

УДК 672.47:681.5.015.22

*Роман Дмитриенко, Александр Палиенко***ПОСТРОЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАЗНОТОЛЩИННОЙ, ТОНКОСТЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГИЛЬЗЫ С ДНИЩАМИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ СТАЛИ 20***Роман Дмитрієнко, Олександр Палієнко***ПОБУДОВА ДІЙНОЇ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ РІЗНОТОВЩИННОЇ, ТОНКОСТІННОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ГІЛЬЗИ З ДНИЩАМИ, ВИГОТОВЛЕНОЇ ЗІ СТАЛІ 20***Roman Dmytriienko, Oleksandr Paliienko***BUILDING OF A REAL DIAGRAM OF DEFORMATION THROUGH THE EXAMPLE OF THIN-WALLED CYLINDRICAL SLEEVE WITH THICKNESS DEVIATION WITH BOTTOMS, MADE OF STEEL 20**

Раскрыт принцип построения действительной диаграммы деформирования на примере разнотолщинной, тонкостенной цилиндрической гильзы с днищами, изготовленной из стали 20. При механическом испытании образца на одноосное растяжение получена диаграмма растяжения. Представлены уточнения при построении действительной диаграммы деформирования, на примере растяжения образцов, вырезанных из тонкостенной цилиндрической гильзы с днищами, после ее испытаний внутренним гидравлическим давлением до разрушения. Обосновано, что тонкостенная цилиндрическая оболочка считается тогда, когда радиус срединной поверхности более чем в 10 раз превышает толщину стенки.

Ключевые слова: деформация, внутреннее давление, предел прочности, образцы растяжения, интенсивность напряжений, аппроксимация.

Рис.: 4. Табл.: 1. Библ.: 8.

Розкрито принцип побудови дійсної діаграми деформування на прикладі різнотовщинної, тонкостінної циліндричної гільзи з днищами, виготовленої зі сталі 20. При механічному випробуванні зразка на одноосьовий розтяг отримана діаграма розтягування. Представлені уточнення під час побудови дійсної діаграми деформування, на прикладі розтягування зразків, вирізаних з тонкостінної циліндричної гільзи з днищами, після її випробувань внутрішнім гідралічним тиском до руйнування. Обґрунтовано, що тонкостінною циліндричною оболонкою вважається тоді, коли радіус срединної поверхні більший ніж у 10 разів перевищує товщину стінки.

Ключові слова: деформація, внутрішній тиск, межа міцності, зразки розтягування, інтенсивність напружень, апроксимація.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 8.

It revealed the actual principle of the deformation diagram of the example of different thickness, thin-walled cylindrical liner with bottoms made of steel 20. When the mechanical test specimen uniaxial tensile strain diagram obtained. Presented verifying the actual deformation in the construction diagrams of stretching the example samples cut from a thin-walled cylindrical sleeve bottoms, after testing the internal hydraulic pressure to fracture. It proved that thin-walled cylindrical sheath is considered when the radius of the middle surface is more than 10 times the wall thickness.

Key words: deformation, the internal pressure test, tensile strength, tensile specimens stress intensity, approximation.

Fig.: 4. Tabl.: 1. Bibl.: 8.

Постановка проблемы. Широкомасштабное использование внутреннего гидравлического давления для проведения испытаний образцов цилиндрической формы с днищами ограничено предельными размерами кристаллизаторов по условиям формирования в них заготовки круглого сечения. Возникновение пластических деформаций в процессе проведения испытаний, а также сложность применения внутреннего гидравлического давления для проведения испытаний образцов цилиндрической формы делают невозможным изготовление образцов широкого спектра прочности, в отличие от, например, производства катаных заготовок. Возникшие трудности ставят перед металлургами, научными работниками и трубопрокатчиками новые научные, технические, технологические и организационные проблемы, требующие решения.

Большинство предприятий и компаний вынуждены предпринимать определенные шаги в направлении «унификации» заготовки цилиндрической гильзы с днищами, изготовленной из стали 20, в силу отсутствия собственных технологий для вторичного передела заготовок. В связи с этим разработана научно обоснованная концепция построения действительной диаграммы деформирования на примере разнотолщинной, тонко-

стенной цилиндрической гильзы с днищами, изготовленной из стали 20, является актуальной научно-технической задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. В технической литературе возможность деформирования образцов цилиндрической формы рассматривается в работах В. П. Дядина [1], Р. И. Дмитриенко, Э. Ф. Гарфа, В. П. Чижиченко [2] и С. А. Куркина [3]. Данные работы объединяет утверждение, что увеличение диаметра заготовки, при прочих увеличении уровня внутреннего гидравлического давления, приводит к росту поперечной деформации на оправке, что, в свою очередь, способствует созданию опережения в осевом направлении.

В работе [4] Р. И. Дмитриенко, О. П. Масючок, А. В. Быков представлен краткий обзор метода испытания поверочным гидравлическим давлением баллонов с определением коэффициента остаточного расширения. Показано, что существующий в Украине регламент переосвидетельствования баллонов высокого давления, находящихся в эксплуатации, не может гарантировать необходимый запас прочности. Они основываются на определении коэффициента остаточного расширения, который является интегральной характеристикой технического состояния баллона.

Анализ методов определения коэффициента остаточного расширения приводится в работе [5]. Авторами детально описывается ряд методов с детальным обоснованием актуальности каждого.

Однако, несмотря на масштабность научных исследований, вопрос разработки научно обоснованного принципа построения действительной диаграммы деформирования на примере разнотолщинной, тонкостенной цилиндрической гильзы с днищами, изготовленной из стали 20, остается открытым и требует детальной проработки.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В процессе проведения испытаний цилиндрического образца на уровень возможной пластической деформации важно выявление дефектов наружной поверхности заготовки, которые являются следствием пороков в поверхностных слоях. Используя диаграмму растяжения, которая включает в себя усилие, действующее на образец, и обычную продольную деформацию, необходимо раскрыть принципы деформации при различной нагруженности и точку потери устойчивости равномерного пластического деформирования.

Однако согласно теории малых упругопластических деформаций изменение объема участка, выделенного в рабочей части образца, не происходит, в силу низкого коэффициента поперечной деформации, поэтому открытым вопросом является построение действительной диаграммы деформирования, основанной на диаграмме растяжения для сталей высокой пластичности.

Цель статьи. Предложить принцип построения действительной диаграммы деформирования на примере разнотолщинной, тонкостенной цилиндрической гильзы с днищами, изготовленной из стали 20. При механическом испытании образца на одноосное растяжение получить диаграмму растяжения. Обосновать уточнения при построении действительной диаграммы деформирования, на примере растяжения образцов, вырезанных из тонкостенной цилиндрической гильзы с днищами, после ее испытаний внутренним гидравлическим давлением до разрушения.

Изложение основного материала. При механическом испытании образца на одноосное растяжение получают диаграмму растяжения $\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}$, где $\bar{\sigma}$ - напряжение как усилие F , действующее на образец, отнесенное к первоначальной площади его рабочего поперечного сечения A_0 , а $\bar{\epsilon}$ - обычная продольная деформация как удлинение некоторой базы, выделенной в продольном направлении образца, отнесенное к длине этой базы. То есть $\bar{\sigma} = F/A_0$, $\bar{\epsilon} = \Delta l/l_0$. Максимально реализовавшееся напряжение называется

тя временным сопротивлением, $\bar{\sigma}_B$. До $\bar{\sigma}_B$ образец деформируется равномерно, после чего идет образование шейки, т. е. образец теряет устойчивость равномерного пластического деформирования.

При растяжении образца в упругой области на величину продольной деформации \bar{e} , можно показать [6; 7], что относительное изменение некоего объема, выделенного вдоль рабочей части, с точностью величин второго порядка малости, равно сумме главных деформаций, в итоге: $\bar{e}_V = \bar{e}(1-2\mu) = \frac{\bar{\sigma}(1-2\mu)}{E}$, т. е. объем увеличивается. Относительная же

деформация площади поперечного сечения равна: $\bar{e}_A = -2\mu\bar{e} + (\mu\bar{e})^2 \approx -2\mu\bar{e}$, т. е. приблизительно сумме поперечных деформаций, площадь уменьшается. В упругой области эти изменения незначительны, деформации невелики, и ими, в принципе, можно пренебрегать. С увеличением деформации, за предел пропорциональности, коэффициент Пуассона (μ) стремится к 0,5 и практически близок этому значению уже при деформациях немногим больших $\bar{e}_{0,2}$. Поэтому в неупругой области, с ростом деформаций, следует, что,

$\bar{e}_V \rightarrow 0$, [6], а $\bar{e}_A \rightarrow -\bar{e} \left(1 - \frac{\bar{e}^2}{4} \right) \approx -\bar{e}$. В принципе пользоваться последней зависимостью

можно и за пределом упругости, погрешность ее невелика, но в пластической области хотя и принимается $\bar{e}_V = 0$, но она, строго говоря, не равна сумме главных деформаций.

В пластической области, пластическое изменение объема равно нулю, и определяется оно как сумма главных пластических составляющих деформаций. Условие несжимаемости при пластических деформациях выглядит следующим образом: $\varepsilon_{Vp} = \varepsilon_{1p} + \varepsilon_{2p} + \varepsilon_{3p} = 0$. Свойство аддитивности интенсивности логарифмических дефор-

маций: $\varepsilon_i = \varepsilon_{ie} + \varepsilon_{ip} = \frac{\sigma_i}{E} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p})^2 + (\varepsilon_{2p} - \varepsilon_{3p})^2 + (\varepsilon_{3p} - \varepsilon_{1p})^2}$. При одинаковом порядке величин упругой и пластической составляющей погрешность может составлять несколько процентов по сравнению с точным подсчетом.

При одноосном растяжении следует, $\varepsilon_{2p} = \varepsilon_{3p} = -\varepsilon_{1p}/2$, отсюда, $\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} + \varepsilon_{ip} = \frac{\sigma_1}{E} + \varepsilon_{1p} = \varepsilon_1$.

Пренебрегая упругими составляющими деформаций, фактическую площадь лучше определить сразу из условия сохранения объема.

Итак, в области пластического деформирования, согласно теории малых упруго-пластических деформаций, коэффициент поперечной деформации принимается равным 0,5, и $\bar{e}_V = 0$, т.е. изменения объема участка, выделенного в рабочей части образца, не происходит: $A_0 l_0 = A(l_0 + \Delta l) = Al$, где A_0, l_0 первоначальные площадь поперечного сечения

образца и длина участка, а A, l - текущие его размеры. Поскольку $\frac{l}{l_0} = \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = 1 + \bar{e}$, имеем,

$A = A_0 \frac{l_0}{l} = \frac{A_0}{1 + \bar{e}}$. То есть $\bar{e}_A = -\frac{\bar{e}}{1 + \bar{e}}$. Действительные напряжения, как усилие F , действующее на образец, отнесенное к фактической площади его рабочего поперечного сечения A , следовательно, равны: $\sigma_D = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \bar{e}) = \bar{\sigma} (1 + \bar{e})$.

Учитывая вышеизложенное, действительную диаграмму деформирования σ_i, ε_i , до момента начала образования шейки, получаем из стандартной диаграммы растяжения $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$ по следующим зависимостям: $\varepsilon_i = \ln(1 + \bar{\varepsilon})$, $\sigma_i = \bar{\sigma}(1 + \bar{\varepsilon})$, где под ε_i и σ_i понимаются интенсивности логарифмических деформаций и действительных напряжений (рис. 1). Упругими деформациями, в сравнении с пластическими, пренебрегаем, т. е. деформации под нагрузкой и после снятия нагрузки принимаем одинаковыми.

Действительно, что в упругой области данной диаграммой пользоваться нецелесообразно, для этого существуют зависимости теории упругости, а в области незначительных пластических деформаций возникает погрешность, которая уменьшается с ростом деформаций. Для описания упругопластического перехода диаграмму растяжения следует перестраивать в действительную диаграмму деформирования другими зависимостями.

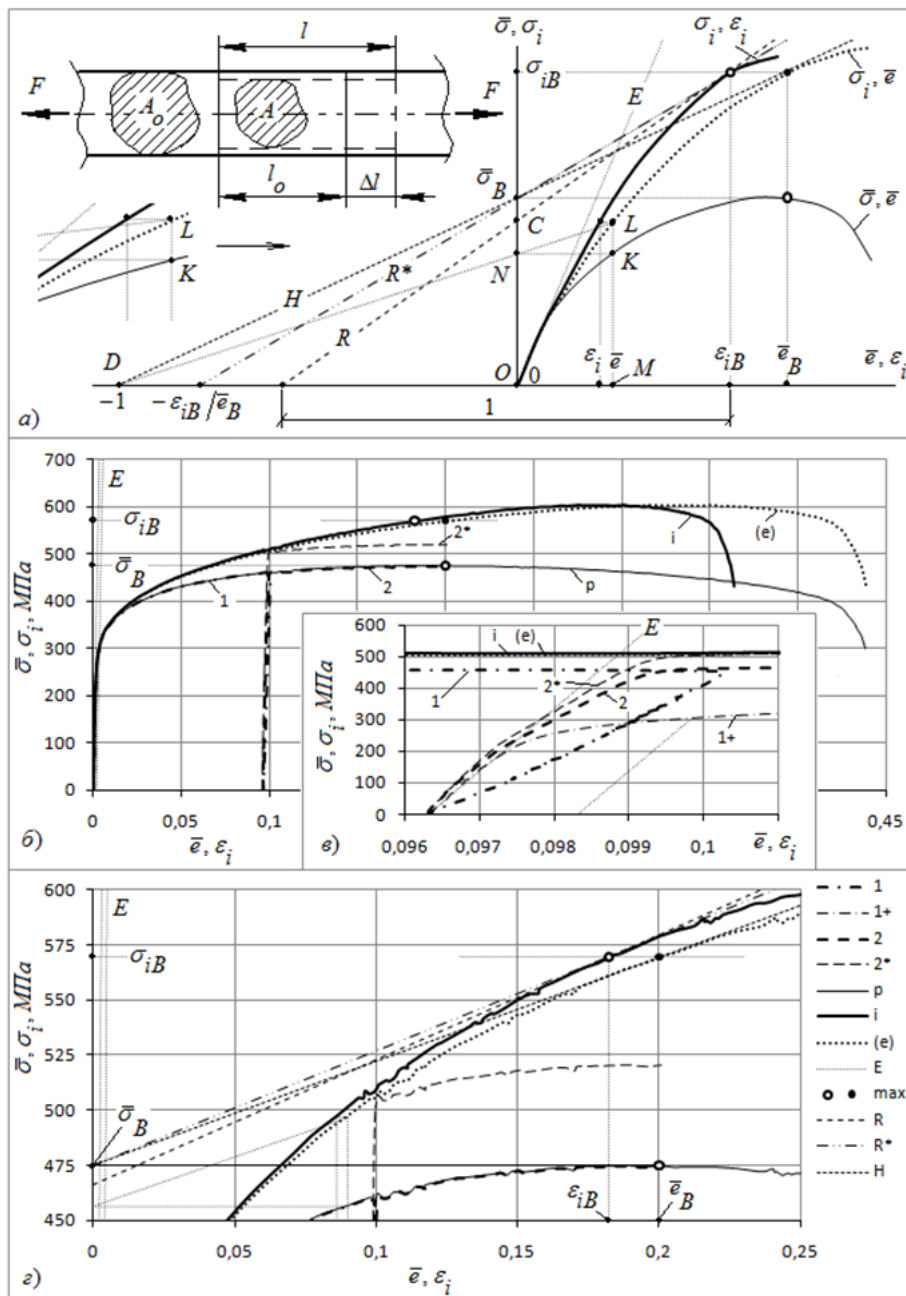


Рис. 1. Диаграмма растяжения образца и построенная по ней действительная диаграмма деформирования: а – схема; б, в, г – для образца К, (см. ниже)

Обозначения на рисунке 1: i - действительная диаграмма деформирования σ_i, ε_i ; p - диаграмма растяжения $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$; (e) - диаграмма $\sigma_i, \bar{\varepsilon}$; E - деформации в соответствии с законом упругости; \max - точка, соответствующая пределу прочности; 1 и 2 - первое и второе растяжение образца; 1+ - смещенная диаграмма растяжения 1; 2* - второе растяжение в пересчете на площадь A_1 ; R - касательная к σ_i, ε_i в точке σ_{iB} ; H - к $\sigma_i, \bar{\varepsilon}$; R* - прямая, проходящая через точки $0, \bar{\sigma}_B$ и $\varepsilon_{iB}, \sigma_{iB}$.

В условиях пластического деформирования тонкостенного цилиндрического образца с днищами, нагруженного внутренним давлением, можно отдельно показать, что:

$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_t \approx 1,155 \varepsilon_t$, где ε_t - кольцевые деформации поверхности, образованной срединным радиусом. Это же справедливо и для обычных деформаций при $\mu=0,5$. Условно, тонкостенной цилиндрической оболочка считается тогда, когда радиус срединной поверхности более чем в 10 раз превышает толщину стенки [7; 8].

Испытание образцов на растяжение. Гидравлические испытания проводились в Институте электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев). Испытания на одноосное растяжение проводились в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко (г. Киев), на испытательной машине УЕ-20. Съем и обработка информации производились специализированной программой (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства, полученные при испытании образцов на одноосное растяжение

Обозначение	Образцы-свидетели		Отжиг		Из разрушенной гильзы				
	K	O	K_a	K_b	$K_{0,009}$	$K_{0,12}$	$K_{0,07}$	$O_{0,11}$	$O_{0,05}$
$\bar{\varepsilon}_t^{*1)}$	-	-	-	-	0,0088	0,1223	0,0682	0,1126	0,0529
$\bar{\sigma}_T$, МПа		320	320						
$\bar{\sigma}_{02}$, МПа	305	314	316	285	340	465	440	505	425
$\bar{\varepsilon}_{02}$	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004
$\bar{\sigma}_B$, МПа	474,76	461,4	454,67	454,94	479,82	557,03	510,88	548,53	501,61
$\bar{\varepsilon}_B^{2)}$	0,200	0,230	0,197	0,230	0,197	0,073	0,162	0,027	0,178
$\delta, \%^{3)}$	33,13	40,97	33,56	31,49	26,74	11,43	20,85	15,01	29,26
Разр., $\%^{4)}$	45	27	32	32	35	44	42	27	31
$\Psi, \%$	48,24	54,60	54,75	46,57	52,31	23,63	36,61	49,84	55,84

1) - предварительная кольцевая деформация в составе гильзы.
2) - равномерная деформация.
3) - полная деформация по базам на образцах.
4) - положение разрыва на базе.

При анализе данных табл. 1 (рис. 2) можно проследить, что чем больше предварительная кольцевая деформация в составе гильзы, тем больше условный предел текучести, полученный на образцах и, естественно, деформация ему соответствующая, причем зависимость значительная и близка к пропорциональной. То же самое можно сказать и о временном сопротивлении, хотя зависимость от предварительной деформации менее значительна. Временное сопротивление пропорционально условному пределу текучести. Полная и равномерная же деформации значительно уменьшаются, и между собой они пропорциональны. Данные зависимости прослеживаются для всех образцов независимо от их ориентации, т. е. все образцы подчиняются некоей общей закономерности.

Что же касается относительного сужения, то для образцов в осевом направлении, с ростом предварительной кольцевой деформации в составе гильзы, оно не меняется, в отличие от образцов в кольцевом направлении, где уменьшение очень значительное.

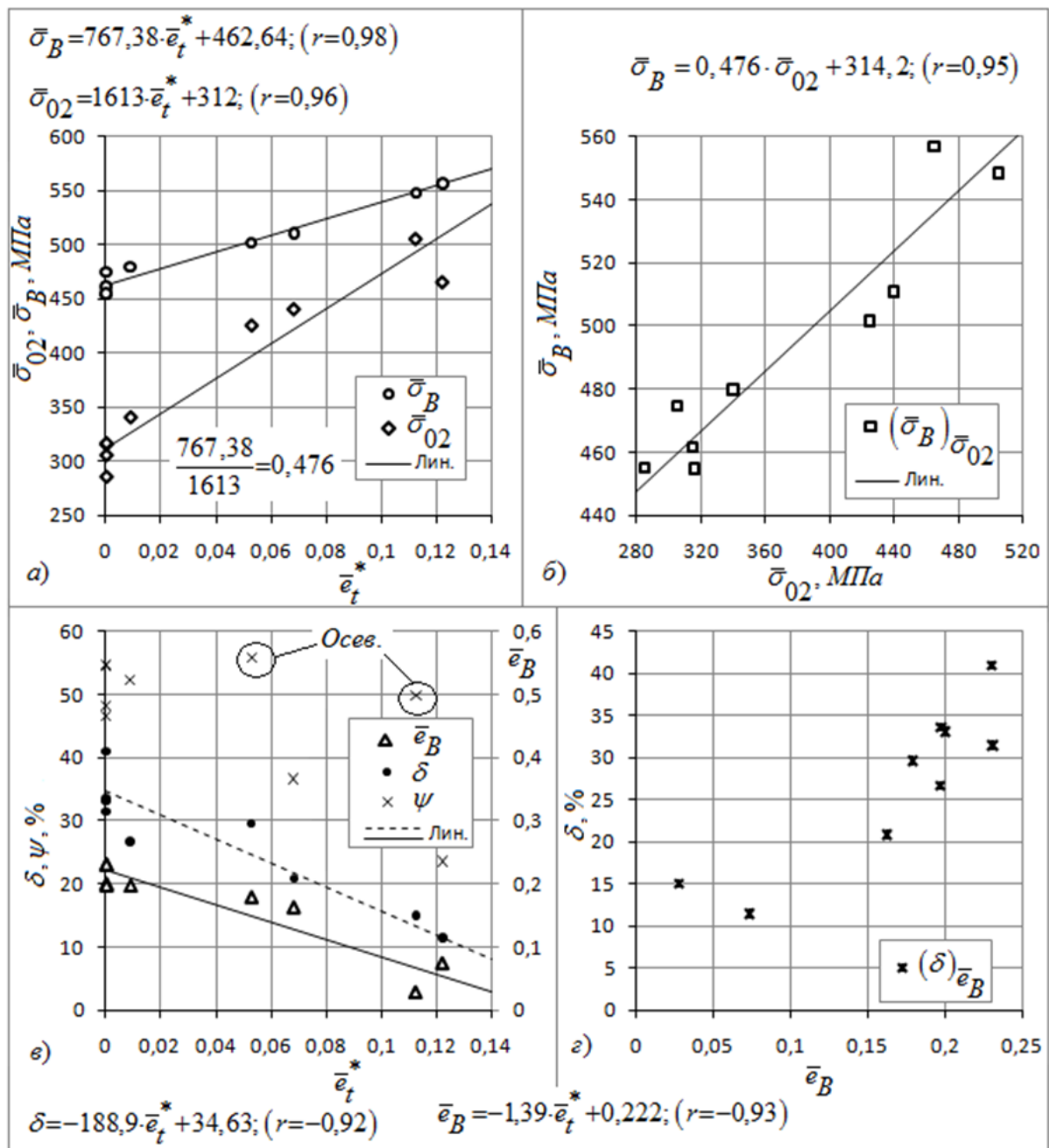


Рис. 2. Зависимости механических свойств от предварительной кольцевой деформации в составе гильзы: Лин. – линейная зависимость, близкая к биссектрисе между линиями регрессии, полученными методом наименьших квадратов; r – коэффициент корреляции

Обозначая через $\bar{\sigma}^*$, \bar{e}^* диаграмму растяжения образца вырезанного из гильзы и учитывая вышеизложенный материал, интенсивности напряжений и логарифмических деформаций получаем по следующим зависимостям (рис. 3, в):

$$\sigma_i = \bar{\sigma}^* \left(1 + \frac{\bar{e}^*}{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^*} \right), \quad \varepsilon_i = \ln \left(1 + \bar{e}^* + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^* \right).$$

Предельные значения, соответствующие временному сопротивлению, которых рав-

ны: $\sigma_{iB} = \bar{\sigma}_B^* \left(1 + \frac{\bar{e}_B^*}{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^*} \right), \quad \varepsilon_{iB} = \ln \left(1 + \bar{e}_B^* + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^* \right).$

Данные зависимости применим для образцов, вырезанных в обоих направлениях.

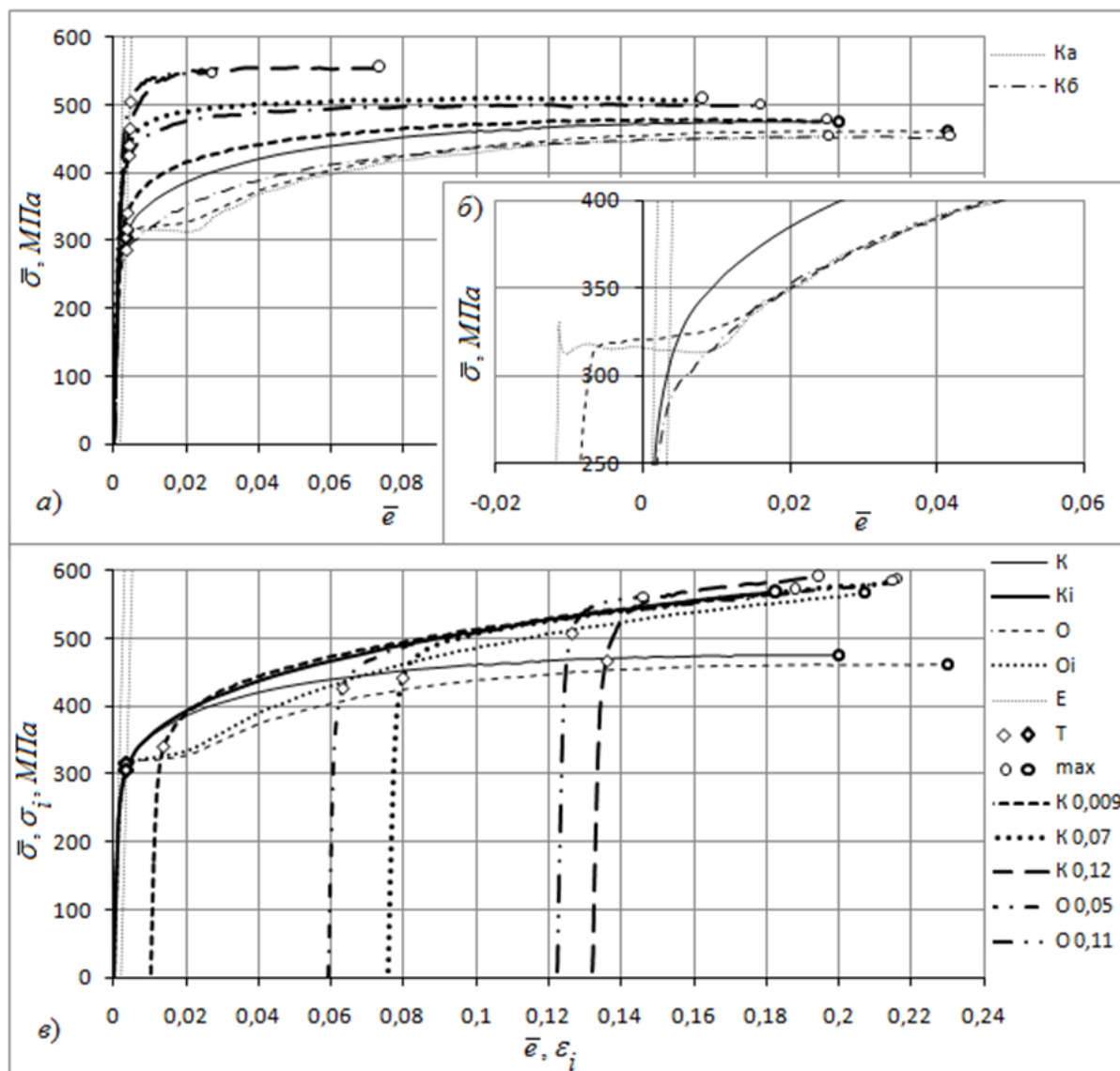


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов, а), б), и их действительные диаграммы деформирования, смещенные по оси абсцисс, в)

На рисунке 3, б) диаграммы растяжения образцов O и K_a смещены влево на величину деформации $\bar{\varepsilon}=0,01$ и $\bar{\varepsilon}=0,013$ соответственно, отсюда видно, что за площадкой текучести они совпадают с диаграммой K_b . На диаграмме K_a имеется зуб текучести.

Все действительные диаграммы деформирования, полученные для образцов, вырезанных из гильзы, целесообразно сравнивать с такой же диаграммой, полученной для кольцевого направления (Кі), т. к. она вследствие образования наклепа при выпрямлении образца также не имеет площадки текучести.

Проведенные исследования показывают, что рассматриваемый материал изотропен и обладает площадкой текучести, которая уничтожается при выпрямлении кольцевых образцов, либо же для всех образцов после предварительной пластической деформации.

Образцы, вырезанные из разрушенной гильзы в осевом направлении, подчиняются тем же закономерностям, что и кольцевые образцы (рис. 3, в), хотя в осевом направлении, как показывает теория и эксперимент, остаточных деформаций нет. Образцы, вырезанные в любом направлении, откликаются на интенсивность деформаций, которую создают кольцевые и радиальные (связанные с уменьшением толщины стенки) деформации.

Приравнивая предельные значения интенсивностей напряжений и логарифмических деформаций, соответствующих временному сопротивлению, полученные на образцах, вырезанных из гильзы к таким же, но полученным на образцах без предварительной деформации, растянутыми до разрушения за один раз: $\sigma_{iB} = \bar{\sigma}_B (1 + \bar{e}_B)$, $\varepsilon_{iB} = \ln(1 + \bar{e}_B)$, получаем:

$$\bar{e}_B = \bar{e}_B^* + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^*, \quad \bar{\sigma}_B = \bar{\sigma}_B^* \left(\frac{1 + \frac{\bar{e}_B^*}{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^*}}{1 + \bar{e}_B^* + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{e}_t^*} \right). \quad \text{Эти выражения являются выр-$$

венными оценками временного сопротивления и деформации ему соответствующей.

Для случая двукратного одноосного растяжения образца из вышеприведенных выражений получаем: $\bar{e}_B = \bar{e}_B^* + \bar{e}^*$, $\bar{\sigma}_B = \bar{\sigma}_B^* \left(\frac{1 + \frac{\bar{e}_B^*}{1 + \bar{e}^*}}{1 + \bar{e}_B^* + \bar{e}^*} \right) = \frac{\bar{\sigma}_B^*}{1 + \bar{e}^*}$. Что касается

условного предела текучести, то его выравнивание таким методом неприемлемо.

После испытаний тонкостенных сосудов внутренним давлением до разрушения иногда из них вырезают образцы на растяжение для проверки механических свойств. При этом в случае больших пластических деформаций сосуда, естественно, получают весьма недостоверные результаты.

При нагружении внутренним давлением тонкостенной цилиндрической оболочки с днищами можно принимать плоское напряженное состояние, т. е. радиальные напряжения равны нулю. Отсюда интенсивность напряжений в упругой области выражается через кольцевые напряжения и внутреннее давление следующим образом:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\sigma}_t = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{Pr_0}{s_0},$$

где r_0, s_0 – первоначальные значения радиуса срединной цилиндрической поверхности и толщины стенки.

Если вместо r_0, s_0 подставлять текущие их значения, а именно r, s , то этим выражением можно пользоваться и в случае больших пластических деформаций. Процесс нагружения не только при малых, но и при больших деформациях является простым [6]. Поэтому, пренебрегая упругими деформациями по сравнению с пластическими, считая, что материал несжимаем, при больших деформациях можно использовать теорию малых упругопластических деформаций, заменяя при этом обычные деформации

на логарифмические. Откуда можно показать, что: $\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_0}$, или

$\varepsilon_i = -\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_s = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{s}{s_0}$, а осевые деформации равны нулю [6]. Отсюда, $r = r_0 e^{\varepsilon_t}$ и

$s = s_0 e^{\varepsilon_s}$, а $\varepsilon_s = -\varepsilon_t$, следовательно, $\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Pr}{s} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Pr_0 e^{2\varepsilon_t}}{s_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Pr_0}{s_0} e^{\sqrt{3}\varepsilon_i}$.

При нагружении внутренним давлением цилиндрической трубы с днищами, анализируя взаимосвязи, интенсивность выражается через кольцевое направление следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_i &= \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\sigma}_t; \bar{\varepsilon}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\varepsilon}_t, & \sigma_t &= \bar{\sigma}_t (1 + \bar{\varepsilon}_t); \sigma_i = \bar{\sigma}_i (1 + \bar{\varepsilon}_t) \\ & & \text{, где} & & \varepsilon_t &= \ln(1 + \bar{\varepsilon}_t); \varepsilon_i = \ln(1 + \bar{\varepsilon}_i) \end{aligned}$$

здесь связь интенсивностей деформаций с кольцевыми, только для области пластических деформаций. Следует отметить, что произведение напряжений и деформаций при пластических деформациях обладает некой инвариантностью:

$$\bar{\sigma}_i \bar{\varepsilon}_i = \bar{\sigma}_t \bar{\varepsilon}_t; \sigma_i \varepsilon_i = \sigma_t \varepsilon_t; \bar{\sigma}_i \varepsilon_i = \bar{\sigma}_t \varepsilon_t; \sigma_i \bar{\varepsilon}_i = \sigma_t \bar{\varepsilon}_t.$$

Замечание:

Для тонкостенной цилиндрической оболочки с днищами нагруженной внутренним давлением, $\sigma_r = 0$, а $\varepsilon_{zp} = 0$, следовательно $\varepsilon_{sp} = -\varepsilon_{tp}$.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{te} + \varepsilon_{tp}, \quad \varepsilon_{te} = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu \sigma_z) = \frac{\sigma_t}{E} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right), \quad \text{при } \mu = 0,3, \quad \varepsilon_{te} = 0,85 \frac{\sigma_t}{E}, \quad \text{а при } \mu = 0,5,$$

$$\varepsilon_{te} = \frac{3\sigma_t}{4E} = 0,75 \frac{\sigma_t}{E}.$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} + \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{tp}, \quad \text{при } \mu = 0,3, \quad \varepsilon_i = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 0,85} \varepsilon_{te} + \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{tp}, \quad \text{а при } \mu = 0,5, \quad \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} (\varepsilon_{te} + \varepsilon_{tp}) = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_t.$$

Остаточные, после разрушения гильзы, кольцевые логарифмические деформации можно приравнять к деформациям баз в сечениях I, II, III, т. е. $\varepsilon_t = \ln l / l_0$, где l_0, l , длина участка выделенного в кольцевом направлении, до деформации и после. Затем можно получить интенсивности деформаций на участках. Беря для каждого конкретного участка текущий радиус как половину эквивалентного наружного диаметра соответствующего сечения, минус половина толщины стенки, естественно, замеренных после разрушения, и максимальное давление, которое выдержала гильза, подставляя конечное значение толщины стенки для каждого участка, находим интенсивность напряжений. Данные представлены на рис. 4. Данные расчета особо не изменятся, если брать не средний, а наружный радиус, либо расчет проводить по r_0, s_0 с учетом интенсивности деформаций. Из рис. 4 видно, что построенные таким образом точки следуют действительной диаграмме деформирования, хотя немного не совпадают с ней в силу возможных погрешностей измерения.

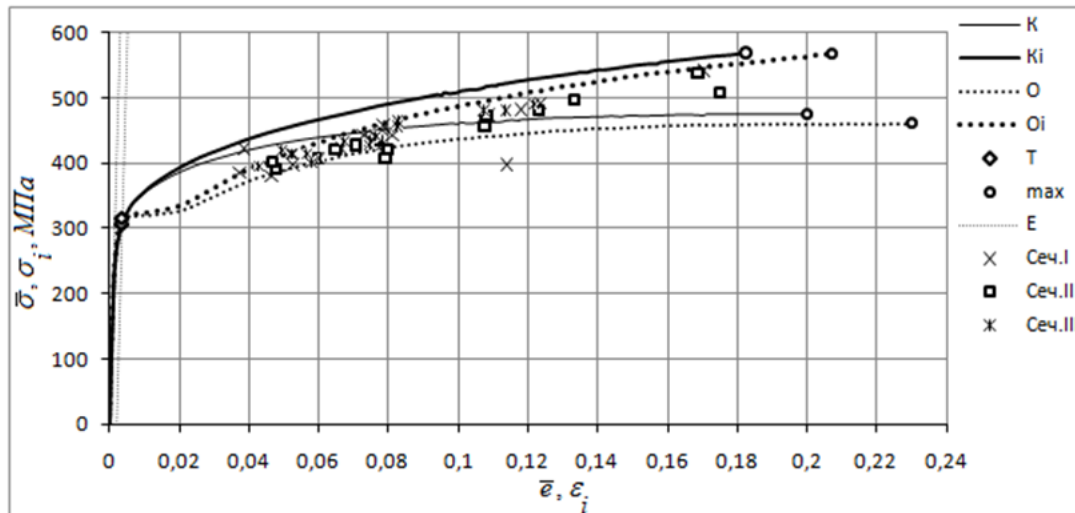


Рис. 4. Сравнение результатов пересчета с действительной диаграммой деформирования

Вывод. Для оценки механических свойств, получаемых при испытании образцов на растяжение, вырезанных из тонкостенных цилиндрических сосудов, доведенных внутренним давлением до разрушения, необходимо учитывать уровень остаточных кольцевых деформаций этих сосудов, особенно если они изготовлены из сталей, обладающих высокой пластичностью.

Независимо от направления вырезаемых образцов, кольцевое либо осевое, дальнейшее их деформирование следует действительной диаграмме деформирования, и для изотропных материалов она одинакова.

Список используемых источников

1. Дядин В. П. Влияние предварительного деформирования на ударную вязкость образца Шарпи при разрушении / В. П. Дядин // Автомат. сварка. – 2007. – № 1. – С. 28–33.
2. Дмитриенко Р. И. Остаточное расширение баллонов (краткий обзор) / Р. И. Дмитриенко, Э. Ф. Гарф, В. П. Чижиченко // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 1. – С. 23–28.
3. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С. А. Куркин. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.
4. Дмитриенко Р. И. Остаточное расширение баллонов. Промежуточные результаты испытаний / Р. И. Дмитриенко, О. П. Масючок, А. В. Быков // ДНИ НА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЬНИЙ КОНТРОЛ 2014, Сборник доклады. Юни 09-17, 2014 = XXIX International Conference “NDT 2014” (Sozopol, Bulgaria). – Созопол, България. Научни известия на НТСМ, год. XXII, бр. 1 (150), 2014. – С. 561–566.
5. Дмитриенко Р. И. Методика определения остаточного расширения баллонов / Р. И. Дмитриенко, М. Миховский // ДНИ НА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЬНИЙ КОНТРОЛ 2014, Сборник доклады. Юни 09-17, 2014 = XXIX International Conference “NDT 2014” (Sozopol, Bulgaria). – Созопол, България. Научни известия на НТСМ, год. XXII, бр. 1 (150), 2014. – С. 494–499.
6. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учебник для студентов вузов / Н. Н. Малинин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
7. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.
8. Каримов И. Сопротивление материалов : электронный учебный курс для студентов очной и заочной формы обучения [Электронный ресурс] / Ильдар Каримов. – Режим доступа : <http://www.soprotmat.ru/obol.htm>.

References

1. Diadin, V.P. (2007). Vliianie predvaritel'nogo deformirovaniia na udarnuiu viazkost obraztca SHarpi pri razrushenii [Influence of pre-deformation on impact toughness of Charpy sample in fracture]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, no. 1, pp. 28–33 (in Russian).

2. Dmitrienko, R.I., Garf, E.F. & V P Chizhichenko (2014). Ostatochnoe rasshirenie ballonov (kratkii obzor) [Residual expansion of cylinders (Brief review)]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol – Technical Diagnostics and Nondestructive Testing*, no. 1, pp. 23–28 (in Russian).
3. Kurkin, S.A. (1976). *Prochnost svarykh tonkostennykh sudov rabotaiushchikh pod davleniem [The strength of welded thin-walled vessels, working under pressure]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
4. Dmitrienko, R.I., Masiuchok, O.P., Bykov, A.V. (2014). Ostatochnoe rasshirenie ballonov. Provezhutochnye rezultaty ispytaniy [Residual extension cylinders. Intermediate test results]. *DNI NA BEZRAZRUSHITELNIIA KONTROL 2014, Sbornik dokladi. IUni 09-17 2014 – XXIX International Conference “NDT 2014” (Sozopol, Bulgaria)*. Sozopol, Blgariia. Nauchni izvestiia na NTSM, god XXII br 1 (150), pp. 561–566 (in Russian).
5. Dmitrienko, R.I., Mikhovskii, M. (2014). Metodika opredeleniia ostatochnogo rasshireniia ballonov [Method of determining the residual expansion cylinders]. *DNI NA BEZRAZRUSHITELNIIA KONTROL 2014, Sbornik dokladi. IUni 09-17 2014 – XXIX International Conference “NDT 2014” (Sozopol, Bulgaria)*. Sozopol, Blgariia. Nauchni izvestiia na NTSM, god XXII br 1 (150), pp. 494–499 (in Russian).
6. Malinin, N.N. (1975). *Prikladnaia teoriia plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]* (2nd ed., rev.). Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
7. Pisarenko, G.S. (ed.), Yakovlev, A.P. & Matveev, V.V. (1988). *Spravochnik po soprotivleniiu materialov [Handbook of resistance of materials]* (2nd ed., rev.). Kyiv: Nauk. dumka (in Russian).
8. Karimov Ildar. *Soprotivlenie materialov [Strength of materials]*. Retrieved from <http://www.soprotmat.ru/obol.htm>.

Дмитриенко Роман Игоревич – ведущий инженер-технолог ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Дмитрієнко Роман Ігорович – провідний інженер-технолог Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона (вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Dmytriienko Roman – Lead Process Engineer Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Bozhenka Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: dril@ukr.net

Палиєнко Александр Леонидович – ведущий инженер-технолог ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Боженко, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Палієнко Олександр Леонідович – провідний інженер-технолог Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона (вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Paliienko Oleksandr – Lead Process Engineer Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Bozhenka Str., 03680 Kyiv, Ukraine).