

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ НА ТОЛЩИНУ ОКСИДНОГО СЛОЯ И ОРИЕНТАЦИЮ ГИДРИДОВ В ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБАХ ИЗ СПЛАВА Zr-1 % Nb, ПОДВЕРГНУТЫХ КОРРОЗИОННЫМ ИСПЫТАНИЯМ

П. Н. Медведев, М. Г. Исаенкова, Ю. А. Перлович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
pmedvedev@hotmail.com

При использовании рентгеновского и металлографического анализа исследовано изменение структурного состояния оболочечных труб из сплавов Zr + 1 % Nb с разным содержанием примесей в результате коррозионных испытаний в паре и пароводяной среде при температуре 350 °С. Кристаллографическая текстура исследованных труб варьировалась в широких пределах, так что соотношение интегральных параметров Кернса f_R/f_T изменялось от 0,8 до 1,6. На базе разработанных количественных методов определения толщины оксидного слоя и ориентации гидридов в поперечном сечении стенки труб выявлены зависимости толщины оксидного слоя и ориентации гидридов от кристаллографической текстуры труб.

Введение

Коррозионное поведение изделий из циркониевых сплавов определяется не только режимами окисления, но и всей совокупностью их структурных характеристик, включая химический и фазовый состав, текстуру, субструктурные особенности, остаточные напряжения [1–3]. Работа [4] посвящена анализу влияния химического состава подложки на интенсивность протекания коррозии и рассмотрению механизма роста оксидных слоев. В рамках данной работы рассматривается влияние кристаллографической текстуры на особенности формирования оксидных слоев при коррозионных испытаниях. Поскольку преимущественная кристаллографическая ориентация зерен, обладающих анизотропной гексагональной кристаллической решеткой, обуславливает возникновение напряжений на границах взаимно разориентированных зерен при повышении температуры, постольку она должна сказываться на ускорении или замедлении процесса окисления. Цель данной работы состояла в выявлении закономерностей формирования структуры оксидного слоя на оболочечных трубах и ориентации гидридов по толщине стенки труб из циркониевых сплавов в зависимости от их структурного состояния и текстуры подложки в условиях низкотемпературного и высокотемпературного окисления.

Методы исследования

Рентгеновский анализ структуры и текстуры оболочечных труб, а также формирующихся на них оксидных слоев проводили на дифрактометрах ДРОН-3 и ДРОН-3М. При исследовании кристаллографической текстуры использовали фильтрованное рентгеновское излучение CrK_α хрома, а при анализе структуры – монохроматизированное излучение CuK_α . Металлографический анализ проводили с использованием микроскопа ЕС МЕТАМ ВР-22, оснащенного цифровой камерой DCM310.

Рентгеновский качественный фазовый анализ «ТС "2.1.1. Рентгеновский фазовый анализ" /f/ I3» заключался в записи дифракционного спектра с последующим сопоставлением полученного набора межплоскостных расстояний с табличными значениями для известных неорганических соединений, присутствие которых возможно в исследуемых образцах. Совпадение опытных и табличных значений межплоскостных расстояний позволяет однозначно идентифицировать присутствующую в образце фазу [5–8]. На рис. 1 показан характерный участок рентгеновского дифракционного спектра, по которому проводится идентификация присутствующих в образце оксидных фаз. Разными символами отмечены линии разных фаз.

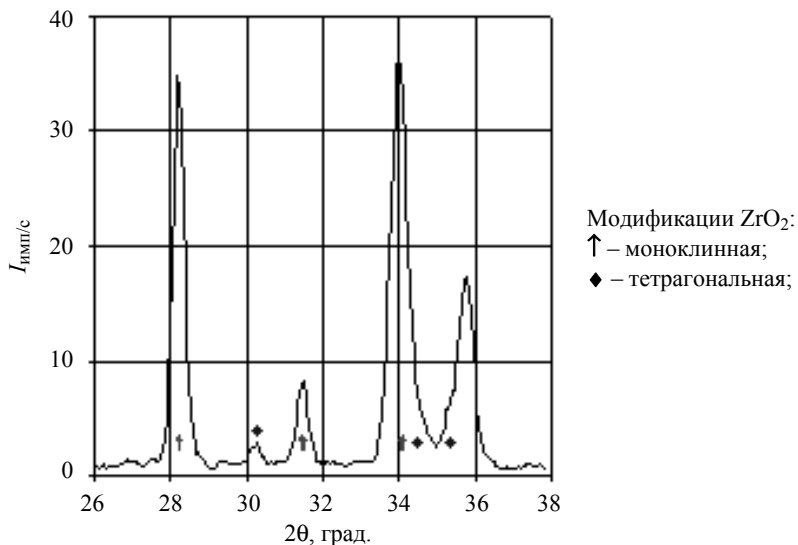


Рис. 1. Дифракционный спектр окисленной оболочечной трубы из сплава Э110. Температура окисления 1100 °С. Съемка с цилиндрической поверхности трубки

Изучение кристаллографической текстуры «ТС "2.1.4. Изучение кристаллографической текстуры поликристаллических образцов по полюсным фигурам" /f/ I3» проводили путем рентгеновской дифрактометрической съемки прямых полюсных фигур $\{hkl\}$ методом наклона образца для соответствующих отражений (hkl) [5–10]. Прямая полюсная фигура $\{hkl\}$ пред-

ставляет собой распределение полюсной плотности нормалей выбранного типа $\langle hkl \rangle$ на стереографической проекции образца с характерными для трубы внешними осями: радиальной R , тангенциальной T и осевой или продольной L . Полюсная плотность прямо пропорциональна интенсивности рентгеновского пучка, отраженного от соответствующих плоскостей $\{hkl\}$. Поэтому для измерения полюсной фигуры регистрируют интенсивность дифрагированного рентгеновского пучка от плоскостей $\{hkl\}$ для всех возможных ориентаций образца относительно направления первичного и отраженного пучков. При различных ориентациях образца отражают плоскости выбранного типа $\{hkl\}$, нормаль к которым находится в плоскости первичного и отраженного пучков и делит угол между ними пополам. Величина регистрируемой интенсивности пропорциональна объему зерен, участвующих в формировании дифрагированного пучка.

Измерения текстуры проводили на дифрактометре ДРОН-3, оснащенный автоматической текстурной приставкой, с накоплением информации на жестком диске персонального компьютера. Последующую обработку осуществляли по оригинальным программам. Полную ППФ (0001) для расчета интегральных параметров Кернса строили путем экстраполяции данных частичной ППФ (до 80°) на неисследованную область стереографической проекции. Текстура металлов с гексагональной кристаллической решеткой полностью описывается пространственным распределением базисных $\langle 0001 \rangle$ и призматических $\langle 11.0 \rangle$ нормалей.

Рентгеновскую съемку текстуры оболочечных труб проводили на образцах, набранных из сегментов, показанных на рис. 2, а, б. Прецизионную резку труб осуществляли на электроэрозионном станке с использованием специального гониометрического устройства. Наклеенные сегменты трубы шлифовали для получения плоского образца (рис. 2, в). Размер образца составлял $17 \cdot 17 \text{ мм}^2$. Строили неполные текстурные полюсные фигуры с угловыми радиусами 80° в случае ПФ (0001) и 70° в случае ПФ $\{11.0\}$. Информация о текстуре, получаемая для таких образцов, характеризует текстуру средних слоев оболочечных труб на глубине 160–250 мкм. Глубина, на которой проводится анализ текстуры, определяется шириной вырезаемого из трубки сегмента.

На рис. 3 приведены типичные ППФ (0001) и $\{11.0\}$ исследованного образца оболочечной трубы, а на рис. 4 – распределение базисных нормалей в R-T-сечении трубы, которое характеризует отклонение текстурного максимума от R-направления на ППФ (0001) (рис. 3).

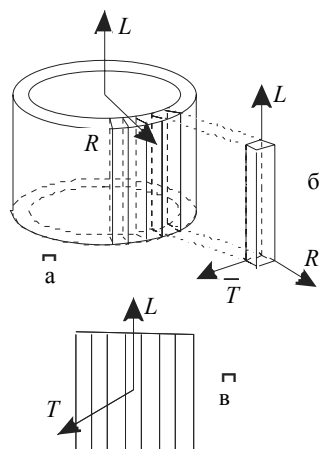


Рис. 2. Схема вырезки сегментов из трубы (а) и приготовления образца для рентгеновского анализа текстуры оболочечных труб

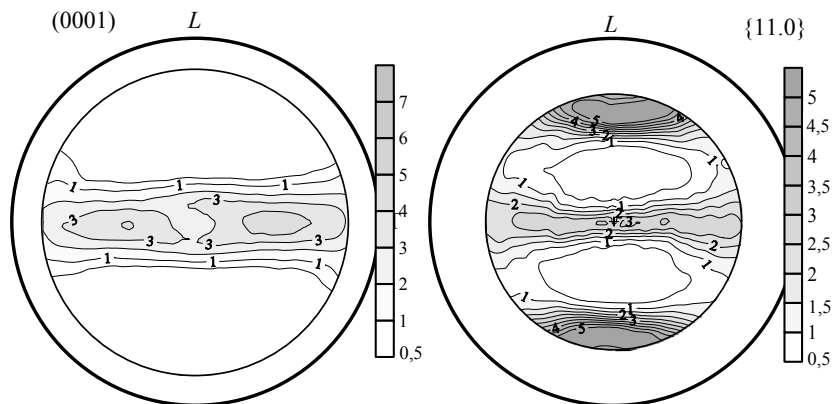


Рис. 3. Типичные неполные прямые полюсные фигуры (0001) (а) и $\{11.0\}$ (б) оболочечных труб

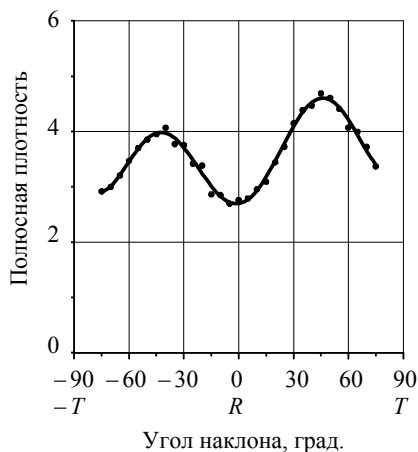


Рис. 4. Распределение базисных нормалей в R - T сечении оболочечной трубы

Для количественной характеристики текстуры материалов с гексагональной кристаллической решеткой по полным ПДФ (0001) проводится расчет интегральных текстурных параметров «ТС "2.1.6. Расчет интегральных текстурных параметров" /f/ 13» Кернса или f -параметров, представляющих собой проекции распределения базисных нормалей на три взаимно ортогональные оси. Эти параметры используются при расчете свойств материалов с гексагональной решеткой.

Определение толщины оксидного слоя проводилось по ослаблению рентгеновских отражений от материала подложки. Известно [7], что ослабление рентгеновских лучей при прохождении через вещество, характеризующееся линейным коэффициентом поглощения рентгеновских лучей μ , описывается законом:

$$I_t = I_0 \exp(-\mu t), \quad (1)$$

где I_t – интенсивность рентгеновских лучей, прошедших слой толщиной t ; I_0 – интенсивность падающего пучка рентгеновских лучей; t – толщина ослабляющего слоя. На этом соотношении основано определение толщины покрытия рентгеновским методом, который состоит в измерении интенсивности рентгеновских лучей, отраженных от материала образца-подложки с покрытием и такого же образца без покрытия (рис. 5, а и б).

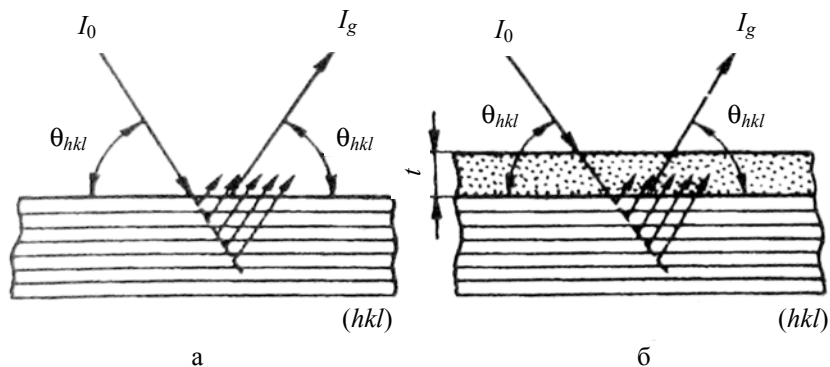


Рис. 5. Схема эксперимента для определения толщины покрытия t по ослаблению луча (I_0), отраженного от основного материала (или подложки); а – образец без покрытия; б – образец с покрытием [7]

При использовании фокусировки по Брэггу – Брентано отражающими плоскостями являются плоскости, параллельные поверхности образца. Из рис. 5 следует, что рентгеновские лучи, проходя через покрытие, ослабляются. Падающий луч в покрытии проходит путь

$$l = t / \sin \theta, \quad (2)$$

такой же путь проходят и отраженные лучи. Поэтому можно записать

$$I_{\text{покр}} = I_{\text{б/покр}} \exp(-2\mu t / \sin \theta). \quad (3)$$

Отсюда

$$t_{\text{покр}} = \frac{\sin \theta}{2\mu_{\text{покр}}} \ln \left(\frac{I_{\text{б/покр}}}{I_{\text{покр}}} \right). \quad (4)$$

При этом следует иметь в виду, что $\mu_{\text{покр}}$ зависит от химического состава покрытия, так как линейный коэффициент ослабления обладает аддитивными свойствами

$$\mu_{\text{покр}} = \rho_{\text{покр}} \sum_{i=1}^{i-k} \left(\frac{\rho}{\mu} \right)_i \alpha_i, \quad (5)$$

где α_i – весовая доля каждого элемента. Поэтому необходимо знать химический состав покрытия.

В предположении неизменности кристаллографической текстуры в процессе окисления оболочечных труб по изменению интенсивности рентгеновского отражения (10.1) оценивали толщину оксидных слоев, образующихся на оболочечных трубах после выдержки при температуре 350° в паре или воде в течение 1000, 2000 и 3000 ч.

Определение коэффициента ориентации гидридов с помощью компьютерной обработки металлографических цифровых изображений. Для количественной оценки преимущественной ориентации гидридов, образующихся в оболочечных трубах при автоклавных испытаниях, введен коэффициент ориентации гидридов F_n . Величина F_n определяется по металлографическим снимкам протравленных шлифов сечения исследованных труб, перпендикулярного направлению их оси. Численное значение F_n определяется как отношение общей длины радиальных выделений гидридов к общей длине гидридов, наблюдаемых в поперечном сечении трубы. К радиальным гидридам в поперечном сечении трубы относятся все выделения, отклоненные своей наиболее протяженной частью от радиального направления на угол не более 45° .

Для определения коэффициента ориентации гидридов использован метод компьютерного анализа цифрового изображения, подобный широко применяемому в различных областях науки и техники [11–15]. Решение поставленной задачи разбито на отдельные этапы, включающие (1) бинаризацию, (2) скелетизацию и (3) определение коэффициента F_n . При этом используется графический редактор Photoshop CS2. Алгоритм последовательных операций по обработке изображения, полученного в темном поле микроскопа, представлен на рис. 6. Бинаризацией называется операция порогового разделения, дающая в результате черно-белое изображение гидрида «ХЕ "бинаризация"». Скелетизацией называют последующую очистку бинарного изображения от шумов (рис. 7). По полученному скелету изображения после дополнительной его обработки в конечном итоге рассчитывается коэффициент ориентации гидридов F_n

$$F_n = \frac{\sum l_{\text{до } 45^\circ}}{\sum l}, \quad (6)$$

где $\sum l_{\text{до } 45^\circ}$ – сумма длин гидридов, отклоненных от радиального направления на угол менее 45° , при рассмотрении поперечного сечения трубы; $\sum l$ – сумма длин всех гидридов.



Рис. 6. Алгоритм обработки изображения при бинаризации

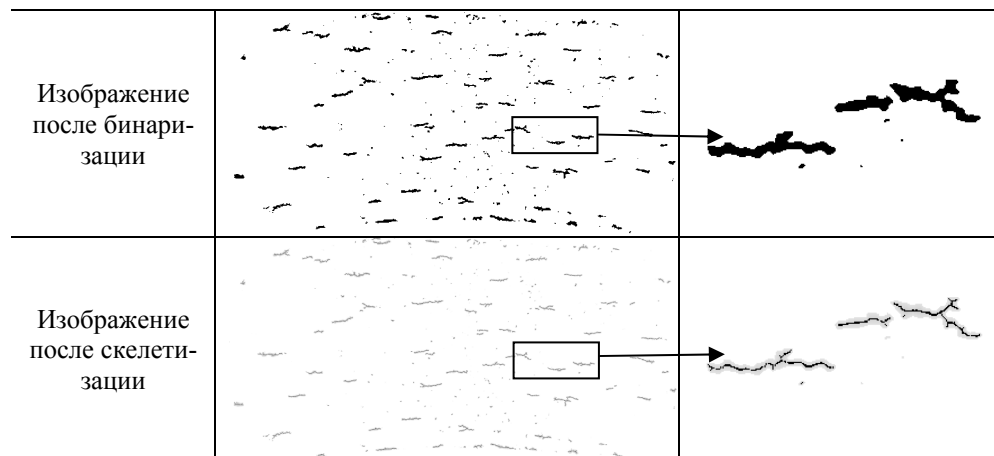


Рис. 7. Обработка бинарного изображения

Исследованные образцы «ТС "3.1. Исследованные образцы" /f/ 12»

Работа выполнялась на трех сериях образцов:

1) оболочечная труба, изготовленная по штатной технологии и окисленная при температуре 1100 °С при 10 % локальной глубины окисления (ЛГО) в течение 550 с;

2) образцы оболочечных труб из сплава Э110, с различными исходными текстурами, подвергнутые испытаниям в автоклаве при температуре 350 °С в воде и в паре в течение 3000 ч (табл. 1);

3) образцы оболочечных труб со шлифованной и травленной поверхностями в исходном состоянии и после окисления при температуре 400 °С в течение ~ 3000 ч при давлении пара 10,3 МПа (табл. 2).

Таблица 1

Исследованные трубы из сплава Э110, подвергнутые окислению при температуре 350 °С в различных средах (вода/пар) (серия № 2)

№№ п/п	Маркировка исх. труб	Внешний диаметр, мм	Исх. состояние	f – параметры		
				f_R	f_T	f_L
1	H01	13,58	Отожженное	0,58	0,37	0,05
2	H02	9,0	Нагартованное	0,49	0,47	0,04
3	H03	6,0	Нагартованное	0,43	0,50	0,07
4	H04	5,5	Нагартованное	0,42	0,52	0,06
5	H05	4,5	Нагартованное	0,52	0,42	0,06
6	H06	4,5	Нагартованное	0,65	0,30	0,05
7	H07	9,1	РКМ, отожженное	0,58	0,36	0,06

Окончание табл. 1

№№ п/п	Маркировка исх. труб	Внешний диаметр, мм	Исх. состояние	f - параметры		
				f_R	f_T	f_L
8	H08	9,1	РКМ, отожженное	0,56	0,35	0,09
9	H09	9,13	РКМ, отожженное	0,57	0,36	0,07
10	H10*	9,13	РКМ, отожженное	0,52	0,41	0,07
11	H11*	9,13	РКМ, отожженное	0,49	0,44	0,07
12	H12*	9,13	РКМ, нагартованное	0,46	0,45	0,09
13	H13*	9,13	РКМ, нагартованное	0,48	0,42	0,10
14	H14*	9,13	РКМ, отожженное	0,52	0,39	0,09

Примечание. * – образцы окислялись в течение 1000 ч; ** – РКМ – радиально-ковочная машина.

Таблица 2

Образцы оболочечных труб из сплавов на основе губчатого циркония, окисленных при температуре 400 °С и давлении пара 10,3 МПа в течение ~ 3000 ч (серия № 3)

Номер образца	Легирующие элементы			Толщина пленки, мкм	Примечания
	Fe, ppm	O, ppm	Nb, ppm		
15	240	30	10000	3,9	Окисление при 360 °С и давлении пара 18,6 МПа в течение ~ 3600 ч
16	100	400	10000	7,26	Шлифование + окисление
17	100	400	10000	7,10	Травление + окисление

Фазовый анализ исследованных образцов свидетельствует о преобладании моноклинной фазы диоксида циркония в поверхностных слоях всех исследованных образцов.

Текстурный анализ оболочечных труб и оксидных слоев

Текстуру оболочечных труб в первом приближении можно описать как аксиальную текстуру, у которой базисные нормали перпендикулярны осевому направлению (L) трубы. На фоне аксиальной составляющей выделяется текстурный максимум в R - T сечении ППФ (0001) (R – радиальное и T – тангенциальное направления в трубе), который у большинства исследованных труб отклонен от радиального направления на угол 40–60 ° в сторону тангенциального направления (рис. 8,а). Шлифование внешней поверхности оболочечных труб приводит к существенному изменению кристаллографической текстуры поверхностного слоя (рис. 8,б), состоящему в исчезновении одного из двух

взаимно симметричных текстурных максимумов, располагающихся на горизонтальном диаметре ПФ (0001). Такое изменение текстуры происходит в поверхностном слое толщиной менее 10 мкм; после удаления этого слоя оказывается, что текстура слоя, лежащего ниже, совпадает с первоначальной текстурой прокатки. То есть, в результате шлифования трубы в ее поверхностном слое исходная симметричная двухкомпонентная текстура трансформируется в асимметричную однокомпонентную.

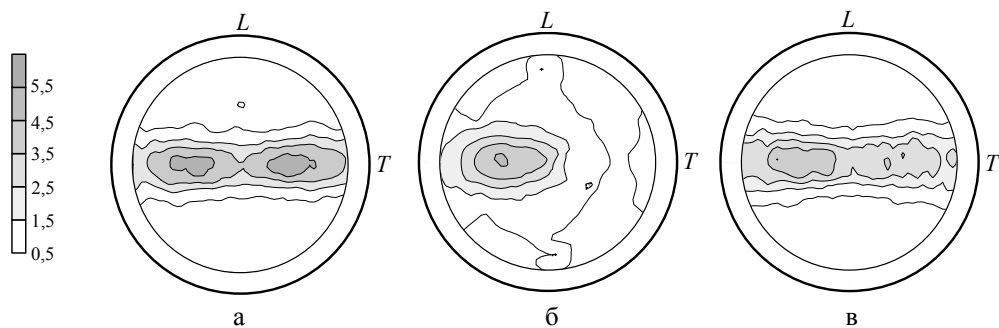


Рис. 8. ППФ (0001)_{α-Zr}: а – оболочечная труба серии 1; б – образец со шлифованной поверхностью (№ 16); в – образец с травленной поверхностью (№ 17)

Анализ кристаллографической текстуры моноклинной фазы оксидных слоев проводили по распределению нормалей $\langle 111 \rangle$. На рис. 9 представлены ППФ $\{111\}$ оксидных слоев оболочечных труб, окисленных при температурах 360, 400 и 1100 °С. Согласно приведенным на рис. 9, а, б данным, в оксидных пленках формируется кристаллографическая текстура, главные компоненты которой имеют индексы $\{001\} \langle 110 \rangle$.

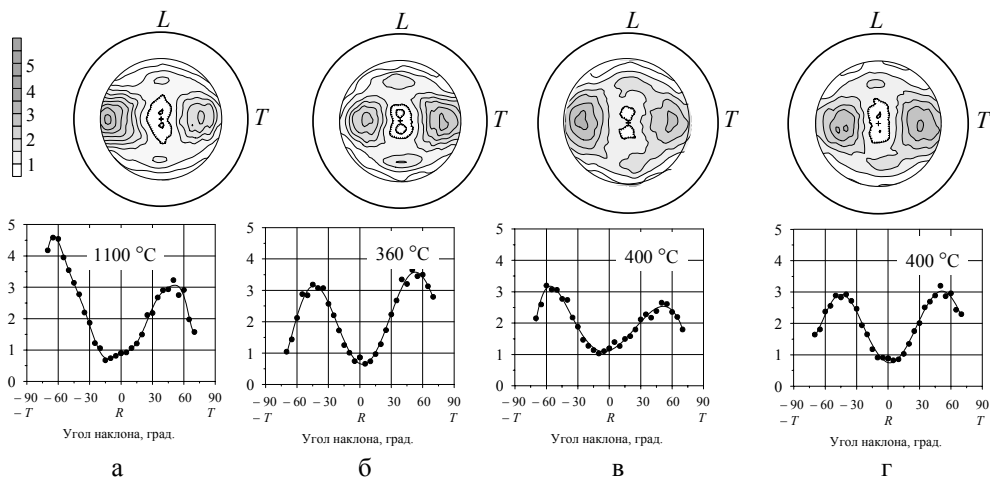


Рис. 9. ППФ (111) оксида циркония в моноклинной фазе: а – оболочечная труба серии 1, окисление при 1100 °С; б – оболочечная труба серии 2, окисление при 360 °С (№ 15); в – образец со шлифованной поверхностью (№ 17); г – образец с травленной поверхностью (№ 16)

Исследуемые оболочечные трубы серий 1 (температура окисления 1100 °С) и 3 (№ 15, $T_{\text{ок}} = 360$ °С), характеризуются типичной ППФ (0001) (на рис. 8,а). Текстурные максимумы слоя ZrO_2 , образовавшегося при различных температурах окисления оболочечных труб, располагаются одинаковым образом в сечении ПФ R - T (рис 9,а, б). Из этого можно сделать вывод, что кристаллографическая текстура оксидных слоев моноклинной модификации не зависит от температуры окисления в диапазоне 350–1100 °С.

Влияние кристаллографической текстуры подложки трубы на текстуру оксидного слоя исследовалось на образцах серии 3 (№№ 16 и 17, $T_{\text{ок}} = 400$ °С). Текстура оксидной пленки, образующейся на шлифованной поверхности оказывается образованной двумя взаимно симметричными максимумами (рис. 9,в) и аналогична текстуре оксидной пленки на травленной поверхности (рис. 9,г). Наиболее простое объяснение этого эффекта связано с тем, что оба основных текстурных максимума на ПФ $\{111\}_{\text{окс}}$ отвечают единственной текстурной компоненте, образующейся на шлифованной подложке в соответствии с ориентационным соотношением:

$$\{111\}_{\text{ZrO}_2} \parallel (0001)_{\alpha\text{-Zr}}; \langle 110 \rangle_{\text{ZrO}_2} \parallel \langle 10.0 \rangle_{\alpha\text{-Zr}}.$$

Угловое расстояние между нормальными $\langle 111 \rangle$ в моноклинной решетке ZrO_2 близко к 110°, то есть максимумы отстоят от центра ПФ на $\sim 55^\circ$, что и наблюдается на рис. 9.

Кинетика роста оксидных пленок

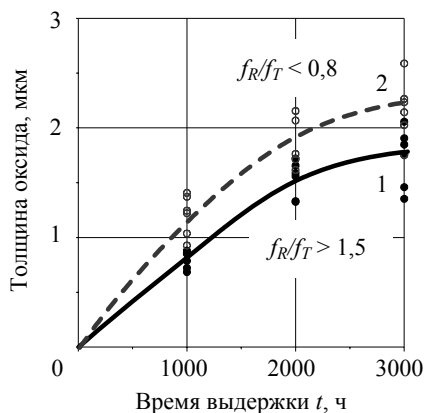


Рис. 10. Зависимость толщины оксидных слоев от времени выдержки: 1 – трубы со значением $f_R/f_T > 1,58$; 2 – трубы со значением $f_R/f_T < 0,82$

На образцах серии 2 измеряли толщину оксидных слоев, образовавшихся в воде или в паре в течение 3000 ч. На рис. 10 показано изменение толщины оксидных слоев на последовательных этапах коррозионных испытаний. С увеличением длительности испытаний толщина оксидных слоев растет, причем по мере увеличения времени выдержки образцов скорость роста оксидного слоя падает (рис. 10). Для труб, окисленных в течение 1000, 2000 и 3000 ч, сохраняется зависимость толщины оксидного слоя от кристаллографической текстуры, а именно, при повышении доли базисных нормалей вблизи радиального направления, по сравнению с тангенциальным, толщина оксидного слоя, становится меньше

(рис. 10). Таким образом, увеличение угла взаимной разориентации базисных нормалей зерен, относящихся к эквивалентным текстурным компонен-

там $(0001) \pm \gamma$, приводит к ускорению диффузии кислорода в стенку трубы, а уменьшение угла разориентации зерен по базисным нормальям способствует замедлению роста оксидного слоя.

Металлографическое исследование труб с разной текстурой

На всех трубах серии 2 проводились металлографические исследования. Для этого подготавливалось сечение труб, перпендикулярное осевому направлению L . Резка труб производилась на электроэрозионном станке. Далее плоскость сечения трубы шлифовали и травили раствором 47 мл HNO_3 , 2 мл HF и 1,5 мл AgNO_3 с целью выявления гидридов. Примеры металлографических изображений труб с различной ориентацией гидридов представлены на рис. 11. Размеры гидридов, образовавшихся при окислении в паре (рис. 11,б), существенно больше, чем при окислении в воде (рис. 11,а), что характерно для всех исследованных образцов. Таким образом, окисление труб в течение 1000 ч при температуре 350°C приводит к образованию гидридов циркония, причем их размеры в исследуемых образцах больше в случае окисления в паре при давлении 16,5 МПа, нежели в воде, находящейся под давлением 12,5 МПа.

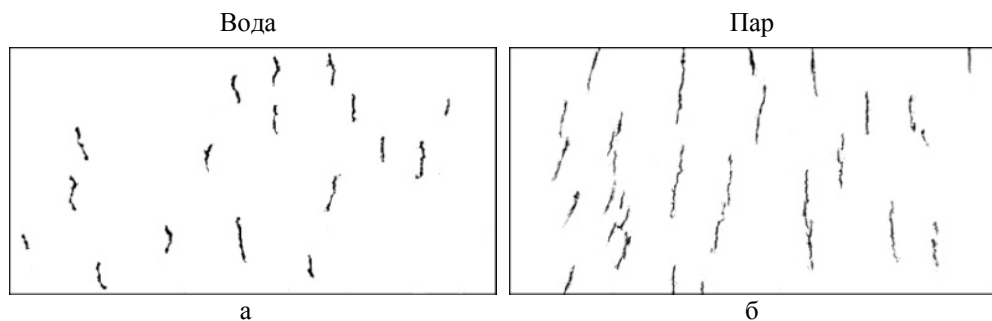


Рис. 11. Распределение гидридов по стенке трубы с текстурным параметром $f_R/f_T = 0,81$, окисленных в воде (а) и в паре (б)

Оценку ориентации гидридов с расчетом коэффициента F_n выполняли путем компьютерной обработки металлографических цифровых изображений. На рис. 12. построена зависимость F_n от текстуры исходных труб. Существует пороговое отношение $f_R/f_T = 0,8$, ниже которого гидриды ориентируются в радиальном направлении. Последний вариант является неблагоприятным в условиях эксплуатации труб, поскольку в случае действия растягивающих тангенциальных напряжений приводит к образованию трещин. Стоит отметить и то, что коэффициент F_n для образцов, испытанных в воде, несколько выше, нежели для испытанных в паре.

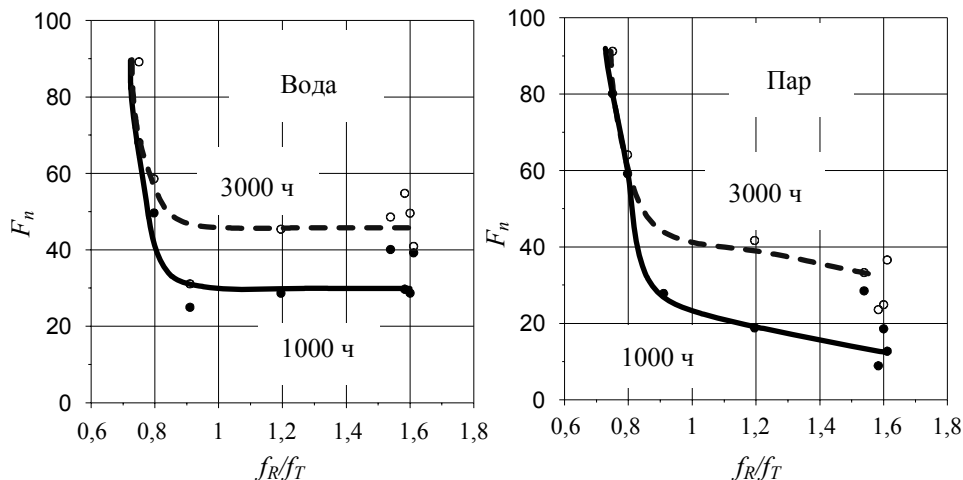


Рис. 12. Зависимость коэффициента ориентации гидридов F_n от текстуры исходных труб

Выводы

1. На поверхности труб, окисленных при температурах 350, 400 и 1100 °С, формируется оксидный слой моноклинной фазы диоксида циркония, характеризующийся одинаковой кристаллографической текстурой $\{001\} \langle 110 \rangle$.

2. Рассмотрена кинетика окисления оболочечных труб и выявлена зависимость толщины оксидных слоев от параметров кристаллографической текстуры оболочечных труб. Чем ближе текстурный максимум базисных нормалей расположен к радиальному направлению, тем меньше толщина оксидного слоя.

3. В трубах с минимальным значением f_R -параметра (0,42–0,43), когда $f_R/f_T < 0,8$, гидриды ориентируются в радиальном направлении, что является неблагоприятным в условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Дуглас Д. Металловедение циркония. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1975. С. 360.
2. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. Пер. с англ. М.: Мир, 1969. С. 392.
3. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. 2-е изд. Перераб. И доп. М.: Энергоатомиздат, 1994. С. 256.
4. Балашов А. А., Маркелов В. А., Шишов В. Н. и др. Влияние добавок кислорода и железа на прочность, сопротивление ползучести и коррозионную стойкость сплава Э110 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2008. Вып. 1, № 70. С. 13–20.

5. Тейлор А. Рентгеновская металлография. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1965. С. 663.
6. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. С. 480.
7. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. С. 360.
8. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. С. 631.
9. Бородкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. С. 271.
10. Перлович Ю. А., Исаенкова М. Г. Об определении параметров Кернса, используемых для характеристики кристаллографической текстуры труб из сплавов на основе Zr // Вопросы атомной науки и техники. Тр. конф. «Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике». 14–19 июня 1999 г. Алушта, Крым, Харьков, 1999. С. 89–90.
11. Сатыхов Р. Х., Дудкин А. А. Обработка изображений и идентификация объектов в системах технического зрения // Искусственный интеллект. 2006. Т. 3. С. 694–703.
12. Поцепав Р. В, Петров И. Б. Эффективный алгоритм предобработки изображений для структурных методов распознавания рукописных символов // Исследовано в России. 2003. С. 181–190.
13. Гончаров С. М., Суховой А. А. Этапы генерации уникальных ключевых последовательностей // Доклады ТУСУРа. Июнь 2010. Ч. 1, № 1 (21).
14. Ильясова Н. Ю., Казанский Н. Л., Корепанов А. О. Компьютерная технология восстановления пространственной структуры коронарных сосудов по ангиографическим проекциям // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 3. С. 281.
15. Местецкий Л. М. Непрерывный скелет бинарного растрового изображения // International conference graphicon. 1998.