

PACS: 81.70.Bt

## REGULARITIES OF INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF TVEL COVERS FROM ZR-1%NB ALLOYS IN LONGITUDINAL AND TRANSVERSE DIRECTIONS

L.S. Ozhigov, V.I. Savchenko, A.S. Mitrofanov,  
Y.A. Krainyuk, S.V. Shramchenko, P.N. Vjugov, A.P. Redkina

*NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology"*

*1, Akademicheskaya st., Kharkov, Ukraine, 61108*

*E-mail: ozhigov@kipt.kharkov.ua*

Received September 26, 2016

There is presented results of mechanical properties testing of different type samples from TVEL tubes from Zr-1%Nb alloy. Held investigations with samples tension in tube type and modified samples, shape and dimensions of that are similar with such parameters of ring samples. Held comparison of mechanical properties in longitudinal and transverse directions at standard and modified samples. Notified significant differences of mechanical properties, mostly, relative lengthening ( $\delta\%$ ) at testing of modified samples, and also with testing of ring samples with using deformation at cone insertion, in comparison with deformation in axis direction at 2 supports.

**KEY WORDS:** mechanical testings, TVEL-tube samples, comparison of mechanical properties in longitudinal and transverse directions

### ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБОЛОНОК ТВЕЛ ЗІ СПЛАВУ ZR-1%NB У ПОЗДОВЖНЬОМУ І ПОПЕРЕЧНОМУ НАПРЯМКУ

Л.С. Ожигів, В.І. Савченко, А.С. Митрофанов, Є.О. Крайнюк,  
С.В. Шрамченко, П.М. В'югов, Г.П. Редкіна

*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»*

*Україна, 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1*

Приведені результати дослідження механічних властивостей зразків різного типу із твельних труб Zr-1%Nb сплаву. Проведені дослідження при розтягуванні зразків-патрубок і модифікованих зразків, виготовлених із патрубків, форма та розміри робочої частини котрих аналогічна відповідним параметрам кільцевих зразків. Проведено порівняння механічних властивостей у поздовжньому та поперечному напрямках на стандартних і модифікованих зразках. Відмічені значні відхилення механічних властивостей, особливо відносного подовження ( $\delta\%$ ) при дослідженні модифікованих зразків, а також при дослідженні кільцевих зразків з використанням деформації на конусних вставках при зрівнянні з деформацією у осьовому напрямку на двох опорах.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** механічні дослідження, зразки із твельних трубок, порівняння механічних властивостей у поздовжньому і поперечному напрямку

### ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ ИЗ ZR-1%NB СПЛАВА В ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Л.С. Ожигов, В.И. Савченко, А.С. Митрофанов, Е.А. Крайнюк,  
С.В. Шрамченко, П.Н. Вьюгов, А.П. Редкина

*Национальный Научный центр «Харьковский физико-технический институт»*

*Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1*

Представлены результаты исследования механических свойств образцов различного типа из твельных труб из Zr-1%Nb сплава. Проведены испытания при растяжении образцов в виде патрубка и модифицированных образцов, изготовленных из патрубков, форма и размеры рабочей части которых аналогична соответствующим параметрам кольцевых образцов. Проведено сравнение механических свойств в продольном и поперечном направлении на стандартных и модифицированных образцах. Отмечены значительные отличия механических свойств, особенно относительного удлинения ( $\delta\%$ ) при испытаниях модифицированных образцов, а также при испытаниях кольцевых образцов с применением деформации на конусных вставках, по сравнению с деформацией в осевом направлении на двух опорах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** механические испытания, образцы из твельных трубок, сравнение механических свойств в продольном и поперечном направлении

Для определения механических характеристик труб в поперечном направлении существуют различные методики, однако до настоящего времени единый подход или универсальная методика отсутствуют. Известные ГОСТы бывшего СССР не полностью отражают такую важную характеристику, как пластичность труб в поперечном направлении. Это приводит к трудностям при испытаниях труб и определении их свойств, в частности, пластичности кольцевых образцов в поперечном направлении. Цель работы – разработка методов контроля механических свойств оболочек твелов.

Один из наиболее распространённых способов испытания кольцевых образцов – испытание колец на растяжение двумя жёсткими полудисковыми опорами. Его преимущества – простота, точность определения

основных механических характеристик  $\sigma, \sigma_0, \delta_k$  при различных температурах и др. К недостаткам можно отнести неравномерность распределения деформации по периметру в результате её 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, причём 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 расчётной длины образца  $l_0$  по уравнению:

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

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

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. Расчётная 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, чёткого обоснования для выбора  $D_3$  не приведено.

Расчётная 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 расчётно-экспериментальным путём 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 расчётной 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.

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, согласно которому расчётная длина образца определяется по соотношению

$$l_0 = 5,65 \sqrt{S_0}. \quad (4)$$

При определении условной расчётной длины образца  $l_0$  по различным методикам [1-5] получены существенно отличающиеся результаты для относительного удлинения  $\delta_k$ , находящиеся в пределах от 15,1 до 39,6 %.

Поэтому при расчёте  $l_0$  более целесообразно использовать уравнение, предусмотренное ГОСТом [7],  $l_0 = 5,65 \sqrt{S_0} \sqrt{S_0}$ , или руководствоваться требованиями ОИ 001.[3]

В связи с разработкой в Украине 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 методика разработана на основе ОИ 001.325-91 [3] и ГОСТ [7].

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании механических свойств тонкостенных трубок для оболочек ТВЭЛ из сплавов Zr-1%Nb в продольном и поперечном направлении обычно применяются две различные методики, в частности, в продольном направлении испытания проводятся на патрубках по ГОСТ 1008-80 [1], а в поперечном направлении на кольцевых образцах по ДСТУ 2528-94 или по ОИ 001.325-91 [2, 3].

В течение длительного времени эти методики совершенствовались и дополнялись [4], однако, существуют некоторые условности, которые затрудняют однозначное определение и сравнение механических свойств, особенно пластичности трубок в продольном и поперечном направлении.

При сравнении результатов исследования пластичности трубок необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на результат. При испытании образцов-патрубков в продольном направлении в соответствии с ГОСТ [1] расчетная длина  $l_0^{\parallel} = 25$  мм, а при испытании кольцевых образцов в поперечном направлении расчетная длина  $l_0^{\perp} = 8,0$  мм [2, 3]. Поэтому при сохранении остальных условий испытаний одинаковыми целесообразно применение модифицированных образцов из трубок для продольных испытаний с одинаковой расчетной длиной и формой с кольцевыми образцами. Для достижения этой цели необходимо для продольных испытаний использовать модифицированные образцы, изготовленные из патрубков твэльных трубок, приведенных на рис. 1.



Рис.1 Образцы (верхний – после испытаний, нижний – до испытаний).

В таком случае для “продольных” и “поперечных” испытаний сохраняются одинаковые условия формы и размеров рабочей части образцов, а именно –  $l_0^{\parallel} = l_0^{\perp} = 8,0$  мм, и ширина рабочей части образцов одинакова  $b_0^{\parallel} = b_0^{\perp} = 2,8$  мм, в соответствии с требованиями ДСТУ 2528-94 [2, 3] для кольцевых образцов.

Применение модифицированных образцов имеет ряд преимуществ при сравнении механических свойств твэльных трубок в продольном и поперечном направлении, и кроме того такие образцы имеют рабочую длину близкую к расчетной длине  $l_0$ , что особенно важно при испытании влияния покрытий и облученных образцов. Дополнительно необходимо отметить особенности при испытаниях твэльных трубок в поперечном направлении на кольцевых образцах, в соответствии с требованиями [1-3]. Эти испытания проводятся длительное время и многократно подвергались усовершенствованиям, однако главная “условность” до сих пор существует и заключается в том, что кольцевой образец – только начальная форма образца, а при одноосном растяжении на полудисковых опорах кольцо деформируется до вытянутой “петли” с прямолинейными боковыми сегментами шириной 2,8 мм и длиной ~ 10 мм, из которых 8 мм составляет расчетная длина по [1-3], т.е. фактически деформация растяжением происходит на выпрямленных боковых участках исходного кольцевого образца и отличается от деформации твэльной трубки в тангенциальном направлении в рабочих условиях.

С целью приближения вида деформации к реальным условиям деформация кольцевого образца нами производилась с применением конусной вставки [5]. В этой работе проведено сравнение испытаний кольцевых образцов на полудисковых опорах [6] и с применением конуса. Испытания показали, что относительное удлинение  $\delta_s\%$  при деформации на конусной вставке значительно превышает удлинение при осевом растяжении кольцевого образца на полудисковых опорах (таблица 1).

Таблица 1.

Относительное удлинение при разных методиках.

Температура испытаний	Относительное удлинение, $\delta\%$	
	Растяжение кольцевых образцов на конусе	Растяжение кольцевых образцов на двух опорах
20°C	41%	24%
350°C	64%	36-41%

С целью исключения отмеченных недостатков при испытании образцов из твэльных трубок в продольном

и поперечном направлении в настоящей работе проведены испытания модифицированных образцов и патрубков при растяжении в продольном направлении. Из одной твэльной трубки из Zr-%Nb сплава были изготовлены два вида образцов – обычные патрубки (по ГОСТ 10006-80) и модифицированные образцы, изготовленные электро-искровым способом. Испытания проводились на растяжение со скоростью 1 мм/мин на установке Instron-5581 при 20 °С. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Механические свойства для различных типов образцов.

Образцы патрубки	Модифицированные образцы
$\sigma_B = 448$ МПа	$\sigma_B = 458$ МПа
$\sigma_{0,2} = 248$ МПа	$\sigma_{0,2} = 339$ МПа
$\delta\% = 48\%$	$\delta\% = 30\%$

Сравнение механических свойств патрубков и модифицированных образцов для продольных испытаний показывает, что для модифицированных образцов предел прочности  $\sigma_B$  изменяется незначительно, а  $\sigma_{0,2}$  на 20% выше, и  $\delta$  на 18% ниже, чем для патрубка.

При сравнении механических свойств твэльных трубок в продольном и поперечном направлении по результатам испытания кольцевых образцов растяжением (на 2-х опорах) (таблица 1) с результатами испытания модифицированных образцов (таблица 2) ( $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$ ) почти не изменяются [6], а  $\delta$  (для продольного растяжения) на 6-7% выше, чем при растяжении кольцевых образцов.

Более значительное отличие пластичности ( $\delta\%$ ) отмечается при сравнении растяжения патрубка  $\delta^I = 48\%$  (таблица 2) и растяжении кольцевого образца в осевом направлении на 2-х опорах (по обычной методике), когда  $\delta^I = 23...24\%$  (таблица 1).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов испытания механических свойств на различных образцах из тонкостенных твэльных трубок из Zr-1%Nb сплава показали, что применение образцов, изготовленных из патрубков с размерами и формой рабочей части аналогичный с кольцевыми образцами позволяет получать более корректные результаты, а применение конусных вставок при испытании кольцевых образцов, приближает результаты (особенно пластичности  $\delta\%$ ) к свойствам твэльной трубки в рабочих условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GOST 10006-80. Truby metallicheskie "Metod ispytaniya na rastjazhenie" [Metallic pipes "Method of tensile test]. (In Russian)
2. DSTU 2528-94. Raschety i ispytaniya na prochnost'. "Metod ispytaniya na rastjazhenie kol'cevyyh obrazcov v uslovijah nagreva" [Calculations and tests of strength. "The method of testing samples on the ring stretching under heat]. – 1994. – 12p. (In Russian)
3. OI № 001.325-91. Metodika vypolnenija ispytanij dlja opredelenija mehanicheskikh svojstv obrazcov ot trub po TU95.405-89 pri rastjazhenii. Otrasleyaja instrukcija [Methods of test for determining the mechanical properties of the samples from the pipes TU95.405-89 tensile. Industry guide] M. VNIINM, 1991. – 25 s. (In Russian)
4. Makarov O.Ju., Prokhorov V.I., et al. Improved measurement technigues for Zr1%Nb alloy claddings mechanical properties while simple ring specimens testing. Abstracts for VI Russian Conference for Reactor Material Science, Dimitrovgrad, September 11-15, 2000. (In Russian)
5. Ozhigov L.S., Mitrofanov A.S., Savchenko V.I., V'jugov P.N., Krajnjuk E.A. Opredelenie plastichnosti metallicheskih trub malyh diametrov v tangencial'nom napravlenii [Determination ductility metal tubes of small diameter in the tangential direction] // Zav. Lab. Diagnostika materialov. – 2014. – T.80. – No.3. – S. 60-62. (In Russian)
6. Azhazha V.M., Ozhigov L.S., Lavrinenko S.D., Savchenko V.I. Issledovanie mehanicheskikh harakteristik tvjel'nyh trubok iz splava Zr1%Nb ukrainskogo proizvodstva v prodol'nom i poperechnom napravlenii v intervale 20...700 °C" [Tvelnyh study of mechanical characteristics of tubes Zr1% Nb alloy Ukrainian production in longitudinal and transverse directions in the range of 20...700 °C]. i dr. // Trudy XIX Mezhdunarodnoj konferencii po fizike radiacionnyh javlenij i radiacionnomu materialovedeniju. – 6-11.IX.2010, s.190-191. (In Russian)
7. GOST 1497-84 Metally. Metody ispytanij na rastjazhenie [Metals. Tensile Test Methods]. (In Russian)