

УДК [621.774.016:669.296.5]:621.039.546]:620.18

EDN GGTHTY

Исследование влияния способа горячей обработки слитков на формирование структурно-фазового состояния, текстуру, свойства полуфабрикатов и готовых изделий в производстве оболочечных труб из сплава Э110

Е.Н. Актуганова¹, А.Г. Зиганшин², А.Н. Кутявин², Ю.С. Карпов², О.В. Юкаева²

¹ФГБОУ ВО ГИПУ г. Глазов

²АО ЧМЗ г. Глазов

В работе показано, что способ горячей обработки слитков из сплава Э110 влияет на формирование структурно-фазового состояния, текстуру материала заготовок под горячее выдавливание. Применение горячей радиально-сдвиговой прокатки на стадии изготовления заготовок способствует формированию в материале готовых труб Ø9,10×7,73мм более радиального типа текстуры и повышению прочностных характеристик, в большей степени в поперечном направлении, что приводит к увеличению значений коэффициента анизотропии предела текучести. Учитывая положительное влияние радиально-сдвиговой прокатки при обработке слитков на структурные и текстурные параметры готовых труб для оболочек твэлов с повышенными требованиями к их качеству, данный способ может быть рассмотрен в оптимизированном процессе их получения.

Ключевые слова: ковка, радиально - сдвиговая прокатка, циркониевые трубы, текстура, коэффициент анизотропии

Study of the effect of ingots hot processing method on the formation of structural-phase state, texture, properties of semi-products and finished products in the production of cladding tubes made of E110 alloy

E.N. Aktuganova¹, A.G. Ziganshin², A.N. Kutuyavin², Yu.S. Karpov², O.V. Yukaeva²

¹FSBEI HE GIPU Glazov

²CMP JSC Glazov

The paper shows that the method of hot processing of ingots made of E110 alloy affects the formation of structural-phase state and the texture of the material of billets for hot extrusion. The use of hot radial-shear rolling at the stage of billet manufacturing contributes to the formation of more radial type of texture in the material of finished tubes Ø9.10×7.73 mm and increase in strength characteristics to a greater extent in the transverse direction, which leads to increasing the values of the anisotropy coefficient of the yield strength. Considering the positive effect of radial-shear rolling during ingot processing on the structural and textural parameters of finished tubes for fuel rod claddings with increased requirements for their quality, this method can be regarded in an optimized process for their production.

Key words: forging, radial-shear rolling, zirconium tubes, texture, anisotropy coefficient

Введение

В настоящее время предприятие АО «Чепецкий механический завод» является одним из основных поставщиком циркониевых изделий для атомной промышленности в России и за рубежом. Повышение требований к качеству оболочечных труб из сплава Э110, применяемых в

ТВС активных зон ядерных реакторов на тепловых нейтронах, определили необходимость модернизации их производства.

В технологических процессах получения этих изделий используют различные схемы деформационного и термического воздействия при горячей обработке слитков. Традиционным способом горячей обработки слитков из сплава Э110 является

ковка [1, 2]. Усовершенствованный процесс изготовления оболочечных труб из сплава Э110 предусматривает применение при горячей обработке слитков радиально - сдвиговую прокатку (РСП) [3].

Процессы горячего деформирования металла слитков как ковкой, так и радиально-сдвиговой прокаткой имеют ряд особенностей, которые могут оказать существенное влияние на качественные показатели готовых изделий. Важнейшими из них являются структура и текстура материала труб.

Наличие текстуры и геометрической направленности структурных составляющих в трубном материале способствуют получению в нём более ярко выраженной анизотропии механических свойств [4, 5]. При этом вид текстуры и степень её совершенства зависит от многих

факторов, в том числе и от характера схем деформирования при горячей обработке слитков.

Целью работы являлось исследование влияния варианта горячей обработки слитков на формирование структурно-фазового состояния, текстуру, свойства полуфабрикатов и готовых изделий в производстве оболочечных труб из сплава Э110.

Материалы и методики исследований

Материалом для исследований являлись темплеты, отобранные от начала, середины и конца поковок и штанг $\varnothing 260$ мм из сплава Э110 двух партий №104 и №161 после горячей обработки слитков ковкой и горячей прокаткой, а также труб готового размера $\varnothing 9,10 \times 7,73$ мм для оболочек твэлов этих же партий (таблица.1).

Таблица 1

Характеристика исследованного материала полуфабрикатов и готовых изделий из сплава Э110

№ варианта/ № партии	Оборудование/ вид заготовки	Температура и время нагрева	Место от- бора образ- цов	Анализируемые харак- теристики
Вариант 1 Ковка слитка №104	Ковочный ком- плекс OFL2-12MN/ поковка	930–980 °С; 30 ⁺¹⁰ мин.	Начало, се- редина, ко- нец поковки	Твердость, макро- и микроструктура, рент- геновский анализ фа- зового состава и тек- стуры
Вариант 2 РСП слитка №168	Стан СВП-500/ штанга		Начало, се- редина, ко- нец штанги	
Вариант 1 Трубы готового размера	-	-	Середина трубы	Механические свой- ства, микроструктура, рентгеновский анализ структурного состоя- ния и текстуры
Вариант 2 Трубы готового размера	-	-		

Анализ общего характера макроструктуры темплетов проводился с помощью сканера типа hp scanjet 5400с. Величина макрозерна определялась методом секущих.

Структурное состояние материала заготовок изучали в поперечном сечении в светлом поле при увеличении 200 крат, а труб готового размера в светлом и поляризованном свете при увеличении 500 крат с помощью микроскопа Axiotech-100HD.

Измерения твёрдости на заготовках, изготовленных по обоим вариантам, проводили на поперечных темплатах методом Роквелла по шкале В (HRB) вдавливанием шарика диаметром 1,588 мм при нагрузке 100 кгс.

Рентгенографические исследования фазового состава и структурного состояния материала выполняли на дифрактометре ДРОН-6. Съёмки проводили в медном монохроматизи-

рованном излучении при записи дифракционной картины в непрерывном и дискретном режиме. Обработку первичных данных для определения фазового состава и структурного состояния осуществляли с применением программного обеспечения PDWIN.

Наличие β -фазы и концентрацию легирующего элемента в ней определяли по отражениям $(110)_\beta$ и $(200)_\beta$ в соответствии с методикой рентгенографического фазового анализа. Структурное состояние оценивали по изменению полуширины рентгеновских отражений ГПУ-решетки α -циркония.

Рентгенографические исследования текстуры проводили с применением текстурного автоматизированного комплекса в соответствии с методическим описанием, используя программу TEXTURA-P.

Прямые полюсные фигуры ППФ (0002) α -Zr заготовок получали методом сшивки частичных прямых полюсных фигур, записанных для трех взаимно - перпендикулярных поверхностей в излучении Сг.

Текстура образцов труб готового размера определялась методом экстраполяции неполной полюсной фигуры, записанной с поверхности, перпендикулярной радиальному направлению трубы. По полным ППФ (0002) рассчитывали величины текстурных параметров Кернса и строили распределения базисных нормалей в RT-сечении труб. Точность определения параметров Кернса составляла ± 0.02 .

Механические испытания труб готового размера выполняли на патрубках полноразмерного сечения длиной 145 мм и кольцах шириной 2,7 мм на разрывной машине 1231У-10.

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.

Особенности горячей обработки слитков из сплава Э110

Процесс традиционного способа горячей обработки ковкой проводится путем обжатия слитка из сплава Э110 за несколько проходов,

что способствует формированию заданных геометрических размеров [1]. Дляковки применяют ковочный комплекс OFL2-12MN. Деформация при ковке осуществляется всесторонним сжатием с невысокими растягивающими напряжениями на поверхности и значительно более высокими сжимающими главными напряжениями в центральной части поковок. Ковка обычно проводится в несколько этапов, что приводит к деформированию отдельных объемов слитка в различных температурных областях существования β -Zr и $(\alpha+\beta)$ -Zr с разными типами кристаллических решеток ОЦК и ГПУ соответственно, имеющих различную склонность к пластической деформации. При этом значительно увеличивается цикл производства и возрастают потери металла.

Наиболее перспективным способом обработки слитков из циркониевых сплавов является горячая радиально - сдвиговая прокатка с применением стана СВП-500. В отличие отковки, большие скорости деформации при горячей РСП позволяют проводить деформацию всего слитка в высокотемпературном однофазном β -состоянии с одним типом кристаллической ОЦК-решетки. Процесс горячей РСП происходит с постепенным нарастанием величины общей деформации от входа к выходу заготовки в очаге деформации и ведёт к существенному разогреву металла к концу прокатки, в отличие отковки [3]. Формоизменение металла в процессе РСП одновременно содержит элементы непрерывного (уменьшение площади поперечного сечения заготовки по мере прохождения очага деформации) и циклического (вращательным движением заготовки между валками) процесса деформирования.

Основное отличие процесса РСП отковки связано с особенностью схемы нагружения. Так, кроме сжатия в радиальном направлении, имеющего место в обоих способах обработки слитков, при прокатке на стане СВП присутствуют растягивающие усилия вдоль оси деформирования металла.

Нагрев слитков из сплава Э110 перед горячей обработкой по обоим вариантам проводится выше температуры полиморфного превращения ($T_{пп}$) $(\alpha+\beta)$ -Zr \leftrightarrow β -Zr на 50 – 100 °С, которая соответствует температурному диапазону 930 – 980 °С [6].

Для понимания влияния различных способов горячей обработки слитков на формирование структурно-фазового состояния и свойства полуфабрикатов и готовых изделий из сплава Э110 был проведен комплекс исследований.

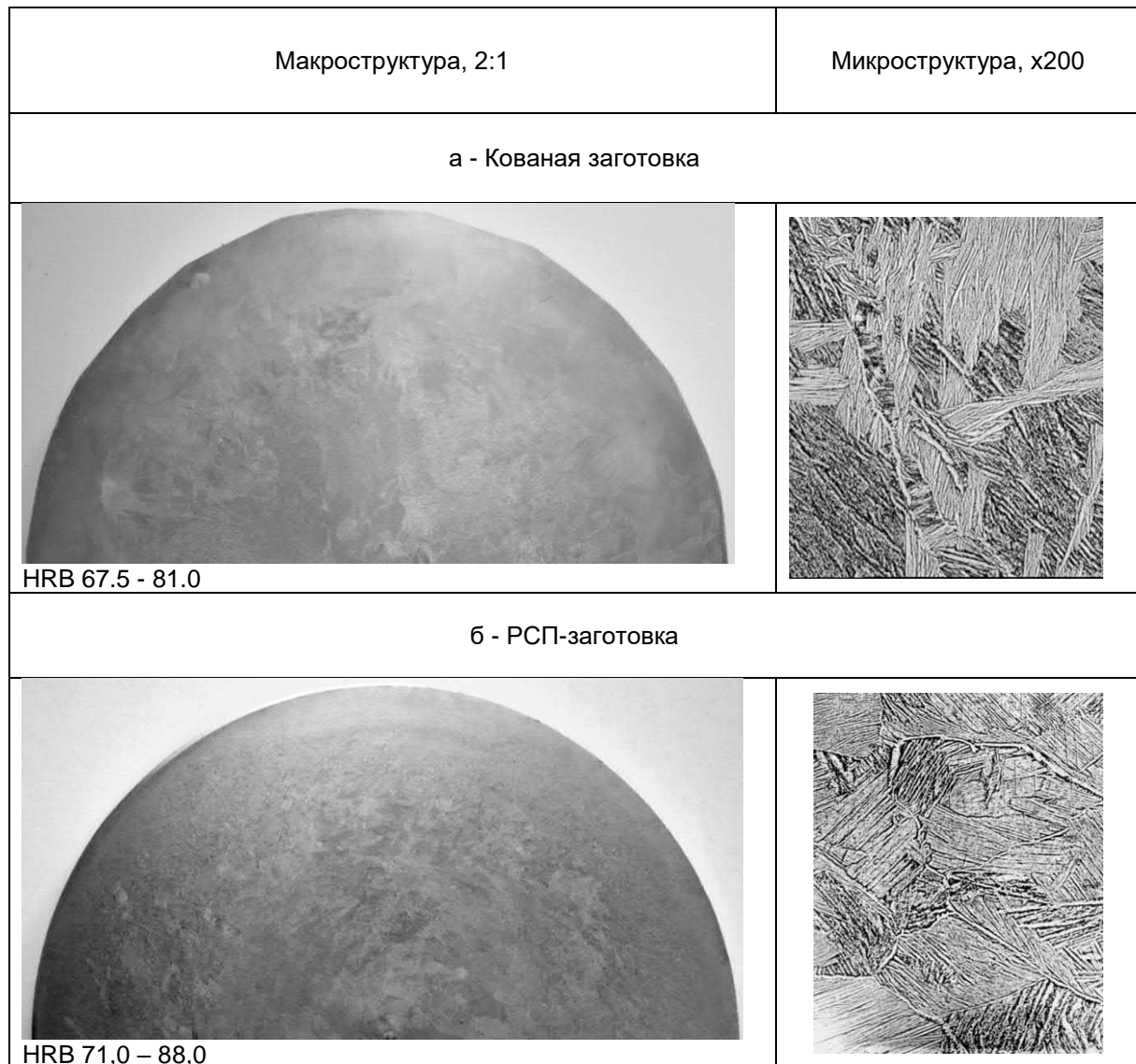


Рис. 1. Макро- и микроструктура заготовок, полученных разными способами горячей обработки слитков

Результаты

Материал заготовок после горячей обработки слитков

Макроструктура материала заготовок, полученных горячей ковкой, существенно отличается от структурного состояния заготовок после радиально - сдвиговой прокатки (рис. 1).

Для кованой заготовки характерна грубая деформированная структура (рис.1а).

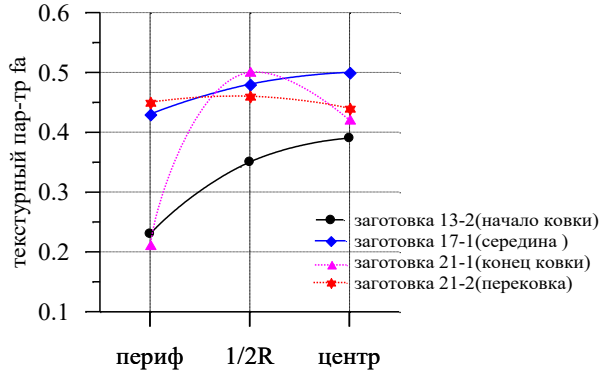
В поперечном сечении катаной заготовки после РСП характерно наличие трех зон, отличающихся по структурному состоянию. Так, материал с поверхности на расстоянии 25-30 мм вглубь металла имеет хорошо проработанную деформированную структуру.

На $\frac{1}{2}$ радиуса наблюдается структура, состоящая из деформированных зерен, закручивающихся по направлению прокатки. В центральной части макроструктура зернистая со средним размером зерна 3,6-4,2 мм (рис. 1б).

Материал поковок и штанг после горячей обработки слитков имеет внутризёрненную микроструктуру пластинчатого типа, состоящую из α -Zr-фазы (ГПУ) и остаточной β -Zr-фазы (ОЦК) (рис.1 - 2).

Анализ интенсивности остаточной β -Zr-фазы показал, что наибольшая её интенсивность выявлена в центральной части по сечению кованой заготовки, в то время как в материале РСП-заготовки большая интенсивность отражений в образцах на $\frac{1}{2}$ радиуса темплета (рис. 2)

Ковка половины слитка № 104- вариант 1



Прокатка СВП-500 слитка №168-вариант 2

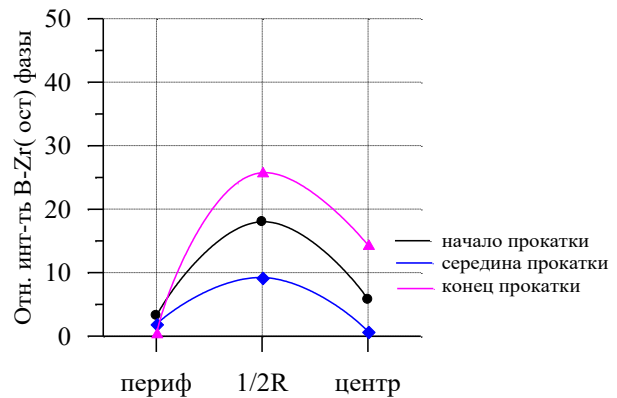
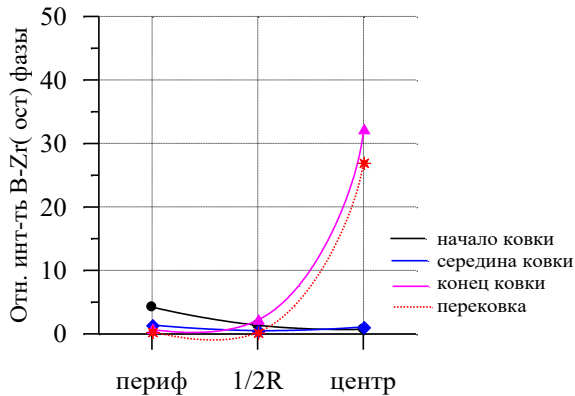
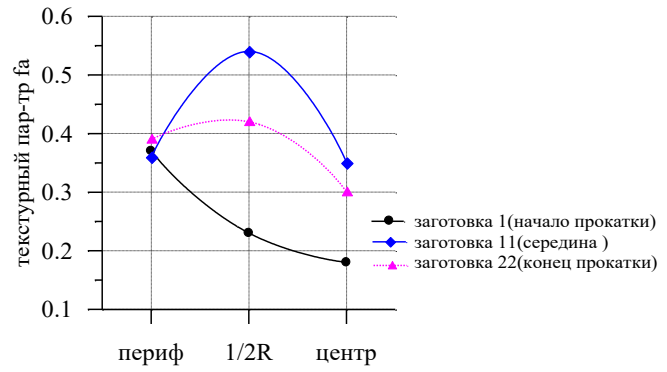


Рис.2. Изменение текстурного параметра аксиального направления и относительной интенсивности β -Zr фазы по длине и сечению темплетов от поковки и штанги, изготовленных ковкой и радиально-сдвиговой прокаткой слитков из сплава Э110

Исследование полюсных фигур (00.2) α -Zr свидетельствует о неоднородности материала по сечению кованых и катаных заготовок вследствие неоднородности пластической деформации и температуры деформирования по их сечению. Это проявляется в наличии поверхностного слоя с размытыми текстурными максимумами, характерными для деформации при более низких температурах, и слоев с более совершенной текстурой (рис. 2 - 3).

Текстуры внутренних слоев (центральная часть и половина радиуса) обоих вариантов заготовок подобны: текстура сформирована растяжением вдоль осевого направления куби-

ческой β -фазы при горячей деформации слитков и сохранившаяся при фазовом переходе $\beta \rightarrow \alpha$ согласно ориентационному соотношению $(0001)_\alpha \parallel \{110\}_\beta$ и $\langle 1120 \rangle_\alpha \parallel \langle 111 \rangle_\beta$ (рис. 2). При этом кованая заготовка имеет размытую текстуру внутренних слоев по сравнению с горячекатаной заготовкой, текстурные максимумы которой более интенсивные и четкие. Кроме того, наличие раздробленных текстурных максимумов на ППФ внутренних слоев кованой заготовки может свидетельствовать о неоднократности фазового перехода $\beta \leftrightarrow \alpha$ в процессе ковки, что не характерно для горячекатаных заготовок (рис. 3).

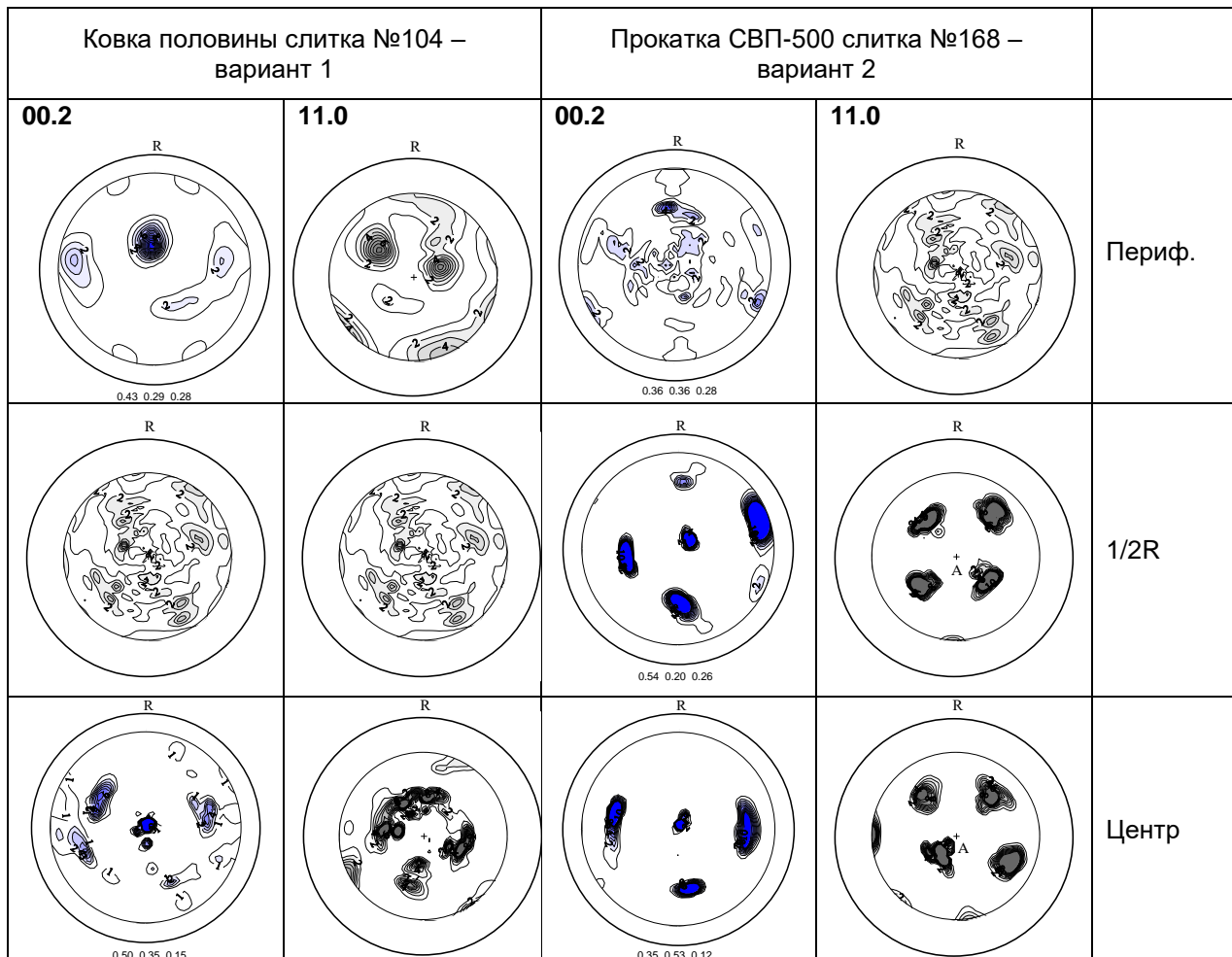


Рис. 3. ППФ (00.2) α -Zr и ППФ {11.0} α -Zr по длине и сечению темплетов от поковки и штанги, изготовленных ковкой и радиально-сдвиговой прокаткой слитков из сплава Э110

Практически на всех ППФ образцов внутренних слоев горячекатаной заготовки наблюдаются неразмытые сильные текстурные максимумы, из чего можно сделать вывод, что деформация материала горячей прокаткой происходила в β -области, затем в процессе охлаждения заготовки произошел фазовый переход $\beta \rightarrow \alpha$ -фазу (рис.3).

Разброс значений и характер изменения текстурного параметра аксиального (продольного) направления и относительной интенсивности (110) β -Zr-фазы в материале по сечению и длине заготовок подтверждает, что материал кованой заготовки более однороден: постепенное изменение структурных характеристик от периферии к центру. При этом в материале прокатанной заготовки наблюдается увеличение структурных характеристик в материале образцов, отобранных от $\frac{1}{2}$ радиуса (рис. 3).

Различия связаны с особенностью схемы нагружения: кроме сжатия в радиальном направлении, имеющего место в обоих способах горячей обработки слитков, при прокатке на стане СВП присутствуют растягивающие усилия вдоль оси, в отличие отковки на ковочном комплексе OFL2-12MN. Кроме того, различия связаны с большей длительностью процесса горячей деформации слитка при ковке и более высокой скоростью охлаждения заготовок.

Материал кованых и катаных заготовок имеет разный характер изменения твердости по сечению штанги в поперечном направлении: снижение твердости от периферии к центру кованой заготовки и увеличение к центру катаной заготовки, при этом наблюдается выравнивание твердости как поковки, так и штанг к концу процесса их деформирования (рис. 4).

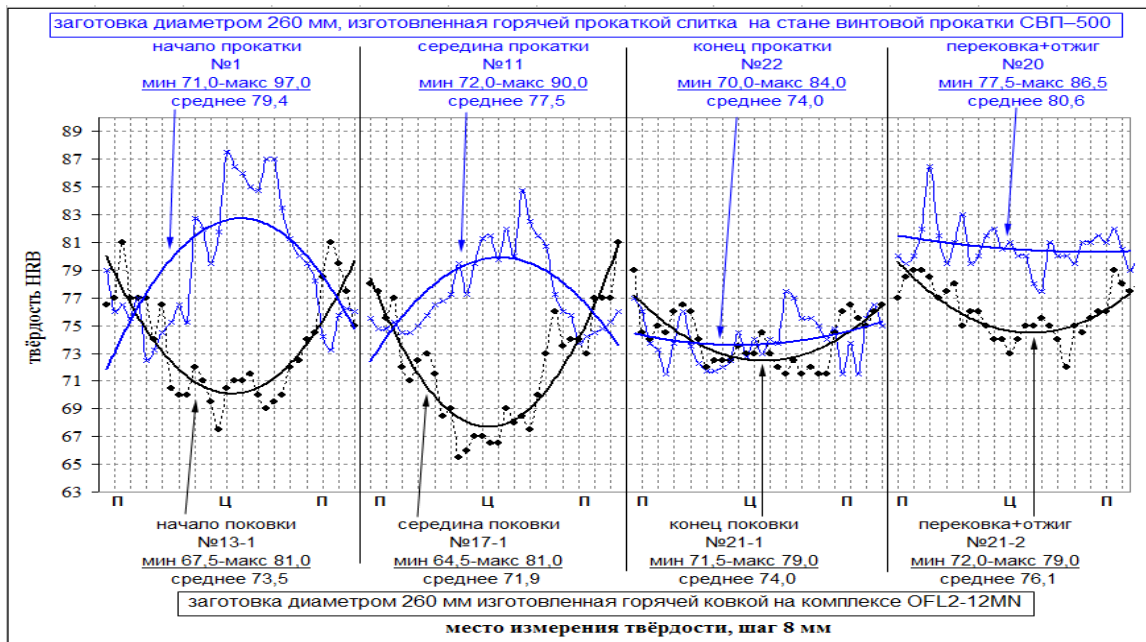


Рис. 4. Распределение твердости HRB по сечению и длине поковки и штанги послековки и радиально-сдвиговой прокатки

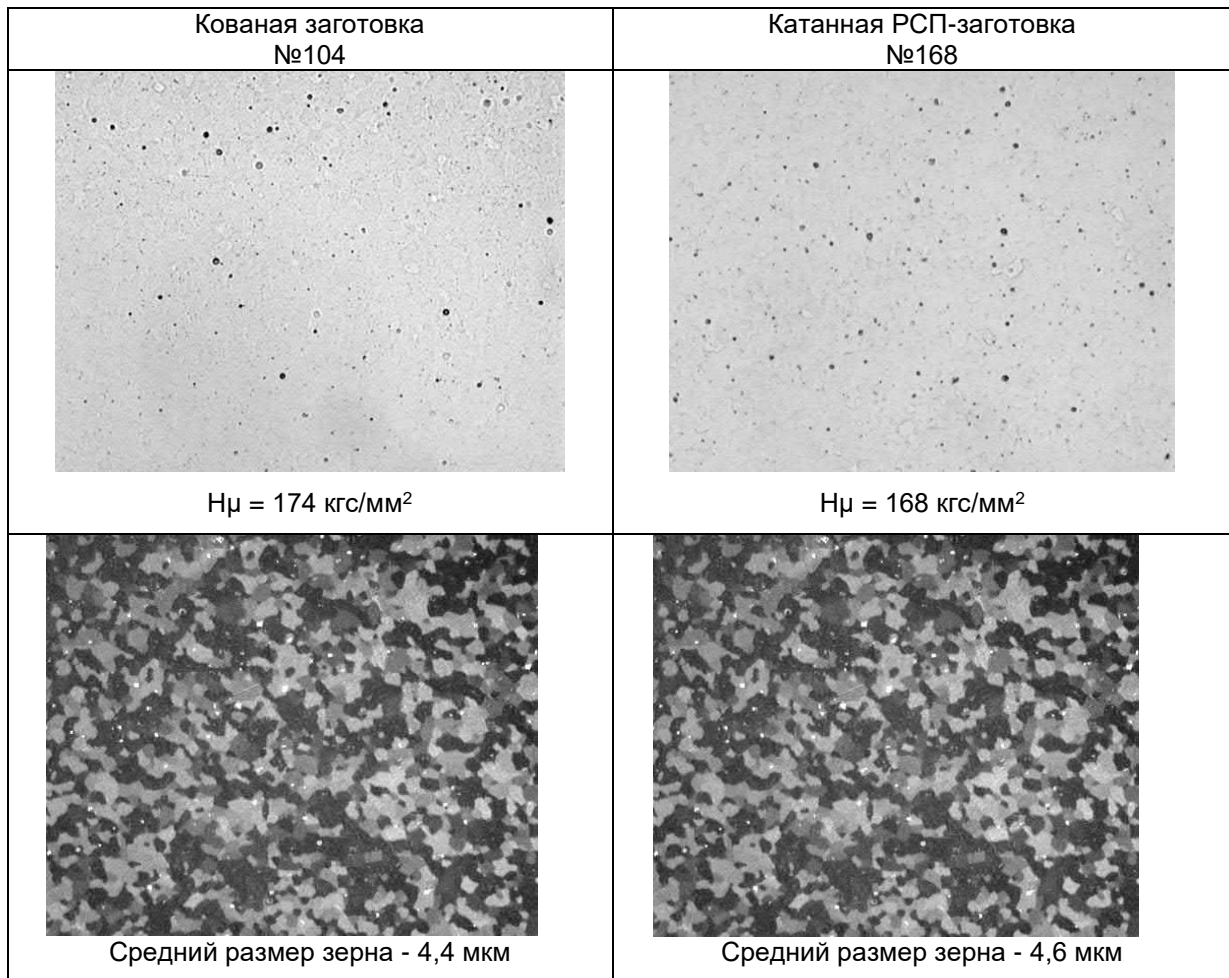


Рис. 5. Микроструктура и микротвердость (H_{μ}) материала труб $\varnothing 9,1 \times 7,73 \text{ мм}$ в состоянии поставки из горячекованных и горячекатаных заготовок сплава Э110, $\times 500$

Из проведённого анализа следует, что способ горячей обработки слитков влияет на формирование структурного состояния, текстуру и твердость поковок и штанг. Материал ковеной заготовки имеет более однородную по сечению деформированную макроструктуру. Для материала заготовок после РСП характерна неоднородная по сечению макроструктура с закручиванием структурных составляющих. Кованая заготовка имеет более однородную и более размытую текстуру внутренних слоев по сравнению с горячекатаной заготовкой, текстурные максимумы которой более интенсивные и четкие.

Оболочечные трубы готового размера

Материал труб $\varnothing 9,10 \times 7,73$ мм в состоянии поставки партий №104 (кованая заготовка) и №168 (катаная РСП заготовка) состоит

из зёрен α -Zr фазы (ГПУ) и выделений β -Nb (88-90% Nb) фазы с ОЦК-решеткой и характеризуется рекристаллизованным структурным состоянием (рис. 5). Минимальные значения полуширины рентгеновских линий и соответствующее текстуру рекристаллизации расположение текстурных максимумов на ППФ $\{11.0\}$ α -Zr подтверждают рекристаллизованное состояние материала исследованных труб (рис. 6).

Средняя величина зерна материала исследованных труб №104 (кованая заготовка) и №168-13-02/2 (катаная РСП заготовка) практически не отличается и составляет 4,4 мкм и 4,6 мкм соответственно (рис.5).

Средние значения микротвердости материала труб №104 (кованая заготовка) и №168 (катаная РСП заготовка) сопоставимы и соответствуют 174 кгс/мм² и 168 кгс/мм² соответственно (рис.5).

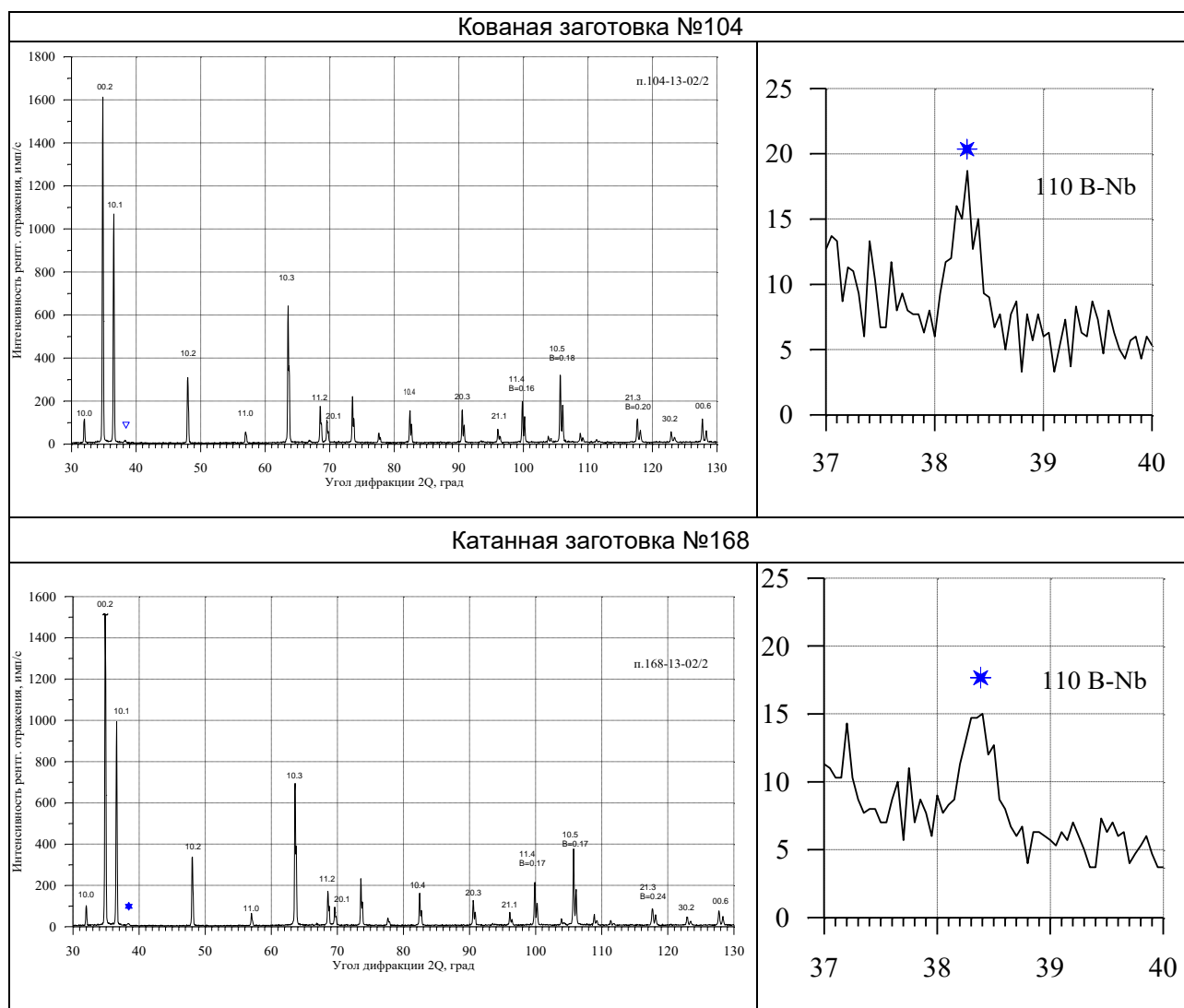


Рис. 6. Рентгенограммы материала труб $9,10 \times 7,73$ мм №104 (кованая заготовка) и №168 (катаная РСП заготовка) из сплава Э110 в состоянии поставки

Трубы для оболочек твэлов, полученные из заготовок после радиально - сдвиговой прокатки (вариант 2) имеют более высокие значения параметров Кернса в радиальном направлении – $f_R=0,57$; $f_T=0,36$; $f_L=0,07$ по сравнению с материалом труб, изготовленных из кованных заготовок (вариант 1), где текстурные параметры соответствуют - $f_R=0,55$; $f_T=0,36$; $f_L=0,09$ (рис. 7-8, таблица.2).

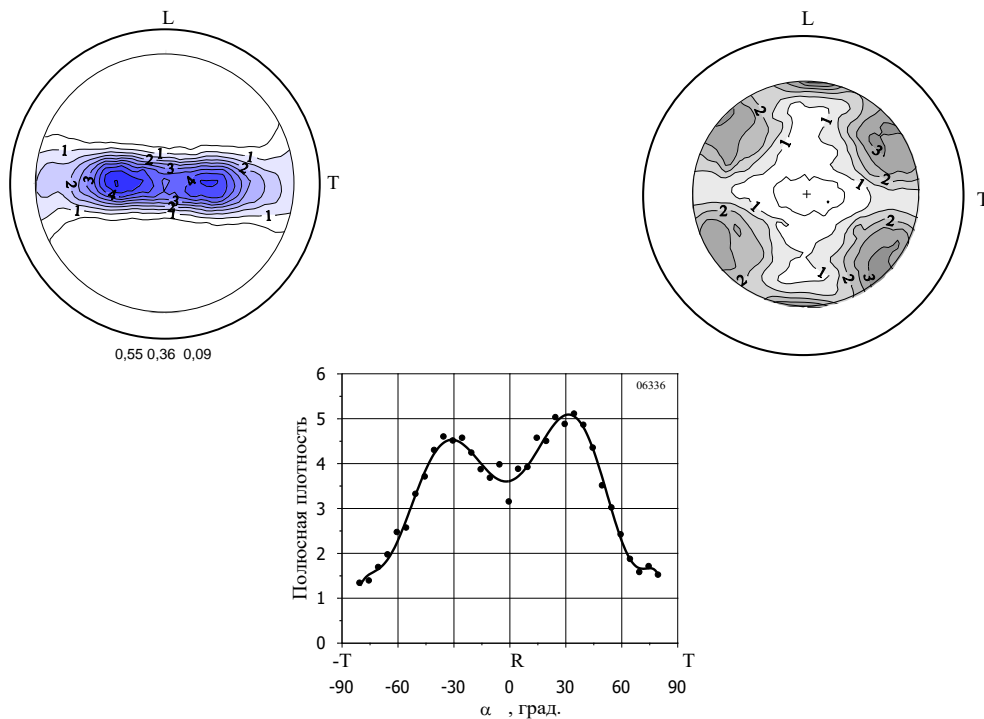


Рис. 7. Полюсные фигуры ППФ базисной $\{0002\}$ и призматической $\{11.0\}$ плоскости α -Zr и распределение плотности базисных нормалей в R-T сечении для труб $\varnothing 9,10 \times 7,73$ мм партии №104 (вариант 1) в состоянии поставки

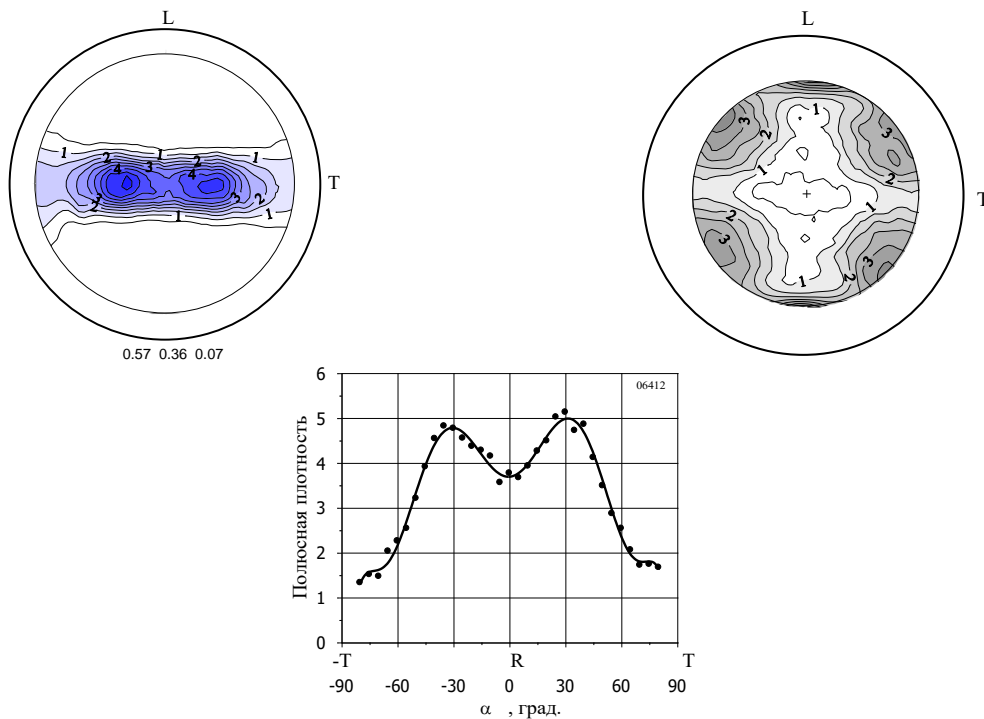


Рис. 8. Полюсные фигуры ППФ базисной $\{0002\}$ и призматической $\{11.0\}$ плоскости α -Zr и распределение плотности базисных нормалей в R-T сечении для труб $9,1 \times 7,73$ мм из сплава Э110 партии №168 (вариант 2) в состоянии поставки

Механические свойства труб при испытании на растяжение кольцевых образцов показывают не намного более высокие значения прочностных характеристик для труб из горячекатаной заготовки (рис. 9), что при одинаковом пределе текучести у труб в осевом направлении при температуре 380 °С позволило получить большее значение коэффициента анизотропии 1,54 (табл.2) для варианта трубы из РСП заготовки.

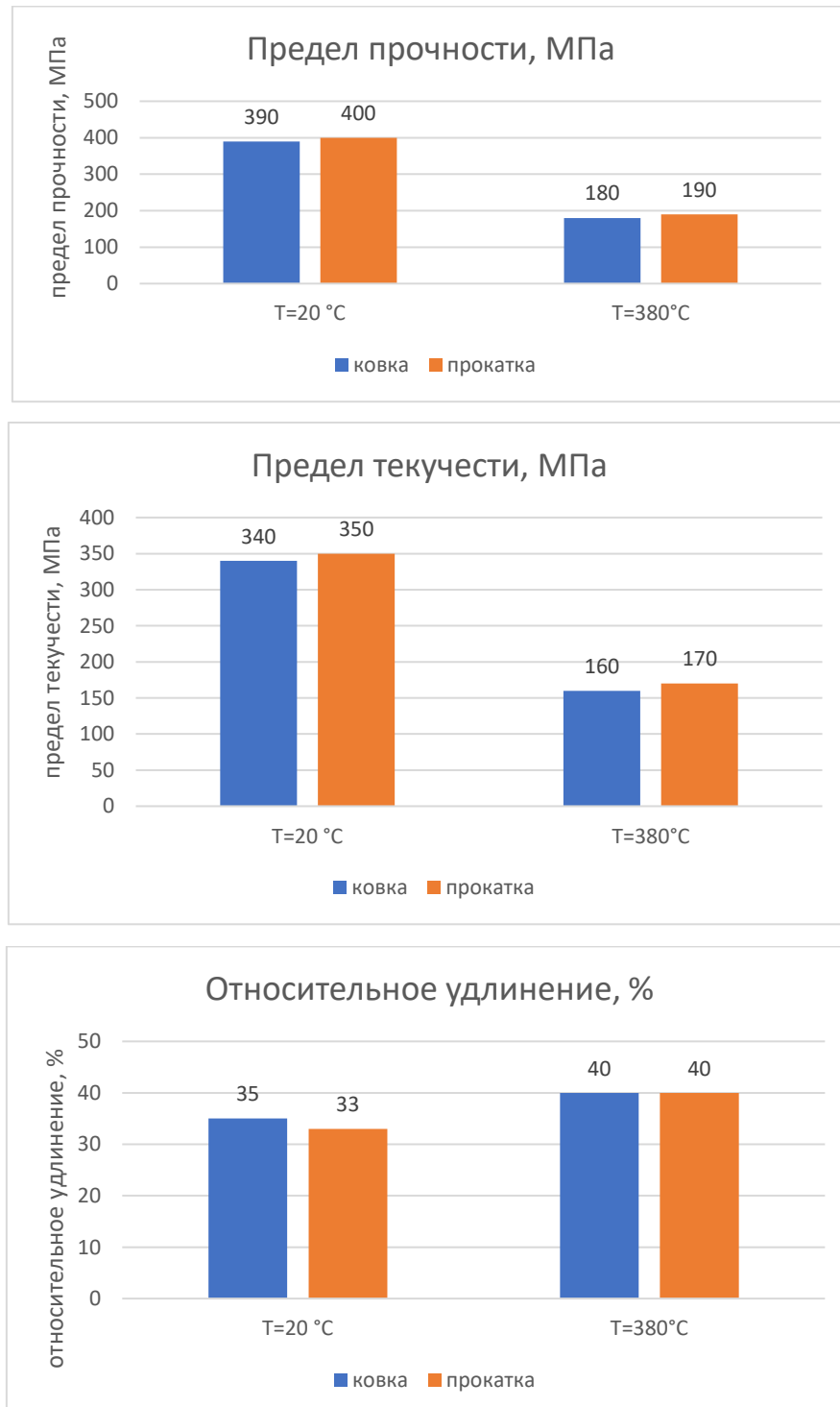


Рис. 9. Механические свойства на кольцевых образцах оболочечных труб в состоянии поставки

Таблица 2

Результаты микроструктуры, текстуры и предела текучести оболочечных труб из сплава Э110 в состоянии поставки

Способ обработки слитков	Микроструктура	Текстура			Предел текучести, Тисп.=380 °С		
		fr	ft	fa	$\sigma_{0,2}$, МПа поперечное направление	$\sigma_{0,2}$, МПа продольное направление	Коэффициент анизотропии, Ка
Вариант 1	Рекристал.	0,55	0,36	0,09	160	110	1,45
Вариант 2	Рекристал.	0,57	0,36	0,07	170	110	1,54

Таким образом, применение радиально-сдвиговой прокатки на стадии изготовления заготовок способствует формированию в материале готовых труб $\varnothing 9,10 \times 7,73$ мм более радиального типа текстуры и повышению прочностных характеристик, в большей степени в поперечном направлении, что приводит к увеличению значений коэффициента анизотропии. Получение более совершенной текстуры и высоких значений коэффициента анизотропии в материале оболочечных труб является положительным фактором с точки зрения улучшения эксплуатационных свойств, таких как увеличение сопротивления ползучести и прочности оболочек твэлов [4,5].

Выводы

В результате проведенных исследований установлено следующее:

- существующие особенности в деформировании металла при горячей обработке слитков ковкой и радиально-сдвиговой прокаткой влияют на формирование структуры, текстуры и твердости. Материал ковкой заготовки имеет более однородную по сечению деформированную макроструктуру. Для материала заготовок после прокатки

характерна неоднородная по сечению макроструктура с закручиванием структурных составляющих. Кованая заготовка имеет размытую текстуру внутренних слоев по сравнению с горячекатаной заготовкой, текстурные максимумы которой более интенсивные и четкие;

- выявленные отличия в формировании структурного состояния и текстуры в заготовках, полученных разными способами при горячей обработке слитков, влияют на характер формирования структуры, текстуры и свойств оболочечных труб готового размера. Так, применение радиально-сдвиговой прокатки на стадии изготовления заготовок способствует формированию в материале готовых труб $\varnothing 9,10 \times 7,73$ мм более радиального типа текстуры и повышению прочностных характеристик, в большей степени в поперечном направлении, что приводит к увеличению значений коэффициента анизотропии предела текучести;
- учитывая положительное влияние радиально-сдвиговой прокатки при обработке слитков на структурные и текстурные параметры готовых труб для оболочек твэлов с повышенными требованиями к их качеству, данный способ может быть рекомендован для применения в оптимизированном процессе их получения.

Список литературы

1. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. - М.: Энергоатомиздат, 1994, 256.
2. Заводчиков С.Ю., Металловедческие вопросы производства изделий из циркониевых сплавов. - Н.: Наука, 2012, 252.
3. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М.: Металлургия, 1990, 344.
4. Никулина А.В., Перегуд М.М., Саблин М.Н., Милешкина О.Ю. Влияние микроструктуры на анизотропию прочности оболочечных труб из сплава Э110. Вопросы атомной науки и техники, серия «Материаловедение и новые материалы», №4, 2018, с. 16-21.
5. Никулина А.В., Перегуд М.М., Коротченко Е.А. Влияние анизотропии прочности на деформационную стабильность оболочечных труб из сплава Э110 // Деформация и разрушение материалов, № 9, 2013, с. 22-25.

6. Актуганова Е.Н., Дубовицкая И.А., Резенов А.В. Газонасыщение изделий из циркониевого сплава Э110 в процессе их изготовления. Вопросы атомной науки и техники, серия «Металловедение и новые материалы», №1, 2018, с. 4-13

Поступила в редакцию / Received 16.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted 13.05.2025