

## МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 669.296

### ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТРУБОК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Zr-1%Nb В УСЛОВИЯХ ИМИТАЦИИ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ

*О.М. Ивасишин<sup>1</sup>, В.Н. Воеводин<sup>2,3</sup>, А.И. Дехтяр<sup>1</sup>, П.Е. Марковский<sup>1</sup>,  
Н.Н. Пилипенко<sup>2</sup>, С.Д. Лавриненко<sup>2</sup>, Р.Г. Гонтарева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина  
E-mail: pmark@imr.kiev.ua;*

<sup>2</sup>*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;*

<sup>3</sup>*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

Методом шеститочечного внутреннего приложения нагрузки при быстром нагреве до температур 800...1200 °С и кратковременных выдержках экспериментально смоделированы условия аварийного отключения в реакторе охлаждения и исследовано механическое поведение трубок твэлов из сплава Zr-1%Nb. Установлено, что при переходе через температуру завершения полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения ( $T_{\text{III}}$ ) и даже кратковременном (порядка нескольких минут) пребывании при температурах однофазной  $\beta$ -области имеет место интенсивная пластическая деформация при наложении незначительных по величине нагрузок. При этом в радиальном направлении обнаружена неравномерная пластическая деформация изделия, которая объясняется формированием одного единственного  $\beta$ -зерна в сечении стенки трубки, что вызывает пластическое течение материала с разной скоростью в различных зернах, в зависимости от соотношения между кристаллографической ориентацией каждого зерна и вектором направления приложенной нагрузки.

#### ВВЕДЕНИЕ

Многие детали конструкций и приборов в энергетике и атомной технике (в частности, оболочки твэлов в ядерных реакторах атомных электростанций) имеют цилиндрическую форму и подвергаются одновременному воздействию высокой температуры и внутреннего давления. Как показал анализ аварии на АЭС Фукусима, при работе атомных станций вполне возможно возникновение критической ситуации, когда исчезает подача охлаждающей воды и оболочки твэлов подвергаются стремительному нарастанию температуры за очень короткое время. При этом оболочки, изготовленные из материала Zr-1%Nb и, как правило, работающие при 300...360 °С, под действием возрастания температуры будут испытывать большую пластическую деформацию, которая приведет к аварии. Исследованию изменений механического и структурного поведения оболочек твэлов при возникновении аварийной ситуации, слабо изученных до настоящего времени, посвящена данная работа.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была взята твэльная трубка из сплава Zr-1%Nb, изготовленная в ННЦ ХФТИ НАН Украины [1]. На рис. 1 показан фрагмент исследуемой в настоящей работе трубки и вырезанные из нее кольца.

Для исследования механических и структурных характеристик оболочек в условиях, близких к натурным, необходимо иметь способ испытаний, позволяющий имитировать подобные условия. Такой способ и устройство для испытаний были разработаны и описаны в [2–4] (рис. 2). Основные моменты методики состоят в следующем. Под действием внутреннего давления в материале стенок труб возникают нормальные и касательные напряжения. Касательные напряжения, которые параллельны оси трубы (при длине труб, значительно превышающей их диаметр), практически отсутствуют [5]. В этом случае длинную трубу можно заменить ее кольцевым элементом.



Рис. 1. Фрагмент твэльной трубки из сплава Zr-1%Nb и вырезанные из нее кольца

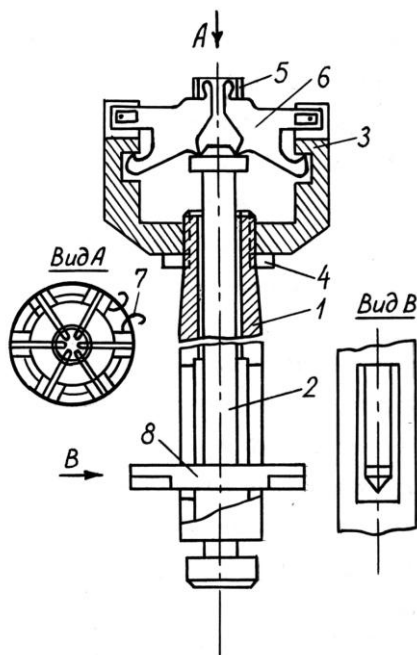


Рис. 2. Устройство для испытаний кольцевых образцов на ползучесть, имитирующее действие внутреннего давления газа или жидкости в тонкостенных трубах:

- 1 – подвижная часть тяги, передающая нагрузку;  
 2 – неподвижная часть тяги, соединенная с корпусом печи; 3 – обойма, передающая нагрузку на пластины-рычаги; 4 – шайба, фиксирующая обойму; 5 – испытуемый образец-кольцо;  
 6 – пластины-рычаги; 7 – технологические вставки; 8 – опорная шайба

В работах [2, 3] было предложено прикладывать нагрузку к внутренней поверхности кольца жесткими рычагами, преобразующими осевую нагрузку стандартных испытательных машин в радиальную, распирающую кольцо изнутри, а в работе [5] рассмотрена краевая задача для анизотропного кольца, нагружаемого изнутри произвольным числом жестких секторов. Напряженно-деформированное состояние кольца весьма близко к осесимметричному. Окружные тангенциальные (растягивающие) напряжения практически постоянны по толщине кольца, исключая области прикосновения секторов к внутренней поверхности кольца. Увеличивая число точек приложения нагрузки, можно добиться равномерного распределения растягивающего напряжения по окружности кольца. Расчет деформирующих напряжений производился с учетом того, что кольца тонкостенные, поэтому нормальные напряжения существенно меньше тангенциальных окружных и ими можно пренебречь [5]. Тангенциальные напряжения  $\sigma_r$  можно считать постоянными по толщине кольца. С учетом изменения размеров образца при деформации и числа рычагов-секторов  $N$  эти напряжения таковы:

$$\sigma_r = \frac{(1-A)P}{2\pi S} \left( 1 + \frac{h}{d_i} \right), \quad (1)$$

где  $A = \pi/N^2 + \pi^3/45N^3 + \dots$ ;  $P$  – приложенная к тягам нагрузка;  $S$  – поперечное сечение стенки кольца;  $h$  – толщина стенки кольца;  $d_i$  – внутренний диаметр кольца.

В настоящей работе в качестве материала рычагов использовали монокристаллический сплав W-1%Re. Специально проведенные исследования по активной деформации поликристаллического свинца показали, что погрешность в передаче усилия подобным рычажным механизмом не превышает 1...4% от приложенной нагрузки, при этом каждый рычаг-сектор передает усилие  $P/N$ . Деформацию кольца, измеряемую в процессе испытаний с помощью индикаторов часового типа, контролировали измерением усредненного диаметра на измерительном приборе ИЗА-2 при прерывании и в конце испытаний.

Применение данной методики испытаний на ползучесть образцов кольцевой формы дает возможность наиболее достоверно имитировать поведение материала труб, работающих под воздействием внутреннего давления и высокой температуры.

При моделировании поведения трубчатых оболочек твэлов из Zr-1%Nb в реальных условиях ядерных реакторов было предположено, что эти оболочки испытывают действие небольшого внутреннего давления, вызванного накоплением продуктов деления. Было выбрано значение 2,8 МПа. Рабочая температура твэла была выбрана максимально возможной – 360 °С. Давление на внутреннюю поверхность твэла имитировали приложением нагрузки с помощью шести жестких секторов-рычагов к внутренней поверхности кольца высотой 2 мм.

Испытания проводили в высоковакуумной печи ПВ-1853, предназначенной для исследований высокотемпературной ползучести металлов и сплавов. Режим имитации аварийной ситуации состоял в следующем. Сначала кольцо испытывали на стойкость к деформации при температуре 360 °С в течение 3 ч под нагрузкой. В результате многочисленных экспериментов было установлено, что во всех исследованных случаях за это время кольцо с точностью до 0,05% не деформировалось. После этого резко (со скоростью 150...170 °С/мин) кольцо нагревали до высоких температур. Было проведено четыре серии испытаний при разных значениях аварийной температуры, а именно: 800, 1000, 1100 и 1200 °С. При этих температурах кольца выдерживали под нагрузкой в течение 5 мин. Общая схема нагрева кольцевых образцов Zr-1%Nb под нагрузкой приведена на рис. 3.

Выбор указанных температур преследовал двоякую цель. Во-первых, это определение предельной температуры, при которой не наблюдалось бы значительной деформации при аварийной ситуации. Во-вторых, сравнить деформационные и структурные изменения в зависимости от того, превышает или нет температура перегрева температуру  $\alpha$ - $\beta$ -перехода для этого сплава ([6], рис. 4). Из рисунка следует, что температура  $\alpha$ - $\beta$ -фазового перехода равна 850 °С.

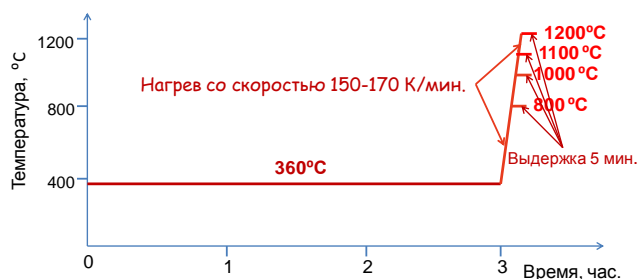


Рис. 3. Схема нагрева кольцевых образцов Zr-1%Nb под нагрузкой

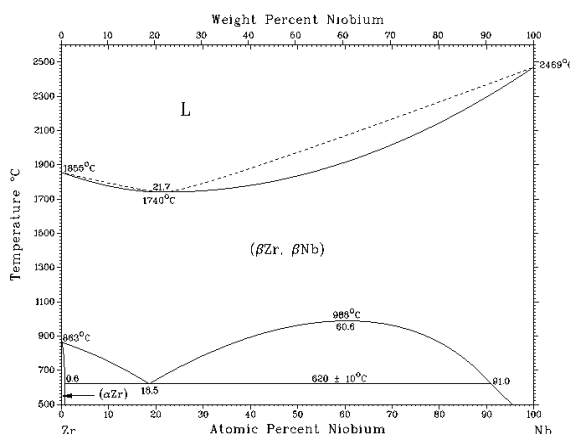


Рис. 4. Диаграмма состояний Zr-Nb [6]

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение формы колец в макроскопическом масштабе в зависимости от температуры нагрева показано на рис. 5. Обращает на себя внимание, что кольца деформировались неравномерно, а именно – несмотря на то, что точек приложения нагрузки было шесть, при температуре 1000 °С четко видно только четыре выраженных места из шести. При 1100 °С слабо проявляется пятая точка, а при 1200 °С уже четко видны пять сильнодеформированных участков приложения нагрузки. Однако, несмотря на то, что приложенная ко всем шести точкам нагрузка была одинаковой, величина пластической деформации в различных участках отличалась в разы (см. рис. 5). Вероятнее всего, наблюдаемое несоответствие количества точек прикладываемой нагрузки количеству деформированных участков кольца и неоднородность деформации в разных точках вызваны кристаллографической текстурой трубки, возникающей либо в результате особенностей ее производства, либо формирующейся в процессе нагрева и изотермической выдержки.

На рис. 6 показаны количественные результаты испытаний, моделирующие аварийное повышение температуры при постоянном приложенном напряжении. Видно, что при 800 °С суммарная усредненная деформация кольца не превышает 1%, тогда как при более высоких температурах прирост деформации стремительно нарастает пропорционально температуре. Это можно объяснить тем, что температура 800 °С ниже температуры  $\alpha \rightarrow \beta$ -полиморфного превращения ( $T_{III}$ ), а нагрев выше  $T_{III}$  за счет протекания фазового превращения приводит к смене ГПУ-решетки на ОЦК, а также интенсивному росту

$\beta$ -зеренной структуры, и при возникновении аварийной ситуации способствует более стремительной деформации и последующему разрушению оболочек твэлов.



Рис. 5. Общий вид кольцевых образцов Zr-1%Nb после деформации при разных температурах перегрева

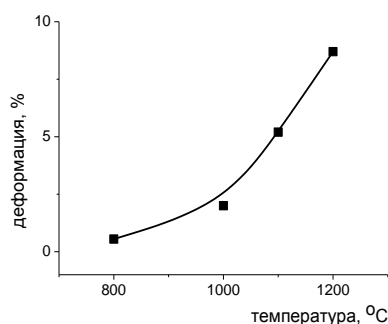


Рис. 6. Зависимость суммарной усредненной деформации колец от температуры нагрева и 5-минутной выдержки

Описанное деформационное поведение кольцевых образцов при перегреве сопровождается структурными изменениями с характерными отличиями в зависимости от достигнутых температур нагрева, краткосрочной изотермической выдержки и последующего охлаждения. На рис. 7 приведена эволюция микроструктуры торцевой поверхности колец из сплава Zr-1%Nb после нагрева и 5-минутной выдержки под нагрузкой при разных температурах. Как и следовало ожидать, после обработки при температуре ниже температуры полиморфного  $\alpha/\beta$ -перехода ( $T_{III} \sim 850$  °С) наблюдается аналогичная исходной высокодисперсная микроструктура глобулярного типа (см. рис. 7,а). Иной характер микроструктуры колец формируется после нагрева сплава Zr-1%Nb выше температуры фазового перехода. Размер зерен по мере роста температуры нагрева и деформации в результате динамической рекристаллизации растёт и достигает размера 50...100 мкм при 1000 °С, 200...400 мкм при 1100 °С и 0,6...3 мм при 1200 °С. Однако наиболее заметные изменения структуры наблюдаются во внутризеренном строении сплава – формируется колониальная структура пластинчатого типа, причем толщина пластин возрастает по мере роста температуры перегрева (см. рис. 7,б,г). Формирование колоний пластин следует связать с процессами охлаждения от температур нагрева. Средняя скорость охлаждения образцов в температурном интервале 1200...600 °С была нами

экспериментально оценена в пределах 120...80 °C/мин. Вследствие охлаждения с такой скоростью при переходе через температуру полиморфного превращения реализовалось обратное полиморфное  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение по диффузионному механизму, в результате чего и формировались пакеты пластин  $\alpha$ -фазы. Увеличение же с ростом тем-

пературы нагрева толщины отдельных пластин можно предположительно объяснить более глубоким протеканием процессов отжига дефектов внутри высокотемпературной  $\beta$ -фазы, что приводит к уменьшению количества зародышей  $\alpha$ -фазы при переходе через  $T_{III}$  при охлаждении.

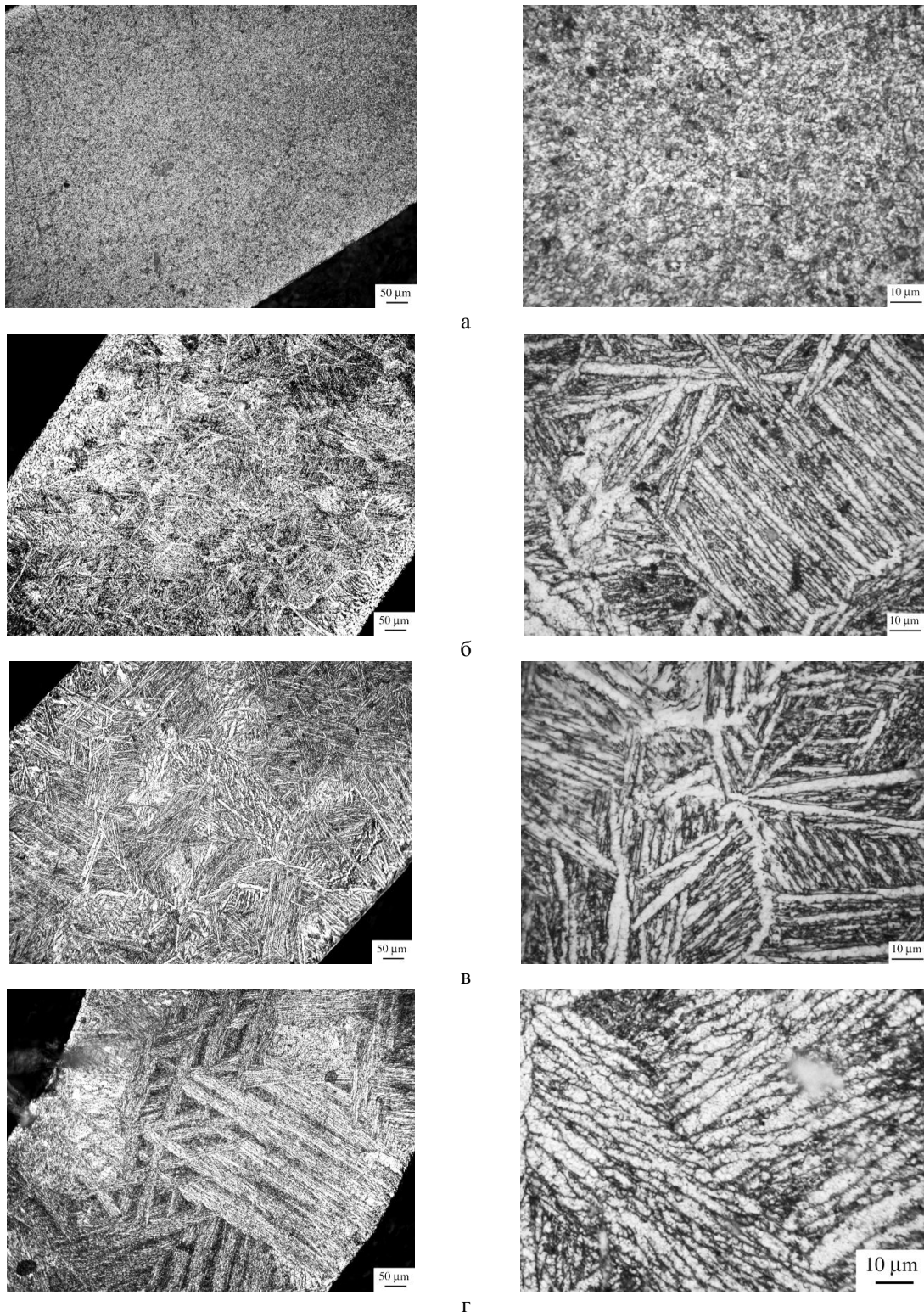


Рис. 7. Изменение микроструктуры колец Zr-1%Nb после нагрева и выдержки при температурах: а – 800; б – 1000; в – 1100; г – 1200 °C и последующего охлаждения с печью

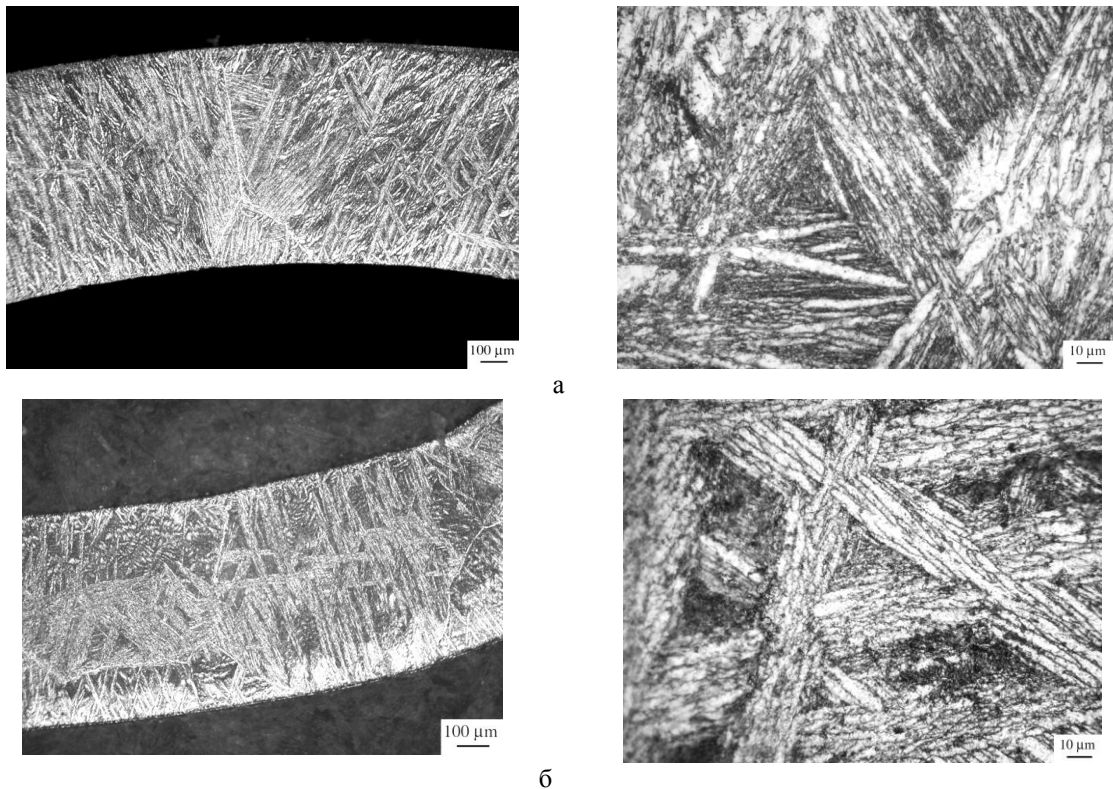


Рис. 8. Влияние деформации на микроструктуру кольца после нагрева до 1200 °С:  
 а – нагрев без приложения нагрузки (деформация 0%); б – нагрев с нагрузкой (деформация 8,7%)

Для определения вкладов в структурные изменения отдельно температуры нагрева и приложенной деформации выполнили эксперимент по нагреву колец из Zr-1%Nb до 1200 °С без приложения нагрузки. Сравнивая микроструктуры на рис. 8,а,б можно заключить, что зеренная структура образцов, перегретых с приложением внутреннего давления (деформация до 8,7%) и без давления (недеформированных), примерно одинакова с почти равным размером зерен. Даже внутри зерен структура также практически одинакова, разве что средняя толщина пластин несколько больше в случае кольца, деформированного в процессе перегрева, что может быть результатом некоторой активации процессов динамического отжига дефектов вследствие приложенной внешней нагрузки. Данный результат свидетельствует о том, что в отличие от изменения геометрических размеров главную роль в формировании микроструктуры играет температура нагрева, а не приложенная внешняя нагрузка и вызванная ею деформация. Как известно из общего технологического подхода к изготовлению таких трубок из сплавов Zr-1%Nb [1], в процессе их изготовления исходный сплав подвергается закалке, двукратной горячей экструзии, двукратной холодной прокатке (pilgering) и старению. В результате получают мелкое зерно, довольно острую кристаллографическую текстуру базисно-призматического типа [7], высокую плотность дислокаций и в некоторых случаях выделения фазы  $\beta$ -Nb. Влияние сформированной в процессе изготовления трубки микроструктуры и кристаллографической текстуры на эволюцию структурно-фазового состояния материала при перегреве выше температуры фазового перехода  $T_{\text{П}}$

можно связать, прежде всего, с интенсивным ростом зерен при переходе в однофазное  $\beta$ -состояние. Причем, как это ранее было показано на аналоге циркониевых сплавов (сплавах на основе титана), скорость такого роста не является монотонной и зависит от пространственной ориентации кристаллографической решетки высокотемпературной ОЦК-фазы [8]. Другими словами, в зависимости от исходной кристаллографической текстуры при перегреве выше температуры  $T_{\text{П}}$  наблюдается интенсивный рост  $\beta$ -зерен определенной кристаллографической ориентации, превалирующий над ростом всех прочих зерен, которых они поглощают в процессе своего роста. При достижении определенного размера рост  $\beta$ -зерен замедляется [8], но в то время, когда в сечении стенки трубки сформировано всего одно зерно, интенсивность пластического течения в нем будет определяться соотношением между направлениями приложения внешней нагрузки и плоскостями легкого скольжения.

Несомненно, что наблюдаемые пластины на микрофотографиях и есть  $\alpha$ -фаза. Для выяснения, что собой представляют прослойки между этими пластинами, были выполнены исследования рентгеновской дифракции (обратная дебаевская съемка) с боковой поверхности колец в исходном состоянии и после нагрева (рис. 9). Хотя съемку проводили без качания и вращения образцов, на рентгенограмме исходного состояния отчетливо видны сплошные кольцевые характеристические линии (см. рис. 9,а), указывающие на то, что в исходном состоянии трубка имеет мелкозернистую микроструктуру. Однако более интересным является то, что расшифровка этих линий показывает: это состояние являет-

ся уже двухфазным. После перегрева при различных температурах наличие второй фазы сохраняется, но сплошные линии разбиваются на отдельные рефлексы, распределенные вдоль кольцевых линий (см. рис. 9,б–г). Количество этих рефлексов уменьшается по мере повышения температуры перегрева, что свидетельствует о прохождении в процессе нагрева собирательной рекристаллизации и формировании меньшего количества более крупных зерен. Отметим, что рефлексы несколько размыты в азимуталь-

ном направлении (вдоль направления кольцевых линий), что является свидетельством накопления избыточных дислокаций одного знака в процессе деформации, происходящей при нагреве и последующем охлаждении. Следовательно, деформация, хотя и оказывает слабое влияние на рекристаллизацию и распределение фаз, но способствует некоторому упрочнению кольцевых образцов за счет образования достаточно высокой плотности избыточных дислокаций одного знака.

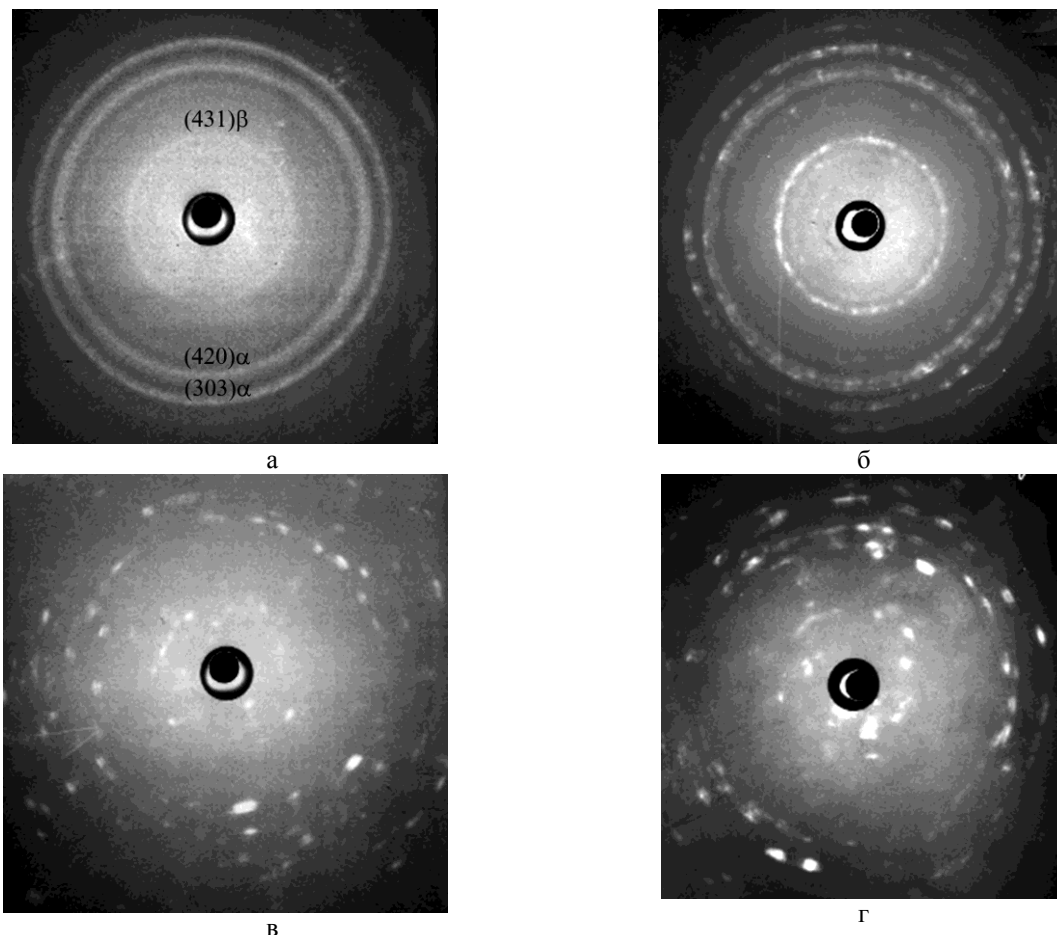
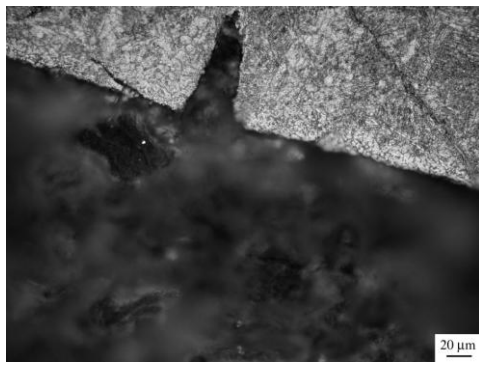


Рис. 9. Рентгенограммы с боковой (цилиндрической) поверхности колец Zr-1%Nb, снятые без кручения и качания: а – исходное состояние; б – перегрев до 1000; в – перегрев до 1100; г – перегрев до 1200 °С и последующее охлаждение с печью

Кроме того, при нагреве до 1200 °С на рентгенограмме отчетливо видны отдельные Лауэ-рефлексы от крупных зерен (см. рис. 9,г), которые не совпадают с характеристическими линиями. Это значит, что величина зерна сопоставима с размером рентгеновского пучка на образце (1,8 мм).

Отдельно следует отметить тот факт, что в процессе нагрева (выше  $T_{III}$ ) и деформации происходит образование трещин с внутренней поверхности колец в глубь материала, причем зарождаются они по границам зерен и/или пакетов  $\alpha$ -пластин (рис. 10). Подобное явление можно объяснить тем, что основные тангенциальные напряжения, действующие по касательной вдоль окружности в используемой схеме приложения нагрузки к внутренней поверхности

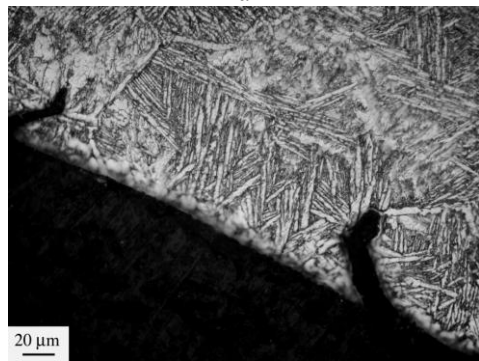
колец, по крайней мере, вдвое превышают нормальные и тангенциальные напряжения, направленные вдоль образующей цилиндра. Учитывая тот факт, что соседние зерна имеют определенную разориентацию кристаллографических решеток и, следовательно, в них деформация протекает по разным плоскостям и с разной скоростью, естественным является появление некоторых «ступенек» на поверхности границы между ними, которая и приводит к зарождению трещины. Также следует отметить, что характер распространения трещин изменяется по мере повышения температуры нагрева, а именно: чем выше температура, тем извилистее они становятся (ср. рис. 10,а–в).



а



б



в

Рис. 10. Трещины, распространяющиеся с внутренней поверхности колец после деформации при нагреве до:  
а – 1000; б – 1100; в – 1200 °С

Вполне возможно наблюдаемое объясняется тем, что с ростом температуры перегрева толщина  $\alpha$ -пластин растет, и трещинам энергетически выгодно распространяться по  $\alpha/\beta$ -межфазным границам. Это предположение подтверждается рис. 10,в.

С достаточной степенью вероятности можно предположить, что в условиях реальной аварии приложенная к трубкам нагрузка может значительно превысить применявшуюся в настоящей работе (2,8 МПа), в результате чего образовавшиеся трещины в совокупности с более интенсивной и неоднородной пластической деформацией приведут к разрушению твэлов.

## ВЫВОДЫ

Показано, что процессы, происходящие в условиях аварийной ситуации с трубками твэлов из сплава Zr-1%Nb при внезапном отключении охлаждающей среды, можно экспериментально моделировать.

Установлено, что критичность ситуации зависит от того, насколько температура нагрева превышает температуру полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения  $T_{\text{пп}}$ . В процессе кратковременного перегрева до температур, не превышающих температуру завершения полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, мелкозернистая структура, характерная для состояния труб Zr-1%Nb после изготовления, не испытывает существенных изменений при небольшой пластической деформации. Даже кратковременные перегревы оболочек твэлов из Zr-1%Nb выше температуры полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения при минимальных внутренних механических напряжениях приводят к их существенной пластической деформации с последующим вероятным разрушением.

В процессе кратковременного нагрева свыше температуры  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения происходит собира-

тельная рекристаллизация и стремительный рост  $\beta$ -зерен пропорционально росту температуры перегрева выше температуры  $T_{\text{пп}}$ , а исходная глобулярная внутризеренная микроструктура при последующем охлаждении превращается в структуру пластинчатого типа. Толщина  $\alpha$ -пластин с ростом температуры перегрева также растет.

Приложение даже минимальной внешней нагрузки в процессе нагрева выше температуры  $T_{\text{пп}}$  сопровождается интенсивной пластической деформацией, которая практически не влияет на процессы рекристаллизации и формирования микроструктуры, однако происходит неоднородно. При формировании в сечении стенки трубки всего одного зерна интенсивность пластического течения определяется соотношением между кристаллографической ориентацией каждого зерна и вектором направления приложенной нагрузки.

В процессе деформации при перегреве выше температуры  $T_{\text{пп}}$  происходит образование трещин, которые распространяются с внутренней поверхности колец в глубь материала, причем, чем выше температура, тем трещины становятся извилистее.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.М. Ажажа, Б.В. Борц, І.М. Бутенко та ін. Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твельних труб зі сплавом Zr-1Nb із вітчизняної сировини // *Наука та інновації*. 2006, т. 2, №4, с. 64-76.
2. В.А. Кононенко. *Разработка физических основ прогнозирования эффективности субструктурного упрочнения металлов в высокотемпературной области*: Дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1978, 432 с.
3. Л.В. Демченко. *Исследование субструктурного упрочнения монокристаллов молибдена и воль-*

фрама в условиях высокотемпературной ползучести: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев, 1987, 225 с.

4. А. с. №460470 СССР. Устройство для механических испытаний кольцевых образцов / Г.Я. Козырский, В.А. Кононенко // Бюл. №6, 1975.

5. В.В. Парцевский. Напряжение в анизотропном кольце при растяжении его жесткими секторами // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1971, №1, с. 90-92.

6. A.F. Guillermet. Thermodynamic Analysis of the Stable Phases in the Zr-Nb System and Calculation of the Phase Diagram // Z. Metallkde. 1991, №82, p. 478-487.

7. О.М. Ивасишин, П.Е. Марковский, С.Д. Лавриненко и др. Влияние режимов термомеханической обработки на формирование микроструктуры, кристаллографической текстуры и механических свойств сплава Zr-1%Nb // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники». 2011, №6, с. 53-62.

8. O.M. Ivasishin, P.E. Markovsky, S.L. Semiatin, S.V. Shevchenko, S.V. Ul'shin. Grain growth and texture evolution in Ti-6Al-4V during beta annealing under continuous heating conditions // Mat. Sci. & Eng. A. 2002, N 337/1-2, p. 88-96.

*Статья поступила в редакцию 21.05.2015 г.*

## **ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ТРУБОК ТВЭЛІВ ЗІ СПЛАВУ Zr-1%Nb В УМОВАХ ІМІТАЦІЇ АВАРІЙНОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ**

*О.М. Івасишин, В.М. Восводін, А.І. Дехтяр, П.Є. Марковський, М.М. Пилипенко, С.Д. Лавриненко, Р.Г. Гонtareва*

Методом шеститочкового внутрішнього прикладення навантаження при швидкому нагріванні до температур 800...1200 °С і короткотривалих витримках експериментально змодельовано умови аварійного відключення в реакторі охолодження та досліджено механічну поведінку трубок твелів зі сплаву Zr-1%Nb. Встановлено, що при переході через температуру завершення поліморфного  $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення ( $T_{\text{III}}$ ) і навіть короткотривалого (протягом декількох хвилин) перебування при температурах однофазної  $\beta$ -області має місце інтенсивна пластична деформація навіть при накладанні незначних за величиною навантажень. При цьому в радіальному напрямку встановлена нерівномірна пластична деформація виробу, яка пояснена формуванням одного єдиного  $\beta$ -зерна в перерізі стінки трубки, наслідком чого є пластична течія матеріалу з різною швидкістю у різних зернах, у залежності від співвідношення між кристаллографічною орієнтацією кожного зерна і вектором дії прикладеного навантаження.

## **FEATURES OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF FUEL ELEMENTS TUBES OF Zr-1% Nb UNDER CONDITIONS SIMULATING BREAKDOWN OF COOLING**

*O.M. Ivasishin, V.N. Voyevodin, A.I. Dekhtyar, P.E. Markovsky, M.M. Pylypenko, S.D. Lavrinenko, R.G. Gontareva*

Employing 6-points internal application of stress loading during rapid continuous heating up to temperatures within the range 800...1200 °C and short-time isothermal exposures conditions of accidental breakdown of cooling in nuclear reactor were simulated and features of the mechanical behavior of fuel elements tubes of Zr-1%Nb were studied. It is established that transition above the beta-transus temperature and even short-time (a few minutes) exposures at temperatures of single-phase  $\beta$ -field intensive plastic deformation took place even when applying minor loads. In the radial direction nonuniform plastic deformation was observed. This was explained as a result of a single  $\beta$  grains' formation in the cross section of the tube wall, what causes plastic flow of the material with different rates in different grains according to the relationship between the crystallographic orientation of each grain and the vector of the applied load.