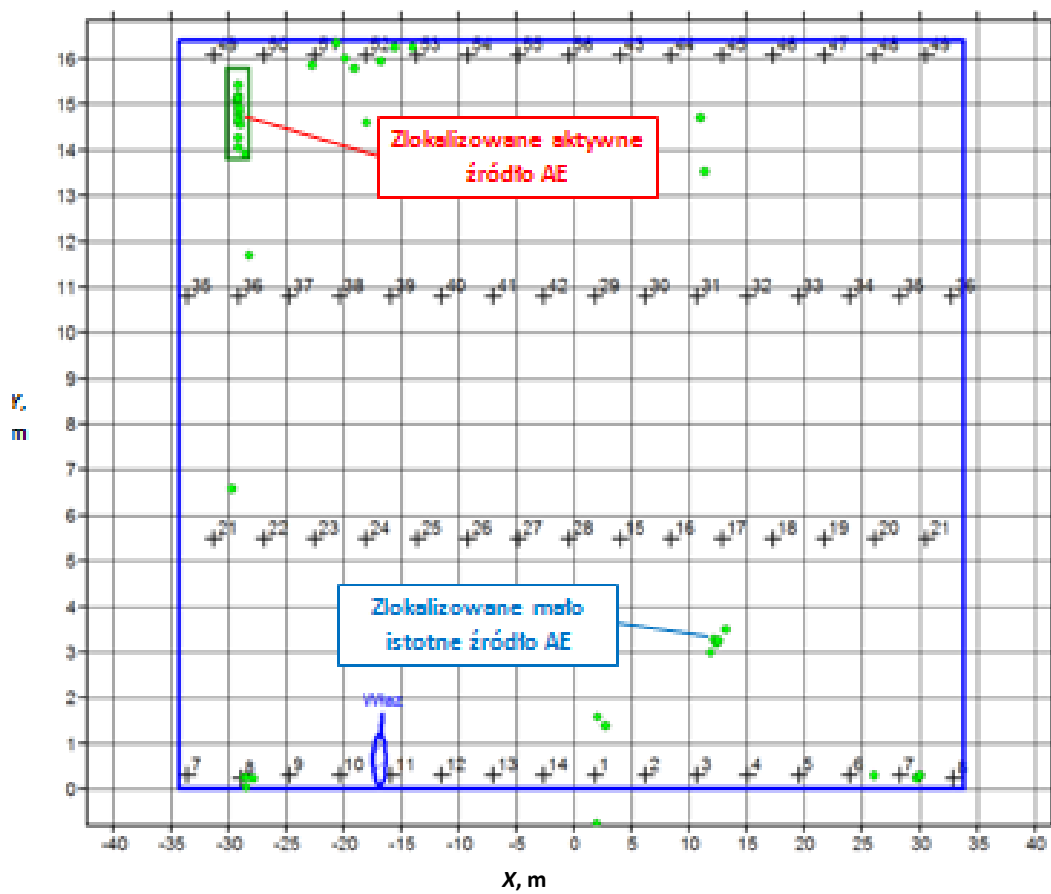


Rys. 1.38. Rozmieszczenie czujników AE podczas badania płaszcza zbiornika magazynowego:
a – widok z boku, *b* – widok z góry

Klasyfikacje zlokalizowanych źródeł AE przeprowadza się z uwzględnieniem poziomu ich aktywności emisyjnej oraz wg kryteriów opracowanych w badaniach laboratoryjnych. Wieloparametrowa analiza i filtracja zarejestrowanych sygnałów AE umożliwia identyfikację i określenie klasy źródeł AE, a następnie ocenę stanu technicznego płaszcza zbiornika. Zlokalizowane źródła AE zostają sklasyfikowane do jednej z trzech klas aktywności opisanych w tabeli 1.5. i zgodnie z postanowieniami norm [40, 80].



Rys. 1.39. Lokalizacja źródła AE na płaszczu zbiornika – propagacja fal AE



Rys. 1.40. Przykład lokalizacji źródeł AE na płaszczu zbiornika magazynowego po analizie i klasyfikacji (+ – czujniki AE)

Tabela 1.5. Klasyfikacja aktywności źródła AE z uwzględnieniem norm [40, 80]

Klasa źródła	Definicja	Zalecane działania
1	Źródło mało istotne	Nie są wymagane dalsze działania. Źródło do uwzględnienia w następnych badaniach
2	Źródło aktywne	Zaleca się badanie innymi metodami nieniszczącymi, jeśli źródło jest powiązane z charakterystycznymi elementami zbiornika (np.: spoiny króćców, uchwyty itd.)
3	Źródło bardzo aktywne	Zanim zbiornik zostanie włączony do eksploatacji, powinna być przeprowadzona dalsza ocena innymi odpowiednimi metodami badań nieniszczących

Komentarz do wyżej wymienionej klasyfikacji źródeł jest następujący:

- klasę 1 odnosi się do źródła AE, które generuje sygnały AE nie będące skutkiem wystąpienia uszkodzenia w strukturze materiału badanego zbiornika,
- klasę 2 odnosi się do źródła AE, które może generować sygnały AE na skutek uszkodzenia w strukturze materiału nie stanowiącego jeszcze niebezpieczeństwa dla badanego zbiornika, ale w przypadku gdy źródło jest powiązane z charakterystycznymi elementami badanego zbiornika (np.: spoiny króćców, uchwyty itd.) zaleca się jego identyfikację innymi metodami nieniszczącymi,
- klasę 3 odnosi się do źródła AE generującego sygnały AE na skutek uszkodzenia mogącego stanowić niebezpieczeństwo dla badanego zbiornika, które znajduje się w stanie krytycznym i którego rozwój uszkodzeń może w krótkim czasie doprowadzić do awarii zbiornika; w tym przypadku zawsze wskazana jest identyfikacja i ocena źródła innymi metodami nieniszczącymi.

PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 1

Po przeanalizowaniu w tym rozdziale stosowanych w przemyśle petrochemicznym typów zbiorników magazynowych stwierdzono, że najczęściej wykonuje się je jako zbiorniki stalowe walcowe pionowe, ponieważ są one najtańsze w wykonaniu warsztatowym i montażu. Podczas wieloletniej ich eksploatacji największym zagrożeniem dla bezpiecznego użytkowania są uszkodzenia korozyjne den i płaszczy. Drugim w kolejności zagrożeniem są rozwarstwienia blach płaszczy występujące łącznie z lokalnymi dużymi deformacjami kształtu płaszcza i dużymi wadami spawalniczymi w spoinach pionowych. Dokonany także w tym rozdziale przegląd metod badawczych, umożliwiający wykrycie tych wad, wskazuje, że najwięcej uwagi należy obecnie poświęcić emisji akustycznej która daje skuteczne określenie lokalizacji i stopień zagrożenia dalszej bezpiecznej eksploatacji przez wadę. Charakter wady i sposób jej usunięcia najlepiej jest rozpoznać metodą ultradźwiękową zastosowaną w miejscach wskazanych przez metodę emisji akustycznej.

ROZDZIAŁ 2

CEL, ZAKRES I TEZA NAUKOWA PRACY DOKTORSKIEJ

Wyszczególnienie w rozdziale pierwszym niniejszej dysertacji typów zbiorników na ropę naftową i ropopochodne paliwa płynne oraz przedstawienie charakterystyki uszkodzeń mogących wystąpić po wieloletniej eksploatacji tych zbiorników pozwoliło na określenie celu i zakresu pracy.

Celem pracy jest określenie przyczyn obniżających przydatność eksploatacyjną zbiorników magazynowych oraz podanie metod przedłużających ich okres dalszej eksploatacji.

Cel ten można osiągnąć poprzez:

- analizę konstrukcji stalowych zbiorników magazynowych i określenie stref, ulegających procesom degradacyjnym, poprzez badania zmian reologicznych stali oraz intensywności rozwoju korozji i innych wad w zależności od rodzaju mediów magazynowanych w zbiorniku;
- wyznaczenie okresów badań kontrolnych w zależności od typu zbiornika i magazynowanego w nim medium;
- analizę i wytypowanie metod kontrolnych pozwalających na diagnostykę zbiornika bez wyłączania go z eksploatacji.

Teza pracy:

- Uszkodzenia konstrukcji zbiornika wpływające na bezpieczeństwo jego eksploatacji, zależą od typu zbiornika, rodzaju magazynowanego w nim paliwa i okresu eksploatacji.
- Przedłużenie okresu eksploatacji zbiornika można uzyskać przeprowadzając badania diagnostyczne (najlepiej bez wyłączenia go z eksploatacji) w określonych miejscach konstrukcji zbiornika, i w odpowiednich okresach jego eksploatacji. Następstwem tych badań muszą być remonty zapobiegawcze podjęte w technicznie uzasadnionym terminie

W dysertacji podjęto próbę oceny rozwarstwień blach, zwłaszcza płaszczy zbiorników walcowych pionowych, gdyż jest to zagrożenie dotychczas mało opracowane.

Drugim istotnym tematem omawianym w dysertacji jest metoda emisji akustycznej, stosowana do wstępnej oceny i lokalizacji miejsc najbardziej zagrożonych (pocienionych na skutek procesów korozyjnych) w płaszczu i dnie zbiornika.

Jest to dotychczas jedyna metoda pozwalająca na wykrycie zagrożeń spowodowanych uszkodzeniami bez konieczności wyłączania zbiornika z eksploatacji.

W dysertacji rozszerzona została wiedza o tej metodzie przez sprawdzenie czy podwójne dno stalowe zbiornika, albo dno ze znajdującą się na nim stalową węzownicą grzewczą nie powoduje zakłóceń w odbiorze sygnałów akustycznych.

ROZDZIAŁ 3

REOLOGIA WŁASNOŚCI TECHNICZNYCH STALI STOSOWANYCH NA ZBIORNIKI W DRUGIEJ POŁOWIE XX WIEKU

Duża liczba aktualnie eksploatowanych zbiorników magazynowych przeznaczonych do przechowywania produktów naftowych jest wybudowana w lata 60. ubiegłego wieku. Niedoskonałości ówczesnych technologii wytwarzania stali niskowęglowych, a także walcowania blach stosowanych w budowie tego typu konstrukcji mogły powodować występowanie w materiale różnego typu wad technologicznych w postaci likwacji, zarówno chemicznych jak i strukturalnych. Charakterystyczną cechą tych stali jest też znaczne zanieczyszczenie struktury poprzez wtrącenia niemetaliczne, a głównie siarczkami. W trakcie długotrwałej eksploatacji materiał większości elementów konstrukcji zbiornika w miejscach o podwyższonej zawartości siarczków ulega degradacji, co często jest przyczyną występowania rozwarstwień, pęknięć i może skutkować utratą nośności konstrukcji.

W związku z powyższym, dla prawidłowego określenia stanu technicznego zbiorników magazynowych niezbędnym jest przeprowadzenie badań oceny wpływu degradacji materiału oraz zawartych w nim wad technologicznych na jego właściwości mechaniczne oraz wykonanie analizy porównawczej otrzymanych wyników z wymaganiami podawanymi w ówczesnych normach

W trzecim rozdziale pracy doktorskiej przedstawiono wyniki cyklu badań niszczących wykonanych na materiale wycinków pobranych z blach płaszcza zbiornika o pojemności $V = 10000 \text{ m}^3$ eksploatowanego przez ok 42 lata zbiornika magazynowego. W płaszczu tego zbiornika poprzez badania grubości UTT wykryto znaczne strefy o podwyższonej zawartości wtrąceń niemetalicznych.

3.1. Charakterystyka zbiornika, cel i zakres przeprowadzonych badań

W trakcie badań kontrolnych, polegających na pomiarze grubości metodą UTT, blach płaszczu zbiornika magazynowego (aktualnie eksploatowanego na terenie jednego z zakładów rafineryjnych), w odległości 2,2 m od wjazdu WI (rys. 3.1) na jednej z blach pierwszego pierścienia wykryto strefę (300×400 mm) zawierającą nieciągłości materiału, które zalegały na głębokości 5-7mm (rys. 3.3, rys. 3.4) pod powierzchnią blachy. Strefa ta znajdowała się w pobliżu pionowej spoiny łączącej blachy cargo. Dane techniczne zbiornika podano w tabeli 3.1.

Następnie w celu wykrycia rozwoju wskazanych powyżej defektów płaszcz zbiornika został poddany badaniom metodą AE, w wyniku których nie stwierdzono żadnych aktywnych źródeł AE we wskazanym obszarze. Niemniej materiał w tym miejscu został wycięty w celu przeprowadzenia cyklu badań laboratoryjnych.

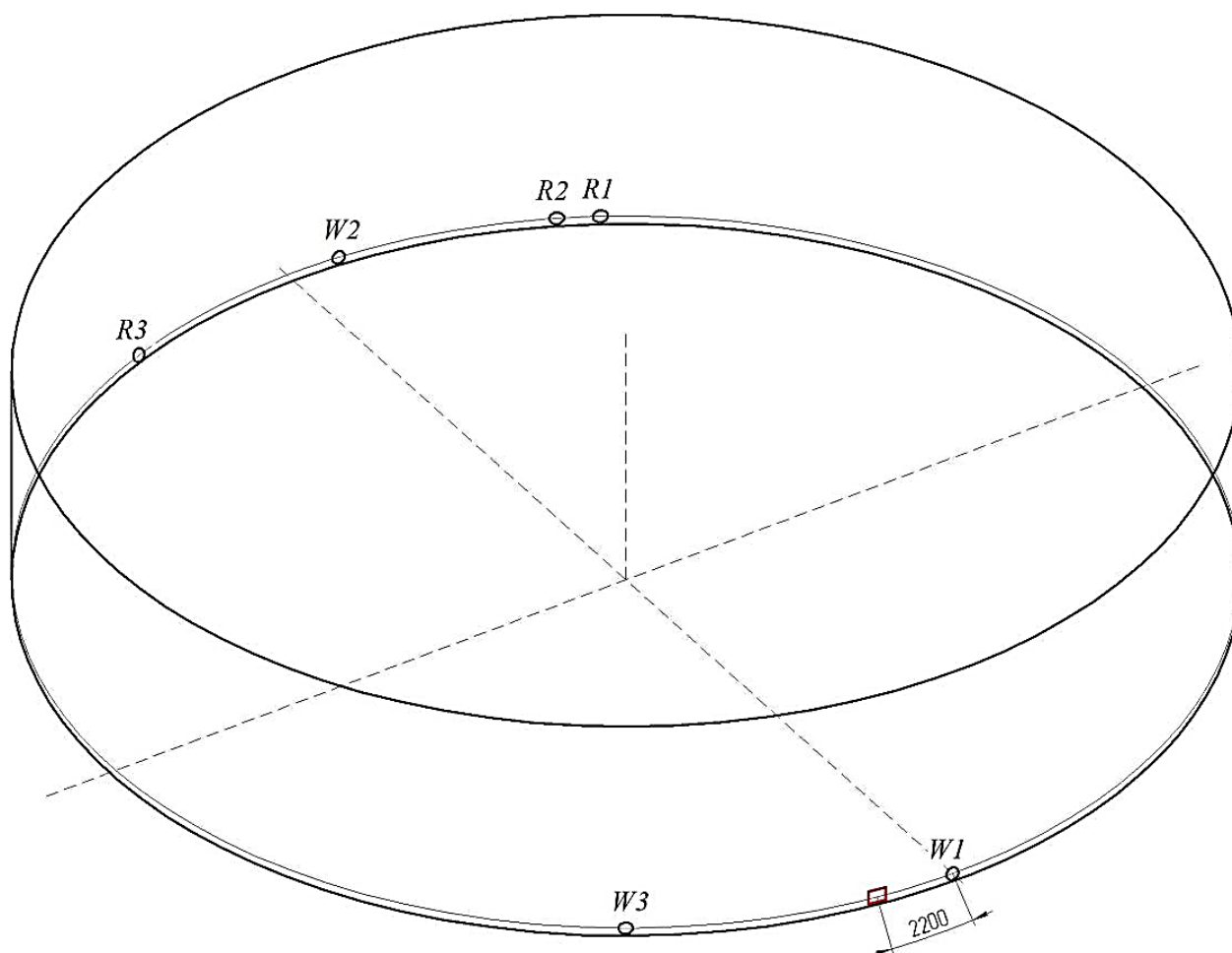
Tabela 3.1. Dane techniczne badanego zbiornika magazynowego

Typ zbiornika	Naziemny o osi pionowej z dachem stałym
Pojemność	10 000 m ³
Magazynowane medium	olej napędowy
Maksymalny poziom roboczy medium	12 000 mm
Rok budowy	1974
Materiał płaszczu	St3S

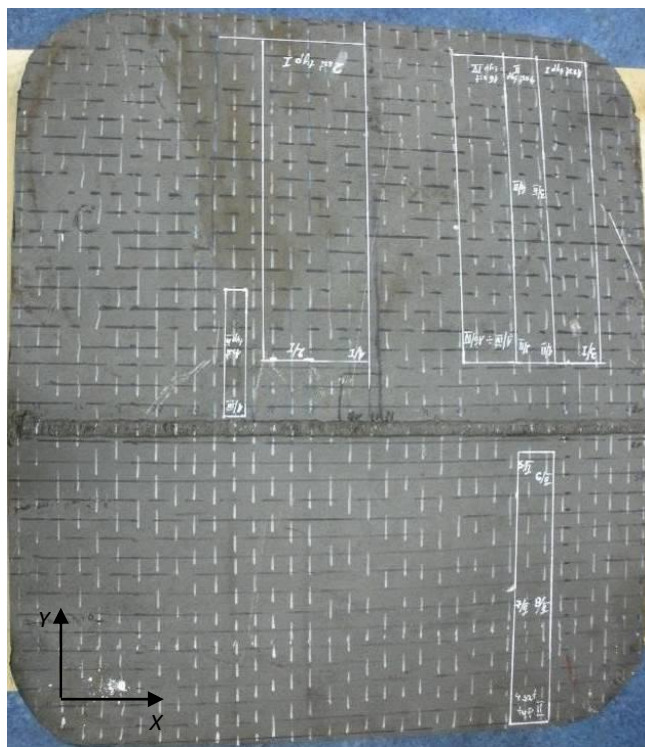
Zakres badań. Dla oceny wpływu degradacji materiału płaszczu zbiornika magazynowego oraz zawartych w nim wad technologicznych na zmiany właściwości mechanicznych, a tym samym na dalszą bezpieczną eksploatację konstrukcji zbiornika, założono i wykonano kompleks następujących badań i analiz:

- badanie składu chemicznego metodą spektrometryczną emisyjną,
- szczegółowa analiza składu chemicznego na zawartość siarki metodą absorpcji w podczerwieni po spaleniu w piecu indukcyjnym,
- badanie metalograficzne struktury materiału,
- statyczna próba rozciągania z wyznaczeniem właściwości wytrzymałościowych w temperaturze otoczenia,
- badanie udarności w temperaturze otoczenia i temperaturach obniżonych KCV oraz określenie temperatury przejścia plastyczno-kruchości,
- pomiary twardości metodą Brinella HBW,
- statyczna próba rozciągania z rejestracją sygnałów AE

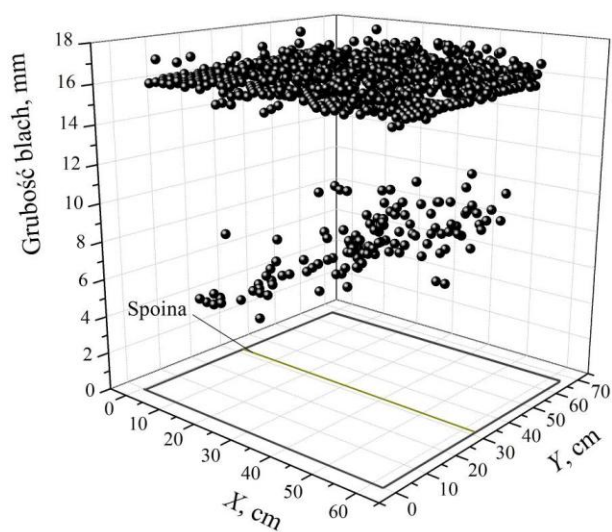
Schemat wycinania oraz oznaczenie próbek. Pobrane z płaszcza zbiornika wycinek do badań składał się ze złącza spawanego dwóch blach (rys. 3.2), które zawierały wady o charakterze nieciągłości (wykryte i zidentyfikowane podczas ultradźwiękowych pomiarów grubości). Powtórny pomiar grubości (wykonany w warunkach laboratorium) z zagęszczoną siatką pomiarową pozwolił dokładnie określić strefy występowania nieciągłości oraz ich wielkości (rys. 3.3). Na rys. 3.4. pokazano wartości głębokości zalegania wtrąceń niemetalicznych z ich lokalizacją na blasze. Otrzymane wyniki pozwoliły na dokładne określenie miejsc zawierających ww. wady. W związku z czym w celu porównania właściwości materiału „zdrowego” z materiałem zawierającym wtrącenia (zgodnie z założonym zakresem badań), zostały wykonane dwie grupy próbek, schemat wycięcia których pokazano na rys. 3.2. i 3.5.



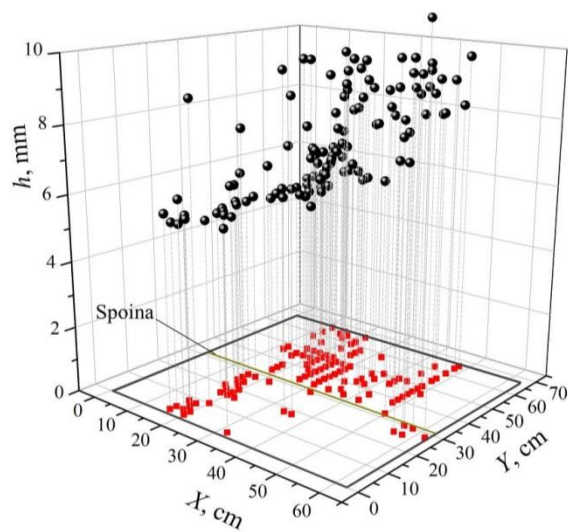
Rys. 3.1. Lokalizacja miejsca pobierania wycinaka płaszcza badanego zbiornika magazynowego
(W1÷W3 – włazy, R1÷R3 – rurociągi)



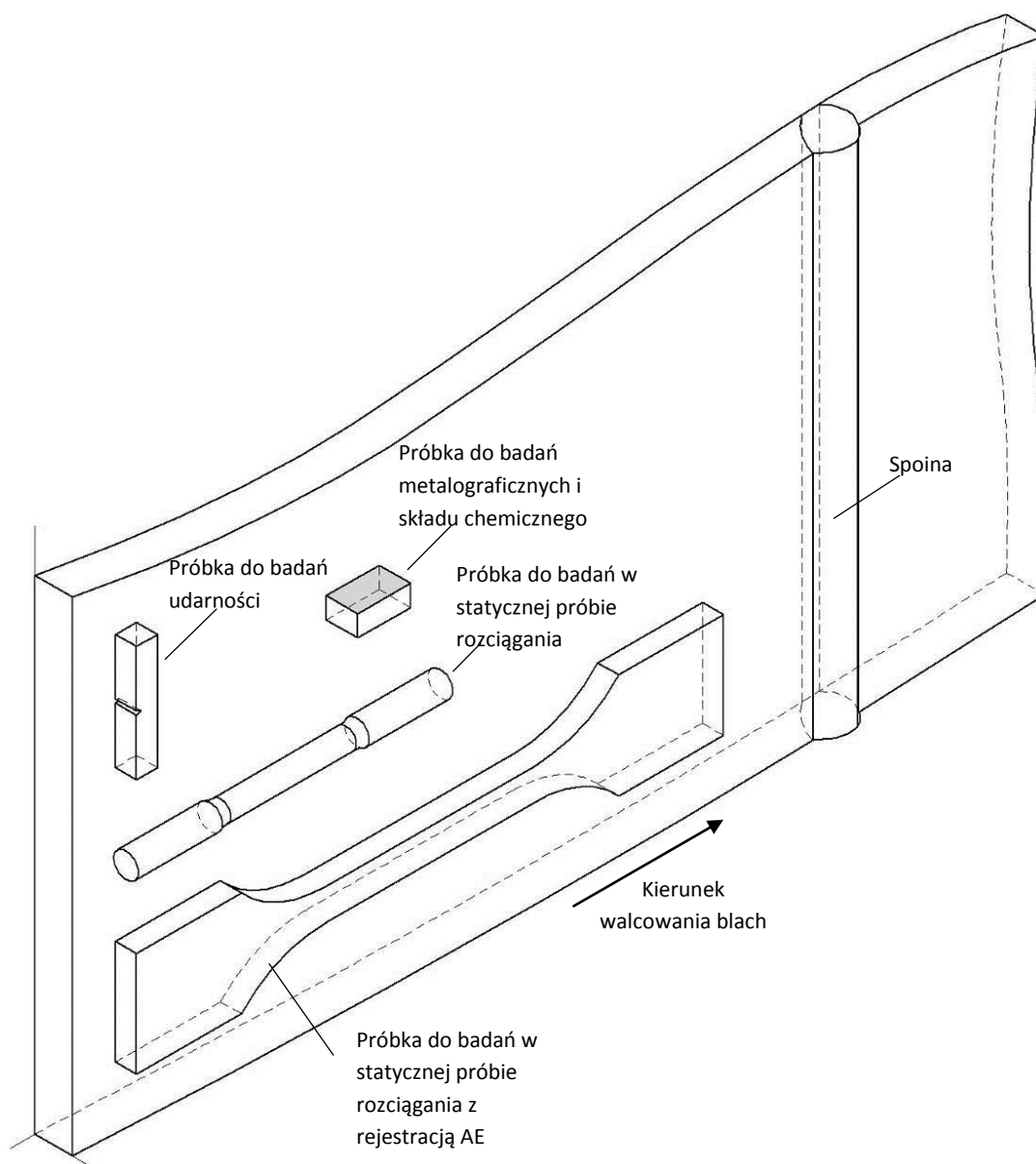
Rys 3.2. Wycinek płaszcza badanego zbiornika z zaznaczonymi miejscami pobierania próbek



Rys. 3.3. Wyniki pomiarów grubości blach wycinka płaszcza zbiornika



Rys. 3.4. Głębokości zalegania wtrąceń niemetalicznych z ich lokalizacją na blasze



Rys. 3.5. Schemat wycięcia próbek do badań niszczących

3.2. Analiza składu chemicznego stali płaszczu zbiornika

Do oceny składu chemicznego stali z dostarczonego wycinka przygotowano dwie standardowe próbki. Ogólne badania stali wykonano metodą spektrometryczną emisyjną zgodnie z wytycznymi normy [81]. Do badań użyto spektrometr optyczny emisyjny typu MA (ARL).

Dla dokładniejszego określenia zawartości siarki w stali, zgodnie z wytycznymi [82] wykonano badania metodą absorpcji w podczerwieni po spaleniu w piecu indukcyjnym – analizator węgla i siarki LECO typu CS-600. Wyniki przeprowadzonych badań podano w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Skład chemiczny materiału blach wycinka oraz stali St3S (zgodnie z [5])

Stal	Pierwiastki chemiczne, [%]							
	C	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Si
Stal wycinka	0,15	0,43	0,032- 0,049	0,022	0,04	0,01	0,02	0,17
St3S wg. PN-88/H-84020	max 0,22	max 1,1	max 0,05	max 0,05	max 0,3	max 0,3	max 0,3	0,1±0,35

Analiza badań składu chemicznego pobranych próbek wykazała, że materiał blach odpowiada niskowęglowej stali gatunku St3S, a zawartości pierwiastków mieszczą się w zakresie wymagań normy [5]. Przy czym zawartość C, Mn oraz Si jest znacznie mniejsza od wartości określonej w normie jako maksymalna, natomiast zawartość siarki 0,049% jest na granicy wartości normowo dopuszczalnej 0,05%.

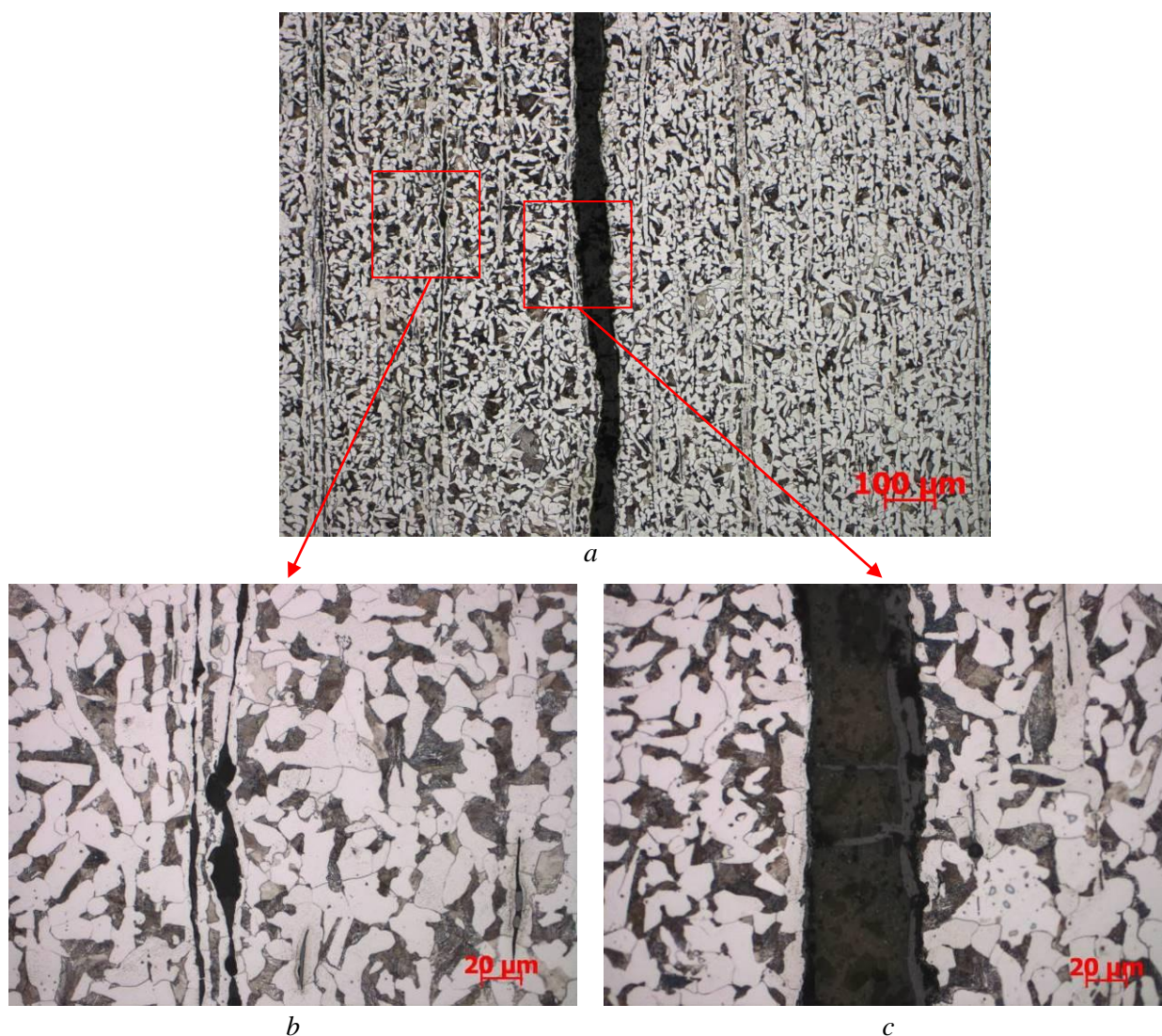
3.3. Badania metalograficzne stali płaszczu zbiornika

Badania metalograficzne wykonano przy pomocy optycznego mikroskopu AXIO OBSERVER Z1m. Zbadano powierzchnie nietrawionych i trawionych zglądów o wymiarach 16×25 mm, wyciętych równoległe do kierunku obróbki plastycznej blach (rys. 3.5). Zgłady wykonano zgodnie z wytycznymi normy [83], a trawiono odczynnikiem Nital (4% HNO₃ + 96% C₂H₅OH) przygotowanym zgodnie z [84].

Badania nietrawionych zglądów wyciętych ze strefy zawierającej uszkodzenia wykazały, że w strukturze stali występuje likwacja wtrąceń niemetalicznych o wydłużonym kształcie w kierunku walcowania (rys. 3.6), które w trakcie wcześniejszych badań nieniszczących były identyfikowane jako nieciągłości materiału. Są to głównie rozwalcowane krzemiany i siarczki manganu oraz żelaza, a ich ilość spowodowana jest podwyższoną zawartością siarki w stali oraz technologią jej wykonania. W centralnej części przekroju blachy zaobserwowano duże likwacje wtrąceń o wydłużonym kształcie, które są połączone w szeregi i pokrywają całą długość próbki (rys. 3.6).



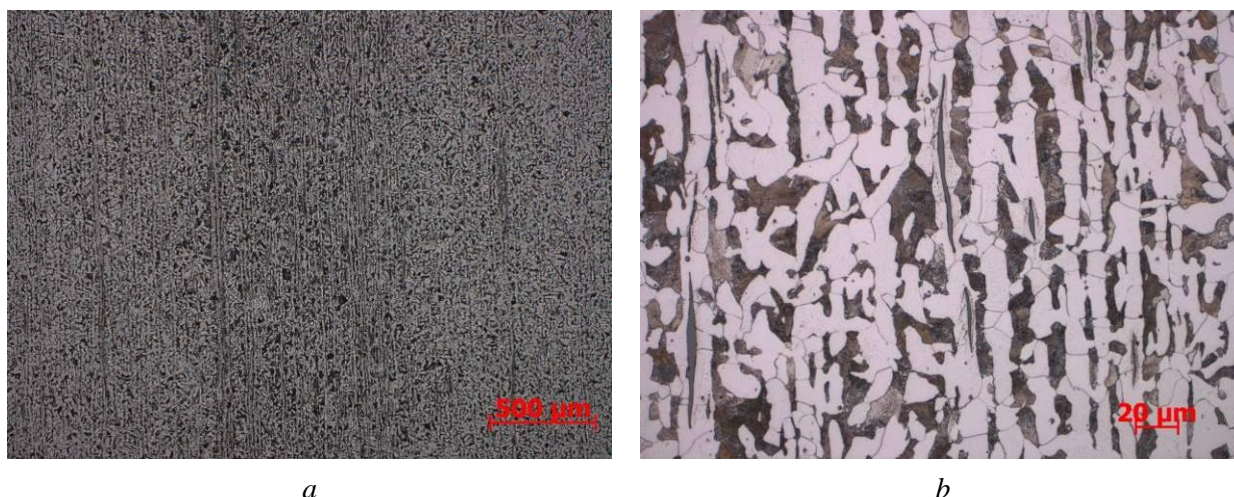
Rys. 3.6. Makrofotografia powierzchni nietrawionego zglądu (widoczne są likwacje siarczków i krzemianów), powiększenie 12×



Rys. 3.7. Mikrostruktura stali wycinka w strefie zalegających wtrąceń: *a* – powiększenie 100×, *b, c* – powiększenie 500×

Badania trawionych zglądów wykonanych ze wskazanej powyżej strefy wykazały, że materiał (stal St3S) wycinka w tym miejscu ma strukturę ferrytyczno-perlityczną pasmową (rys. 3.7), typową dla stali tego gatunku. Ziarna ferrytu oraz perlitu są ukształtowane w warstwy wydłużone zgodnie z kierunkiem walcowania blachy. Dodatkowo stwierdzono, że stal zawiera dużą ilość wtrąceń niemetalicznych, głównie w postaci rozwalcowanych krzemianów oraz siarczków rozmieszczonych na granicach ziarn, które kształtują obszerne likwacje w centralnej części przekroju blachy.

Badania metalograficzne, które zostały wykonane w innych punktach wycinka wykazały, że skład fazowy stali w tych miejscach (rys. 3.8) niewiele się różni od tego z nieciągłościami (rys. 3.7). Struktura składa się z ukształtowanych w warstwy ziarn ferrytu oraz perlitu z oznakami struktury wtórnej. Na mikrostrukturach (rys. 3.8) są widoczne wydłużone wtrącenia siarczków, ale ich ilość jednak jest zdecydowanie mniejsza.

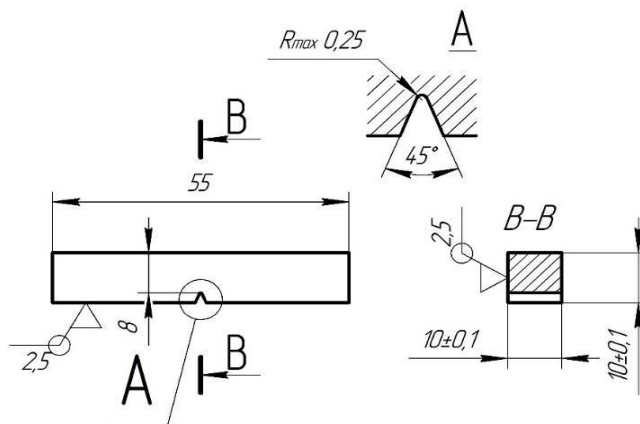


Rys. 3.8. Mikrostruktura stali wycinka: *a* – powiększenie 100×, *b* – powiększenie 500×

3.4. Badanie udarności stali płaszczu zbiornika

Badania udarności przeprowadzono na młocie Charpy’ego z bijakiem o początkowej energii 50 J w temperaturach: -40, -20, 0 i +20°C. Próbę w temperaturze otoczenia wykonano zgodnie z wymaganiami normy [85], a w temperaturach obniżonych zgodnie z [86]. Do badań użyto próbek o wymiarach 10×10×55 mm, z karbem typu „V” o głębokości 2 mm (rys. 3.9). Próbki zostały wycięte ze strefy zawierającej skupiska wtrąceń niemetalicznych w sposób taki, że kierunek pęknięcia materiału był skierowany równoległe do kierunku obróbki plastycznej blach oraz ukształtowania wtrąceń (rys. 2.5).

Z literatury [87] wiadomo, że anizotropia materiału ma istotny wpływ na odporność stali na pęknięcie przy obciążeniu dynamicznym. Pasmowość struktury oraz zawartość dużej ilości rozwałcowanych wtrąceń niemetalicznych o kształcie wydłużonym, powodują obniżenie udarności, wzdłuż kierunku walcowania blach. W związku z tym badania udarności KCV stali wycinka z płaszczu zbiornika zostały wykonane w kierunku mniejszej odporności. Wyniki badań podano w tabeli 3.3.

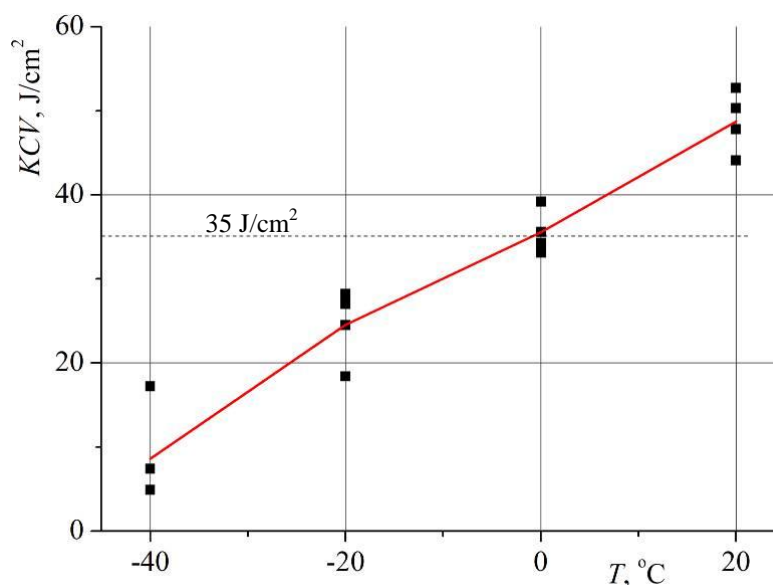


Rys. 3.9. Rysunek próbki do badania udarności KCV

Tabela 3.3. Wyniki badań udarności KCV stali w temperaturach -40, -20, 0 i 20°C równoległe do kierunku walcowania blach.

Temperatura pomiaru, °C	Oznaczenie próbki	KCV, J/cm ²
20	IV/1	44,1
	IV/2	50,3
	IV/3	47,8
	IV/4	52,7
	śred.	48,7
0	IV/5	33,1
	IV/6	39,2
	IV/7	34,3
	IV/8	35,6
	śred.	35,5
-20	IV/9	28,2
	IV/10	27,0
	IV/11	18,4
	IV/12	24,5
	śred.	24,5
-40	IV/13	4,9
	IV/14	7,4
	IV/15	4,9
	IV/16	17,2
	śred.	8,6

Na rysunku 3.10. przedstawiono przebieg zmian udarności w funkcji temperatury. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że udarność KCV stali wycinka z płaszcza zbiornika w temperaturze 20°C mieści się w zakresie wymaganym normą [5] – $KCV > 35 \text{ J/cm}^2$. Oprócz tego badany materiał spełnia wymagania dotyczące minimalnej wartości udarności dla współczesnych stali konstrukcyjnych, która wynosi 35 J/cm^2 [8, 88].



Rys. 3.10. Zależność zmian udarności KCV od temperatury

3.5. Pomiar twardości stali płaszczą zbiornika

Pomiar twardości wykonano sposobem Binella zgodnie z wytycznymi normy [89] z zastosowaniem uniwersalnego twardościomierza Zwick/Roell ZHU 250. Do badań jako wgłębnik użyto kulkę z węgla spiekanego (\varnothing 2,5 mm), a ich wyniki przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Wyniki pomiarów twardości *HBW* stali

Nr pomiaru	<i>HBW</i>	Średnica kulki, mm	Wielkość obciążenia, N	Nominalny czas działania obciążenia, s
1	151,5	2,5	1839,3	12
2	150,4			
3	148,4			
4	150,7			
5	153,0			
6	151,6			
Śred.	150,9			

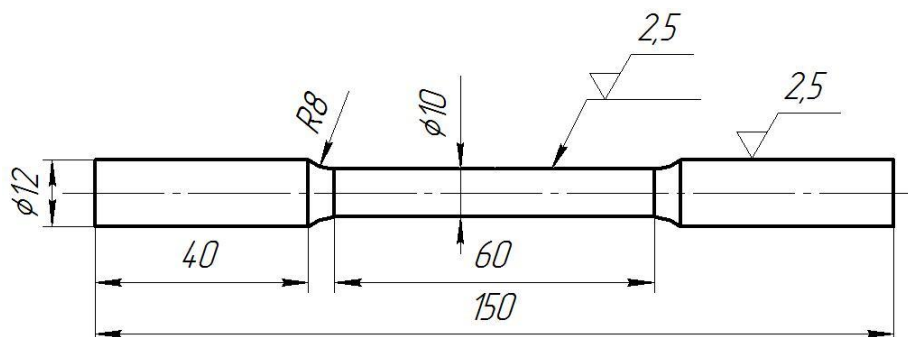
Otrzymane wyniki pomiaru twardości stali mieszczą się w zakresie normy [5] – *HB* > 120.

3.6. Badania wytrzymałości stali na rozciąganie

Statyczną próbę rozciągania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100, zgodnie z wytycznymi normy [90]. Próbki do badań (rys. 3.11) zostały wycięte równoległe do kierunku walcowania (zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3.5) z tej części blachy, która nie zawierała skupisk wtrąceń niemetalicznych (nieciągłości).

Właściwości mechaniczne badanej stali podano w tabeli 3.5. Dla porównania w tabeli 3.6. podano również dane literaturowe dotyczące właściwości niskowęglowej stali St3 zgodnie z normą [5].

Wykresy naprężenie-odkształcenie dla wszystkich próbek przedstawiono na rys. 3.12.



Rys. 3.11. Rysunek próbki do badania wytrzymałości stali na rozciąganie

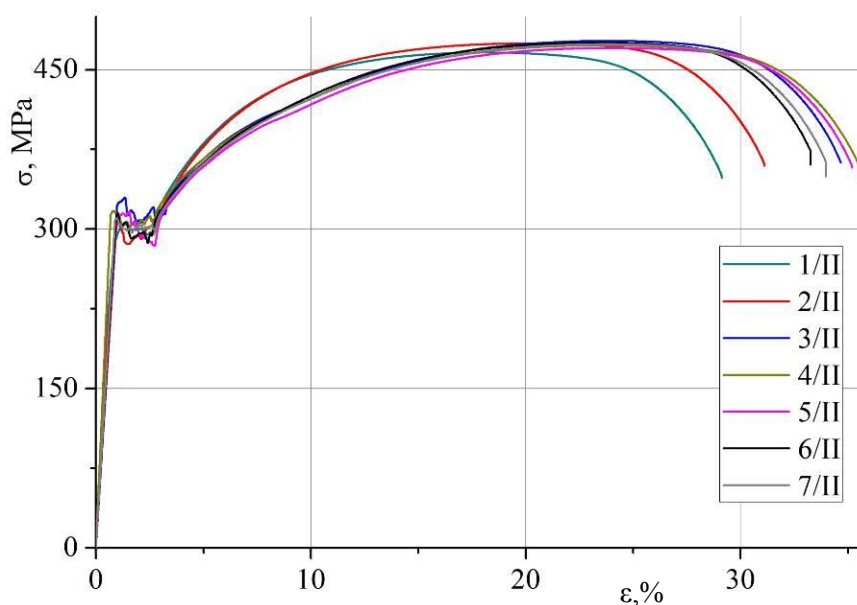
Tabela 3.5. Właściwości mechaniczne badanej stali

Oznaczenie próbki	Parametr			
	R_m , MPa	R_e , MPa	A_5 , %	Z , %
1/II	466	307	29,2	37
2/II	475	310	31,1	34
3/II	477	328	34,6	
4/II	473	317	35,2	
5/II	470	316	35,6	
6/II	475	315	33,2	
7/II	474	310	34,0	
Śred.	473	315	33,3	

Tabela 3.6. Literaturowe właściwości mechaniczne stali gatunku St3 (zgodnie z [5])

Gatunek stali	R_m , MPa	R_e , MPa	A , %
Stal St3S	375÷460	215÷235*	23÷26
Stal St3M	370÷470	min 240	min 25

*W zależności od grubości blachy



Rys. 3.12. Wykresy rozciągania stali wycinka z płaszcza zbiornika magazynowego

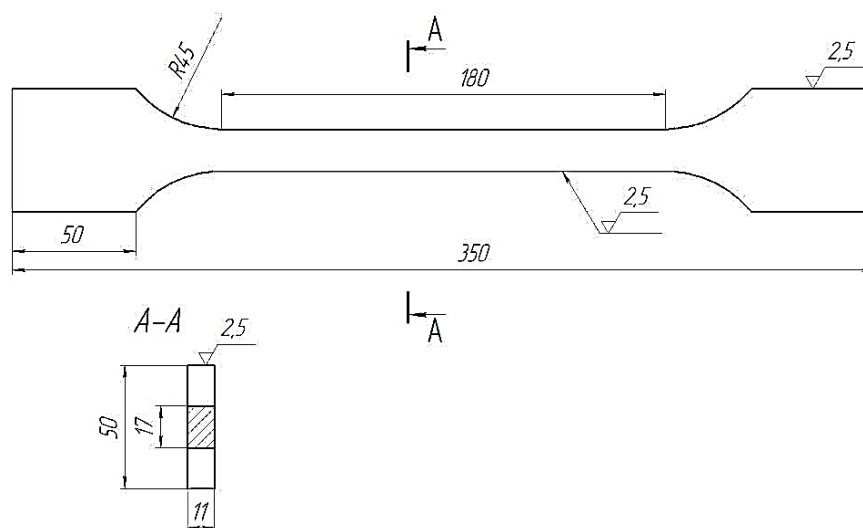
Analiza wyników badań statycznej próby rozciągania w temperaturze otoczenia wykazała, że z wyjątkiem wytrzymałości stali R_m pozostałe parametry mieszczą się w zakresie wartości wymaganych normą [5] (tabela 3.5. i tabela 3.6).

Dla porównania wyników przeprowadzono także w punkcie 3.7. niniejszej dysertacji badania właściwości stali metodą AE.

3.7. Badania wytrzymałości stali na rozciąganie z zastosowaniem metody emisji akustycznej

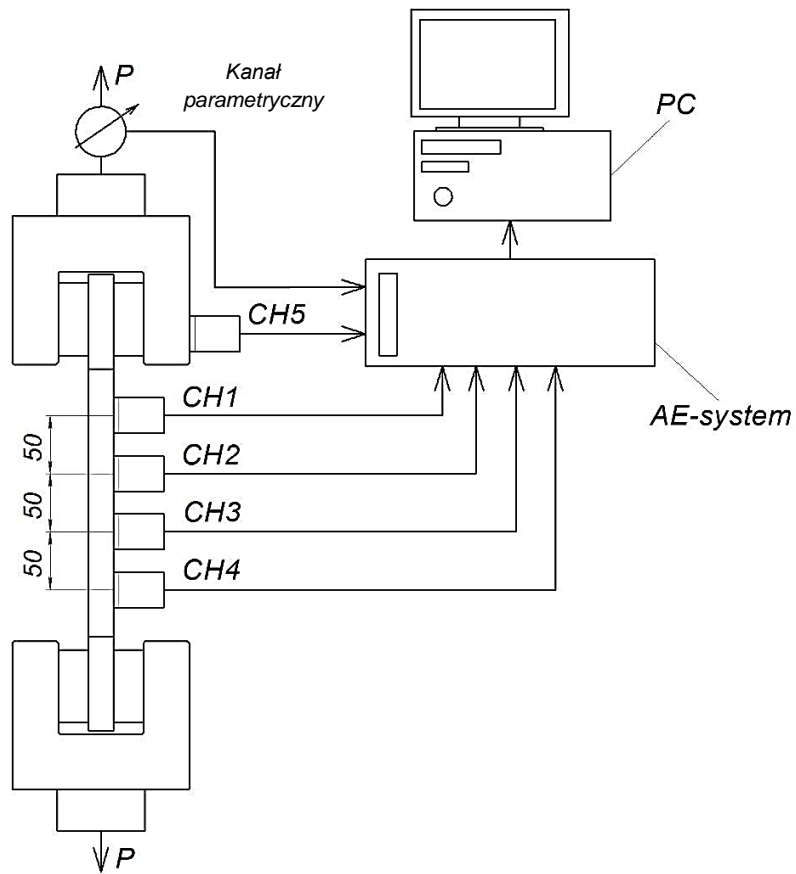
Metodyka przeprowadzenia badań. Badania statycznej próby rozciągania z rejestracją AE wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 z uchwytami hydraulicznymi. Zastosowanie takich uchwytów istotnie obniża poziom zakłóceń generowanych w strefie mocowania próbki w trakcie próby i pomiarów AE. Do rejestracji AE użyto systemu pomiarowego AMSY-6 oraz rezonansowych czujników typu VS 150-RIC z wbudowanym przedwzmacniaczem (częstotliwość rezonansowa 150 kHz, wzmacnienie 34 dB) – aparatura firmy Vallen Systeme GmbH.

Badania przeprowadzono na płaskich próbkach wyciętych z różnych miejsc: 1 – wyciętych z materiału, który zawierał likwacje wtrąceń niemetalicznych, oraz 2 – materiału, który zawierał znacznie mniejszą ilość takich wtrąceń. Na rys. 3.13. przedstawiono rysunek techniczny próbki do badań w statycznej próbie rozciągania z zastosowaniem metody AE, a na rys. 3.14. i rys. 3.15. –schemat stanowiska badawczego oraz widok próbki zamontowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej z czujnikami AE.

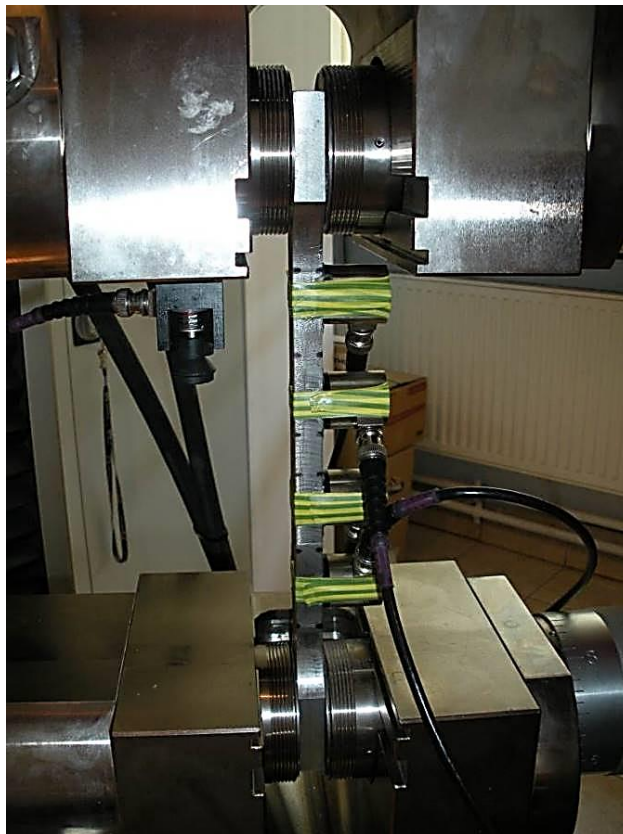


Rys 3.13. Rysunek próbki do statycznej próby rozciągania stali z zastosowaniem metody AE

Zgodnie ze schematem (rys. 3.14) na każdej badanej próbce montowano cztery czujniki przeznaczone do rejestracji AE bezpośrednio ze strefy zniszczenia. W celu wykrycia i eliminacji zakłóceń pochodzących z pracy maszyny na uchwytach hydraulicznych montowano dodatkowo czujniki. Dla rejestracji siły oraz drogi w systemie AE AMSY-6 użyto kanałów parametrycznych połączonych z wyjściowymi kanałami parametrycznymi maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100. Przed każdym badaniem przeprowadzano kalibrację kanałów pomiarowych AE za pomocą źródła Hsu-Nielsena 2H/0,5 mm zgodnie z [40, 91].



Rys 3.14. Schemat stanowiska badawczego z rejestracją AE



Rys 3.15. Widok próbki zamontowanej na maszynie wytrzymałościowej z czujnikami AE

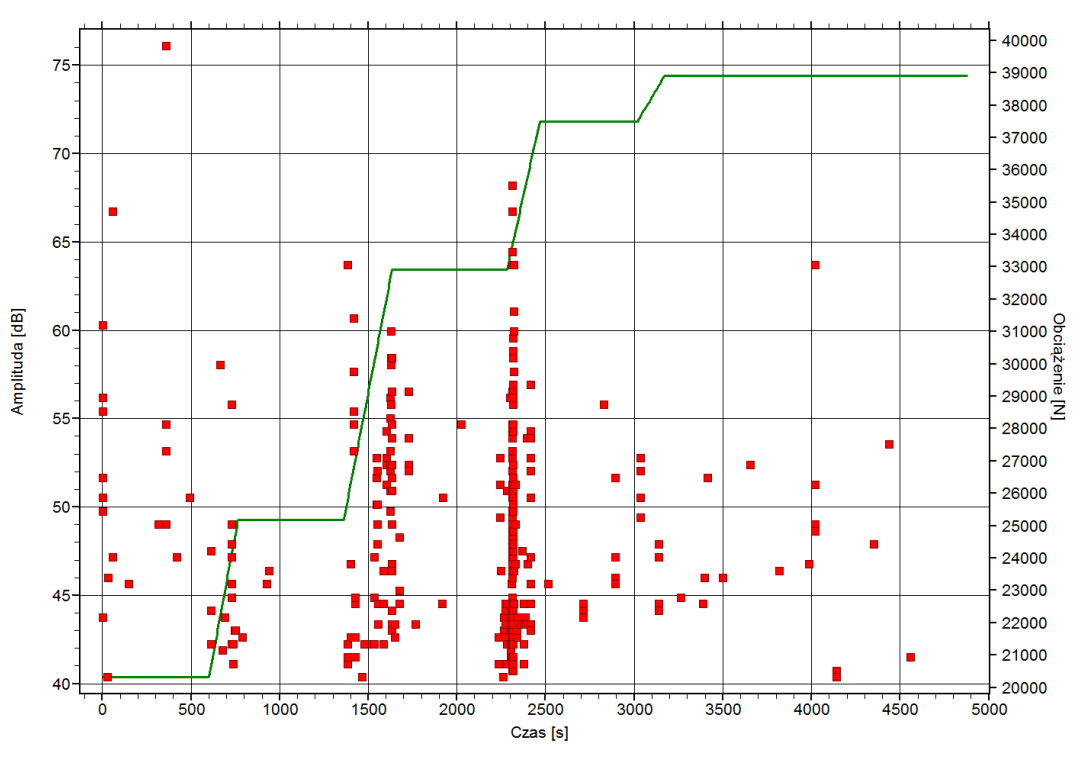
Analiza wyników badań. W pierwszym etapie badań z wykorzystaniem metody AE próbki poddawano obciążaniu wg. schematu i obciążeń odpowiadającym tym jakim był poddawany materiał płaszcz zbiornika w czasie próby ciśnieniowej z pomiarem AE. Na rysunkach 3.16. i 3.17. przedstawiono wykresy AE dla całej próby, na których pokazano również wartość obciążenia w celu lepszej wizualizacji wyników.

Wykresy przedstawiają amplitudy oraz aktywność AE w funkcji czasu. W trakcie badań stwierdzono, że maksymalna zarejestrowana amplituda sygnałów dla próbek obu typów (rys. 3.16 *a* i 3.17 *a*) nie przekraczała 75dB i były to pojedyncze sygnały zarejestrowane w czasie przyrostu obciążenia. Aktywność emisyjna dla obu typów próbek była na porównywalnym poziomie, co potwierdza brak wpływu występujących defektów na generowanie AE w warunkach obciążenia blach płaszcz zbiornika podczas jego napełnienia do maksymalnego poziomu (próby ciśnieniowej z pomiarem AE). Przedstawione wyniki potwierdzają fakt braku sygnałów AE generowanych z defektów (wykrytych metodami ultradźwiękową oraz metalograficzną) w materiale płaszcz zbiornika magazynowego o pojemności $V = 10000 \text{ m}^3$ podczas jego wcześniejszego badania metodą AE.

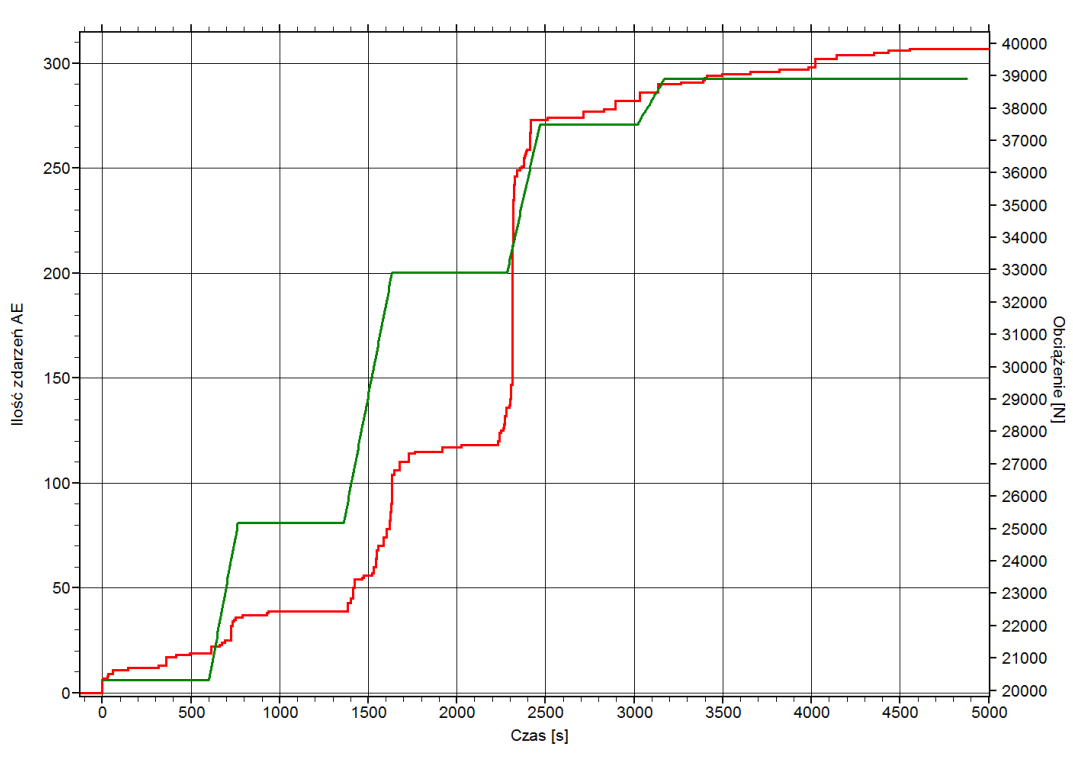
Na kolejnych rysunkach 3.18. i 3.19. pokazano wykresy w takim samym układzie, ale przedstawiające sygnały AE zarejestrowane tylko w czasie wytrzymań obciążenia. W tym przypadku nie stwierdzono również istotnych różnic w odpowiedzi materiału poszczególnych typów próbek na obciążenie oraz w rejestrowanej AE.

Następnym etapem badań było obciążanie próbek w taki sposób, aby doprowadzić do wartości obciążenia, przy którym w materiale ujawnią się źródła AE generowane przez występujące uszkodzenia. Próbki obciążano aż do zniszczenia, aby sprawdzić jak występujące uszkodzenia wpływają na wytrzymałość materiału. Na rysunkach 3.20. i 3.21. przedstawiono wykresy wartości amplitud sygnałów AE oraz aktywności AE dla poszczególnych typów próbek. Wszystkie wykresy przedstawiają tylko wytrzymań obciążenia i nie uwzględniają ostatniego etapu obciążania próbek aż do zniszczenia.

Na wykresach amplitud widać wyraźną różnicę wartości rejestrowanych sygnałów dla próbek zawierających defekty (rys. 3.20 *a*) oraz próbki bez nich (rys. 3.21 *a*). Dla tej ostatniej amplitudy rejestrowanych sygnałów nie przekraczały poziomu 60dB, a dla próbek z uszkodzeniami rejestrowano amplitudy powyżej 70dB. Również aktywność emisyjna dla próbek pierwszego typu była dużo większa co jest widoczne na wykresach ilości zdarzeń AE (hits) na sekundę (rys. 3.20 *b*).

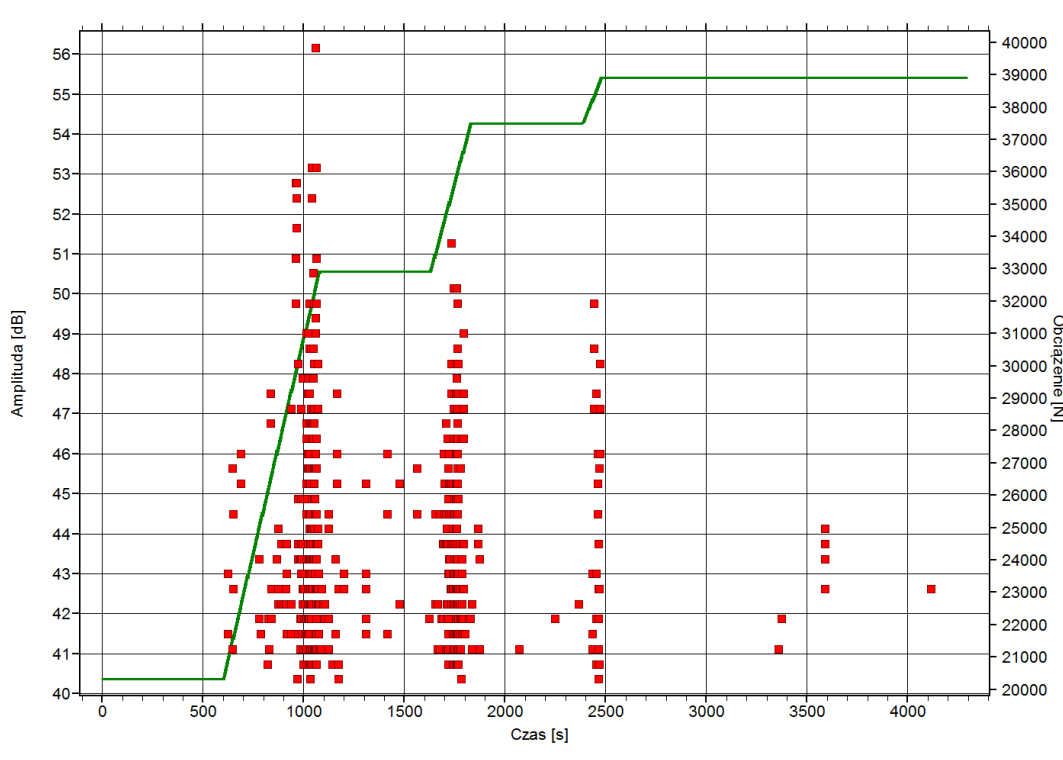


a

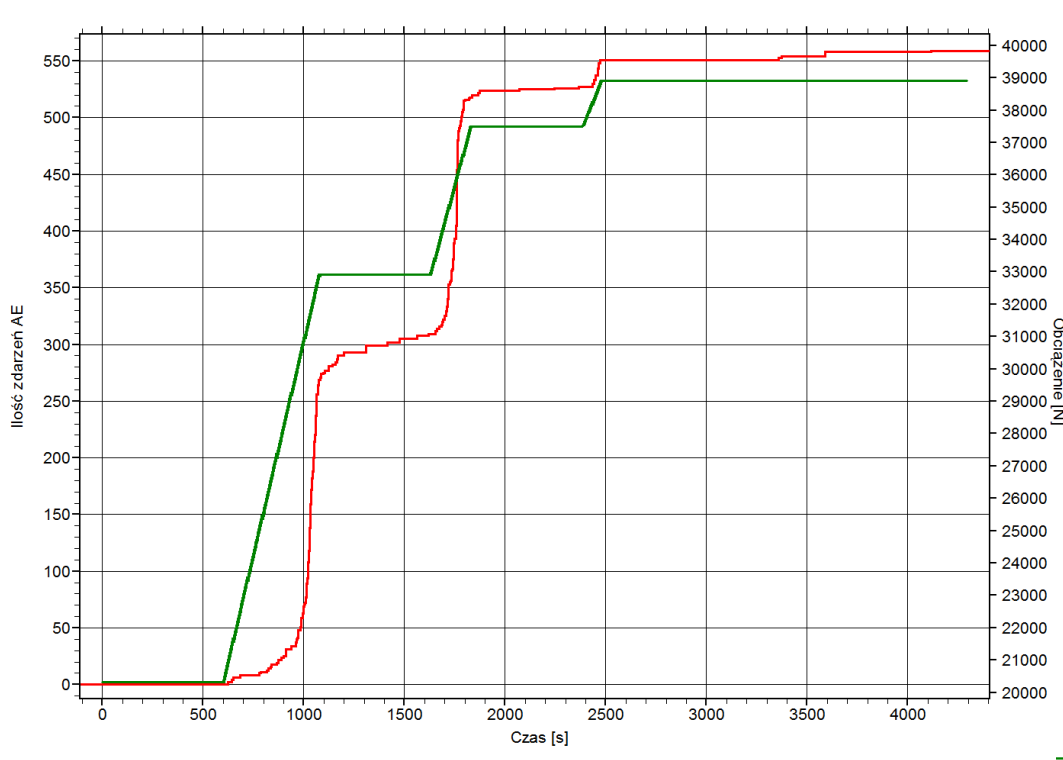


b

Rys. 3.16. Wartości amplitud (*a*) oraz aktywność emisyjna (*b*) sygnałów rejestrowanych w czasie całej próby obciążeniowej próbki zawierającej likwacji wtrąceń niemetalicznych oznaczonej 1/I

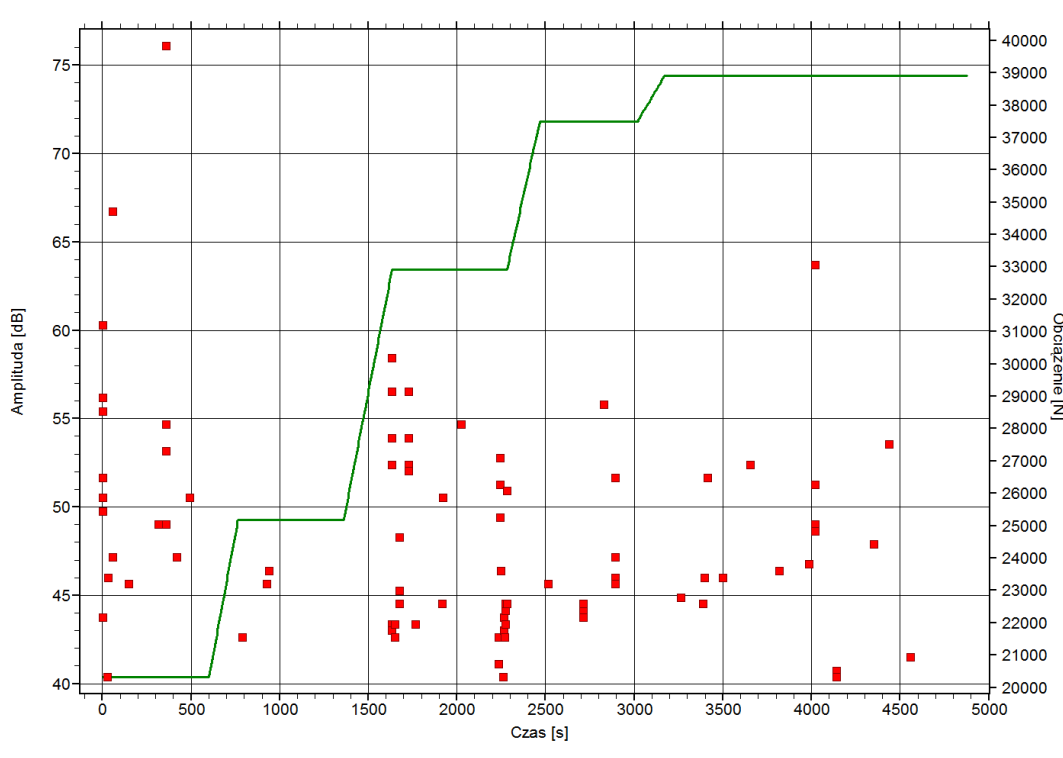


a

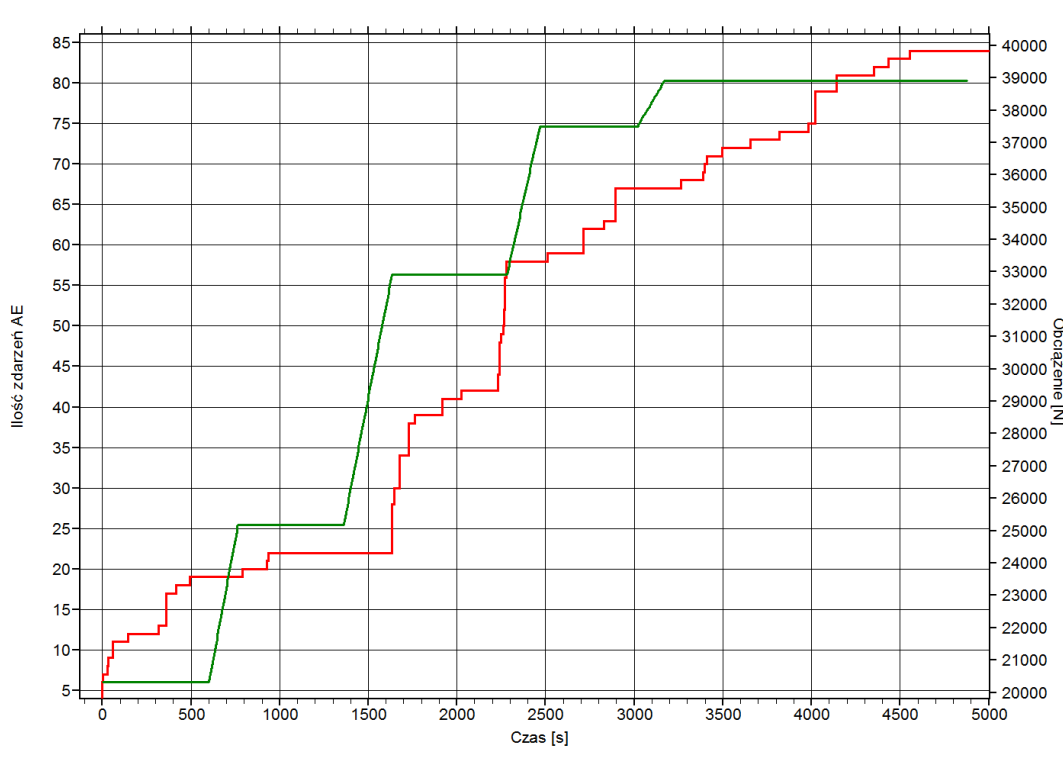


b

Rys. 3.17. Wartości amplitud (*a*) oraz aktywność emisyjna (*b*) sygnałów rejestrowanych w czasie całej próby obciążeniowej próbki bez istotnych defektów oznaczonej 3/I

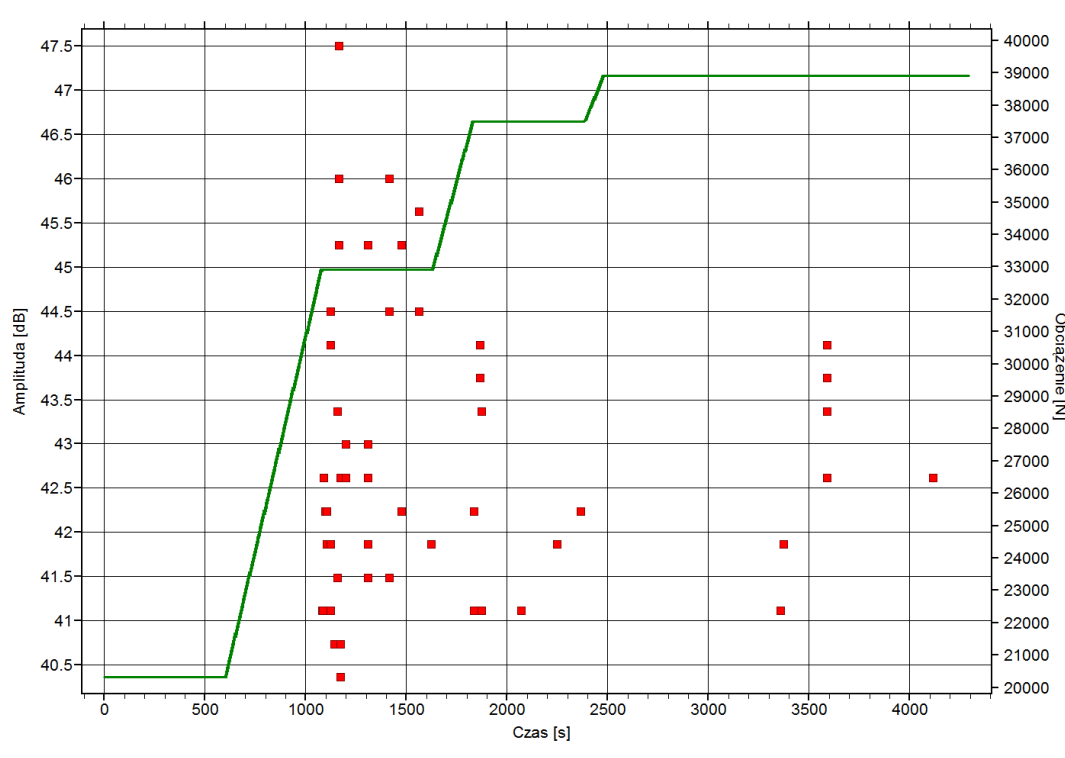


a

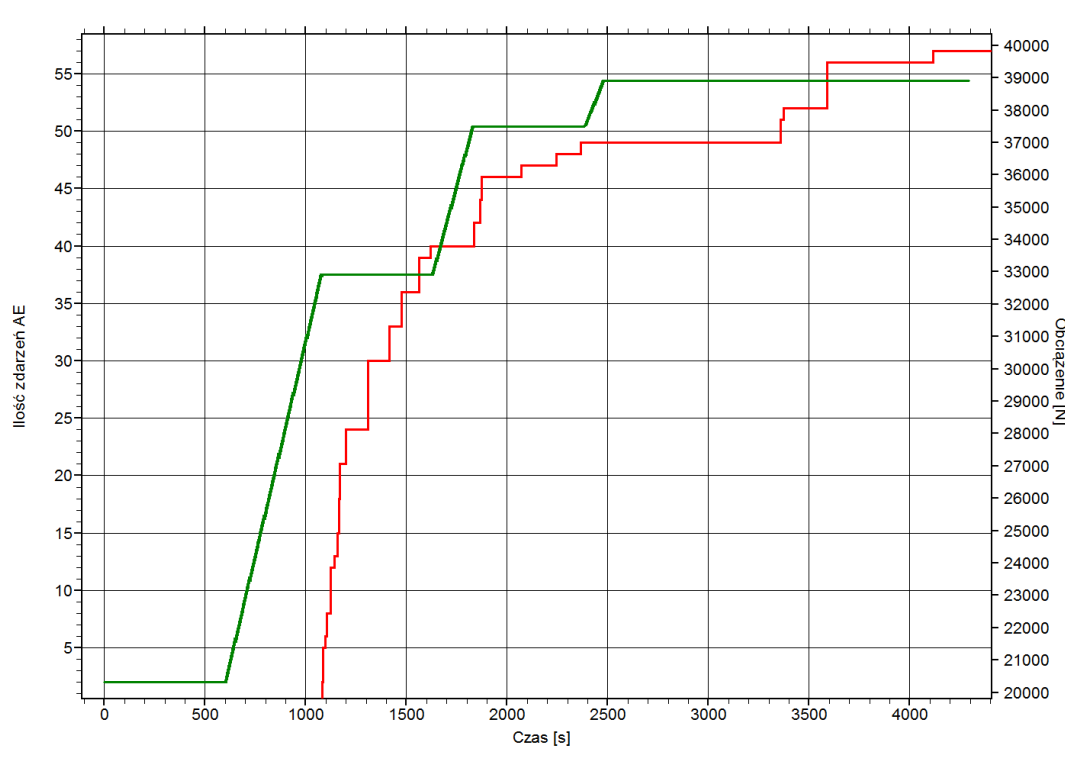


b

Rys. 3.18. Wartości amplitud (*a*) oraz aktywność emisyjna (*b*) sygnałów rejestrowanych w czasie stałego obciążenia próbki ze skupiskami wtrąceń niemetalicznych oznaczonej 1/I

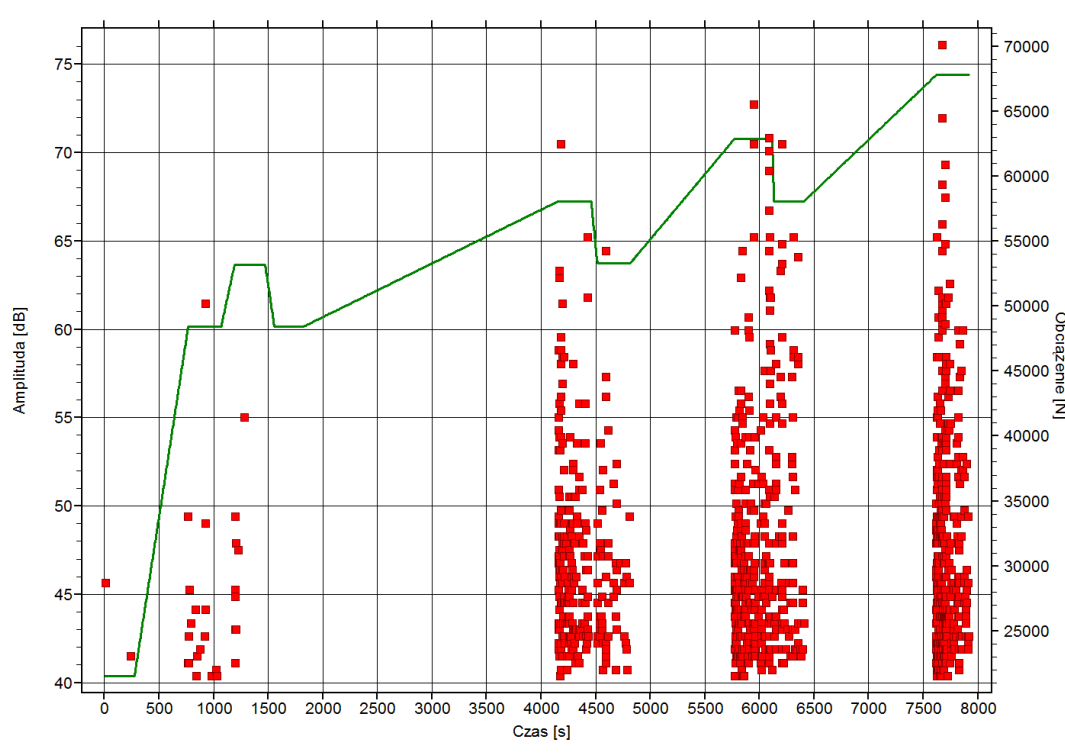


a

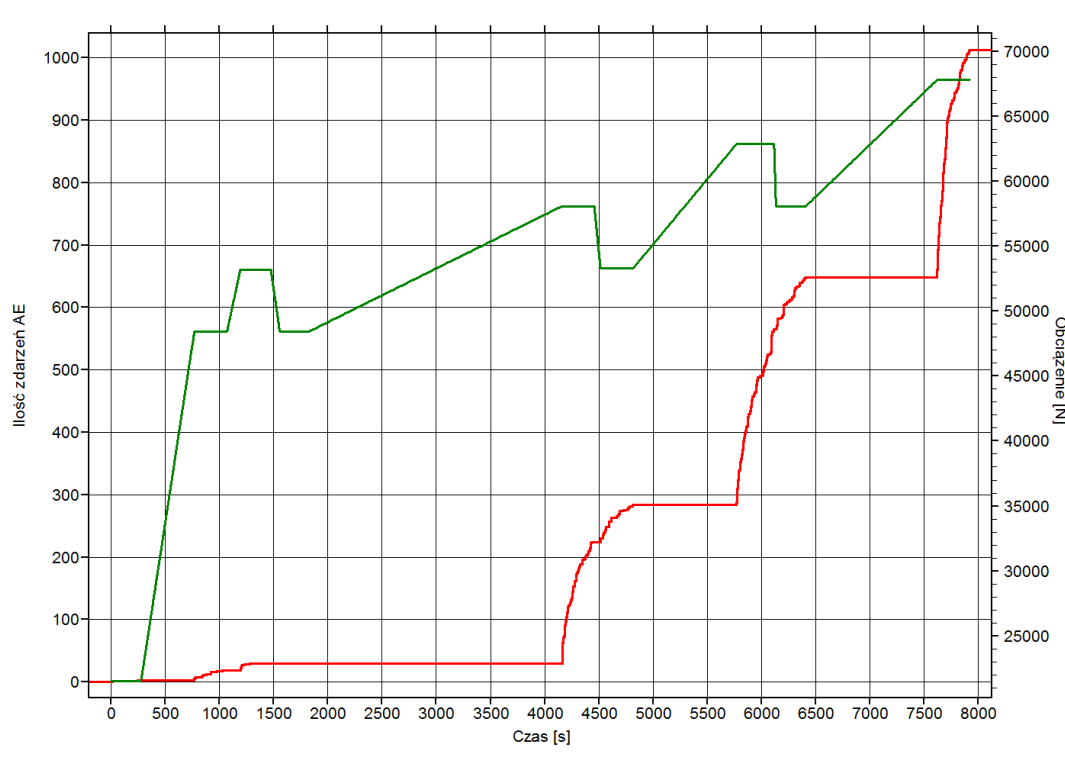


b

Rys 3.19. Wartości amplitud (*a*) oraz aktywność emisyjna sygnałów (*b*) rejestrowanych w czasie stałego obciążenia próbki bez istotnych defektów oznaczonej 3/I

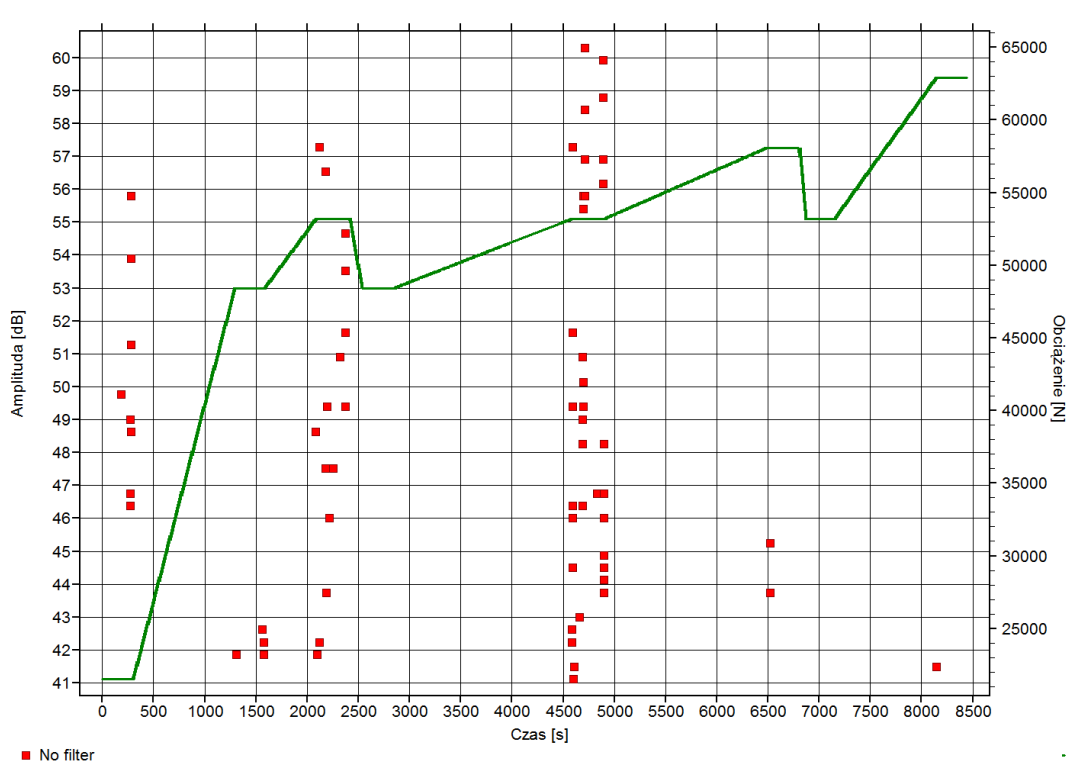


a

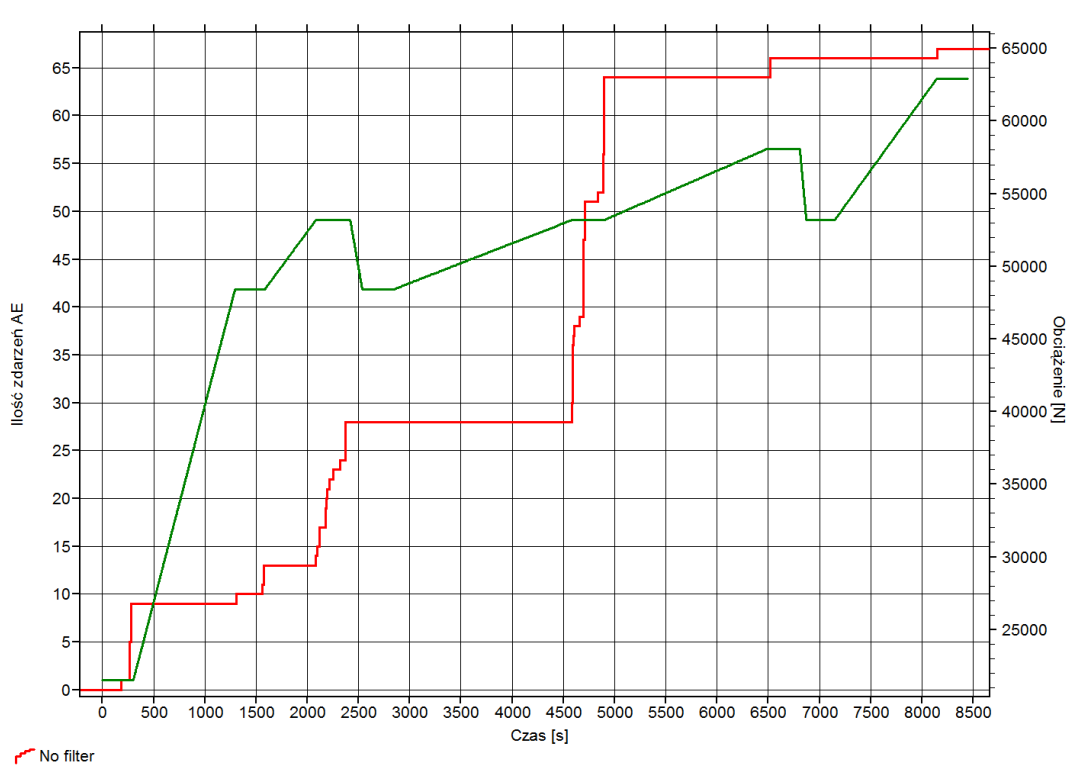


b

Rys. 3.20. Wartości amplitud (*a*) oraz aktywność i ilość sygnałów AE (*b*) rejestrowanych w czasie stałego obciążenia próbki oznaczonej 2/I, zawierającej likwacje wtrąceń niemetalicznych



a

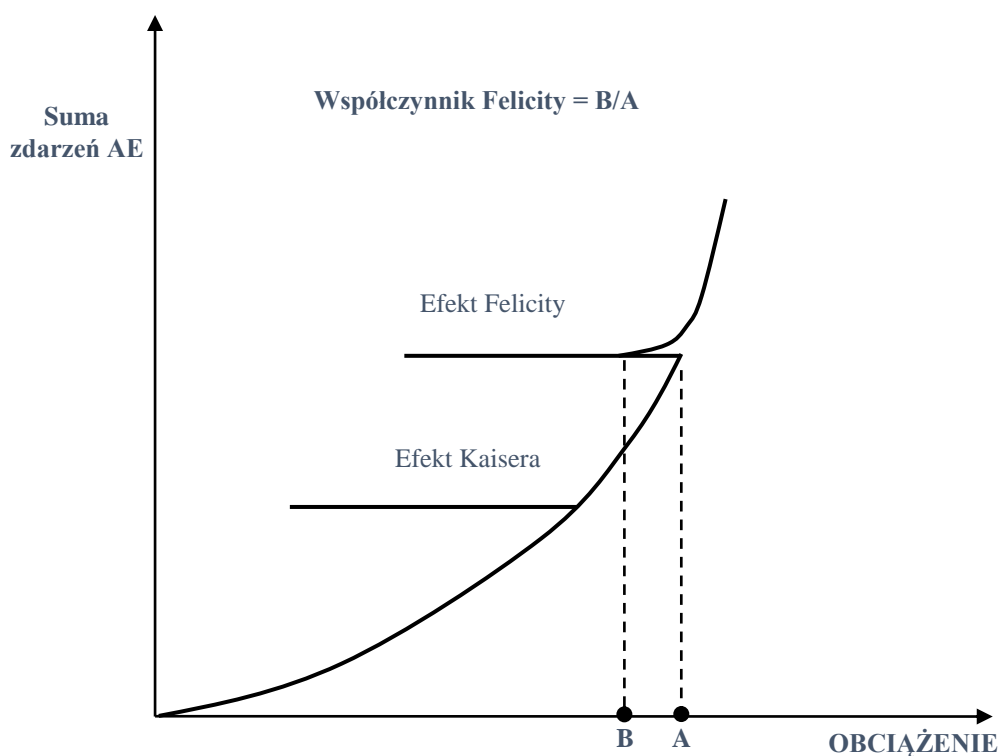


b

Rys. 3.21. Wartości amplitud oraz aktywność i ilość sygnałów AE rejestrowanych w czasie stałego obciążenia próbki oznaczonej 3/I, bez istotnych uszkodzeń

Warto zaznaczyć, że na początkowych etapach rozciągania próbek, zawierających segregacje wtrąceń niemetalicznych, obserwujemy brak sygnałów AE podczas odciążania i odciążania przykładowo próbki nr 2/I z 53 kN do poziomu 48 kN (rys. 3.20), co jest znane w literaturze jako efekt Kaisera [92, 93]. Efekt ten polega na braku aktywności emisji akustycznej przy wartości naprężenia mniejszej od maksymalnej wartości uprzednio przyłożonego („zapamiętanego”) naprężenia.

Natomiast na późniejszych etapach rozciągania próbek z wtrąceniami niemetalicznymi ma miejsce generowanie sygnałów AE podczas odciążania (próbki nr 2/I) z 58 kN do poziomu 53 kN oraz z 63 kN do 58 kN (rys. 3.20). W tym przypadku mamy do czynienia z efektem Felicity [92], gdzie w przeciwieństwie do efektu Kaisera, podczas powtórnego obciążania, aktywność emisji akustycznej pojawia się przy niższej wartości obciążenia niż maksymalne obciążenie w poprzednim cyklu obciążania. Opisuje (definiuje) go współczynnik Felicity, który jest stosunkiem obciążenia w cyklu wtórnym, przy którym rozpoczyna się emisja akustyczna do maksymalnego obciążenia w cyklu poprzednim. Wartość współczynnika podawana jest w procentach ($0 \div 100\%$) lub w przedziale $0 \div 1$ (rys. 3.22).

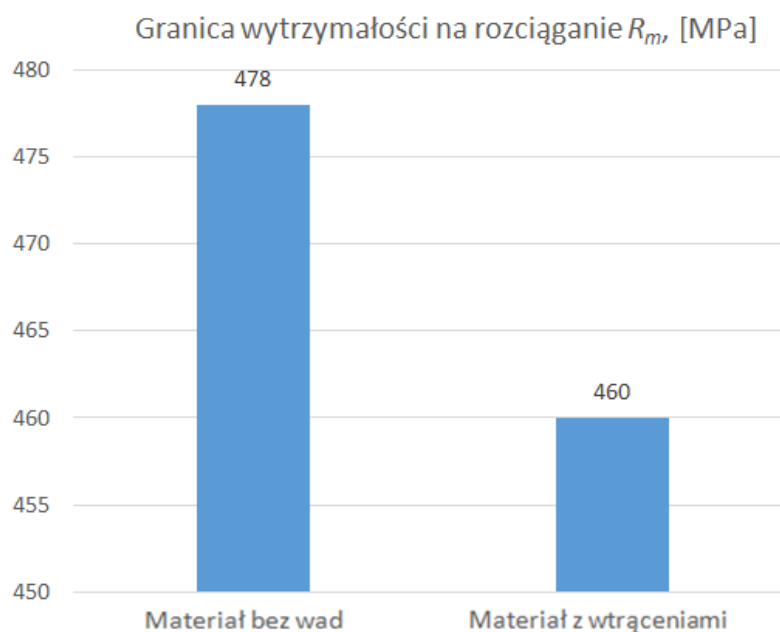


Rys. 3.22. Generowanie AE podczas powtórnego obciążania próbki (efekty Kaisera i Felicity)

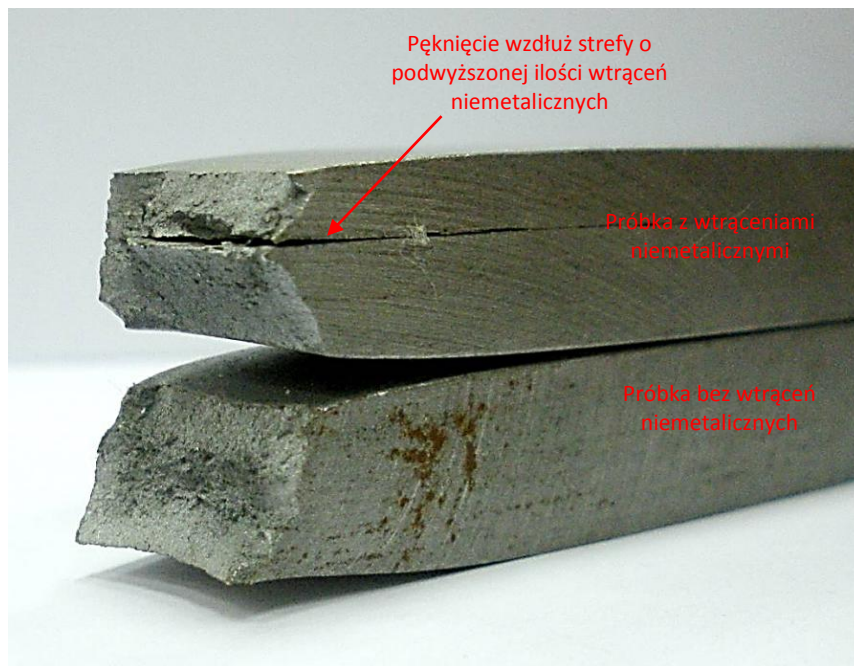
Oba wymienione wyżej efekty informują o tym czy ma miejsce rozwój wady (uszkodzenia) oraz jak dynamicznie przebiegają procesy destrukcji materiału. Jeśli występuje efekt Kaisera lub współczynnik Felicity jest większy od $>95\%$ ($>0,95$), to mamy do czynienia z brakiem rozwoju uszkodzeń w obciążanym obiekcie. Natomiast, jeśli wartość współczynnika Felicity jest poniżej $<95\%$ ($<0,9$), to jest to informacja o aktywnym rozwoju uszkodzeń w obciążanym obiekcie. Im ten współczynnik jest mniejszy, tym dynamika rozwoju uszkodzenia jest większa (rozwój uszkodzenia od stabilnego, poprzez niestabilne i podkrytyczne, aż do krytycznego).

Otrzymane wyniki z badań z wykorzystaniem metody AE wykazały większą aktywność AE na próbkach z występującymi uszkodzeniami typu rozwalcowanych segregacji wtrąceń niemetalicznych, jednak należy zaznaczyć że poziom obciążeń przy których jest to zauważalne, znacznie przewyższa wartości obciążeń jakim poddawany jest materiał płaszcza zbiornika w trakcie jego eksploatacji.

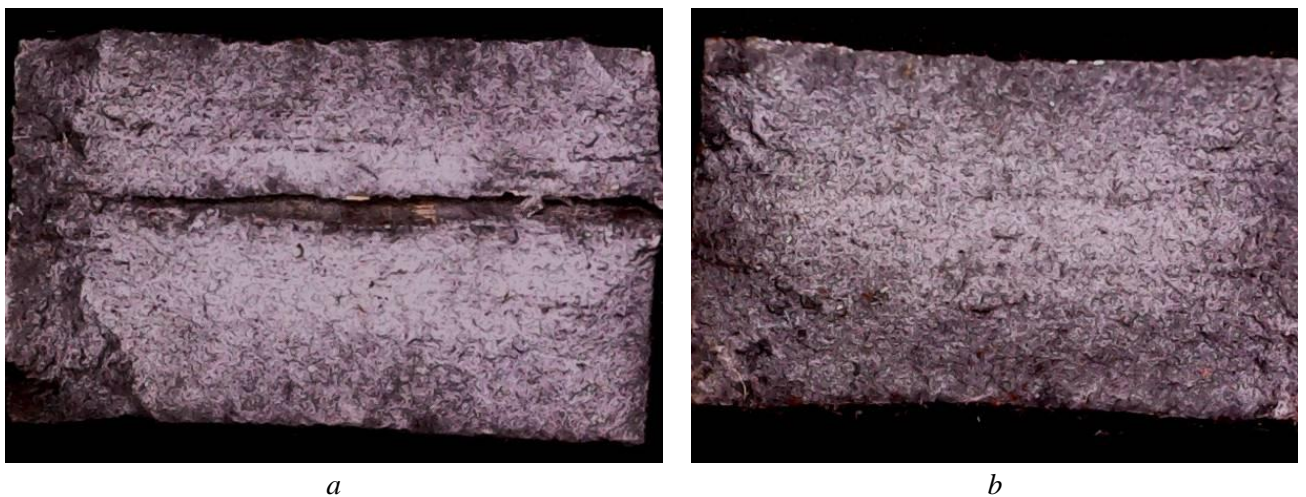
Obciążanie próbek do zniszczenia pozwoliło na określenie wytrzymałości próbek obu typów. Wartości te odpowiednio wyniosły $R_m = 460$ MPa dla materiału z uszkodzeniami oraz $R_m = 478$ MPa dla materiału bez defektów, co daje obniżenie wartości wytrzymałości o około 4% (rys. 3.23). Na rysunkach 3.24. i 3.25. przedstawiono makrofotografię przełomów próbek obu typów na których wyraźnie widać pęknięcia propagujące wzdłuż warstw zawierających wtrącenia niemetaliczne.



Rys. 3.23. Porównanie granicy wytrzymałości na rozciąganie materiału blach zawierającego wtrącenia niemetaliczne oraz materiału bez wad



Rys 3.24. Widok przełamów próbek po zerwaniu: górna – zawierająca warstwowe likwacji wtrąceń niemetalicznych, dolna – bez istotnych uszkodzeń



Rys. 3.25. Faktograficzne zdjęcia przełamów próbek: *a* – zawierających warstwowe likwacji wtrąceń niemetalicznych, *b* – bez istotnych uszkodzeń, powiększenie 10×

PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 3

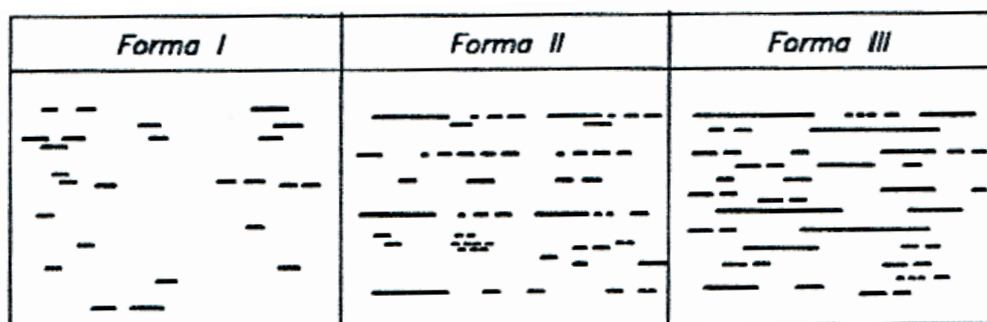
1. W wyniku przeprowadzonych badań metalograficznych oraz składu chemicznego stwierdzono, że pobrany wycinek blachy płaszcza zbiornika magazynowego w badanych punktach wykazuje strukturę ferrytyczno-perlityczną, która jest typowa dla stali gatunku St3S. W niektórych strefach stwierdzono również występowanie lokalnych segregacji wtrąceń niemetalicznych krzemianów oraz siarczków o wydłużonym kształcie wzdłuż kierunku walcowania, które w trakcie wcześniejszych badań nieniszczących były identyfikowane jako nieciągłości materiału.
2. Badania właściwości mechanicznych, takich jak udarność w temperaturze otoczenia i temperaturach obniżonych, twardość, wytrzymałość na rozciąganie wykazały, że wszystkie własności stali St3S wycinka z płaszcza zbiornika magazynowego mieszczą się w zakresie wartości wymaganych normą dla tej stali.
3. Statyczna próba rozciągania płaskich próbek z rejestracją sygnałów AE nie wykazała wyraźnych różnic w aktywności emisji akustycznej dla próbek z wtrąceniami i bez nich w przypadku obciążania materiału do wartości równej wartości obciążenia w czasie badania zbiornika. Natomiast wykryto wyraźny wpływ uszkodzeń na rejestrowane sygnały AE w czasie obciążania materiału powyżej wartości obciążeń eksploatacyjnych zbiornika.
4. Stwierdzono, że występowanie pasm segregacji wtrąceń zorientowanych równolegle do kierunku obciążania ścianki zbiornika ma niewielki wpływ na jego eksploatację w zakresie obciążeń eksploatacyjnych.

ROZDZIAŁ 4

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA WALCOWYCH ZBIORNIKÓW STALOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WAD- BLACH PŁASZCZA

4.1. Skrótowy zarys mechanizmu powstawania rozwarstwień w wyrobach walcowanych

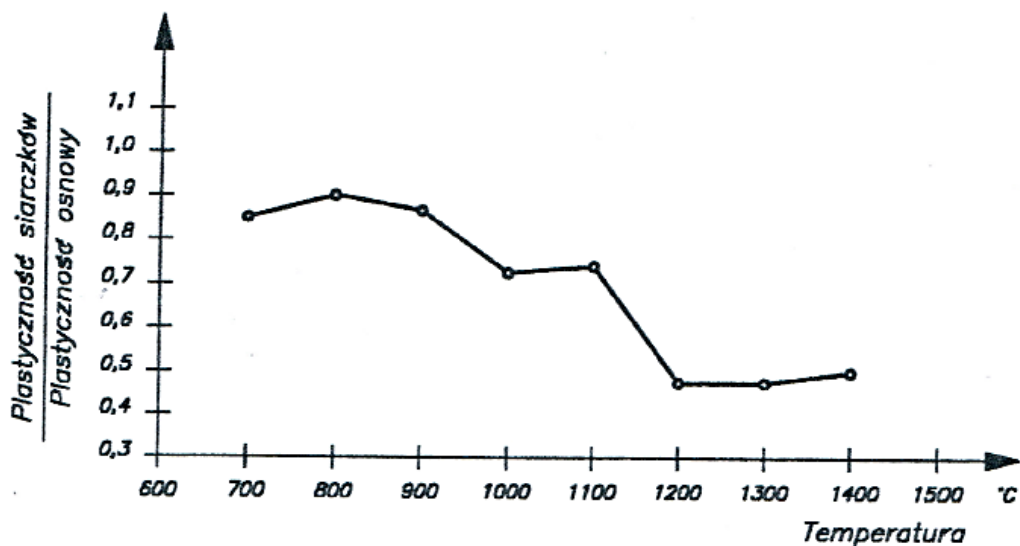
Rozwarstwieniem nazywa się pęknięcie wyrobu stalowego w płaszczyźnie w przybliżeniu równoległej do powierzchni blachy lub ścianki względnie stopki kształtownika. Rozwarstwienia występują w wyrobach ze stali nie w pełni uspokojonych i są wadą hutniczą związaną z istnieniem wtrąceń niemetalicznych, głównie siarczków magnezu, które występują najczęściej w trzech formach (np. 4.1):



Rys. 4.1. Rozmieszczenie wtrąceń siarczków w przekroju pionowym blachy [95]

- I – najmniej niebezpieczna, obejmująca drobne, najczęściej punktowe wtrącenia rozproszone wzdłuż pasm walcowania w strukturze materiału;
- II – obejmuje niełączące się ze sobą wtrącenia liniowe o nieznacznej długości oraz drobne skupiska wtrąceń małych wymiarów, zalegających wzdłuż pasm walcowania;
- III – najbardziej niebezpieczna, obejmuje wtrącenia znacznej długości, tworzące ciągłe bariery między pasmami walcowania, przy czym często bariery przebiegają w niewielkich od siebie odległościach.

Siarczki są mniej odkształcalne niż osnowa metaliczna (rys. 4.2) i ze wzrostem temperatury różnica plastyczności siarczków i osnowy rośnie. [94]



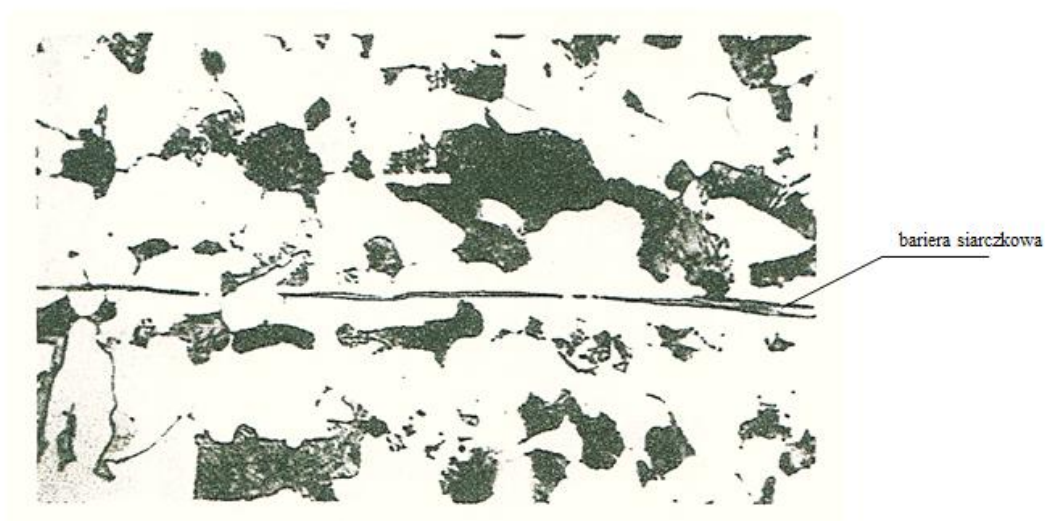
Rys. 4.2. Plastyczność siarczków i osnowy metalicznej przy zmieniającej się temperaturze walcowania blachy [94]

Odkształcalność siarczków w stali zwiększa się wraz ze spadkiem temperatury walcowania więc przy niskich temperaturach walcowania powstają w stali wydłużone „bariery siarczkowe” (rys. 4.3). Spójność siarczków z osnową metaliczną jest pomijalnie mała, ponadto mają one większy niż osnowa współczynnik skurczu cieplnego. Dlatego już w procesie stygnięcia blach po walcowaniu wtrącenia siarczkowe mogą odspajać się od osnowy i powstają wokół nich wewnętrzne mikrokawerny w materiale.

Proces tworzenia się kawern wokół siarczków manganu może zachodzić również pod wpływem:

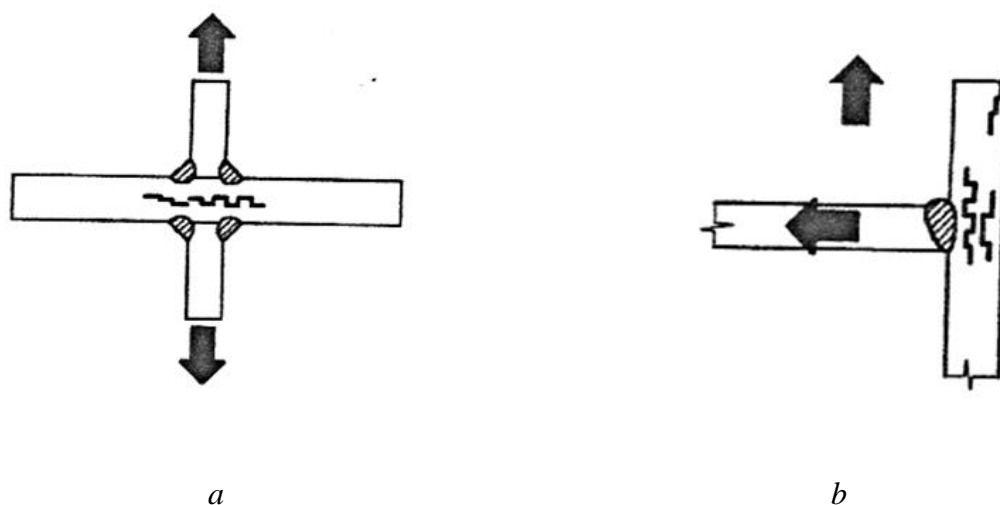
- sił skurczu wywołanych np. przez sąsiadujące z wtrąceniami złącza spawane,
- obciążeń eksploatacyjnych położonych prostopadle do powierzchni walcowania blachy.

Jeżeli są to obciążenia udarowe lub zmęczeniowe to należy liczyć się z szybkim wzrostem wymiarów kawern, które zmieniają się w wewnętrzne eliptyczne ogniska zmęczeniowe.



Rys. 4.3. Siarczki zawalcowane w połowie grubości blachy utworzyły tzw. barierę siarczkową- linia ciągła w połowie grubości próbki

Przebieg pęknięć rozwarstwiających zależy od usytuowania względem siebie poszczególnych wtrąceń siarczkowych. Mają one tendencję do gromadzenia się w pasmach, sprzyja to szybkiemu łączeniu się poszczególnych kawern w większe obszary wewnętrznych rozwarstwień. Znaczny ich wymiar liniowy i łatwość odpajania się od osnowy metalicznej wytwarza w blasze ostre koncentratory naprężeń w postaci kawern. Jeżeli wtrącenia niemetaliczne usytuowane są w płaszczyznach równoległych niezbyt od siebie oddalonych to powstaje charakterystyczne pęknięcie tarasowe wynikające z łączenia pionowego lub skośnego krótkich kawern sąsiadujących ze sobą. Rozwarstwienia najczęściej występują w krzyżowych lub teowych węzłach konstrukcji (rys. 4.4)



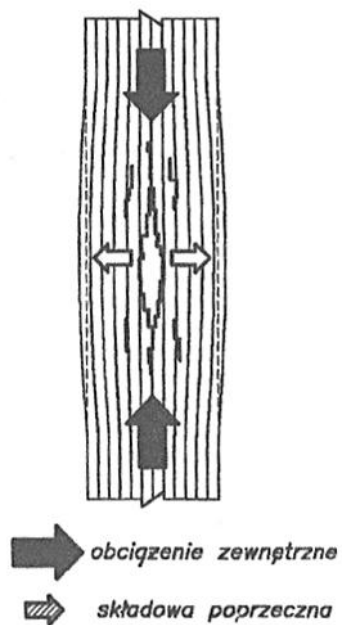
Rys. 4.4. Rozwarstwienia powstałe w wyniku pionowego lub ukośnego połączenia się siarczków zalegających w zbliżonych do siebie płaszczyznach



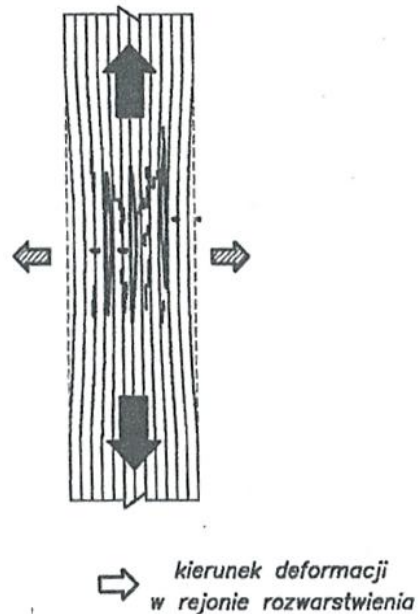
Mogą jednak wystąpić także w elemencie usytuowanym wzdłuż kierunku działania obciążenia (rys. 4.5., np. w blachach płaszcza zbiornika walcowego pionowego rozciąganych parciem hydrostatycznym magazynowanej cieczy)

W elementach ściskanych pęknięcie rozwarstwiający się w wyniku działania składowej poprzecznej obciążenia (rys. 4.5. a). Podobnie jest w elemencie rozciągany, w którym mało plastyczne siarczki blokują odkształcenia poprzeczne (przewężenie), w środku elementu wytwarza się strefa mało odkształcalna poprzecznie, wywołuje to w skrajnych włóknach rozciąganie skierowane prostopadle do kierunku działania obciążenia głównego (rys. 4.5. b 4.5. c). Pęknięcia rozwarstwiający mogą występować bezpośrednio po pierwszym obciążeniu konstrukcji lub po zadziałaniu skurczu spawalniczego w wyniku zespawania elementów. Mogą również rozwijać się stopniowo, np. pod wpływem cyklicznych obciążeń- wówczas rozwarstwienie ujawnia się kilku lub kilkunastu latach eksploatacji. Rozwarstwienia występują najczęściej w połowie grubości blachy, niekiedy jednak rozpoczynają się w połowie grubości blachy i przebiegają ukośnie aż do zewnętrznej jej powierzchni. Takie rozwarstwienia nazywane są „wyklinowującymi się”.

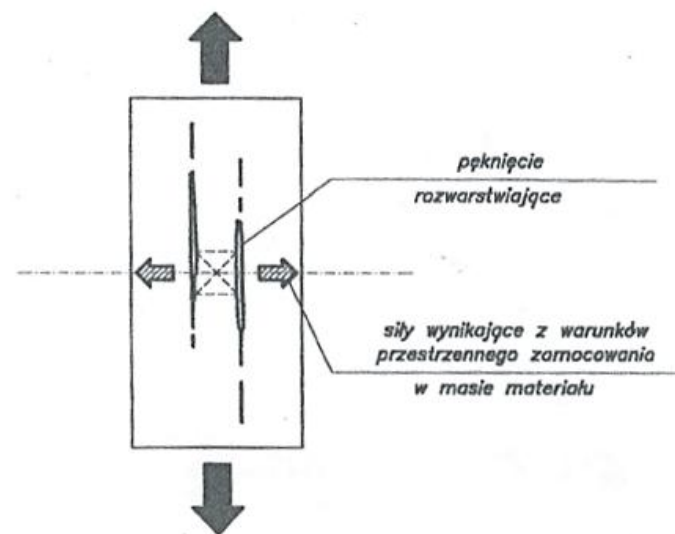
a) ściskanie



b) rozciąganie



c)



Rys. 4.5. Mechanizm powstawania rozwarstwień w elementach usytuowanych wzdłuż kierunku działania obciążeń:
a) element ściskany, *b* oraz *c* element rozciągany. [94]

4.2. Analiza numeryczna MES pola naprężeń w płaszczu zbiornika magazynowego z wadą typu rozwarstwienie

4.2.1. Zakres i cel obliczeń MES

Rozwarstwienia blach stalowych w konstrukcjach okrętów omówiono obszernie w pracy Rosochowicza [94] i to zarówno w aspekcie teoretycznym, metaloznawczym i praktycznym inżynierskim. Wniosków zawartych w tej pracy nie można jednakowo wykorzystać w odniesieniu do zbiorników magazynowych, gdyż ich konstrukcja, a zwłaszcza obciążenia eksploatacyjne są zdecydowanie różne od konstrukcji i obciążeń okrętów. Dlatego w niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych pól naprężeń w blachach dolnej części płaszczy zbiorników walcowych w strefach występowania wirtualnych rozwarstwień.

Przeanalizowano trzy typy zbiorników stosowanych w polskim przemyśle petrochemicznym różniące się zasadniczo pojemnością eksploatacyjną, która wynosi $V=5000\text{m}^3$, $V=10000\text{m}^3$ i $V=50000\text{m}^3$. Rozpatrzono wpływ na nośność płaszcza różnych typów rozwarstwień zarówno przebiegający wyłącznie w połowie grubości blachy, jak i tych, które wyklinowują się na zewnątrz. Również zmieniono lokalizację strefy rozwarstwień umieszczając ją szczególnie w rejonie zaburzeń błonowego stanu naprężeń, tj. połączenia płaszcza z dnem.

Skomplikowanym było opracowanie modelu numerycznego rzeczywistego zbiornika, w którego płaszczu wykryto rozwarstwienia blach, ponieważ są to zjawiska nieregularne i mają charakter rozproszonych stref w obszarze płaszcza zbiornika. Dlatego w obliczeniach przyjęto uproszczoną geometrię strefy rozwarstwienia w postaci obszaru opisanego elipsą.

Eliptyczny obszar rozwarstwienia dolnej blachy płaszcza zbiornika modelowano jako dwie równoległe do siebie blachy o grubości równej połowie grubości blachy nieuszkodzonej. Pomiędzy blachami zastosowano jednostronne więzy przenoszące jedynie docisk blach do siebie. Połączenie obu blach obu ze strefy rozwarstwionej z blachą bez defektu zrealizowano stosując sztywne elementy skończone. Węzłami nadrzędnymi są węzły należące do blachy bez defektu i łączą się sztywnymi elementami z sąsiednimi węzłami z blach strefy rozwarstwionej.

4.2.2. Dane techniczne modelowanych zbiorników

Podstawowe dane **zbiornika o pojemności $V = 5000 \text{ m}^3$** przyjęte do obliczeń statycznych:

- średnica wewnętrzna płaszcza $d_w = 24760 \text{ mm}$,
- wysokość płaszcza $h_c = 11990 \text{ mm}$,
- parametry geometryczne pierścieni płaszcza (materiał: stal St3S – S235):
 1. $t = 15 \text{ mm}$, $h = 1990 \text{ mm}$
 2. $t = 13 \text{ mm}$, $h = 1990 \text{ mm}$

3. $t = 10 \text{ mm}$, $h = 1990 \text{ mm}$
 4. $t = 8 \text{ mm}$, $h = 1990 \text{ mm}$
 5. $t = 5 \text{ mm}$, $h = 1990 \text{ mm}$
 6. $t = 5 \text{ mm}$, $h = 1995 \text{ mm}$
- grubość blach centralnej części dna (materiał: stal St3S – S235) – $t = 8 \text{ mm}$
 - grubość blach pierścienia obrzeżnego dna (szerokość 1000 mm) – $t = 8 \text{ mm}$
 - masa dachu stałego $Q = 32000 \text{ kg}$
 - posadowienie zbiornika na poduszce żwirowo-pisakowej, przyjęto stałą sprężystości $k = 50 \text{ MN/m}^3$,
 - maksymalna wysokość napełnienia zbiornika $h = 11100 \text{ mm}$
 - gęstość magazynowanej cieczy – oleju napędowego – $\rho = 0,860 \text{ g/cm}^3$.

Podstawowe dane **zbiornika o pojemności $V = 10000 \text{ m}^3$** przyjęte do obliczeń statycznych:

- średnica wewnętrzna płaszczka $d_w = 32370 \text{ mm}$,
- wysokość płaszczka $h_c = 13450 \text{ mm}$,
- parametry geometryczne pierścieni płaszczka (materiał: stal St3S – S235):
 1. $t = 16 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 2. $t = 14 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 3. $t = 13 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 4. $t = 11 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 5. $t = 10 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 6. $t = 8 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 7. $t = 6 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 8. $t = 6 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
 9. $t = 6 \text{ mm}$, $h = 1490 \text{ mm}$
- grubość blach centralnej części dna (materiał: stal St3S – S235) – $t = 10 \text{ mm}$,
- grubość blach pierścienia obrzeżnego dna (szerokość 1000 mm) – $t = 12 \text{ mm}$,
- masa dachu stałego $Q = 72000 \text{ kg}$,
- posadowienie zbiornika na poduszce żwirowo pisakowej, przyjęto stałą sprężystości $k = 50 \text{ MN/m}^3$,
- maksymalna wysokość napełnienia zbiornika $h = 12500 \text{ mm}$,
- gęstość magazynowanej cieczy – oleju napędowego – $\rho = 0,860 \text{ g/cm}^3$.

Podstawowe dane **zbiornika o pojemności $V = 50000 \text{ m}^3$** przyjęte do obliczeń statycznych:

- średnica wewnętrzna płaszczka $d_w = 64000 \text{ mm}$,
- wysokość płaszczka $h_c = 17500 \text{ mm}$,
- parametry geometryczne pierścieni płaszczka (materiał: 18G2A – S355):
 1. $t = 30 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 2. $t = 26 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 3. $t = 23 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 4. $t = 19 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 5. $t = 16 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 6. $t = 12 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 7. $t = 9 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
 8. $t = 9 \text{ mm}$, $h = 2250 \text{ mm}$
- grubość blach centralnej części dna (materiał: stal St3S – S235) – $t = 11 \text{ mm}$,
- grubość blach pierścienia obrzeżnego dna (szerokość 1000 mm, stal 18G2A) – $t = 15 \text{ mm}$,
- masa dachu stałego $Q = 368860 \text{ kg}$ (dach oparty na 19 ustawionych radialnie słupach wewnętrznych i obwodowo na płaszczu, ciężar przekazywany na płaszcz $Q_p = 111600 \text{ kG}$),
- posadowienie zbiornika na poduszce żwirowo pisakowej, przyjęto stałą sprężystości $k = 50 \text{ MN/m}^3$,
- maksymalna wysokość napełnienia zbiornika $h = 16500 \text{ mm}$,
- gęstość magazynowanego produktu naftowego $\rho = 0,877 \div 0,890 \text{ g/cm}^3$.

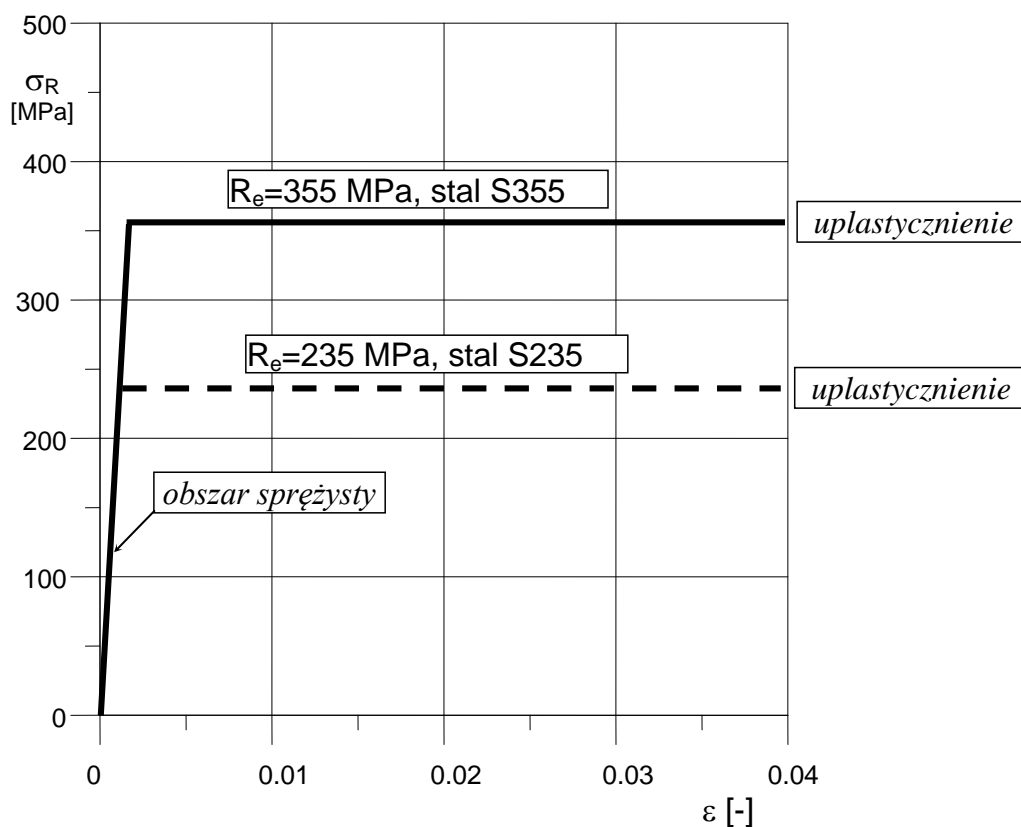
4.2.3. Modele obliczeniowe zbiorników

Analizę statyczną przeprowadzono przy użyciu systemu do obliczeń MES – Femap NX NASTRAN v.10.1.1. Zastosowano następujące typy elementów :

- powłokowy – konstrukcja zbiornika,
- kontaktowy (gap element) – strefa kontaktu pomiędzy rozwarstwionymi elementami blachy – przenoszony jest jedynie docisk pomiędzy elementami,
- sztywny – modelowano połączenie blach na krawędzi rozwarstwienia,
- bryłowy – modelowano posadowienie zbiornika, model podłoża typu Winklera.

W obliczeniach przyjęto następujące parametry materiału (otrzymane m.in. w wyniku badań niszczących wykonanych w rozdziale 2 pracy doktorskiej):

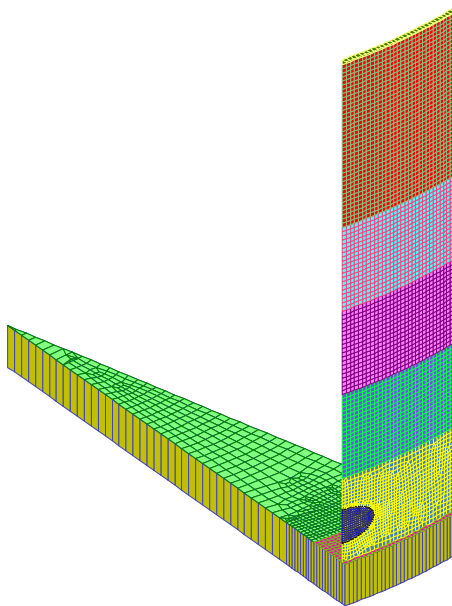
- $E = 210 \text{ GPa}$ – moduł sprężystości (Younga) stali,
- $\nu = 0.3$ – współczynnik Poissona stali,
- ciężar właściwy stali $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$,
- przyjęto model ciała idealnie sprężysto-plastycznego z parametrami pokazanymi na rys. 4.6.



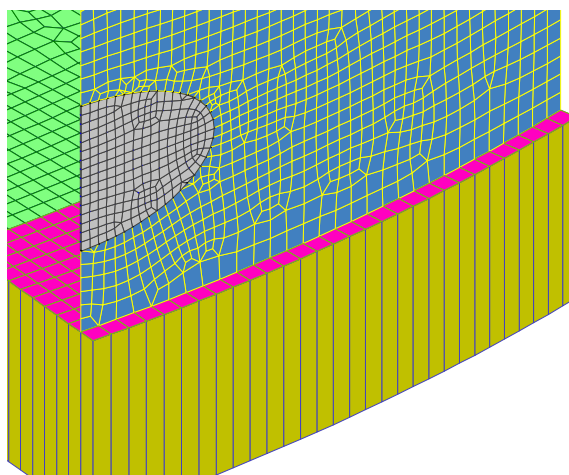
Rys. 4.6. Model ciała idealnie sprężysto-plastycznego stali płaszczy zbiorników

Model obliczeniowy zbiornika o pojemności $V = 5000 \text{ m}^3$ pokazano na rys 4.7. W modelu użyto 6697 węzłów oraz 6624 elementów skończonych. Strefę rozwarstwienia modelowano w kształcie powierzchni ograniczonej elipsą o osi poziomej $b = 1600 \text{ mm}$ oraz osi pionowej $h = 800 \text{ mm}$. Dolna krawędź elipsy znajduje się na wysokości 450 mm ponad miejscem połączenia płaszcza z dnem zbiornika (rys. 4.7. b). Dla danego zbiornika wykonano obliczenia wyężenia materiału płaszcza dla dwóch przypadków uszkodzenia: rozwarstwienia w środku grubości blachy, a także wyklinowania rozwarstwienia na zewnętrzną stronę blachy płaszcza (rozwijające się od środka grubości blachy oraz wychodzące na jej powierzchnię). Modelowane wyklinowanie ukierunkowane zostało wzdłuż pionowej osi symetrii strefy rozwarstwienia, w miejscu występowania największych sił obwodowych w płaszczu.

a)



b)



Rys. 4.7. Model obliczeniowy zbiornika o pojemności $V = 5000 \text{ m}^3$
(Poszczególne kolory na rysunku oznaczają różne grubości blach dna i płaszcza)

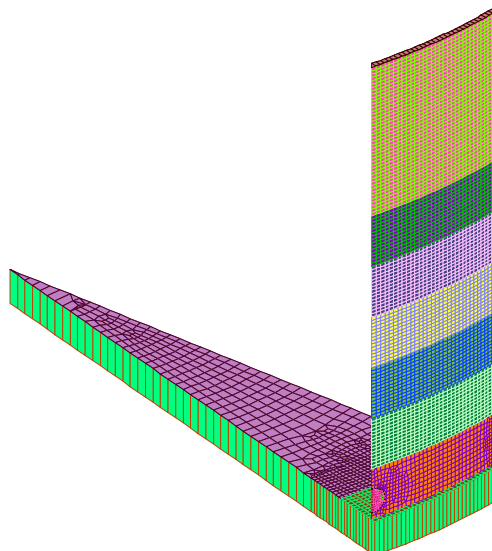
Model obliczeniowy zbiornika o pojemności $V = 10000 \text{ m}^3$ pokazano na rys 4.8. W modelu użyto 6473 węzłów oraz 6233 elementów skończonych. Wykonano obliczenia dla dwóch typów uszkodzenia:

- rozwarstwienie w płaszczyźnie środkowej blachy,
- rozwarstwienie zaczynające się w środkowej płaszczyźnie blachy i wyklinowujące się na zewnątrz.

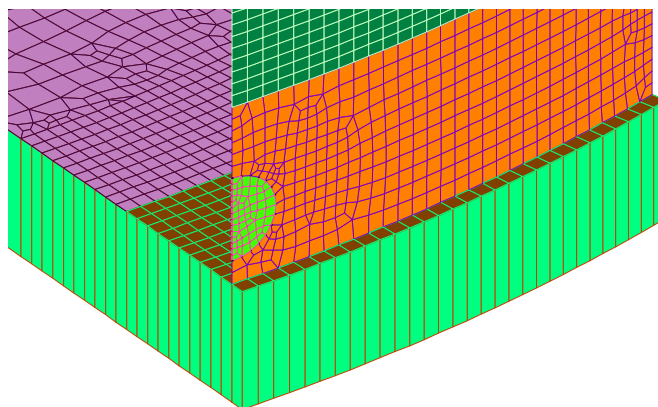
Uszkodzenie typu wyklinowania modelowano w taki sposób, że jego główna płaszczyzna była ukierunkowana wzdłuż pionowej osi symetrii strefy rozwarstwienia. Strefę rozwarstwienia

jak i w przypadku zbiornika $V = 5000 \text{ m}^3$ przyjęto w kształcie powierzchni ograniczonej elipsą o osi poziomej $b = 800 \text{ mm}$ i osi pionowej $h = 700 \text{ mm}$. Modelowano dwa przypadki usytuowania uszkodzenia: *I* – dolna krawędź elipsy (uszkodzenia) znajduje się na wysokościach 200 mm ponad miejscem połączenia płaszcza z dnem zbiornika (rys. 4.8. *a* oraz 4.8. *b*) oraz *II* – rozwarstwienie/wyklinowanie w miejscu połączenia dolnej cargo płaszcza z dnem zbiornika (rys. 4.8. *c*).

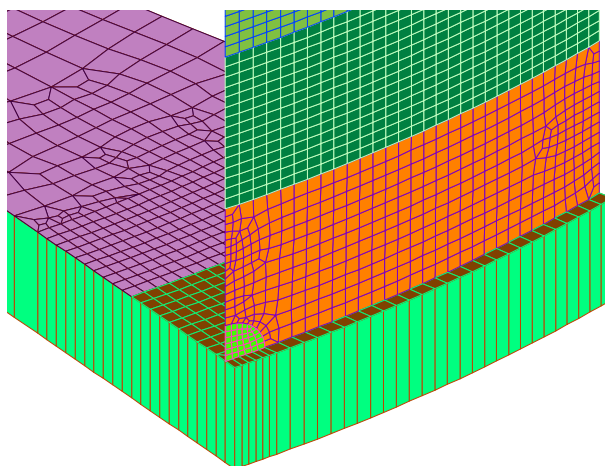
a)



b)

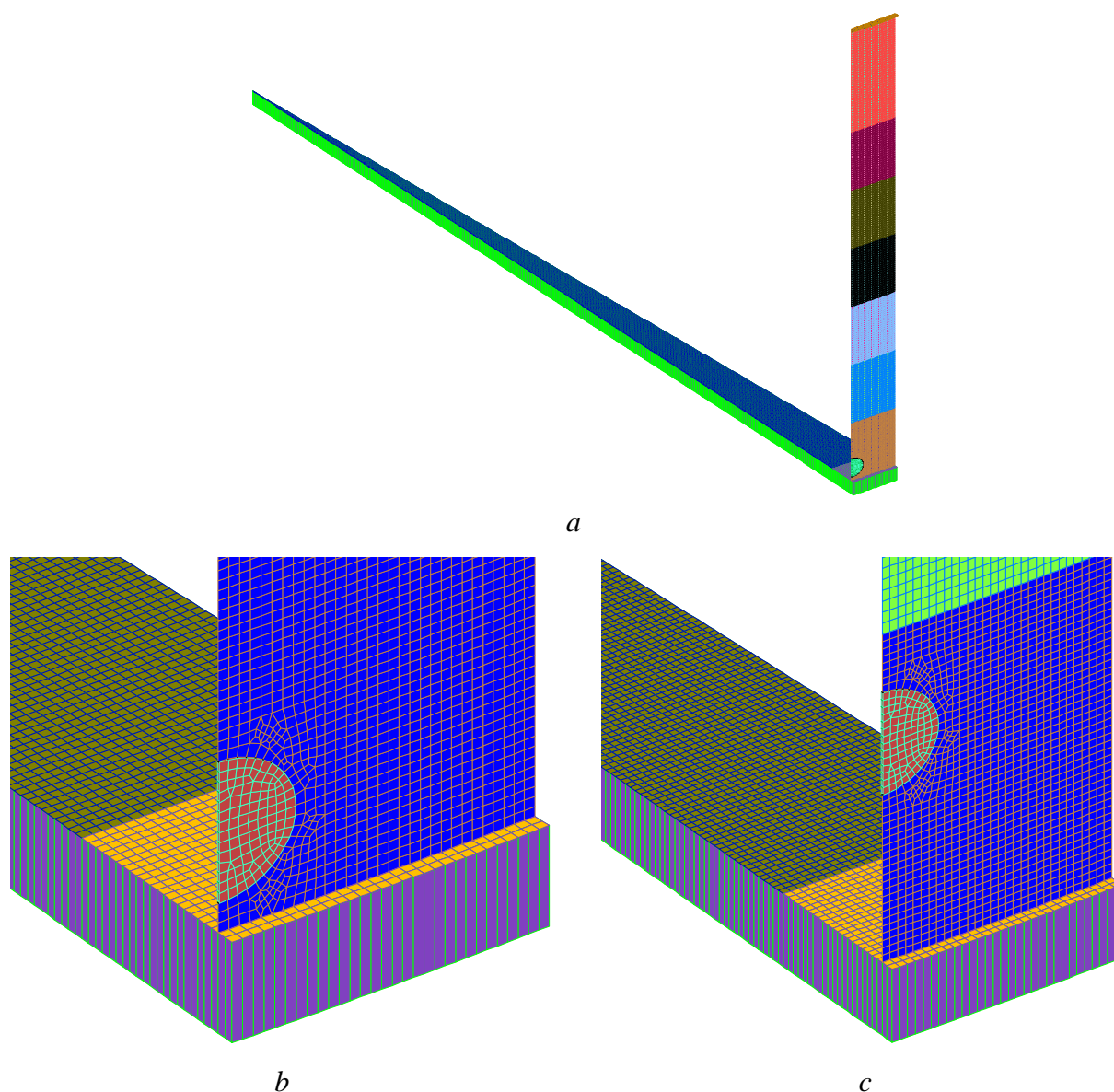


c)



Rys. 4.8. Model obliczeniowy zbiornika o pojemności $V = 10000 \text{ m}^3$ z rozmieszczeniem uszkodzenia na wysokości 200 mm od dna – a , b oraz w miejscu połączenia płaszcza z dnem – c (Poszczególne kolory na rysunku oznaczają różne grubości blach dna i płaszcza)

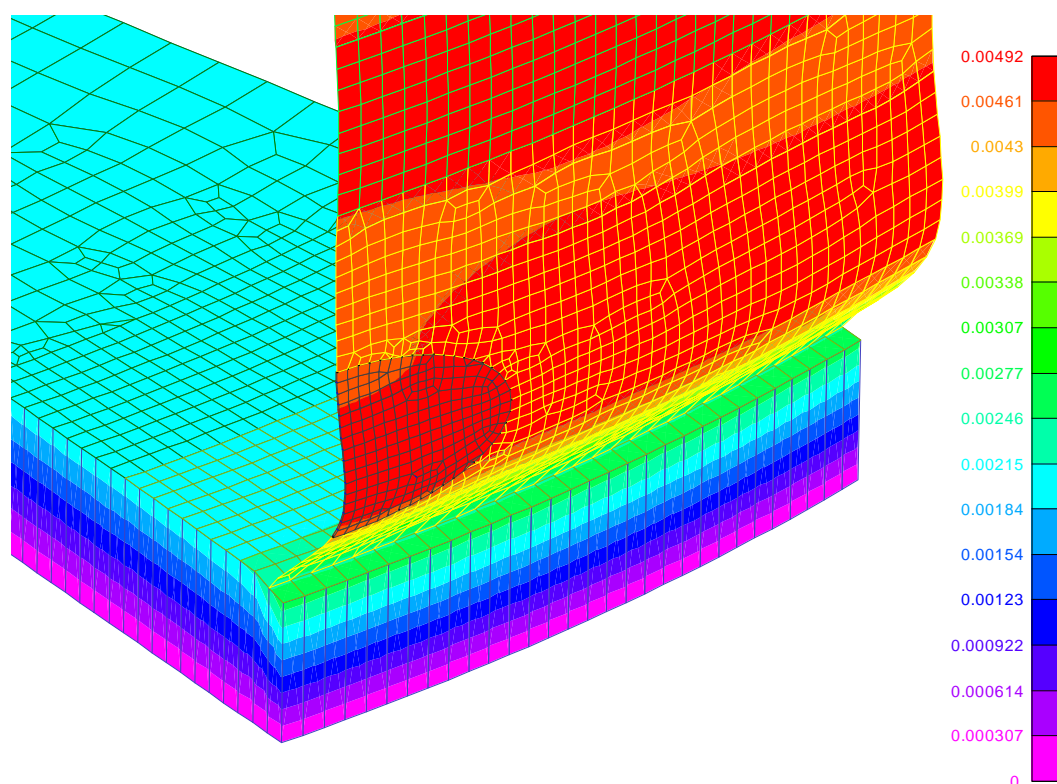
Model obliczeniowy zbiornika o pojemności $V = 50000 \text{ m}^3$ pokazano na rys 4.9. W modelu użyto 40521 węzłów oraz 39048 elementów skończonych. Strefę uszkodzenia (rozwarstwienia/wyklinowania) jak i w przypadku zbiorników $V = 5000 \text{ m}^3$ i $V = 10000 \text{ m}^3$ przyjęto w kształcie powierzchni ograniczonej elipsą o osi poziomej $b = 800 \text{ mm}$ i osi pionowej $h = 700 \text{ mm}$. Modelowano dwa przypadki usytuowania uszkodzenia: *I* – dolna krawędź elipsy znajduje się na wysokościach 150 mm ponad miejscem połączenia płaszcza z dnem zbiornika (rys. 4.9. *a* oraz 4.9. *b*) oraz *II* – dolna krawędź elipsy znajduje się na wysokościach 1150 mm ponad miejscem połączenia płaszcza z dnem zbiornika (rys. 4.9. *c*).



Rys. 4.9. Model obliczeniowy zbiornika o pojemności $V = 50000 \text{ m}^3$ z rozmieszczeniem dolnej krawędzi uszkodzenia na wysokości 115 mm – *a*, *b* i 1150 mm – *c* ponad miejscem połączenia płaszcza z dnem (Poszczególne kolory na rysunku oznaczają różne grubości blach dna i płaszcza)

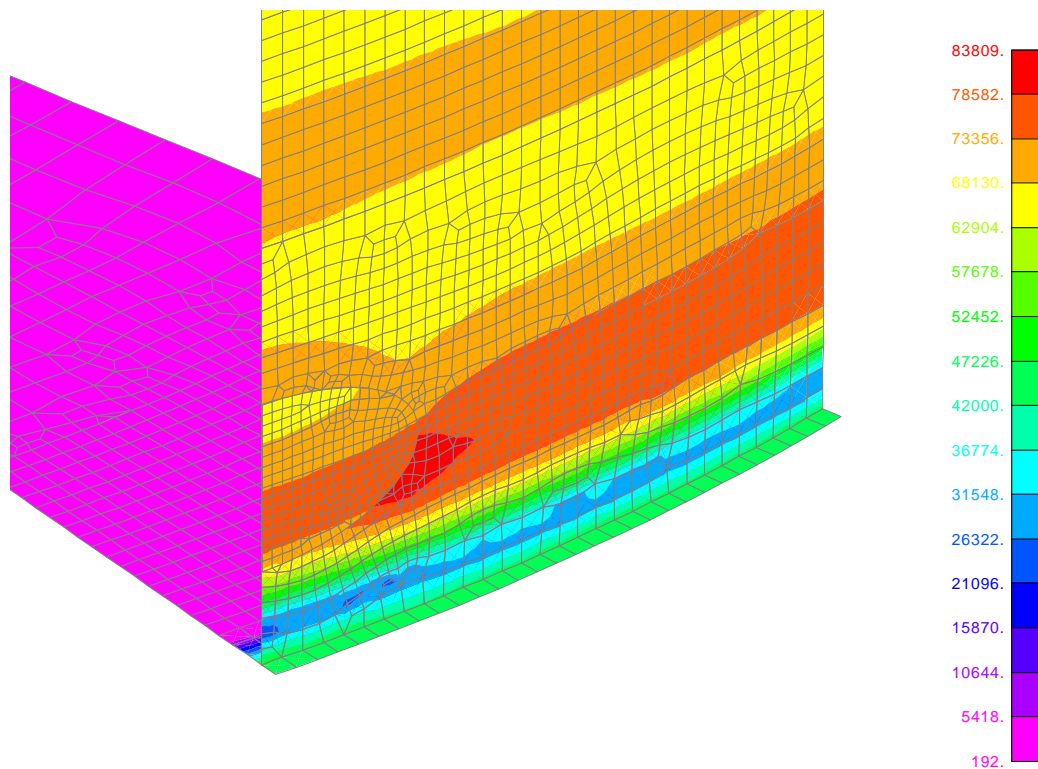
4.2.4. Wyniki analizy MES

W wyniku obliczeń MES wyężenia elementów konstrukcji zbiornika o pojemności $V = 5000 \text{ m}^3$ (w warunkach napełnienia medium do poziomu maksymalnego) stwierdzono że największe wartości całkowitych przemieszczeń blach płaszcza występują w miejscach położonych na wysokości ok. 800–900 mm ponad linię połączenia płaszcza z dnem zbiornika (miejsce występowania największych obwodowych sił normalnych) oraz wynoszą ok. 4,6 mm, a w strefie rozwarstwienia odpowiednio 4,9 mm (rys. 4.10). Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych w przypadku uszkodzenia typu rozwarstwienie w strefie defektu są na poziomie ok. 84 MPa (rys. 4.10), czyli ok. 40% $f_d=215 \text{ MPa}$.

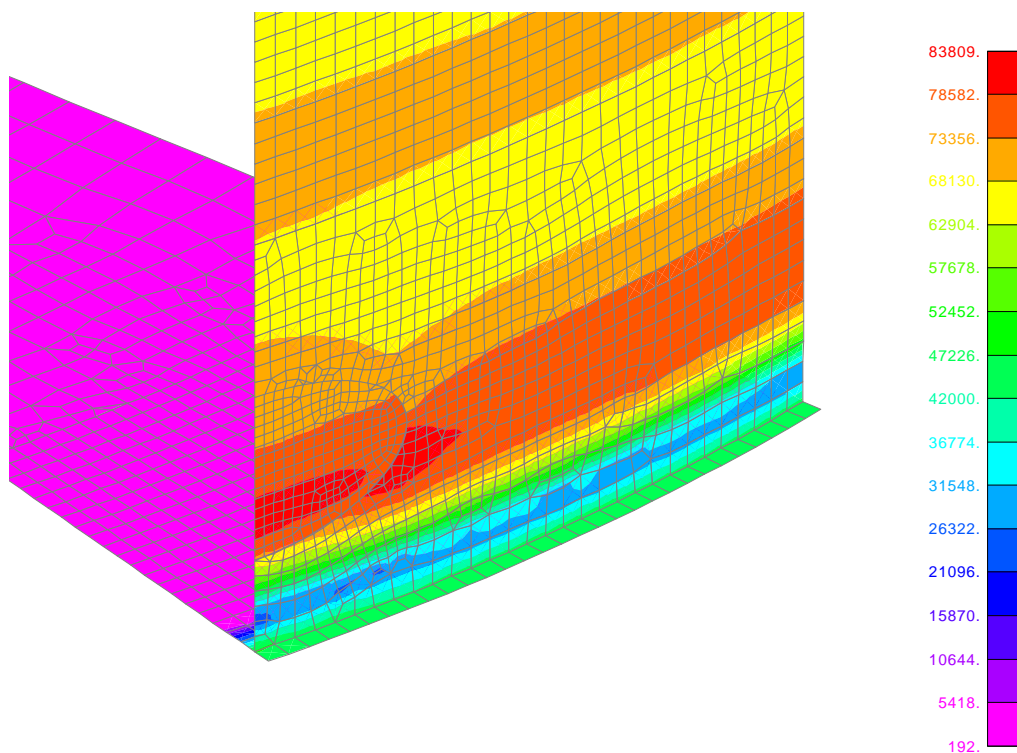


Rys. 4.10. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 5000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie (skala skażona)

a)

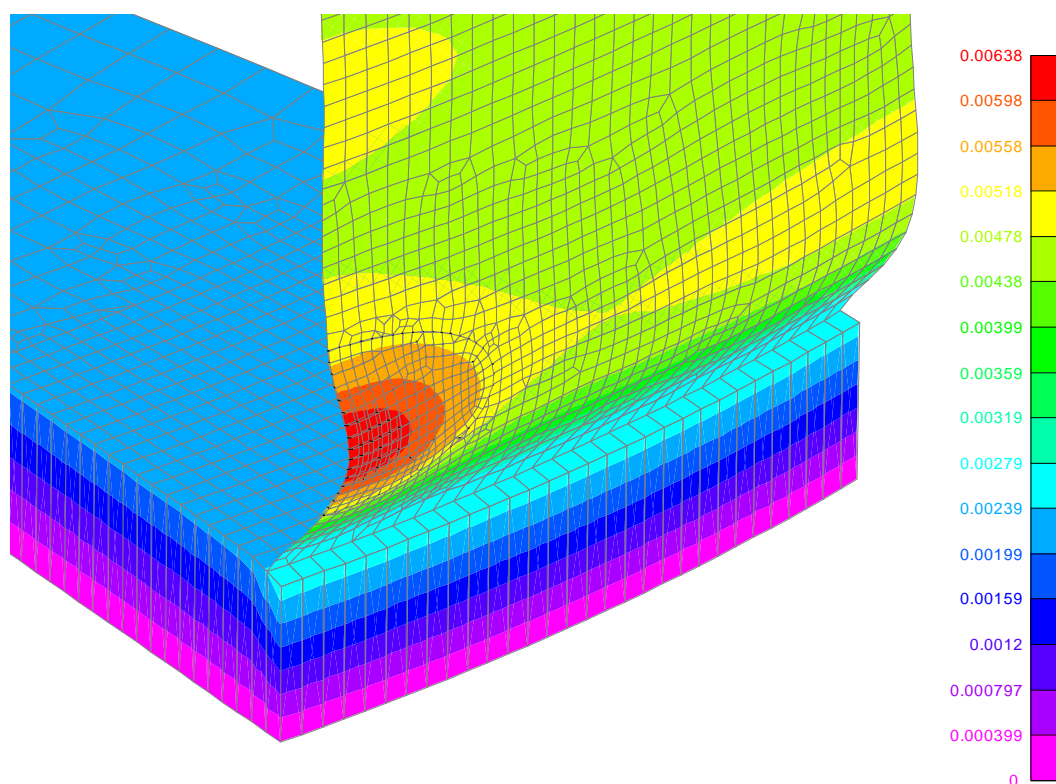


b)



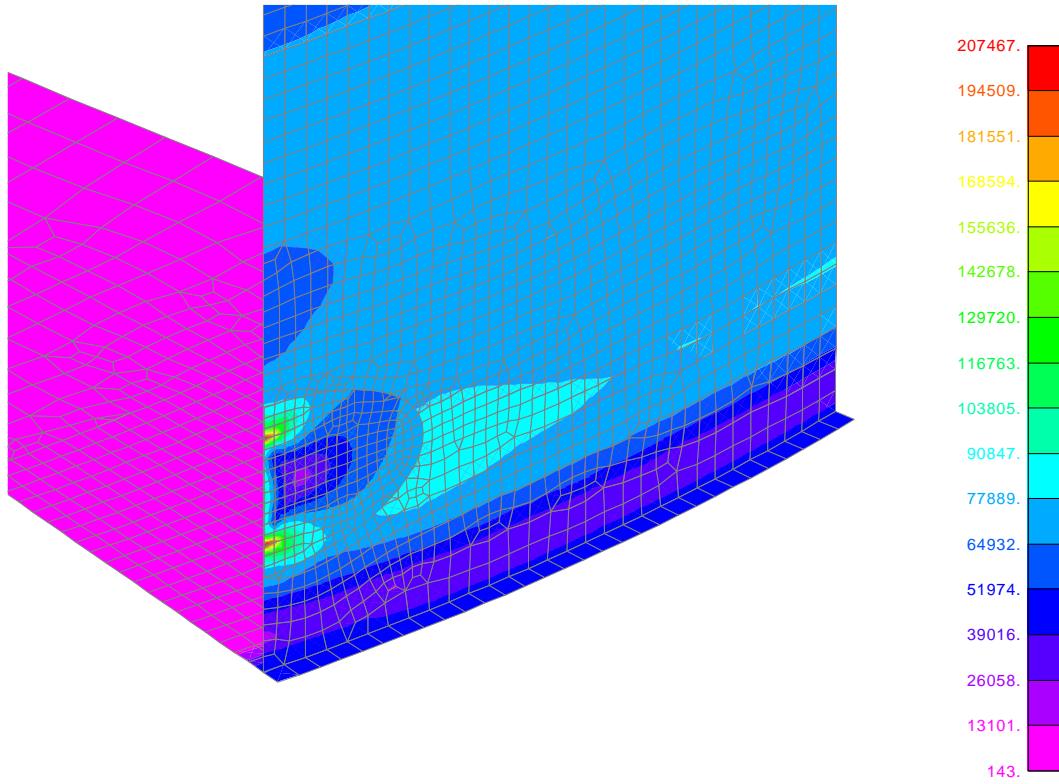
Rys. 4.11. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 5000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie: *a* – pokazano pole naprężeń od strony zewnętrznej płaszczu zbiornika, *b* – rozkład naprężeń w głównej płaszczyźnie rozwarstwienia (odsłonięto wewnętrzną część strefy uszkodzenia)

W przypadku wyklinowania rozwarstwienia na zewnętrzną stronę blachy płaszczu, które powstało w środkowej części przekroju oraz wyklinowania się na jej zewnętrzną powierzchnię, maksymalne wartości przemieszczeń całkowitych w analizowanej strefie wynoszą ok. 6,4 mm (rys. 4.12), a największe naprężenia zredukowane skoncentrowane są na początku i końcu linii wyklinowania i wynoszą ok. 207 MPa (rys. 4.13), czyli wzrasta o ok. 40% w odniesieniu do rozwarstwienia bez wyklinowania.

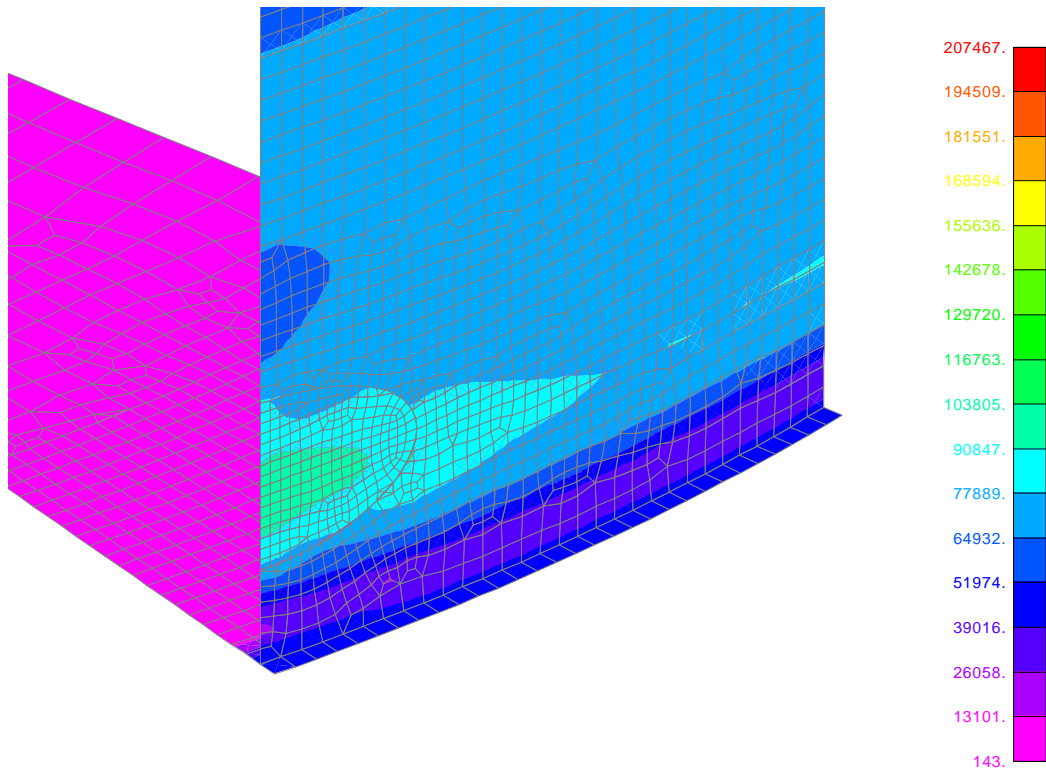


Rys. 4.12. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 5000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem (skala skażona)

a)



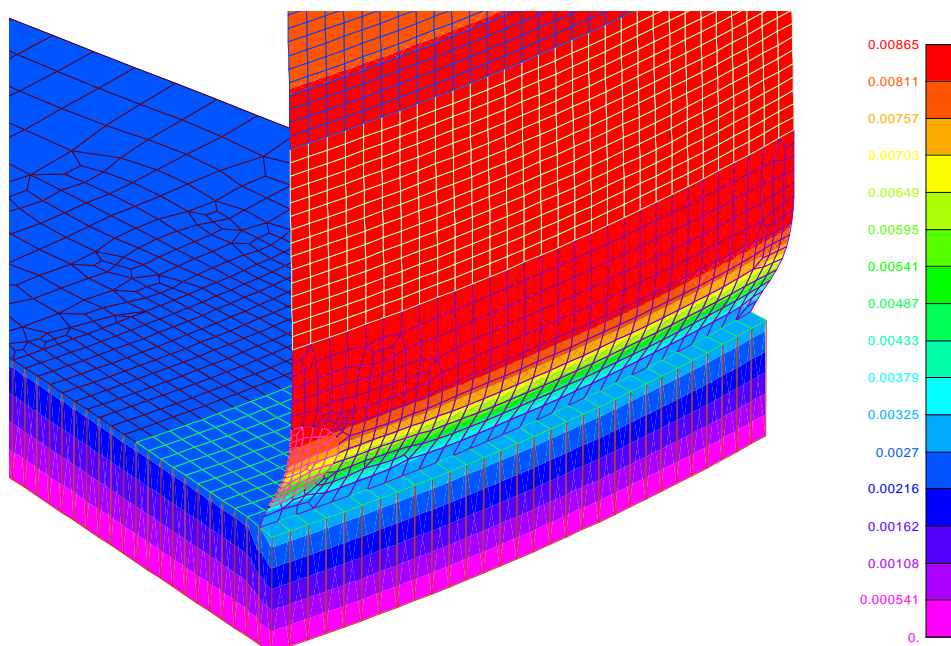
b)



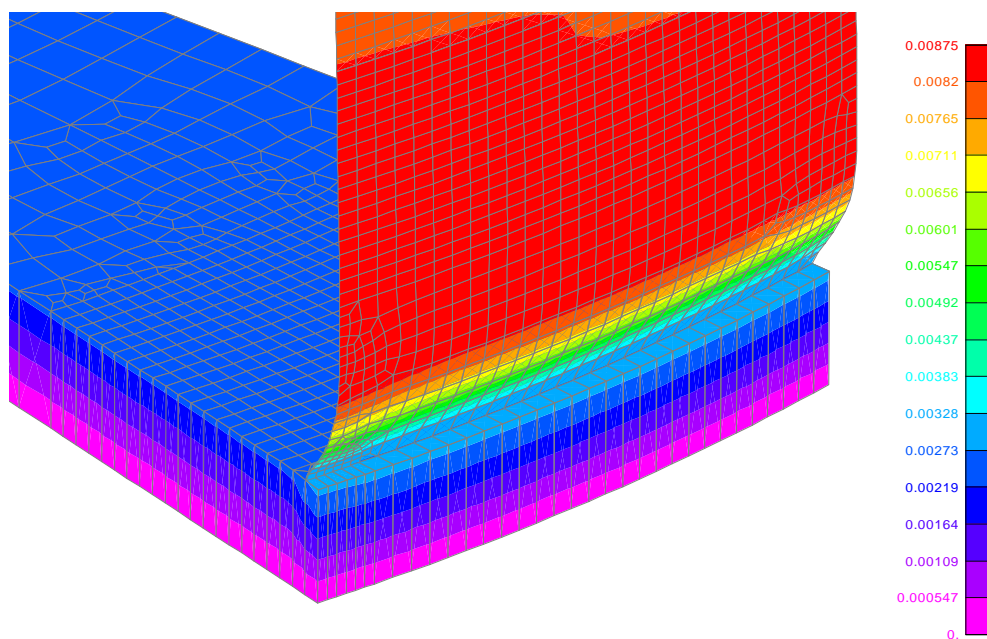
Rys. 4.13. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczy zbiornika $V = 5000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem: *a* – pokazano pole naprężeń od strony zewnętrznej płaszczy zbiornika, *b* – rozkład naprężeń w głównej płaszczyźnie rozwarstwienia (odsłonięto wewnętrzną część strefy uszkodzenia)

Analiza MES pola naprężeń w konstrukcji zbiornika o pojemności $V = 10000 \text{ m}^3$ (przy maksymalnym napełnieniu) wykazała, że największe wartości całkowitych przemieszczeń blach płaszcza są w miejscach położonych na wysokościach od ok. 1000 mm od dna zbiornika (miejscze występowania największych obwodowych sił normalnych) oraz wynoszą ok. 8,6 mm (rys. 4.14. *a*). Usytuowanie uszkodzenia w miejscu łączenia blach płaszcza z dnem nie wywołuje istotnych zaburzeń pola przemieszczeń (rys. 4.14. *b*).

a)



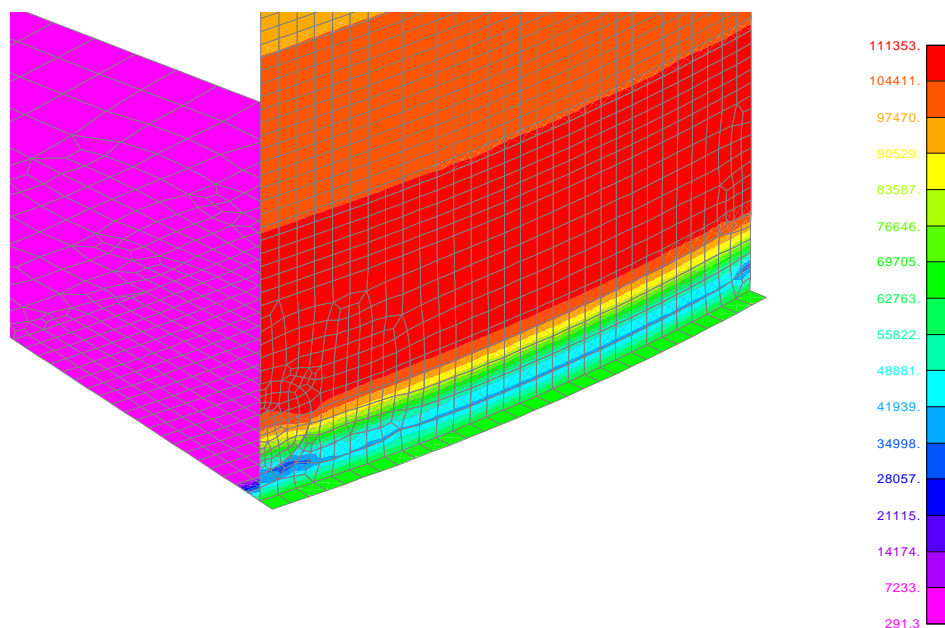
b)



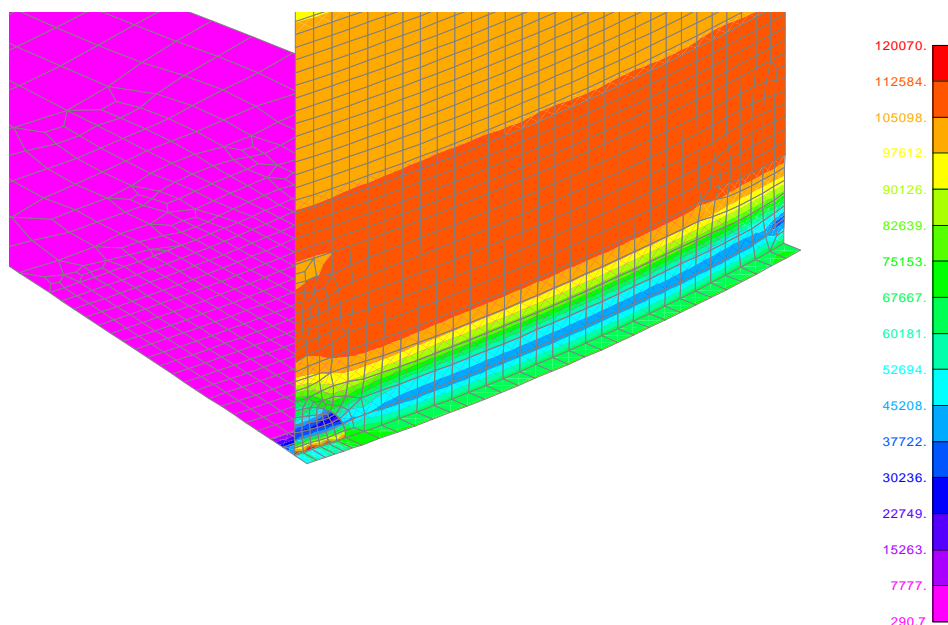
Rys. 4.14. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 10000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie (skala skażona): *a* – uszkodzenie umiejscowione na wysokości 200 mm od dna, *b* – uszkodzenie znajduje się w miejscu połączenia płaszcza z dnem

Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych w strefie rozwarstwienia, usytuowanego 200 mm powyżej dna zbiornika, wynoszą ok. 112 MPa (rys. 4.15. *a*). W przypadku uszkodzenia, zlokalizowanego w miejscu łączenia się blach pierwszej cergi płaszcza z dnem, powstają w tej strefie lokalne koncentracje pola naprężeń na poziomie 120 MPa (rys. 4.15. *b*), czyli o ok. 56% $f_d=215$ MPa

a)



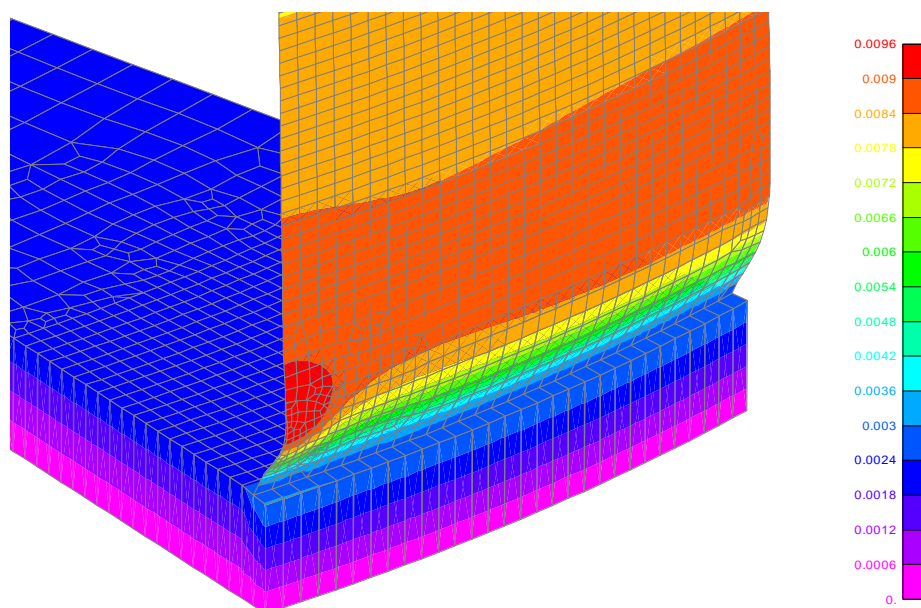
b)



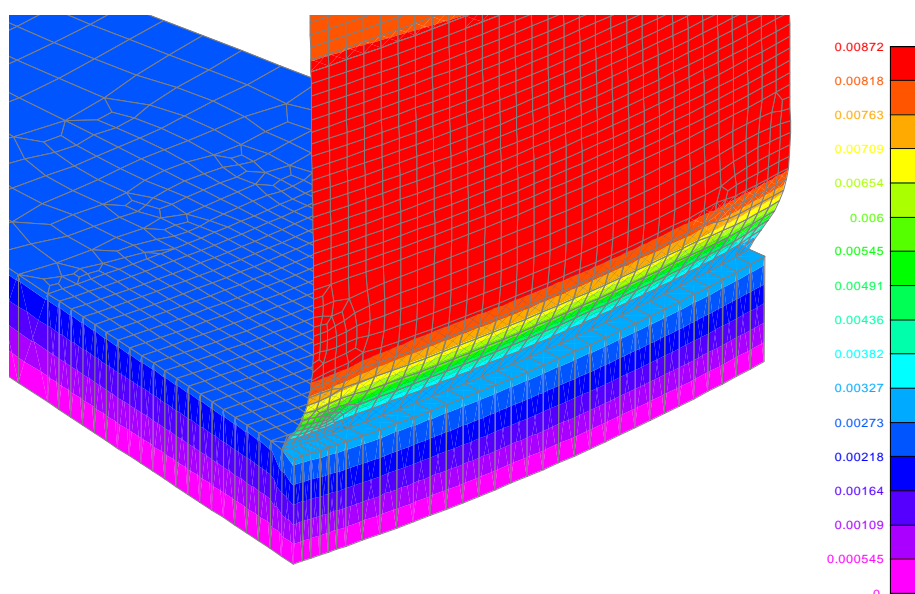
Rys. 4.15. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 10000$ m³ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie: *a* – uszkodzenie umiejscowione na wysokości 200 mm od dna, *b* – uszkodzenie znajduje się w miejscu połączenia płaszcza z dnem (odsłonięto wewnętrzną część strefy uszkodzenia)

Wyklinowanie rozwarstwienia na zewnętrzną stronę blachy płaszczu, które ukierunkowane jest wzdłuż pionowej osi symetrii strefy elipsy, powoduje występowanie koncentracji pola przemieszczeń całkowitych w strefie uszkodzenia (zlokalizowanego 200 mm powyżej dna), a ich maksymalne wartości wynoszą ok. 9,6 mm (rys. 4.16. *a*). Rozmieszczenie uszkodzenia w miejscu łączenia blach płaszczu z dnem nie wywołuje istotnych zaburzeń pola przemieszczeń (rys. 4.16. *b*).

a)



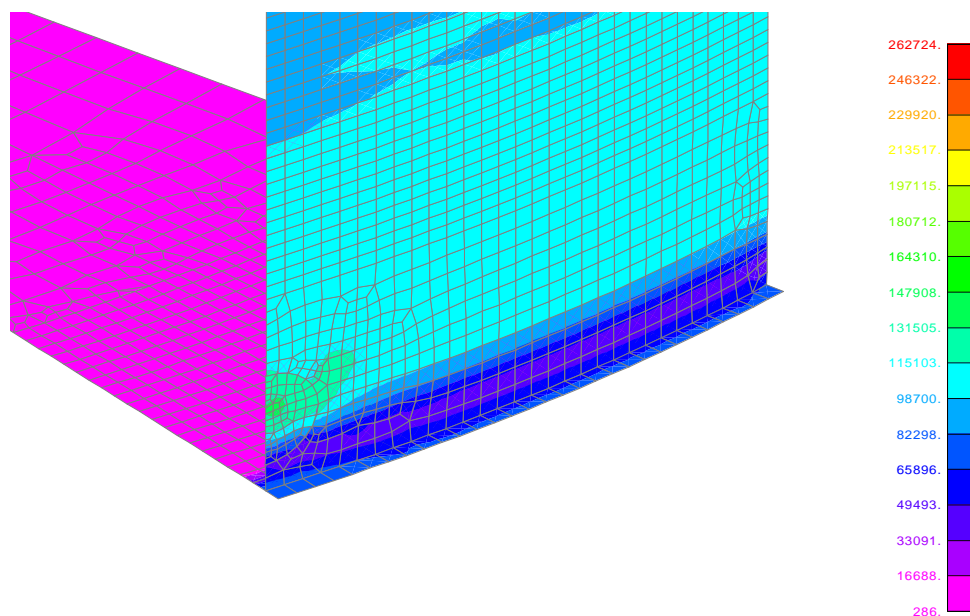
b)



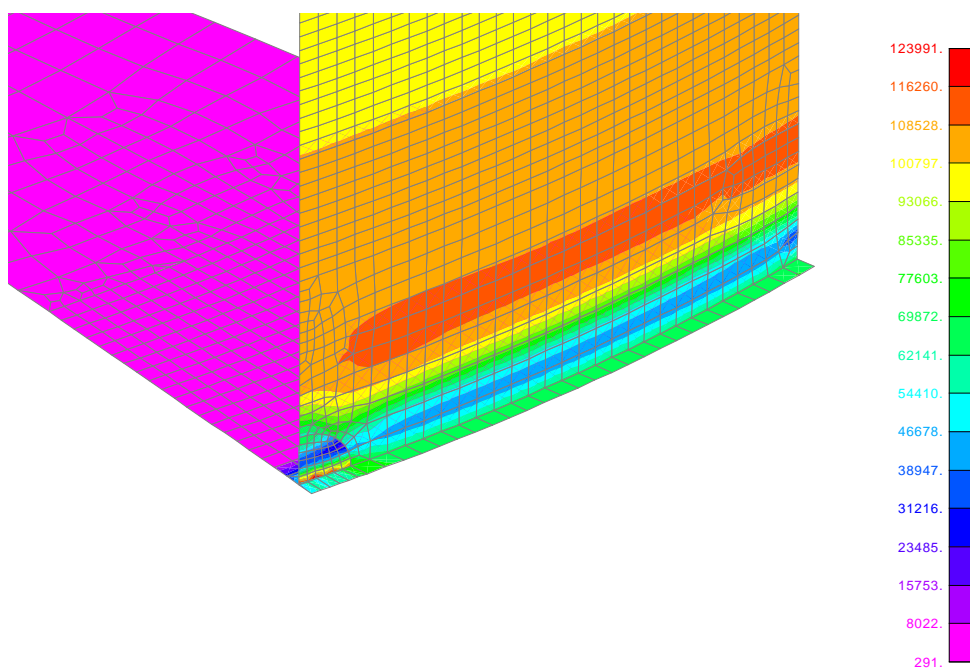
Rys. 4.16. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 10000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem (skala skażona): *a* – uszkodzenie umiejscowione na wysokości 200 mm od dna, *b* – uszkodzenie znajduje się w miejscu połączenia płaszczu z dnem

W przypadku powstania uszkodzenia typu rozwarstwienie z wyklinowaniem w miejscu łączenia się blach pierwszej cangi płaszcza z dnem powstaje lokalna koncentracja naprężeń zredukowanych na poziomie ok. 124 MPa (rys. 4.17) co stanowi ok. 58% $f_d=215$ MPa.

a)

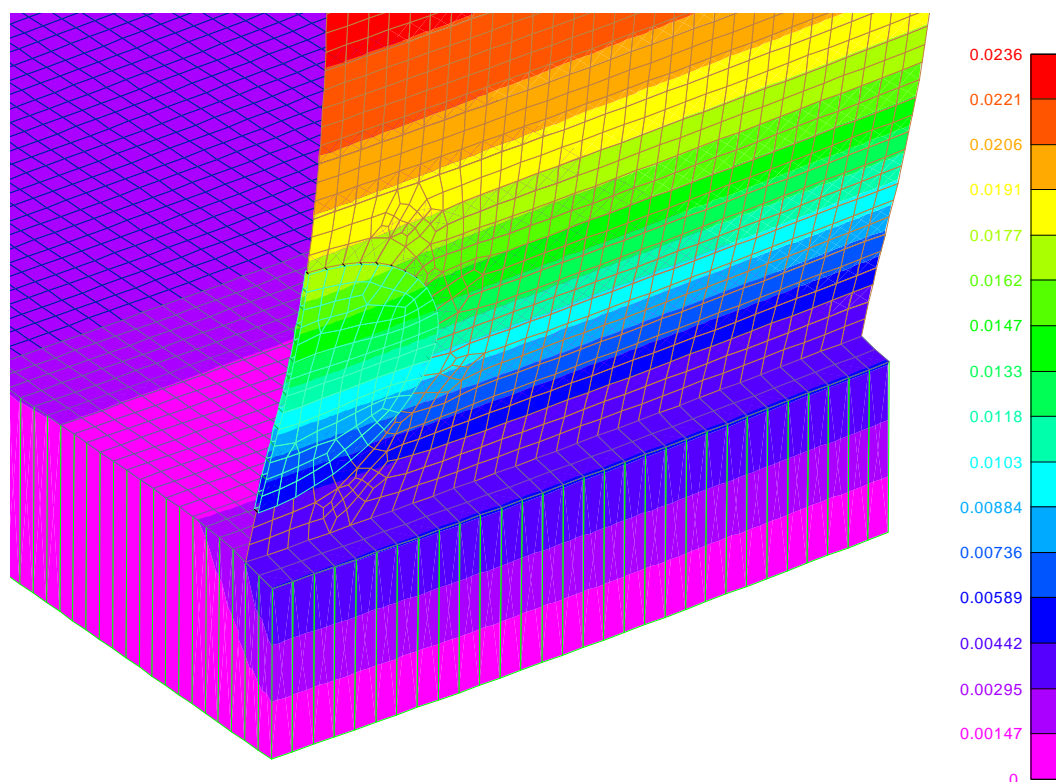


b)

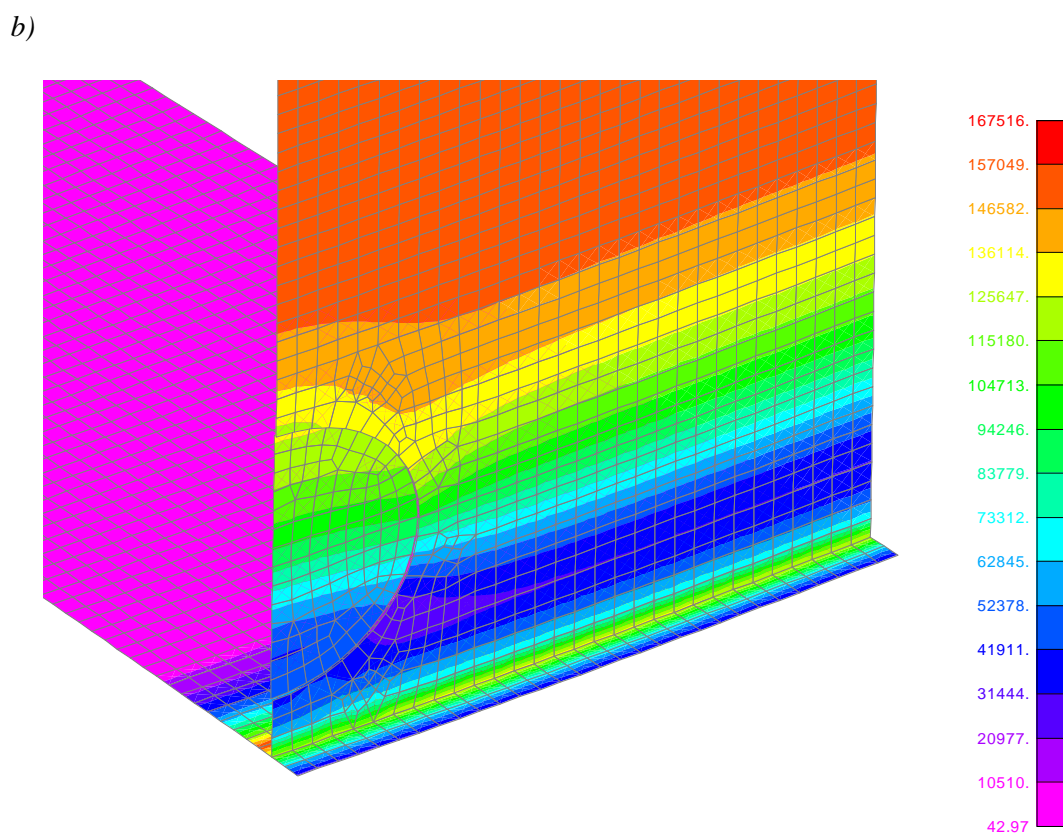
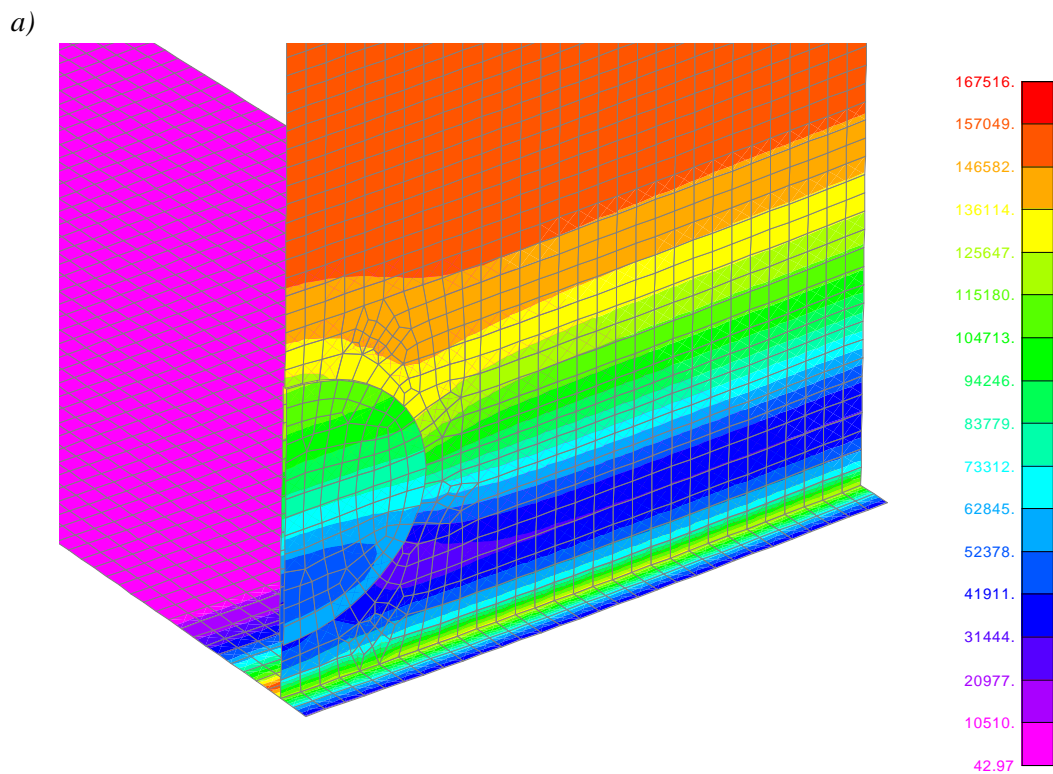


Rys. 4.17. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 10000$ m³ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem: *a* – uszkodzenie umiejscowione na wysokości 200 mm od dna, *b* – uszkodzenie znajduje się w miejscu połączenia płaszcza z dnem (odsłonięto wewnętrzną blachę płaszcza w strefie rozwarstwienia)

Analiza MES wyężenia płaszcza zbiornika magazynowego o pojemności $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie (rozieszczonym na wysokości 120 mm ponad dnem) wykazała, że największe wartości całkowitych przemieszczeń blach płaszcza są w miejscach położonych na wysokościach od ok. 1500 mm ponad dnem zbiornika (miejsce występowania największych obwodowych sił normalnych) oraz wynoszą ok. 23,6 mm. W miejscu rozwarstwienia ww. przemieszczenia są na poziomie 13,5 mm (rys. 4.18). Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych w przypadku rozwarstwienia, usytuowanego bliżej dna (dolna krawędź elipsy znajduje się na wysokościach 150 mm od dolnej części płaszcza) w strefie defektu wynoszą ok. 115 MPa (rys. 4.19), czyli wynosi ok. 37% $f_d=315 \text{ MPa}$.

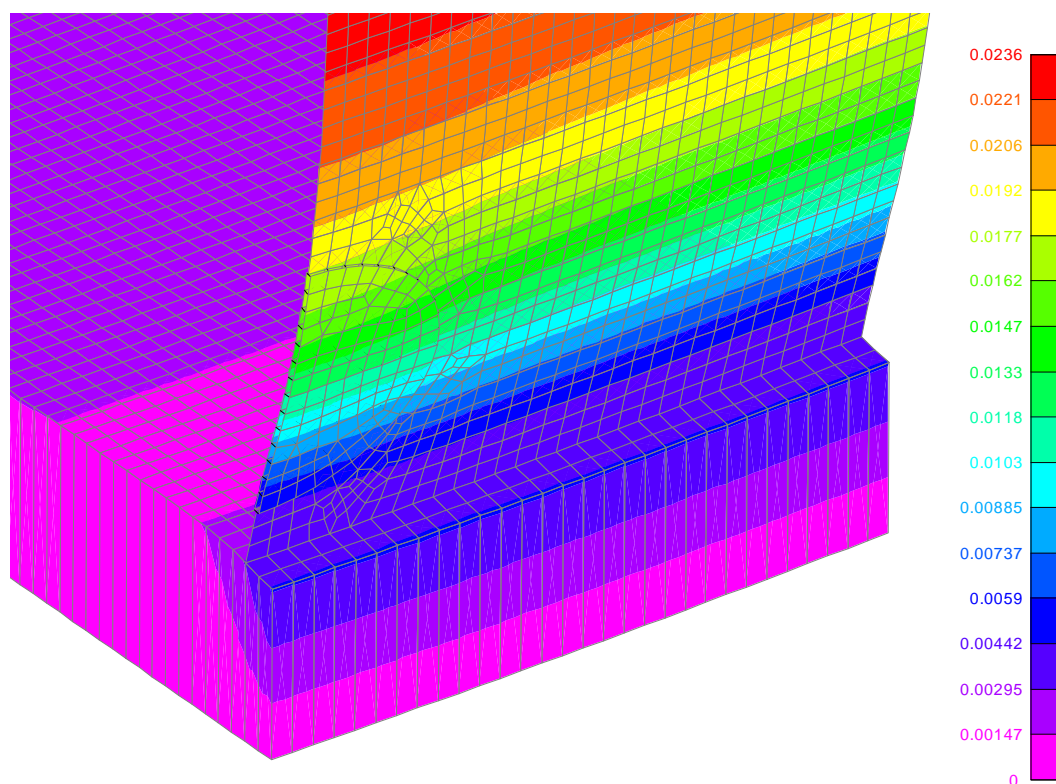


Rys. 4.18. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie, rozmieszczonym na wysokości 150 mm od dolnej krawędzi płaszcza (skala skażona)



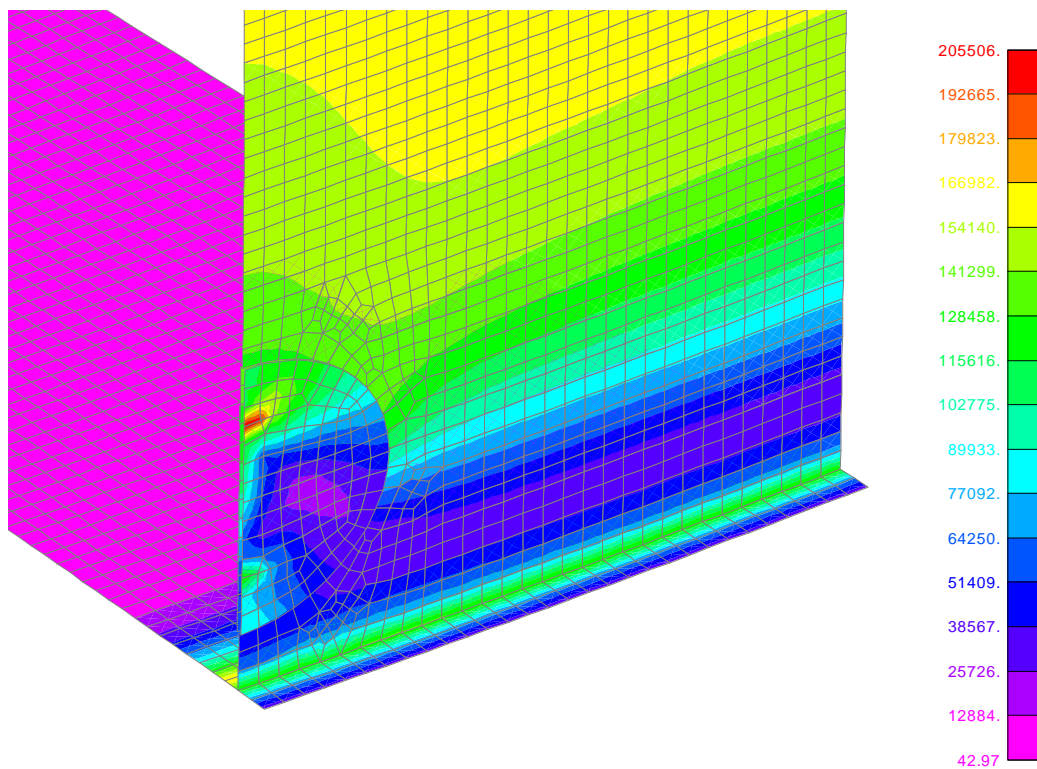
Rys. 4.19. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie, rozmieszczonym na wysokości 150 mm od dolnej krawędzi płaszczu: *a* – pokazano pole naprężeń od strony zewnętrznej płaszczu zbiornika, *b* – rozkład naprężeń w głównej płaszczyźnie rozwarstwienia (odsłonięto wewnętrzną część blachy płaszczu w strefie rozwarstwienia)

W przypadku wyklinowania rozwarstwienia, ukierunkowanego wzdłuż pionowej osi symetrii elipsy, maksymalne wartości przemieszczeń całkowitych występowały w strefie ww. defektu oraz wynosiły ok. 16,2 mm (rys. 4.20). Dla uszkodzenia, zlokalizowanego na wysokości 150 mm od dolnej krawędzi płaszcza zbiornika, największe wartości naprężeń zredukowanych skoncentrowane są w wierzchołku wyklinowania – 205 MPa (rys. 4.21). Powstają one na skutek oddziaływania maksymalnych sił obwodowych w kierunku największego rozwarcia wyklinowania, wywołanych parciem magazynowanego medium.

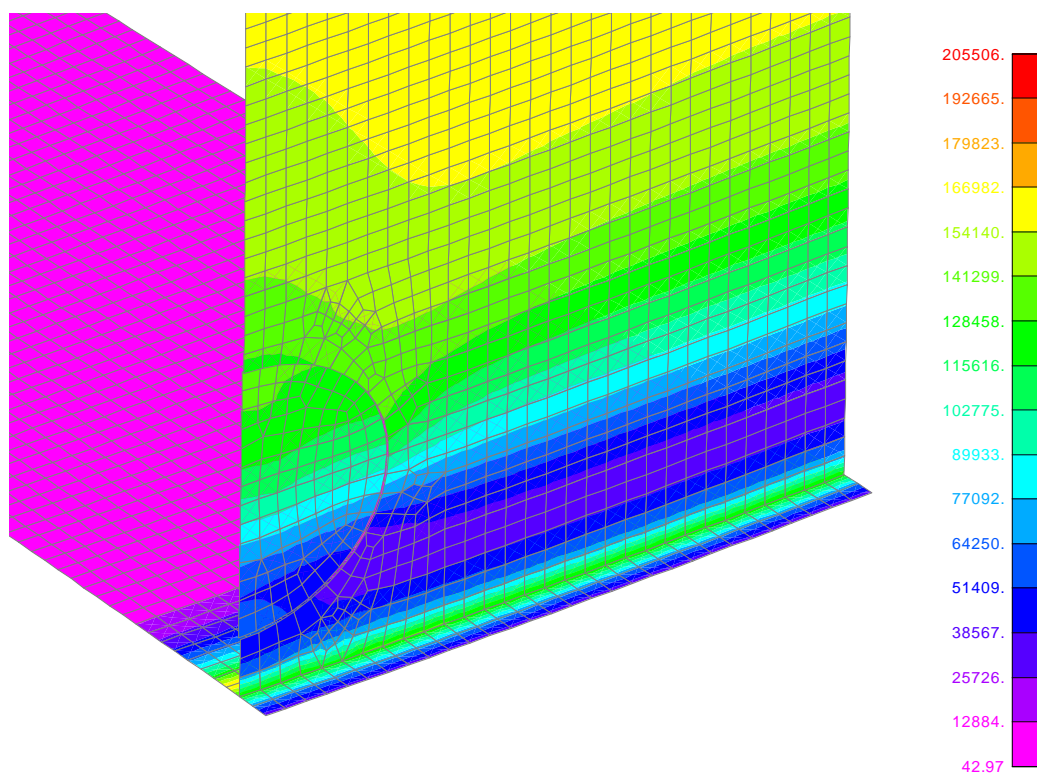


Rys. 4.20. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem, rozmieszczonym na wysokości 150 mm od dolnej krawędzi płaszcza (skala skażona)

a)



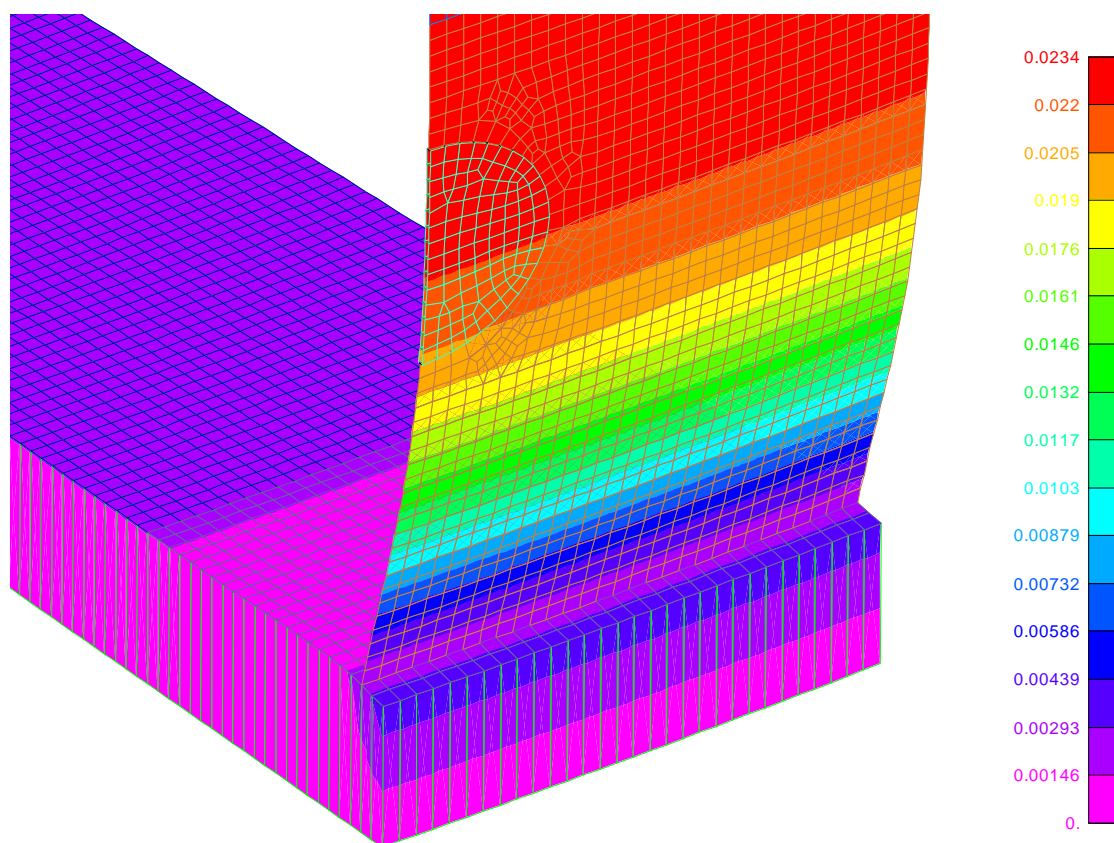
b)



Rys. 4.21. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem, rozmieszczonym na wysokości 150 mm od dolnej krawędzi płaszczu: *a* – pokazano pole naprężeń od strony zewnętrznej płaszczu zbiornika, *b* – rozkład naprężeń w głównej płaszczyźnie rozwarstwienia (odsłonięto wewnętrzną blachę płaszczu w strefie rozwarstwienia)

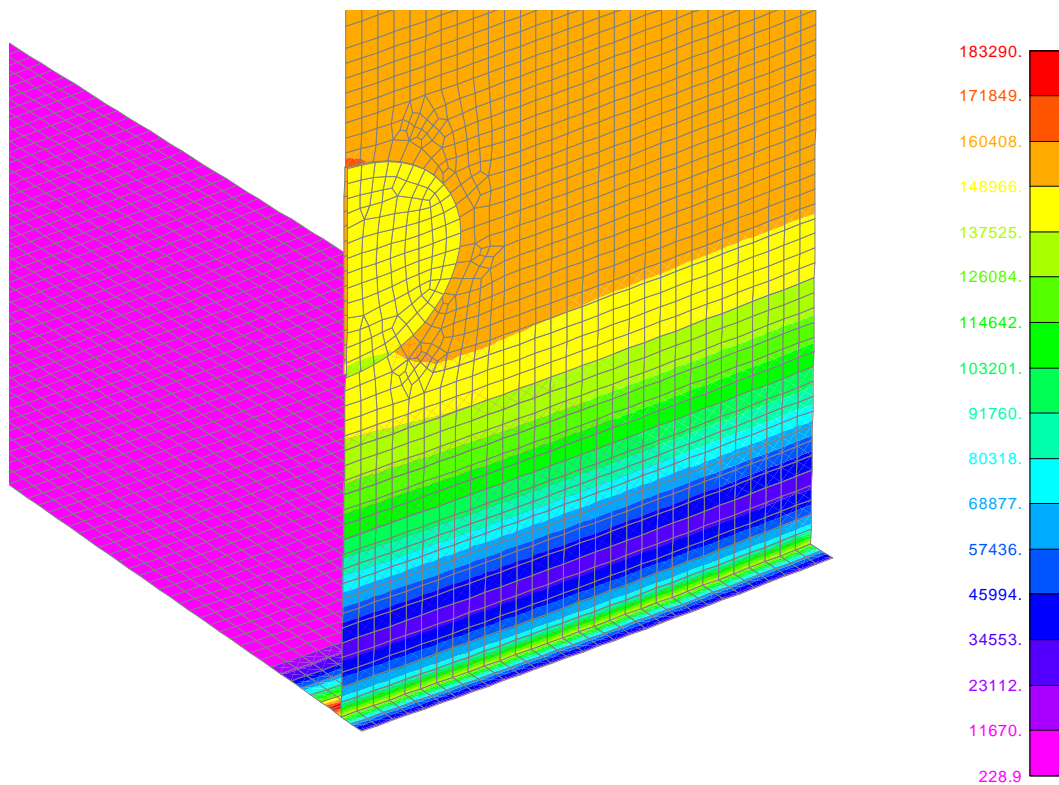
Analiza MES wyężenia blach płaszczu zbiornika o pojemności $V = 50000 \text{ m}^3$ wykazała, że naprężenia zredukowane w ścianie płaszczu (poza strefą uszkodzenia) sięgają swojej maksymalnej wartości w obszarze powyżej 1500 mm ponad dnem. Dlatego w celu uwzględnienia najbardziej „niebezpiecznego” przypadku (z punktu widzenia utraty nośności pałasza) wykonano analizę pola naprężeń gdy uszkodzenie usytuowane jest w obszarze maksymalnych naprężeń obwodowych – dolna krawędź strefy rozwarstwienia usytuowana jest na wysokości 1150 mm ponad dnem zbiornika.

Na rys. 4.22. pokazano rozkład przemieszczeń całkowitych w płaszczu, gdzie maksymalne wartości danego parametru wynoszą ok. 23,4 mm. W tym przypadku wartości naprężeń zredukowanych są porównywalne do tych, co występują w strefie z uszkodzenia innych obszarach (powyżej 1500 m) oraz wynoszą ok. 160 MPa (rys. 4.23), czyli ok. 50% $f_d=315 \text{ MPa}$.

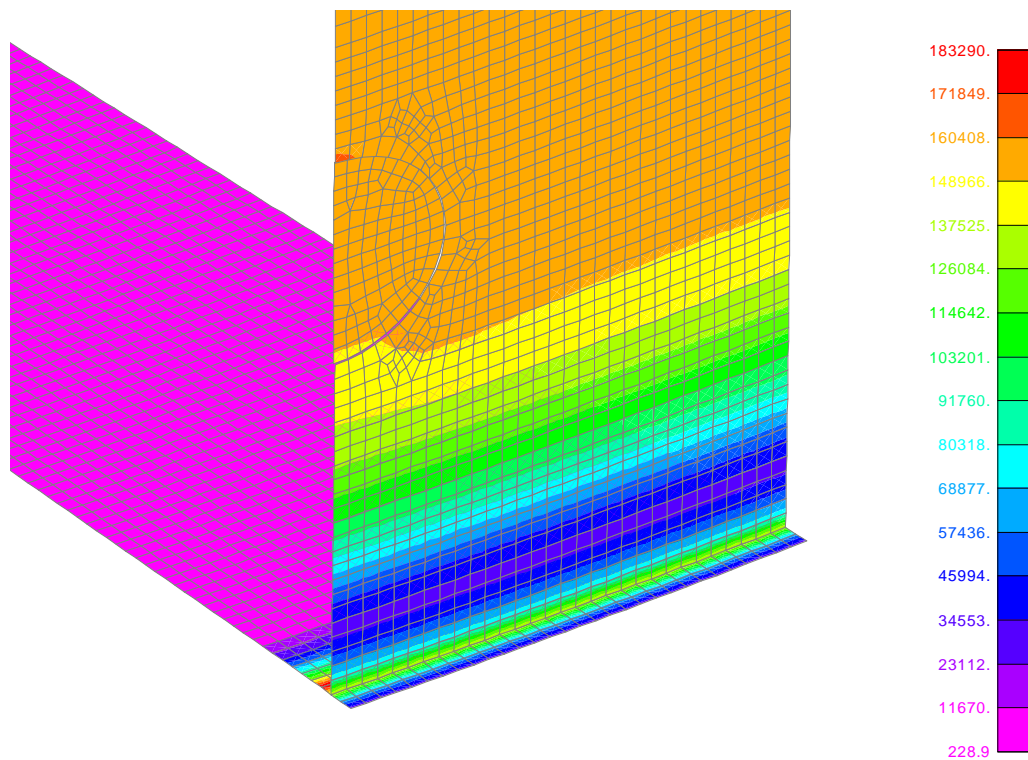


Rys. 4.22. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie, rozmieszczonym na wysokości 1150 mm od dolnej krawędzi płaszczu (skala skażona)

a)



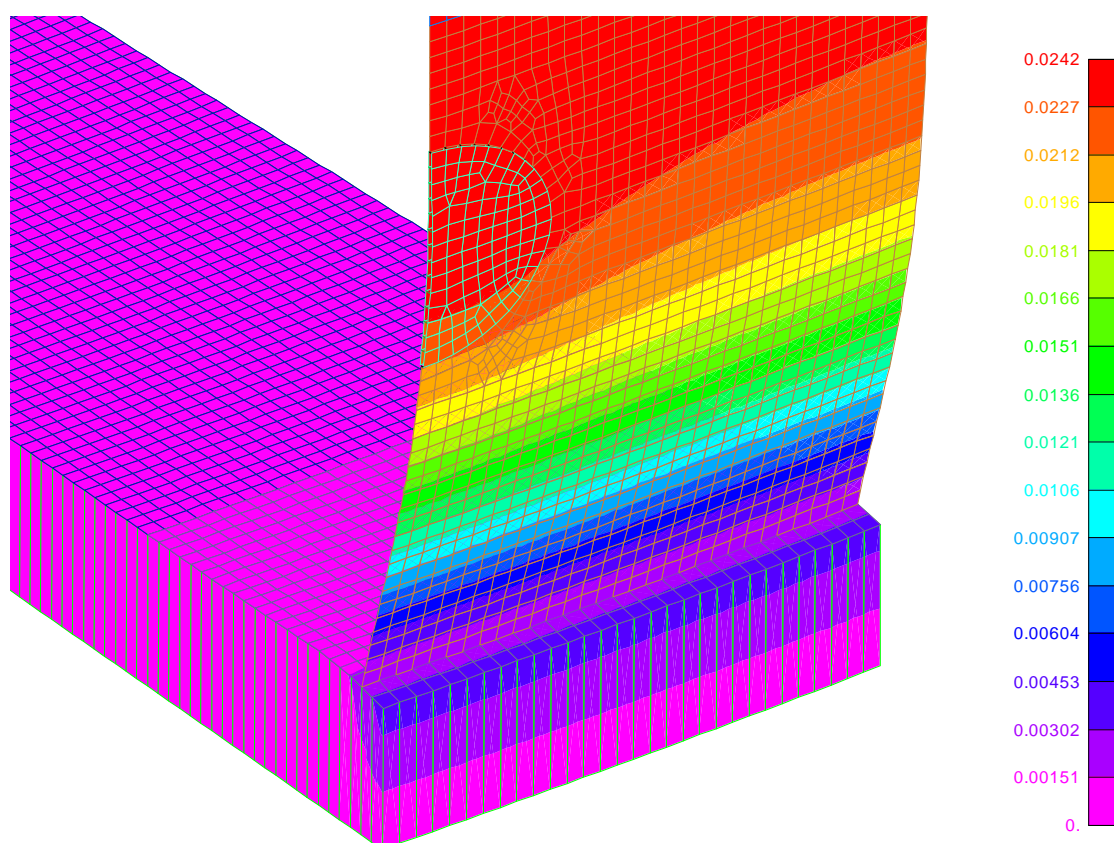
b)



Rys. 4.23. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie, rozmieszczonym na wysokości 1150 mm od dolnej krawędzi płaszczu: *a* – pokazano pole naprężeń od strony zewnętrznej płaszczu zbiornika, *b* – rozkład naprężeń w głównej płaszczyźnie rozwarstwienia (odsłonięto wewnętrzną część blachy płaszczu w strefie rozwarstwienia)

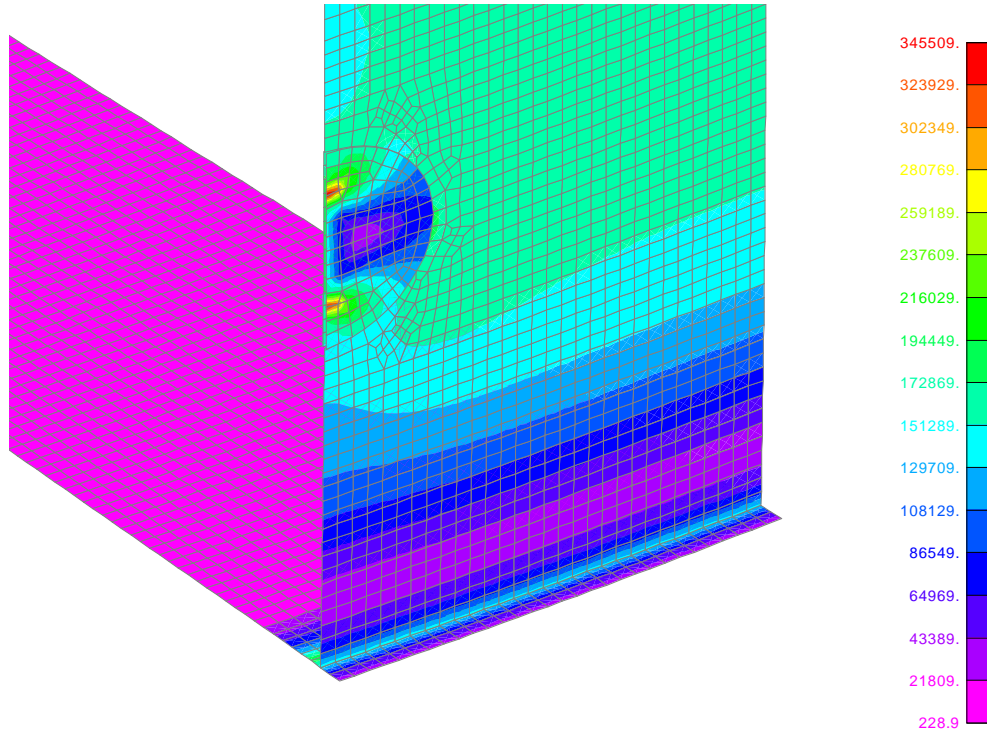
W przypadku defektu blachy z wyklinowaniem rozwarstwienia na zewnętrzną stronę płaszcza, usytuowanego na wysokości 1150 mm ponad dnem, maksymalne przemieszczenia całkowite są na poziomie ok. 24,2 mm (rys. 4.24).

W tym przypadku rozmieszczenia uszkodzenia mają miejsce największe wartości naprężeń zredukowanych, które występują w miejscu wierzchołka wyklinowania i wynoszą ok. 345 MPa (rys. 4.25), czyli 110% $f_d=315$ MPa, lecz nie przekraczają wartości granicy plastyczności $R_e=355$ MPa.

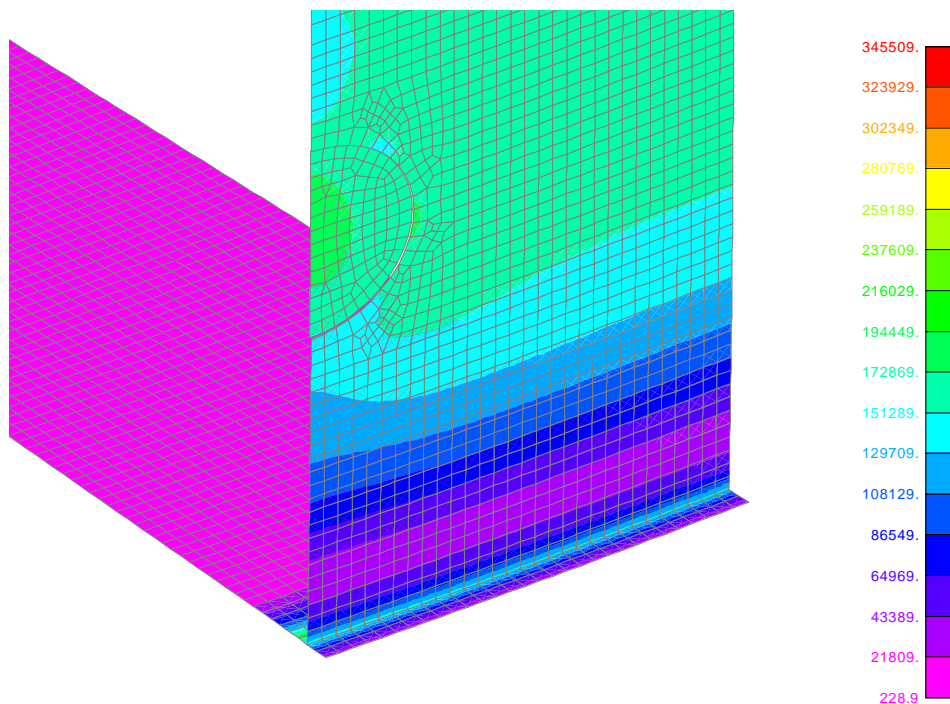


Rys. 4.24. Przemieszczenia całkowite D [m] w płaszczy zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem, rozmieszczonym na wysokości 1150 mm od dolnej krawędzi płaszcza (skala skażona)

a)



b)



Rys. 4.25. Naprężenia zredukowane wg. hipotezy Hubera Misesa σ_R [kPa] w płaszczu zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$ z uszkodzeniem typu rozwarstwienie z wyklinowaniem, rozmieszczonym na wysokości 1150 mm od dolnej krawędzi płaszczu: *a* – pokazano pole naprężeń od strony zewnętrznej płaszczu zbiornika, *b* – rozkład naprężeń w głównej płaszczyźnie rozwarstwienia (odsłonięto wewnętrzną blachę płaszczu w strefie rozwarstwienia)

PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 4

1. Z analizy numerycznej MES wynika, że samo rozwarstwienie nie powoduje znacznych zaburzeń pola naprężeń w blachach płaszczu. Z otrzymanych wyników widać, że żadna wartość zredukowanych naprężeń nie przekroczyła granicy plastyczności materiałów płaszczy zbiorników.
2. Istotne zaburzenia stanu naprężeń można zauważyć dla przypadku, gdy strefa rozwarstwienia znajduje się w miejscu występowania największych obwodowych sił normalnych w płaszczu, czyli na wysokościach ok. 800÷900 mm (zbiornik $V = 5000 \text{ m}^3$) oraz ok. 1500 mm (zbiornik $V = 50000 \text{ m}^3$).
3. W przypadku rozwarstwienia z wyklinowaniem na zewnętrzną stronę blachy płaszczu, które jest ukierunkowane wzdłuż pionowej osi symetrii strefy rozwarstwienia, ma miejsce lokalna koncentracja naprężeń w wierzchołkach wyklinowania.
4. Powstanie uszkodzenia typu rozwarstwienie z wyklinowaniem w miejscu łączenia się blach pierwszej cergi płaszczu z dnem zbiornika ($V = 10000 \text{ m}^3$), powoduje w tej strefie lokalną koncentrację pola naprężeń na poziomie 124 MPa.
5. Najbardziej „niebezpiecznym” przypadkiem, z punktu widzenia nośności konstrukcji pałasza, jest ten, w którym rozwarstwienie z wyklinowaniem znajduje się w obszarze występowania największych obwodowych sił normalnych. Dla zbiornika $V = 50000 \text{ m}^3$, w płaszczu którego dane uszkodzenie zostało zlokalizowane na wysokości 1150 mm ponad dnem, mają miejsce największe wartości naprężeń zredukowanych. Są one skoncentrowane w wierzchołku wyklinowania oraz wynoszą ok. 345 MPa. Naprężenia te są bliskie wartości granicy plastyczności materiału blach płaszczu zbiornika, a więc rozwój takiego uszkodzenia może spowodować stan awaryjny całej konstrukcji płaszczu zbiornika.

ROZDZIAŁ 5

UZUPEŁNIENIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ NOWYMI ELEMENTAMI TECHNOLOGICZNYMI ROZSZERZAJĄCYMI ZAKRES JEJ STOSOWANIA

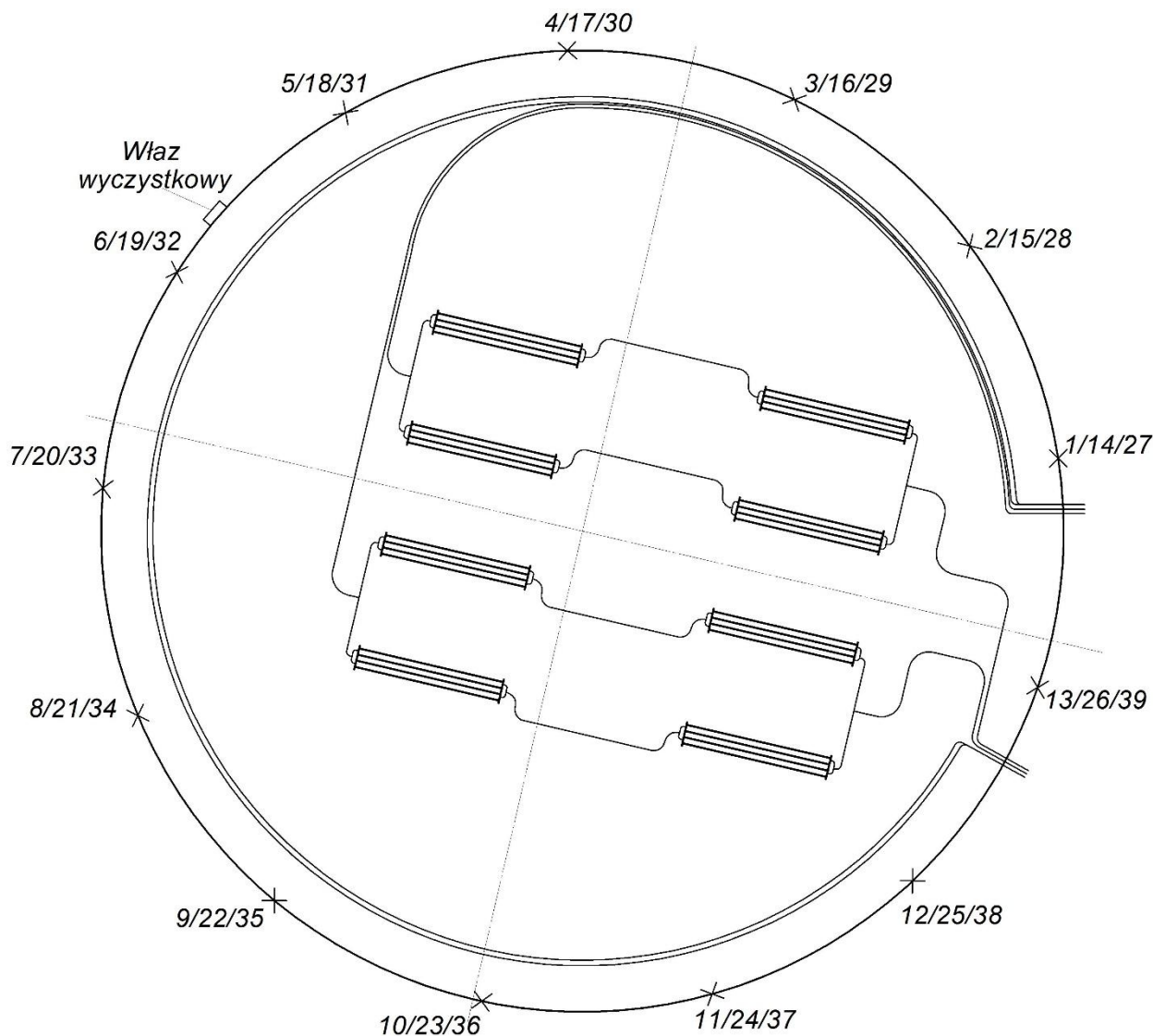
Metoda emisji akustycznej omówiona w punkcie 1.5.3 niniejszej dysertacji jest jedyną ze znanych obecnie metod, która bez wyłączania zbiornika z eksploatacji, pozwala na zlokalizowanie wad istniejących na jego dnie lub płaszczu. Metoda ta miała jednak dotychczas pewne ograniczenia w zastosowaniu. Można było posługiwać się nią tylko przy diagnozowaniu wad w zbiornikach, które w swoim wnętrzu nie miały wyposażenia ograniczającego swobodne rozchodzenie się fal akustycznych aktywizujących uszkodzenia. Przykładami takiego wyposażenia lub konstrukcji mogą być:

- węzownice grzewcze lub grzejniki (zapewniające płynność oleju napędowego w okresach niskiej temperatury zewnętrznej) jeżeli są zainstalowane w niewielkiej odległości od powierzchni dna.
- podwójne dna stalowe wykorzystywane w celu stworzenia warunków do podciśnieniowego monitorowania ewentualnych przecieków paliwa płynnego magazynowanego w zbiorniku mogącego spowodować skażenia gruntu w sąsiedztwie bazy zbiornikowej. Podwójne dna montowane są w odległości od siebie o ok 4,0mm czyli odległości odpowiadającej grubości siatki z drutu stalowego lub wysokości żeberk na blasze żeberkowej.

Nowe rozwiązania pozwalające również takie zbiorniki diagnozować metodą emisji akustycznej omawiane będą w niniejszym rozdziale.

5.1. Badanie metodą AE dna zbiornika magazynowego z wewnętrzną instalacją grzewczą

Badanie metodą AE dna wykonano na zbiorniku magazynowym z dachem stałym o pojemności $V = 40000 \text{ m}^3$ i wymiarach głównych: $d_w = 52425 \text{ mm}$, $h_c = 19950 \text{ mm}$ zbiornik jest izolowany, magazynowany jest w nim olej opałowy. Wewnątrz zbiornika na dnie zamontowano system grzejny (węzownica i grzejniki, rys. 5.1) na wysokości ok 0,3 m. W trakcie badania metodą AE zbiornik został napełniony do maksymalnego poziomu roboczego. Do rejestracji sygnałów fal akustycznych użyto wielokanałowego systemu pomiarowego AMSY-6 oraz niskoczęstotliwościowych czujników AE typu VS30-SIC, których rozmieszczenie pokazano na rysunkach 5.1 i 5.2.



LEGENDA

- 27÷39 – czujniki pomiarowe Emisji Akustycznej umieszczone 0,2 m powyżej dna zbiornika,
- 1÷13 – czujniki pomiarowe Emisji Akustycznej umieszczone 1,5 m powyżej dna zbiornika,
- 14÷26 – czujniki strzegące Emisji Akustycznej umieszczone 5,5 m powyżej dna zbiornika,

Rys. 5.1. Rozmieszczenie czujników pomiarowych AE na powierzchni zewnętrznej poboczniczy zbiornika magazynowego $V = 40000 \text{ m}^3$ z zaznaczonym osprzętem

W odróżnieniu od tradycyjnie wykorzystywanych w badaniu den metodą AE dwóch rzędów czujników, co zostało opisane w Rozdziale I, pkt. 1.5.3.1 i przedstawione na rysunkach 1.34 ÷ 1.36, na obwodzie zbiornika zamontowano trzy rzędy czujników AE na różnych wysokościach tj. 0,2, 1,5 i 5,5 m. Na rysunku 5.2 pokazano cel i sposób wykorzystania trzech rzędów czujników tj. strzegących (5,5 m) i pomiarowych (0,2 i 1,5 m), w badaniu zbiornika magazynowego z systemem grzejnym (węzownice + grzejniki) na dnie. Takie rozwiązanie miało na celu identyfikację źródeł AE generujących fale AE z dna i/lub z elementów systemu grzejnego.

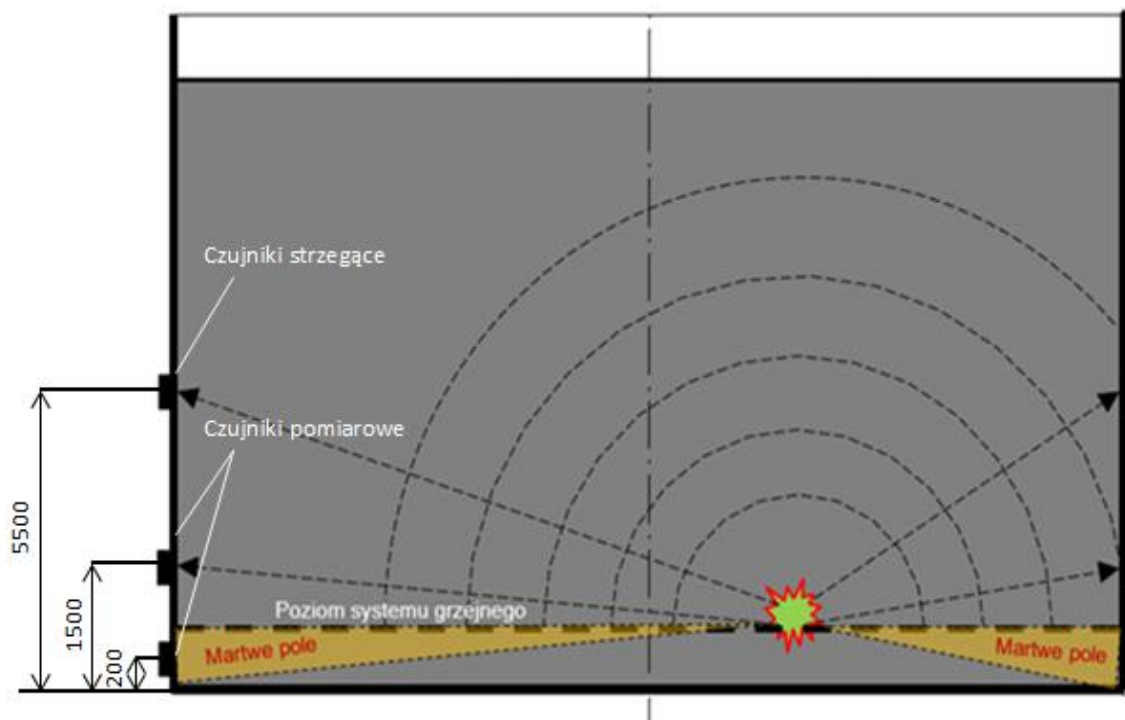
W przypadku generowania fal AE przez źródła znajdujące się na elementach grzejnych (5.2 a), w lokalizacji i identyfikacji tych źródeł brały udział czujniki pomiarowe z rzędu zamontowanego na wysokości 1,5 m oraz czujniki strzegące rzędu zamontowanego na wysokości 5,5 m, a czujniki pomiarowe z rzędu zamontowanego na wysokości 0,2 m znajdowały się w martwym polu (fale AE nie docierały do tych czujników ze względu na tłumienie i odbicia przez elementy grzejne). Takie przypadki miały miejsce zwłaszcza, gdy źródła fal AE znajdowały się bliżej środka zbiornika.

Natomiast w przypadku fal AE generowanych przez źródła znajdujące się na dnie zbiornika (5.2 b), w lokalizacji i identyfikacji tych źródeł brały udział czujniki pomiarowo z rzędu zamontowanego na wysokości 0,2 m oraz czujniki strzegące zamontowane na wysokości 5,5 m, a czujniki pomiarowe z rzędu zamontowanego na wysokości 1,5 m znajdowały się w martwym polu (fale nie docierały do tych czujników ze względu na tłumienie i odbicia przez elementy grzejne). Również miało to miejsce w przypadku, gdy źródła fal AE znajdowały się bliżej środka zbiornika.

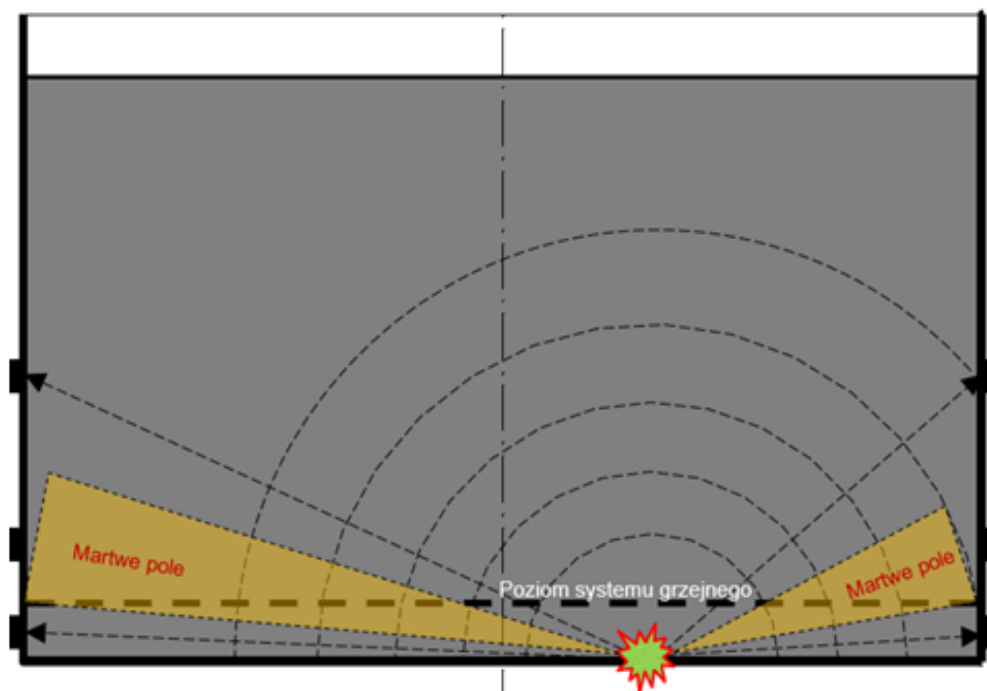
W przypadku, gdy źródła fal AE znajdowały się bliżej płaszcza zbiornika pola martwe praktycznie nie występowały, a w identyfikacji i lokalizacji wad brały udział wszystkie trzy rzędy czujników.

W wyniku przeprowadzonych badań metodą AE nie stwierdzono przecieków oraz istotnych uszkodzeń w dnie zbiornika magazynowego $V = 40000 \text{ m}^3$. Wykryto natomiast kilka źródeł AE zlokalizowanych na elementach systemu grzewczego (rys. 5.3). Z analizy numerycznej sygnałów wynika, że są to źródła fal AE generowane przez uszkodzenia w postaci korozji powierzchniowej i wżerowej materiału rur oraz elementów mocowania pakietu grzejników.

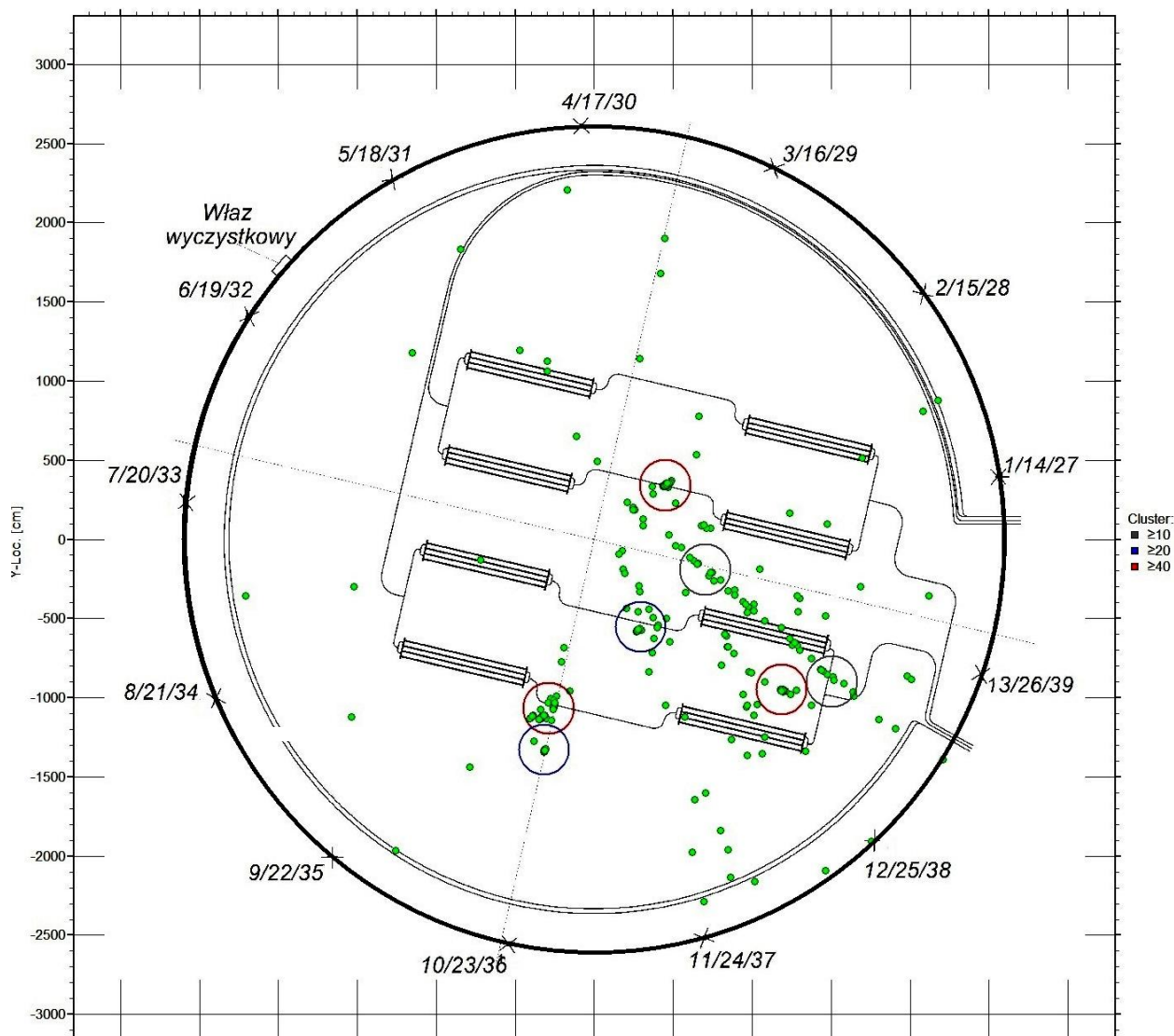
a)



b)



Rys. 5.2. Schemat wykorzystania trzech rzędów czujników AE do identyfikacji źródeł AE pochodzących z elementów systemu grzejnego (a) i dna zbiornika magazynowego (b)

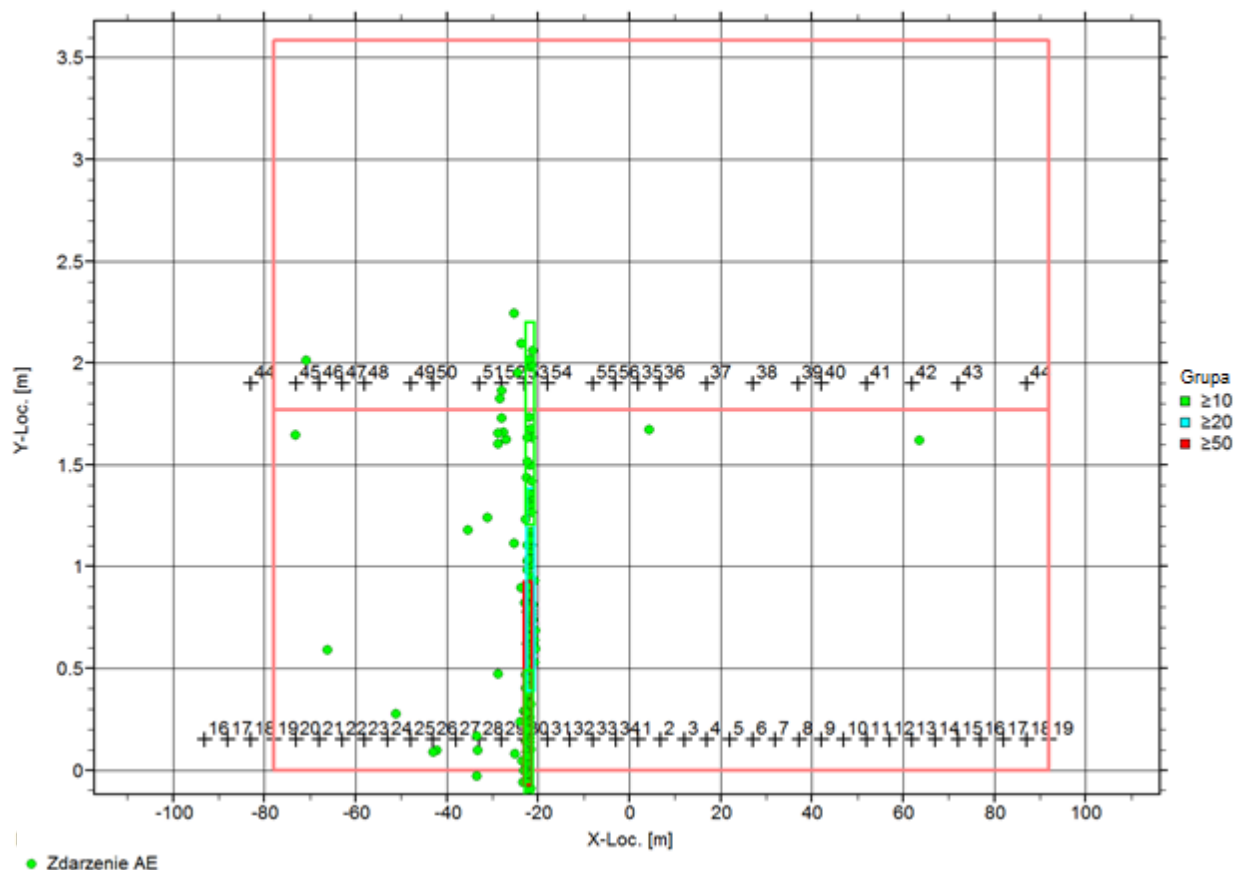


Rys. 5.3. Lokalizacja źródeł AE na dnie i elementach grzewczych zbiornika magazynowego $V = 40000 \text{ m}^3$ z węzownicą grzewczą

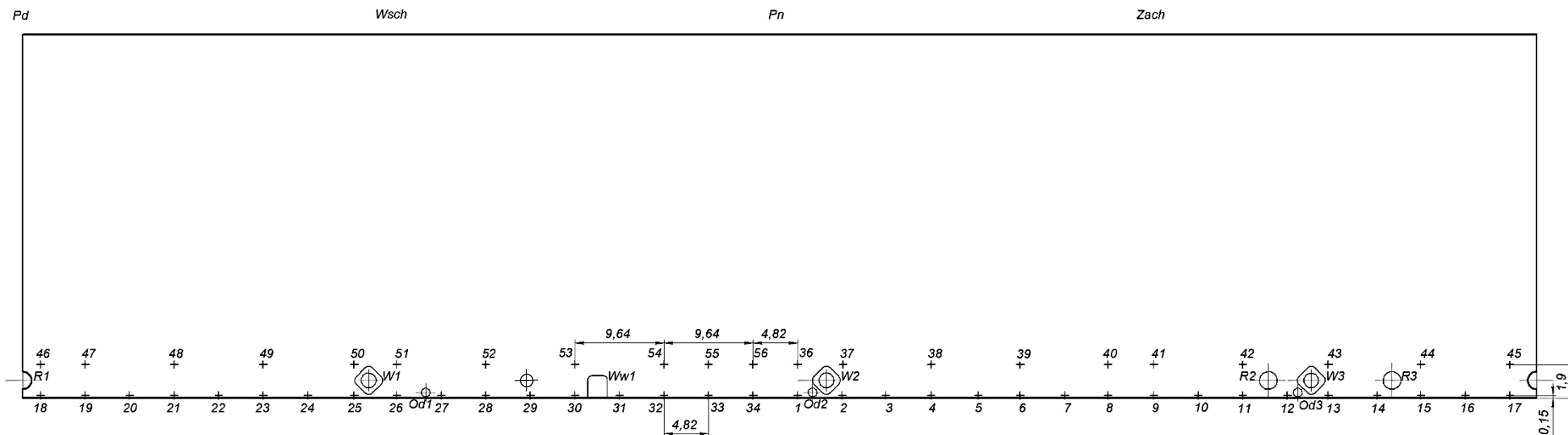
5.2. Badanie metodą AE pierwszego pierścienia płaszcza oraz strefy przydennej zbiornika magazynowego z wewnętrznymi grzejnikami

Badanie metodą AE blach pierwszego pierścienia płaszcza oraz strefy przydennej wykonano na zbiorniku magazynowym z dachem stałym. Charakterystyka zbiornika- patrz pkt. 5.1. W zbiorniku przechowywany jest olej opałowy, a wewnątrz zbiornika na dnie zamontowane jest pakiet grzejników na wysokości 0,3 m. W trakcie badania zbiornik był napełniony do maksymalnego poziomu roboczego oraz dodatkowo obciążany nadciśnieniem w postaci poduszki pneumatycznej (azot – N_2) o wartości 0,13 kPa. Do rejestracji AE użyto wielokanałowego systemu pomiarowego AMSY-6 oraz rezonansowych czujników AE typu VS150-RIC. Na obwodzie zbiornika zamontowano dwa rzędy czujników na wysokościach 0,15 i 1,9 m (rys. 5.5).

W wyniku przeprowadzonych badań metodą AE blach pierwszego pierścienia płaszczu oraz strefy przydennej zbiornika magazynowego $V = 40000 \text{ m}^3$, nie wykryto istotnych uszkodzeń mających wpływ na bezpieczną eksploatację zbiornika. Podczas badań w trakcie obciążania zbiornika nadciśnieniem (poduszka pneumatyczna), uaktywniona została nieszczelność w armaturze zaporowej na jednym z rurociągów zasilających zbiornik, co zostało wykryte i zlokalizowane (rys. 5.4). Nieszczelność ta została potwierdzona specjalnym przyrządem do badania szczelności armatury zaporowej.



Rys. 5.4. Lokalizacja źródeł AE pochodząca od armatury zaporowej w rzucie na pierwszym pierścieniu płaszczu zbiornika magazynowego $V = 40000 \text{ m}^3$



LEGENDA

Wejścia/wyjścia instalacji określono wg własnych pomiarów dokonanych na zbiorniku, a kierunki geograficzne określono orientacyjnie. Odległości podano w metrach.

1÷56 – czujniki pomiarowe Emisji Akustycznej,

W1÷W3 – włazy,

Ww1 – wąż wyczystkowy,

R1÷R3 – rurociągi,

Od1÷Od3 – odwodnienia dna.

Rys. 5.5. Rozmieszczenie czujników pomiarowych AE na płaszczu zbiornika magazynowego $V = 40000 \text{ m}^3$ z zaznaczonym osprzętem

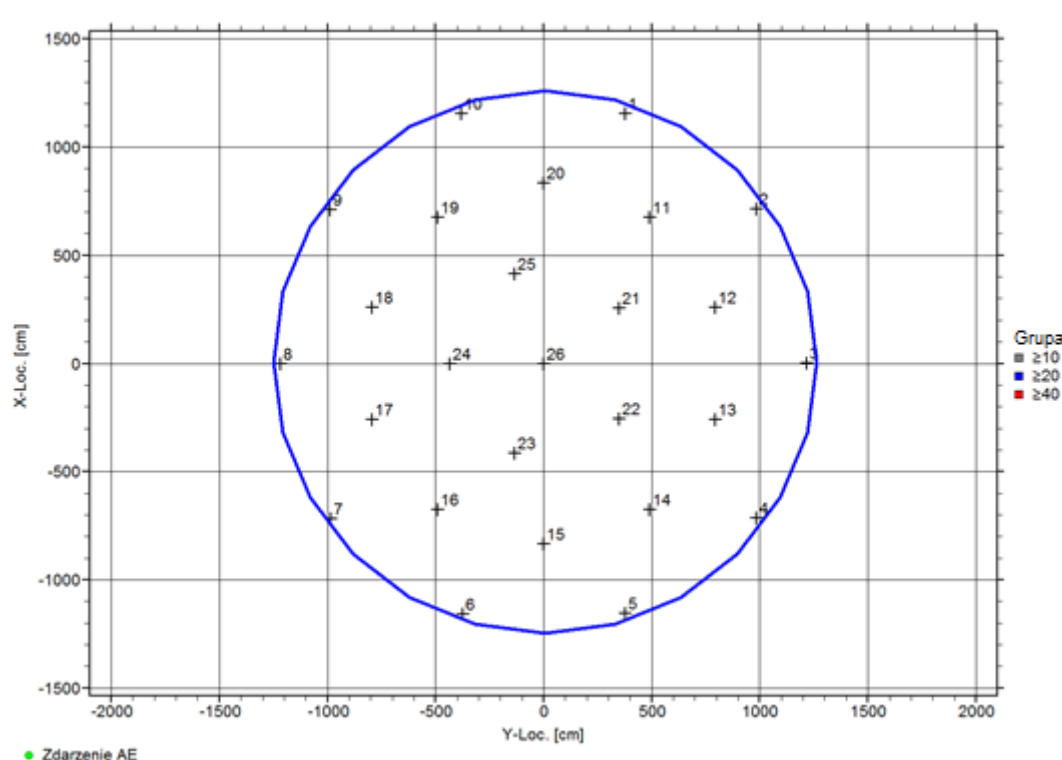
5.3. Badanie metodą AE nieszczelności w podwójnym dnie zbiornika magazynowego

5.3.1. Wykrywanie nieszczelności w podwójnym dnie zbiornika – zbiornik pusty (Wariant I)

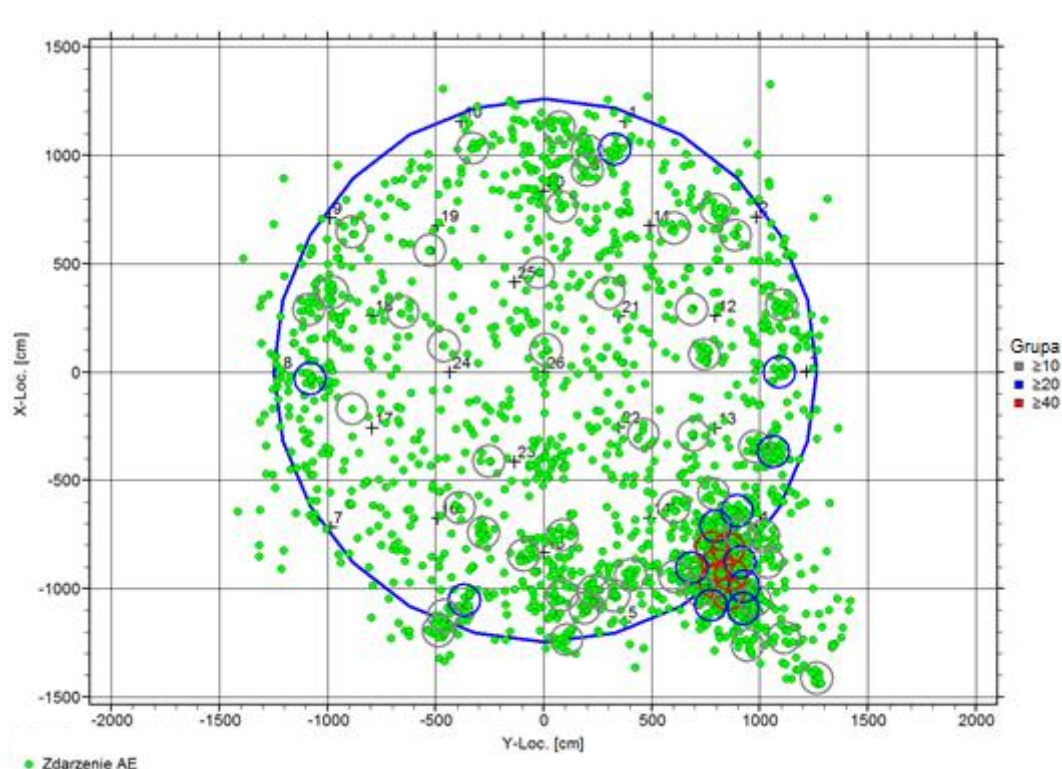
Badanie metodą AE podwójnego dna wykonano na dwupłaszczyznowym zbiorniku magazynowym o pojemności $V = 9600 \text{ m}^3$. Zbiornik przeznaczony jest na olej napędowy i ma dach stały. Główne wymiary płaszczy tego zbiornika to: płaszcz wewnętrzny o średnicy $d_w=24760\text{mm}$ i wysokości $h_w=21179\text{mm}$, zewnętrzny płaszcz osłonowy $d_w=28788\text{mm}$, $h_w=15500\text{mm}$. W omawianym zbiorniku, w trakcie jego eksploatacji system monitorowania podciśnieniowego wykazał nieszczelność w dnie, a w przestrzeni międzydennej został wykryty magazynowany produkt.

W celu zlokalizowania nieszczelności wykonano badanie metodą AE na opróżnionym i wyłączonym z eksploatacji zbiorniku. Na powierzchni dna zbiornika zamontowano 26 niskoczęstotliwościowych czujników pomiarowych typu VS30-SIC – rozmieszczenie czujników pokazano na rys. 5.6. W celu aktywacji nieszczelności w trakcie badania AE, zastosowano podciśnienie w przestrzeni między dennej na poziomie -0,5 bar. Niestety, przy takim poziomie różnicy ciśnień nie udało się uaktywnić nieszczelności – wprowadzone podciśnienie w przestrzeni międzydennej, pozostawało niezmiennie w okresie kilkunastu godzin monitorowania jego poziomu.

W wyniku przeprowadzonych badań metodą AE w trakcie obciążania przestrzeni międzydennej, zlokalizowano kilka źródeł sygnałów AE (rys. 5.7). Jednak żadne z nich nie odpowiadało nieszczelności dna zbiornika. W tym przypadku zastosowana metodyka pomiarowa okazała się nieskuteczna, przede wszystkim ze względu na brak aktywności przecieku w dnie.



Rys. 5.6. Rozmieszczenie czujników pomiarowych AE na powierzchni dna zbiornika magazynowego $V=9600\text{m}^3$



Rys. 5.7. Lokalizacja źródeł AE na dnie zbiornika magazynowego $V = 9600 \text{ m}^3$

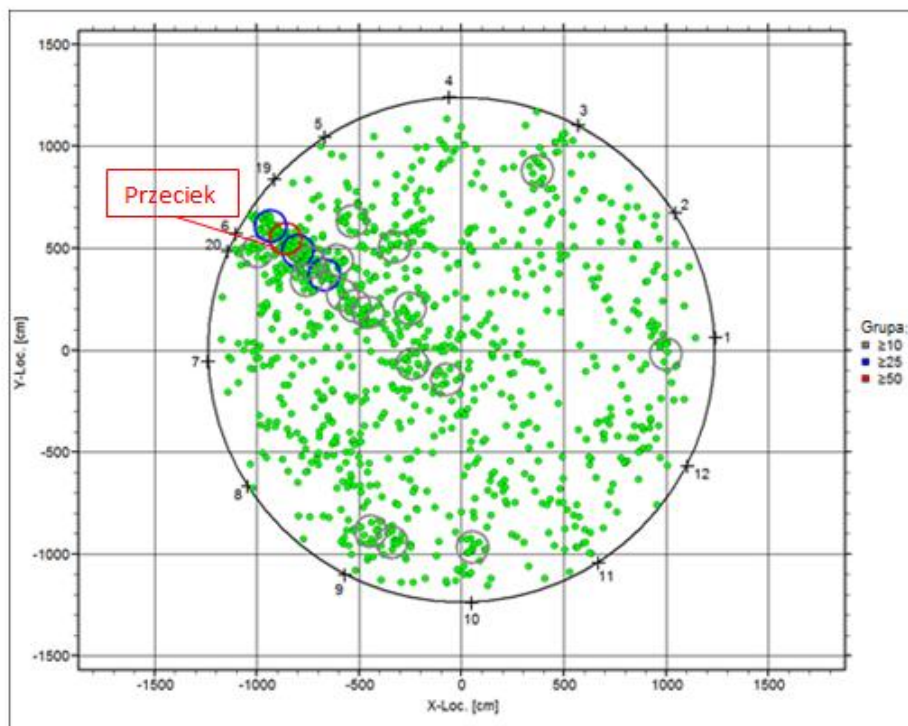
5.3.2. Wykrywanie nieszczelności w podwójnym dnie – zbiornik napelniony (Wariant II)

Brak powodzenia przy zastosowaniu wariantu I spowodował wprowadzenie wariantu II w celu wykrycia nieszczelności w podwójnym dnie ww. zbiornika wykonano kolejne badanie AE według nowej metodyki pomiarowej. W celu aktywacji nieszczelności w dnie podwójnym, zbiornik podczas badania napelniano sukcesywnie wodą, przy jednoczesnym zastosowaniu stałego podciśnienia w przestrzeni międzydennej na poziomie -0,5 bar – zastosowano specjalną pompę próżniową do wytworzenia podciśnienia na stałym poziomie. Zastosowane w przestrzeni między dennej podciśnienie oraz nadciśnienie ponad dnem wywołane wysokością słupa cieczy wewnątrz w zbiorniku, powodowały powiększanie różnicy ciśnień na dnie wewnętrznym.

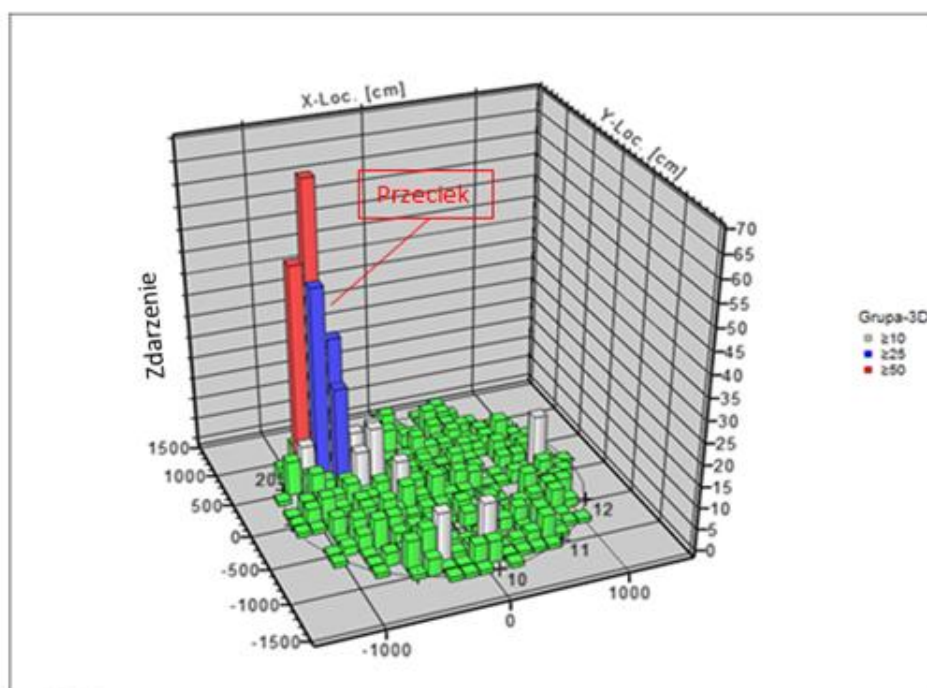
Na obwodzie zbiornika zamontowano dwa rzędy czujników AE (typu VS30-SIC) na wysokościach 1,0 i 4,0 m. Czujniki AE górnego rzędu spełniały funkcje strzegących, a pozostałe czujniki pomiarowych w celu wykrycia nieszczelności/przecieku w blachach dna.

W trakcie napelniania zbiornika wodą, przy poziomie ok 7 m (sumaryczna różnica ciśnień wynosiła ok. 1,2 bar), nieszczelność w dnie została aktywowana co spowodowało pojawienie się aktywnego przecieku. Badanie z zastosowaniem AE, pozwoliło na wykrycie oraz zlokalizowanie aktywnego przecieku w dnie wewnętrznym zbiornika. Lokalizację źródeł sygnałów AE generowanych przez aktywny przeciek pokazano na rysunkach 5.8 i 5.9.

Uzyskany wynik potwierdził, że podczas badania wg metodyki przedstawionej w punkcie 5.3.1, przy pustym zbiorniku i czujnikach zamontowanych na dnie, nie była możliwa aktywacja nieszczelności ze względu na zbyt małą różnicę ciśnień.



Rys. 5.8. Lokalizacja źródła AE (aktywnego przecieku) na dnie zbiornika magazynowego $V = 9600 \text{ m}^3$



Rys. 5.9. Lokalizacja przestrzenna źródła AE (aktywnego przecieku) na dnie zbiornika magazynowego $V = 9600 \text{ m}^3$

PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 5

1. Zaprezentowane nowe elementy rozwiązań technologicznych pozwoliły na skuteczne zastosowanie metody emisji akustycznej do diagnostyki wad w:
 - zbiorniku $V = 40000 \text{ m}^3$ z węzownicą i grzejnikami usytuowanymi pod dnem,
 - zbiorniku $V = 9600 \text{ m}^3$ z podwójnym dnem stalowym.
2. Inicjatorem i autorem koncepcji omówionych rozwiązań technologicznych uzupełniających metodę emisji akustycznej był autor dysertacji. Realizatorem prototypowego zastosowania tych nowych elementów technologicznych była przy współdziałaniu autora, firma dysponująca sprzętem i oprogramowaniem do tych badań.

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Zasadnicza liczba stalowych zbiorników magazynowych eksploatowana obecnie przez polskie przedsiębiorstwa przemysłu petrochemicznego i rafineryjnego została wybudowana w latach sześćdziesiątych XX wieku, czyli ma już ponad sześćdziesiąt lat. W tym okresie stal zastosowana wówczas na zbiorniki poddana została odmiennym wpływom destrukcyjnym od zewnętrznej strony zbiornika (wpływy atmosferyczne) i od strony wnętrza zbiornika (chemiczne oddziaływanie magazynowanej cieczy).
2. Zbiorniki magazynowe w przemyśle petrochemicznym i rafineryjnym konstruowane są najczęściej jako stalowe powłoki walcowe o głównej osi pionowej, mają najczęściej płaskie dna z minimalnym spadkiem od środka zbiornika ku obwodowi dna. Dachy zbiorników magazynowych mogą być stałe (kopulaste) albo pływające na powierzchni magazynowanej cieczy.
3. Zasadniczymi elementami konstrukcji takiego zbiornika, decydującymi o jego bezpiecznej eksploatacji są pobocznica walcowej powłoki (zwana płaszczem) i dno. Nośność tych zasadniczych elementów konstrukcji zbiornika może zostać obniżona po wieloletniej eksploatacji, zarówno przez wady hutnicze stali, z której zbiornik zbudowano (np. zawalcowane wtrącenia siarczków powodujące rozwarstwienia w blachach), jak i wady będące wynikiem eksploatacji (np. ubytki grubości blach spowodowane przez korozję). Szczególnie niebezpieczne może być sumowanie się tych destrukcyjnych wpływów w określonych miejscach konstrukcji nośnej zbiornika.
4. Badania próbek stali wyciętych z płaszcza zbiornika eksploatowanego przez 42 lata wykazały, że właściwości stali w tym okresie nie doznały istotnych, niekorzystnych zmian reologicznych. Należy jednak wyjaśnić, że w przemyśle petrochemicznym napełnianie i opróżnianie zbiorników magazynowych odbywa się z małą prędkością, a liczba cykli tych operacji nie jest dostatecznie duża, aby rozpatrywać zagadnienia z uwzględnieniem zmęczenia materiału.
5. Stosowane obecnie metody kontroli szczelności i nośności płaszcza i den zbiorników (omówione w rozdziale 1 niniejszej dysertacji) można uznać za dobre w aspekcie wykrywania wad i uszkodzeń mogących wywołać zagrożenie awaryjne. Z wymienionych metod tylko metoda emisji akustycznej pozwala na badanie zbiornika podczas eksploatacji (wypełnionych magazynowanym produktem). Ale i ta metoda ma

ograniczenia jeżeli wewnątrz zbiornika jest wyposażenie mogące zakłócić swobodne rozprzestrzenianie się fal akustycznych. Dlatego metodę tą należy rozwijać i uzupełniać.

6. Zaproponowane w niniejszej dysertacji elementy uzupełniające metodę emisji akustycznej pozwoliły na przeprowadzenie w PKN ORLEN w 2016 roku skutecznej kontroli szczelności den także w zbiorniku z podwójnym dnem stalowym (zbiornik $V = 9600 \text{ m}^3$) i zbiornika z węzownicą grzewczą zamontowaną bezpośrednio nad pojedynczym jego dnem (zbiornik $V = 40000 \text{ m}^3$).
7. Wpływ rozwarstwień w blachach płaszcza zbiornika na jego nośność został w niniejszej dysertacji oceniony na podstawie analizy numerycznej przeprowadzonej przy użyciu systemu obliczeń MES Femap NX NASTRAN v. 10.1.1. Jednakże model obliczeniowy musiał być opracowany przy założeniu uproszczeń, jako że rozwarstwienia występują nieregularnie i mają charakter rozproszony na powierzchni płaszcza zbiornika. Ponadto wymiary wady i jej kształt założono umownie na podstawie zaledwie kilku przykładów takich wad na istniejących zbiornikach. W związku z tym przeprowadzoną analizę należy traktować jako przybliżoną, ale dającą jednak pogląd na przedmiotowe zagadnienie.

Mapy pól naprężeń i przemieszczeń płaszcza zbiornika przedstawione w dysertacji wskazują, że wpływ rozwarstwień blach na nośność płaszcza zbiornika jest zróżnicowany i zależy od typu rozwarstwienia i lokalizacji tej wady. Można przyjąć następujące uogólnienie:

- jeżeli rozwarstwienie występuje na całym swym obszarze wyłącznie w środku grubości blachy płaszcza (a jest to przypadek najczęściej występujący) i zalega równoległe do kierunku działania głównych naprężeń eksploatacyjnych (wywołanych parciem hydrostatycznym magazynowanej cieczy) i ponadto nie jest zlokalizowane w strefie maksymalnego wyężenia blach płaszcza- **to nie wymaga ono natychmiastowych działań naprawczych. Przy kolejnej kontroli zbiornika powinno jednak zostać sprawdzone czy nie występuje propagacja wady-rozwarstwienia.**
- jeżeli rozwarstwienie blachy wyklinowuje się w kierunku zewnętrznej powierzchni blachy i jeżeli strefa jego zalegania znajduje się:
 - w miejscu występowania największych naprężeń zastępczych w płaszczu,
 - w strefie lokalnych zaburzeń błonowej pracy płaszcza (w sąsiedztwie połączenia płaszcza z dnem),

- w sąsiedztwie spoin pionowych w płaszczu zbiornika,
to naprężenia zredukowane mogą osiągnąć wartość nawet granicy plastyczności stali w sąsiedztwie występowania tej wady. W takim wypadku zbiornik należy opróżnić z magazynowanej cieczy i inną metodą nieniszczącą (np. ultradźwiękową) określić obszar płaszcza uszkodzony rozwarstwieniem. **Obszar ten należy wyciąć i zastąpić nową blachą o sprawdzonych, dobrych właściwościach stali.**

LITERATURA

1. Kourniotis S.P., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., 2000, Statistical analysis of domino chemical accidents, *Journal of Hazardous Materials*, 71, 239–252.
2. PN-EN 1993-4-2:2009 Eurokod 3 – ”Projektowanie konstrukcji stalowych” – Część 4-2: Zbiorniki.
3. Kuan, Siew Yeng Design, Construction and Operation of the Floating Roof Tank (Dissertation No. ENG 4111 & ENG 4112 Research Project). Queensland, USA, 2009.
4. Zbiorniki stalowe. <http://chodor-projekt.net/encyclopedia/zbiorniki-stalowe>
5. PN-88/H-84020 „Stal niestopowa konstrukcyjna ogólnego przeznaczenia”.
6. PN-H-84023-05:1989 „Stal określonego zastosowania – Stal niskowęglowa wyższej jakości, niskostopowa i stopowa – Gatunki”.
7. Ziółko J. Zbiorniki metalowe na cieczy i gazy, Arkady, Warszawa, 1986.
8. Lesiuk G., Szata M. Degradacja mikrostruktur elementów konstrukcyjnych pochodzących z mostów wzniesionych na przełomie XIX i XX wieku, *Zeszyty Naukowe WSOWL*, Nr 1 (155) 2010, S. 98-109.
9. PN-EN 970:1999 „Spawalnictwo – Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania wizualne”.
10. PN-EN ISO 17637:2011 „Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania wizualne złączy spawanych”.
11. PN-77/B-06200 „Konstrukcje budowlane. Wymagania badania”.
12. Ziółko J. Remonty i wzmacnianie zbiorników stalowych i rurociągów dalekosiężnych, XXIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 5-8 marca 2008, S. 393-448.
13. Boulton C. F. Acceptance Levels of Weld Defects for Fatigue Service, *Welding Journal*, No 1, 1977, P. 14-22.
14. Praca zbiorowa pod red. Prof. J. Pilarczyka, t. 1 Poradnik Inżyniera – Spawalnictwo, WNT, Warszawa 2003.
15. Pollard B. Cover R. Fatigue of Steel Weldments, *Welding Journal*, No 11, 1972, P. 544-554.
16. Robakowski T Wpływ wysokości nadlewu na wytrzymałość zmęczeniową złączy doczołowych z wadami wewnętrznymi, *Prace Instytutu Spawalnictwa*, Nr 3-4, 1986.
17. Nihei N. Sasaki E. Statistical Analysis For Correlation Between Scatter Of Fatigue Strength And That Of Reinforcement Shape Of Sm50a Butt Welded Joints, *Trans.N.R.I.M.* No 2, 1981, P. 9-17.

18. Harrison, J. D., "The basis for an acceptance standard for weld defects. Part 1: Porosity," *Metal Construction*, Vol. 4, No. 3, March 1972.
19. Harrison, J. D., "The basis for an acceptance standard for weld defects. Part 2: Slag Inclusions," *Metal Construction*, Vol. 4, No. 7, July 1972.
20. Robakowski T Wpływ podtopień na wytrzymałość zmęczeniową złączy doczołowych ze stali o podwyższonej wytrzymałości, *Prace Instytutu Spawalnictwa*, Nr 2, 1980.
21. Шахматов М. В. Оценка прочности механически неоднородных сварных соединений с трещиноподобными дефектами в условиях квазивязкого разрушения, *Научно-технический раздел, Сварочное производство 2000*, Nr 7 .С 5-8.
22. Neumann A. Thelen G. Kerbueberschweissen eine effektive methode von Erhoehnung Ermuendungs festigkeit. *Schweissen und Schneiden*, Nr 2, 1984.
23. Booth G. S. Improving the Fatigue Strength of Welded Joints by Grinding – Techniques and Benefits, *Met. Constr.*, No 7, 1986.
24. Lawrence F. V. Munce W. H. Fatigue Crack Initiation and Propagation in High-Yield-Strength Steel Weld Metal, *The Welding Journal*, No 5, 1973.
25. Skorupa M. Przewidywanie żywotności zmęczeniowej połączeń spawanych, *Zeszyty naukowe AGH. Mechanika. Zeszyt Nr 18*, Kraków 1989.
26. Truchon M. Application of Low-Cycle Fatigue Test Results to Crack Initiation from Notches *ASTM-STP 770*, 1982, S. 284-268.
27. Ziółko J., Supernak E., Naprawa zbiorników stalowych na paliwa płynne uszkodzonych wskutek korozji wżerowej. *Inżynieria i Budownictwo*, 1996 nr 7.
28. Wright B. H. Hastelter H. F. *Soc. Automotive Engineering*, 1953.
29. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 listopada 2005 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowania.
30. Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 7 grudnia 2012 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu (Dz. U. 2012 nr 0 poz. 1468).
31. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz.U. Nr 113, poz. 1211 z późn. zm).
32. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 31 marca 2008 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny

odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz. U. Nr 60, poz. 371).

33. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów trujących lub żrących (Dz.U. Nr 63, poz.572).
34. Marta Wojas Badania eksploatacyjne. Przyczyny powstawania wad eksploatacyjnych, ich wykrywanie i ocena, XII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane, 14-17 marca 2006, S. 2-9.
35. PN-EN 14127:2011 Badania nieniszczące – Ultradźwiękowe pomiary grubości.
36. Rojek B., Korneta A. Tor akustyczny i elektryczny defektoskopu ultradźwiękowego, XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 4-7 marca 2008.
37. Słania J., Balcerzak M. Spawanie zbiornika bezciśnieniowego do magazynowania oleju opałowego, Przegląd Spawalnictwa Nr 11, 2012, S. 42-47.
38. PN-EN ISO 9712:2012 Badania nieniszczące – Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących.
39. PN-EN 1330-9:2009 Badania nieniszczące – Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną.
40. PN-EN 13554:2011 Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne.
41. K.Ono: Trends of Recent Acoustic Emission Literature, Journal of Acoustic Emission, vol.12, 1994.
42. P. Tscheliesnig: Thirty years experience of industrial application of acoustic emission testing at TÜV Austria, Advances in Acoustic Emission - 2007 6th ICAE & 50th EWGAE Conference, Lake Tahoe, USA 2007.
43. I.Baran, M.Nowak, J.Schmidt, K.Ono: Potentials of AE application in testing industrial pipelines, Advances in Acoustic Emission, USA, 2007.
44. M.Nowak, I.Baran, J.Grześkowiak, S.Kisielewski: Zastosowanie metody emisji akustycznej do oceny stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych w aspekcie przepisów i wymagań dozorowych na przykładzie zbiornika kulistego, Dozór Techniczny, Nr 2, 2008.
45. I.Baran, M.Nowak, K.Ono: Acoustic emission analysis of the over-straining of pipes in a polyethylene reactor, European Conference of Acoustic Emission Testing (EWGAE), Kraków, Poland, 2008.
46. K.Ono: Acoustic Emission in Materials Research – A Review, Journal of Acoustic Emission, vol.29, 2011.

47. C.M.Nickolaus: Acoustic emission monitoring of aboveground storage tanks, *Materials Evaluation*, vol.46, 1988.
48. M.L.Medvedeva and T.D.Tiam: Classification of corrosion damage in steel storage tanks, *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 34. Nos. 9-10, 1998.
49. P.J.van de Loo, B.Herrman: How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study!. *NDT.net*, Vol.4 No 2, Feb.1999.
50. P.J. van de Loo, D.A.Kronemeijer: Screening of tank bottom corrosion with a single point AE detector, *AE simple*, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 18, 2000.
51. P.J. van de Loo, D.A.Kronemeijer: Acoustic emission tank testing, How to discriminate between the onset of corrosion and further stages of degradation?, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 18, 2000.
52. S.N. Gautrey, P.T. Cole, and H.J. Schoorlemmer: Case histories from ten years of testing storage tank floors using acoustic emission, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 18, 2000.
53. P.Tscheliesnig, G.Lackner: Inspection of flat bottomed storage tanks by acoustical methods. Classification of corrosion related signals, 24th EWGAE Conference, 2000.
54. C.J. Moss, R.R.Griffiths, A.Bishop, M.Dinon: Life Management of Above Ground Atmospheric Storage Tanks, 10th APCNDT Brisbane, Australia, 2001.
55. P.T.Cole, S.T.Gautrey: Development History of the Tankpac™ AE Tank Floor Corrosion Test, *NDT.net*, Vol.7 No 09, 2002.
56. G. Lackner and P.Tscheliesnig: Acoustic emission testing on flat bottomed storage tanks: How to condense acquired data to a reliable statement regarding floor condition, 25th EWGAE Conference, Prague 2002.
57. G. Lackner, P. Tscheliesnig: Field Testing of Flat Bottomed Storage Tanks with Acoustic Emission – A Review on the Gained Experience, 26th European Conference on Acoustic Emission Testing, Berlin, 2004.
58. S.Park; S.Kitsukawa, K.Katoh, S.Yuyama, H.Maruyama and K.Sekine: AE Source and Relation between AE Activity and Rate of Corrosion of Oil Tank Bottom Plate on Acidic Soils, *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 11, 2005.
59. S.Park; S.Kitsukawa, K.Katoh, S.Yuyama, H.Maruyama and K.Sekine: Development of AE Monitoring Method for Corrosion Damage of the Bottom Plate in Oil Storage Tank on the Neutral Sand under Loading, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 4, 2006.
60. I.Baran, M.Nowak, J.Schmidt: Zastosowanie nowoczesnych numerycznych metod analizy sygnałów emisji akustycznej do identyfikacji i oceny korozji w zbiornikach magazynowych. 35 KKBN, Szczyrk, 24-26.10.2006 oraz Badania Nieniszczące nr 03/2006.

61. H.Cho, A.Yonezu, M.Takemoto and H.Suzuki: Condition Monitoring of Storage Tanks by Acoustic Emission – Advanced Signal Processing for Corrosion Zone Location of Floor Plates, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol.1 no 7, 2007
62. G.Martin, J.Dimopoulos, J.Cacic: Acoustic Emission for Tank Bottom Monitoring, *Advanced Materials Research Vols. 41-42*, 2008.
63. I.Baran, G.Lackner: Analysis of corrosion processes and leaks in aboveground storage tanks in aspect of AE monitoring system, *NDT.net & EWGAE-30/ICAE-7*, Granada, Spain, 2012.
64. K.Fukunaga: Introduction to Statistical Pattern Recognition, 2nd Edition, ISBN 0-12-269851-7, Academic Press, Boston 1990.
65. H. Vallen, J. Vallen, T.Thenikl: New developments in the field of AE system, sensors & software, *NDT.net & EWGAE-29*, Vienna, Austria, 2010.
66. J.W.R.Boyd, J.Varley: The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, 2001.
67. R.S.Geng: Corrosion-related Acoustic Emission and its identification, 10th APCNDT Brisbane, Australia, 2001.
68. F.Ferrer, T.Faure, J.Goudiakas, E.Andres: Acoustic emission study of active–passive transitions during carbon steel erosion–corrosion in concentrated sulfuric acid, *Corrosion Science*, Vol. 44, 2002.
69. S.Yuyama, T.Nishida: Acoustic emission evaluation of corrosion damages in buried pipes of refinery, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 21, 2003.
70. P.Cole, J.Watson: Acoustic emission for corrosion detection, *www.ndt.net - 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - Bahrain, Manama, 27-30 Nov 2005*.
71. P.T.Cole, P.Watson: Acoustic Emission for Corrosion Detection, *Advanced Materials Research Vols. 13-14*, pp 231-236, 2006.
72. A.Prateepasena, C.Jirarungsateanb, and P.Tuengsookc: Identification of AE Source in Corrosion Process, *Key Engineering Materials Vols. 321-323*, 2006.
73. I.Baran, G.Lackner: Zagadnienia rozwoju techniki emisji akustycznej w zastosowaniu do oceny korozji zbiorników tankowców. 35 KKBN, Szczyrk, 24-26.10.2006 oraz Badania Nieniszczące nr 03/2006.
74. C.Jomdechaa, A.Prateepasena, P.Kaewtrakulpongb: Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types, *NDT&E International 40*, 2007
75. H.Cho, M.Takemoto: AE Monitoring of Soil Corrosion of Buried Pipe, *Journal of Acoustic Emission*, vol.25, 2007.

76. N.Kasai, K.Utatsu, S.Park, S.Kitsukawa, K.Sekine: Correlation between corrosion rate and AE signal in an acidic environment for mild steel, *Corrosion Science*, Vol. 51, 2009.
77. C.Jirarungstin, A.Prateepasen: Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission parameters, *Corrosion Science*, vol.52, 2010.
78. M.Nowak, I.Baran, J.Schmidt: The use of Acoustic Emission method for detection and location corrosion defects on railway steel bridges, *European Conference of Acoustic Emission Testing (EWGAE)*, Vienna, Austria, 2010.
79. PN-EN 15856:2010 „Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne badania AE przy wykrywaniu korozji w metalowym otoczeniu wypełnionym cieczą”.
80. PN-EN 14584:2006 „Badania nieniszczące – Badania emisją akustyczną – Sprawdzenie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej – Planarna lokalizacja źródeł AE”.
81. PN-78/H-04039 „Analiza chemiczna surówki, żeliwa i stali – Wytyczne ogólne”.
82. ASTM E1019-11 „Standard test methods for determination of carbon, sulfur, nitrogen, and oxygen in steel, iron, nickel, and cobalt alloys by various combustion and fusion techniques”
83. PN-ISO 3057:2000 „Badania nieniszczące – Badanie powierzchni technikami replik metalograficznych”.
84. PN-61/H-04503 – „Odczynniki do badania mikrostruktury stopów żelaza”.
85. PN-EN ISO 148-1:2010 Metale – „Próba udarności sposobem Charpy'ego – Część 1: Metoda badania”.
86. PN-79/H-04371 „Metale. Próba udarności w obniżonych temperaturach”.
87. *Metalożnawstwo* : praca zbiorowa / pod red. Marii Głowackiej ; Politechnika Gdańska.- Wyd. 3 zm. i popr.- Gdańsk : Wydaw. PG, 1996.
88. Lesiuk, G., Rabiega, J., Szata, M. Problem kruchości stali zgrzewnych w warunkach strukturalnej degradacji – badania statyczne, cykliczne i dynamiczne, *Zeszyty Naukowe WSOWL*, 2011, Nr 4, s. 254-269.
89. PN-EN ISO 6506-1:2006 „Metale – Pomiar twardości sposobem Brinella – Część 1: Metoda badań”.
90. PN-EN ISO 6892-1 – „Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”.
91. ASTM E976-10 – „Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response”.
92. Tensi H. M., The Kaiser-Effect and its Scientific Background, *J. Acoustic Emission*, 22 (2004) 1-16.

93. Cho H., Fukaura K., Ono K. Micro-Cracking and Breakdown of Kaiser Effect in Ultra High Strength Steels, *J. Acoustic Emission*, 21 (2003).
94. Rosochowicz K. Problemy pęknięcia materiałów i konstrukcji kadłubowych skłonnych do rozwarstwień, *Budownictwo okrętowe, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej* Nr 381, *Budownictwo okrętowe* Nr 40, 1984.
95. Ziółko J., Supernak E., Zagrożenie awarią w wyniku rozwarstwienia wyrobów walcowanych, *XIX Konferencja N-T „Awarye budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje, Politechnika Szczecińska, 1999.