

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ ТРУБ ИЗ СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Zr-2,5%Nb ПРИ ГОРЯЧЕМ ПРЕССОВАНИИ

А.А. Кабанов, В.Н. Соловьев, К.В. Ожмегов,
М.И. Сергачева, М.Г. Исаенкова, Ю.А. Перлович

В работе представлены результаты исследования влияния температурно-скоростных и деформационных параметров пластической обработки на формирование текстуры труб из сплава на основе циркония Zr-2,5%Nb при горячем прессовании. Было изучено влияние температуры нагрева заготовок, температуры прессования и отношения степеней деформации по стенке и по диаметру при прессовании. Исследования включали в себя разработку программы экспериментов и физическое моделирование влияния условий горячего прессования на свойства материала. В результате исследований получены и проанализированы зависимости сопротивления деформации от температуры нагрева и температуры испытаний при заданной степени и скорости деформации. Проанализированы dilatометрические кривые нагрева и охлаждения образцов. Определены зависимости влияния параметров горячего прессования на текстурное состояние труб.

Ключевые слова: трубы из сплава Zr-2,5%Nb, текстурное состояние, горячее прессование, параметры Кернса, физическое моделирование

INFLUENCE OF DEFORMATION-THERMAL PARAMETERS OF PLASTIC PROCESSING ON TEXTURE FORMATION OF TUBES OF ZIRCONIUM ALLOY ZR-2,5% Nb AT HOT EXTRUSION

A.A. Kabanov, V.N. Soloviev, K.V. Ozhmegov, M.I. Sergacheva,
M.G. Isaenкова, Ju.A. Perlovich

The paper presents the results of studying the influence of the temperature and strain rate parameters of plastic treatment on texture formation at the manufacture of Zr-2.5%Nb tubes of zirconium alloy. Analysis of technological parameters was carried out in hot extrusion conditions. There was studied the result of heating and extrusion temperature of blanks and ratio degree deformation wall and diameter tube on texture formation. Program of experiments for research and physical modeling of technological processes was developed. As a result of the research dependences of strain on heating and test temperature were obtained and analyzed for at the given degree and strain rate. The dilatometric curves of heating and cooling specimen were analyzed. The dependence of hot extrusion parameters on textural tubes was determined.

Keywords: Zr-2,5% Nb alloy tubes, crystallographic texture, hot extrusion, parameters Kearns, physical modeling.

Введение

Одной из важнейших характеристик труб давления, изготавливаемых из сплава Zr-2,5%Nb, является кристаллографическая текстура. Она определяет поведение труб при эксплуатации. Преимущественная ориентация зерен основной фазы циркониевых сплавов, а именно α -фазы с гексагональной плотно упакованной (ГПУ) решеткой, обусловлена анизотропией ее кристаллической структуры.

Преимущественно формирование текстуры при производстве труб давления происходит на стадии горячего прессования трубных заготовок в $(\alpha+\beta)$ -области, и затем в некоторой степени корректируется холодной деформацией. На основании литературных данных [1–4] в настоящем исследовании рассматривались в качестве технологических факторов, влияющих на текстуру прессованных гильз (и готовых труб давления):

- температура нагрева заготовок $T_{\text{наг}}$;
- температура начала деформации (испытаний) $T_{\text{и}}$;
- продолжительность переноса заготовки в контейнер прессы;
- коэффициент вытяжки μ ;
- скорость перемещения пресс-штемпеля прессы $V_{\text{пр}}$;
- соотношение деформации по стенке и по диаметру Q ,

$$Q = \frac{\ln(t_3/t_r)}{\ln((D_3 - t_3)/(D_r - t_r))}, \quad (1)$$

где t_3 и D_3 – толщина стенки и наружный диаметр заготовки; t_r и D_r – толщина стенки и наружный диаметр гильзы.

Зная зависимость влияния технологических параметров на формирование текстуры, можно скорректировать технологический процесс прессования для обеспечения стабильного получения необходимой текстуры гильз и готовых труб.

Влияние технологических факторов и их взаимодействие наиболее рационально исследовать методом физического моделирования с применением современного лабораторного оборудования [5].

Целью работы является исследование влияния условий горячего прессования на формирование текстуры в гильзах из сплава Zr-2,5%Nb.

Методика исследований

Исследования осуществлялись в два этапа: на первом этапе исследовались цилиндрические образцы размером $\varnothing 10 \times 12$ мм на пластометре-дилатометре *DIL805 A/D*; на втором этапе изучалось влияние на заготовки прессования на лабораторном вертикальном гидравлическом прессе с усилием 7,0 МН.

Пластометр-дилатометр *DIL805A/D* предназначен для определения коэффициента расширения, а также сопротивления деформации σ_s исследуемых металлов методом испытаний на сжатие. Его отличительной особенностью является возможность стабильной работы при высоких скоростях нагрева и охлаждения. Компьютерная система пластометра-дилатометра регистрирует происходящие структурные изменения в металле, а также усилие, затраченное на деформацию образцов, и выдает результаты испытаний в виде диаграмм «время – температура – изменение длины – напряжение».

Испытания на пластометре-дилатометре *DIL805A/D* проводились для регистрации изменения размеров образца сплава Zr-2,5%Nb в процессе нагрева и охлаждения до и после деформации, а также для определения влияния деформационно-термических параметров на сопротивление деформации σ_s исследуемого сплава. Образцы диаметром 5 мм и высотой 10 мм (рис. 1) вырезались из металла в состоянии перед прессованием (закаленное состояние). Испытания проводили в условиях горячего прессования в вакууме, в режимах, представленных в табл. 1.

Вакуумная система обеспечивала разрежение не менее $4,5 \times 10^{-3}$ мм. рт. ст. Образцы нагревались до $T_{\text{наг}}$ прямым пропусканием электрического тока со скоростью нагрева $a_n = 5^\circ\text{C}/\text{с}$. Контроль температуры нагрева образцов осуществлялся с помощью платинородиевой термопары, приваренной к образцу. Результаты испытаний записывались с разрешающей способностью $0,05^\circ\text{C}$. Для записи усилий при испытаниях использовались тензодатчики, а для записи деформаций – датчики перемещений подвижной траверсы.

Обработка результатов исследований и построение диаграмм упрочнения-разупрочнения исследуемого циркониевого сплава осуществлялась с помощью программного обеспечения *Microsoft Office Excel*.

Таблица 1

Программа пластометрических испытаний сплава Zr-2,5 % в условиях горячего прессования

№ исп.	$T_{\text{наг}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon}, \text{c}^{-1}$	ϵ	$a_0, ^\circ\text{C}/\text{c}$
1	840	800	0,5	0,6	0,5
2		775			
3		700			
4	815	800			
5		775			
6		700			

Примечание: $T_{\text{н}}$ – температура испытаний; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; ϵ – степень деформации; a_0 – скорость охлаждения после нагрева и деформации. Время выдержки при температуре нагрева – 300 с.

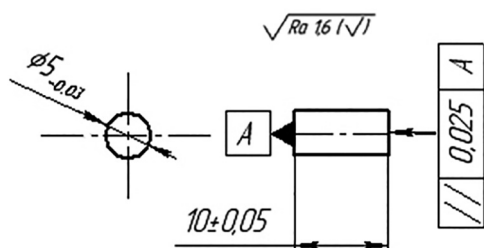


Рис. 1. Образец для пластометрических испытаний методом сжатия на DIL805A/D

Для проведения экспериментов на прессе усилием 7,0 МН были изготовлены четыре заготовки в закаленном состоянии. Для предотвращения газонасыщения и обеспечения требуемого качества поверхности гильз, перед прессованием на поверхность заготовок наносили медное подмазочное покрытие, затем смазку на основе графита. Нагрев заготовок перед прессованием осуществлялся в печи сопротивления. Режимы нагрева и прессования представлены в табл. 2.

После прессования отбирались кольцевые образцы от переднего и заднего конца каждой гильзы для проведения исследований текстуры.

Для количественной оценки текстуры поликристаллических материалов с ГПУ-решеткой применяются текстурные f -параметры (или параметры Кернса) по полюсной фигуре, и представляющие собой квадраты косинусов углов, образованных среднестатистической базисной нормалью решетки с тремя взаимно ортогональными координатными осями, ориентированными в радиальном (R), тангенциальном (T) и осевом (L) направлениях гильзы (рис. 2). Сумма параметров, согласно зависимостям пространственной геометрии, равна единице: $f_R + f_T + f_L = 1$ [4].

Исследования текстуры проводились на рентгеновском автоматизированном комплексе с использованием специализированной программы «ТЕКСТУРА-Р». Прямые полюсные фигуры (ППФ) (0001) α -Zr получали методом сшивки частичных прямых полюсных фигур, записанных для трех взаимно перпендикулярных поверхностей, в излучении Cu . По полным ППФ (0001) рассчитывали величины текстурных параметров Кернса и строили распределения базисных нормалей в R - T -сечении труб. Точность определения параметров Кернса составляла $\pm 0,02$.

Таблица 2

Режимы нагрева и прессования заготовок на вертикальном прессе усилием 7,0 МН

№ заготовки (гильзы)	$T_{\text{наг}}, ^\circ\text{C}$	μ	$V_{\text{пр}}, \text{мм/с}$	Q
1	815±10	10,2	11	4,4
2				6,5
3	845±10			4,4
4				6,5

Примечание. $V_{\text{пр}}$ – скорость прессования.

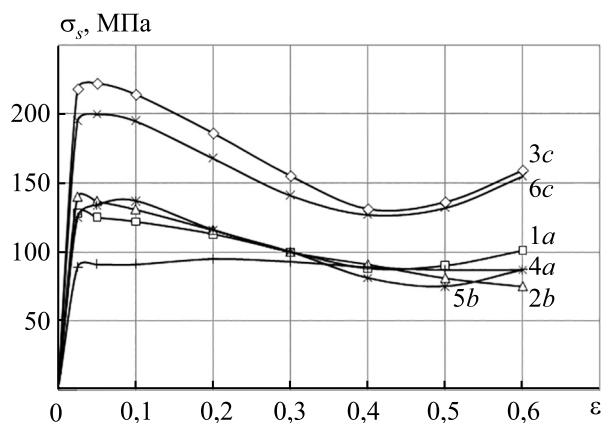


Рис. 2. Кривые течения $\sigma_s - \varepsilon$ сплава Zr-2,5%Nb, полученные в результате испытаний методом сжатия на DIL805A/D, при $T_{\text{наг}} = 815^\circ\text{C}$ (1–3) и $T_{\text{наг}} = 840^\circ\text{C}$ (4–6):
а – $T_{\text{и}} = 800^\circ\text{C}$; б – $T_{\text{и}} = 775^\circ\text{C}$; в – $T_{\text{и}} = 700^\circ\text{C}$

Результаты исследования

На рисунке 2 представлены результаты испытаний методом сжатия. Вид кривых течения $\sigma_s - \varepsilon$ в целом имеет одинаковый характер, отличается наличием ярко выраженного максимума сопротивления деформации σ_s в области деформации ε от 0 до 0,1. Положение максимума на кривых течения в первую очередь связано с типом кристаллической решетки (энергия дефекта упаковки $E_{\text{д.у}}$) и температурно-скоростными условиями деформации. Для металлов с малой $E_{\text{д.у}}$ максимум смещается в область более высоких степеней деформации. И наоборот, его положение будет тем ближе к началу координат, чем меньше скорость деформации и выше температура [6]. При деформации $\varepsilon > 0,1$ в металле наблюдается разупрочнение. Снижение величины сопротивления деформации σ_s связано с возрастающим влиянием процессов динамического разупрочнения и его можно объяснить суперпозицией следующих трех процессов: динамической рекристаллизацией, влиянием теплового эффекта пластической деформации и локализацией (неустойчивостью) течения, характерной для материалов с кристаллической решеткой ГПУ.

С увеличением деформации на кривой течения 4а сопротивление деформации σ_s стремится выйти на установившуюся стадию. Для кривых течения $\sigma_s - \varepsilon$ (кроме 2б и 4а) в диапазоне деформации $\varepsilon \approx 0,4 \div 0,6$ отмечается замедление процессов разупрочнения с последующим увеличением деформационного упрочнения. Причем для меньших значений $T_{\text{и}}$ (кривые течения 3с и 6с) стадия упрочнения более выражена.

На представленных результатах испытаний следует отметить влияние температуры нагрева $T_{\text{наг}}$ на величину σ_s . С повышением $T_{\text{наг}}$ до 840°C максимум на кривых течения менее выражен.

Дилатометрическая кривая сплава Zr-2,5%Nb при нагреве образца представлена на рис. 3. При нагреве образца до температуры $T \approx 600^\circ\text{C}$ коэффициент линейного расширения α_L находится в диапазоне от 5,0 до 5,8. В результате фазового превращения $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ при температуре $T > 600^\circ\text{C}$ показатель n искривления дилатометрической кривой ($n = \Delta L / \Delta T$, где ΔL – изменение геометрических размеров образца (по оси сжатия)) по экспоненте увеличивается от 0,03 до 0,56 с повышением температуры нагрева от $T = 600^\circ\text{C}$ до $T = 840^\circ\text{C}$. Интервал температур от 600 до 840°C на дилатометрической кривой (рис. 4) можно разбить на четыре участка:

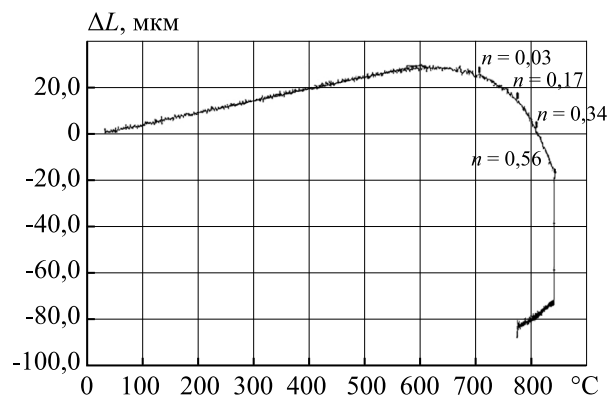


Рис. 3. Дилатометрическая кривая сплава Zr-2,5%Nb при $a_{\text{и}} = 5^\circ\text{C/s}$ до $T_{\text{наг}} = 840^\circ\text{C}$ перед сжатием на DIL805A/D (расширение образца)

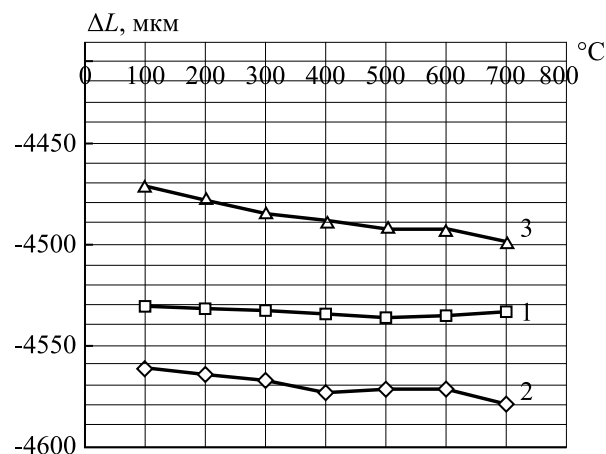


Рис. 4. Дилатометрические кривые сплава Zr-2,5%Nb при $a_0 = 0,5^\circ\text{C/s}$ от $T = 700^\circ\text{C}$ после испытания на сжатие на DIL805A/D: 1 – $T_{\text{наг}} = 815^\circ\text{C}$, $T_{\text{и}} = 800^\circ\text{C}$; 2 – $T_{\text{наг}} = 815^\circ\text{C}$, $T_{\text{и}} = 700^\circ\text{C}$; 3 – $T_{\text{наг}} = 840^\circ\text{C}$, $T_{\text{и}} = 700^\circ\text{C}$

1 – $T = 600 - 700$ °C, $n = 0,03$; 2 – $T = 700 - 775$ °C, $n = 0,17$; 3 – $T = 775 - 800$ °C, $n = 0,34$; 4 – $T = 800 - 840$ °C, $n = 0,56$. Участок 4 является верхней границей $\alpha + \beta$ области.

Из анализа результатов дилатометрических исследований охлаждения образцов после деформации следует, что чем меньше разница между $T_{\text{наг}}$ и $T_{\text{и}}$ тем меньше изменение размеров образца при охлаждении после деформации. Согласно результатам, представленным на рис. 4, размеры образца 1 изменились не более чем на 9 мкм, образца 2 – на 20 мкм, образца 3 – 30 мкм. Данные результаты могут быть связаны с релаксацией напряжений после деформации и происходящим в металле фазовым превращением $\alpha + \beta \rightarrow \alpha$.

По результатам, представленным на рис. 2–4, следует отметить положительное влияние сокращения разности температур между нагревом $T_{\text{наг}}$ и деформацией $T_{\text{и}}$ вблизи верхней границы $\alpha + \beta$ области в части снижения величины сопротивления деформации σ_s , уменьшения содержания α -фазы и стабильности геометрических размеров образца при охлаждении. Данный интервал температур определяет объемное соотношение α - и β -фаз, влияющее на формирование текстуры гильзы. Для получения текстуры с преобладающей тангенциальной ориентацией базисных нормалей α -зерен ($f_T > f_R > f_L$) доля α -фазы при прессовании (в $\alpha + \beta$ области) не должна превышать ~ 70 % [7]. При уменьшении содержания α -фазы тангенциальная ориентация базисных нормалей увеличивается [1, 8]. В то же время повышение температур нагрева и прессования в $\alpha + \beta$ области вызывает нежелательный рост α -зерен. Поэтому для следующего этапа работы был выбран темпера-

турный интервал, соответствующий верхней границе $\alpha + \beta$ области (табл. 2). Для обеспечения данного интервала ($T_{\text{наг}} = 815$ °C, $T_{\text{и}} = 800$ °C) необходимо было отработать режим переноса заготовок от печи к прессу.

Для горячего прессования применялись кованые заготовки после закалки с «рассеянной» текстурой металла со следующими параметрами Кернса: $f_R = 0,304$; $f_T = 0,324$; $f_L = 0,372$ [9]. В качестве варьируемых технологических параметров, влияющих на текстуру гильз рассматривались температура нагрева $T_{\text{наг}}$ и отношение деформаций по стенке и по диаметру гильзы (параметр Q).

В табл. 3 приведены усредненные по толщине стенки значения параметров Кернса, полученные на образцах прессованных гильз. Текстура гильз характеризуется низким значением параметра f_R и высоким f_L .

Оптимальные значения текстурных параметров по длине гильзы сплава Zr-2,5%Nb получены при температуре нагрева под прессованием 815 °C. Нагрев гильзы до 845 °C приводит к относительной неоднородности параметров Кернса.

Существенное влияние изменение параметра Q на текстуру гильз при заданных температурах нагрева заготовок не отмечено. Некоторое различие текстурных параметров по концам гильзы является следствием более интенсивного захлаживания заднего конца заготовки в процессе прессования.

На рис. 5 представлены результаты исследования изменения текстуры по толщине стенки гильзы при $T_{\text{наг}} = 845 \pm 10$ °C (см. рис. 5, а) и $T_{\text{наг}} = 815 \pm 10$ °C (см. рис. 5, б). Из сравнения результатов следует отметить большую неоднородность текстуры по толщине стенки при $T_{\text{наг}} = 845 \pm 10$ °C (см. рис. 5, а). Данная неоднород-

Таблица 3

Результаты горячего прессования заготовок из сплава Zr-2,5%Nb
на вертикальном гидравлическом прессе усилием 7,0 МН

№ заготовки (гильзы)	$T_{\text{наг}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Q	Сечение гильзы	Текстурные параметры Кернса		
				f_R	f_T	f_L
1	815±10	4,4	Переднее	0,32	0,59	0,09
			Заднее	0,34	0,59	0,09
2		6,5	Переднее	0,31	0,60	0,09
			Заднее	0,33	0,60	0,07
3	845±10	4,4	Переднее	0,25	0,59	0,16
			Заднее	0,29	0,60	0,12
4		6,5	Переднее	0,27	0,58	0,14
			Заднее	0,33	0,54	0,13

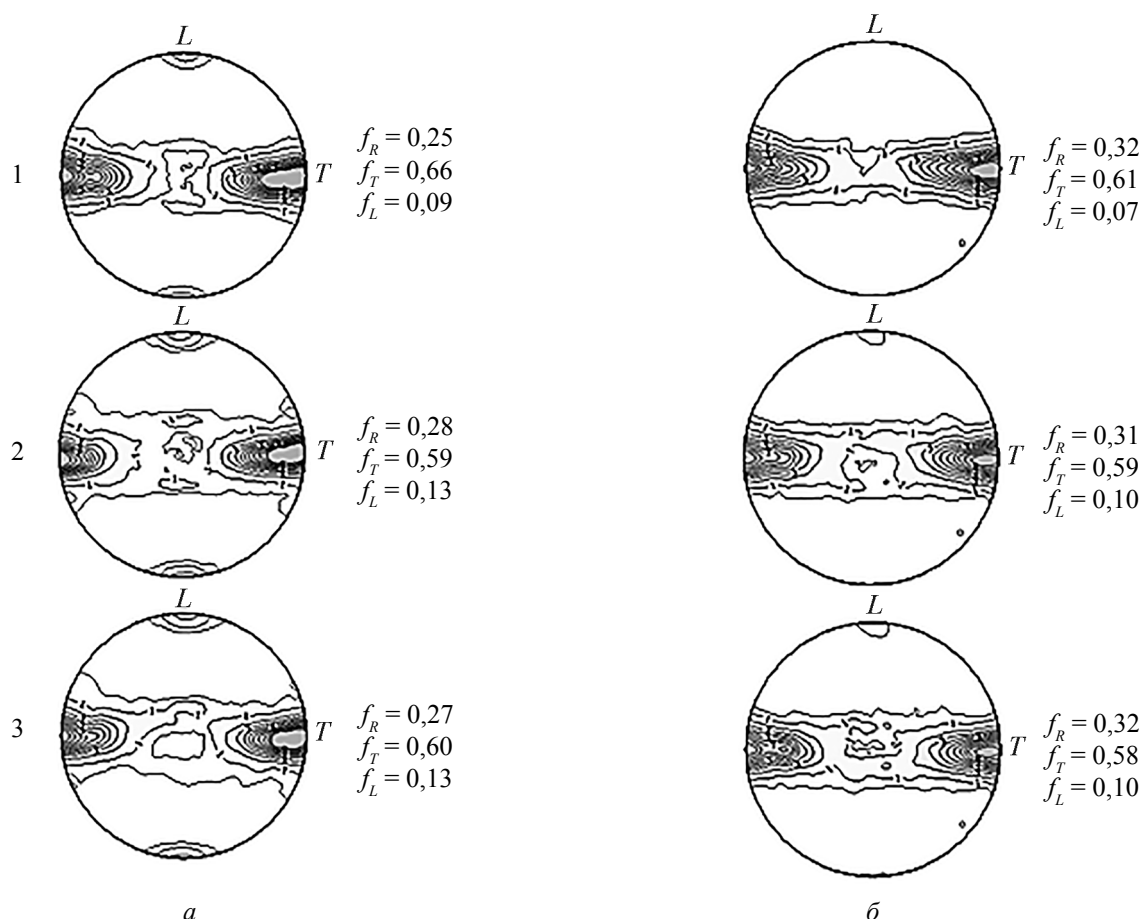


Рис. 5. Полусные фигуры ППФ (0001)R и текстурные параметры в различных зонах стенки прессованной гильзы при:

а) $T_{\text{наг}} = 845 \pm 10$ °C и б) $T_{\text{наг}} = 815 \pm 10$ °C; 1 – внешние слои; 2 – средние слои; 3 – внутренние слои

родность связана с большим градиентом температуры начала деформации T_n по толщине стенки заготовки.

Для обеспечения стабильной температуры металла в процессе прессования необходимо сократить продолжительность переноса заготовки в контейнер прессы и увеличить скорость прессования $V_{\text{пр}}$, что позволит приблизить условия прессования к изотермическим и повысить однородность текстуры по сечению и длине гильзы.

Выводы

По результатам исследований сформулированы следующие выводы:

Отмечено положительное влияние на увеличение параметра f_T уменьшение разницы температур нагрева и начала деформации вблизи верхней границы $\alpha + \beta$ области, а именно, снижение величины сопротивления деформации σ_s , уменьшение содержания α -фазы и стабильности геометрических размеров образца при охлаждении.

При прессовании на прессе усилием 7,0 МН с температурами нагрева заготовок 815 °C

и 845 °C и значениями параметра $Q = 4,4$ и $Q = 6,5$ более выражены тангенциальная ориентация и однородность текстуры у гильз, полученных с температурой нагрева $T_{\text{наг}} = 815 \pm 10$ °C.

Для повышения текстурной однородности по длине гильз необходимо минимизировать продолжительность переноса нагретой заготовки в контейнер прессы и увеличить скорость прессования.

Заключение

Результаты проведенной работы могут быть использованы при разработке рекомендаций по совершенствованию режимов деформационно-термической обработки сплава Zr-2,5%Nb при производстве труб давления, а также в качестве входных параметров для математического моделирования исследуемого процесса.

На основе результатов настоящего исследования были обоснованы и внедрены в производство технологические режимы горячего прессования заготовок, обеспечивающие стабильное получение требуемой текстуры гильз и готовых труб.

Список литературы

1. Effect of Extrusion Variables on Crystallographic Texture of Zr-2,5 wt% Nb / R.A. Holt, S.A. Aldridge // Journal of Nuclear Materials. Vol. 135 (1985). Pp. 246–259.
2. Development of local microstructure and crystallographic texture in extruded Zr–2.5Nb tubes / Y. Li, R. Rogge, R.A. Holt // Materials Science and Engineering A 437 (2006). Pp. 10–20.
3. Development of texture and structure in Zr-2,5 wt%Nb extruded tubes / B.A. Cheadle, S.A. Aldridge, C.E. Ells // Canadian metallurgical quarterly, Volume 11, Number 1 (1972). Pp. 121–127.
4. Исаенкова М.Г. Закономерности развития кристаллографической текстуры и субструктурной неоднородности в циркониевых сплавах при деформационном и термическом воздействиях: дис. док. ф-м. наук. Москва, 2011. С. 425.
5. Исследование влияния деформационно-скоростных условий пильгерной прокатки на качество труб и характеристики сплава Zr-1%Nb / Ожмегов К.В., Сергачева М.И., Кабанов А.А. // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 3 (52). С. 16–21.
6. Мочалов Н.А., Галкин А.М., Мочалов С.Н. Пластометрические исследования металлов. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 318 с.
7. Holt W.Li, R., Tracy S. Polycrystalline Modeling of the Effect of Texture and Dislocation Microstructure on Anisotropic Thermal Creep of Pressurized из Zr-2,5%Nb Tubes // Zirconium in the Nuclear Industry: 16th International Symposium. (2010). Pp. 298–325.
8. Cheadle B.A. The Development of Zr-2,5%Nb Tubes for CANDU Reactors // Zirconium in the Nuclear Industry. 16th International Symposium. (2010). P. 67–87.
9. The Effects of Temperature, Speed and Deformation Parameters of Plastic Processing on the Formation of Texture and Structure in the Manufacture of Tubes of E125 Type Zirconium Alloy / M. Sergacheva, V. Soloviev, M. Astrakhancev, O. Ermakov, A. Kabanov, V. Novikov // 10-th International Conference WWER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support. 2013. Pp. 479–492.

Материал поступил в редакцию 06.12.2017

КАБАНОВ Александр Анатольевич E-mail: AAKabanov@bochvar.ru Тел.: (499) 190-84-38	Зам. директора отделения, начальник отдела АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: обработка металлов давлением. Автор более 80 научных статей.
СОЛОВЬЕВ Вадим Николаевич Тел.: (499) 190-84-38	Старший научный сотрудник АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: обработка металлов давлением. Автор более 80 научных статей.
ОЖМЕГОВ Кирилл Владимирович E-mail: kirillozhmegov@yandex.ru Тел.: (499) 190-84-38	Кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: физическое моделирование процессов ОМД, исследование реологических характеристик цветных сплавов. Автор более 30 научных статей.
СЕРГАЧЕВА Мария Игоревна E-mail: mrs.deetz@gmail.com Тел.: (499) 190-84-38	Аспирант, инженер-технолог 1 кат, АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: металловедение и термическая обработка металлов, трибология, механика разрушения, обработка металлов давлением. Автор 5 научных статей.
ИСАЕНКОВА Маргарита Геннадьевна E-mail: isamarg@mail.ru Тел.: (495) 788-56-99 доб. 9639	Доктор физико-технических наук, профессор НИЯУ МИФИ. Сфера научных интересов: физические проблемы материаловедения, рентгеновские методы исследования структуры и текстуры материалов. Автор 7 монографий и более 180 научных статей.
ПЕРЛОВИЧ Юрий Анатольевич E-mail: yuperl@mail.ru Тел.: (495) 788-56-99 доб. 9638	Доктор физико-технических наук, профессор НИЯУ МИФИ. Сфера научных интересов: физические проблемы прочности, рентгеновские методы исследования структуры и текстуры материалов. Автор 8 монографий и более 220 научных статей.