



Evaluation of Static Strength Margin of Thin-Wall Steel Cylinders on Coefficient of Permanent Expansion

Roman DMYTRIENKO¹, Andriy PEREPICHAY¹,
Odarka PROKHORENKO², Alexander ALEXIEV³

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych St., Kyiv 03150 Ukraine. E-mail: dri1@ukr.net

² National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37, Prosp. Peremohy, Solomyanskyi district, Kyiv, Ukraine, 03056.

³ Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences,

Block 4, Acad. G. Bonchev Str., 1113 Sofia, Bulgaria. E-mail: alexiev@imbm.bas.bg

Abstract

Theoretical and experimental substantiation of application of method of permanent expansion for evaluation of static strength margin of steel cylinders have been presented. Common deformation curve and deformation plasticity theories are used. A possibility is provided for justified designation of a maximum allowable coefficient of permanent expansion used at periodic inspection of the cylinders.

Keywords: steel cylinders, hydraulic pressure tests, volume change, strength margin, periodic inspection.

Evaluation of Static Strength Margin of Thin-Wall Steel Cylinders on Coefficient of Permanent Expansion / R. Dmytriienko, A. Perepichay, O. Prokhorenko, A. Alexiev // International Journal «NDT Days». - Year 2019. Volume II / Issue 4, pp. 375-389. ISSN 2603-4018.

Статья вышла на английском языке, публикуется в бумажном виде и на сайтах:

www.bg-s-ndt.org/journal/vol2_bg.html; www.ndt.net.

Для удобства, ниже приведена версия на русском языке.

Оценка запаса статической прочности тонкостенных цилиндрических стальных баллонов по коэффициенту их остаточного расширения

Р. И. Дмитриенко¹, А. А. Перепечай¹, Д. В. Прохоренко², А. Р. Алексиев³

¹ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Ул. Казимира Малевича 11, г. Киев, Украина. 03150.

E-mail: dri1@ukr.net

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». Пр-т Победы, 37, Соломенский район, г. Киев, Украина. 03056.

³ Институт Механики Болгарской академии наук. Блок 4, ул. Акад. Г. Бончев, София, Болгария. 1113.

E-mail: alexiev@imbm.bas.bg

Аннотация

Представлено теоретическое и экспериментальное обоснование использования метода остаточного расширения для оценки статической прочности цилиндрических стальных баллонов. Используются единая кривая деформирования и деформационная теория пластичности. Приведена возможность обоснованного назначения предельно-допустимого коэффициента остаточного расширения, используемого при периодической инспекции баллонов.

Ключевые слова: стальные баллоны, гидроиспытания внутренним давлением, изменение объема, запас прочности, периодическая проверка.

1. Общие положения

В публикации выдвигается гипотеза о единой зависимости между коэффициентом остаточного расширения и коэффициентом запаса статической прочности для однотипных баллонов. Приводятся теоретические и экспериментальные аргументы в ее защиту.

Гипотеза: Тонкостенные стальные цилиндрические баллоны, изготовленные из одной марки стали и по одной технологии, независимо от различий по объему, весу, толщине стенки, наружному диаметру и длине, будут иметь одинаковую зависимость между текущим коэффициентом запаса статической прочности и коэффициентом остаточного расширения.

Примечания: Баллоны не должны иметь дефектов, выявляемых методами неразрушающего контроля. Это означает, что если баллон нагружать медленно возрастающим внутренним давлением вплоть до предельного состояния, то его разрушение будет происходить вследствие исчерпания несущей способности самого металла. Зависимость текущего коэффициента запаса статической прочности от коэффициента остаточного расширения можно получить как теоретически, так и экспериментально.

В процессе производства баллонов одного типа, существует определенный разброс по геометрическим параметрам и механическим свойствам. Некоторые из показателей регламентируются допусками, некоторые нет. Зачастую устанавливается только одна предельно-допустимая граница. На весьма существенный разброс механических свойств влияют плавки даже одной и той же стали, не говоря уже о разных сталях-заменителях. В качестве примера на рисунке 1 представлены результаты механических испытаний на растяжение металла кислородных 40-ка литровых баллонов изготовленные по ГОСТ 949-73 [1]. Минимально-допустимые значения предела текучести ($\bar{\sigma}_T$) и временного сопротивления ($\bar{\sigma}_B$) составляют 373 и 638 МПа, соответственно. Условное обозначение чертой сверху означает, что данные по диаграмме растяжения. Рисунок 1а - данные при производстве за 2001-2008 г.г., на ММК им. Ильича. Использовались цилиндрические образцы, вырезаемые в осевом направлении из гильз-свидетелей. Выборка составлена без повторных термообработок. Испытания на двух образцах из каждой партии, всего 447 партий. В партии не более 400 баллонов, [2]. Баллоны изготавливались преимущественно из стали марки Дс (ТУ 14-157-15). Рисунок 1б - действительные диаграммы деформирования (см. зависимости (4)), полученные по диаграммам растяжения образцов, вырезанных в кольцевом направлении 2-х исследуемых баллонов изготовленных из стали марки Дс, и долгое время находящихся в эксплуатации. Образцы вырезались из недеформированной части - под башмаками, после разрушений баллонов внутренним давлением. Диаграммы даны до деформаций соответствующих временному сопротивлению - началу образования шейки. В области незначительных пластических деформаций отношение напряжений практически постоянно.

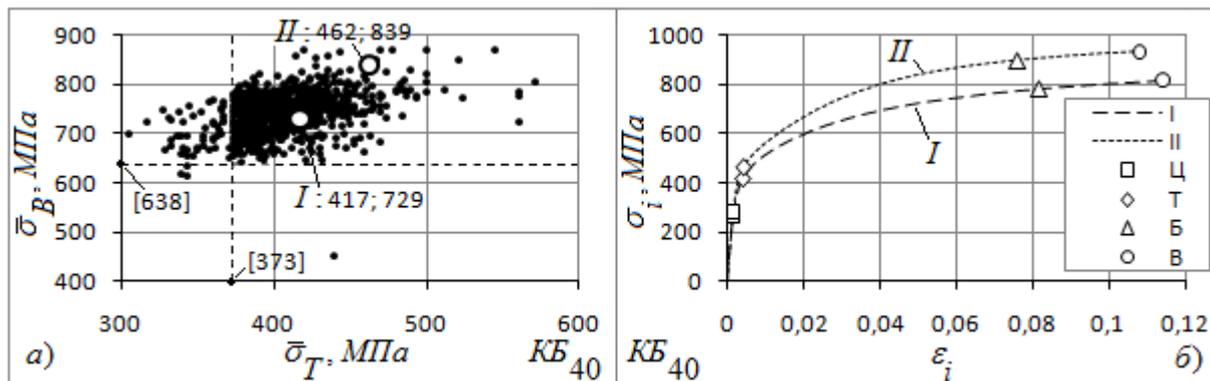


Рис. 1. Механические свойства металла кислородных 40-ка литровых баллонов:

а - при производстве; б - действительные диаграммы деформирования металла баллонов I и II, построенные по диаграммам растяжения с использованием зависимостей (4).

Ц - предел пропорциональности $\sigma_{ПЦ}$ см. ГОСТ 1497-84 [3]; Т - условный предел текучести σ_{02} ; Б - значение соответствующее предельному состоянию баллона (см. зависимость (15)); В - временное сопротивление σ_B . Значения Ц, Т, В действительной диаграммы деформирования получены из соответствующих значений по диаграмме растяжения с использованием зависимостей (4).

Из рисунка 1а виден довольно таки большой разброс предела текучести и временного сопротивления при производстве одного типа баллонов на одном заводе. Известно, что механические свойства имеют нормальное распределение, что в принципе подключая дополнительный анализ можно сказать о временном сопротивлении. Предел текучести же сильно далек от этого закона. В принципе даже из рисунка 1а можно сделать вывод, что данные по пределу текучести, в области его минимально-допустимых значений по ГОСТу, были собраны весьма не объективно. Также можно проследить тенденцию, что чем выше предел текучести, тем выше и временное сопротивление. Что же касается прочности, то например, баллон с большим диаметром и меньшей толщиной стенки, имея более высокие механические свойства, может оказаться прочнее - выдержать большее давление. Процесс эксплуатации баллонов также может вносить свои коррективы в прочность, например уменьшение толщины стенки вследствие коррозии, и т.п. (По европейским требованиям, например, коррозия недопустима).

При производстве и при периодических освидетельствованиях баллонов проводят гидравлические испытания внутренним пробным давлением (P_{II}), которое, в зависимости от различных требований, превышает рабочее (P_P) в 1,25; 1,5 либо в 5/3 раза. По целому ряду нормативных документов (см. например [4, 5, 6, 7]) в процессе проведения таких испытаний определяют изменения объема и определяют коэффициент остаточного расширения:

$$K_{op} = \Delta W_{ост} / \Delta W_{полн} , \quad (1)$$

где: $\Delta W_{полн}$ - полное изменение объема баллона находящегося под пробным давлением, $\Delta W_{ост}$ - остаточное изменение объема баллона после сброса пробного давления до нуля.

Изменения объема определяют преимущественно с помощью метода «водяной рубашки». Баллон помещают в плотно закрываемый сосуд с жидкостью с выходящей из него (из сосуда) оттарированной бюреткой. При нагружении давлением баллон расширяется и

вытесняет жидкость в бюретку. Также устанавливают предельно-допустимое значение K_{op} на уровне 0,1 - для стальных баллонов, и 0,05 - для композиционных баллонов, в России, например, 0,05 на все баллоны.

В США, например, помимо коэффициента остаточного расширения, по рекомендациям ассоциации сжатого газа определяют упругое расширение:

$$\Delta W_{упр} = \Delta W_{полн} - \Delta W_{ост} \quad (2)$$

Предельно-допустимое его значение устанавливается из ограничения средних напряжений в стенке баллона, см. [8]. Разъяснение приводимых формул и экспериментальные зависимости можно найти в материалах [9]. Упругое изменение объема связано с геометрическими характеристиками конкретного баллона, остаточное же, с величинами пластических деформаций, если они имели место в стенке баллона, при пробном давлении. Коэффициент остаточного расширения является интегральной характеристикой и характеризует степень этих пластических деформаций. В упругой области работы он равен нулю ($\Delta W_{ост} = 0$). Как будет видно далее, наиболее чувствителен он к начальным этапам пластических деформаций, а затем слабо реагирует на дальнейшие деформации. Также он не может быть больше 1.

Фактический коэффициент запаса статической прочности баллона (n_B) определяется как максимальное давление, реализованное в баллоне (P_B) перед его разрушением, отнесенное к рабочему, и минимально-допустимое его значение также регламентируется. Для большого спектра баллонов, по европейским и американским требованиям этот коэффициент равен 2,4, на пост советском пространстве - 2,6. При уменьшении коэффициента, по каким либо причинам, ограничивается и срок дальнейшей эксплуатации. Определить фактическую прочность баллона можно только путем его разрушения. В силу различных причин коэффициент n_B будет иметь некоторый разброс даже для баллонов принадлежащих одной партии. Понятно, что при пробных испытаниях n_B не ниже чем отношение P_{II}/P_R , но какой он на самом деле для каждого конкретного баллона, сказать нельзя. Используя метод объемного расширения можно полагать, что чем больше при этом будет K_{op} , тем ближе предельное состояние, т.е. P_B , и, следовательно, n_B будут ниже.

Одинаковое значение предельно-допустимого коэффициента назначается на различные типы баллонов независимо от соотношения P_{II}/P_R , и минимально-допустимого коэффициента запаса статической прочности. При этом в подавляющем большинстве случаев, не учитывают данные предшествующих проверок. Более подробную информацию и ссылки на источники можно найти в статье [10].

2. Теоретические предпосылки

Детальная проработка излагаемой ниже теории рассмотрена в [11]. Там же приводятся и многочисленные экспериментальные данные, включая подробное описание, и результаты испытаний натурального образца, используемого далее. В данной публикации излагаются только основные положения.

При описании больших деформаций целесообразнее пользоваться понятием логарифмической деформации (ε), иногда ее называют действительная, которую можно выразить через текущий (l) и первоначальный (l_0) линейные размеры, либо же через обычную деформацию ($\bar{\varepsilon}=\Delta l/l_0$) следующим образом:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln l - \ln l_0 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \bar{\varepsilon}). \quad (3)$$

Здесь $\Delta l = l - l_0$ - конечное приращение.

Оперирование логарифмическими деформациями, удобней с математической точки зрения - исчезают дополнительные члены, которые неудобны в преобразованиях. К тому же они, в отличие от обычных, обладают свойством аддитивности. При малых деформациях обычные и логарифмические деформации практически неразличимы.

При механическом испытании образца на одноосное растяжение, получают диаграмму растяжения: $\bar{\varepsilon} = \Delta l / l_0$ - обычная продольная деформация, $\bar{\sigma} = F / A_0$ - напряжение, как растягивающее усилие F , действующее на образец, отнесенное к первоначальной площади его рабочего поперечного сечения A_0 . Эту диаграмму будем перестраивать в действительную диаграмму деформирования ε_i, σ_i по следующим зависимостям:

$$\varepsilon_i = \varepsilon = \ln(1 + \bar{\varepsilon}), \quad \sigma_i = \bar{\sigma}(1 + \bar{\varepsilon}). \quad (4)$$

Тогда ею можно пользоваться и при многоосном напряженном состоянии, но только до момента образования шейки. Интенсивность напряжений (σ_i) здесь уже с учетом изменения размеров. Следует заметить, что при таком построении действительной диаграммы деформирования мы пренебрегаем упругими деформациями объема занятым материалом, т.е. принимается условие несжимаемости - коэффициент Пуассона μ равен 0,5. Теорема же об упругой разгрузке сохраняет свою силу. Действительная диаграмма деформирования ε_i, σ_i является свойством материала и не зависит от типа напряженного состояния. В обобщенном виде, при сложном напряженно-деформированном состоянии закона Гука для упругого состояния выглядит следующим образом: $\sigma_i = E \varepsilon_i$. Следует заметить, что далее, напряжения мы определяем не по первоначальным, а уже по фактическим, текущим размерам, см. например зависимости (6). В дальнейшем будем использовать только такие напряжения и логарифмические деформации.

Расчет ведем по тонкостенной теории - толщина стенки мала по сравнению с диаметром. Обозначая первоначальные значения радиуса срединной поверхности, толщины стенки и длины баллона через r_0, s_0, l_0 , текущие, изменяемые в процессе деформирования под нагрузкой, можно выразить в соответствии с формулой (3), следующим образом:

$$r = r_0 e^{\varepsilon_r}, \quad s = s_0 e^{\varepsilon_s}, \quad l = l_0 e^{\varepsilon_z}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_s, \varepsilon_z$ - деформации баллона в кольцевом, по толщине стенки и в осевом направлениях, (главные деформации).

В упругой области изменения размеров незначительны, поэтому ими обычно пренебрегают, в области же пластических деформаций, изменения существенны и пренебрегать ими не следует.

Внутреннее давление, действуя на днища цилиндрического баллона, создает осевое усилие и, следовательно, осевые напряжения. Радиальные напряжения в баллоне считаем равными нулю, т.е. принимаем плоское напряженное состояние. Цилиндрическая часть баллона находящаяся в пластической области, как будет показано ниже, из предположения о несжимаемости, будет находиться в условиях плоского деформированного состояния - осевые деформации равны нулю. Рассматривая деформирование тонкостенного стального баллона за пределами упругости можно пользоваться несколькими теориями пластичности. Для тонкостенного баллона под воздействием внутреннего давления, независимо от выбранной теории пластичности, главные напряжения в цилиндрической стенке - кольцевые, осевые и радиальные, выражаются следующим образом:

$$\sigma_t = Pr/s, \sigma_z = \sigma_t/2, \sigma_r = 0. \quad (6)$$

Определяя интенсивность напряжений как эквивалентное напряжение по 4-й теории прочности - гипотезе удельной потенциальной энергии изменения формы, и подставляя напряжения из (6) имеем:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z)^2 + (\sigma_t)^2} = \sqrt{\sigma_t^2 - \sigma_t \sigma_z + \sigma_z^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_t = \frac{\sqrt{3} Pr}{2s}. \quad (7)$$

В пластической области, так как и в упругой, интенсивность напряжений пропорциональна своим составляющим, и эти составляющие между собой также пропорциональны и в свою очередь пропорциональны давлению.

Также следует отметить, что вследствие геометрической и силовой симметрии, касательные напряжения на главных площадках - параллельных и перпендикулярных оси, равны нулю. При нагружении цилиндрического баллона внутренним давлением главные оси напряженного состояния сохраняют свое направление. Напряжения между собой пропорциональны и возрастают пропорционально давлению. Такой вид деформации носит название простой деформации, а нагружение - простого нагружения. В случае простого нагружения, интенсивность приращения пластических деформаций равна приращению интенсивности пластических деформаций. В таком случае при описании больших пластических деформаций уместно использовать деформационную теорию пластичности (теорию малых упруго-пластических деформаций). Процесс нагружения не только при малых, но и при больших деформациях является простым. Линейные деформации, соответствующие главным напряжениям тоже главные. Для участков значительно удаленных от днищ, радиальные перемещения не зависят от положения вдоль оси. Поэтому можно рассматривать часть баллона, вырезанную двумя сечениями, нормальными к оси баллона, и составлять уравнения равновесия элемента оболочки, выделенного из этой части двумя радиальными сечениями, составляющими между собой некоторый угол. Это справедливо как для упругой, так и для пластической стадии нагружения. Деформации же определяемые по различным теориям пластичности могут различаться. При описании пластических деформаций баллона, например с помощью теории пластического течения (теории течения), получаются такие же результаты, как и по деформационной теории пластичности. Теория течения используется тогда, когда при нагружении, напряжения не пропорциональны между собой, т.е. нагружение не является простым [12]. Интенсивность приращения пластических деформаций, в общем случае, не равняется приращению

интенсивности пластических деформаций. Равенство, это частный случай, и его нужно доказывать.

При построении деформационной теории пластичности как собственно и теории пластического течения в уравнениях остаются модуль упругости и коэффициент Пуассона в упругой области, которые позволяют из зависимостей, полученных для пластического состояния (общих решений), при незначительных деформациях получить упругие решения. При пластических же деформациях упругая составляющая в уравнениях мала. Фактический же коэффициент Пуассона в области пластического деформирования стремится к 0,5 [13]. В условиях разгрузки действуют только уравнения упругости.

Расписывая главные деформации через напряжения [12], и выражая напряжения через их интенсивность, имеем главные деформации для баллона:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_i}{2\sqrt{3}} \left(\frac{1-2\mu}{E} + \frac{3}{E_C} \right), \quad \varepsilon_s = -\frac{\sqrt{3}\sigma_i}{2} \left(\frac{1-2\mu}{E} - \frac{1}{E_C} \right), \quad \varepsilon_z = \frac{2\sigma_i}{\sqrt{3}E} \left(\frac{1}{2} - \mu \right), \quad (8)$$

где: E_C - секущий модуль упругости по действительной диаграмме деформирования - переменная величина.

Отсюда видно, что осевые деформации всегда упругие, а деформации по толщине стенки отрицательны. Следует заметить, что если в выражении находится модуль упругости (E), или тоже самое, $\mu \neq 0,5$, то секущий модуль не стоит расписывать как σ_i/ε_i , поскольку в отличие от интенсивности напряжений, интенсивности деформаций для баллона и по действительной диаграмме деформирования разные. Пологая для баллона $\mu = 0,5$, они полностью совпадают, только в таком случае можно принять $E_C = \sigma_i/\varepsilon_i$ и производить дальнейшие преобразования.

Расписывая интенсивность деформаций по определению, используя зависимости (8), для баллона имеем:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_s)^2 + (\varepsilon_s - \varepsilon_t)^2} = \frac{\sigma_i}{3} \left(\frac{2\mu-1}{E} + \frac{3}{E_C} \right). \quad (9)$$

Заменяя в формулах (8, 9) E_C на E , получаем зависимости для расчета упругого деформирования. Зависимости существенно упрощаются, если считать материал несжимаемым, т.е. принимать $\mu = 0,5$. Отсюда следует, что: $\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_C} = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_t$, $\varepsilon_s = -\varepsilon_t$ и $\varepsilon_z = 0$.

Для этого случая также можно показать, что: $r \cdot s = r_o \cdot s_o$ и $\sigma_i \cdot \varepsilon_i = \sigma_t \cdot \varepsilon_t$. Вообще при принятии $\mu = 0,5$ решения в пластической области более приближены к реальности, но при малых деформациях эти решения не переходят автоматически в упругие решения, вернее они переходят в такие упругие решения, где коэффициент Пуассона также равен 0,5.

В пластической области в отличие от упругой, интенсивность деформаций не пропорциональна интенсивности напряжений. Также интенсивность деформаций не пропорциональна каждой из линейных деформаций. При $\mu = 0,5$ интенсивность деформаций становится пропорциональной линейным деформациям за исключением осевых, которые в этом случае равны нулю. И все также не пропорциональна интенсивности напряжений.

Поскольку логарифмические деформации в отличие от обычных обладают свойством аддитивности, то после сброса внутреннего давления, приведшего к пластическим деформациям, остаточные деформации ($\varepsilon_{iост}$) можно выразить как разницу между полными (ε_i) и упругими (ε_{iy}). Сброс естественно происходит упруго:

$$\varepsilon_{iост} = \varepsilon_i - \varepsilon_{iy} = \left(\frac{\sigma_i}{3} \left(\frac{2\mu-1}{E} + \frac{3}{E_C} \right) \right) - \left(\frac{2\sigma_i(1+\mu)}{3E} \right) = \sigma_i \left(\frac{1}{E_C} - \frac{1}{E} \right). \quad (10)$$

Понятно, что здесь значение σ_i соответствует значению интенсивности напряжений во время нагрузки. Видно, что это выражение не зависит от коэффициента Пуассона, и полностью совпадает с параметром Удквиста - остаточные деформации по действительной диаграмме деформирования. Т.е. здесь остаточные деформации в баллоне уже совпадают с остаточными деформациями по действительной диаграмме деформирования. Аналогично можно поступить и с главными деформациями. Откуда следует, что: $\varepsilon_{tост} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_{iост}$, $\varepsilon_{sост} = -\varepsilon_{tост}$, $\varepsilon_{zост} = 0$, а также что $r_{ост} \cdot s_{ост} = r_o \cdot s_o$. Отсюда видно, что все остаточные деформации не зависят от коэффициента Пуассона.

Для случая простого нагружения интенсивность деформаций можно расписать как сумму упругой и пластической составляющих: $\varepsilon_i = \varepsilon_{iy} + \varepsilon_{ip}$, где пластическая составляющая: $\varepsilon_{ip} = \varepsilon_{iост}$. То же будет верно и для приращений: $d\varepsilon_i = d\varepsilon_{iy} + d\varepsilon_{ip}$. Под ε_{iy} можно понимать как величину упругой разгрузки в каждой точке. Чем больше деформация, тем больше напряжения и тем большей будет величина упругой разгрузки. Интересно отметить, что пластическая составляющая деформаций, как и ее приращение не зависят от коэффициента Пуассона.

Используя текущие и первоначальные размеры, распишем изменение объема баллона как изменение объема, обметаемого цилиндрической оболочкой:

$\Delta W = \pi r^2 l - \pi r_o^2 l_o = \pi r_o^2 l_o \left(e^{2\varepsilon_t + \varepsilon_z} - 1 \right) = W_o \left(e^{2\varepsilon_t + \varepsilon_z} - 1 \right)$. Расписывая главные деформации, имеем общее решение:

$$\Delta W = W_o \left(\exp \left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left(\frac{2-4\mu}{E} + \frac{3}{E_C} \right) \right) - 1 \right) = W_o \left(\exp \left(\sqrt{3} \varepsilon_i \frac{\frac{2-4\mu}{E} + \frac{3}{E_C}}{\frac{2\mu-1}{E} + \frac{3}{E_C}} \right) - 1 \right). \quad (11)$$

Здесь $W_o = \pi r_o^2 l_o$ - первоначальный объем, хотя его можно определить и непосредственно, например, как внутренний, а ε_i определяется по формуле (9), а не по действительной диаграмме деформирования. В упругой области соответственно имеем:

$$\Delta W_y = \Delta W = W_o \left(\exp \left(\frac{\sigma_i(5-4\mu)}{\sqrt{3}E} \right) - 1 \right) = W_o \left(\exp \left(\frac{\varepsilon_i \sqrt{3}(5-4\mu)}{2(1+\mu)} \right) - 1 \right), \text{ а при } \mu = 0,5 \text{ из общего}$$

$$\text{решения следует: } \Delta W = W_o \left(\exp \left(\frac{\sqrt{3}\sigma_i}{E_C} \right) - 1 \right) = W_o \left(\exp(\sqrt{3}\varepsilon_i) - 1 \right).$$

Из общего решения (11) видно, что разложить полное изменение объема под нагрузкой, на упругую (ΔW_y), сбрасываемую после разгрузки, и пластическую (ΔW_p) составляющие не представляется возможным. Условно полагая что: $\Delta W = \Delta W_y + \Delta W_p$, пластическое изменение объема можно представить как: $\Delta W_p = \Delta W - \Delta W_y$. Естественно, что с ростом пластических деформаций, ΔW_y , как собственно и ΔW , и ΔW_p увеличивается, но в меньшей степени, чем последние. Пластическая составляющая изменения объема связана с остаточными деформациями. Зависимость $\Delta W = f(\varepsilon_i)$, близка к линейной. Можно показать, что выражение для ΔW_p от коэффициента Пуассона практически не зависит. Но при этом стоит заметить, что составляющие разность значения ΔW и ΔW_y при $\mu \neq 0,5$ и $\mu = 0,5$ между собой могут существенно различаться. Что же касается остаточных деформаций и их интенсивности, то там полное совпадение, а составляющие разностей при $\mu \neq 0,5$ и $\mu = 0,5$ также между собой могут существенно отличаться.

При определении остаточного изменения объема баллона можно поступить проще. Распишем его как изменения объема обметаемого цилиндрической оболочкой, используя остаточные и первоначальные размеры, см. выше. Поскольку нам известны остаточные кольцевые деформации, которые также можно выразить и через остаточную интенсивность деформаций, и при этом мы знаем, что осевые остаточные деформации равны нулю, имеем:

$$\Delta W_{ост} = W_o \left(\exp(\sqrt{3}\varepsilon_{iост}) - 1 \right) = W_o \left(\exp \left(\sqrt{3}\sigma_i \left(\frac{1}{E_C} - \frac{1}{E} \right) \right) - 1 \right). \quad (12)$$

Значение $\Delta W_{ост}$ очень близко к значению ΔW_p , находимым как разность. Можно было бы положить $\Delta W = \Delta W_{ост} + \Delta W_y$. Вообще для определения изменения объема можно предложить несколько зависимостей, результаты естественно будут несколько отличаться, но общий принцип от этого не нарушается.

Располагая изменениями объема, например, при испытаниях в водяной рубашке (ВР), можно найти кольцевые деформации и интенсивность деформаций. Из формулы (11), принимая $\mu = 0,5$, тем самым уходя от секущего модуля, имеем:

$$\varepsilon_i = \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_t \right\} = \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{\Delta W}{W_o} + 1 \right). \quad (13)$$

Подставляя в формуле (13), вместо ΔW , полное и остаточное объемные расширения, полученные при испытаниях в ВР, получаем полную и остаточную интенсивность деформаций.

Имея кольцевые и по толщине стенки деформации баллона, можно вычислить давление соответствующее текущему нагруженному состоянию.

Поскольку (используя формулы (5)):

$$\frac{r}{s} = \frac{r_0 e^{\varepsilon_t}}{s_0 e^{\varepsilon_s}} = \frac{r_0}{s_0} \exp\left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{E_C} - \frac{1-2\mu}{E}\right)\right) = \frac{r_0}{s_0} \exp(\sqrt{3}\varepsilon_i), \text{ то}$$

$$P = \frac{2\sigma_i s}{\sqrt{3}r} = \frac{2\sigma_i s_0}{\sqrt{3}r_0 \exp\left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{E_C} - \frac{1-2\mu}{E}\right)\right)} = \frac{2\sigma_i s_0}{\sqrt{3}r_0 \exp(\sqrt{3}\varepsilon_i)}. \quad (14)$$

Напомним, интенсивность деформаций здесь берется для баллона, она несколько отличается от интенсивности деформаций по действительной диаграмме деформирования. При $\mu = 0,5$, интенсивность деформаций уже по действительной диаграмме деформирования. И давление в таком случае получается несколько ниже. Формулу для давления можно свести к напряжениям и остаточным деформациям. Из формулы (14) видно, что связь давления с действительной диаграммой деформирования осуществляется через геометрические параметры баллона r_0, s_0 . Все остальные рассматриваемые здесь величины можно связать непосредственно, не используя геометрических параметров. Зная диаграмму ε_i, σ_i , и геометрические параметры баллона, можно построить зависимость $\Delta W, P$.

Разберем условие потери устойчивого пластического деформирования. Продифференцируем выражение $P = 2s\sigma_i / \sqrt{3}r$, см. формулу (14). Поскольку текущие значения радиуса, и толщины стенки не являются постоянными, имеем:

$$dP = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{sd\sigma_i}{r} + \frac{\sigma_i ds}{r} - \frac{\sigma_i s dr}{r^2} \right).$$

Понятно, что при деформировании, толщина стенки уменьшается ($ds < 0$), радиус срединной поверхности увеличивается ($dr > 0$), а хотя приращение интенсивности напряжений и больше нуля, но с ростом пластических деформаций эти приращения уменьшаются. Поэтому значения dP становятся все меньше и меньше. Как рассматривается в [13], когда при продолжении нагнетания среды вовнутрь, давление перестанет расти, т.е. dP станет равным нулю, то оболочка с днищами теряет процесс устойчивого пластического деформирования, образуются локальные утонения стенки, и она разрушается путем разгерметизации. Хотя теоретически если бы этого не происходило, то при дальнейшем бы равномерном деформировании давление падало бы. Из выражения $dP = 0$, следует, что выражение в скобках должно равняться нулю. Приравняв

его к нулю, предварительно умножив на r , преобразовывая, находим: $d\sigma_i = \sigma_i \left(\frac{dr}{r} - \frac{ds}{s} \right)$.

В скобках стоят приращения кольцевых и по толщине стенки деформаций, т.е. $d\sigma_i = \sigma_i (d\varepsilon_t - d\varepsilon_s)$. При $\mu = 0,5$, имеем $d\varepsilon_s = -d\varepsilon_t = -\sqrt{3}d\varepsilon_i / 2$. Отсюда

$d\sigma_i = \sigma_i (d\varepsilon_t - d\varepsilon_s) = \sigma_i 2d\varepsilon_t = \sqrt{3}\sigma_i d\varepsilon_i$. В итоге получаем соответствие условию потери равномерного пластического деформирования на действительной диаграмме деформирования как приведено в [13]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}. \quad (15)$$

Расписывая же полные приращения главных деформаций и их интенсивности, при $\mu \neq 0,5$ можно прийти к выражению $d\varepsilon_t - d\varepsilon_s = \sqrt{3}d\varepsilon_i$. В итоге получаем такое же выражение для потери устойчивого пластического деформирования, как и при $\mu = 0,5$. Но здесь приращение интенсивности деформаций по диаграмме для баллона при $\mu \neq 0,5$.

Представим себе некоторую точку на диаграмме ε_i, σ_i . Для нее можно найти соответствующие ей коэффициенты остаточного расширения и статического запаса прочности. Расписывая коэффициент остаточного расширения через расчетные изменения объемов, имеем: $K_{op} = \frac{\Delta W_p}{\Delta W} = \frac{\Delta W - \Delta W_y}{\Delta W} = 1 - \frac{\Delta W_y}{\Delta W}$. Подставляя сюда найденные выше изменения объемов, получаем первую формулу (16). Вместо ΔW_p можно было бы, и использовать $\Delta W_{ост}$ по формуле (12), а ΔW расписать как $\Delta W_{ост} + \Delta W_y$. Результат от этого практически не меняется. Текущий коэффициент запаса прочности это отношение максимального давления к давлению в i -той точке: $n_{Bi} = P_B / P_i$. Обозначая индексом m значения соответствующие максимальному давлению, найденному по условию потери равномерного пластического деформирования, после сокращения, получаем вторую формулу (16).

$$K_{op} = 1 - \frac{\exp\left(\frac{\sigma_i(5-4\mu)}{\sqrt{3}E}\right) - 1}{\exp\left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}\left(\frac{2-4\mu}{E} + \frac{3}{E_C}\right)\right) - 1}, \quad n_{Bi} = \frac{P_B}{P_i} = \frac{\sigma_{im} \exp\left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}\left(\frac{3}{E_C} - \frac{1-2\mu}{E}\right)\right)}{\sigma_i \exp\left(\frac{\sigma_{im}}{\sqrt{3}}\left(\frac{3}{E_{Cm}} - \frac{1-2\mu}{E}\right)\right)}. \quad (16)$$

В упругой области $K_{op} = 0$, а при $\mu = 0,5$: $K_{op} = 1 - \frac{\exp\left(\frac{\sqrt{3}\sigma_i}{E}\right) - 1}{\exp\left(\frac{\sqrt{3}\sigma_i}{E_C}\right) - 1}$; $n_{Bi} = \frac{\sigma_{im} \exp\left(\frac{\sqrt{3}\sigma_i}{E_C}\right)}{\sigma_i \exp\left(\frac{\sqrt{3}\sigma_{im}}{E_{Cm}}\right)}$.

Расчетное текущее значение коэффициента остаточного расширения при $\mu = 0,5$, немного больше чем при $\mu < 0,5$. Что же касается расчетного значения текущего коэффициента запаса прочности, то тут наоборот. Вообще, при определении текущего коэффициента запаса прочности, коэффициент Пуассона практически не влияет и можно полагать $\mu = 0,5$. Погрешность при этом, по сравнению с расчетом при $\mu = 0,3$ например, отрицательна и по абсолютному значению составляет менее 0,1 %.

Из выражений (16) видно, что теоретические K_{op} и n_{Bi} не зависят от геометрических параметров и объема баллона в тонкостенном его представлении. Они определяются свойствами действительной диаграммы деформирования и сущностью цилиндрической формы имеющей днища не создающих краевого эффекта. Тем же свойством обладает и графическая зависимость $n_{Bi} = f(K_{op})$. Также имеется все предпосылки построения теоретических кривых для других типов баллонов, например, шарообразных и композитных.

3. Эксперимент

Определим экспериментальную зависимость $n_{Bi}=f(K_{op})$ на одном баллоне. Для этого, процесс нагружения баллона внутренним давлением вплоть до его разрушения, разобьем на этапы. Максимальное давление P_i каждого i -го этапа превосходит максимальное давление предыдущего $(i-1)$ -го. Затем оно сбрасывается до нуля. Поскольку нагружение осуществляется этапами, то полное и остаточное изменения объема, необходимые для определения полного коэффициента остаточного расширения, нужно брать с учетом данных предыдущих этапов. Таким образом, если бы нагружение произошло за один раз. На рисунке 2 приведена геометрическая интерпретация таких нагружений.

Если на каждом i -том этапе нагружения баллона внутренним давлением, измерять его коэффициент остаточного расширения по определению: $(K_{op})_i = (\Delta W_{ост})_i / (\Delta W_{полн})_i$, где изменения объемов связаны только с этим этапом, то полный K_{op} , если бы нагружение происходило за один раз, не будет равняться сумме поэтапных коэффициентов, он будет меньше:

$$K_{op} = \frac{\Delta W_{ост}}{\Delta W_{полн}} = \frac{(\Delta W_{ост})_i + \sum_{n=1}^{i-1} \Delta W_{ост}}{(\Delta W_{полн})_i + \sum_{n=1}^{i-1} \Delta W_{ост}} < \sum_{n=1}^i (K_{op})_i. \quad (17)$$

Вообще, если $K_{op} < 1$, то $\sum (K_{op})_i$ может быть и намного больше единицы. Формула же для текущего коэффициента запаса прочности остается прежней, т.е.: $n_{Bi} = P_B / P_i$. P_B здесь берется уже из результатов испытаний.

Представленные ниже экспериментальные данные получены при испытании образца (баллона) с условным обозначением П. Образец изготавливался из трубы 219×6 сталь 20 с приварными плоскими днищами. Рабочее и пробное давление принимались равными 10 и 15 МПа, соответственно. Образец на начальных этапах проходил испытания в ВР, изготовленной в ИЭС им. Е. О. Патона, затем, уже вне ее доводился до разрушения. Видео процесса испытаний приведено в [14]. На рисунке 2 приведены экспериментальные зависимости полного и остаточного объемных расширений от давления, полученные при испытаниях образца П в водяной рубашке. Обозначение давлений используемых ниже: $\{P_T\}$ - давление начала текучести - объем баллона перестал возвращаться в исходное состояние; P_T - давление текучести, определенное как точка перегиба диаграммы нагружения внутренним давлением, (см. рис. 4б); $P_{вод p}$ - давление, до которого образец испытывался в ВР; P_B - максимальное давление которое выдержал образец; $\{P_B\}$ - давление разрушения.

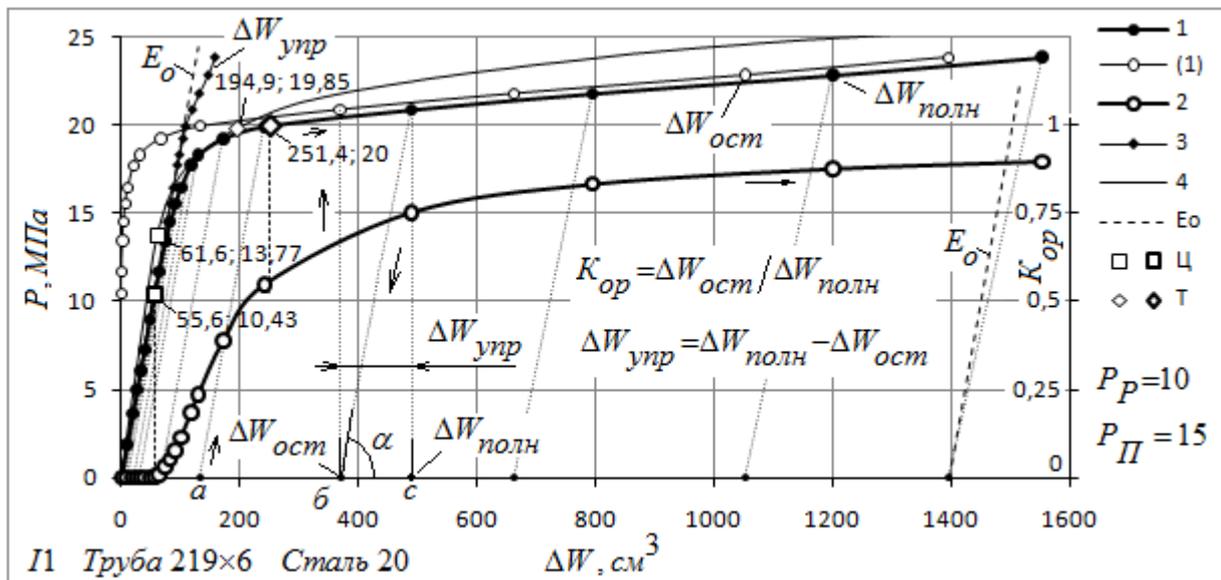


Рис. 2. Экспериментальные зависимости полного и остаточного объемных расширений от давления, полученные при испытаниях образца П1 в водяной рубашке:

1, (1) - полное и остаточное изменение объема определенное по ВР; 2 - пересчитываемый по формуле (17) K_{op} - по правой шкале; 3 - разница между полным и остаточным изменением объема; 4 - расчетная зависимость при $\mu = 0,5$; E_0 - линейная зависимость, построенная для упругой области до начала пластических деформаций. Жирными маркерами Ц и Т, обозначены давления $\{P_T\}$ и P_T , не жирными - расчетные значения соответствующие $\sigma_{ПЦ}$ и σ_{02} .

Величины $(\Delta W_{полн})_i$ и $(\Delta W_{ост})_i$ для i-го этапа нагружения равны расстояниям (с-а) и (б-а), см. рисунок 2. Понятно, что значение $\Delta W_{упр}$ в этих системах координат инвариантно. Значение $ctg(\alpha)$, см. рисунок 2, является упругой объемной податливостью (β). И, эта величина с ростом пластических деформаций увеличивается, [9]. Для прямой E_0 , которая на рисунке 2 приведена слева, и для сравнения справа, соответствует $\beta_0 = ctg(\alpha_0) = 5,329$. В области упругих деформаций β постоянна. От предела пропорциональности до условного предела текучести она незначительно растет до 5,45. Затем растет значительно, и концу испытаний в ВР она составляет 6,64, причем этот рост практически линейный. Упругое изменение объема также можно представить и следующим образом: $\Delta W_{упр} = P_i \cdot ctg(\alpha) = P_i \cdot \beta$.

На рисунке 3 приведены диаграмма растяжения (К) образца вырезанного в кольцевом направлении трубы (первоначальное состояние) из которой изготавливался образец П1, и построенная по ней с использованием зависимостей (4) действительная диаграмма деформирования (К_i). Диаграмма (К) а соответственно и (К_i) представлена до деформаций соответствующих временному сопротивлению - началу образования шейки. Поскольку для баллона σ_t в два раза больше чем σ_z , то все расчеты, производились по диаграмме (К_i). Стоит отметить, что диаграмма в осевом направлении в отличие от кольцевого, имеет площадку текучести и расчеты, проводимые с ее использованием плохо описывают результаты испытаний.

При анализе формулы (14) видно, что расчетное давление связано с первоначальной толщиной стенки линейно. Поскольку фактическая толщина стенки имеет некий разброс, характеризуемый разнотолщинностью, то в качестве s_0 можно принимать такое значение, которое отвечает за пластические деформации. Это значение, как правило, немного ниже среднего. В наших расчетах (см. 4 на рисунке 2) в качестве s_0 принимали номинальную толщину, т.е. 6 мм.

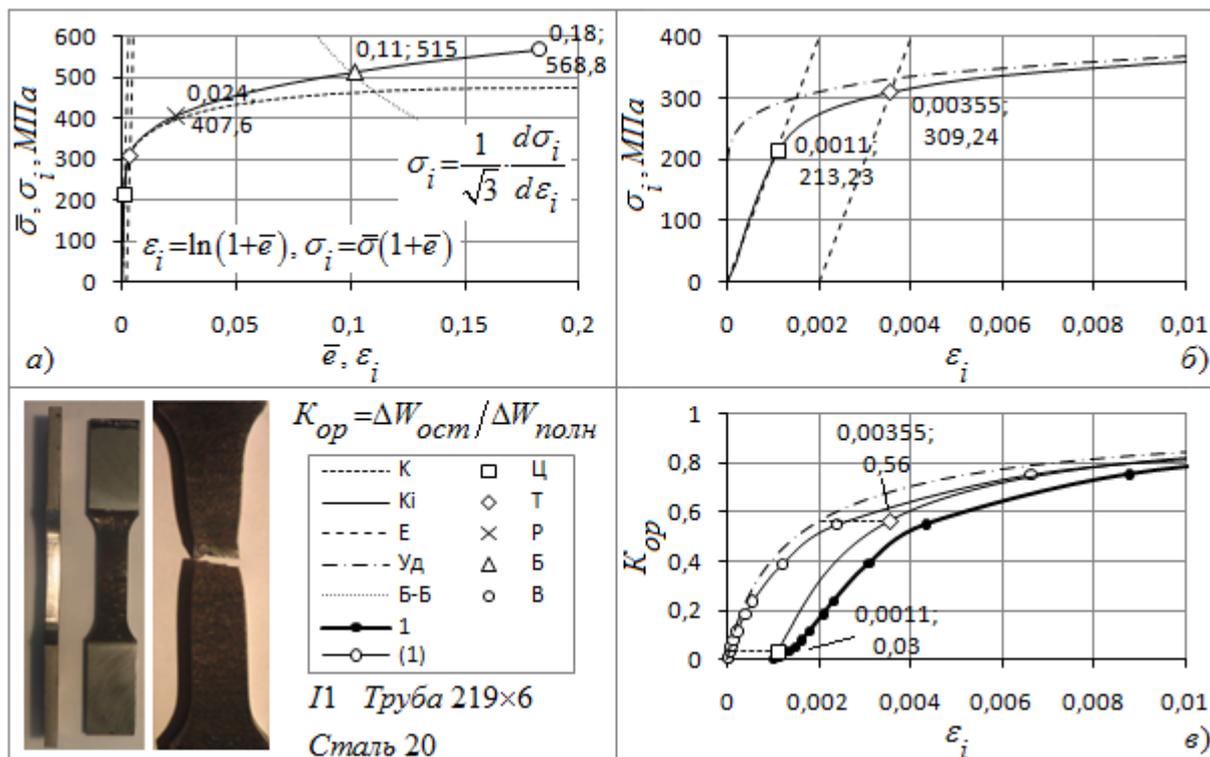


Рис. 3. Диаграммы деформирования стали 20 и связь деформаций с $K_{ОР}$ для тонкостенного баллона на примере образца П1:

K - диаграмма растяжения образца вырезанного в кольцевом направлении; K_i - действительная диаграмма деформирования, построенная по K с использованием зависимостей (4); E - упругие деформации; $Уд$ - напряжения как функция от параметра Удквиста; $Б-Б$ - зависимость $d\sigma_i / (\sqrt{3}d\epsilon_i)$; 1, (1) - полные и остаточные деформации по экспериментальным данным в соответствии с формулой (13); P - значения до которых образец П1 испытывался в ВР; остальные обозначения соответствуют рисунку 1.

Из рисунков 2 и 3в видно, что при достижении интенсивности напряжений в стенке баллона уровня σ_{02} , коэффициент остаточного расширения достигает уже довольно таки значительных величин. Также стоит отметить, что перегиб на графике нагружения внутренним давлением (см. значение P_T , на рис. 4б), происходит очень близко к этому уровню. Расчетные значения, соответствующие σ_{02} на рисунках 4а и 4в, практически совпадают со значением соответствующим P_T .

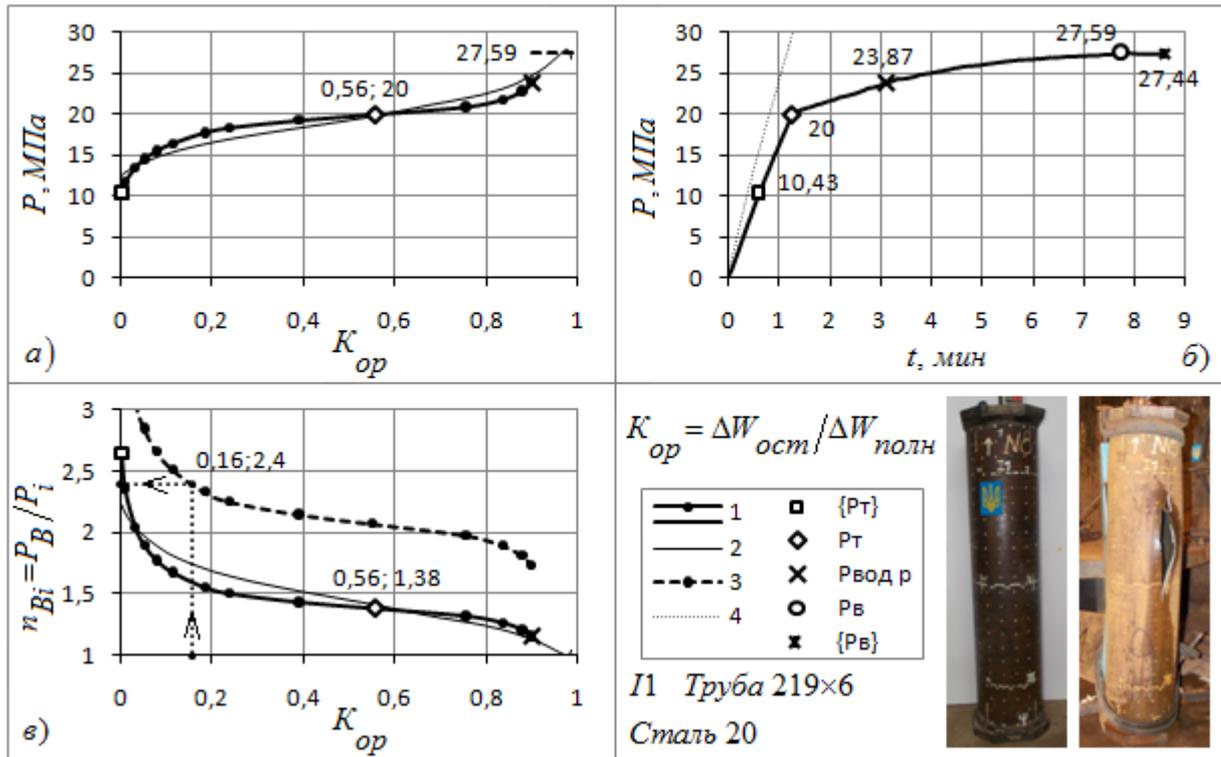


Рис. 4. Зависимость между давлением, коэффициентом остаточного расширения и текущим коэффициентом запаса прочности, на примере образца I1:

a - зависимости между давлением и коэффициентом остаточного расширения; *б* - огибающая смещенных диаграмм нагружения образца внутренним давлением во времени; *в* - зависимости между коэффициентом остаточного расширения и текущим коэффициентом запаса прочности.

1 - экспериментальные данные; *2* - расчетные данные; *3* - ординаты зависимости *1* умноженные на 1,5; *4* - зависимость для гидравлических ресиверов без объекта испытаний.

В области больших пластических деформаций, деформации пропорциональны времени нагружения образца, (скорость нагружения насосом близка к постоянной). Также интересно отметить, что давление разрушения оказалось меньше чем максимальное давление, которое выдержал образец, см. рисунок 4б: $\{P_B\} < P_B$. Это полностью согласуется с положением о потере равномерного пластического деформирования. Если баллон, например, разрушается, не доходя до условия $dP = 0$, то это свидетельствует о том, что «сработал» какой либо дефект, либо скорость нагружения чрезмерно велика. После разрушения образца I1, остаточные деформации периметра в центральной его части составили 0,082. Если по ним оценить интенсивность, то она равна 0,095, что очень близко к значению Б, на рисунке 3а.

Экспериментальная кривая $n_{Bi} = f(K_{op})$ является зависимостью между степенью пластических деформаций и предельным состоянием баллона. Она является интегральной кривой вбирающей в себя свойства материала и конструктивные особенности баллона. К конструктивным особенностям можно отнести форму днища и горловины, степень овальности и разнотолщинности, искривление оси, допустимые каверны и т.п. Тем не менее, видно, что она близка к теоретической кривой, см. рисунок 4в. Также следует отметить, что теоретические кривые построенный по диаграммам I и II (см. рисунок 1б), также между собой совпадают. Но они довольно таки отличаются на начальном участке от экспериментальных, также совпадающих между собой кривых для кислородных баллонов I и

II. Данное несовпадение связано по всей вероятности с тем, что образцы на растяжение вырезались из-под башмаков, и не в полной мере характеризуют свойства цилиндрической стенки. Аналогичные результаты показали и два других кислородных баллона III и IV, изготовленных из стали 35Г.

В случае периодической поверки баллонов изготовленных по типу образца II, по зависимости 1 (см. рисунок 4в) можно определять коэффициент запаса статической прочности, но по отношению к пробному давлению. Поскольку для образца II отношение $P_{II}/P_P=1,5$, то ординаты зависимости 3 получены из ординат экспериментальной зависимости 1 умножением на 1,5. Зависимость 3 может служить диаграммой оценки статического запаса прочности по коэффициенту остаточного расширения на случай периодической поверки баллонов этого типа.

4. Выводы

При расчете тонкостенного баллона можно пользоваться деформационной теорией пластичности. Принимая коэффициент Пуассона равным 0,5 расчеты значительно упрощаются.

Используя действительную диаграмму деформирования стали, получаемую из диаграммы одноосного растяжения, можно однозначно связать напряжения и деформации в цилиндрической стенке тонкостенного баллона, при нагружении его внутренним давлением вплоть до предельного состояния (разрушения).

Теоретическая зависимость между коэффициентами запаса статической прочности и остаточного расширения баллонов одного типа не зависит от геометрических параметров.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку в рамках двустороннего проекта «Исследование влияния параметров штамповки на напряженно-деформированное состояние элементов трубопроводов (2017-2019 гг.)» между Институтом механики Болгарской академии наук и Институтом электросварки им. Е. О. Патона, НАНУ, Киев, Украина.

Литература

1. ГОСТ 949-73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_p \leq 19,6$ МПа (200 кгс/см²).
2. Надежность и экономичность производимых в Украине баллонов высокого давления для технических газов / Э. Ф. Гарф, Р. И. Дмитриенко, А. А. Перепечай, А. П. Деньгин, В. А. Плетнев // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. - 2012. - № 2. - С. 36-41. - Библиогр.: 7 назв. - рус. УДК 620.19.14.
URL: <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/120918213704.pdf>.
3. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) Металлы. Методы испытаний на растяжение.
4. 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.
5. ISO 7866:1999. Gas cylinders - Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders - Design, construction and testing. (This standard has been revised by: ISO 7866:2012).
6. ISO 6406:2005(E). Gas cylinders. Seamless steel gas cylinders. Periodic inspection and testing.

7. BS EN 1802:2002. Transportable gas cylinders. Periodic inspection and testing of seamless aluminium alloy gas cylinders.
8. CGA C-5: Cylinder Service Life-Seamless Steel High Pressure Cylinders.
9. Дмитриенко Р. И. Упругое изменение объема бесшовных стальных баллонов, "К-фактор", ограничение напряжений // Рабочая записка: RZ DRI - 030816.
URL: <http://www.dri1.cc.ua/RZ/RZ-DRI-030816.pdf>.
10. Остаточное расширение баллонов (краткий обзор) / Р. И. Дмитриенко, Э. Ф. Гарф, В. П. Чижиченко // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. - 2014. - № 1. - С. 23-28. - Библиогр.: 25 назв. - рус. УДК 620.19.30.
URL: <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/140214224111.pdf>.
11. «Рабочие записки» на сайте www.dri1.cc.ua.
12. Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М., «Машиностроение», 1977, 144 с.
13. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1975. - 400 с. с ил.
14. Плейлист «Гидравлические испытания» на канале «[ROMAN DMYTRIENKO](https://www.youtube.com/channel/UCROMAN_DMYTRIENKO)» видеохостинга YouTube.

Уточнения:

Места под захваты, у образцов, вырезанных в кольцевом направлении, разгибались на прессе и шлифовались с целью получения параллельности плоскостей у захватов, рабочая часть образцов не разгибалась и не шлифовалась, (см. фото на рис. 3).

Оценка запаса статической прочности тонкостенных цилиндрических стальных баллонов по коэффициенту их остаточного расширения.

URL: [http://www.dri1.cc.ua/Stati/RD_NDT-Days_2019_\(ru\).pdf](http://www.dri1.cc.ua/Stati/RD_NDT-Days_2019_(ru).pdf).

Текст: [http://www.dri1.cc.ua/Stati/RD_NDT-Days_2019_\(ru\).doc](http://www.dri1.cc.ua/Stati/RD_NDT-Days_2019_(ru).doc).

Evaluation of Static Strength Margin of Thin-Wall Steel Cylinders on Coefficient of Permanent Expansion / R. Dmytriienko, A. Perepichay, O. Prokhorenko, A. Alexiev // International Journal «NDT Days». - Year 2019. Volume II / Issue 4, pp. 375-389. ISSN 2603-4018.

На английском: http://dri1.cc.ua/Stati/IJ_NDT-Days_2019_V2_I4_01.pdf.

Статья вышла на английском языке, публикуется в бумажном виде и на сайтах:

www.bg-s-ndt.org/journal/vol2_bg.html; www.ndt.net.

www.bg-s-ndt.org/journal/vol2/JNDTD-v2-n4-a01.pdf.

https://www.researchgate.net/publication/336968524_Evaluation_of_Static_Strength_Margin_of_Thin-Wall_Steel_Cylinders_on_Coefficient_of_Permanent_Expansion.

ЛИСД - лаборатория испытаний сосудов давлением. Сайт: www.dri1.cc.ua.

YouTube: [ROMAN DMYTRIENKO](https://www.youtube.com/channel/UCROMAN_DMYTRIENKO).