

Експериментальна оцінка якості дослідної партії металевих балонів за натурних гідравлічних випробувань високим тиском. Повідомлення 2. Результати натурних циклічних випробувань

О. П. Гопкало^{a,1}, Р. І. Дмитрієнко^{b,2}, О. Л. Палієнко^b, А. Є. Литвиненко^b,
А. О. Перепічай^b

^a Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

^b Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

¹ apg1947@ukr.net

² dri1@ukr.net

Поява на ринку України балонів закордонного виробництва потребує проведення відповідних експериментальних перевірок їхньої якості для обґрунтування закупівлі. Експериментальними дослідженнями міцнісних параметрів дослідної партії балонів високого тиску (сім типорозмірів по п'ять балонів кожного типу), виготовлених із безшовних труб, установлено, що два типорозміри балонів не витримали стандартних циклічних випробувань пробним тиском. Ймовірною причиною руйнування є виробничий дефект невідповідності нормативному документу радіуса заокруглення увігнутого днища та значні деформації при навантаженні циклічним пробним тиском. Суттєві циклічні деформації днищ балонів сприяли зародженню і розвитку тріщин втомі у зоні концентратора напружень у кільцевому напрямку, що спричинило руйнування від дії поздовжніх напружень. Експериментально встановлено такі механізми руйнування балонів при стандартних випробуваннях: при статичному навантаженні зростаючим внутрішнім тиском руйнування відбувається від дії кільцевих напружень у поздовжньому напрямку балонів за механізмом квазістатичного з ознаками обмеження накопичених деформацій; при циклічному навантаженні пробним тиском руйнування відбувається від дії поздовжніх напружень за механізмом малоциклового втомного внаслідок зародження і розвитку до критичних розмірів тріщин утомі у зоні концентратора.

Ключові слова: гідравлічні випробування, внутрішній тиск, навантаження, напруження, деформація.

Вступ

У зв'язку з припиненням виробництва в Україні балонів високого тиску для технічних газів та різким підвищенням попиту на них під час пандемії COVID-19 виникла необхідність їхньої закупівлі за кордоном. Економічне обґрунтування для масової закупівлі металевих балонів високого тиску різної ємності та їхньої сертифікації в Україні регламентує проведення стандартних статичних і циклічних гідравлічних випробувань внутрішнім тиском. Стандартні процедури гідравлічних випробувань передбачають навантаження зростаючим тиском до руйнування, циклічні – пробним тиском на базі 12000 циклів. Детальні процедури випробувань можна знайти у відповідних нормативних документах (НД) виробників. Наприклад, ДСТУ EN ISO 9809-2019, BS EN 12245-2009, GB 28053-2011, ISO 11119-2002, ISO

11439-2000. Згідно з правилами виготовлення і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском, балони повинні бути розраховані таким чином, щоб напруження в стінках при гідравлічному випробуванні пробним тиском не перевищували 85...90% границі текучості металу за кімнатної температури для цієї марки сталі [1].

Пробний тиск є розрахунковим і може перевищувати робочий в 1,25...3 рази залежно від матеріалу, конструкції балонів та НД. Пробний тиск має становити менше півтора робочого, який, в свою чергу, визначає тиск газу в балоні при 15°C. У США найпоширенішим є коефіцієнт 5/3 (відношення пробного тиску до робочого). У ряді НД циклічні випробування проводять саме пробним тиском, очевидно, у разі неруйнування отримують велику гарантію циклічної довговічності та надійності порівняно з тими НД, де випробування проводять на рівні робочого тиску. Важливим є й те, що при більш високих навантаженнях велика ймовірність виявити квазістатичне руйнування внаслідок розкриття (розриву), що для балонів не допускається. А таке руйнування може мати місце у разі недосконалості, наприклад, форми увігнутих днищ, місць переходу однієї геометричної форми в іншу тощо. Локальні включення, каверни, тріщини тощо можуть також призводити до розгерметизації, але вона більшою мірою відбувається за механізмом втоми з утворенням свища, що менш небезпечно порівняно з розривом.

Згідно з [1] при серійному виробництві циклічні випробування проводять на двох, або на трьох балонах, або один балон із виробленої партії, або один балон із п'яти партій, тобто один на 1000 вироблених балонів. При незадовільних результатах випробування проводять на п'яти балонах. Балони повинні витримати 12000 циклів пробним гідравлічним тиском без розгерметизації (руйнування через розрив або витік внаслідок утворення свища). Для балонів, у яких пробний тиск складає понад 450 бар, допускається зменшення верхнього циклічного тиску до 2/3 пробного, при цьому балони повинні витримати 80000 циклів.

Детальні процедури випробувань можна знайти у відповідних нормативних документах виробників балонів. Робочий тиск у балоні визначається тиском газу в ньому при температурі 15°C, за деякими нормативними документами ця температура становить 20°C. Зрозуміло, що зі зростанням температури тиск газу в балоні також збільшується. Існують таблиці заправки балонів тиском залежно від температури газу, причому для різних газів вони дещо відрізняються. При максимальній температурі експлуатації балона тиск у ньому не повинен перевищувати пробний. У деяких випадках допускаються короточасні дії високих температур на балон, маємо на увазі, що ustalена температура в балоні не перевищує максимальну температуру експлуатації.

При циклічних випробуваннях призначаються інтервали (допуски) максимального і мінімального тиску в циклі. Для максимального: від номінального циклічного тиску до +3% або +10 бар залежно від того, що менше. Для мінімального: від нуля до 10% номінального циклічного тиску, але не більше 30 бар. Також при випробуваннях частота зміни тиску не повинна перевищувати 0,25 Гц (15 цикл/хв), середня температура на зовнішній поверхні балонів не вища за 50°C.

Мета і завдання досліджень

Поява на ринку України балонів закордонного виробництва потребує проведення відповідних експериментальних перевірок їхньої якості та надійності для обґрунтування закупівлі. Експериментальну перевірку якості поставленої пробної партії балонів проводили шляхом випробування на статичну і циклічну міцність у спеціалізованій сертифікованій лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України за участю спеціалістів Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.

Методика досліджень циклічної міцності балонів

Дослідженню підлягали 35 балонів високого тиску, виготовлених із безшовних труб (сім типорозмірів по п'ять балонів кожного типу). З кожного типорозміру передбачено випробування зростаючим гідравлічним внутрішнім тиском до руйнування двох балонів та на циклічне навантаження пробним тиском трьох балонів. Стандартні випробування циклічним гідравлічним внутрішнім пробним тиском дослідної партії балонів проводили згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 9809-3:2019 на спеціально розробленому випробувальному стенді [2]. Пробний тиск (P_p) сягав 5/3 робочого тиску (P_r). Останній складав 150 бар, пробний тиск – 250 бар. Згідно з НД база циклічних випробувань гідравлічним пробним тиском складала 12000 циклів. Слід зауважити, що саме у цьому діапазоні числа циклів навантаження знаходиться границя переходу від малоциклового квазістатичного до малоциклового руйнування від втоми вуглецевих сталей.

Кожен із 21 балона, відібраних для циклічних гідравлічних випробувань, перед початком пройшов навантаження пробним тиском P_p у “водяному жакеті” з визначенням коефіцієнта залишкового розширення. При цьому балони раніше тиском не навантажувалися. Вони були зібрані у послідовну гірлянду. Балони (21 шт.) навантажували циклічно змінним гідравлічним внутрішнім пробним тиском. Загальний об'єм балонів сягав 273,8 л.

На рис. 1 зображено зібрані у гірлянду балони для циклічних випробувань пробним тиском 250 бар.



Рис. 1. Зібрані у гірлянду балони для циклічних випробувань пробним тиском.

Фактичні параметри навантаження такі: максимальний тиск циклів – 249,5...255,4 бар (у середньому ~252,4 бар), мінімальний тиск циклів – 15,2...17,7 бар (у середньому ~16,3 бар), розмах циклу – 231,8...240,2 (у середньому ~236,1 бар), температура води, що виходить із системи, – 25,5...41°C, час одного циклу – 0,3969 хв (23,82 с), частота навантаження – 2,52 цикл/хв (151,16 цикл/год), час навантаження – приблизно 16 с, час зниження тиску приблизно 7 с.

На рис. 2 приведено скриншот діаграми час–тиск при завершенні циклічних випробувань – 12044 циклів навантаження пробним тиском 250 бар.

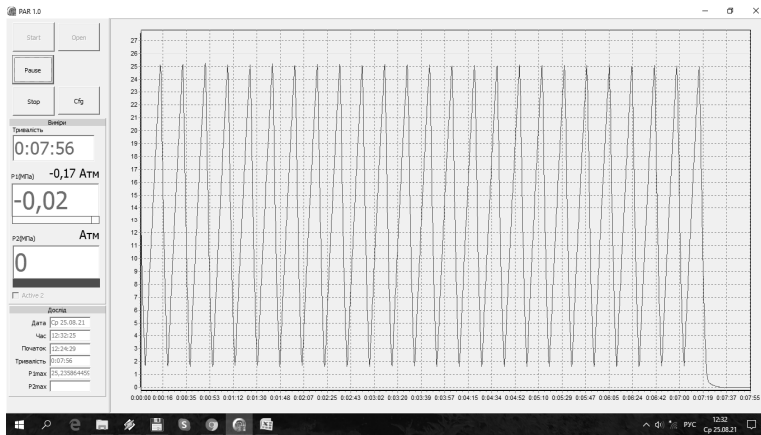


Рис. 2. Скриншот діаграми час–тиск при завершенні циклічних випробувань.

Для створення циклічного тиску використовували насос ГН 600-800. Максимальний тиск – 60 МПа, продуктивність – 800 л/год.

Результати експериментальних досліджень

Стандартна процедура навантаження гідравлічним зростаючим внутрішнім тиском до руйнування та циклічним пробним тиском передбачає попереднє навантаження балонів пробним тиском у водяному жакеті. У табл. 1 приведено дані параметрів балонів при навантаженні пробним тиском у водяному жакеті.

Проведені циклічні випробування пробним тиском дослідної партії балонів показали, що балони типорозміру 2 (№№ 2.1...2.3) і 5 (№№ 5.1...5.3) не витримали базового (12000) числа циклів навантаження і їхнє руйнування відбувалось біля дна. Інші балони витримали 12044 циклів без руйнування і протікання. Руйнування від втоми відбувалось у поперечному напрямку донної частини балону (рис. 3) від дії поздовжніх напружень у зоні концентратора напружень. При циклічному навантаженні пробним тиском відношення пробного тиску до тиску початку текучості металу балона при випробуваннях зростаючим внутрішнім тиском до руйнування складало 0,59...0,86.

У табл. 2 приведено дані периметрів (П) балонів 5.1, 5.2, 5.3 до і після першого навантаження пробним тиском у водяному жакеті при циклічних випробуваннях у перерізах циліндричної частини: П1 – біля горловини; П3 – середини; П5 – дна балона.

Таблиця 1

Дані розміру Н1 у вихідному стані, Н1ВЖ у водяному жакеті під пробним тиском та Н1к після ВЖ за відсутності тиску

V, л	D, мм	№ типорозміру балона	№ балона	Вид випробувань	Н1 (вихідний стан), мм	0,12×D, мм	Н1ВЖ при $P_{\Pi} \neq 0$, мм	Н1к після ВЖ ($P_{\Pi} = 0$), мм
2	108	1	1.1	Ц	18,1	12,96		
			1.2	Ц	18,0			
			1.3	Ц	18,1			
			1.4	Г	18,0		17,6	15,6
			1.5	Г	17,9		(Δ2 мм)	15,7
3,2	120	2	2.1	Ц	19,5	14,40		
			2.2	Ц	19,3			
			2.3	Ц	19,2			
			2.4	Г	19,0		18,0	15,0
			2.5	Г	19,3		(Δ3 мм)	15,8
5	140	3	3.1	Ц	22,1	16,80		
			3.2	Ц	22,3			
			3.3	Ц	22,3			
			3.4	Г	21,8		20,6	19,4
			3.5	Г	22,0		(Δ1,2 мм)	20,4
10	140	4	4.1	Ц	21,7	16,80		
			4.2	Ц	22,0			
			4.3	Ц	20,3			
			4.4	Г	22,6		21,3	20,0
			4.5	Г	21,9		(Δ1,4 мм)	19,9
10	159	5	5.1	Ц	25,9	19,08		
			5.2	Ц	26,3			
			5.3	Ц	26,0			
			5.4	Г	26,4		24,6	20,5
			5.5	Г	26,4		(Δ4,4 мм)	20,2
20	180	6	6.1	Ц	27,3	21,60		
			6.2	Ц	26,9			
			6.3	Ц	27,4			
			6.4	Г	27,0		25,7	23,2
			6.5	Г	26,6		(Δ2,6 мм)	23,1
40	219	7	7.1	Ц	27,2	26,28		
			7.2	Ц	26,7			
			7.3	Ц	26,8			
			7.4	Г	26,9			25,5
			7.5	Г	27,5			25,5

Примітка. V – об'єм балона; D – діаметр балона; Ц – циклічні випробування; Г – статичні випробування; $H1 \geq 0,12 \times D$.

У табл. 3 приведено результати циклічних випробувань балонів пробним тиском 250 бар на базі 12000 циклів.



Рис. 3. Фото зруйнованих балонів після циклічних гідравлічних випробувань у вихідному стані та після руйнування.

Таблиця 2

Периметри балонів 5.1, 5.2, 5.3 до (над рискою) та після (під рискою) першого навантаження пробним тиском при циклічних випробуваннях у перерізах П1, ПЗ, П5

№ перерізу	Локація перерізу	Периметр, мм			Деформація, %		
		№ балона					
		5.1	5.2	5.3	5.1	5.2	5.3
П1	У верхній частині	<u>499,0</u>	<u>498,5</u>	<u>495,5</u>	0,20	0,30	0,10
		500,0	500,0	498,0			
П3	Середина	<u>501,0</u>	<u>501,5</u>	<u>500,0</u>	0,10	0,10	0,10
		501,5	501,5...502,0	500,5			
П5	Біля дна	<u>501,0</u>	<u>501,0</u>	<u>499,0</u>	0,10	0,10	0,20
		501,5	501,5	500,0			

Таблиця 3

Результати циклічних випробувань балонів пробним тиском 250 бар

№ типорозміру балона	№ балона	N	ΔN	Параметри балона
5	5.3	2942	0	V=10 л D=159 мм
	5.2	3144	202	
	5.1	3382	238	
2	2.1	5576	0	V=3,2 л D=120 мм
	2.3	6953	1377	
	2.2	7584	631	
	Напрацювання	12044		

Примітка. N – число циклів, яке витримав балон; ΔN – різниця у кількості циклів порівняно з попереднім балоном того ж типу.

Руйнування від втоми відбувалось у найбільш навантаженій донній частині балона без ознак пластичного деформування в зоні концентрації напружень внаслідок конструктивної недосконалості форми увігнутого днища (рис. 4).

Руйнування балонів відбулося при циклічному напрацюванні в межах 2942...7584 числа циклів при нормованих 12000 у зоні концентратора напружень, який

знаходився в внутрішній стороні балонів (рис. 4,*а,б*). Згідно з даними розрахунку (рис. 4,*б*) максимальна інтенсивність напружень відповідає донній частині балона у зоні концентратора напружень. Малий радіус заокруглення переходу конусної частини днища до нижньої частини є причиною розвитку втомного руйнування. Цей різкий перехід малого радіуса у вигляді кільця можна було бачити через горловину балона. Слід зазначити, що при вимірюванні товщини стінки балонів товщиноміром ТУЗ-2 методом ультразвукового контролю із зовнішнього боку в зоні цього радіуса (концентратора напружень) сигнал втрачався. Цей концентратор напружень пов'язаний з невідповідністю радіуса заокруглення (0,05...0,057 його номінального зовнішнього діаметра) переходу конусної частини балона до нижньої частини дна вимогам ISO 9809-3. Згідно з цим НД радіус переходу у внутрішній частині балона повинен бути $\geq 0,075$ його номінального зовнішнього діаметра, і товщина циліндричної частини при підході до переходу до дна повинна збільшуватись. Концентратор, вірогідно, був сформований при гарячій “закатці” днища внаслідок недостатнього прогріву металу по довжині ділянки кінця труби. Причиною отримання малого радіуса заокруглення переходу конусної частини днища до нижньої частини міг бути малий радіус заокруглення пуансона, що формує внутрішню поверхню днища при гарячій “закатці”. На балонах типорозміру 1 цей дефект також є, але руйнування не відбулося через запас по товщині стінки. Для балонів типорозміру 1...5 мінімально допустима товщина стінки сягає 4 мм, фактична – порядку 4,5. Балони типорозміру 3, 4, 6, 7 не мають такого дефекту, там має місце плавний перехід. Після навантаження балонів пробним тиском у водяному жакеті було виявлено деформування донної частини (зміни розміру Н1, табл. 1, рис. 4,*а*). При цьому відбувалось руйнування лише балонів 2.1...2.3 і 5.1...5.3, для яких мало місце максимальне деформування донної частини 3,0 і 4,4 мм відповідно (різниця Н1ВЖ і Н1к, табл. 1, рис. 4,*а*) після першого навантаження у водяному жакеті.

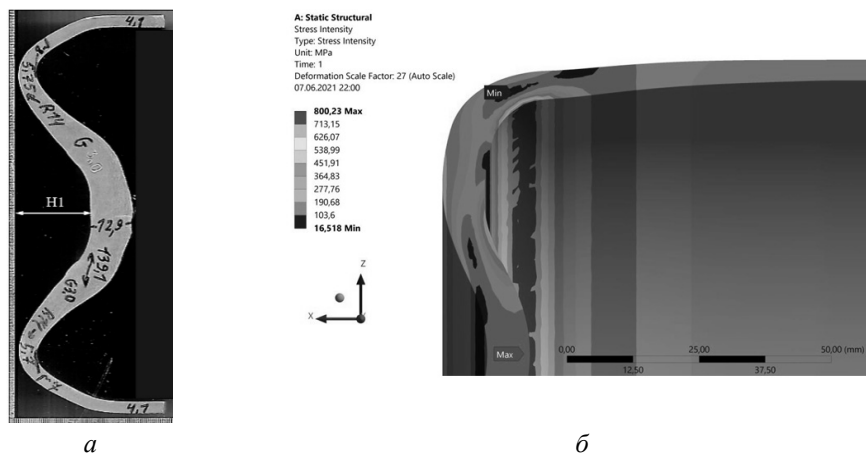


Рис. 4. Переріз донної частини балона (а) і розподіл інтенсивності напружень (б) при навантаженні пробним тиском.

При циклічному навантаженні пробним тиском руйнування відбувалося внаслідок зародження і розвитку тріщини втоми до критичних розмірів у кільцевому

напрямку (малоциклове втомне руйнування, рис. 3) від дії поздовжніх (осьових) напружень, на відміну від статичного навантаження, де руйнування відбувалось у поздовжньому напрямку балона від кільцевих напружень. Зміна об'єму балонів після першого навантаження пробним тиском у водяному жакеті була пов'язана, ймовірно, з незворотною деформацією днищ (зміна розміру Н1, рис. 4,а).

У зв'язку з тим, що балони 2.1...2.3 і 5.1...5.3 не витримали базового числа циклів до руйнування (12000 циклів) при навантаженні пробним тиском 250 бар, було проведено додаткові циклічні гідравлічні випробування іншої партії балонів ($V = 10$ л, $D = 159$ мм і $V = 3,2$ л, $D = 120$ мм) дещо меншим внутрішнім тиском 225 бар.

У табл. 4 приведено дані порівняння впливу внутрішнього тиску 225 і 250 бар на циклічну довговічність балонів ($V = 10$ л, $D = 159$ мм і $V = 3,2$ л, $D = 120$ мм).

Таблиця 4

Порівняння впливу внутрішнього тиску 225 і 250 бар на циклічну довговічність балонів

№ п/п	Параметри балонів	$P_{п}$, бар	р/н	n_{f1}	n_{f2}	n_{f3}	M_{nf}	σ_{nf}	v_{nf}	P_T , бар	P_B , бар
1	$V=10$ л	225	р	4085	4214	4504	4268	215	0,05	290,4	425,3
2	$D=159$ мм	250	р	2942	3144	3382	3156	220	0,07	299,4	436,2
3	$V=10$ л $D=159$ мм*	225	р	5686	6197	7062	6315	696	0,11	332	474,4
										330	481,6
4	$V=3,2$ л $D=120$ мм*	225	н	12089	12089	12089	—	—	—	366,4	514,9
5	$V=3,2$ л $D=120$ мм	250	р	5576	6953	7584	6704	1027	0,15	374,4	532,7

Примітка. n_{fi} – число циклів, яке витримав балон; р/н – руйнування балонів відбулося чи/ні; зірочкою позначено нову більш якісну партію; P_T , P_B – тиск текучості та руйнування, визначений при навантаженні зростаючим внутрішнім тиском на інших балонах того ж типу.

Циклічні гідравлічні випробування балонів ($V = 10$ л, $D = 159$ мм) пробним тиском 225 і 250 бар показали, що зниження тиску на 10% підвищує циклічну довговічність дослідженої партії балонів із виробничим дефектом на 33,0...38%. Для партії більш якісних балонів ($V = 10$ л, $D = 159$ мм) зниження тиску на 10% майже вдвічі збільшує циклічну довговічність відносно попередньо дослідженої. І тільки балони з $V = 3,2$ л, $D = 120$ мм витримали циклічні гідравлічні випробування більш низьким пробним тиском 225 бар, незважаючи на наявність виробничого дефекту.

На рис. 5 приведено залежності циклічної довговічності від мінімальної товщини стінки, на рис. 6 – залежності циклічної довговічності балонів 2.1...2.3 і 5.1...5.3 від інтенсивності напружень σ_i при випробуваннях пробним тиском 250 і 225 МПа. Слід відмітити, що отримані розрахункові значення інтенсивності напружень при випробуваннях пробним тиском 250 і 225 МПа значно нижчі за відповідні значення інтенсивності напружень, визначені методом скінченних елементів (МСЕ) у донній частині балонів, які складали 800 МПа (рис. 4,б). Іntenсивність напружень $\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_t = \frac{\sqrt{3}Pr_0}{2s_0}$ визначали як еквівалентне напруження за 4-ю теорією міцності (гіпотеза

питомої потенціальної енергії зміни форми). Для розрахунків тиску випробування балонів 3.5 і 7.5 прийнято характеристики міцності металу, які згідно із сертифікатом складала $\sigma_{0,2} \geq 505$ МПа та $\sigma_B \geq 715$ МПа відповідно.

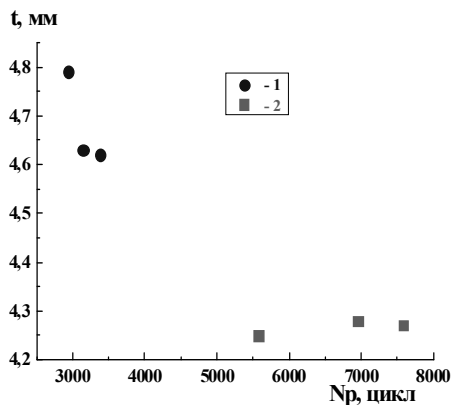


Рис. 5

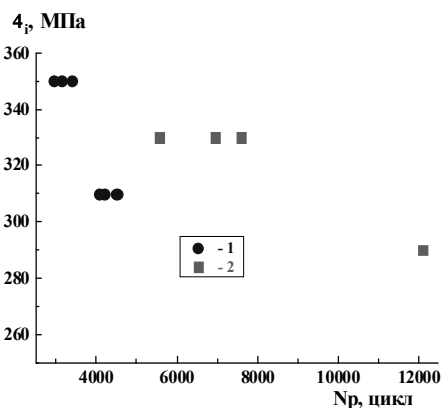


Рис. 6

Рис. 5. Залежність циклічної довговічності балонів від мінімальної товщини стінки. (Тут і на рис. 6: 1 – типорозмір 5; 2 – типорозмір 2).

Рис. 6. Залежність циклічної довговічності балонів від розрахункової інтенсивності напружень.

Досвід експлуатації конструкцій і спеціальні дослідження показали, що в місцях різкої зміни розмірів елементів, гострих кутів, надрізів, отворів, подряпини і т.п. виникають високі місцеві напруження, а такі місця називають зонами концентрації напружень. При циклічному навантаженні у цих місцях, як правило, з'являються тріщини втоми. Місцеві напруження у зонах концентрації напружень σ_{max} значно вищі за аналогічні напруження в тому ж перерізі деталей σ_n без наявності концентратора. Мірою оцінки концентраторів є теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} > 1$, який визначається теоретично на основі підходів теорії пружності при припущенні “пружного” розподілу напружень [3]. Значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ для найбільш поширених випадків приведено у довідниках.

У зонах концентрації напружень, як правило, виникає складний напружений стан (плоский або об'ємний). Величина коефіцієнта концентрації напружень визначається ступенем різкої зміни форми об'єкта. Якщо перехід від однієї форми до іншої виконано різко під прямим кутом, то коефіцієнт α_σ має найбільші значення. Якщо поперечний переріз змінюється поступово, то величина α_σ різко знижується і може дорівнювати одиниці. Концентрація напружень для пластичних матеріалів менш небезпечна, ніж для крихких. Практично при статичному навантаженні виробів із пластичних матеріалів концентрація напружень не впливає на їхню міцність, тобто пластичні матеріали малочутливі до концентрації напружень. При циклічному навантаженні зниження границі витривалості оцінюють за допомогою ефективного коефіцієнта концентрації напружень $k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}}$ [4] як відношення границі витривалості гладкого зразка без концентрації напружень σ_{-1} до границі витривалості зразка з концентратором напружень σ_{-1k} , що має такі самі абсолютні розміри перерізів.

Ефективний коефіцієнт концентрації напружень зазвичай менший за теоретичний і лише для крихких однорідних матеріалів він дуже близький до теоретичного $k_\sigma \leq \alpha_\sigma$. Для пластичних матеріалів ефективний коефіцієнт концентрації напружень близький до одиниці. У зонах концентрації напружень виникають місцеві напруження, які сягають границі текучості, і викликають пластичне деформування металу. Завдяки цьому різко знижується можливість розповсюдження місцевих напружень у виробі з пластичних матеріалів. Для крихких матеріалів концентрація напружень призводить до зниження міцності, оскільки відсутній фактор, який помягчує вплив концентрації, а саме: властивість текучості матеріалу. При ударних і повторно-змінних навантаженнях, якщо деформації і напруження швидко змінюються у часі, напруження не встигають вирівнюватися, і шкідливий вплив концентрації напружень зберігається. Для однорідних крихких матеріалів нерівномірність розподілу напружень унаслідок концентрації зберігається на всіх стадіях навантаження, включно зі статичним. У місцях дії максимальних напружень починається руйнування матеріалу (утворюються тріщини). Особливо чутлива до концентраторів загартована сталь і тим більше, чим вищі її характеристики міцності. Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень залежить від геометрії концентратора і не відображає властивості реального матеріалу. Сумісний вплив геометрії концентратора й властивостей матеріалів визначають шляхом випробування зразків із досліджуваного матеріалу до руйнування. При таких випробуваннях визначають ефективний (дійсний) коефіцієнт концентрації напружень, який відображає вплив геометрії концентратора і механічних властивостей матеріалу. При статичному навантаженні ефективний коефіцієнт концентрації напружень $k = \frac{P_I}{P_{II}}$ визначається як відношення навантаження руйнування зразка без концентратора (P_I) до руйнівного навантаження зразка з концентратором напружень P_{II} [4].

Для діапазону багатоциклової втоми концентрація напружень призводить до зниження границі витривалості виробів як із пластичних, так і з крихких матеріалів [5]. При відсутності експериментальних даних для ефективного коефіцієнта концентрації напружень іноді використовують емпіричні формули, які зв'язують його з границею міцності матеріалу.

Для діапазону багатоциклової втоми значення границі витривалості зразків із концентратором напружень нижчі за аналогічні показники для гладкого зразка без концентратора [6], тобто $k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} > 1$. Слід зауважити, що значення α_σ також більше за одиницю. У реальних матеріалах унаслідок пластичних деформацій у мікрзоні місця концентрації напруження дещо перерозподіляються й згладжуються. Для прикладу на рис. 7 приведено криві втоми для гладких циліндричних зразків та з концентратором напружень ($\alpha_\sigma = 1,8$, $k = 0,65$) зі сталі 20 з однаковим мінімальним перерізом при випробуванні на малоциклову втому при контролі максимальних і мінімальних напружень із коефіцієнтом асиметрії циклу $R_\sigma = -0,5$. Для зразка з концентратором напружень у вигляді проточки ($\frac{r}{d} = 0,25$) теоретичний коефіцієнт концентрації напружень згідно з даними [3] дорівнює 1,8. При малоцикловому навантаженні ефективний коефіцієнт концентрації напружень k_σ на базі випробувань 5000 циклів складає 0,73...0,77. Слід зазначити, що для діапазону багатоциклової втоми маємо $k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} > 1$, тоді як для діапазону малоциклової втоми $k_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{maxk}} < 1$.

Згідно з приведеними даними (рис. 7) у зоні концентрації напруження вищі за умовну границю текучості сталі $\sigma_{0,2}$, водночас зразок без концентратора напружень деформується пружно (максимальні напруження не досягають значень $\sigma_{0,2}$).

На рис. 8 приведено схему гладкого зразка і з концентратором напружень.

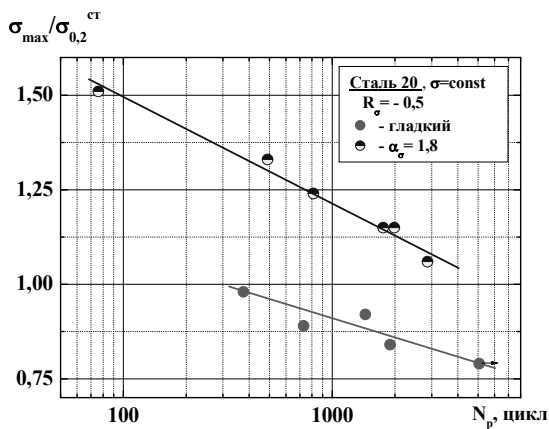


Рис. 7. Криві втоми для гладких циліндричних зразків та з концентратором напружень зі сталі 20 з однаковим мінімальним перерізом.

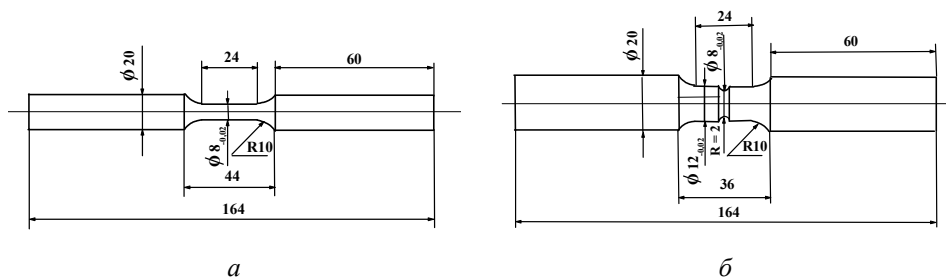


Рис. 8. Конструкція зразків без концентратора (а) і з концентратором напружень (б).

Розглянуті співвідношення максимальних напружень для гладкого зразка і зразка з концентратором напружень дійсні в умовах одноосового навантаження, де діючі напруження у зоні концентрації напружень вищі за умовну границю текучості сталі.

У разі плоского напруженого стану балонів значення поздовжніх напружень σ_z у два рази менші за кільцеві σ_t . При статичному навантаженні зростаючим внутрішнім тиском руйнування відбувалось у поздовжньому напрямку балонів від дії кільцевих напружень σ_t , максимальні значення яких практично збігалися з характеристиками міцності лабораторних зразків при випробуваннях на розтяг (повідомлення 1 [7]). Наприклад, руйнування балона 3.5 відбулося при тиску 441,1 бар, при цьому внутрішній тиск, за якого почалася текучість металу, склав 324,4 бар, відповідно розрахункові кільцеві напруження руйнування – 651,39 МПа. Розрахункові кільцеві напруження текучості металу сягали 479,05 МПа. Руйнування балона 7.5 відбулося при тиску 444,6 бар, при цьому внутрішній тиск, за якого почалася текучість металу, склав 299,4 бар, відповідно розрахункові кільцеві напруження руйнування – 720,05 МПа. Розрахункові кільцеві напруження текучості металу склали 484,89 МПа. Слід зазначити, що характеристики міцності балонів, отримані при випробуванні до

руйнування, добре узгоджуються з результатами випробування лабораторних зразків, виготовлених із балонів 3.4 і 7.4, границя міцності металу яких складала 712,62 і 729,25 МПа, а умовна границя текучості – 461,6 і 483,21 МПа відповідно.

При навантаженні внутрішнім тиском кільцеві напруження визначали за допомогою залежності $\sigma_t = \frac{Pr_0}{s_0}$, а поздовжні (осьові) напруження – $\sigma_z = \frac{\sigma_t}{2}$, де $r_0 = \frac{D_{cp} - s_0}{2}$ – радіус серединної поверхні; s_0 – середня товщина стінки балонів.

В умовах циклічного навантаження для балона 2.4 розрахункові кільцеві напруження σ_t від пробного тиску (250 бар) складали 336,8 МПа ($0,73\sigma_{0,2}$). Розрахункові поздовжні напруження σ_z від пробного тиску (250 бар) сягали 168,4 МПа ($0,36\sigma_{0,2}$). Для балона 5.4 аналогічні кільцеві напруження від пробного тиску (250 бар) складали 410,4 МПа ($0,89\sigma_{0,2}$). Розрахункові поздовжні напруження від пробного тиску (250 бар) дорівнювали 205,18 МПа ($0,44\sigma_{0,2}$).

Отримані дані задовільно збігаються з аналогічними розрахунками напружень у поздовжньому напрямку, визначеними як дія внутрішнього пробного тиску 250 бар на площу донної частини. Визначені таким чином розрахункові поздовжні напруження для балона 2.4 складали 155,9 МПа ($0,34\sigma_{0,2}$). Для балона 5.4 аналогічні поздовжні напруження сягали 193,0 МПа ($0,42\sigma_{0,2}$). Похибка визначення цих напружень за двома приведеними способами складала 6,0 і 7,5% відповідно для балонів 5.4 і 2.4.

Як було відмічено вище для розглянутих балонів 2.1...2.3, малий радіус заокруглення біля дна, який складав 0,05 зовнішнього діаметра 120 мм, тобто 6,0 мм, є концентратором напружень. Для балонів 5.1...5.3 аналогічний радіус заокруглення складав 0,057 зовнішнього діаметра 159 мм, тобто 9,0 мм. Згідно з даними таблиці 11 [3] відношення радіуса галтелі до діаметра стрижня буде 0,0625, що дуже близьке до розглянутих балонів, де аналогічне відношення складає 0,05...0,057, а коефіцієнт (α_σ) згідно з цією ж таблицею дорівнює 1,75. Для розглянутих балонів радіус заокруглення біля дна балонів менший за нормований згідно з ISO 9809-3 і повинен бути $\geq 0,075$ номінального зовнішнього діаметра, тобто 12 мм. Таким чином, з урахуванням теоретичного коефіцієнта концентрації напружень величина максимальних поздовжніх напружень від дії пробного тиску у зоні концентратора балонів 2.1...2.3 має складати 294,7 МПа ($0,64\sigma_{0,2}$), а балонів 5.1...5.3 – 359,06 МПа ($0,78\sigma_{0,2}$). Тобто поздовжні напруження в зоні концентратора не сягали умовної границі текучості металу балонів.

Для умов осьового навантаження крива втоми зразка без концентратора напружень знаходиться нижче аналогічної кривої зразка з концентратором (рис. 7), для якого напруження вищі за умовну границю текучості металу. Величина напружень для кривої втоми зразка без концентратора напружень значно нижча за умовну границю текучості металу. На відміну від осьового навантаження, метал балонів, навантажених внутрішнім тиском, знаходиться в умовах плоского напруженого стану. При цьому значення напружень у поздовжньому напрямку у два рази менші за кільцеві. Відповідно до аналогії із закономірностями осьового навантаження лабораторних зразків із концентраторами та без концентраторів напружень, максимальні значення поздовжніх напружень у металі балонів у зонах концентрації мають перевищувати умовну границю текучості матеріалу. Розрахункові поздовжні напруження від пробного тиску у зоні концентратора напружень для балонів 2.1...2.3 і 5.1...5.3

складали $0,64\sigma_{0,2}$ і $0,78\sigma_{0,2}$. Аналогічні розрахункові напруження без урахування концентрації напружень для цих балонів складали $0,36\sigma_{0,2}$ і $0,44\sigma_{0,2}$ відповідно. Оскільки руйнування балонів відбувалось у поперечному напрямку від дії поздовжніх напружень, які мали дуже низькі значення, невідповідність закономірностей руйнування лабораторних зразків при одноосовому навантаженні та двовісному при циклічних випробуваннях балонів, ймовірно, пов'язана зі специфікою впливу двовісності й концентратора напружень у їхній донній частині.

Висновки

З метою обґрунтування закупівлі за кордоном балонів високого тиску різної ємності та їхньої сертифікації в Україні у сертифікованій лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України було проведено стандартні статичні та циклічні гідравлічні випробування внутрішнім тиском згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 9809-3:2019 дослідної партії балонів високого тиску (сім типорозмірів по п'ять балонів кожного типу), виготовлених із безшовних труб. З кожного типорозміру передбачено випробування зростаючим гідравлічним внутрішнім тиском до руйнування двох балонів та на циклічне навантаження пробним тиском трьох.

Експериментальні дослідження міцнісних параметрів дослідної партії балонів високого тиску показали, що два типорозміри балонів не витримали стандартних циклічних випробувань пробним тиском 250 бар. Випробування додаткової покращеної партії балонів цього типу також не витримали нормованого числа циклів навантаження. І тільки після зниження на 10% пробного тиску було отримано позитивний результат для одного типу балонів.

При циклічному навантаженні балонів гідравлічним внутрішнім пробним тиском руйнування відбувалось у донній частині у зоні концентратора напружень переходу від циліндричної частини до увігнутого днища. Ймовірною причиною руйнування двох типорозмірів балонів є виробничий дефект невідповідності радіуса заокруглення у донній частині балонів нормативному документу, що викликало значні деформації днищ при навантаженні пробним тиском. Значні циклічні деформації днищ балонів сприяли зародженню і розвитку тріщин утоми у зоні концентратора напружень у кільцевому напрямку, що спричинило руйнування від дії поздовжніх напружень.

Руйнування від утоми при циклічному навантаженні пробним тиском унаслідок дії поздовжніх напружень, ймовірно, пов'язано з особливістю напружено-деформованого стану в зоні концентратора напружень в умовах плоского напруженого стану і впливу двовісності навантаження.

Експериментально встановлено механізми руйнування балонів при стандартних випробуваннях: при статичному навантаженні зростаючим внутрішнім тиском руйнування відбувається від дії кільцевих напружень у поздовжньому напрямку балонів за механізмом квазістатичного з ознаками обмеження накопичених деформацій; при циклічному навантаженні пробним тиском руйнування відбувається за механізмом малоциклового втомного внаслідок зародження і розвитку до критичних розмірів тріщин утоми в зоні концентратора напружень у вигляді виробничого дефекту невідповідності радіуса заокруглення увігнутого днища нормативному документу.

1. ДСТУ EN ISO 9809-3:2019. Балони газові. Перезаправні безшовні сталеві газові балони. Проектування, конструювання та випробування. Ч 3. Нормалізовані сталеві балони (EN ISO 9809-3:2010, IDT; ISO 9809-3:2010, IDT), Чинний від 01.01.2020.
2. Р. И. Дмитриенко, Э. Ф. Гарф, В. П. Чижиченко, Остаточное расширение баллонов (краткий обзор), *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*, № 1, 23–28 (2014).
3. *Сопротивление материалов*, Под общ. ред. Г. С. Писаренко, Вища школа, Киев (1973).
4. Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський, *Опір матеріалів*, 2 вид. допов. і переробл., Вища школа, Київ (2004).
5. В. І. Шваб'юк, *Опір матеріалів*, Знання, Київ (2016).
6. Л. Є. Матохнюк, А. В. Бялонович, А. А. Котляренко та ін., Вплив частоти навантаження на опір втомі сплаву Д16Т, *Пробл. міцності*, № 3, 71–78 (2022).
7. О. П. Гопкало, Р. І. Дмитрієнко, О. Л. Палієнко, А. Є. Литвиненко, А. В. Кравчук, Експериментальна оцінка якості дослідної партії металевих балонів за натурних гідравлічних випробувань високим тиском. Повідомлення 1. Результати натурних статичних випробувань, *Пробл. міцності*, № 2, 107–120 (2026).

Надійшла 18.12.2025