

Особенности определения характеристик пластичности кольцевых образцов из циркониевых сплавов в поперечном направлении

И. М. Неклюдов^а, Л. С. Ожигов^а, В. И. Савченко^а, А. И. Стукалов^а,
В. М. Грицина^а, В. С. Вахрушева^б, В. В. Ковалев^в, В. В. Бухановский^в

^а Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Харьков, Украина

^б Государственный трубный институт, Днепропетровск, Украина

^в Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Проанализированы основные методики испытаний кольцевых образцов на растяжение, применяющиеся в различных организациях СНГ. Проведено сравнение характеристик пластичности кольцевых образцов из циркониевых сплавов, полученных по различным методикам. Сделан вывод о необходимости согласования используемых методик испытаний кольцевых образцов либо их стандартизации.

Для определения механических характеристик труб в поперечном направлении существуют различные методики [1–5], однако до настоящего времени в пределах СНГ единый подход или универсальная методика отсутствуют. Известные ГОСТы бывшего СССР не полностью отражают такую важную характеристику, как пластичность труб в поперечном направлении [4]. Это приводит к трудностям при испытаниях труб и определении их свойств, в частности пластичности кольцевых образцов при растяжении в радиальном направлении. Следует отметить, что применяемые способы определения пластичности кольцевых образцов в поперечном направлении имеют свои достоинства и недостатки. В зависимости от свойств изучаемого материала целесообразно использовать тот или иной метод.

Один из наиболее распространенных способов испытания кольцевых образцов – испытание колец на растяжение двумя жесткими полудисковыми опорами [1]. Его преимущества – простота, точность определения основных механических характеристик $\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, $\delta_{\text{к}}$ при различных температурах и др. К недостаткам можно отнести неравномерность распределения деформации по периметру в результате ее заторможенности на опорах и дополнительное деформирование кольцевого образца, вызванное его трансформацией в эллипс, что особенно характерно для пластичных материалов. В связи с этим применяются опоры различного диаметра, причем без достаточного обоснования выбора их размеров. Некоторые исследователи отмечают, что диаметр опор влияет как на процесс деформирования кольца, так и на коэффициент k при определении расчетной длины образца l_0 по уравнению [1]

$$l_0 = (\pi / 2)(D_{\text{ср}} - kD_3), \quad (1)$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр трубы; k – коэффициент, $k = 0,85$; D_3 – диаметр опоры.

В настоящее время в разных организациях применяются различные диаметры опор для одинаковых образцов при расчете l_0 по одним и тем же формулам [1] или используются совершенно разные формулы для определения l_0 и δ_k [2]. Это приводит к большим трудностям при оценке пластичности материала труб из идентичных сплавов.

При определении механических характеристик труб $\varnothing 9,15 \times 7,72$ мм из циркониевого сплава Э-110 применялись кольцевые образцы шириной 2,8 мм и полудисковые опоры диаметром $D_3 = 4$ мм. Расчетная длина l_0 вычислялась по формуле (1). Значение коэффициента $k = 0,85$ выбиралось исходя из соотношения $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$, где S_0 – площадь поперечного сечения образца. Однако четкого обоснования для выбора D_3 не приведено [1].

Расчетная длина l_0 кольцевых образцов ($\varnothing 9,15 \times 7,72 \times 2,8$ мм) из циркониевого сплава КТЦ-110 определялась по формуле

$$l_0 = \pi d / 8, \quad (2)$$

где d – внутренний диаметр трубы.

Зависимость (2) получена для пластичных материалов на основании данных теоретических и экспериментальных исследований, включающих решение в упругой постановке задачи о растяжении анизотропного кольца двумя жесткими полудисками; исследование закономерностей распределения пластических деформаций по окружности кольцевого образца и определение расчетно-экспериментальным путем зависимости между линейным перемещением активного захвата испытательной машины и окружной деформацией кольцевого образца. Значение $D_3 = 7,7$ мм выбирается из условия сопряжения внутренней поверхности кольца с наружной поверхностью опорного полудиска по скользящей посадке. Это обеспечивает минимальную трансформацию кольцевого образца в эллипс на начальной стадии упругопластического деформирования и уменьшение вследствие этого погрешностей при определении механических характеристик [2].

Зарубежные исследователи для определения расчетной длины образца используют выражение

$$l_0 = \pi D / 5, \quad (3)$$

где D – наружный диаметр кольца.

Выражение (3) получено исходя из предположения, что основная деформация кольцевого образца сконцентрирована на $1/5$ длины его окружности [3].

В то же время экспериментальные исследования показали, что при деформировании кольцевого образца из циркониевого сплава происходит его трансформация в эллипс, и процесс разрушения локализуется на прямолинейных участках, к которым могут быть применены требования ГОСТ 1497-84 [4], согласно которому расчетная длина образца определяется по соотношению

$$l_0 = 5,65\sqrt{S_0}.$$

При использовании отраслевого стандарта [5] для аналогичных кольцевых образцов из сплава Э-110 расчетная длина l_0 принимается равной 6 мм.

Если учесть, что в приведенных примерах кольцевые образцы изготовлялись из аналогичных материалов и имели одинаковые геометрические размеры, то следовало бы ожидать, что значения абсолютной деформации для рассмотренных случаев должны совпадать. Так, при комнатной температуре и скорости растяжения 1 мм/мин во всех случаях Δl составляет примерно 1,2 мм. Однако при определении условной расчетной длины образца l_0 по различным методикам [1–5] получены существенно отличающиеся результаты для относительного удлинения δ_k кольцевых образцов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Относительное удлинение δ_k циркониевого сплава Э-110, определенное по разным методикам на кольцевых образцах ($\varnothing 9,15 \times 7,72 \times 2,8$ мм)

Методика	Формула для расчета l_0	l_0 , мм	D_3 , мм	$\delta_k = (\Delta l / l_0) \cdot 100\%$
[1]	$l_0 = (D_{cp} - kD_3)\pi / 2$	7,93	4,0	15,1
[2]	$l_0 = \pi d / 8$	3,03	7,7	39,6
[3]	$l_0 = \pi D / 5$	5,71	Не указан	20,9
[4]	$l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$	7,90	6,0...7,7	15,2
[5]	$l_0 = 6,0$	6,00	6,0	20,0

Из приведенных в табл. 1 значений l_0 , D_3 и δ_k видно, что их отличие достигает 86%, что явно недопустимо.

Не вдаваясь в более детальный анализ представленных выражений для расчета l_0 и δ_k и учитывая условность последней, достаточно отметить, что единого подхода для их определения пока не существует. Для обоснованного сравнения механических характеристик, определяемых при испытаниях в различных организациях на территории СНГ и за его пределами, необходимо представленные выше методики привести в соответствие с ГОСТ 1497-84 [4].

Как видно из данных табл. 1, значения δ_k , полученные по методикам [1] и [4] для циркониевого сплава Э-110, одинаковые. При этом необходимо заметить, что использование в расчетных формулах для определения l_0 строго необоснованных значений D_3 и k приводит к дополнительным ошибкам. Поэтому при расчете l_0 более целесообразно не опираться на подобные величины, а использовать выражение, предусмотренное ГОСТом [4], например $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$, или руководствоваться требованиями ОИ 001.325-91, согласно которым расчетная длина образца l_0 принимается равной 6 мм, а диаметр опоры D_3 – 6 мм.

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты испытаний кольцевых образцов из сплава КТЦ-110, обработанные по методикам [1–5].

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний на растяжение кольцевых образцов ($\varnothing 9,15 \times 7,72 \times 2,8$ мм) из сплава КТЦ-110, обработанные по различным методикам

№ образца	δ_k (%) при l_0 , мм					Δl_0 , мм	T , °C
	8 [1]	3,03 [2]	5 [3]	7,9 [4]	6 [5]		
1	14,5	38,0	20,0	14,7	19,3	1,16	20
2	15,8	41,5	21,8	16,0	20,9	1,26	20
3	19,5	51,5	26,6	19,7	26,0	1,56	20
4	20,1	55,0	28,8	21,0	27,6	1,66	350
5	26,8	71,0	37,6	27,4	36,0	2,16	350
6	25,8	68,0	35,8	26,2	34,4	2,06	350
7	22,0	58,0	30,6	22,5	29,4	1,76	350

Испытания проводились при температурах 20 и 350°C в вакууме $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Абсолютная деформация измерялась по делениям сетки, нанесенной до испытания образцов с помощью делительной головки УДГ-Д-160. Для измерений использовался микроскоп ИМЦ-100×50А. Как видно из табл. 1, расчетная длина l_0 , определенная по методикам [1] и [4], составляет 8 мм, по методике [2] – 3,03 мм, в остальных случаях – 5-6 мм. Анализ результатов показал, что согласно методикам [1–5] протяженность зоны локализации деформации принимается различной (3–8 мм). По-видимому, минимальная зона характерна преимущественно для хрупких материалов, в то время как максимальная – для пластичных, к которым можно отнести циркониевые сплавы. С этой точки зрения методики [1] и [4] в данном случае предпочтительнее.

В табл. 2 представлены также значения относительного удлинения δ_k , для кольцевых образцов из сплава КТЦ-110, полученные по методикам [1–5].

Видно, что при оценке δ_k по методикам [1] и [4] получены практически аналогичные данные, в то время как результаты, определенные по методике [2], существенно отличаются.

Учитывая особенности определения l_0 и D_3 по методикам [1–5], в качестве оптимальных для них можно принимать усредненные величины ($l_0 = 6$ мм и $D_3 = 6$ мм), соответствующие отраслевому документу ОИ 001.325-91 [5]. Таким образом, требования отраслевой инструкции [5] можно рассматривать в качестве основных для определения характеристик пластичности кольцевых образцов из циркониевых сплавов.

В связи с начавшейся в Украине разработкой технологии производства труб-оболочек твэлов из циркониевых сплавов и необходимостью получения сопоставимых результатов испытаний по заданию Министерства энергетики в Государственном трубном институте разработана и согласована с Национальным научным центром “Харьковский физико-технический институт” первая редакция отраслевой методики определения механических свойств кольцевых образцов из циркониевых сплавов. Для труб размером

$\varnothing 9,15 \times 7,72$ мм расчетная длина l_0 предусмотрена равной 6 мм, диаметр опор D_3 – 6 мм. Методика разработана на основе ОИ 001.325-91 [5].

Резюме

Проаналізовано основні методики дослідження кільцевих зразків на розтяг. Порівнюються характеристики пластичності кільцевих зразків із цирконієвих сплавів, що визначені за різними методиками. Зроблено висновок щодо необхідності погодження методик, що використовуються, або їх стандартизації.

1. *Кобылянский Г. П., Новоселов А. Е.* Радиационная стойкость циркониевых сплавов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. – 175 с.
2. *ДСТУ 2528-94.* Метод испытания на растяжение кольцевых образцов в условиях нагрева. – Введ. 01.07.95.
3. *Steward K. P.* The properties of cold-worked Zr-2,5wt.%Nb fuel sheathing. – AECL-2250, 1965.
4. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01. 01. 84.
5. *ОИ 001.325-91.* Методика выполнения испытаний для определения характеристик механических свойств кольцевых образцов от труб по ТУ 95.405-89 при растяжении. – Введ. 19. 09. 91.

Поступила 11. 05. 99