

# Spis treści

Przedmowa . . . . .	XIX
Wykaz ważniejszych skrótów . . . . .	XXIII
<b>1. Ogólne zasady projektowania powłok z uwagi na stateczność . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. Wstęp . . . . .	1
1.2. Nośność wyboczeniowa powłoki walcowej . . . . .	5
1.2.1. Powłoka walcowa poddana ścisłkaniu osiowemu . . . . .	5
1.2.1.1. Wprowadzenie. . . . .	5
1.2.1.2. Stateczność powłoki walcowej ścisłkanej osiowo. Rozwiązanie analityczne . . . . .	7
1.2.1.3. Stateczność powłoki walcowej ścisłkanej osiowo. Rozwiązanie numeryczne . . . . .	11
1.2.1.4. Oszacowanie nośności wyboczeniowej powłoki walcowej ścisłkanej osiowo na podstawie zaleceń normowych . . . . .	12
1.2.1.5. Badania laboratoryjne nośności ścisłkanych wzdłużnie powłok walcowych . . . . .	15
1.2.1.6. Stateczność powłoki walcowej ścisłkanej osiowo – stany pokrytyczne . . . . .	17
1.2.2. Powłoka walcowa poddana ścisłkaniu promieniowemu . . . . .	21
1.2.2.1. Wprowadzenie. . . . .	21
1.2.2.2. Rozwiązanie analityczne . . . . .	21
1.2.2.3. Rozwiązanie numeryczne . . . . .	23
1.2.2.4. Oszacowanie nośności wyboczeniowej na podstawie zaleceń normowych . . . . .	24
1.2.3. Powłoka walcowa poddana skręcaniu . . . . .	27
1.2.3.1. Wprowadzenie. . . . .	27
1.2.3.2. Rozwiązanie analityczne . . . . .	27
1.2.3.3. Rozwiązanie numeryczne . . . . .	30
1.2.3.4. Oszacowanie nośności wyboczeniowej na podstawie zaleceń normowych . . . . .	31
1.3. Nośność wyboczeniowa powłoki stożkowej . . . . .	33
1.3.1. Wprowadzenie . . . . .	33
1.3.2. Stateczność powłoki stożkowej ścisłkanej osiowo . . . . .	34
1.3.3. Stateczność powłoki stożkowej obciążonej ciśnieniem na powierzchni bocznej . . . . .	41

1.3.4.	Oszacowanie nośności wyboczeniowej powłoki stożkowej ściskanej na powierzchni bocznej . . . . .	43
1.3.5.	Stateczność skręcaną powłoki stożkowej . . . . .	46
1.3.6.	Oszacowanie nośności wyboczeniowej skręcaną powłoki stożkowej. . . . .	48
1.3.7.	Nośność wyboczeniowa powłoki stożkowej – komentarze do zapisów normowych . . . . .	51
1.4.	Nośność wyboczeniowa powłoki sferycznej . . . . .	53
1.4.1.	Wprowadzenie . . . . .	53
1.4.2.	Stateczność powłoki sferycznej obciążonej ciśnieniem. . . . . Rozwiązanie analityczne. . . . .	55
1.4.3.	Stateczność powłoki sferycznej obciążonej ciśnieniem. . . . . Rozwiązanie numeryczne – analiza LBA . . . . .	62
1.4.4.	Nośność wyboczeniowa powłok sferycznych według zaleceń ECCS . . . . .	64
1.4.5.	Analizy GMNIA powłoki w postaci wycinka sfery . . . . .	72
1.4.5.1.	Wprowadzenie. . . . .	72
1.4.5.2.	Rodzaje rozpatrywanych imperfekcji . . . . .	73
1.4.5.3.	Generacja geometrii na potrzeby analizy GMNIA . . . . .	74
1.4.5.4.	Analizy GMNIA. . . . .	75
1.4.5.5.	Wnioski z wykonanych analiz. . . . .	81
1.5.	Projektowanie powłok stalowych według kryteriów normy PN-EN 1993-1-6 . . . . .	82
1.5.1.	Wprowadzenie . . . . .	82
1.5.2.	Stan graniczny uplastycznienia (LS1) . . . . .	84
1.5.2.1.	Projektowanie naprężeniowe . . . . .	84
1.5.2.2.	Projektowanie na podstawie globalnych analiz numerycznych MNA lub GMNA . . . . .	86
1.5.2.3.	Projektowanie bezpośrednie. . . . .	87
1.5.3.	Stan graniczny uplastycznienia cyklicznego (LS2) . . . . .	87
1.5.3.1.	Projektowanie naprężeniowe . . . . .	87
1.5.3.2.	Projektowanie na podstawie globalnych analiz MNA i GMNA . . . . .	88
1.5.3.3.	Projektowanie bezpośrednie. . . . .	89
1.5.4.	Stan graniczny wyboczenia (LS3) . . . . .	89
1.5.4.1.	Wprowadzenie. . . . .	89
1.5.4.2.	Wymiarowanie na podstawie stanu naprężenia . . . . .	90
1.5.4.3.	Wymiarowanie na podstawie globalnych analiz numerycznych MNA i LBA . . . . .	94
1.5.4.4.	Projektowanie na podstawie globalnej analizy numerycznej GMNIA . . . . .	97
1.5.5.	Stan graniczny zmęczenia wysokocyklowego (LS4) . . . . .	103
1.5.5.1.	Wprowadzenie. . . . .	103
1.5.5.2.	Projektowanie naprężeniowe . . . . .	104
1.5.5.3.	Sprawdzenie stanu granicznego zmęczenia (LS4) z wykorzystaniem numerycznej analizy globalnej LA lub GNA. . . . .	105
Normy . . . . .		106
Literatura. . . . .		107

<b>2. Silosy i zasobniki</b> . . . . .	111
2.1. Wprowadzenie . . . . .	111
2.2. Obciążenia silosów i zasobników . . . . .	119
2.2.1. Wprowadzenie . . . . .	119
2.2.2. Podstawowe pojęcia . . . . .	121
2.2.3. Normy związane z projektowaniem stalowych silosów i zasobników . . . . .	122
2.2.4. Klasyfikacja obciążeń . . . . .	122
2.2.5. Sytuacje obliczeniowe i kombinacje obciążeń wg PN-EN 1990 . . . . .	125
2.2.5.1. Kombinacje oddziaływań w klasie oceny oddziaływań 1. . . . .	127
2.2.5.2. Kombinacje oddziaływań w klasach oceny oddziaływań 2 i 3 . . . . .	127
2.2.5.3. Kombinacje oddziaływań w stanach granicznych nośności . . . . .	128
2.2.5.4. Kombinacje oddziaływań w stanach granicznych użyteczności . . . . .	132
2.2.5.5. Sytuacje projektowe przy różnych układach geometrycznych silosów . . . . .	134
2.2.5.6. Sytuacje obliczeniowe wynikające ze specyficznych rozwiązań . . . . .	139
2.2.6. Właściwości materiałów rozdrobnionych i zbrylonych . . . . .	140
2.2.7. Obciążenia pionowych ścian . . . . .	145
2.2.7.1. Silosy smukłe . . . . .	146
2.2.7.2. Silosy niskie i średniej smukłości . . . . .	159
2.2.7.3. Silosy retencyjne . . . . .	166
2.2.7.4. Silosy zawierające materiały sypkie napowietrzane . . . . .	167
2.2.7.5. Różnice temperatury między składowanym ośrodkiem a konstrukcją ściany silosu . . . . .	167
2.2.7.6. Obciążenia w silosach prostopadłościennych . . . . .	169
2.2.8. Obciążenia stożkowych lejów i płaskich den . . . . .	169
2.2.8.1. Klasyfikacja den silosów i zasady obliczania parć na dna silosów . . . . .	169
2.2.8.2. Metoda bazowa . . . . .	171
2.2.8.3. Parcie pionowe na płaskie dna w silosach smukłych . . . . .	172
2.2.8.4. Parcie pionowe na płaskie dna w silosach niskich i średniej smukłości . . . . .	173
2.2.8.5. Parcie w lejach stromych . . . . .	174
2.2.8.6. Parcie w lejach płaskich . . . . .	175
2.2.8.7. Metody alternatywne obliczania parcia w lejach . . . . .	176
2.2.8.8. Parcie na leje przy napełnianiu . . . . .	177
2.2.8.9. Leje w silosach z materiałem napowietrzonym . . . . .	179
2.2.9. Badania właściwości materiałów rozdrobnionych i zbrylonych . . . . .	179
2.2.9.1. Dobór i przygotowanie próbek . . . . .	179
2.2.9.2. Ciężar objętościowy $\gamma$ . . . . .	179
2.2.9.3. Współczynnik tarcia materiału o ścianę $\mu$ . . . . .	180
2.2.9.4. Kąt tarcia wewnętrznego materiału $\phi_i$ . . . . .	180
2.2.9.5. Iloraz parcia bocznego $K$ . . . . .	181
2.2.9.6. Kohezja $c$ . . . . .	181

2.2.9.7.	Bazowy współczynnik parcia lokalnego ośrodka $C_{op}$ . . . . .	181
2.2.10.	Ustalenie właściwości materiałów rozdrobnionych i zbrylonych . . . . .	182
2.2.11.	Obciążenia wybuchem pyłu. Zasady obliczeń na wybuchy . . . . .	183
2.3.	Podstawy projektowania silosów stalowych . . . . .	186
2.3.1.	Wymagania ogólne. . . . .	186
2.3.2.	Zarządzanie niezawodnością. . . . .	186
2.3.3.	Stany graniczne . . . . .	188
2.3.4.	Oddziaływania i czynniki środowiskowe . . . . .	189
2.3.5.	Właściwości materiałów i parametry geometryczne niezbędne w projektowaniu . . . . .	189
2.3.6.	Modelowanie silosu w celu określenia efektów oddziaływań . . . . .	190
2.3.7.	Efekty oddziaływań do weryfikacji poszczególnych stanów granicznych. . . . .	190
2.3.8.	Trwałość i odporność ogniowa. . . . .	191
2.3.9.	Właściwości materiałów . . . . .	191
2.3.10.	Podstawy obliczeń konstrukcyjnych i wymiarowania . . . . .	192
2.3.10.1.	Stany graniczne nośności . . . . .	192
2.3.10.2.	Analiza silosów o konstrukcji powłokowej. . . . .	192
2.3.10.3.	Analiza silosów o konstrukcji skrzyniowej . . . . .	195
2.3.10.4.	Równoważne cechy ortotropowe ścian z blach profilowanych . . . . .	196
2.3.10.5.	Wymiarowanie płaszczy silosów walcowych . . . . .	198
2.3.10.6.	Wymiarowanie stożkowych lejów wysypowych . . . . .	231
2.3.10.7.	Obliczanie stożkowych dachów silosów . . . . .	239
2.3.10.8.	Projektowanie styków przejściowych oraz pierścieniowych dźwigarów podporowych . . . . .	240
2.3.11.	Obliczanie silosów prostopadłościennych . . . . .	257
2.3.11.1.	Wprowadzenie. . . . .	257
2.3.11.2.	Klasyfikacja form konstrukcyjnych . . . . .	258
2.3.11.3.	Nośność nieuzębrowanych ścian pionowych . . . . .	259
2.3.11.4.	Nośność ścian silosów wykonanych z blach uźębrowanych lub profilowanych . . . . .	259
2.3.11.5.	Silosy z wewnętrznymi ściągnięciami . . . . .	262
2.3.11.6.	Nośność lejów ostrosłupowych . . . . .	265
2.3.11.7.	Żebra pionowe ścian silosów skrzyniowych . . . . .	266
2.3.11.8.	Stan graniczny użyteczności silosów skrzyniowych . . . . .	267
2.3.12.	Reguły uproszczone dla silosów walcowych w klasie konsekwencji CC1 . . . . .	267
2.3.12.1.	Kombinacje obciążeń dla klasy konsekwencji CC1 . . . . .	268
2.3.12.2.	Oszacowanie efektów oddziaływań . . . . .	268
2.3.12.3.	Ocena stanu granicznego nośności . . . . .	268
2.3.13.	Wyrażenia na naprężenia błonowe w lejach stożkowych . . . . .	274
2.3.13.1.	Równomierne ciśnienie $p_0$ na ściany stożka z towarzyszącym obciążeniem stycznym (tarcie) $\mu p_0$ . . . . .	275
2.3.13.2.	Ciśnienie zmienne liniowo w przedziale od wartości $p_1$ w wierzchołku do wartości $p_2$ w strefie przejściowej z towarzyszącym obciążeniem stycznym (tarcie) $\mu p$ . . . . .	275

2.3.13.3. Ciśnienie odcinkowo zmienne ze zmianą na poziomie $h_1$ i bez składowej stycznej . . . . .	275
2.3.13.4. Wzory zgodne z ogólną teorią rozkładu parcia w leju stożkowym . . . . .	276
2.3.14. Rozkład ciśnienia wiatru na ściany silosów walcowych. . . . .	277
Normy . . . . .	279
Literatura. . . . .	281
<b>3. Zbiorniki . . . . .</b>	<b>283</b>
3.1. Wstęp . . . . .	283
3.2. Charakterystyka konstrukcji powłokowych . . . . .	284
3.3. Konstrukcje z blach stalowych . . . . .	289
3.3.1. Rodzaje konstrukcji z blach . . . . .	289
3.3.2. Zbiorniki na paliwa płynne. . . . .	297
3.3.3. Zbiorniki na wodę . . . . .	306
3.3.4. Zbiorniki ze stali nierdzewnej . . . . .	308
3.3.5. Zbiorniki emaliowane . . . . .	314
3.4. Charakterystyka podstawowych norm dotyczących projektowania walcowych stalowych zbiorników na ciecze . . . . .	317
3.4.1. Normy wykorzystywane w obliczaniu zbiorników stalowych. . . . .	317
3.4.2. PN-EN 1991-4:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki . . . . .	318
3.4.3. PN-EN 1993-1-6:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych . . . . .	318
3.4.4. PN-EN 1993-4-2:2009. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-2: Zbiorniki . . . . .	321
3.4.5. PN-EN 14015:2010. Specyfikacja dotycząca projektowania i wytwarzania na miejscu zbiorników pionowych, o przekroju kołowym, z dnem płaskim, naziemnych, stalowych, spawanych, na ciecze o temperaturze otoczenia i wyższej . . . . .	326
3.4.6. PN-EN ISO 28765:2016. Emalie szkliste i porcelanowe. Projektowanie zbiorników stalowych, skręcanych śrubami, do przechowywania lub oczyszczania wody lub ścieków i osadów komunalnych lub przemysłowych . . . . .	332
3.4.7. PN-EN 13445-1:2014. Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe. . . . .	334
3.4.8. Podsumowanie . . . . .	334
3.5. Obliczanie zbiorników . . . . .	335
3.5.1. Obciążenia zbiorników. . . . .	335
3.5.2. Materiały . . . . .	337
3.5.3. Obliczenia statyczne i sprawdzanie stanów granicznych nośności . . . . .	338
3.6. Zbiorniki walcowe pionowe z dachem stałym . . . . .	342
3.6.1. Kształtowanie zbiorników i zalecenia konstrukcyjne . . . . .	342
3.6.2. Obliczanie płaszcza zbiornika . . . . .	347
3.6.3. Dach zbiornika . . . . .	350
3.6.4. Dno zbiornika . . . . .	357

3.7. Zbiorniki z dachem pływającym . . . . .	363
3.7.1. Kształtowanie zbiornika . . . . .	363
3.7.2. Obliczanie płaszcza zbiornika . . . . .	363
3.7.3. Dach zbiornika . . . . .	366
3.8. Zbiorniki wieżowe na wodę . . . . .	368
Normy i akty prawne . . . . .	381
Literatura i źródła internetowe . . . . .	383
<b>4. Rurociągi . . . . .</b>	<b>387</b>
4.1. Zagadnienia ogólne . . . . .	387
4.1.1. Informacje wstępne i klasyfikacja . . . . .	387
4.1.2. Części składowe rurociągów . . . . .	389
4.1.3. Ochrona przed korozją . . . . .	391
4.1.4. Szczególne zagadnienia projektowania rurociągów innych niż podziemne . . . . .	397
4.2. Podstawy projektowania . . . . .	399
4.2.1. Ogólna procedura . . . . .	399
4.2.2. Obliczanie naprężeń w rurociągach . . . . .	400
4.2.3. Uproszczona metoda sprawdzania stanu granicznego nośności . . . . .	404
4.2.4. Metoda analizy przy niespełnieniu warunków stosowania metody uproszczonej . . . . .	406
4.3. Stany graniczne . . . . .	407
4.3.1. Formy zniszczenia . . . . .	407
4.3.2. Stany graniczne nośności . . . . .	407
4.3.2.1. LS1: Rozerwanie . . . . .	407
4.3.2.2. LS2: Odkształcenia plastyczne . . . . .	407
4.3.2.3. LS3: Deformacja trwała i warunki stateczności. . . . .	408
4.3.2.4. LS4: Zmęczenie . . . . .	409
4.3.2.5. LS5: Wyciek w wyniku nieszczelności . . . . .	410
4.3.3. Stany graniczne użyteczności . . . . .	410
4.3.3.1. LS6: Owalizacja i ugięcia . . . . .	410
4.3.3.2. LS7: Drgania . . . . .	410
4.3.3.3. LS8: Nieszczelność . . . . .	410
4.4. Kombinacje oddziaływań i współczynniki częściowe . . . . .	411
4.4.1. Postanowienia ogólne . . . . .	411
4.4.2. Stany graniczne nośności . . . . .	411
4.4.3. Stany graniczne użyteczności . . . . .	412
4.5. Materiały i wyroby . . . . .	413
4.5.1. Stal rurociągu. . . . .	413
4.5.1.1. Właściwości mechaniczne i spawalnicze . . . . .	413
4.5.1.2. Ciągłość . . . . .	414
4.5.2. Stal spoiwa . . . . .	414
4.5.2.1. Właściwości mechaniczne. . . . .	414
4.5.2.2. Ciągłość . . . . .	414
4.5.3. Łączniki mechaniczne . . . . .	415
4.5.4. Rury i połączenia rur . . . . .	415

4.5.4.1.	Asortyment i wymagania . . . . .	415
4.5.4.2.	Odchyłki i karby technologiczne w rurach ze szwem. . . . .	420
4.5.4.3.	Pęknięcia rurociągów . . . . .	421
4.6.	Metody badań i projektowanie na podstawie badań . . . . .	424
4.7.	Modele obliczeniowe i metody analizy. . . . .	424
4.7.1.	Postanowienia ogólne . . . . .	424
4.7.2.	Modele prętowe i metody analizy. . . . .	426
4.7.2.1.	Uwagi wstępne . . . . .	426
4.7.2.2.	Podstawy teorii sprężystego pręta zakrzywionego . . . . .	427
4.7.2.3.	Modelowanie numeryczne w ujęciu MES . . . . .	428
4.7.3.	Metody analizy. . . . .	428
4.8.	Zagadnienia wymiarowania . . . . .	429
4.8.1.	Dobór optymalnej średnicy i wymaganej grubości ścianki rury. . . . .	429
4.8.2.	Sprawdzanie stanu granicznego nośności . . . . .	432
4.8.3.	Trwałość zmęczeniowa. . . . .	435
4.8.4.	Sprawdzanie stanu granicznego użyteczności . . . . .	437
	Normy . . . . .	438
	Literatura. . . . .	440
<b>Przykład I. Silos z blach nieprofilowanych . . . . .</b>		<b>443</b>
PI.1.	Dane projektowe. . . . .	443
PI.1.1.	Założenia . . . . .	443
PI.1.2.	Dane techniczne . . . . .	443
PI.2.	Oddziaływania. . . . .	444
PI.2.1.	Obciążenie ciężarem własnym . . . . .	444
PI.2.2.	Oddziaływania zmienne . . . . .	444
PI.3.	Naprężenia oraz siły wewnętrzne w części walcowej silosu . . . . .	452
PI.3.1.	Południkowa siła ściskająca $n_{xf}$ w ściance w stanie pełnego napełnienia silosu. . . . .	452
PI.3.2.	Południkowa siła ściskająca $n_{xe}$ w ściance w stanie opróżniania silosu . . . . .	452
PI.3.3.	Wypadkowa obciążenia lokalnego $F_{pe}$ oraz moment $M_{base}$ . . . . .	452
PI.3.4.	Naprężenia ściskające w dolnej części płaszczu wywołane momentem $M_{base}$ . . . . .	452
PI.3.5.	Naprężenia ściskające w dolnej części płaszczu wywołane parciem symetrycznym przy opróżnianiu . . . . .	453
PI.3.6.	Naprężenia ściskające w ściankach silosu od obciążenia śniegiem. . . . .	453
PI.3.7.	Naprężenia ściskające w ściankach silosu od ciężaru własnego . . . . .	453
PI.3.8.	Wartości charakterystyczne i obliczeniowe naprężeń całkowitych . . . . .	453
PI.4.	Naprężenia oraz siły wewnętrzne w fartuchu . . . . .	453
PI.4.1.	Moment $M_{base}$ od wypadkowej obciążenia lokalnego . . . . .	453
PI.4.2.	Naprężenia ściskające w dolnej części fartucha wywołane momentem $M_{base}$ . . . . .	454

PI.4.3.	Naprężenia ściskające w dolnej części fartucha wywołane parciem symetrycznym przy opróżnianiu . . . . .	454
PI.4.4.	Naprężenia ściskające w fartuchu od obciążenia śniegiem . . . . .	454
PI.4.5.	Naprężenia ściskające w fartuchu od ciężaru własnego . . . . .	454
PI.4.6.	Wartości charakterystyczne i obliczeniowe naprężeń całkowitych . . . . .	454
PI.5.	Naprężenia oraz siły wewnętrzne w leju . . . . .	455
PI.5.1.	Południkowa siła błonowa $n_{\phi h, Ed}$ na jednostkę obwodu na górnym brzegu leja . . . . .	455
PI.5.2.	Maksymalne obliczeniowe naprężenie ściskające $\sigma_{u0, Ed}$ . . . . .	456
PI.6.	Warunki nośności części cylindrycznych . . . . .	458
PI.6.1.	Wyboczenie płaszcza w warunkach osiowego ściskania . . . . .	458
PI.6.2.	Wyboczenie fartucha w warunkach osiowego ściskania . . . . .	461
PI.6.3.	Niestateczność w warunkach ciśnienia zewnętrznego . . . . .	462
PI.7.	Warunki nośności leja stożkowego . . . . .	463
PI.7.1.	Rozerwanie styku przejściowego . . . . .	463
PI.7.2.	Mechanizm plastyczny w strefie przejściowej . . . . .	464
PI.7.3.	Wyboczenie ścianki leja . . . . .	464
PI.8.	Warunki nośności styku przejściowego silosów podpartych równomiernie . . . . .	467
PI.8.1.	Nośność plastyczna na podstawie analizy sprężystej . . . . .	467
PI.8.2.	Nośność plastyczna na podstawie analizy plastycznej . . . . .	467
PI.8.3.	Nośność ze względu na wyboczenie giętne pierścienia styku przejściowego . . . . .	468
PI.8.4.	Nośność ze względu na wyboczenie giętno-skrętne pierścienia styku przejściowego . . . . .	469
<b>Przykład II. Silos z blach profilowanych poziomo . . . . .</b>		<b>471</b>
PII.1.	Dane projektowe . . . . .	471
PII.1.1.	Założenia . . . . .	471
PII.1.2.	Dane techniczne . . . . .	471
PII.2.	Oddziaływania . . . . .	472
PII.2.1.	Oddziaływania stałe . . . . .	472
PII.2.2.	Oddziaływania zmienne . . . . .	472
PII.3.	Naprężenia oraz siły wewnętrzne w części walcowej silosu . . . . .	480
PII.3.1.	Południkowa siła ściskająca $n_{xt}$ w ściance w stanie pełnego napełnienia silosu . . . . .	480
PII.3.2.	Południkowa siła ściskająca $n_{xe}$ w ściance w stanie opróżniania silosu . . . . .	481
PII.3.3.	Południkowa siła ściskająca $n_{xM}$ w ściance silosu spowodowana wypadkową obciążenia lokalnego w stanie opróżniania . . . . .	481
PII.3.4.	Południkowa siła ściskająca $n_x$ w ściance silosu spowodowana innym oddziaływaniami . . . . .	482
PII.3.5.	Równoleżnikowa siła rozciągająca $n_{\theta}$ w ściance w stanie pełnego napełnienia silosu (wartość obliczeniowa) . . . . .	483
PII.3.6.	Równoleżnikowa siła rozciągająca $n_{\theta e}$ w ściance w stanie opróżniania silosu (wartość obliczeniowa) . . . . .	483



PII.4.	Warunki nośności dla płaszcza silosu . . . . .	483
PII.4.1.	Nośność wyboczeniowa ścianki z pominięciem sztywności poszycia. . . . .	483
PII.4.2.	Nośność wyboczeniowa ścianki z uwzględnieniem sztywności poszycia. . . . .	485
PII.4.3.	Nośność wyboczeniowa ścianki, usztywnionej żebrami, traktowanej jak powłoka ortotropowa . . . . .	486
PII.4.4.	Nośność wyboczeniowa ścianki pod wpływem ciśnienia zewnętrznego, częściowego podciśnienia lub oddziaływania wiatru . . . . .	490
PII.4.5.	Nośność plastyczna poszycia silosu . . . . .	492
<b>Przykład III.</b>	<b>Zbiornik z dachem pływającym . . . . .</b>	<b>493</b>
PIII.1.	Dane projektowe. . . . .	493
PIII.2.	Kształtowanie zbiornika . . . . .	494
PIII.3.	Dach pływający dwupowłokowy . . . . .	495
PIII.3.1.	Oddziaływania stałe . . . . .	497
PIII.3.2.	Sprawdzenie warunków pływalności dachu . . . . .	498
PIII.3.2.1.	Przypadek obciążenia nr 1 – zanurzenie dachu w stanie eksploatacyjnym . . . . .	499
PIII.3.2.2.	Przypadek obciążenia nr 2 – stan awaryjny I – zanurzenie dachu przy obciążeniu wodą opadową . . . . .	499
PIII.3.2.3.	Przypadek obciążenia nr 3 – stan awaryjny II – zanurzenie dachu przy rozszczelnieniu dwóch sąsiednich komór . . . . .	499
PIII.3.3.	Sprawdzenie warunku nośności płyty dolnej dachu . . . . .	501
PIII.3.4.	Sprawdzenie warunku nośności żebra usztywniającego . . . . .	502
PIII.3.5.	Obliczenia modelu MES płyty dolnej dachu . . . . .	504
PIII.3.6.	Wymiarowanie podpieraka dachowego. . . . .	506
PIII.4.	Płaszcz zbiornika . . . . .	512
PIII.4.1.	Dobór grubości pasów płaszcza . . . . .	512
PIII.5.	Usztywnienie płaszcza zbiornika . . . . .	518
PIII.5.1.	Pierścień brzegowy . . . . .	518
PIII.5.2.	Oddziaływania wiatru. . . . .	518
PIII.5.3.	Pierścień wieńczący (wiatrowy) . . . . .	521
PIII.5.3.1.	Wstępne kształtowanie pierścienia z warunku sztywności . . . . .	522
PIII.5.3.2.	Obliczenie momentów i sił osiowych w pierścieniu oraz sprawdzenie warunków wytrzymałości i sztywności pierścienia . . . . .	524
PIII.5.4.	Pierścienie pośrednie . . . . .	528
PIII.5.4.1.	Sprawdzenie stateczności lokalnej płaszcza wg PN-EN 1993-4-2 . . . . .	529
PIII.5.4.2.	Sprawdzenie stateczności lokalnej płaszcza wg PN-EN 14015/J.4. . . . .	531

PIII.6. Dno zbiornika . . . . .	533
PIII.6.1. Przyjęcie konstrukcyjne grubości blach i wymiarów pierścienia obwodowego . . . . .	533
PIII.6.2. Sprawdzenie połączenia płaszcza z dnem . . . . .	535
PIII.6.2.1. Zebranie obciążeń . . . . .	536
PIII.6.2.2. Rozkład sił wewnętrznych w powłoce walcowej . . . . .	536
PIII.6.2.3. Sprawdzenie naprężeń zastępczych w styku płaszcza z dnem . . . . .	541
PIII.6.2.4. Sprawdzenie naprężeń zastępczych w płaszczu w miejscu maksymalnego momentu ujemnego . . . . .	542
PIII.6.2.5. Sprawdzenie naprężeń zastępczych w płaszczu w miejscu maksymalnej siły obwodowej . . . . .	543
PIII.6.2.6. Sprawdzenie naprężeń w pierścieniu obwodowym dna . . . . .	544
PIII.6.2.7. Sprawdzenie naprężeń zastępczych z uwzględnieniem podatności podłoża . . . . .	544
PIII.6.2.8. Obliczenie połączenia płaszcza z dnem wg PN-EN 1993-1-6/Załącznik C . . . . .	548
PIII.7. Sprawdzenie stateczności położenia zbiornika . . . . .	549
PIII.7.1. Określenie ciężaru skorodowanej konstrukcji zbiornika . . . . .	550
PIII.7.2. Określenie wypadkowej oddziaływania wiatru na płaszczyznę zbiornika . . . . .	552
PIII.7.3. Sprawdzenie stateczności pustego zbiornika na obrót . . . . .	552
PIII.7.4. Sprawdzenie stateczności pustego zbiornika na przesunięcie . . . . .	553
<b>Przykład IV. Zbiornik wieżowy . . . . .</b>	<b>555</b>
PIV.1. Przedmiot projektu . . . . .	555
PIV.2. Kształtowanie zbiornika wodnego. . . . .	555
PIV.2.1. Forma i konstrukcja. . . . .	555
PIV.2.2. Optymalizacja kształtu . . . . .	555
PIV.3. Dane projektowe. . . . .	559
PIV.4. Zestawienie obciążeń . . . . .	561
PIV.5. Obliczenia statyczne. . . . .	577
PIV.5.1. Założenia . . . . .	577
PIV.5.2. Etap pierwszy obliczeń statycznych – stan błonowy . . . . .	578
PIV.5.3. Etap drugi – Obliczenia statyczne według teorii zgięciowej – uwzględnienie zaburzeń stanu błonowego . . . . .	581
PIV.6. Wymiarowanie wybranych elementów konstrukcyjnych . . . . .	588
PIV.6.1. Poz. 1. – Płyta kołowa dachowa . . . . .	588
PIV.6.2. Poz. 2. – Dach stożkowy zbiornika wodnego . . . . .	588
PIV.6.3. Poz. 3. – Płaszczyznę zbiornika wodnego – powłoka stożkowa dolna . . . . .	591
PIV.6.4. Poz. 4. – Płyta kołowa denną . . . . .	598
PIV.6.5. Poz. 5. – Trzon konstrukcji wsporczej . . . . .	599
PIV.6.5.1. Zestawienie obciążeń. . . . .	599

---

PIV.6.5.2. Obliczenia statyczne . . . . .	600
PIV.6.5.3. Sprawdzenie stanów granicznych powłoki walcowej trzonu . . . . .	600
PIV.7. Stateczność położenia – sytuacja obliczeniowa EQU . . . . .	606
PIV.7.1. Stateczność na obrót . . . . .	606
PIV.7.2. Stateczność na przesunięcie poziome . . . . .	608
PIV.8. Obliczenia konstrukcji zbiornika programem ARSAP . . . . .	609
PIV.8.1. Założenia . . . . .	609
PIV.8.2. Rezultaty obliczeń MES . . . . .	610
PIV.8.3. Podsumowanie . . . . .	615
<b>Przykład V. Rurociąg magistrali przesyłowej . . . . .</b>	<b>617</b>
PV.1. Założenia . . . . .	617
PV.2. Dobór grubości ścianki rury i sprawdzenie naprężeń wg ST-IGG-0901:2013 . . . . .	618
PV.3. Obliczenia zgodnie z PN-EN 1993-4-3 – ciśnienie wewnętrzne + oddziaływania zewnętrzne . . . . .	620
PV.4. Obliczenia zgodnie z PN-EN 1993-4-3 – bez ciśnienia wewnętrznego + oddziaływania zewnętrzne . . . . .	630
PV.5. Analiza metodą elementów skończonych (MES) . . . . .	638
Normy i akty prawne do przykładów PI-PV . . . . .	645
Literatura do przykładów PI-PV . . . . .	646