

УДК [621.774:669.296.5]:621.039.546]:[620.18+539.22]

EDN DNXYDC

## Влияние вариантов технологии на формирование текстуры и анизотропию свойств оболочечных труб из сплава Э110

**Е.Н. Актуганова<sup>1</sup>, А.Г. Зиганшин<sup>2</sup>, А.Н. Кутявин<sup>2</sup>, Ю.С. Карпов<sup>2</sup>, Е.Н. Полиивец<sup>2</sup>,  
О.В. Юкаева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО ГИПУ г. Глазов

<sup>2</sup>АО ЧМЗ г. Глазов

*Проведен анализ влияния различных вариантов изготовления труб для оболочек твэлов из сплава Э110 (Э110 о.ч.) на формирование текстуры, структуры и анизотропию свойств. Показано, что для всех рассмотренных вариантов изготовления труб существует один механизм формирования текстуры в готовых изделиях, который определяется наличием текстуры деформации, сформированной при деформировании металла, и текстуры рекристаллизации – при последующей термической обработке. При этом каждая из исследуемых технологических операций: выплавка слитков (состав шихты), а также их горячая обработка, холодная деформация и термическая обработка - в той или иной степени влияет на формирование определённого типа текстуры и степень её совершенства. Наличие сложного процесса формирования текстуры в производстве оболочечных труб способствует получению нестабильных результатов по коэффициенту анизотропии предела текучести этих изделий. Полученные результаты создают предпосылки для более детального изучения влияния степени рекристаллизации и совершенства текстуры на коэффициент анизотропии предела текучести и ползучесть материала труб для оболочек твэлов.*

**Ключевые слова:** циркониевый сплав, изделия, трубы для оболочек твэлов, слиток, шихта,ковка, прокатка, вытяжка, термообработка, температура, продолжительность нагрева, текстура, анизотропия свойств, предел текучести.

---

## Influence of technology options upon arrangement of texture and anisotropy of properties of E110 alloy cladding tubes

**E.N. Aktuganova<sup>1</sup>, A.G. Zignashin<sup>2</sup>, A.N. Kutyavin<sup>2</sup>, Yu.S. Karpov<sup>2</sup>, E.N. Poliivets<sup>2</sup>,  
O.V. Yukaeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Higher Education "Glazov Engineering and Pedagogical University", Glazov,

<sup>2</sup>Chepetsk Mechanical Plant JSC, Glazov

*Analysed was the influence of various options of manufacturing tubes for fuel rod claddings made of E110 (E110 h.p.) alloy upon arrangement of texture, structure, and anisotropy of properties. It was shown that, for all the analysed tube manufacturing options, there existed the same mechanism of texture arrangement in the finished products, which was determined by existence of deformation texture arranged during the metal deformation, and of recrystallization texture during subsequent heat treatment. Here, each of the investigated process operations: ingot melting (charge mixture composition) and hot working, cold deforming and heat treatment influenced to a various extent upon an arrangement of a certain type of texture and degree of its perfection. Existence of the complicated process of texture arrangement in production of the cladding tubes contributes to unstable results in anisotropy factor of yield strength of these products. The results obtained predetermine a more detailed investigation of influence of recrystallization degree and texture perfection upon the anisotropy factor of yield strength and creep of material of the tubes for fuel rod claddings.*

**Key words:** zirconium alloy, products, tubes for fuel rod claddings, ingot, charge mixture, forging, rolling, drawing, heat treatment, temperature, heating duration, texture, anisotropy of properties, yield strength.

---

## Введение

Оболочечные трубы из сплава Э110 (Э110о.ч.) являются наиболее ответственными конструкционными элементами ТВС ВВЭР. В процессе эксплуатации оболочки твэлов испытывают экстремальные нагрузки, вызванные облучением, высокой температурой, переменными нагрузками, вибрацией, коррозией, наводораживанием и радиационным распуханием топлива. Коэффициент анизотропии является одним из параметров, который определяет устойчивость оболочек против сплющивания в реакторных условиях при повышенных температурах и давлении [1].

В соответствии с существующими требованиями технических условий коэффициент анизотропии ( $K_a$ ), рассчитанный как отношение средних значений условных пределов текучести  $\sigma_{0,2}$  в поперечном и продольном направлениях при температуре испытаний ( $380 \pm 5$ )°С в оболочечных трубах из сплава Э110 (Э110о.ч.), должен быть не менее 1,4.

В работах [2, 3] показано, что чем выше коэффициент анизотропии, тем выше сопротивление ползучести оболочек твэлов и их надежность при работе в условиях напряжённо-деформированного состояния под воздействием теплоносителя и топлива.

Повышение требований к качеству оболочечных труб из сплава Э110 (Э110 о.ч.), применяемых в ТВС активных зон ядерных реакторов, определили необходимость модернизации их производства.

Усовершенствованные процессы получения этих изделий предусматривали использование слитков, легированных кислородом и железом, с разным шихтовым составом, а также различные схемы деформационного и термического воздействия как при горячей обработке слитков, так и при холодной обработке трубных полуфабрикатов и готовых изделий.

Известно [1, 4, 5], что одним из важных факторов, определяющих анизотропию свойств, является текстура материала. Наличие текстуры и геометрической направленности структурных составляющих в материале способствуют получению более ярко выраженной анизотропии механических свойств в нём. При этом вид текстуры и степень её совершенства зависит от структуры металла, его химического состава, характера схем деформации и температурно-временных параметров термической обработки.

Установление влияния различных параметров производства на текстуру, структуру и ани-

зотропию свойств может способствовать выбору наиболее оптимального процесса получения труб для оболочек твэлов из сплава Э110 (Э110 о.ч.) с повышенными требованиями к качеству.

Целью данной работы являлось изучение влияния изменений шихтового состава слитков, дополнительного легирования, а также деформационного и термического воздействия на формирование текстуры и анизотропию свойств материала оболочечных труб из сплава Э110 (Э110 о.ч.).

## Материалы и методики исследований

Материалом для исследований являлись оболочечные трубы наружным диаметром 9,10 мм из сплава Э110 (Э110 о.ч. оптимизированного состава по содержанию железа и кислорода) после холодной прокатки в готовый размер и в состоянии поставки после конечного отжига, изготовленные из слитков с различным шихтовым составом, с дополнительным легированием их кислородом и железом, а также с применением различных деформационно-термических схем горячей и холодной обработки этих изделий (таблица 1).

Для изучения влияния химического состава слитков, различных схем деформационного воздействия и параметров термической обработки на текстуру и анизотропию свойств при изготовлении оболочечных труб из сплава Э110 (Э110 о.ч. – в данном случае сплав на основе губки оптимизированного состава по содержанию железа и кислорода) проведен комплекс металлографических, рентгеновских и физико-механических исследований.

Металлографические исследования микроструктуры с определением среднего размера зерна  $\alpha$ -Zr фазы в исследуемых трубах производили в их поперечном сечении в поляризованном свете на инвертированном микроскопе OLYMPUS GX51 при увеличении 500 крат с помощью специальной программы для определения данного параметра.

Механические испытания выполняли в соответствии с отраслевыми инструкциями на патрубках полноразмерного сечения длиной 145 мм и кольцах шириной 2,7 мм на разрывной машине 1231У-10.

Исследования текстуры, фазового состава и структурного состояния материала труб готового размера выполняли на дифрактометрах типа ДРОН. Съёмки проводили в медном излучении с использованием графитового монохроматора. Первичную обработку выполняли

с помощью программного комплекса PDWin. Идентификацию основных и интерметаллидных фаз проводили по справочным данным известных соединений циркония, опубликованных

в картотеке ASTM (JCPDS). Наличие b-фазы и концентрацию ниобия в ней определяли по отражению (110) и (200) в соответствии с методикой рентгенографического фазового анализа.

Таблица 1

Характеристика исследуемого материала труб для оболочек твэлов наружным диаметром 9,10 мм из сплава Э110 (Э110 о.ч. оптимизированного состава по содержанию железа и кислорода)

Вариант изготовления	Сплав/Партия	Шихтовой состав	Содержание элементов в слитке		Заготовка	Деформационная схема холодной прокатки	Состояние материала
			O, ppm	Fe, ppm			
1	Э110 60-13-06/1	50% элек. Zr, 35% иод. Zr; 15% обор. мет.	430-470	76-120	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	3 прокатки, станы валкового типа	х/д сост. пост
2	Э110 78-14-01/2	55% элек. Zr, 30% иод. Zr; 15% обор. мет.	360-390	-	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	4-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
3	Э110 104-13-02/2	55% элек. Zr, 30% иод. Zr; 15% обор. мет.	390-440	90-130	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	4-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
4	Э110 189-13-02/4	55% элек. Zr, 30% иод. Zr; 15% обор. мет.	480-530	60-92	Прокатка СВП-500 Укруп. загот	3-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
5	Э110 168-13-03/2	55% элек. Zr, 30% иод. Zr; 15% обор. мет.	540	99-170	Прокатка СВП-500 Укруп. загот	4-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
6	Э110 306-13-01/2	55% элек. Zr, 30% иод. Zr; 15% обор. мет.	650	375	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	3-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
7	Э110 142-13-02/1	62% элек. Zr, 23% иод. Zr; 15% обор. мет.	440-510	82-110	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	4-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
8	Э110 144-13	68% элек. Zr, 17% иод. Zr; 15% обор. мет.	530	88-150	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	4-прокатки станы валкового типа	х/д сост. пост
9	Э110 о.ч. 5009-08/2	100 % губка	640-720	330-540	Ковка OFL1-12MN Укруп. загот	4-прокатки станы валкового типа	х/д+т/о 500-600 °С 3 часа

Текстура образцов труб готового размера определялась методом экстраполяции неполной полюсной фигуры, записанной с поверхности, перпендикулярной радиальному направлению трубы, используя программу TEXTURA-P. По полным ППФ (0002) рассчитывали величины текстурных параметров Кернса и строили распределения базисных нормалей в RT-сечении труб. Точность определения параметров Кернса составляла  $\pm 0,02$ .

Коэффициент анизотропии определяли по формуле 1 как отношение предела

текучести в поперечном направлении к пределу текучести в продольном направлении при 380 °С.

$$K_a = \frac{\sigma_{0,2\text{попер}}}{\sigma_{0,2\text{прод}}} \quad (1)$$

где  $\sigma_{0,2\text{попер}}$  – предел текучести в поперечном направлении,

$\sigma_{0,2\text{прод}}$  – предел текучести в продольном направлении.

## Результаты

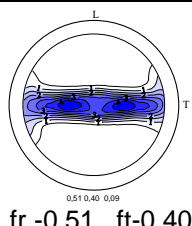
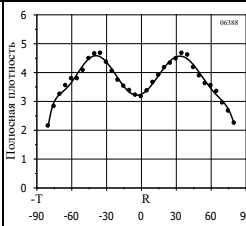
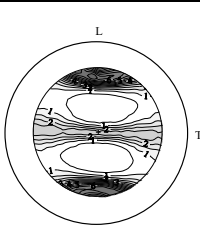
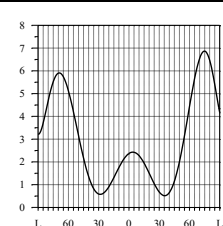
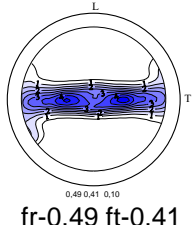
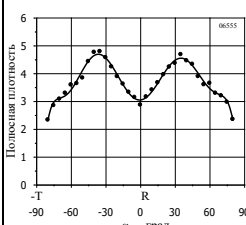
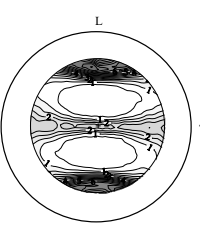
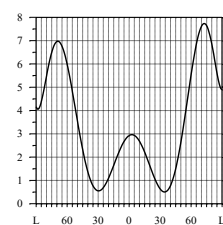
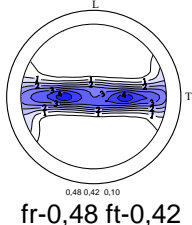
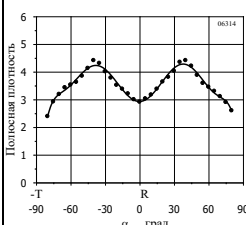
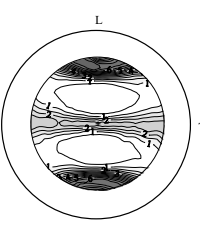
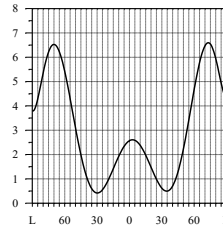
### Влияние шихтового состава, дополнительного легирования слитков и деформационного воздействия при горячей и холодной обработке материала

Анализ текстуры труб наружным диаметром 9,10 мм после холодной прокатки в готовый размер, изготовленных по вариантам 1 - 8 из слитков сплава Э110 с разным шихтовым составом, с дополнительным легированием железом и

кислородом, а также по различным деформационно-термическим схемам, показал, что текстура всех исследованных холоднодеформированных труб, вне зависимости от способа их получения, характеризуется преимущественной ориентацией базисных полюсов в RT сечении с отклонением от радиального направления на угол  $\pm(35-40)^\circ$  в сторону тангенциального. При этом полюса призматической плоскости  $\{11.0\}\alpha\text{-Zr}$  выстроены вдоль направления прокатки, как показано в таблице 2 для вариантов изготовления 2, 4, и 7.

Таблица 2

Результаты текстурного анализа оболочечных труб из сплава Э110 после холодной прокатки в готовый размер, изготовленных по вариантам 2, 4, 7

Состояние материала	Прямая полюсная фигура ППФ(00.2) $\alpha\text{Z}$	Распределение базисных нормалей	Призматическая плоскость $\{11.0\}\alpha\text{-Zr}$	Распределение призматических нормалей
<b>Вариант 2</b> 168-13-02/2, (55% порошок прокатки СВП-500, укруп. заг-ка, 4 прокатки)	 fr -0,51 ft-0,40 fl-0,09			
<b>Вариант 4</b> 306-13-01/2 (55% порошок по выш. сод. Fe, O, ковка OFL1-12MN укруп. заг-ка 3 прокатки)	 fr-0,49 ft-0,41 fl -0,10			
<b>Вариант 7</b> 142-13-02/1 (62% порошок ковка OFL1-12MN укруп. заг-ка 4 прокатки)	 fr-0,48 ft-0,42 fl -0,10			

Характер распределения базисных (00.2) полюсов в RT сечении труб свидетельствует о невысокой интенсивности текстурных максимумов и размытии базисных нормалей в поперечном сечении вне зависимости от способа их получения.

Интегральные текстурные параметры радиального fr, тангенциального ft и аксиального fl направления труб после холодной прокатки в готовый размер составляют – 0,48-0,51; 0,40-0,42; 0,09-0,11 соответственно (Таблица 2, 3).

Таблица 3

Результаты исследования оболочечных труб наружным диаметром 9,10 мм из сплава Э110, изготовленных по 8-ми вариантам

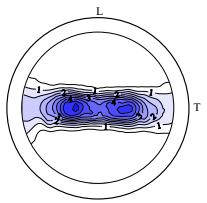
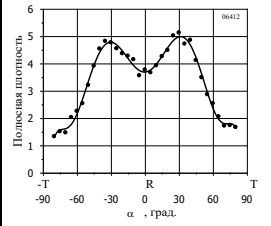
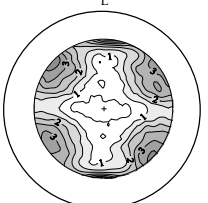
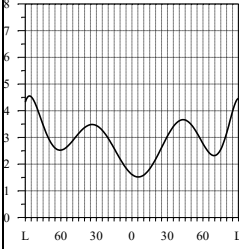
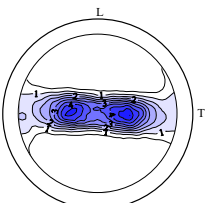
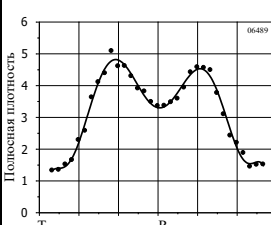
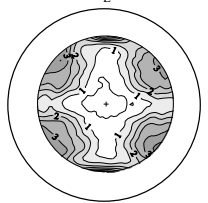
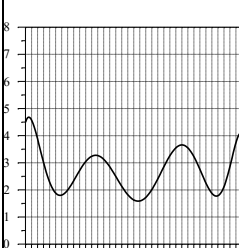
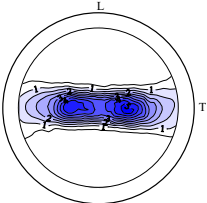
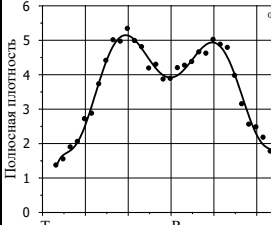
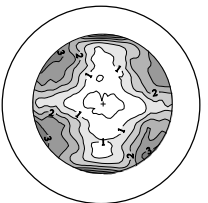
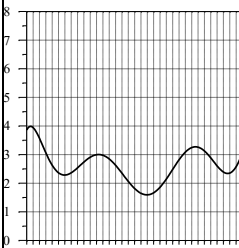
Вариант /партия/ содержание порошка	Способ получения	Содержание кислор. ppm	Состояние материала	Текстурные параметры			Предел текучести, кгс/мм <sup>2</sup> T = 380 °C		Ka	Средняя величина зерна, мкм
				fr	ft	fl	поп	прод.		
<i>Вариант 1</i> 60-13-06/1 50%	Ковка OFL1-12MN, 3-прокатки	430-470	х/д	0,50	0,40	0,10			-	-
			сост. пост.	0,54	0,36	0,10			1,4-1,45	-
<i>Вариант 2</i> 78-14-01/2 55%	Ковка OFL1-12MN, 4-прокатки,	360-390	х/д	0,50	0,41	0,09	-	-	-	-
			сост. пост.	0,57	0,36	0,07	16,1-16,3	10,7-11,2	1,46-1,5	4,0
<i>Вариант 3</i> 104-13-02/2 55%	Ковка OFL1-12MN 4-прокатки	390-440	х/д	0,49	0,40	0,11	-	-	-	-
			сост. пост.	0,55	0,36	0,09	16,0-17,0	11,0	1,4	4,4
<i>Вариант 4</i> 189-13-02/4 55%	Прокатка СВП-500, 3-прокатки	480-530	х/д	0,48	0,41	0,11	-	-	-	-
			сост. пост.	-	-	-	16,0-17,0	11-12	1,4-1,5	-
<i>Вариант 5</i> 168-13-02/2 55%	Прокатка СВП-500, 4-прокатки	540	х/д	0,51	0,40	0,09	-	-	-	-
			сост. пост.	0,57	0,36	0,07	16,8	11,4	1,47	4,5
<i>Вариант 6</i> 306-13-01/2 55%	Прокатка СВП-500, 3-прокатки	650	х/д	0,49	0,41	0,10	-	-	-	-
			сост. пост.	0,54	0,36	0,10	16,0-17,0	13	1,3	4,4
<i>Вариант 7</i> 142-13-02/1 62%	Ковка OFL1-12MN, 4-прокатки	440-510	х/д	0,48	0,42	0,10	-	-	-	-
			сост. пост.	0,57	0,35	0,08	16,0	11	1,4	4,2
<i>Вариант 8</i> Э110 144-13 68%	Ковка OFL1-12MN, 4-прокатки	530	х/д	-	-	-	-	-	-	-
			сост. пост.	-	-	-	16,0-17,0	11-12	1,4-1,5	-

Последующие операции - окончательный отжиг и правка, проведенные в соответствии с существующим процессом для этих труб, - способствуют значимому увеличению параметра радиального направления fr с 0,48–0,51 до 0,54–0,57 (таблица 3, 4).

Повышение параметра fr происходит за счет увеличения интенсивности и концентрации базисных полюсов около текстурного максимума, снижения тангенциальной составляющей текстуры и переориентации призматических нормалей так, что вдоль направления прокатки выстраиваются полюса призматической плоскости {11.0}α-Zr (таблица 4).

То есть при всех исследуемых вариантах из изготовления оболочечных труб после холодной прокатки их в готовый размер в них формируется неустойчивая текстура деформации, которая продолжает свое дальнейшее формирование при последующей термообработке и правке, и, как следствие, ведет к получению нестабильных результатов в уровне механических свойств и коэффициента анизотропии, который изменяется от 1,3 до 1,5. При этом следует отметить, что средняя величина рекристаллизованного зерна α-Zr – фазы в готовых трубах от способа их изготовления изменяется незначительно и составляет 4,0 – 4,5 мкм (таблица 3-4).

Таблица 4  
Результаты текстурного анализа оболочечных труб из сплава Э110 в состоянии поставки, изготовленных по вариантам 2, 4, 7

Состояние материала	Прямая полюсная фигура ППФ(00.2) $\alpha$ Zr	Распределение базисных нормалей	Призматическая плоскость {11.0} $\alpha$ -Zr	Распределение призматических нормалей
<p><b>Вариант 2</b> 168-13-02/2, (55% порошок, прокатка СВП-500, укруп. заг-ка, 4 прокатки) <math>K_a=1,47</math></p>	 <p>0,57 0,36 0,07 fr-0,57 ft-0,36 fl-0,07</p>	 <p>06412</p>		
<p><b>Вариант 4</b> 306-13-01/2 (55% порошок, повыш. сод. Fe, O, ковка OFL1-12MN укруп. заг-ка, 3 прокатки) <math>K_a=1,3</math></p>	 <p>0,54 0,36 0,10 fr-0,54 ft-0,36 fl-0,10</p>	 <p>06489</p>		
<p><b>Вариант 7</b> 142-13-02/1 (62% порошок, ковка OFL1-12MN укруп. заг-ка, 4 прокатки) <math>K_a=1,4-1,5</math></p>	 <p>0,57 0,35 0,08 fr-0,57 ft-0,35 fl-0,08</p>	 <p>06377</p>		

Сравнительные исследования текстуры, механических свойств и микроструктуры труб, изготовленных по одним деформационно-термическим схемам горячей и холодной обработки материала, но из слитков сплава Э110 с разным содержанием железа, кислорода и электролитического порошка циркония в шихте, показали (варианты 1 - 8), что увеличение кислорода в сплаве до 650 ppm (вариант 6) демонстрирует тенденцию снижения параметра  $fr$  от 0,55 до 0,54 и повышает предел текучести в продольном направлении материала

труб с 11 до 13 кгс/мм<sup>2</sup>, не изменяя микроструктуры, что приводит к уменьшению значения коэффициента анизотропии до 1,3 (рис. 1, таблица 3).

При этом увеличение содержания электролитического порошка циркония в шихте от 50 до 68% (варианты 1, 2, 7, 8) не оказывает значимого влияния на изменение характеристик текстуры, структуры и механических свойств. Трубы, изготовленные из слитков с различным составом шихты, имеют значения коэффициента анизотропии от 1,4 до 1,5.

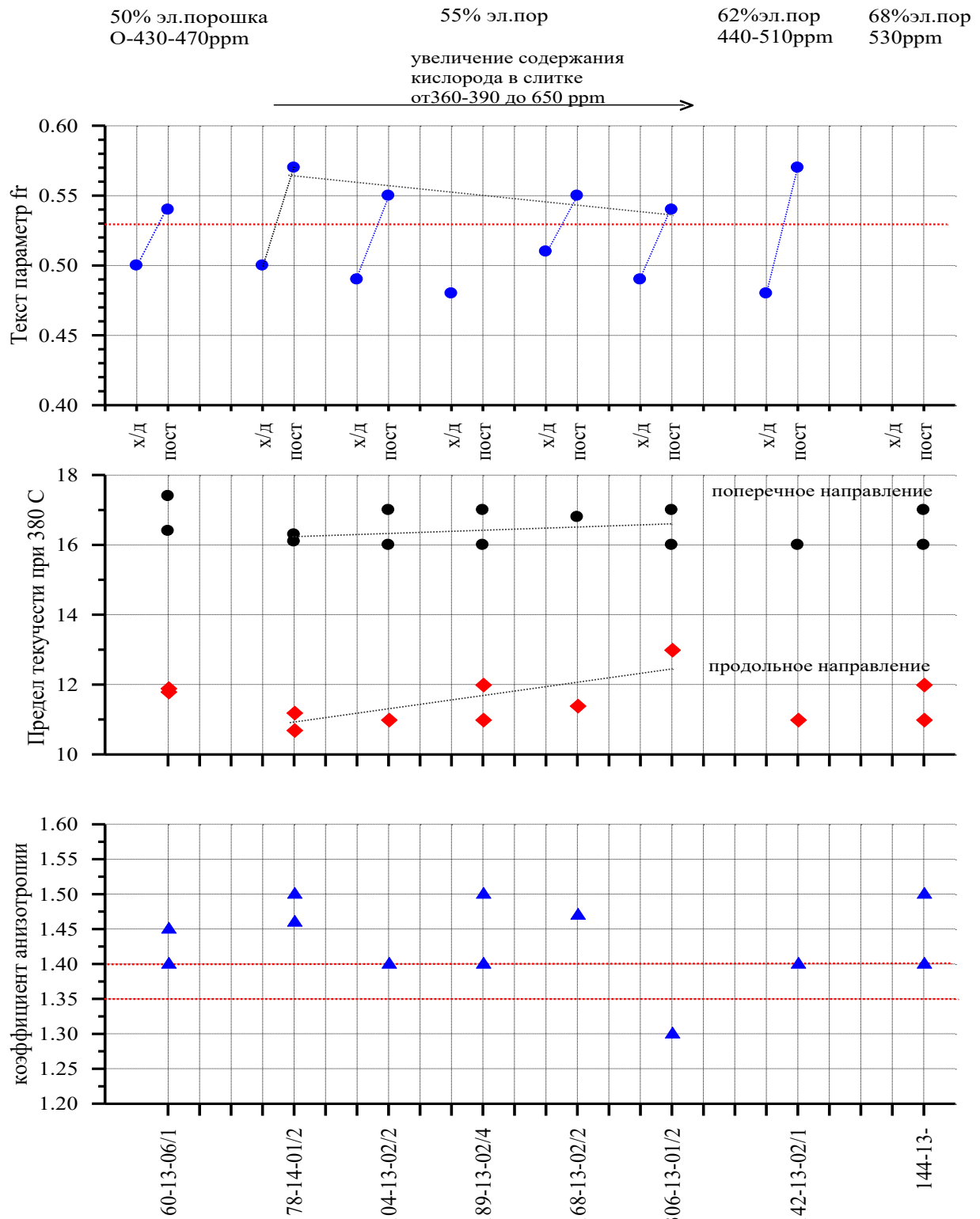


Рис. 1. Текстура параметр  $f_r$ , предел текучести в продольном и поперечном направлении и коэффициент анизотропии труб наружным диаметром 9, 10 мм из сплава Э110, изготовленных по 8 – ми вариантам

При изучении влияния горячей обработки слитков (варианты 3 и 5) отмечено небольшое увеличение радиальности (на 0,02) холоднокате-

формированных труб, изготовленных с применением горячей прокатки вместо ковки. Так, текстурные параметры  $f_r$ ,  $f_t$ ,  $f_l$  холоднокатаной

трубы, полученной из ковальной заготовки (вариант 3), составляют 0,49; 0,40; 0,11, а трубы из катаной заготовки (вариант 5) - 0,51; 0,40; 0,09 соответственно (рис. 1, таблица 2). Более высокие значения  $f_g$  в трубе, изготовленной из заготовки, горячая обработка которой проводилась прокаткой, способствуют получению более высоких значений коэффициента анизотропии 1,47 по сравнению с трубой, полученной из ковальной заготовки, где данный параметр составляет 1,4 (таблица 3, рис. 1).

Для исследования влияния холодной деформации на текстуру, структуру и свойства оболочечных труб было рассмотрено две схемы, которые предусматривали проведение холодной прокатки труб до готового размера в три и четыре этапа. Основным отличием трёхпрокатной схемы от четырехпрокатной является применение большей вытяжки при деформации труб в предготовый размер. Так, варианты получения труб 2, 3, 5, 7, 8 предусматривали проведение прокаток в предготовый размер с вытяжкой от 1,95 до 3,7. Прокатка по трёхпрокатной схеме (варианты 1, 4, 6) проводилась в предготовый размер с вытяжкой 4,3 – 4,5. При этом деформирование труб наружным диаметром 9,10 мм в готовый размер по обеим схемам осуществлялось с одинаковой вытяжкой  $\sim 5$  и параметром  $Q \sim 2,2-2,4$  (соотношения деформаций в радиальном и тангенциальном направлении).

При рассмотрении влияния холодной деформации в процессе изготовления оболочечных труб отмечено, что, вне зависимости от схемы холодной прокатки, они имеют текстуру деформации с пониженными значениями параметра  $f_g$  и достаточно большим размытием базисных нормалей в поперечном и продольном ( $f_l=0,09-0,11$ ) сечении труб. Получение данного типа текстуры связано с доминирующим влиянием деформационного воздействия при финишной прокатке на станах КРВ (параметра  $Q$ ) на текстуру труб. При этом коэффициент анизотропии труб находится в диапазоне значений 1,4-1,5, за исключением одной партии 306-13-02/2 с более высоким содержанием кислорода, в которой  $K_a$  составил – 1,3. (таблица 3, рис. 1).

Проведённые исследования влияния различных вариантов изготовления труб для оболочек твэлов из сплава Э110 на формирование текстуры, структуры и анизотропию свойств определили особенности характера формирования текстуры и свойств в производстве этих изделий. Вне зависимости от способа получения оболочечных труб, после холодной прокатки их в готовый размер в них формируется

неустойчивая текстура деформации, которая продолжает свое дальнейшее формирование при последующей термообработке и правке, что влияет на получение нестабильных результатов механических свойств и коэффициента анизотропии.

То есть отжиг в интервале температур 580 – 600°C продолжительностью 3 часа увеличивает совершенство текстуры холоднодеформированного материала и способствует получению более ярко выраженной анизотропии механических свойств.

Проведенные исследования показали значительную роль термической обработки в формировании текстуры и свойств в производстве рассмотренных вариантах изготовления оболочечных труб из сплава Э110.

#### **Влияние температурно-временных параметров нагрева при термической обработке труб готового размера**

При исследовании параметров производства труб для оболочек твэлов, изготовленных по различным вариантам из сплавов Э110, показано, что на коэффициент анизотропии в этих изделиях влияет текстура, сформированная как при деформации материала, так и его рекристаллизации при последующем отжиге.

При этом отмечено, что чем совершеннее текстура деформации, тем более четкой получается соответствующая ей текстура рекристаллизации и более однородные механические свойства имеет трубный материал. То есть отжиг холоднодеформированного материала труб в процессе рекристаллизации  $\alpha$ -Zr может оказывать влияние на формирование текстуры и свойств готовых изделий [6].

Исследования влияния температуры нагрева при термообработке оболочечных труб готового размера на текстуру и анизотропию свойств проводились на трубном материале из сплава Э110 о.ч. оптимизированного состава по содержанию железа и кислорода на основе губки, изготовленном по варианту 9, в диапазоне температур 500 – 600 °C продолжительностью 3 часа.

Из представленных в таблице 5 и на рис. 2 результатов видно, что пределы текучести в поперечном и продольном направлениях при температурных испытаниях труб, изготовленных по варианту 9, после термообработки в диапазоне температур 500 – 560 °C в результате формирования рекристаллизованной структуры существенно снижаются, в отличие от коэффициента анизотропии, для которого видна тенденция к увеличению с 1,31 до 1,36.

Таблица 5

Механические свойства труб для оболочек твэлов готового размера, изготовленных по варианту 9, после термообработки в диапазоне температур 500 – 600 °С с выдержкой 3 часа

Режим т/о	Фазовый со- став	Продольное направление			Поперечное направление			коэф- фици- ент анизотропии
		T <sub>исп</sub> =380±2 °С			T <sub>исп</sub> =380±2 °С			
		S <sub>B</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	S <sub>0,2</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	d, %	S <sub>B</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	S <sub>0,2</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	d, %	
500°С 2 часа	α-Zr, b-Nb (87- 91%Nb), следы Zr(Nb,Fe) <sub>2</sub> <sup>ГПУ</sup> , следы ZrC	24,3	15,0	62,5	22,1 22,2	19,6 19,6	39,1 38,5	1,31
520°С 2 часа		22,9	13,7	62,3	20,2 20,6	17,6 18,0	39,2 39,2	1,30
540°С 2 часа		22,0	12,8	62,8	19,7 19,7	17,6 17,2	40,3 39,9	1,36
560°С 2 часа		21,7	12,5	63,3	19,7 19,7	16,8 17,3	40,2 39,8	1,36
580°С 2 часа		21,6	12,3	61,4	19,0 19,4	17,8 16,5	- 41,5	1,39
600°С 2 часа		21,7	11,8	62,0	19,1 19,0	17,9 17,9	39,0 -	1,52

Дальнейшее повышение температуры нагрева при отжиге труб до 580 – 600 °С способствовало некоторому увеличению значений предела текучести в поперечном и снижению предела текучести в продольном направлении, что увеличивает коэффициент анизотропии с 1,36 до 1,52 (таблица 5, рис. 2).

Фазовый состав материала труб после отжигов во всем исследуемом интервале температур характеризуется наличием α-Zr, b-Nb (87-91% Nb), следов интерметаллидного соединения Zr(Nb,Fe)<sub>2</sub><sup>ГПУ</sup>. Также наблюдаются следы карбидной фазы ZrC. b-Zr фаза отсутствует, что

свидетельствует об ожидании хорошей коррозионной стойкости исследуемого материала (таблица 5).

Исследование текстуры холоднодеформированных труб варианта 9 после термообработки в диапазоне температур 500 – 600 °С продолжительностью 3 часа показало, что повышение температуры нагрева способствует значительному увеличению параметра радиального направления fr с 0,51 до 0,57, при этом наиболее высокие значения данного параметра (0,56, 0,57) наблюдаются при нагреве до температур 580 – 600 °С (таблица 6, рис. 3).

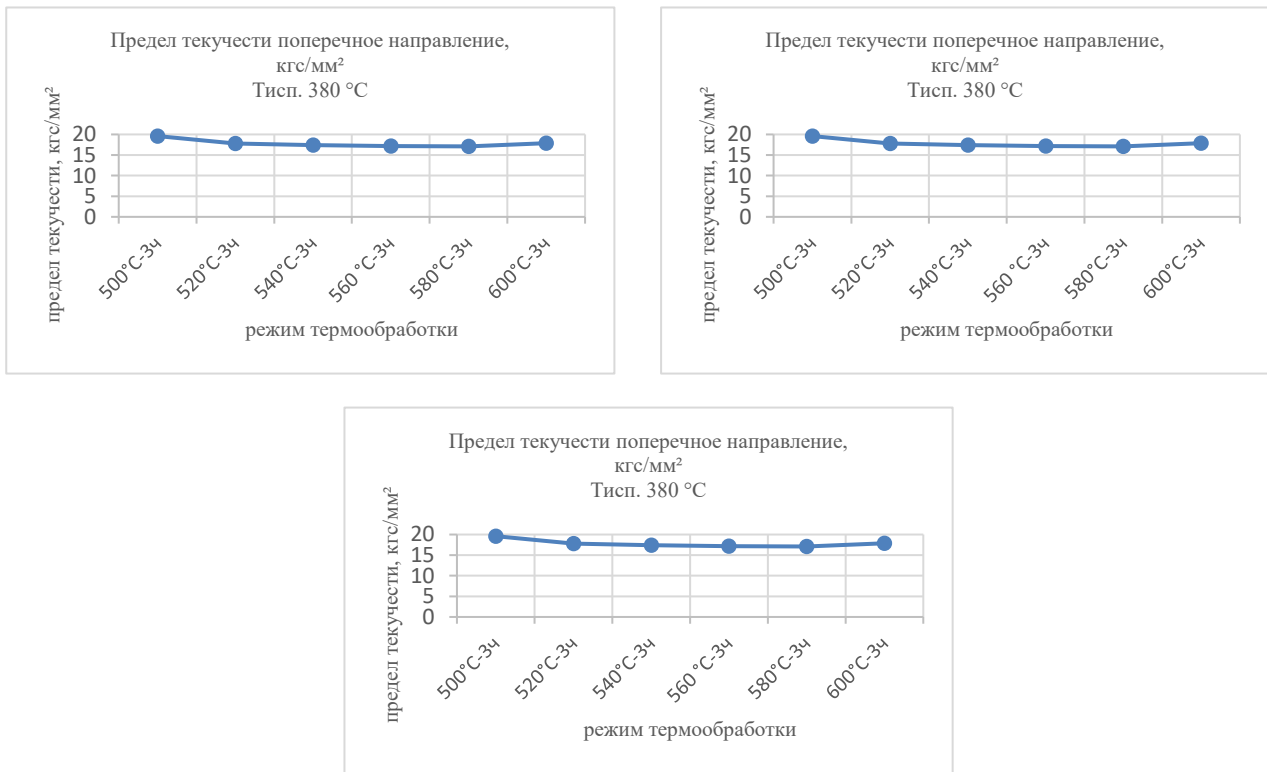


Рис. 2. Изменение значений предела текучести в поперечном и продольном направлениях при испытании 380 °С, а также коэффициента анизотропии после термообработки при 500 – 600°С с временем выдержки 3 часа

Повышение параметра  $f_g$  происходит за счет увеличения интенсивности и концентрации базисных полюсов около текстурного максимума, снижения тангенциальной составляющей текстуры и переориентации призматических нормалей так, что вдоль направления прокатки выстраиваются полюса призматической плоскости  $\{11.0\}\alpha\text{-Zr}$  (таблица 6).

Таблица 6

Изменение текстуры материала труб из сплава Э110о.ч., изготовленных по варианту 9, в зависимости от температуры термообработки

	х/катаное	500 °С-3ч	540°С-3ч	580°С-3ч	600°С-3ч
(00.2)					
{11.0}					

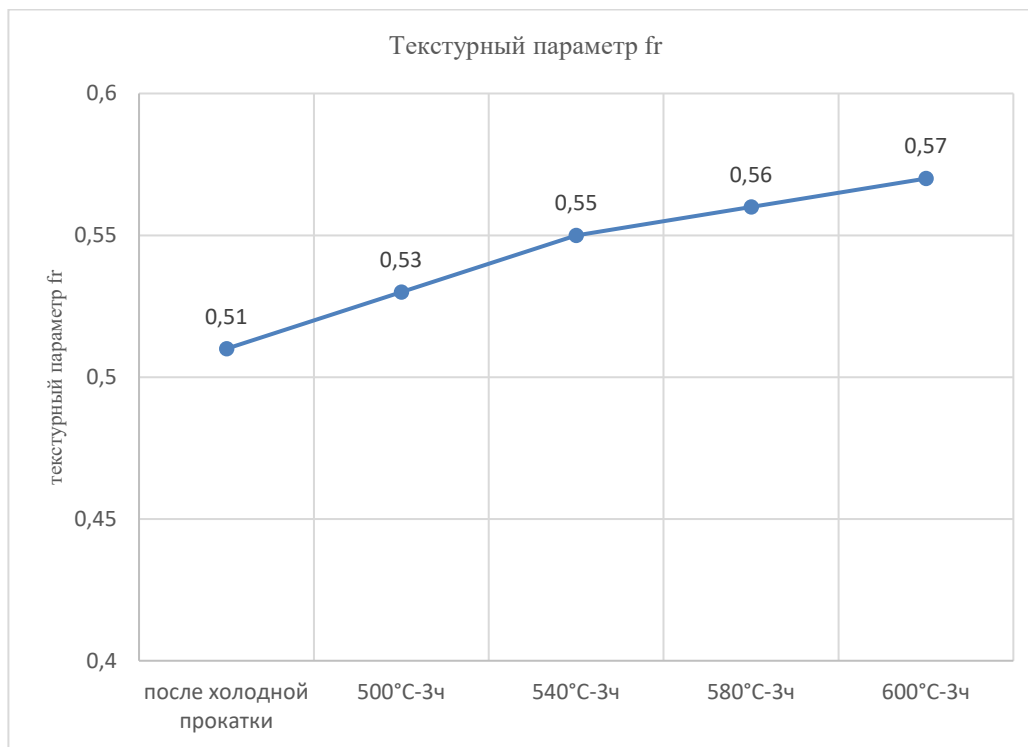


Рис.3. Изменение текстуры материала труб из сплава Э110.ч., изготовленных по варианту 9, в зависимости от температуры термообработки

То есть отжиг в интервале температур 580 – 600 °С продолжительностью 3 часа увеличивает совершенство текстуры холоднодеформированного материала и способствует получению более ярко выраженной анизотропии механических свойств.

Проведенные исследования показали значительную роль термической обработки в формировании текстуры и свойств в производстве рассмотренных вариантов изготовления оболочечных труб из сплава Э110 (Э110 о.ч.).

Процесс формирования текстуры рекристаллизации достаточно сложный. Можно предположить, что возникает он из текстуры деформации путем термически активируемых процессов образования новых зерен и их роста, зависит от температуры нагрева, а также от локальных особенностей текстуры деформации, ее интенсивности и размытия. Движущей силой возврата и рекристаллизации является избыточная энергия дефектов (структурных несовершенств), накопленная в процессе пластической деформации. От уровня этой энергии зависит интенсивность и полнота рекристаллизации.

По мнению авторов работы [6], рекристаллизация  $\alpha$  - Zr в трубах сопряжена не только с поворотом призматических нормалей относительно базисных, но и с переориентацией самих базисных нормалей. Склонность зерен к

рекристаллизации зависит от структурного состояния деформированных зерен и их ориентации относительно текстурного максимума. То есть в первую очередь рекристаллизуются зерна, наиболее искаженные и разориентированные относительно текстурного максимума.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено следующее:

- определены особенности в характере формирования текстуры и её влияние на анизотропию свойств в оболочечных трубах из сплава Э110 (Э110 о.ч.), изготовленных по различным технологическим вариантам. Наличие неоднородной и не до конца сформированной текстуры в холоднодеформированных трубах при прокатке их в готовый размер, вне зависимости от способа их изготовления, способствует дальнейшему её формированию при окончательной термообработке в интервале температур 580 – 600 °С продолжительностью 3 часа, что оказывает влияние на изменение анизотропии свойств этих изделий;

- исследования влияния химического и шихтового составов слитков, способов их горячей обработки, различных схем холодной деформации на структуру, текстуру и анизотропию свойств оболочечных труб из сплава

Э110 (Э110 о.ч.) не позволило выявить доминирующего влияния какого-либо из рассмотренных факторов, так как формирование структуры, текстуры и свойств в материале происходит в процессе всего цикла их изготовления.

Полученные результаты создают предпосылки для более детального изучения влияния степени рекристаллизации, совершенства текстуры на коэффициент анизотропии предела текучести и ползучесть материала труб для оболочек твэлов.

#### Список литературы

1. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. «Циркониевые сплавы в ядерной энергетике», Москва, Энергоатомиздат, 1994.
2. Заводчиков С.Ю., Зуев Л.Б., Котрехов В.А. «Металловедческие вопросы производства изделий из сплавов циркония», Новосибирск, Наука, 2012.
3. Новиков В.В. «Эксплуатационная надежность ТВЭЛОВ и совершенствование технологии производства, Конференция НТК-2014 «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития», г. Москва, 12 - 13 ноября 2014 г.
4. Справочник «Металловедение и термическая обработка стали», том.2, Металлургия, 1983г.
5. Дуглас Д. «Металловедение циркония», Москва, Атомиздат, 1975.
6. Исаенкова М.Г., Перлович Ю.А., Фесенко В.А. «Закономерности формирования кристаллографической текстуры в  $\alpha$ -Zr при пластической деформации и термообработке» Доклад НИЯУ МИФИ на конференции Цирконий XXI века, 2014г.

Поступила в редакцию / Received 19.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.09.2025

Принята к публикации / Accepted 23.10.2025