

Експериментальна оцінка якості дослідної партії металевих балонів за натурних гідравлічних випробувань високим тиском. Повідомлення 1. Результати натурних статичних випробувань

О. П. Гопкало^{а,1}, Р. І. Дмитрієнко^б, О. Л. Палієнко^б, А. Є. Литвиненко^б,
А. В. Кравчук^а

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

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

¹ arg1947@ukr.net

Наведено результати експериментальних досліджень оцінки якості виготовлення дослідної партії металевих балонів високого тиску для технічних газів згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 9809-3:2019. Проведено статичні (до руйнування) й циклічні випробування пробним тиском дослідної партії балонів, виготовлених із безшовних труб. Установлено невідповідність вимогам нормативного документа окремих геометричних параметрів кількох типорозмірів балонів із дослідженої партії і характеристик міцності металу. Визначено, що всі типорозміри балонів витримали статичні випробування як за параметрами міцності, так і за характером руйнування та відповідали вимогам нормативного документа. Руйнування балонів відбувалось у поздовжньому напрямку від дії кільцевих напружень. При цьому характеристики міцності балонів, отримані при випробуванні внутрішнім тиском до руйнування, добре узгоджуються з результатами випробування лабораторних зразків на розтяг. Експериментально виявлено, що при статичному навантаженні зростаючим внутрішнім тиском руйнування відбувається по механізму квазістатичного з ознаками обмеження накопичення деформацій, пов'язаного з впливом двовісності навантаження і динамічності процесу руйнування.

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

Вступ

Експлуатація балонів високого тиску пов'язана з певними ризиками руйнування. Як правило, їх виготовляють із пластичних сталей для унеможливлення уламкового руйнування. Водночас вони можуть мати такий характер внаслідок динамічності навантаження під час вибуху в середині них при швидкоплинному непружному деформуванні та дії кліматичних температур. Для запобігання руйнування балонів у процесі експлуатації періодично проводять переогляд, який передбачає статичні випробування високим пробним тиском ($P_{\text{п}}$, $P_{\text{н}}$ – hydraulic pressure tests). Але, незважаючи на те що при кожному переогляді відбраковується від 2 до 7% балонів, на практиці іноді відбувається їхнє руйнування. В Європі вимоги до балонів високого тиску для технічних газів регламентуються документом ISO 9809-2010 – безшовні сталеві газові балони багаторазового використання, проектування, виготовлення і випробування. Детальні процедури випробувань можна знайти у відповідних нормативних документах (НД) виробників. Наприклад, ISO 9809-2010, BS EN 12245-2009, GB 28053-2011, ISO 11119-2002, ISO 11120, ISO 11439-2000.

Стандартні процедури гідравлічних випробувань вироблених партій балонів високого тиску й їхня сертифікація передбачають навантаження зростаючим тиском до руйнування, циклічні – пробним тиском P_{Π} . При статичних випробуваннях особлива увага приділяється характеру руйнування, яке має відбуватись у центральній частині балона, бути в'язким, тріщина не повинна розгалужуватися. Пробний тиск є розрахунковим. Згідно з правилами виготовлення і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском, балони мають бути розраховані таким чином, щоб напруження в їхніх стінках при гідравлічному випробуванні пробним тиском не перевищувало 85...90% границі текучості металу при кімнатній температурі для цієї марки сталі [1].

Балони у процесі періодичного огляду піддаються гідравлічним випробуванням внутрішнім пробним тиском, що перевищує робочий (P_p , P_W – working pressure) в 1,25...3 рази, залежно від матеріалу, конструкції балонів і НД. Згідно з іншими НД пробний тиск має бути щонайменше в півтора рази більшим за робочий. У США найпоширенішим є коефіцієнт 5/3. У ряді НД циклічні випробування проводять саме пробним тиском, очевидно, у разі неруйнування отримують велику гарантію циклічної довговічності та надійності у порівнянні 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 вади – вклучення, 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.

При випробуванні балонів пробним тиском P_{Π} коефіцієнт запасу міцності повіреного балона повинен бути достатнім, щоб витримати пробний тиск, який є вищим за робочий. Але проведення таких випробувань не дає змоги оцінити рівень залишкових деформацій, якщо такі можуть мати місце. Незначні деформації неможливо виявити візуально. А, як відомо, чим більші залишкові деформації, тим більша вірогідність досягнення граничного стану. Тому останніми роками з метою контролю залишкових деформацій при перевірочних випробуваннях почали використовувати величини повної зміни об'єму балона (ΔW_{TE} – total expansion) і залишкової зміни (ΔW_{PE} – permanent expansion) після зниження пробного тиску до нуля (рис. 1) [2–5]. На рис. 1 приведено схему визначення об'ємного розширення і коефіцієнта залишкового розширення балона.

Повна зміна об'єму пов'язана з геометричними характеристиками конкретного балона і механічними властивостями металу, залишкова зміна – з величиною пластичних деформацій, якщо вони мали місце в стінці балона при пробному тиску. Через те що геометричні параметри балонів, що належать одній партії, мають певний розкид, то і ΔW_{TE} у них буде неоднакове, не кажучи вже про балони, що належать до різних партій або взагалі типів і технологій виробництва. Тому з метою узагальнення використовують відношення залишкової зміни об'єму балона до повної, це співвідношення визначається як коефіцієнт залишкового розширення (K_{PE}). Коефіцієнт K_{PE} визначається як відношення залишкової зміни об'єму (ΔW_{PE}) до повної його зміни під тиском (ΔW_{TE}). Він характеризує ступінь пластичних деформацій у балоні та є інтегральним критерієм технічного стану, що часто виражається у

відсотках. Ймовірно, чим більше відхилення балона від ідеальної форми і нижче границя текучості матеріалу, тим більшим буде коефіцієнт залишкового розширення при пробному тиску. Внаслідок різнотовщинності в межах одного балона і локалізації можливих дефектів залишкова деформація може бути нерівномірною. При наступному навантаженні балона пробним тиском, наприклад при черговому переогляді, якщо з ним не відбулося жодних змін, коефіцієнт залишкового розширення повинен дорівнювати нулю.

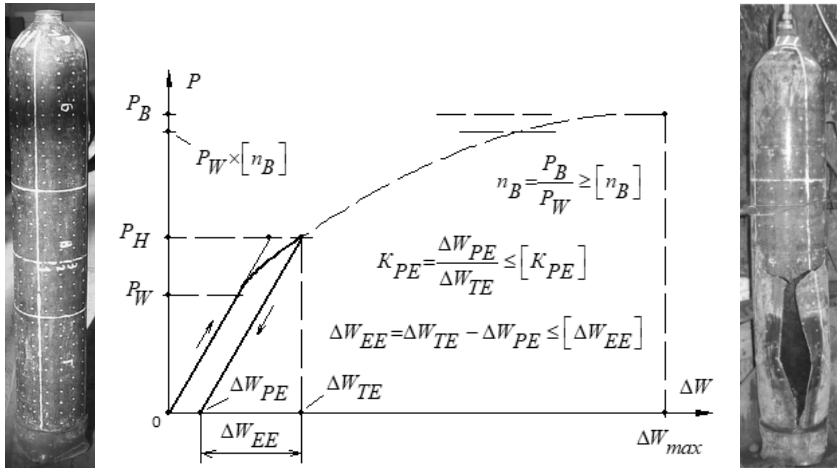


Рис. 1. Схема визначення об'ємного розширення і коефіцієнта залишкового розширення балона.

При випробуваннях пробним тиском балон поміщається у заповнений водою резервуар ("водяний жакет"), вода з якого при навантаженні внутрішнім тиском внаслідок його розширення витісняється у відтаровану бюретку, призначеною для точного вимірювання повної зміни об'єму [6–8]. Після зниження тиску в балоні частина води з бюретки може повернутися у водяний жакет, за іншою, яка залишалась у бюретці, визначають залишкову зміну об'єму.

Згідно з одними НД визначення коефіцієнта K_{PE} є обов'язковим [9], тоді як за іншими – альтернативним [3]. Також встановлюється гранично допустиме значення коефіцієнта K_{PE} , при перевищенні якого балони не допускаються до експлуатації. Згідно з вимогами Європейських норм [3] для новостворених балонів, які пройшли остаточну термічну обробку, значення загального та залишкового розширення, якщо вони визначаються, мають бути вибиті поряд із серійним номером балона. За коефіцієнтом залишкового розширення при пробному тиску проводять відбраковування балонів як на стадії виробництва, так і при періодичному огляді. Цей критерій у НД, де він передбачений, застосовується до кожного балона, тобто проводять 100%-ний контроль якості.

У НД, що регламентують проведення випробувань із визначенням коефіцієнта залишкового розширення, зазначаються гранично допустимі його значення – 5 і 10% [1, 3, 4]. Для деяких типів балонів цей коефіцієнт повинен призначати сам виробник [1, 10], причому не вказується, чим він повинен керуватися. Коефіцієнт залишкового розширення є інтегральною характеристикою технічного стану балона. Його

використання особливо важливе для балонів, виготовлених і експлуатованих в Україні, оскільки, як відомо, через особливості технології виробництва вони характеризуються значною різноманітністю, великим розсіюванням механічних властивостей і відношенням границі текучості до тимчасового опору, що незначно перевищує 0,5 [5].

Граничний стан балона пов'язують із тиском, за якого відбувається розгерметизація його корпусу – тиском руйнування P_B . Коефіцієнт запасу міцності балона (n_B) визначається як відношення тиску руйнування (P_B) до робочого тиску (P_p); він має бути не нижчим за встановлений відповідними нормативними документами [1]. У деяких випадках приймається коефіцієнт запасу міцності щодо пробного тиску, наприклад, 1,6 [3]. Іноді використовують коефіцієнт запасу за границею текучості металу. Для випадку гідравлічних випробувань цей коефіцієнт дорівнює 1,1 [1].

Руйнівний тиск, що визначає граничний стан балона, може відрізнятися від балона до балона, що навіть належать одній партії, через відхилення геометричних параметрів і розсіювання механічних властивостей, а також через наявність можливих дефектів, отриманих під час виробництва або експлуатації. Фактичний тиск руйнування можна отримати лише за результатами гідравлічних випробувань балона до граничного стану. У процесі експлуатації коефіцієнт запасу міцності конкретного балона може дещо знижуватися. Ступінь зниження залежить від багатьох факторів, пов'язаних з умовами і тривалістю експлуатації та ін.

Балони не мають терміну обмеження експлуатації за позитивних результатів періодичних перевірок. Вироблені в Україні балони високого тиску для технічних газів, були високонадійними у частині появи зон текучості при пробному тиску, а їхній запас міцності щодо робочого тиску істотно перевищував вимоги норм. Високі рівні надійності балонів при штатних режимах експлуатації досягались за рахунок завищених значень товщини стінки, що призводило до збільшення ваги балонів і підвищення їхньої собівартості. Сталі, з яких виготовляли балони, мали значне розсіювання за всіма показниками механічних властивостей. Відсоток відбраковування за параметром границі текучості металу перевищував 17%. Наприклад, відношення максимальних значень границі текучості до мінімальних у досліджених вибірці сягало більше двох [11]. Трубі заготовки для балонів мали значну різноманітність. В одному балоні товщина стінки змінювалась у межах 30%. Середнє значення товщини стінки на 18...26% більше за мінімально допустимі норми, що призводить до суттєвих перевитрат сталі [5]. Підвищення техніко-економічних показників балонів і їхньої безпеки вимагає перегляду нормативної бази, реконструкції виробництва, переходу на сучасні матеріали та вдосконалення методик оцінки технічного стану виробів, що експлуатуються.

У зв'язку з припиненням виробництва балонів високого тиску в Україні останніми роками на ринку все більшого поширення набувають балони закордонного виробництва. Сучасна технологія виробництва балонів високого тиску така, що практично виключає різноманітність, а використовувані для виготовлення сталі мають високі механічні властивості. У цій ситуації необхідно проводити контроль за надійністю балонів як при постачанні, так і в процесі експлуатації. При цьому важливим показником є гранично допустиме значення коефіцієнта залишкового розширення під час випробування пробним тиском і впровадження експресних

неруйнівних методів оцінки еволюції структурного стану металу балонів, яку проводять у розвантаженому стані при їхньому періодичному перегляді.

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 дослідної пробної партії балонів проводили шляхом натурних випробувань гідравлічним внутрішнім тиском на статичну і циклічну міцність у спеціалізованій лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України за участю спеціалістів Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.

Методика досліджень

Дослідженню підлягали балони високого тиску, виготовлені з 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*. Стандартні випробування зростаючим гідравлічним внутрішнім тиском до руйнування дослідної партії з 14 балонів проводили згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 9809-3:2019 в сертифікованій лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України на спеціально розробленому випробувальному стенді [5]. Ці вимоги стосуються сталевих безшовних балонів. Пробний тиск становив 1,66 (5/3) робочого тиску, який сягав 150 бар, пробний тиск – 250 бар.

Оскільки об'єкт випробувань розміщували у спеціальному стенді нижче рівня датчика тиску на 4,1 м, а, як відомо, стовп води висотою 1 м створює тиск 0,0980638 бар, для отримання реального тиску в балоні до значень тиску датчика необхідно додати 0,4 бара. Далі цю поправку враховано. Усі балони навантажували пробним тиском у водяному жакеті для визначення коефіцієнта залишкового розширення. По два балони кожного типорозміру випробовували зростаючим внутрішнім тиском до руйнування із записом кінетики внутрішнього тиску в часі. По перегину кривої тиску в часі визначали тиск, який відповідає границі текучості металу, а по максимальних значеннях – тиск руйнування.

На рис. 2 наведено креслення і фото балона високого тиску для випробувань внутрішнім тиском. Формовку дна балони та його горловини здійснено шляхом “гарячої закатки”. Наприклад, для балона типорозміру № 3 (табл. 1) за такої технології формовки дна і горловини балона товщина стінки циліндричної частини зростала від 4,1 до 12,9 мм даної ділянки.

У вихідному стані було нанесено поздовжню і поперечну розмітку та виміри периметра різних ділянок балона, а також визначення розподілу товщини стінки – ультразвуковим товщиноміром ТУЗ-2. Поперечну розмітку проведено по п'яти перетинах балонів, а поздовжня сягала від 5 до 16 ліній по периметру залежно від його діаметра.

* Результати натурних циклічних гідравлічних випробувань буде приведено в повідомленні 2.

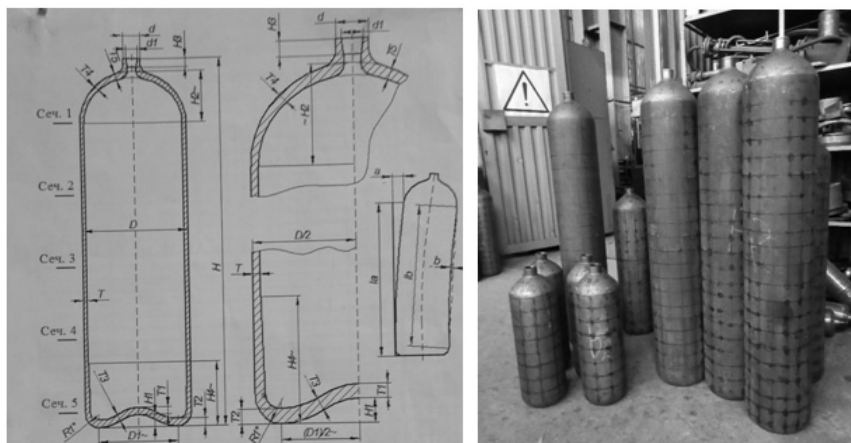


Рис. 2. Креслення балона високого тиску для випробувань внутрішнім тиском та фото з нанесеною розміткою на поверхні для перевірки відповідності геометричних параметрів в НД.

У табл. 1 наведено геометричні параметри балонів для випробувань. Перевірка геометричних параметрів і випробування внутрішнім тиском проводили згідно ISO 9809-3:2010.

Таблиця 1

Номінальні характеристики балонів

№	V , л	G , кг	D_3 , мм	T_{min} , мм	H , мм	P_B^p , бар
1	2	3,5	108	4	300	407
2	3,2	5	120	4	370	407
3	5	7,5	140	4	450	414,8
4	10	13,3	140	4	820	407
5	10	12,5	159	4	650	407
6	20	25	180	5,3	970	408
7	40	48	219	5,7	1310	431,8
d	$\pm 5\%$	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$	—	$\pm 1\%$	$\geq$

Примітка. № – номер типорозміру балона; d – відхилення; V – внутрішній об'єм; G – вага; D_3 – зовнішній діаметр; T_{min} – мінімально гарантована товщина стінки циліндричної частини; H – габаритна довжина без вентиля; P_B^p – мінімальне розрахункове значення тиску руйнування.

Перевірка на вертикальність балонів у початковому стані показала, що частина з них не відповідала вимогам НД (табл. 2).

На рис. 3 наведено діаграму розтягу лабораторних зразків із металу балонів № 3.4 і 7.4 (без обробки поверхні) при випробуваннях на машині INSTRON 8802, а в табл. 3 – їхні механічні властивості.

Згідно із сертифікатом характеристики міцності металу балонів є такими: $\sigma_{0,2} \geq 505$ МПа, $\sigma_b \geq 715$ МПа, $\sigma_b/\sigma_{0,2} = 1,416$. З отриманих даних видно, що умовна границя текучості металу балонів 3.4 і 7.4 відповідно на 8,6 і 4,3% нижча від задекларовану в сертифікаті, границя міцності металу цих балонів відрізняється в межах $-0,3$ і $+2\%$ відповідно.

Таблиця 2

Результати перевірки на вертикальність у початковому стані балонів

V , л	D_3 , мм	№ м	Тиск	l_a , мм	a , мм	a_b , мм/м	Відп.
2	108	1.1	Ц	230,0	1,3	5,7	Так
		1.2	Ц	241,0	1,3	5,4	
		1.3	Ц	235,0	1,3	5,5	
		1.4	Г	230,0	1,3	5,7	
		1.5	Г	235,0	1,3	5,5	
3,2	120	2.1	Ц	300,0	4,2	14,0	Ні
		2.2	Ц	300,0	3,1	10,3	
		2.3	Ц	310,0	4,2	13,5	
		2.4	Г	290,0	3,1	10,7	
		2.5	Г	310,0	1,4	4,5	Так
5	140	3.1	Ц	367,0	3,2	8,7	Ні
		3.2	Ц	30,0	3,2	10,7	
		3.3	Ц	363,0	3,2	8,8	Так
		3.4	Г	360,0	3,2	8,9	
		3.5	Г	365,0	3,2	8,8	
10	140	4.1	Ц	670,0	4,5	6,7	Так
		4.2	Ц	715,0	4,5	6,3	
		4.3	Ц	710,0	4,5	6,3	
		4.4	Г	695,0	4,5	6,5	
		4.5	Г	690,0	4,5	6,5	
10	159	5.1	Ц	460,0	5,9	12,8	Ні
		5.2	Ц	460,0	5,9	12,8	
		5.3	Ц	520,0	5,9	11,3	
		5.4	Г	540,0	5,9	10,9	
		5.5	Г	501,0	5,9	11,8	
20	180	6.1	Ц	903,0	3,2	3,5	Так
		6.2	Ц	900,0	3,2	3,6	
		6.3	Ц	897,0	3,2	3,6	
		6.4	Г	895,0	3,2	3,6	
		6.5	Г	900,0	3,2	3,6	
40	219	7.1	Ц	1170,0	11,6	9,9	Так
		7.2	Ц	1170,0	5,9	5,0	
		7.3	Ц	1200,0	7,9	6,6	
		7.4	Г	1180,0	5,9	5,0	
		7.5	Г	1170,0	11,6	9,9	

Примітка. Ц – циклічний; Г – гідравлічний до руйнування; № м – маркування типорозміру балона; l_a – довжина балона; a – відхилення (відхилення від вертикалі не повинно перевищувати 10 мм на 1 м висоти); a_b – відносне відхилення; відп. – відповідає/не відповідає вимогам НД.

Таблиця 3

Механічні властивості металу балонів

№ м	E , ГПа	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$\delta_{р\text{івн}}$, %	Ψ , %
3.4	198,37	712,62	461,60	37,23	23,13	42,35
7.4	218,60	729,25	483,21	42,80	24,16	49,0

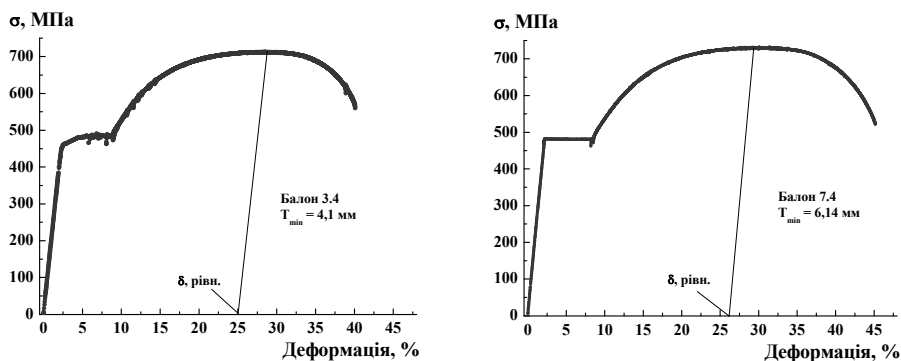


Рис. 3. Діаграма розтягу лабораторних зразків із металу балонів 3.4 і 7.4 (без обробки поверхні), випробуваних на машині INSTRON 8802.

Результати експериментальних досліджень

На рис. 4 приведено фото зруйнованих балонів при навантаженні зростаючим внутрішнім гідралічним тиском до руйнування. При цьому руйнування відбувалось у поздовжньому напрямку середньої частини балонів, де діють максимальні кільцеві напруження. Характер і локація руйнування відповідали вимогам НД.

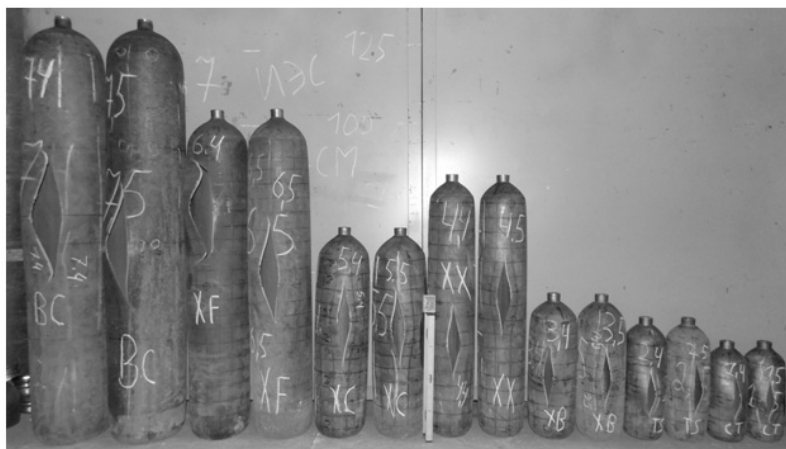


Рис. 4. Фото зруйнованих балонів після випробувань зростаючим гідралічним внутрішнім тиском.

У табл. 4 наведено результати випробувань балонів зростаючим внутрішнім тиском до руйнування.

У кінці табл. 4 наведено розрахункові мінімально допустимі значення P_T і P_B для двох варіантів пробного тиску $P_{II} = 250$ і 225 бар, визначених відповідно до ДСТУ EN ISO 9809-3:2019 [1] за умови $\sigma_{0,2} \geq 505$ МПа, $\sigma_b \geq 715$ МПа згідно із сертифікатом.

Слід зазначити, що коефіцієнт запасу статичної міцності, визначений як відношення $n_B = P_B/P_p$ вищий за аналогічну величину, приведену в ISO 9809-1:2010 (E), яка складає 2,4. Таким чином, по запасу статичної міцності пробна партія досліджених балонів відповідала вимогам НД.

Для дослідження еволюції структурного стану металу, оціненої коерцитиметричним контролем, було проведено ступінчасте навантаження внутрішнім тиском до руйнування двох балонів № 3.5 і 7.5. У табл. 5 наведено геометричні параметри досліджених балонів.

Таблиця 4

Результати випробувань балонів зростаючим внутрішнім тиском до руйнування

№ м	D , мм	s_0 , мм	P_T , бар	P_T/P_{II}	P_{II}/P_T	P_B , бар	P_B/P_{II}	P_B/P_T	v , < бар/с	n_B	ϵ_p
1.4	108,0	4,17	410,0	1,64	0,61	596,4	2,38	1,45	3,9	3,98	0,056
1.5	108,1	4,36	422,4	1,69	0,59	564,8	2,26	1,34	3,9	3,77	0,047
2.4	121,3	4,31	366,4	1,46	0,68	514,9	2,06	1,4	3,9	3,43	0,051
2.5	120,8	4,36	374,4	1,5	0,67	532,7	2,13	1,42	3,9	3,55	0,050
3.4	140,6	4,60	316,4	1,26	0,79	465,8	1,86	1,47	3,8	3,11	0,045
3.5	140,5	4,60	324,4	1,3	0,77	441,1	1,76	1,36	3,8	2,94	0,039
4.4	140,7	4,57	316,4	1,26	0,79	436,8	1,74	1,38	3,6	2,91	0,061
4.5	140,6	4,52	321,5	1,28	0,78	455,2	1,82	1,41	3,6	3,03	0,056
5.4	158,7	4,72	290,4	1,16	0,86	425,3	1,7	1,46	3,5	2,84	0,065
5.5	159,3	4,67	299,4	1,2	0,83	436,2	1,74	1,45	3,5	2,91	0,061
6.4	179,7	6,07	355,4	1,42	0,7	510,6	2,04	1,43	3,1	3,40	0,056
6.5	179,8	5,93	356,4	1,42	0,7	518,9	2,07	1,45	3,1	3,46	0,055
7.4	218,4	6,48	299,2	1,2	0,83	443,5	1,77	1,48	2,6	2,96	0,056
7.5	218,7	6,55	299,4	1,2	0,83	444,6	1,77	1,48	2,6	2,96	0,063
Для $P_{II}=250$ бар		–	294,1	1,18	0,85	431,8	–	–	5	–	–
Для $P_{II}=225$ бар		–	264,7	1,18	0,94	388,6	–	–	5	–	–

Примітка. D – початковий еквівалентний зовнішній діаметр; s_0 – початкова середня товщина стінки; P_T – тиск текучості металу балона, визначений по перегину діаграми навантаження в часі; P_B – максимальний тиск; v – швидкість навантаження в пружній області; $n_B = P_B/P_p$ – коефіцієнт запасу статичної міцності; ϵ_p – залишкова деформація зовнішнього периметра. D і s_0 – для регулярної частини балонів, яка знаходиться далеко від переходів на їхнє днище і верхню частину.

Таблиця 5

Середній діаметр і параметри товщини стінки для регулярної циліндричної частини балонів

№ м	V , л	D_3 , мм	W_0 , л	G_0 , кг	D_{cp} , мм	s_{min} , мм	s_{max} , мм	s_0 , мм	σ , мм	n	r_0 , мм
3.5	5	140	5,1	7,4	140,46	4,2	4,9	4,60	0,213	70	67,93
7.5	40	219	40,0	47,6	218,71	6,3	6,8	6,55	0,104	432	106,08

Примітка. D_{cp} – початковий середній (еквівалентний) зовнішній діаметр у трьох центральних перерізах 2, 3, 4, визначений згідно з вимогами ТУ; σ – стандартне відхилення для товщини; n – кількість вимірів у регулярній частині; D_{cp} і s_0 – для регулярної частини балонів, які знаходяться недалеко від переходів на їхнє днище та верхню частину; G_0 – чиста вага колб (без кілець для кріплення ковпаків) з відхиленням $\pm 0,05$ кг; W_0 – внутрішній об'єм із похибкою $\pm 0,1$ л; $r_0 = (D_{cp} - s_0)/2$ – радіус серединної поверхні, використаний при розрахунках.

Дані для розрахунку балонів для гідравлічних випробувань внутрішнім тиском, для яких проводили запис значень коерцитивної сили при ступінчастому навантаженні до руйнування балонів №3.5 і 7.5, приведено в табл. 6.*

Таблиця 6

Етапи ступінчастого навантаження внутрішнім тиском балонів №3.5 і 7.5

Етапи навантаження	$P_{тр}$, МПа	P_{max} , МПа	P_{min} , МПа	$\sigma_t = \frac{Pr_0}{s_0}$, МПа	$\sigma_z = \frac{\sigma_t}{2}$, МПа	$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_t = \frac{\sqrt{3}Pr_0}{2s_0}$, МПа
Балон № 3.5						
1	5,68	5,69	5,65	83,88	41,94	72,64
2	10,77	10,78	10,74	159,04	79,52	137,74
3	15,79	15,81	15,76	233,18	116,59	201,94
4	22,97	22,99	22,94	339,21	169,60	293,76
5	25,81	25,83	25,76	381,15	190,57	330,08
6	30,59	30,7	30,38	451,73	225,87	391,21
7	35,26	35,38	35,01	520,70	260,35	450,94
8	40,24	40,44	39,84	594,24	297,12	514,63
P_T	32,44	$\sigma_{0,2}=461,6$	–	479,05	239,53	414,87
P_B	44,11	$\sigma_b=712,62$	–	651,39	325,69	564,12
Балон № 7.5						
1	5,66	5,68	5,61	91,67	45,83	79,39
2	10,52	10,53	10,51	170,38	85,19	147,55
3	15,44	15,45	15,41	250,06	125,03	216,56
4	22,71	22,73	22,66	367,80	183,90	318,52
5	25,61	25,63	25,58	414,76	207,38	359,20
6	29,89	30,14	29,38	484,08	242,04	419,23
7	31,99	32,24	31,5	518,09	259,05	448,68
P_T	29,94	$\sigma_{0,2}=483,21$	–	484,89	242,45	419,93
P_B	44,46	$\sigma_b=729,25$	–	720,05	360,02	623,58

Примітка. $P_{тр}$ – тиск, прийнятий для розрахунків.

Кільцеві напруження визначали за залежністю $\sigma_t = Pr_0/s_0$, а поздовжні (осьові) – $\sigma_z = \sigma_t/2$. Інтенсивність напружень визначали за залежністю $\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_t = \frac{\sqrt{3}Pr_0}{2s_0}$ як еквівалентне напруження за 4-ю теорією міцності (гіпотезі питомої потенціальної енергії зміни форми). Для розрахунку тиску випробування балонів прийнято характеристики міцності металу балонів № 3.5 і 7.5, які згідно із сертифікатом складали $\sigma_{0,2} \geq 505$ МПа і $\sigma_b \geq 715$ МПа відповідно.

* Результати оцінки зміни структурного стану металу досліджених ділянок балонів при натурних ступінчастих навантаженнях гідравлічним внутрішнім тиском буде приведено в повідомленні 3.

З приведених даних видно, що для досліджених балонів № 3.5 і 7.5 внутрішній тиск, який викликав початок текучості металу при випробуваннях, сягав 32,44 та 29,94 МПа відповідно. Внутрішній тиск руйнування для цих балонів складав 44,11 і 44,46 МПа відповідно. При цьому кільцеві розрахункові напруження текучості металу складали $\sigma_t^T = 479,05$ і $484,89$ МПа відповідно. Кільцеві розрахункові напруження руйнування сягали відповідно $\sigma_t^b = 651,39$ і $720,05$ МПа. Умовна границя текучості металу балонів № 3.4 і 7.4, яку визначали на лабораторних зразках, дорівнювала $\sigma_{0,2} = 461,6$ і $483,21$ МПа відповідно. Границя міцності металу цих балонів визначена на лабораторних зразках, складала $\sigma_b = 712,62$ і $729,25$ МПа відповідно (табл. 3). Отримані результати показали, що для балона № 3.5 напруження руйнування на 8,5% нижчі за границю міцності металу зразків, тоді як напруження текучості металу перевищували аналогічні значення для лабораторних зразків. Для балона № 7.5 напруження текучості металу і руйнування відповідали аналогічним параметрам лабораторних зразків.

Слід зазначити деякі відмінності в діапазонах ділянок зміцнення при випробуванні балонів внутрішнім тиском до руйнування при двовісному напруженому стані і лабораторних зразків при одновісному. Так, діапазон ділянок зміцнення балонів № 3.4 і 3.5, визначених як відношення P_B/P_T , складав 1,47 та 1,36 відповідно (табл. 4). Аналогічно для балонів № 7.4 і 7.5 цей діапазон складав 1,48. Діапазон ділянок зміцнення, визначений за розрахунковим кільцевим напруженням σ_t балонів № 3.5 і 7.5, складав 1,36 та 1,48 відповідно (табл. 6). Для лабораторних зразків із металу балонів № 3.4 і 7.4 діапазон ділянок зміцнення, визначений як відношення $\sigma_b/\sigma_{0,2}$, складав 1,54 та 1,51 відповідно (табл. 3). Таким чином, діапазон ділянок зміцнення металу при випробуванні зростаючим внутрішнім тиском балонів № 3.4 і 3.5 на 4,8 і 12% менший за аналогічний діапазон ділянок для лабораторних зразків. Для балонів № 7.4 і 7.5 ці відмінності складали тільки 2,0%, що ймовірно, пов'язано з впливом двовісності навантаження на обмеження можливості розвитку деформацій, де максимальні значення накопичених деформацій по периметру балонів № 5.4 складали 6,48%, № 3.5 і 7.5 – 3,3 і 5,61% відповідно (рис. 5). Тобто при навантаженні зростаючим внутрішнім тиском у момент руйнування було реалізовано тільки частину рівномірної деформації (25,0...26,2%, рис. 3), відносно визначеної при випробуванні лабораторних зразків металу балонів № 3.4 та 7.4 на розтяг. Подальшого накопичення пластичних деформацій не відбувається через вплив двовісності й динамічності (швидкоплинності) процесу руйнування (вивільнення енергії стиснутої води при руйнуванні балона), що зумовлено ефектом запізнення деформації відносно нормованих швидкостей навантаження при розтязі. Слід зазначити, що накопичена деформація по периметру руйнування випробуваних 14 балонів зростаючим внутрішнім тиском до руйнування знаходилась в межах 3,95...6,48% (табл. 3).

У табл. 7 і 8 та на рис. 5 приведено дані накопичених деформацій по периметру балонів № 3.5 і 7.5 після руйнування у різних по довжині перерізах.

У зв'язку з тим, що частина балонів пробної партії не витримала базового числа циклів навантаження пробним тиском було проведено випробування у повному об'ємі додаткової партії балонів, зокрема зростаючим внутрішнім гідравлічним тиском до руйнування (табл. 9).

Таблиця 7
Дані залишкових деформацій по периметру балона № 3.5 у різних перерізах

Деформації	Периметр у перерізах, мм						
	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7
	450	463	463	465	450	463	463
Δ, мм	0	13	13	15	0	13	13
ε, %	0	2,9	2,9	3,33	0	2,9	2,9

Таблиця 8
Дані залишкових деформацій по периметру балона № 7.5 у різних перерізах

Деформації	Периметр у перерізах, мм								
	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7	п8	п9
	695	723	730	727	695	730	734	733	732
Δ, мм	0	28	35	32	0	35	39	38	37
ε, %	0	4,03	5,04	4,6	0	5,04	5,61	5,47	5,32

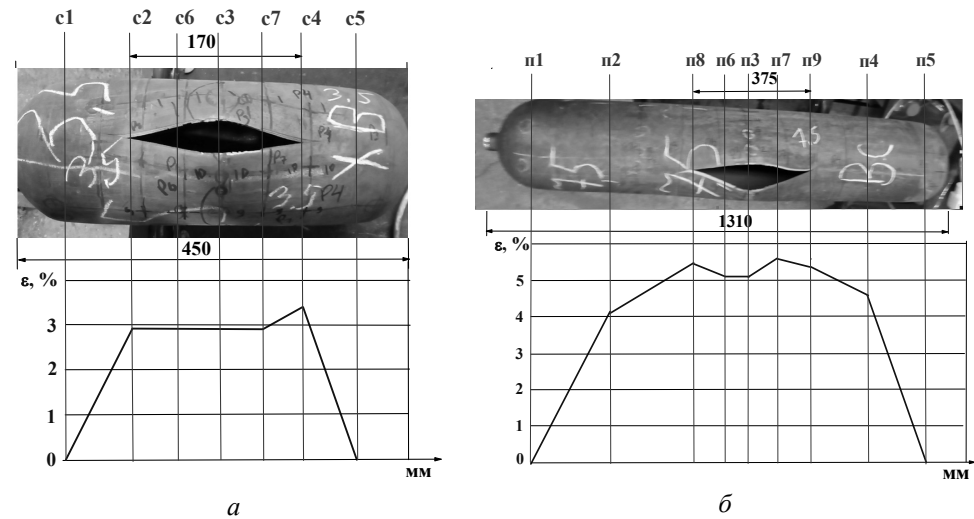


Рис. 5. Загальний вигляд балонів № 3.5 (а) і 7.5 (б) після руйнування з графіками розподілу залишкових деформацій по довжині.

Випробування зростаючим внутрішнім тиском додаткової партії балонів показали більш високі показники міцності на 10...12% (відносно основної партії балонів) тільки для балонів Ø140 мм ємністю 5 і 10 л і 159 мм ємністю 10 л (табл. 4 і 9). Характеристики міцності порівнюваних партій балонів Ø108 мм ємністю 2 л і 219 мм ємністю 40 л практично не відрізнялись.

Таким чином, проведені натурні випробування зростаючим внутрішнім гідравлічним тиском до руйнування дослідної партії балонів свідчать про деяку невідповідність вимогам регламентуючого нормативного документа геометричного параметра дотримання вертикальності кількох типорозмірів балонів і характеристик міцності металу. Вимоги до характеру руйнування відповідали нормативному

документу. Експериментально встановлено вплив двовісності навантаження на характеристики міцності й обмеження накопичених деформацій по периметру при випробуванні балонів і лабораторних зразків на розтяг.

Таблиця 9

Результати випробувань внутрішнім тиском до руйнування додаткової партії балонів

D_a , мм	T_{min} , мм	V , л	P_T , бар	P_B , бар	v , < бар/с	n_B
108	3,2	2	422	579,7	3,9	3,89
108	3,2	2	415	574,6	3,9	3,83
140	4,1	5	370	516,7	3,7	3,44
140	4,1	5	358	493,9	3,8	3,29
140	4,1	10	353	516,8	3,6	3,45
140	4,1	10	345	499,5	3,4	3,33
159	4,4	10	332	474,4	3,4	3,16
159	4,4	10	330	481,6	3,4	3,21
219	5,7	40	295	451,1	2,4	3,01
219	5,7	40	296	441,5	2,4	2,94
Розрахунок для $P_{II} = 225$ бар			265,5	398,5	—	—

Примітка. У кінці таблиці наведено розрахункові мінімально допустимі значення пробного тиску $P_{II} = 225$ бар для додаткової партії балонів за умови $\sigma_{0,2} \geq 465$ МПа, $\sigma_b \geq 675$ МПа згідно із сертифікатом, де $\sigma_b/\sigma_{0,2}=1,45$.

Висновки

З метою перевірки якості балонів високого тиску різної ємності для обґрунтування їхньої закупівлі за кордоном і сертифікації в Україні у сертифікованій лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України було проведено стандартні статичні і 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.

Проаналізовано різні нормативні документи й вибрано найбільш об'єктивний для експериментальної перевірки дослідної партії балонів вимогам НД. Установлено невідповідність вимогам нормативного документа геометричного параметра дотримання вертикальності кількох типорозмірів балонів і характеристик міцності металу зразків із дослідженої партії.

Виявлено, що всі типорозміри балонів витримали статичні випробування як по параметрах міцності, так і за характером руйнування та відповідали вимогам нормативного документа. Руйнування балонів відбувалось від дії кільцевих напружень у поздовжньому напрямку. При цьому характеристики міцності балонів, отримані при випробуванні внутрішнім тиском до руйнування, добре узгоджуються з результатами випробування лабораторних зразків на розтяг. По запасу статичної міцності пробна партія досліджених балонів відповідала вимогам НД.

Експериментально визначено, що при статичному навантаженні зростаючим внутрішнім тиском руйнування відбувається по механізму квазістатичного руйнування з ознаками обмеження накопичених деформацій. Установлено вплив двовісності навантаження на характеристики міцності та величину накопиченої

деформації по периметру при випробуванні балонів і лабораторних зразків на розтяг. Обмеження накопичення деформацій в балонах пов'язано з впливом двовісності навантаження та динамічності процесу руйнування, що зумовлено ефектом запізнення деформації відносно нормованих швидкостей навантаження при розтягу.

1. *ДСТУ EN ISO 9809-3:2019. Балони газові. Перезаправні безшовні сталеві газові балони. Проектування, конструювання та випробування. Частина 3. Нормалізовані сталеві балони (EN ISO 9809-3:2010, IDT; ISO 9809-3:2010, IDT), Чинний від 2020-01-01.*
2. *ДСТУ 3245-95. Балони сталеві зварні для зріджених вуглеводневих газів на тиск до 1,6 МПа. Загальні технічні умови, Чинний від 01.07.2003.*
3. *ISO 9809-1:2010(E). Gas Cylinders – Refillable Seamless Steel Gas Cylinders – Design, Construction and Testing – Part 1: Quenched and Tempered Steel Cylinders with Tensile Strength Less than 1 100 MPa, ISO, Switzerland (2015).*
4. *ДСТУ EN ISO 7866:2019. Газові балони. Багаторазові безшовні газові балони з алюмінієвих сплавів. Проектування, конструкція та випробування (EN ISO 7866:2012, IDT; ISO 7866:2012, IDT), Чинний від 01.01.2020.*
5. Р. И. Дмитриенко, Э. Ф. Гарф, В. П. Чижиченко, Остаточное расширение баллонов (краткий обзор), *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*, № 1, 23–28 (2014).
6. *GB/T 9251-2022. Methods for Hydrostatic Test of Gas Cylinders, China (2022).*
7. *DOT CFR 49–U.S. Department of Transportation, Code of Federal Regulations. (Департамент транспорту США (DOT), кодекс федеральних правил (CFR), розділ 49, для виробництва, перевірки і транспортування посудин високого тиску).*
8. *CGA C-1-2009. Methods for Pressure Testing Compressed Gas Cylinders, CGA, Inc., USA (2009).*
9. *ECE/TRANS/WP.15/AC.1/2010/15. Proposal for Changing the Provisions for the Hydraulic Pressure Test for non-UN Pressure Receptacles in 6.2.3.4.1, Economic and Social Council, UN, Bern (2010).*
10. R. Dmytriienko, A. Perepichay, O. Prokhorenko, and A. Alexiev, Evaluation of static strength margin of thin-wall steel cylinders on coefficient of permanent expansion, *Int J NDT Days*, **2**, No. 4, 375–389 (2019). <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=25198>
11. Э. Ф. Гарф, Р. И. Дмитриенко, А. А. Перепечай и др., Надежность и экономичность производимых в Украине баллонов высокого давления для технических газов, *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*, № 2, 36–41 (2012).

Надійшла 18.12.2025