

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-9-46-51>

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ПОЛИКРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ ТЕКСТУРНЫХ ДАННЫХ

© Андрей Викторович Степаненко

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19; e-mail: avstep@mail.ru

*Статья поступила 16 января 2019 г. Поступила после доработки 20 июня 2019 г.  
Принята к публикации 25 июня 2019 г.*

Представлены результаты исследования взаимосвязи кристаллографической текстуры поликристаллических материалов и анизотропии их физико-механических свойств. Приведен обзор методов расчета анизотропных свойств поликристаллов на основе данных, полученных рентгеновскими методами прямых и обратных полюсных фигур. Расчетные методы, основанные на применении функции распределения ориентировок кристаллитов, требуют использования больших объемов экспериментальных данных, поэтому они не пригодны для экспресс-оценки уровня анизотропии физических свойств образцов при их термомеханической обработке. Предложена методика для определения анизотропных свойств, использующая «ориентационные факторы». С помощью экспериментальных данных рентгенографического анализа (метод обратных полюсных фигур) получены выражения для расчета абсолютного и относительного отклонений физического параметра текстурированного поликристалла от его значения в изотропном состоянии. Оценены вклады отдельных кристаллографических ориентировок в формирование анизотропии свойств образца. Исследована динамика количественных изменений анизотропных свойств поликристалла в процессе текстурообразования. Для анализа источника наиболее быстрых изменений анизотропии свойств использовали коэффициенты матрицы «отклика», расчет которых не зависит от результатов конкретных дифрактометрических измерений, а является общим для всех металлов с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) — решеткой. Расчет анизотропии коэффициента теплопроводности, удельной электропроводности и температуропроводности выполняли для образцов деформированного иттрия, прошедших холодную прокатку со степенью обжатия  $\varepsilon = 25\%$ . Установили, что конечные физические свойства поликристалла с ГПУ-структурой в значительной степени определяются пирамидальными кристаллографическими ориентировками  $\{10\bar{1}5\}$ ,  $\{11\bar{2}4\}$ .

**Ключевые слова:** поликристаллы, текстура; анизотропия; структура; деформация; редкоземельные металлы; рентгеновский анализ; дифракция.

## STUDY OF THE ANISOTROPY OF THE POLYCRYSTAL PROPERTIES BASED ON TEXTURE DATA

© Andrej V. Stepanenko

Yeltsin Ural Federal University; ul. Mira 19, Yekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: avstep@mail.ru

*Received January 16, 2019. Revised June 20, 2019. Accepted June 25, 2019.*

The results of studying correlation between the crystallographic texture of polycrystalline materials and anisotropy of their physical and mechanical properties are considered. The methods for calculating the anisotropic properties of polycrystals based on the data obtained by X-ray methods of direct and inverse pole figures are reviewed. Calculation methods based on the use of the distribution function of crystallite orientations require the use of a large amount of experimental data and, hence, they are not suitable for express estimation of the anisotropy level of the physical properties of samples upon their thermomechanical processing. A method for rapid estimation of the anisotropic properties of the sample based on the use of  $\Delta_i$  (“orientation factors”) in the calculations, is proposed. Experimental data of X-ray analysis (method of inverse pole figures) are used to calculate the absolute and relative deviations of the physical parameter of textured polycrystal from the same value in the isotropic sample. The contributions of individual crystallographic orientations to the formation of the anisotropy of the properties of the sample are estimated. The dynamics of quantitative changes in the anisotropic properties of a polycrystal in the process of texture formation is studied. To analyze the source of the most rapid changes in the anisotropy of properties, we used the coefficients of the “response” matrix, the calculation of which does not depend on the results of specific diffractometric measurements, but is common for all metals with a hexagonal close-packed (hcp) lattice. The anisotropy of the coefficient of thermal conductivity, electrical conductivity, and thermal diffusivity was calculated for the samples of deformed yttrium which underwent cold

rolling with a reduction ratio of  $\varepsilon = 25\%$ . It is shown that the final physical properties of the hcp polycrystal are largely determined by the pyramidal crystallographic orientations  $\{10\bar{1}5\}$ ,  $\{11\bar{2}4\}$ . The results of the study form a basis for analysis of the anisotropy of the physical properties of hcp-metal samples upon thermomechanical processing.

**Keywords:** polycrystal; texture; anisotropy; structure; deformation; rare-earth metals; X-ray analysis; diffraction.

## Введение

Физические свойства поликристаллических материалов во многом определяются их кристаллографической текстурой [1 – 3]. Среди факторов, определяющих уровень анизотропии физико-механических свойств металлических материалов, можно выделить анизотропные свойства отдельного монокристалла, функциональное распределение кристаллитов по ориентировкам, степень рассеяния текстурных компонент, сформированных при термомеханической обработке [4 – 9].

Существуют различные методики расчета физико-механических параметров поликристаллов на основе экспериментальных данных об их текстуре. Методы, основанные на использовании функции распределения ориентировок кристаллитов (ФРО), предполагают значительный объем вычислений с применением аппроксимации данных и расчета средних (интегральных) текстурных параметров. Зная ФРО, можно определить анизотропию упругих, пластических, прочностных и магнитных характеристик текстурированных поликристаллов [10 – 15]. Однако ее расчеты (с помощью гармонического метода) на основе измерений полюсных фигур, сопряженные с известными трудностями [16, 17], не получили широкого распространения на практике.

Анизотропные свойства поликристаллов можно также описать с помощью подхода, основанного на методах статистического материаловедения, учитывающих сформированную текстуру материала [18 – 20]. Но и он требует существенного временного ресурса для вычислений.

Таким образом, подобные методы мезомеханики не пригодны для экспресс-оценки анизотропных параметров поликристаллов.

Цель работы — разработка методики оценки отклонения анизотропных физических параметров поликристалла от параметров бестекстурного эталона и определения вклада различных кристаллографических ориентировок в формирование анизотропии образца при его термомеханической обработке.

## Методика расчета анизотропии физических свойств поликристаллов

Предлагаемая методика, основанная на использовании текстурных параметров [3], поз-

воляет рассчитывать анизотропные характеристики металлов, имеющих гексагональную плотноупакованную структуру (ГПУ-структуру), оценивать абсолютное и относительное отклонения величины физического параметра текстурированного поликристалла от значения в изотропном образце, а также определять вклад кристаллографических ориентировок в анизотропию физических свойств. Кроме того, она дает возможность исследовать динамику количественных изменений анизотропных параметров в процессе текстурообразования. В расчетах использовали данные дифрактометрических измерений по методу обратных полюсных фигур (ОПФ) [21].

Анизотропные физические параметры монокристаллов (в случае гексагональной структуры) описываются величинами тензоров второго ранга. При этом имеются только две независимые величины, задающие тензор. Поэтому выражение, связывающее величину некоторого физического параметра поликристалла ( $S_i$ ), измеренного в  $i$ -м направлении, можно выразить через текстурный параметр ( $\Delta_i$ ) и монокристаллические константы:

$$S_i = S_{\perp}^M + (S_{\parallel}^M - S_{\perp}^M)\Delta_i, \quad (1)$$

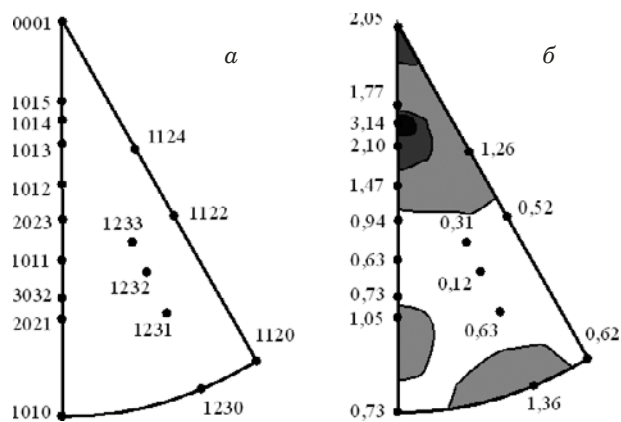
где  $S_{\perp}^M$ ,  $S_{\parallel}^M$  — значения физической величины, полученные при измерении в направлении, перпендикулярном гексагональной оси монокристалла, и вдоль нее.

Текстурный параметр — усредненная безразмерная величина, зависящая от элементов матрицы поворота отдельных кристаллитов относительно осей, связанных с поликристаллическим образцом [3]:

$$\Delta_i = \langle \varphi_{i1}^2 \varphi_{i2}^2 + \varphi_{i2}^2 \varphi_{i3}^2 + \varphi_{i3}^2 \varphi_{i1}^2 \rangle. \quad (2)$$

Усреднение элементов матрицы поворота ( $\varphi_{ik}$ ) должно проводиться по всему объему поликристалла. Следовательно,

$$\Delta_i = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} (Q_{i1}^2 Q_{i2}^2 + Q_{i2}^2 Q_{i3}^2 + Q_{i3}^2 Q_{i1}^2) \times \\ \times F(\varphi, \psi, \theta) \sin \theta d\varphi d\psi d\theta. \quad (3)$$



**Рис. 1.** Текстура холоддеформированного иттрия в направлении нормали к плоскости проката: *a* — кристаллографические ориентировки; *b* — распределение полюсной плотности на ОПФ

**Fig. 1.** The texture of cold-deformed yttrium in the direction normal to the rolling plane: *a* — crystallographic orientations; *b* — distribution of the pole density on the inverse pole figure

При усреднении  $\Delta_i$  рассчитывали с использованием коэффициентов по Моррису [10]:

$$\Delta_i = f_n \cos^2 \theta_{in} = P_n A_n \cos^2 \theta_{in}, \quad (4)$$

где  $f_n$  — доля кристаллитов с  $n$ -й ориентировкой в текстуре образца;  $P_n$  — полюсные плотности на ОПФ;  $\theta_{in}$  — угол между гексагональной осью кристаллитов с  $n$ -й ориентировкой и  $i$ -й осью образца;  $A_n$  — коэффициент Морриса.

При термомеханической обработке металлов меняется их текстура и, как следствие, меняются физико-механические свойства. В случае оценки скоростных параметров текстурообразования и динамики изменения физических свойств необходимо сравнить ОПФ, полученные на данном этапе обработки, с результатами предшествующего этапа. Для экспресс-оценки анизотропии свойств в произвольный момент технологического процесса требуется расчет отклонения текстурного состояния материала от состояния изотропного эталона.

Сравнивая физический параметр текстурированного образца ( $S_i$ ), измеренного в  $i$ -м направлении, с величиной изотропного эталона ( $S_{\text{изотр}}$ ), можно определить

$$\Delta S_i = S_i - S_{\text{изотр}} = (S_{\parallel}^{\text{м}} - S_{\perp}^{\text{м}})(\Delta_i - \Delta_{\text{изотр}}), \quad (5)$$

где  $\Delta_{\text{изотр}}$  — текстурный параметр, рассчитанный для изотропного эталона.

В случае малых текстурных изменений, учитывая  $\Delta S^{\text{м}} = S_{\parallel}^{\text{м}} - S_{\perp}^{\text{м}}$ , для элементарного изменения физического параметра поликристалла по-

лучаем (суммирование по повторяющимся индексам):

$$dS_i = \Delta S^{\text{м}} A_n \cos^2(\theta_{in}) \frac{\partial P_n}{\partial P_k} dP_k. \quad (6)$$

Для интегрального отклонения величины физического параметра в  $i$ -м направлении в текстурированном образце от значения в бестекстурном эталоне в случае пренебрежения корреляционными связями для полюсных плотностей на ОПФ получаем

$$\Delta S_i = \sum_{n=1}^{17} \Delta S_{in} = \sum_{n=1}^{17} \Delta S^{\text{м}} A_n \cos^2(\theta_{in}) \Delta P_n,$$

где  $\Delta P_n = P_n - P_{\text{изотр}} = P_n - 1$  ( $P_{\text{изотр}}$  — полюсная плотность для изотропного эталона).

Для анализа анизотропного состояния образца использовали безразмерную величину  $\eta_i$  — относительное отклонение  $S_i$  от  $S_{\text{изотр}}$ :

$$\eta_i = \frac{\Delta S_i}{S_{\text{изотр}}} = \sum_{n=1}^{17} \eta_{in} =$$

$$= \sum_{n=1}^{17} \frac{\Delta S^{\text{м}}}{S_{\text{изотр}}} A_n \cos^2(\theta_{in}) (P_n - 1). \quad (7)$$

Отрицательные  $\eta_{in}$  приравнивали к нулю, так как они не могут понижать анизотропию ниже изотропного состояния.

Относительный вклад каждой из исследуемых кристаллографических ориентировок в анизотропию физического параметра поликристалла составляет:

$$f_{in} = \frac{\eta_{in}}{\sum_{n=1}^{17} \eta_{in}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

«Эффективность» отдельных кристаллографических ориентировок ( $D_i$ ) в процессе формирования анизотропии свойств при текстурообразовании определяли, оценивая частные производные относительного отклонения от изотропности по величинам полюсных плотностей на ОПФ (суммирование по повторяющимся индексам):

$$\begin{aligned} D_{ik} &= \frac{\partial \eta_i}{\partial P_k} = \frac{\Delta S^{\text{м}}}{S_{\text{изотр}}} A_n \cos^2(\theta_{in}) \frac{\partial P_n}{\partial P_k} = \\ &= \frac{\Delta S^{\text{м}}}{S_{\text{изотр}}} A_n \cos^2(\theta_{in}) \delta_{nk} = \frac{\Delta S^{\text{м}}}{S_{\text{изотр}}} R_{ik}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $R_{ik} = A_n \cos^2(\theta_{in}) \delta_{nk}$  — безразмерные параметры (элементы матрицы отклика).

Параметры  $D_{ik}$  характеризуют «отклик»  $S$  в  $i$ -м направлении на единичное изменение полюс-

ной плотности  $k$ -й ориентировки на ОПФ. Безразмерные параметры  $R_{ik}$  не связаны с конкретным физическим параметром поликристалла, они отражают общие закономерности формирования анизотропии свойств текстурированных материалов.

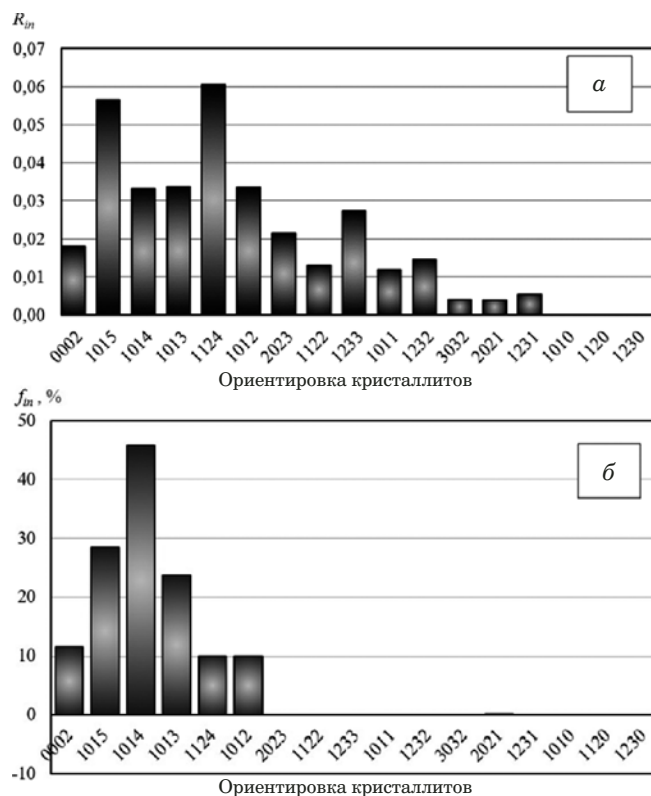
## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты рентгеновского анализа текстуры поликристаллического образца иттрия после деформации холодной прокаткой со степенью обжатия  $\varepsilon = 25\%$ . Исходное состояние образца близко к бестекстурному, что позволяет не учитывать влияние фактора «наследственности» текстуры в процессе текстурообразования при пластической деформации. В текстуре деформированного материала выделяются преимущественные базисная (0001) и пирамидальные  $\{10\bar{1}5\}$ ,  $\{10\bar{1}3\}$  кристаллографические ориентировки, что фиксировали также при осадке иттрия [22]. Такой тип формирующейся при прокатке текстуры — следствие развитого призматического  $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$  и базисного  $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$  (0001) $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  скольжений [23].

Результаты расчета анизотропии коэффициентов теплопроводности ( $\lambda$ ), температурного линейного расширения ( $\alpha$ ) и удельного сопротивления ( $\rho$ ) (монокристаллические параметры, использованные при вычислениях, соответствовали температуре  $T = 300\text{ К}$  [24]) приведены в таблице ( $S_{\perp}$ ,  $S_{\parallel}$  соответствуют перпендикулярному и параллельному гексагональной оси кристаллита направлениям,  $\Delta S_i$  и  $\eta_i$  определены для  $i$ -го направления в образце, совпадающего с направлением нормали к плоскости прокатки).

Видно, что абсолютные ( $\Delta S$ ) и относительные ( $\eta$ ) отклонения значений физических параметров, характеризующих состояние деформированного образца, от значений в изотропном состоянии по своему знаку и величине соответствуют исходным монокристаллическим параметрам.

Рассчитанные элементы матрицы «отклика»  $R_{in}$  и вклады кристаллографических ориентировок кристаллитов  $f_{in}$  в анизотропию физических параметров текстурированного образца иттрия представлены на рис. 2 ( $i$ -е направление соответствует нормали к плоскости проката,  $n$ -е — описывает монокристаллическую ориентировку).



**Рис. 2.** Величины безразмерных параметров  $R_{in}$  (а) и  $f_{in}$  (б) для поликристаллического образца иттрия

**Fig. 2.** Values of the dimensionless parameters  $R_{in}$  (a) and  $f_{in}$  (b) for the polycrystalline yttrium sample

Установили, что в ходе текстурообразования, протекающего во время обработки материала, наиболее значимы для формирования конечных физических свойств поликристалла динамические изменения, происходящие с пирамидальными кристаллографическими ориентировками  $\{10\bar{1}5\}$ ,  $\{11\bar{2}4\}$  (см. рис. 2, а). Изменение полюсных плотностей на ОПФ для них следует рассматривать как источник наиболее быстрых изменений анизотропии физических параметров обрабатываемого металла.

Наибольший вклад в анизотропию физических параметров исследуемого образца внесли пирамидальные кристаллографические ориентировки  $\{10\bar{1}4\}$ ,  $\{10\bar{1}5\}$ ,  $\{10\bar{1}3\}$ , расположенные в угловой области  $15 - 35^\circ$  относительно гексагональной оси монокристаллов иттрия (см. рис. 2, б).

Результаты расчета анизотропных параметров поликристаллического иттрия

The results of the calculation of the anisotropic parameters of polycrystalline yttrium

| Параметр                                       | $S_{\perp}$ | $S_{\parallel}$ | $\langle S \rangle$ | $(S_{\parallel} - S_{\perp})/\langle S \rangle$ | $\Delta S_i$ | $\eta, \%$ |
|------------------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------------------------------|--------------|------------|
| $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | 11,80       | 14,90           | 12,70               | 0,24                                            | 0,48         | 3,79       |
| $\alpha \cdot 10^6, \text{К}^{-1}$             | 4,68        | 17,10           | 9,00                | 1,38                                            | 1,93         | 21,45      |
| $\rho \cdot 10^8, \text{Ом} \cdot \text{м}$    | 80,50       | 39,50           | 66,70               | -0,61                                           | -6,37        | -9,56      |

## Заключение

Таким образом, представленную методику расчета анизотропных физических свойств металлов с ГПУ-решеткой по данным рентгеновского текстурного анализа можно использовать для экспресс-оценки физических параметров образцов в ходе их термомеханической обработки. Методика позволяет рассчитывать отклонения величины того или иного физического параметра от его значения в бестекстурном эталоне. Кроме того, можно определить, какие кристаллографические ориентировки — источник наиболее быстрых изменений физических свойств материала, а также оценить вклад различных ориентировок кристаллитов в анизотропию конечного состояния образца. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических процессов обработки металлов при производстве материалов с заданным уровнем анизотропии физических свойств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kocks F., Tomé C., Wenk H.-R. Texture and Anisotropy. Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Material Properties. — Cambridge University Press. 2000. — 676 p.
2. Hielscher R., Mainprice D., Schaeben H. Material Behavior: Texture and Anisotropy. In: Freedon W., Nashed M., Sonar T. (eds). Handbook of Geomathematics. — Berlin: Springer, 2010. P. 973 – 1003. DOI: 10.1007/978-3-642-01546-5\_33.
3. Адамеску Р. А., Гельд П. В., Митюшов Е. А. Анизотропия физических свойств металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 136 с.
4. Wenk H.-R., Van Houtte P. Texture and anisotropy / Rep. Prog. Phys. 2004. Vol. 67. N 8. P. 1367. DOI: 10.1088/0034-4885/67/8/R02.
5. Михеев В. А., Зайцев В. М. Анизотропные материалы. — Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2012. — 79 с.
6. Золоторевский Н. Ю., Рыбин В. В. Фрагментация и текстуробразование при деформации металлических материалов. — СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2014. — 208 с.
7. Бецофен С. Я., Ильин А. А., Скворцова С. В., Филатов А. А., Дзунович Д. А. Закономерности формирования текстуры и анизотропии механических свойств в листах титановых сплавов / Металлы. 2005. № 2. С. 54 – 62.
8. Ohta K., Nishihara Yu., Sato Yu., Hirose K., Yagi T., Kawaguchi S., Hirao N., Ohishi Ya. An Experimental Examination of Thermal Conductivity Anisotropy in hcp Iron / Frontiers in Earth Science. 2018. Vol. 6. N 176. P. 1 – 15. DOI: 10.3389/feart.2018.00176.
9. Luzin V., Gnaupel-Herold T., Prask H. Evaluation of local and global elastic properties of textured polycrystals by means of FEM / Material science forum. 2002. P. 407 – 412.
10. Бородинкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 272 с.
11. Колбасников Н. Г. Физические основы пластической обработки металлов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. — 268 с.
12. Иванов А. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. — М.: МИСИС, 2009. — 22 с.
13. Фарбер В. М., Архангельская А. А. Дифракционные методы анализа. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. — 113 с.
14. Ivanova T. M., Savolova T. I., Sypchenko M. V. The Modified Component Method for Calculation of Orientation Distribution Function from Pole Figures / Inverse Problems in Science and Engineering. 2010. Vol. 18. P. 163 – 171.

15. Паромов В. В. Изучение текстур металлических листов методом прямых полюсных фигур. — СПб.: Петербургский гос. политех. ун-т, Ин-т металлургии, машиностроения и транспорта, 2013. — 35 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id17-8.
16. Серебряный В. Н., Куртасов С. Ф., Литвинович М. А. Изучение ошибок ФРО при обращении полюсных фигур с использованием статистического метода гребневых оценок / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 4. С. 29 – 35.
17. Иванкина Т., Маттис З. О развитии количественного текстурного анализа и применении его в решении задач науки о земле / Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. Вып. 3. С. 665 – 758.
18. Митюшов Е. А., Одинцова Н. Ю., Берестова С. А. Формальная схема расчета эффективных упругих свойств текстурованных металлов / Математическое моделирование систем и процессов. 2003. № 11. С. 76 – 80.
19. Гречников Ф. В., Ерисов Я. А. Разработка критерия пластичности для расчетов формообразования высокотекстурованных анизотропных заготовок / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 1(32). С. 94 – 99.
20. Трусев П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Статистические модели / Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14(4). С. 17 – 28.
21. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. — М.: МИСИС, 2002. — 306 с.
22. Adamesku R. A., Grebenkin S. V., Stepanenko A. V. Texture and Deformation Mechanism in Yttrium / Physics of Metals and Metallography. 1992. Vol. 74. N 5. P. 535 – 537.
23. Степаненко А. В. Текстуробразование при осадке и рекристаллизационном отжиге гадолиния / Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 3. № 6. С. 85 – 88.
24. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.

## REFERENCES

1. Kocks F., Tomé C., Wenk H.-R. Texture and Anisotropy. Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Material Properties. — Cambridge University Press. 2000. — 676 p.
2. Hielscher R., Mainprice D., Schaeben H. Material Behavior: Texture and Anisotropy. In: Freedon W., Nashed M., Sonar T. (eds). Handbook of Geomathematics. — Berlin: Springer, 2010. P. 973 – 1003. DOI: 10.1007/978-3-642-01546-5\_33.
3. Adamesku R. A., Gel'd P. V., Mityushov E. A. Anisotropy of the physical properties of metals. — Moscow: Metallurgiya, 1985. — 136 p. [in Russian].
4. Wenk H.-R., Van Houtte P. Texture and anisotropy / Rep. Prog. Phys. 2004. Vol. 67. N 8. P. 1367. DOI: 10.1088/0034-4885/67/8/R02.
5. Mikheev V. A., Zaitsev V. M. Anisotropic materials. — Samara: Samar. gos. aerokosm. univ., 2012. — 79 p. [in Russian].
6. Zolotorevsky N. Yu., Rybin V. V. Fragmentation and texturization during deformation of metallic materials. — SPb.: Izd-vo Politekh. univ., 2014. — 208 p. [in Russian].
7. Betsofen S. Ya., Il'in A. A., Skvortsova S. V., Filatov A. A., Dzunovich D. A. Patterns of formation of texture and anisotropy of mechanical properties in sheets of titanium alloys / Metally. 2005. N 2. P. 54 – 62 [in Russian].
8. Ohta K., Nishihara Yu., Sato Yu., Hirose K., Yagi T., Kawaguchi S., Hirao N., Ohishi Ya. An Experimental Examination of Thermal Conductivity Anisotropy in hcp Iron / Frontiers in Earth Science. 2018. Vol. 6. N 176. P. 1 – 15. DOI: 10.3389/feart.2018.00176.
9. Luzin V., Gnaupel-Herold T., Prask H. Evaluation of local and global elastic properties of textured polycrystals by means of FEM / Material science forum. 2002. P. 407 – 412.
10. Borodkina M. M., Spector É. N. X-ray analysis of the texture of metals and alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 272 p. [in Russian].

11. **Kolbasnikov N. G.** Physical bases of plastic processing of metals. — St. Petersburg: Izd. SPbGPU, 2004. — 268 p. [in Russian].
12. **Ivanov A. N.** Crystallography, X-ray and electron microscopy. — Moscow: MISIS, 2009. — 22 p. [in Russian].
13. **Farber V. M., Arhangel'skaya A. A.** Diffraction analysis methods. — Yekaterinburg: UGTU-UI, 2005. — 113 p. [in Russian].
14. **Ivanova T. M., Savyolova T. I., Sypchenko M. V.** The Modified Component Method for Calculation of Orientation Distribution Function from Pole Figures / Inverse Problems in Science and Engineering. 2010. Vol. 18. P. 163 – 171.
15. **Paromov V. V.** The study of the texture of metal sheets by the method of direct pole figures. — St. Petersburg: SPb gos. polytekhn. univ., Inst. metallurgii, mashinostroeniya i transporta, 2013. — 35 p. DOI: 10.18720/SPbPU/2/id17-8.
16. **Serebryany V. N., Kurtasov S. F., Litvinovich M. A.** Studying ODF-errors when reversing pole figures using the statistical method of ridge estimates / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 4. P. 29 – 35 [in Russian].
17. **Ivankina T., Mattis Z.** On the development of quantitative texture analysis and its application in solving problems of earth science / Fiz. Élement. Chast. Atom. Yadra. 2015. Vol. 46. N 3. P. 665 – 758 [in Russian].
18. **Mityushov E. A., Odintsova N. Yu., Berestova S. A.** Formal scheme for calculating the effective elastic properties of textured metals / Matem. Modelir. Sist. Prots. 2003. N 11. P. 76 – 80 [in Russian].
19. **Grechnikov F. V., Erisov Ya. A.** Development of plasticity criterion for the calculation of forming highly textured anisotropic blanks / Vestn. Samar. Gos. Aéhkrosm. Univ. 2012. N 1(32). P. 94 – 99 [in Russian].
20. **Trusov P. V., Shveikin A. I.** Multi-level physical models of single and polycrystals. Statistical models / Fiz. Mezomekh. 2011. Vol. 14(4). P. 17 – 28 [in Russian].
21. **Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguev L. N.** X-ray and electron-optical analysis. — Moscow: MISIS, 2002. — 306 p. [in Russian].
22. **Adamesku R. A., Grebenkin S. V., Stepanenko A. V.** Texture and Deformation Mechanism in Yttrium / Physics of Metals and Metallography. 1992. Vol. 74. N 5. P. 535 – 537.
23. **Stepanenko A. V.** Texture formation during the precipitation and recrystallization annealing of gadolinium / Usp. Sovr. Nauki Obrazov. 2016. Vol. 3. N 6. P. 85 – 88 [in Russian].
24. **Zinov'ev V. E.** Thermophysical properties of metals at high temperatures. — Moscow: Metallurgiya. 1989. — 384 p. [in Russian].