

УДК 539.3

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Е. В. Карпов, А. Ю. Ларичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: evkarpov@mail.ru, larichking@gmail.com

Представлены результаты экспериментального исследования деформирования и разрушения циркониевого сплава Zr — 1 % Nb при многократном нагружении в условиях низких температур (до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). С использованием образцов, вырезанных из труб, применяемых в качестве оболочек твэлов тепловыделяющих сборок ядерных реакторов, проведена серия экспериментов по малоциклового растяжению и сжатию при низких температурах и исследовано влияние низкой температуры на релаксацию напряжений в материале при различном количестве предварительных нагружений.

Ключевые слова: циркониевый сплав, многократное нагружение, малоцикловая усталость, низкие температуры, релаксация напряжений.

DOI: 10.15372/PMTF20170620

Введение. В современной атомной энергетике используются различные сплавы циркония. Тепловыделяющий элемент (твэл) представляет собой трубку из сплава Zr — 1 % Nb [1, 2], в которую помещены урановые таблетки. Основной проблемой утилизации отработанных элементов является сложность разделения твэлов на фрагменты после извлечения частично отработанного топлива. В процессе утилизации важным условием является сведение к минимуму загрязнения окружающей среды радиоактивными фрагментами трубок. Основными способами разделения отработанных циркониевых трубок на фрагменты для утилизации являются распиливание и разрубание, однако при их использовании остаются осколки или стружка облученного циркония. Способ безотходной резки тонкостенных трубок путем усталостного нагружения предложен в работе [3].

В данной работе приведены результаты экспериментов по равномерному и циклическому деформированию образцов из сплава Zr — 1 % Nb в диапазоне температур от 20 до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данные экспериментов по сложному деформированию трубчатых образцов из стали различных марок приведены в [4].

1. Образцы и постановка экспериментов. Испытания проводились на электро-механической универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 с климатической камерой W91255 в диапазоне температур от 20 до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Образцы, испытываемые на растяжение и сжатие, изготавливались из трубок, внешний диаметр которых равен 9,13 мм, внутренний — 7,72 мм. Образцы на сжатие представляли собой отрезки трубки длиной 20 мм, конфигурация образцов, испытываемых на

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-01635).

© Карпов Е. В., Ларичкин А. Ю., 2017

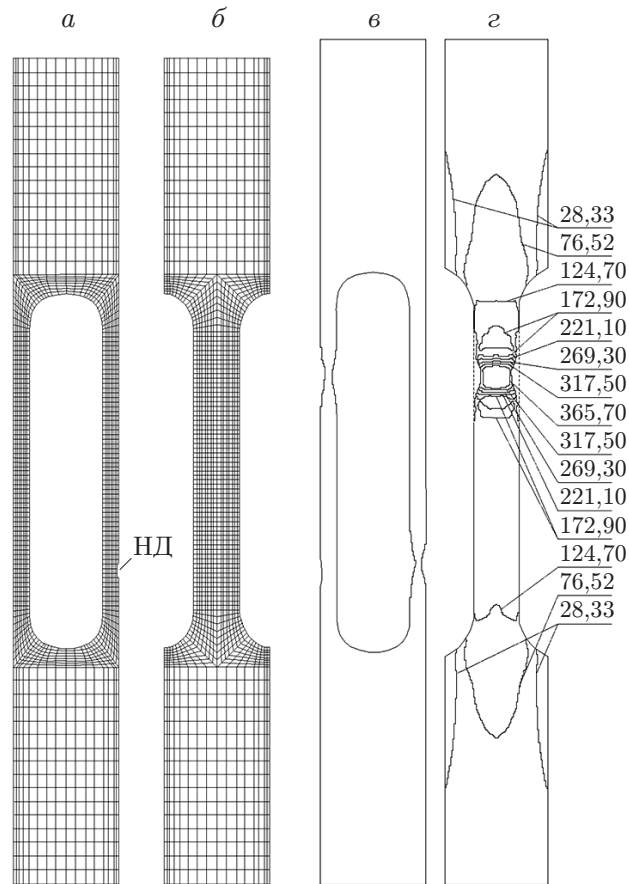


Рис. 1. Геометрия образца с кососимметричной локализацией деформаций и результаты численного моделирования его растяжения:

a, б — конечноэлементная модель образца (*a* — вид спереди, *б* — вид сбоку), *в* — конфигурация деформированного образца с двумя шейками, *г* — изолинии напряжений σ_{yy} (в мегапаскалях); НД — начальный дефект

растяжение, показана на рис. 1, *a, б*. Для крепления образцов в захватах в головках образцов были просверлены поперечные отверстия. Боковые вырезы сделаны для того, чтобы поперечное сечение рабочей части образца было меньше поперечных сечений головок, ослабленных отверстиями. Таким образом, образец представляет собой пару испытываемых на растяжение лопаточных образцов, соответствующих ГОСТ 1006-80. Начальная площадь поперечного сечения образца вычисляется по формуле

$$S = 2nab, \quad n = 1 + b^2 / (6D(D - 2a)),$$

где *a* — толщина стенки; *D, b* — диаметр и ширина образца. В качестве меры деформации *e* при растяжении рассматривалось относительное увеличение расстояния между головками образца, измеряемое внешним тензометром.

Щупы тензометра не устанавливались непосредственно на рабочую часть образца, поскольку на стадии образования локализованных зон пластической деформации эти зоны могут частично находиться за пределами измерительной базы, что затрудняет определение среднего относительного удлинения. При сжатии в качестве меры деформации *e* использовалась относительная усадка образца, определяемая по перемещению траверсы.

Проведены испытания по однократному и малоцикловому нагружению образцов при различных значениях температуры. Малоцикловое нагружение представляло собой пуль-

сирующее знакопостоянное нагружение с постоянной амплитудой напряжения, соответствующей начальной площади поперечного сечения. Также проведены исследования релаксации напряжений при растяжении и сжатии для значений температуры в диапазоне от 20 до -80 °С при постоянной деформации и различных степенях деформирования.

2. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния образцов. Проведено численное моделирование растяжения образцов в виде сдвоенного сегмента трубы (см. рис. 1, *a*). На нижнем торце образца задавалось условие жесткого закрепления, на верхнем — перемещение вдоль оси образца со скоростью 15 мм/мин.

Использовалась модель идеально упругопластического тела. Область, в которой проводилось численное моделирование, разбивалась на 16 128 кубических элементов с трилинейной интерполяцией вектора перемещений (см. рис. 1, *a*). Моделирование выполнялось с учетом больших деформаций в текущей лагранжевой конфигурации [5].

Поскольку образец имеет две дублирующие друг друга рабочие части, возникновение шейки в одной из них может вызвать перекосяк и как следствие появление различных напряженно-деформированных состояний. Для оценки влияния наличия шейки в одной из рабочих частей на напряженно-деформированное состояние образца возникновение шейки было инициировано созданием незначительного дефекта. Дефект создавался в нижней половине одной из рабочих частей за счет сдвига находящегося на внешней поверхности образца узла сетки по радиусу внутрь на глубину 0,05 мм, что составляет 3,5 % толщины стенки трубки (см. рис. 1, *a*). Результаты моделирования показывают, что возникновение шейки в одной из рабочих частей приводит к образованию асимметрично расположенной шейки во второй половине образца (см. рис. 1, *b*), где дефект расчетной сетки отсутствовал. На рис. 1, *b* приведены изолинии компоненты σ_{yy} тензора напряжений Коши. Осредненное по длине рабочей части деформированное состояние сдвоенных сегментов трубки остается одним и тем же. Аналогичная картина наблюдается в эксперименте. Следовательно, напряженно-деформированное состояние использованных образцов можно рассматривать как осредненное напряженно-деформированное состояние двух образцов, соответствующих ГОСТ 1006-80.

3. Квасистатическое нагружение. На рис. 2 приведены диаграммы нагружения образцов при различных значениях температуры. По оси ординат отложены абсолютные значения условных напряжений при растяжении и сжатии.

При растяжении наличие ниспадающей ветви кривой $\sigma(\epsilon)$ является следствием образования шеек в рабочих частях образцов. При $T = 20$ °С появляется площадка текучести (при $T = -60$ °С и $T = -80$ °С площадка текучести отсутствует), предел текучести

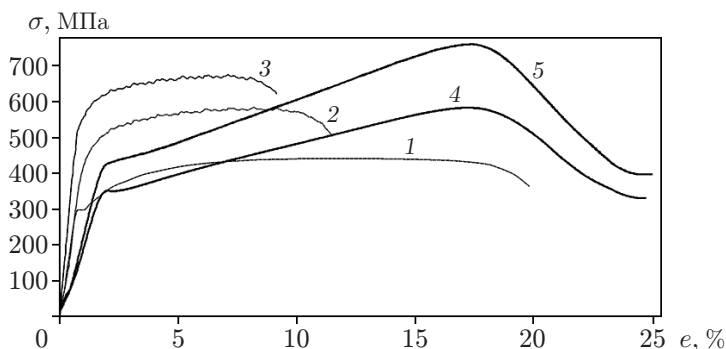


Рис. 2. Диаграммы нагружения образцов:

1–3 — растяжение (1 — $T = 20$ °С, 2 — $T = -60$ °С, 3 — $T = -80$ °С), 4, 5 — сжатие (4 — $T = 20$ °С, 5 — $T = -80$ °С)

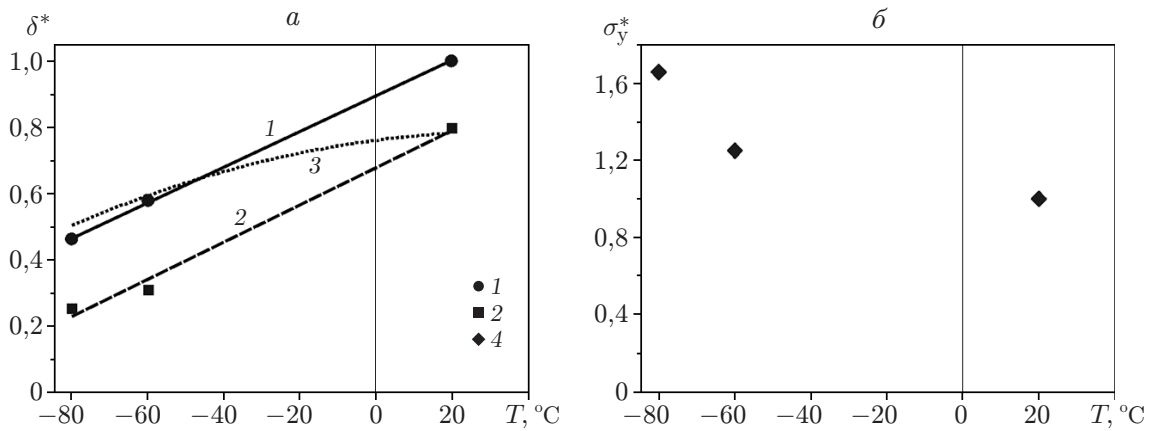


Рис. 3. Зависимости параметров δ_p^* , δ_{max}^* , $\delta_{max}^*/\delta_p^*$ (а) и σ_y^* (б) от температуры: 1 — нормированное максимальное относительное удлинение при равномерном квазистатическом растяжении δ_p^* , 2 — нормированное максимальное относительное удлинение при малоцикловом пульсирующем растяжении δ_{max}^* , 3 — отношение $\delta_{max}^*/\delta_p^*$, 4 — нормированный предел упругости σ_y^* ; точки — экспериментальные данные, линии — линейная аппроксимация экспериментальных данных

при низких температурах не выражен. На рис. 3 приведены зависимости нормированного максимального относительного удлинения δ_p^* и нормированного предела упругости σ_y^* от температуры. Нормированные параметры представляют собой отношение значения параметра при текущей температуре к его значению при $T = 20$ °С. При низких температурах наблюдается нестабильность пластического течения, отличающаяся от эффекта Портевена — Ле Шателье. При этом кривая растяжения является волнообразной периодической по величине деформации, но не по времени (период колебаний $\sigma(\epsilon)$ сохраняется при равномерном и неравномерном нагружении).

При сжатии начало ниспадающей ветви соответствует осесимметричной потере устойчивости образцов. Изменение температуры не оказывает влияния на величину деформации, при которой происходит потеря устойчивости. В случае сжатия при $T = 20$ °С появляется площадка текучести. При $T = -80$ °С площадка текучести отсутствует, но имеется выраженный предел текучести, который увеличивается на 23 % по сравнению с пределом текучести при $T = 20$ °С. Касательный модуль, характеризующий упрочнение материала при пластическом деформировании, увеличивается на 45 %.

4. Малоцикловое нагружение при низких температурах. Поскольку при различных температурах предел текучести материала имеет разные значения, сравнение поведения материала в случае малоциклового усталости с одной и той же амплитудой напряжения при различных значениях температуры некорректно. Поэтому амплитуда нагружения выбиралась таким образом, чтобы в первом цикле приращение относительного удлинения для всех образцов было одним и тем же (3 %). Предельное относительное удлинение δ_{max}^* (см. рис. 3) также зависит от температуры, вследствие чего значения отношения приращения относительного удлинения в первом цикле к значению δ_{max}^* различаются, что оказывает влияние на количество циклов нагружения до разрушения. Для сравнения поведения материала при различных температурах использовались нормированное приращение относительного удлинения $\epsilon^* = (\epsilon - \epsilon_1)/\epsilon_{lim}$ и нормированное число циклов $n^* = n/n_{lim}$ (ϵ — абсолютное приращение относительного удлинения; ϵ_1 — приращение относительного удлинения в первом цикле (в первом цикле определялась амплитуда циклического нагружения); n — число циклов нагружения; ϵ_{lim} — предельное относительное удлинение

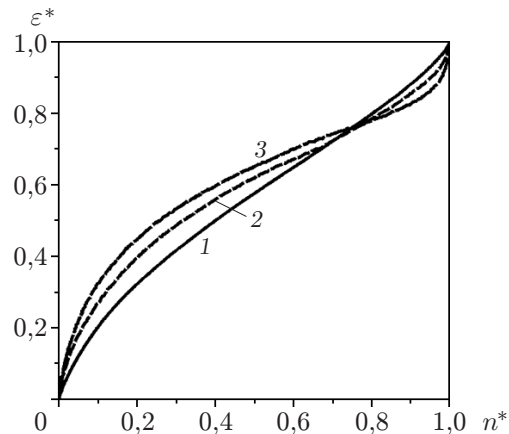


Рис. 4. Зависимость нормированного относительного удлинения от нормированного числа циклов при различных значениях температуры:
1 — $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 — $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 — $T = -80\text{ }^{\circ}\text{C}$

ние; n_{lim} — число циклов до разрушения). На рис. 4 приведена зависимость $\varepsilon^*(n^*)$ при различных значениях температуры. Кривые $\varepsilon^*(n^*)$ состоят из двух ветвей, соответствующих замедляющемуся и ускоряющемуся приращению относительного удлинения. Вторая ветвь соответствует также развитию шейки в образце. При любой температуре переход от первой ветви ко второй происходит при одном и том же значении $n^* \approx 0,75$.

Испытания показали, что при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость $\varepsilon^*(n^*)$ близка к линейной, а при отрицательных значениях температуры является нелинейной. При уменьшении температуры степень нелинейности увеличивается как на этапе циклического упрочнения, так и на этапе развития локализованной деформации.

Предельная деформация при циклическом нагружении меньше, чем при равномерном, причем с уменьшением температуры это различие увеличивается (кривые 1–3 на рис. 3).

5. Релаксация напряжений при низких температурах. Испытания на релаксацию проводились по ступенчатой программе нагружения. На каждой ступени осадка при сжатии или относительное удлинение при растяжении увеличивались на 0,5 %, после чего осуществлялась выдержка образцов в течение 120 с. Нагружение проводилось до момента разрушения. Зависимости напряжения от времени при постоянной деформации приводились к безразмерному виду $s_e(t) = \sigma_e(t)/\sigma_{e0}$, где $\sigma_e(t)$ — текущее напряжение; σ_{e0} — начальное напряжение для шага, соответствующего постоянному значению относительного удлинения e . При этом предполагалось, что функция релаксации содержит начальное напряжение в качестве постоянного множителя. Для сравнения релаксации напряжений при различных значениях накопленной деформации проводилась аппроксимация полученных безразмерных экспериментальных зависимостей функциями вида

$$\sigma^*(t) = 1 - \alpha \ln(1 - \beta t).$$

Для большинства полученных зависимостей в случаях растяжения и сжатия при температурах $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ наименьшее среднеквадратичное отклонение значений аппроксимирующих функций от экспериментальных данных имело место при $\beta = 1,7$. Поэтому данное значение параметра β использовалось при аппроксимации всех зависимостей. Сравнение зависимостей проводилось при различных значениях параметра α . Функции, аппроксимирующие экспериментальные данные, приведены на рис. 5. Экспериментальные данные представлены в безразмерном виде $s_e(t) = \sigma_e(t)/\sigma_{e0}$.

В случае сжатия при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и одних и тех же значениях осадки кривые релаксации совпадают (рис. 6, а) для различных напряженно-деформированных

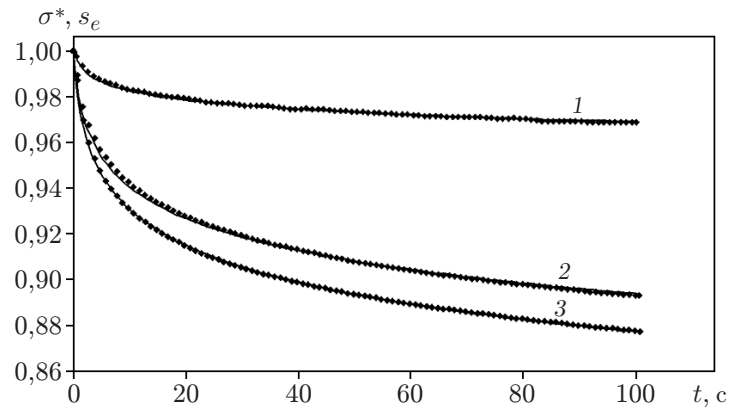


Рис. 5. Аппроксимации кривых релаксации напряжения функциями вида $\sigma^*(t) = 1 - \alpha \ln(1 - \beta t)$ после третьего (1), седьмого (2) и десятого (3) нагружений в случае растяжения при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

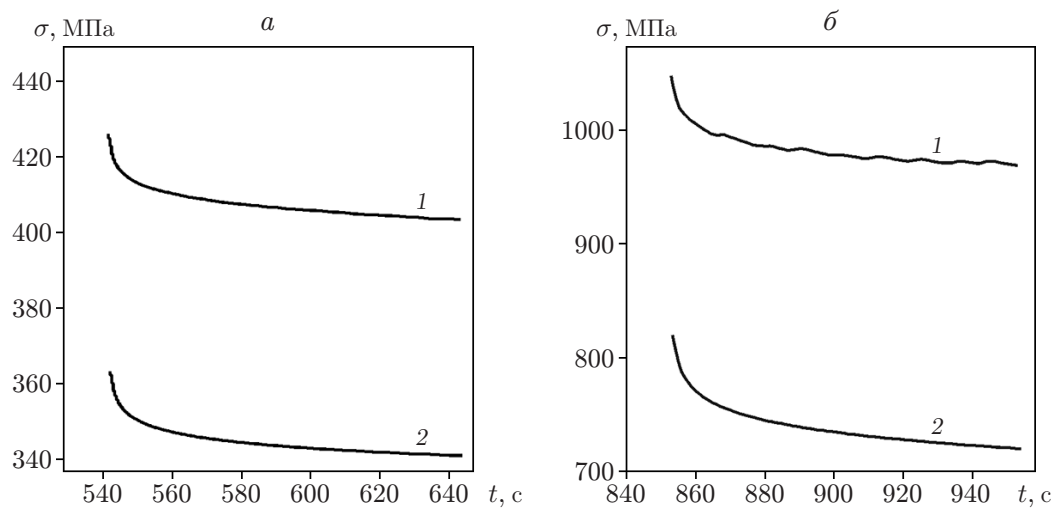


Рис. 6. Кривые релаксации напряжений при различных условиях: a — сжатие, b — растяжение; 1 — $T = -80 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 — $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

состояний при деформации $e = 3,0 \div 17,5 \%$ (этот диапазон соответствует монотонному упрочнению материала, происходящему за площадкой текучести при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и после достижения предела текучести при $T = -80 \text{ }^\circ\text{C}$ до момента потери устойчивости). В безразмерных переменных кривые релаксации различаются, поскольку при различных значениях температуры одному значению деформации соответствуют разные значения напряжения σ_{e0} . В диапазоне значений деформации $e = 3,0 \div 17,5 \%$ параметр релаксации α (рис. 7) при обоих значениях температуры монотонно уменьшается с увеличением осадки, зависимость $\alpha(e)$ близка к линейной зависимости $\alpha = -0,0002e + 0,0243$ при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\alpha = -0,0002e + 0,0203$ при $T = -80 \text{ }^\circ\text{C}$. Увеличение параметра релаксации вне указанного выше диапазона значений деформации обусловлено потерей устойчивости образца. При переходе от упругого деформирования к пластическому наблюдается корреляция кривых $\alpha(e)$ и $\sigma(e)$: при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ на кривых $\alpha(e)$ (кривая 1 на рис. 7) и $\sigma(e)$ (кривая 4 на рис. 2) имеется “зуб”, соответствующий переходу к пластической деформации, при $T = -80 \text{ }^\circ\text{C}$ он отсутствует (кривая 2 на рис. 7 и кривая 5 на рис. 2). В случае упругого деформирования параметр релаксации при $T = -80 \text{ }^\circ\text{C}$ больше, чем при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. При растяжении такой зависимости не наблюдается.

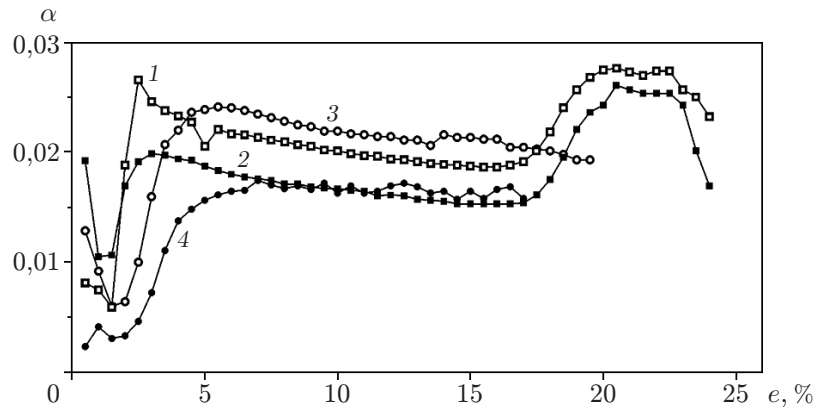


Рис. 7. Зависимость параметра α в функции релаксации $\sigma^*(t) = 1 - \alpha \ln(1 - \beta t)$ от величины относительного удлинения при различных условиях нагружения: 1 — сжатие при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, 2 — сжатие при $T = -80\text{ }^\circ\text{C}$, 3 — растяжение при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, 4 — растяжение при $T = -80\text{ }^\circ\text{C}$

В случае растяжения при одних и тех же значениях деформации различие параметров релаксации при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и $T = -80\text{ }^\circ\text{C}$ более чем в два раза превышает соответствующее различие при сжатии (см. рис. 7), а значения напряжений в процессе релаксации при $T = -80\text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 1 на рис. 6,б) уменьшаются не монотонно, как при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 2 на рис. 6,б), а с некоторой периодичностью по времени. Также наблюдаются значительные различия кривых $\alpha(e)$ в диапазоне значений деформаций, соответствующем упрочнению материала. При $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ зависимость параметра релаксации от деформации аналогична наблюдаемой при сжатии ($\alpha = -0,0002e + 0,0243$), в то время как при $T = -80\text{ }^\circ\text{C}$ вместо монотонного уменьшения параметра релаксации наблюдается его колебание вблизи постоянного значения, близкого к среднему значению параметра α в том же диапазоне значений деформации при сжатии.

6. Обсуждение результатов. Проведенные испытания показали, что низкие температуры оказывают существенное влияние на процесс пластического деформирования циркониевого сплава. При температуре $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ при переходе от упругого деформирования к пластическому образуется площадка текучести вследствие закрепления дислокаций атмосферами Коттрелла, образованными атомами кислорода, входящими в кристаллическую решетку циркония в качестве примеси [6]. В случае растяжения при температурах $T = -60, -80\text{ }^\circ\text{C}$ площадка текучести исчезает, а характерное для сплавов циркония пластическое течение с параболическим упрочнением приобретает существенную неустойчивость, выраженную в циклическом упрочнении-разупрочнении. Колебания напряжения обладают периодичностью по величине деформации, но не по времени. В работах [7–10] показано, что неустойчивость пластического течения в сплавах циркония определяется образованием фрагментированной структуры, обуславливающей периодическое изменение пространственно-временного распределения локальных деформаций, т. е. образование и перемещение очагов локализации деформаций (появление некоторого количества “неактивных” шеек, одна из которых по мере развития деформации становится устойчивой и превращается в зону предразрушения материала).

При температурах $T = -60, -80\text{ }^\circ\text{C}$ периодическая неустойчивость появляется на ранних стадиях пластического деформирования (см. рис. 2), поэтому при значении деформации, при котором начинается малоцикловое нагружение, происходит локализация очагов пластического течения. В результате один из очагов локализации превращается в шейку при циклическом нагружении с последующим разрушением. При увеличении шейки про-

исходит локальный рост амплитуды напряжения при постоянной амплитуде приложенной внешней силы. Механизм усталостного разрушения в циркониевых и титановых сплавах в работе [11] объясняется возникновением зон кривизны кристаллической решетки. В этих зонах образуются неравновесные вакансии, коалесценция которых приводит к накоплению микропор в материале и последующему разрушению пористых областей. Накопление микропор может способствовать развитию шейки. Начало ее развития соответствует переходу от замедляющегося прироста остаточной деформации к ускоряющемуся и во всем рассмотренном диапазоне температур происходит при удельной деформации $\varepsilon^* = 0,75$, т. е. при относительном растяжении $\varepsilon = 0,75\varepsilon_{\text{lim}} + \varepsilon_1$. Количество циклов, после которого начинается развитие шейки, равно $0,75n_{\text{lim}}$.

Увеличение степени неоднородности напряженно-деформированного состояния при растяжении в условиях отрицательных температур проявляется в возникновении неустойчивости пластического течения, увеличении степени нелинейности кривых $\varepsilon^*(n)^*$ и в нестабильности релаксации напряжений. Понижение температуры приводит к уменьшению предельного относительного удлинения δ^* образцов и отношения δ^* при малоцикловом растяжении к δ^* при равномерном нагружении. Получены линейные зависимости δ^* от температуры в диапазоне $-80\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 20\text{ }^\circ\text{C}$ при равномерном и пульсирующем растяжении, позволяющие по величине δ^* при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ в случае равномерного растяжения оценить предельное относительное удлинение в случае малоциклового растяжения в указанном температурном диапазоне.

Заключение. Проведенные исследования показали, что в циркониевом сплаве Zr — 1 % Nb при $T \leq -60\text{ }^\circ\text{C}$ уменьшение температуры сопровождается увеличением степени неоднородности напряженно-деформированного состояния, в частности локализацией деформаций на начальных стадиях пластического деформирования. Вследствие этого предельная деформация при циклическом нагружении оказывается значительно меньшей (на 50 %), чем при обычном растяжении. При этом сохраняется вязкий тип разрушения с образованием развитой шейки, что исключает образование осколков. Таким образом, охлаждение сплава Zr — 1 % Nb до температуры $T \leq -60\text{ }^\circ\text{C}$ позволяет увеличить эффективность разделения на фрагменты отработанных циркониевых трубок путем циклического нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Заводчиков С. Ю.** Металловедческие вопросы производства изделий из сплавов циркония / С. Ю. Заводчиков, Л. Б. Зуев, В. А. Кортехов. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 2012.
2. **Ривкин Е. Ю.** Прочность сплавов циркония / Е. Ю. Ривкин, Б. С. Родченков, В. М. Филатов. М.: Атомиздат, 1974.
3. **Пат. 2361702 С2 РФ, МПК В 23 D 21/00 (2006.01).** Способ безотходной резки тонкостенных труб / В. И. Пинаков, А. А. Мещеряков, А. И. Макаров. № 2007123388/02; Заявл. 21.06.2007; Оpubл. 20.07.2009, Бюл. № 20.
4. **Аннин Б. Д.** Поведение материалов в условиях сложного нагружения / Б. Д. Аннин, В. М. Жигалкин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
5. **Коробейников С. Н.** Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
6. **Черняева Т. П., Стукалов А. И., Грицина В. М.** Поведение кислорода в цирконии // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 1999. Вып. 2. С. 71–85.

7. Полетика Т. М., Колосов С. В., Нариманова Г. Н., Пшеничников А. П. Неустойчивость пластического течения при формировании шейки в сплавах циркония // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 141–149.
8. Полетика Т. М., Пшеничников А. П., Гирсова С. Л. Неустойчивость пластического течения и формирование шейки в сплаве циркония // Физ. мезомеханика. 2006. Вып. 9. С. 99–102.
9. Полетика Т. М., Пшеничников А. П. Нелинейный характер формирования шейки в сплавах циркония // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 3. С. 197–204.
10. Полетика Т. М., Нариманова Г. Н., Колосов С. В., Зуев Л. Б. Локализация пластического течения в технических сплавах циркония // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 2. С. 132–142.
11. Панин В. Е., Елсукова Т. Ф., Попкова Ю. Ф. Роль кривизны кристаллической структуры в образовании микропор и развитии трещин при усталостном разрушении технического титана // Докл. АН. 2013. Т. 453, № 2. С. 155–158.

*Поступила в редакцию 27/VI 2016 г.,
в окончательном варианте — 4/X 2016 г.*
