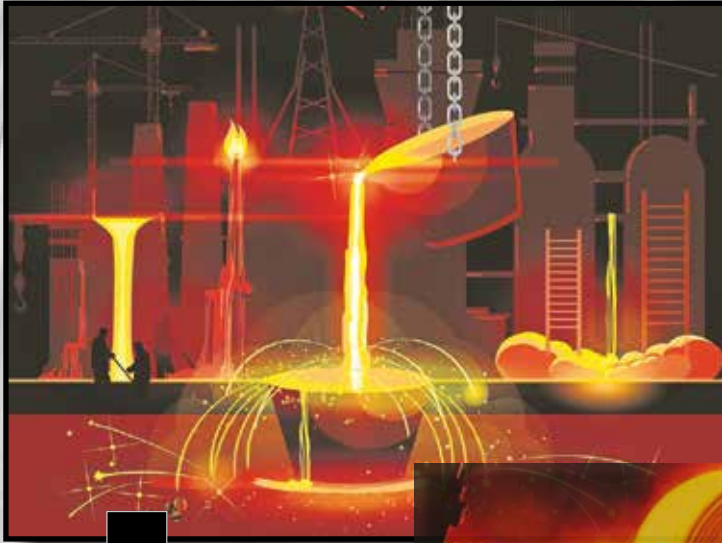


# МЕТАЛЛУРГ 7 / 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



МЕТАЛЛУРГИЯ



УДК 548.73:54.08

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ТЕКСТУРА» ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПРЕИМУЩЕСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Татьяна Ивановна Иванова<sup>1</sup>, канд. геол.-минерал. наук, [IvanovaTI@bv.alrosa.ru](mailto:IvanovaTI@bv.alrosa.ru); Дмитрий Игоревич Николаев<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, [dmitry@nf.jinr.ru](mailto:dmitry@nf.jinr.ru); Дмитрий Алексеевич Дмитриев<sup>1</sup>, [DmitrievDA@bv.alrosa.ru](mailto:DmitrievDA@bv.alrosa.ru); Иван Владимирович Степанов<sup>1</sup>, [StepanovIV@bv.alrosa.ru](mailto:StepanovIV@bv.alrosa.ru); Павел Павлович Чёрный<sup>1</sup>, [ChyornyPP@bv.alrosa.ru](mailto:ChyornyPP@bv.alrosa.ru)

<sup>1</sup>АО «Инновационный Центр «Буревестник», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

**Аннотация.** Данная работа представляет новый программный комплекс «Текстура», предназначенный для количественного анализа преимущественной ориентации кристаллитов металлов и сплавов дифракционными методами. Дано описание теоретических основ текстурного анализа и его инструментальной реализации. Проиллюстрированы функциональные возможности комплекса по построению, моделированию и анализу прямых и обратных полюсных фигур, а также по расчету функции распределения ориентаций методом ADC и восстановлению полюсных фигур. Представлены результаты сравнительного исследования полных полюсных фигур, построенных по экспериментальным дифракционным данным и вычисленных из функции распределения ориентаций, которая была рассчитана по серии неполных ненормированных полюсных фигур.

**Ключевые слова:** текстурный анализ, дифракционные методы, полюсные фигуры, функция распределения ориентаций

## “TEXTURE” SOFTWARE SUITE FOR QUALITATIVE ANALYSIS OF PREFERRED ORIENTATION OF CRYSTALLITES IN METALS AND ALLOYS USING DIFFRACTION TECHNIQUES

Tatjana I. Ivanova<sup>1</sup>, Dmitry I. Nikolaev<sup>2</sup>, Dmitry A. Dmitriev<sup>1</sup>, Ivan V. Stepanov<sup>1</sup>, Pavel P. Cherny<sup>1</sup>

<sup>1</sup>“Bourestnik” Innovation Center, JSC, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

**Abstract.** This work presents newly developed «Texture» software suite for quantitative analysis of the preferred orientation of crystallites in metals and alloys by diffraction techniques. A description of the theoretical foundations of texture analysis and its instrumental realization is given. The software functionalities for the construction, modeling and analysis of direct and inverse pole figures, as well as for the calculation of the orientation distribution function by the ADC method and the reconstruction of the pole figures are illustrated. The results of a comparative study of the complete pole figures built from experimental diffraction data and calculated from the orientation distribution function, which has been computed from a series of incomplete not normalized pole figures, are presented.

**Keywords:** texture analysis, diffraction techniques, pole figures, orientation distribution function

**Введение.** В металлах и сплавах, а также изделиях из них текстура является широко распространенным явлением и возникает при направленном воздействии внешних или внутренних сил в процессе производства материалов и на определенных этапах их обработки. Текстура формируется в результате преимущественной ориентировки кристаллитов вдоль какого-либо определенного направления при обработке металлов давлением (например, при прокатке полос или волочении проволоки), при рекристаллизации холоднодеформированных металлов, выпрессовывании порошков (экструзии), электроосаждении, напылении тонких пленок и в ряде других случаев.

Практический интерес к текстурам вызван тем, что они формируют анизотропию свойств металлов и сплавов и позволяют связать их с условиями получения материалов. Экспериментальные методы определения текстуры можно условно подразделить на два типа – методы измерения индивидуальных ориентировок отдельных структурных составляющих и интегральные методы определения текстуры [1 и др.]. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при конкретной задаче исследования.

**Дифракционные методы исследования текстур.** Интегральные методы базируются на получении дифракционных картин от всего объ-



ема образца, облучаемого рентгеновским или нейтронным пучком, усредняя информацию об ориентировках для отдельных структурных составляющих. Для этого дифрактометры оснащаются специальными приставками, позволяющими изменять положение образца по отношению к падающему пучку в двух направлениях. В конструкции такой приставки предусмотрены два независимых угловых перемещения образца: поворот  $\varphi$  в собственной плоскости и наклон  $\chi$  перпендикулярно направлению рентгеновского пучка. Отсчеты по осям  $\varphi$  и  $\chi$  определяют положение образца в сферической системе координат.

Таким образом, аппаратно-программный комплекс, состоящий из дифрактометра и приставки, имеет четыре степени свободы: две ( $2\Theta$  и  $\Omega$ -повороты) – у двухкружного гониометра и две ( $\varphi$ -поворот и  $\chi$ -наклон) – у приставки. Четыре независимо управляемых поворота могут быть синхронизированы различным образом в зависимости от выбранного метода измерения и задачи исследования, включая рутинный фазовый анализ, для выполнения которого достаточно поворотов гониометра, и анализ структурного состояния кристаллического материала, зависящего от направления (текстура и остаточные напряжения, а также кристаллографическая ориентация в случае монокристаллических объектов). Важной составляющей комплекса является аналитическое программное обеспечение, позволяющее осуществлять обработку и графические построения дифракционных данных, а также проводить расчеты требуемых кристаллографических параметров и структурных характеристик.

Примером такого аппаратно-программного комплекса отечественного производства является многофункциональный рентгеновский ДРОН-8 (см. обложку), который может быть оснащен различными приставками, в том числе с контролируемым наклоном и поворотом образца, двумя системами регистрации с программным переключением для сбора данных от различных типов объектов, а также специализированными программными комплексами, в том числе для исследования интегральных текстур, который использует построение и анализ прямых и обратных полюсных фигур (ПФ) и расчет функции распределения ориентаций (ФРО) методом ADC (Arbitrarily Defined Cells), т.е. произвольно определенных ячеек.

В данной статье приводится описание программного комплекса «Текстура», разработанного АО «ИЦ «Буревестник» в соавторстве с

ОИЯИ, даются теоретические основы, заложенные в алгоритмах, и рассматриваются примеры исследования текстур.

**Теоретические основы текстурного анализа.** В традиционном количественном текстурном анализе исходными данными являются прямые полюсные фигуры. В дифракционном эксперименте измеряются не сами ПФ, а связанные с ними величины (интегральные интенсивности), которые после вычитания фона и поправок на дефокусировку рассматриваются как ПФ. Отдельные ПФ не являются независимыми, внутренняя связь между ними может быть установлена с помощью функции распределения ориентаций (ФРО). Это общепринятый термин, однако, более корректно называть данную функцию *плотностью распределения ориентаций*. Обычно экспериментально полученные ПФ являются неполными, т.е. ограниченными по угловому диапазону угла наклона  $\chi$ , поэтому они не могут быть нормированы. Таким образом, есть две задачи, при решении которых нельзя обойтись без вычисления ФРО:

- вычисление полных нормированных ПФ;
- выбор наилучших коррекций измеренных величин.

*Полюсные фигуры и функция распределения ориентаций.* Впервые понятие функции распределения ориентаций было введено Виглиным [2] в 1960 г. Первые работы, посвященные вычислению ФРО, были опубликованы Роэ [3] и Бунге [4]. Наиболее полное математическое описание количественного текстурного анализа изложено в [5, 6].

Рассмотрим поликристаллический образец (рис. 1), с которым связана система координат  $K_A$ , а с произвольно ориентированным кристаллитом связана система координат  $K_B$ .

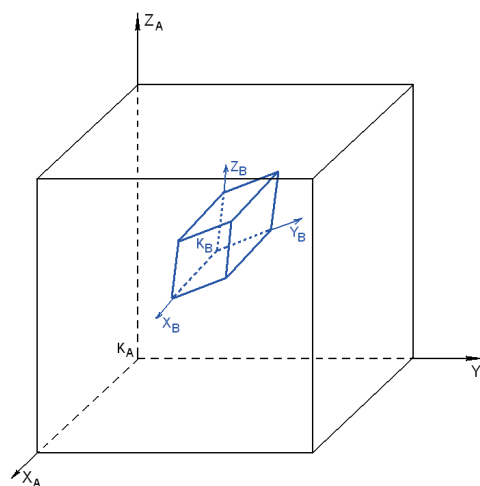


Рис. 1. Системы координат образца и кристаллита

Пусть  $\vec{y}(\chi, \eta)$  – единичный вектор в системе координат образца ( $\chi, \eta$  сферические координаты этого вектора), а  $\vec{h}(\vartheta, \varphi)$  – единичный вектор в системе координат кристаллита ( $\vartheta, \varphi$  сферические координаты этого вектора), тогда  $dV(\vec{h} || \vec{y})$  – это объемная доля образца, для которой кристаллографическое направление  $\vec{h}$  совпадает с направлением  $\vec{y}$  в области  $[\vec{y}, \vec{y} + d\vec{y}]$ . Таким образом, полюсная фигура – это функция, удовлетворяющая условию

$$\frac{1}{4\pi} P_h(\vec{y}) d\vec{y} = \frac{dV(\vec{h} || \vec{y})}{V}.$$

В предположении, что суммарный объем кристаллитов равен объему образца, эта функция должна быть нормированной или

$$\frac{1}{4\pi} \int_{S^2} P_h(\vec{y}) d\vec{y} = 1.$$

Тогда полюсная фигура – это относительная объемная доля кристаллов, у которых кристаллографическое направление соответствует  $\vec{h}(\vartheta, \varphi)$ .

Вращение, которое переводит  $K_A$  в  $K_B$

$$g: [K_A \rightarrow K_B],$$

называется ориентацией системы  $K_B$  (кристаллита) по отношению к системе  $K_A$  (образцу). Параметризация вращений достигается введением углов Эйлера  $g \equiv \{\alpha, \beta, \gamma\}$  следующим образом:

$$g_1 = \{0, 0, \alpha\}: [K_A \rightarrow K_A']$$

– это вращение системы  $K_A$  на угол  $\alpha$  вокруг оси  $Z_A$ ;

$$g_2 = \{0, \beta, 0\}: [K_A' \rightarrow K_A'']$$

– это вращение системы  $K_A'$  на угол  $\beta$  вокруг оси  $Y_A'$ ;

$$g_3 = \{0, 0, \gamma\}: [K_A'' \rightarrow K_A''' \equiv K_B]$$

– это вращение системы  $K_A''$  на угол  $\gamma$  вокруг оси  $Z_A''$ .

В итоге после умножения матриц вращения получим

$$g = \{\alpha, \beta, \gamma\} = \{0, 0, \gamma\} \{0, \beta, 0\} \{0, 0, \alpha\} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \beta \cos \gamma \\ -\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \beta \sin \gamma \\ \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}.$$

Задание вращения с помощью углов Эйлера  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  является одной из множества возможных параметризаций вращений.

Множество всех вращений трехмерного евклидова пространства (множество линейных преобразований евклидова пространства  $R^3$ , сохраняющих расстояние между точками пространства и не меняющее ориентацию этого простран-

ства) является группой вращений, обозначаемой  $SO(3)$ . Углы Эйлера  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  однозначно определяют все элементы группы вращений.

Функция распределений ориентаций (ФРО),  $f(g)$ , строго говоря, есть плотность распределения вероятности, определенная на группе вращений  $SO(3)$ . Она описывает объемную долю кристаллитов в образце, имеющих ориентации в окрестности  $dg$  определенного элемента группы вращения  $g$ :

$$f(g)dg = \frac{dV(g)}{V}.$$

ФРО как плотность вероятности определяется так, чтобы обладать свойством нормировки

$$\int_{SO(3)} f(g)dg = \int_{SO(3)} f(g) \sin \beta d\alpha d\beta d\gamma = 8\pi^2.$$

Такая нормировка ФРО удобна тем, что для изотропного распределения  $f(g) = const$  значение константы есть единица. Такое распределение описывает случай полностью изотропного материала. Другой предельный случай ФРО – монокристалл – описывается  $\delta$ -функцией в ориентационном пространстве следующим образом:

$$f(g) = \delta(gh); g, h \in SO(3); \frac{1}{8\pi^2} \int_{SO(3)} \delta(gh)dg = 1.$$

Таким образом, с помощью ФРО текстурный анализ описывает ориентационные состояния поликристаллических сред, включая монокристаллы и изотропные среды как свои предельные случаи. Необходимо отметить, что введенная таким образом ФРО не описывает пространственные положения зерен поликристалла.

В зависимости от точечной группы симметрии монокристаллов, образующих поликристалл, ФРО может обладать определенными свойствами симметрии.

Пусть  $G_B = \{g_{B_j}, j = 1, \dots, N_B\}$  – точечная группа симметрии с  $N_B$  элементами симметрии, а ее подгруппа вращений –  $G_B = \{g_{B_j}, j = 1, \dots, N_B\}$  с  $N_B$  элементами, тогда ориентации  $g$  и  $g_{B_j}g$  физически принципиально не различимы. В этом случае ФРО обладает следующим свойством симметрии:

$$f(g_{B_j}g) = f(g), g_{B_j} \in G_B, j = 1, \dots, N_B.$$

Аналогично внешняя симметрия образца  $G_A = \{g_{A_k}, k = 1, \dots, N_A\}$  может индуцировать дополнительную симметрию ФРО по отношению к этой группе:

$$f(g_{A_k}g) = f(g), g_{A_k} \in G_A, k = 1, \dots, N_A.$$

В отличие от 32 возможных кристаллических точечных групп возможные симметрии образца могут быть гораздо более разнообразными.

Обычно симметрия образца отражает свойства симметрии тех внешних условий, при которых происходило формирование текстуры в данном образце.

Полюсная фигура является интегральной по отношению к ФРО величиной, которая пропорциональна суммарному объему (интеграл по ФРО) всех тех кристаллитов, чьи ориентации  $g$  отвечают условию  $\vec{h}_i = g \cdot \vec{y}$ . Если для фиксированного  $\vec{h}_i$  исследуется зависимость по  $\vec{y}$  на сфере направлений  $S^2$ , то такой объект называется (прямой) полюсной фигурой (ППФ), а вышеуказанный интеграл записывается как

$$P_{h_i}(\vec{y}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f\left(\{\vec{h}_i, \varphi\}^{-1}\{\vec{y}, 0\}\right) d\varphi,$$

где использовано новое обозначение вращения  $\{h_i, \varphi\} \equiv \{\psi, \vartheta, \varphi\}$  если  $(\vartheta, \psi)$  – сферические углы векторы  $\vec{h}_i = (\vartheta, \psi)$ . Кристаллическая симметрия кристалла, очевидно, также влияет на ПФ. Поскольку вектор  $\vec{h}_i$  и все векторы, полученные действием элементов точечной группы  $G_B$  на  $\vec{h}_i$ , кристаллографически эквивалентны, то нередуцированные ПФ должны быть записаны в форме

$$P_{h_i}(\vec{y}) = \frac{1}{N_b} \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^{N_b} \int_0^{2\pi} f\left(\{g_{b_j} \cdot \vec{h}_i, \varphi\}^{-1}\{\vec{y}, 0\}\right) d\varphi = \\ = \frac{1}{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} P_{g_{b_j} \cdot h_i}(\vec{y}).$$

Влияние симметрии образца проявляется в том, что значения ПФ в точке сферы  $\vec{y}$  и симметричных ей точках одинаковы. Вследствие этого ПФ разбиваются на симметричные (кратные) области в случае конечных групп симметрии образца или вырождаются в одномерные объекты в случае бесконечных групп (аксиальные текстуры).

Из эксперимента известны ПФ  $P_{h_i}(\vec{y})$ , требуется восстановить ФРО  $f(g)$ . Эта обратная задача восстановления ФРО по конечному числу экспериментальных ПФ определяется в количественном текстурном анализе как *основная задача*.

В настоящей программе реализован дискретный метод ADC [7] (другие названия WIMV, maximum entropy method). Это итерационный метод, в основе которого лежит формула

$$f^{(n+1)}(g) = f^{(n)}(g) \left\{ \prod_{i=1}^I \prod_{m_i=1}^{M_i} \frac{\tilde{P}_{h_i}^{(n+1)}(\vec{y}_{m_i})}{\tilde{P}_{h_i}^{(n)}(\vec{y}_{m_i})} \right\}^{M_i I(g)},$$

где  $f^{(n)}$  – значение ФРО с предыдущей итерации,  $\tilde{P}_{h_i}^{(n+1)}(\vec{y}_{m_i})$  – значение вычисленной ПФ из  $f^{(n)}$ ,  $\tilde{P}_{h_i}^{(n)}(\vec{y}_{m_i})$ , перенормированное значение измеренной ПФ.

«Стандартные» функции. Существует несколько наборов функций, удовлетворяющих интегральному соотношению (1). В количественном текстурном анализе их принято называть «стандартными» функциями [6].

Например, ФРО, заданной в виде

$$f(g, g_0, \varepsilon) = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \exp(-l(l+1)\varepsilon^2) \frac{\sin(l+\frac{1}{2})t}{\sin \frac{t}{2}},$$

где  $\cos t = [Tr(g(g_{B_j} g_0 g_{A_k})^{-1}) - 1]/2$ , соответствует полюсная фигура

$$P_{h_i}(\vec{y}) = \sum_{n=0(2)}^{\infty} (2n+1) \exp\{-n(n+1)\varepsilon\} P_n(\cos \theta_0),$$

где  $\cos \theta_0 = (\vec{y}, g_0^{-1} g_{b_j} \vec{h}_i)$ ,  $P_n$  – полиномы Лежандра.

В обеих формулах параметр полуширины  $\varepsilon$  определяет, насколько острой будет вычисленная компонента. Параметр  $g_0$  определяет положение максимума этих функций.

Если ФРО задана в виде [8]

$$f(g, g_0, \sigma) = \frac{\sigma \sqrt{\pi \sigma}}{\cos^4(t/2)} \exp(-\sigma \tan^2(t/2)),$$

то ей соответствует ПФ в виде

$$P_{h_i}(\vec{y}) = \frac{\sigma}{\cos \theta_0} \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} + \frac{1}{2\sigma} \right) \exp(-\sigma \tan^2(\theta_0/2)).$$

В этом случае  $\sigma$  является параметром, связанным с полушириной.

**Функциональные возможности и программный интерфейс.** Программный комплекс «Текстура» работает под ОС Microsoft Windows 10 Professional (64 бит) и имеет современный интуитивно понятный эффективный графический интерфейс и встроенную хелп-систему. Для удобства пользования интерфейс снабжен всплывающими подсказками.

Программный комплекс позволяет:

- на основе экспериментальных данных осуществлять построение прямых полюсных фигур (ППФ);
- осуществлять любые повороты по симметрии экспериментальных полюсных фигур;
- проводить графический анализ ППФ, в том числе определять угловые координаты максимумов интенсивности и идентифицировать ориентации по углам Эйлера и индексам Миллера;
- вычислять и изображать разностные ППФ;
- проводить сглаживание экспериментально измеренных ППФ;
- моделировать текстуры без привязки к экспериментальным данным;



- осуществлять предварительную обработку экспериментальных данных с учетом корректировки интенсивностей на дефокусировку и на отклонение положения образца от направления проката в плоскости образца для восстановления истинной симметрии образца (ромбической, моноклинной или триклинной);
- проводить расчет функции распределения ориентаций (ФРО) методом ADC по откорректированному массиву данных как по полюсным фигурам, так и по наборам индивидуальных ориентаций;
- осуществлять графическое построение рассчитанных ФРО с указанием RP-фактора (характеристика качества расчетов и самосогласованности измеренных ПФ);

теристика качества расчетов и самосогласованности измеренных ПФ);

- на основе рассчитанной ФРО осуществлять восстановление (вычисление) и построение полных ППФ и обратных полюсных фигур (ОПФ);
- рассчитывать текстурный индекс и долю текстурированности образца;
- формировать протокол с результатами обработки и расчетов.

Ниже приводятся примеры некоторых программных функций с иллюстрациями интерфейсных решений.

### Построение, графический анализ и повороты ППФ

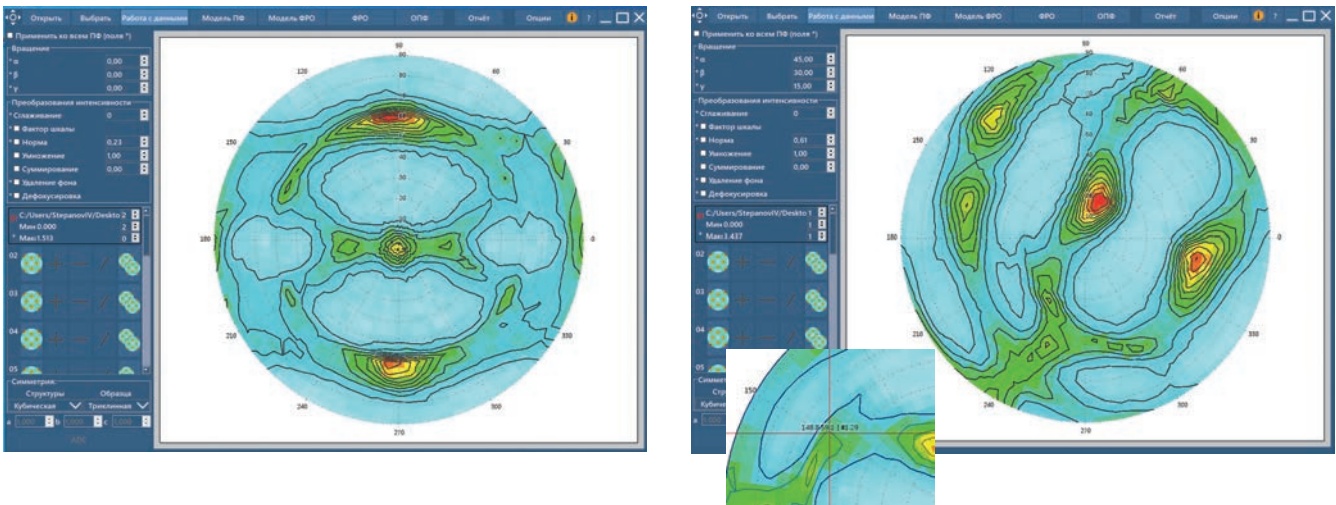


Рис. 2. Вкладка Работа с данными с изображением исходной ППФ, построенной по экспериментальным данным (слева) и после применения процедуры вращения на указанные углы  $\alpha\beta\gamma$  (справа). На врезке показана индикация интенсивности текстурных максимумов в выбранной точке на крестообразном курсоре с указанием ее координат.

### Сглаживание ППФ

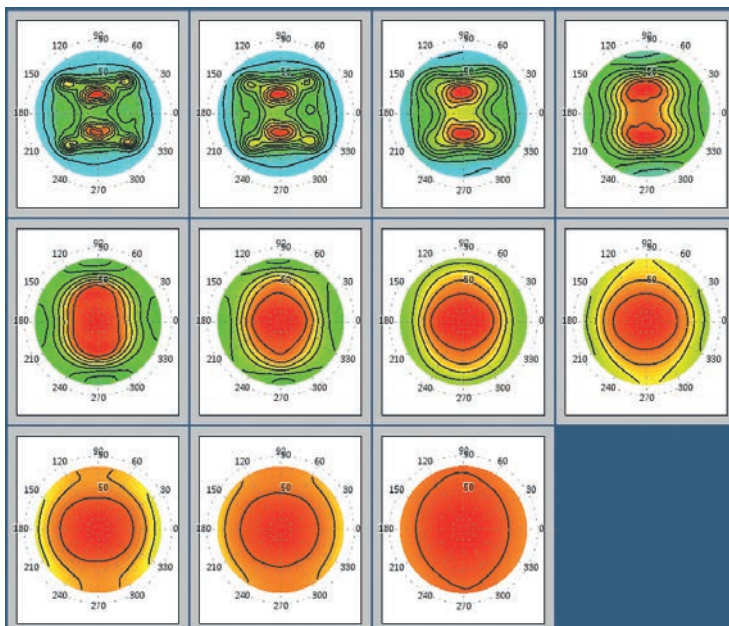


Рис. 3. Пример различных уровней сглаживания экспериментальной ПФ методом ядерной оценки плотности (диапазон 0–14, шаг – 2)

### Вычитание фона и поправка на дефокусировку

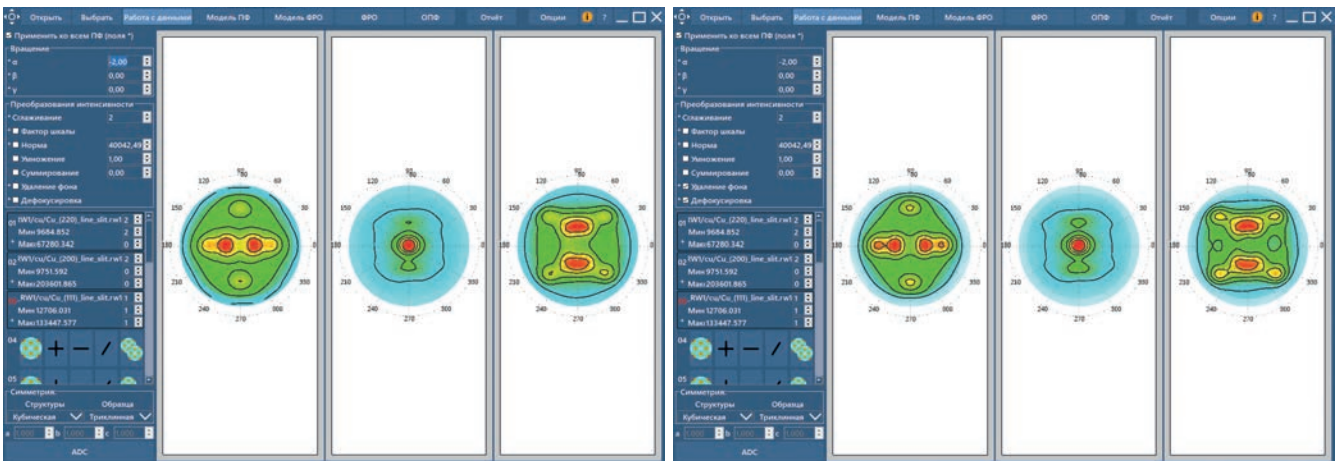


Рис. 4. Сглаженные экспериментальные ППФ (слева) после вычитания фона и поправки на дефокусировку (справа)

### Моделирование ППФ и ФРО

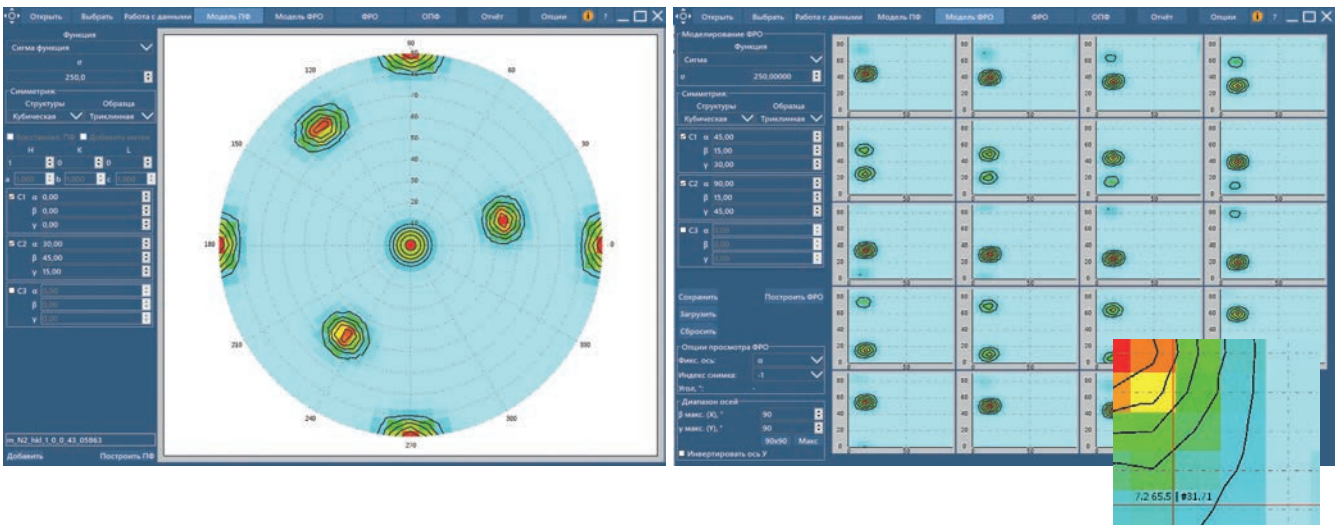


Рис. 5. Моделированная ППФ (100) с двухкомпонентной текстурой (слева) и сечения смоделированной ФРО (справа). На врезке – индикация координат и значения ФРО на выбранном сечении

### Расчет ФРО, построение сечений и восстановление полных ПФ

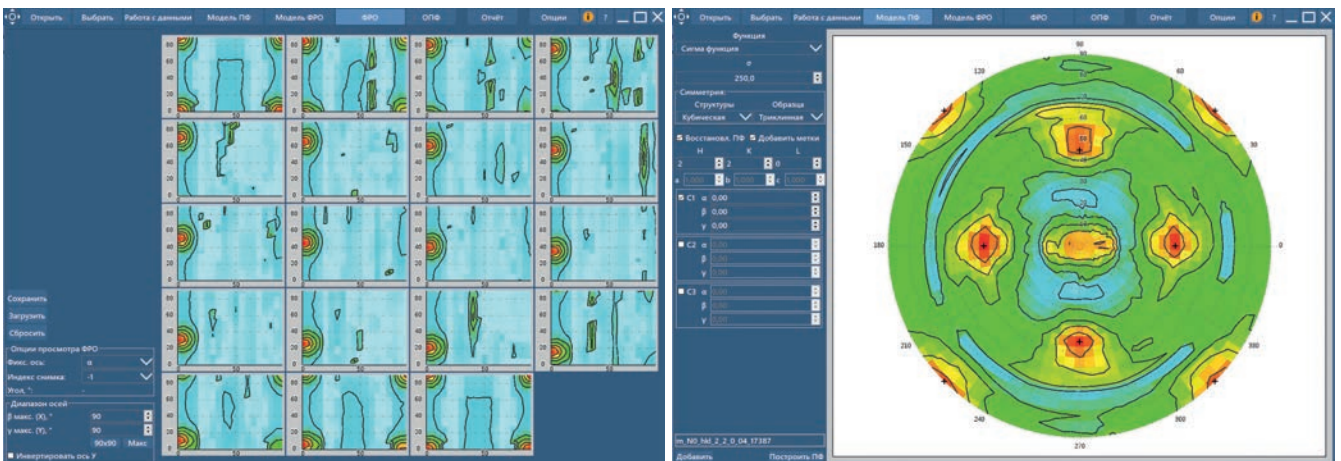


Рис. 6. Графическое изображение сечений рассчитанной ФРО (слева) и восстановленная (вычисленная по ФРО) полная ПФ (220) (справа) (крестиками показано расположение заданной идеальной ориентировки)



Расчет и построение ОПФ

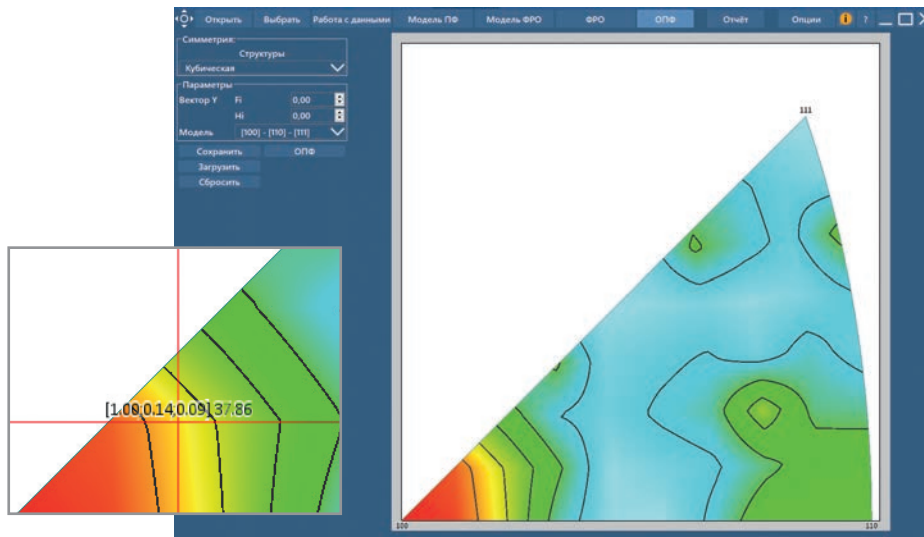


Рис. 7. Рассчитанная ОПФ. На врезке – индикация значения индекса hkl интенсивность текстурного максимума в выбранной точке

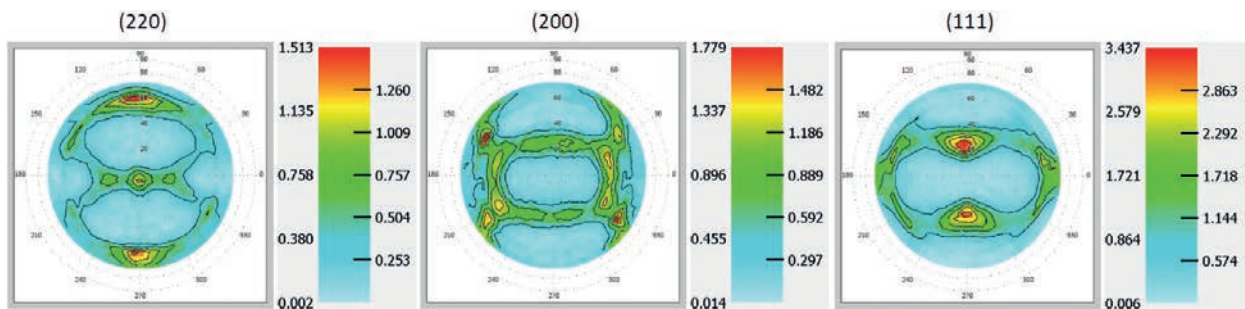


Рис. 8. ПФ, использованные в расчете ФРО

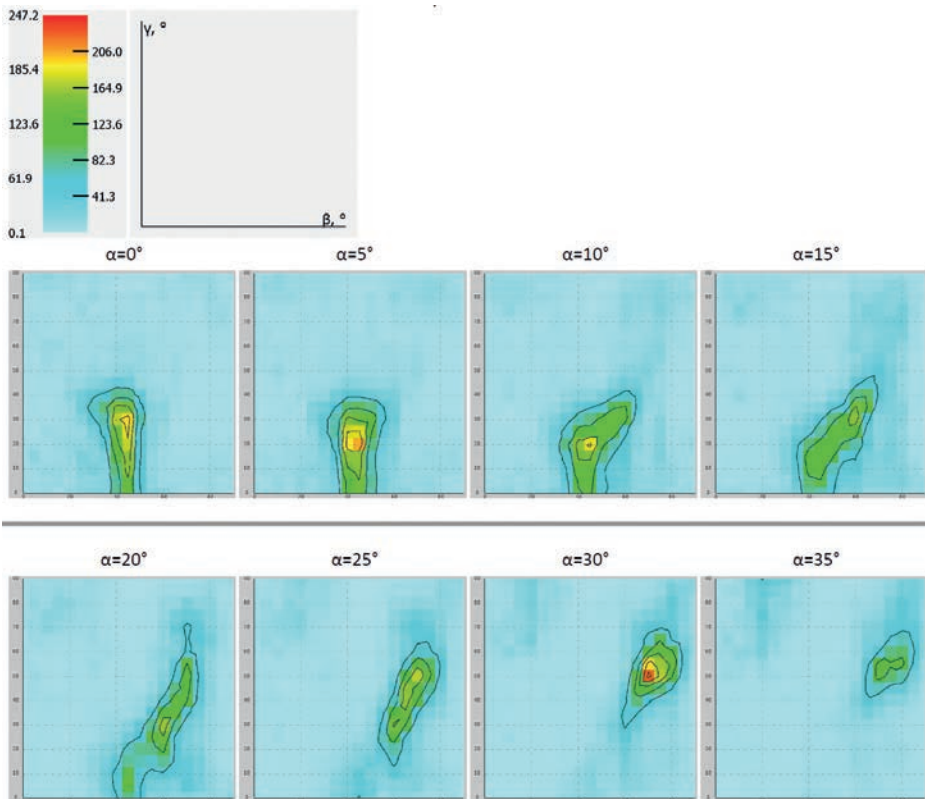


Рис. 9. ФРО, рассчитанная из неполных ПФ

**Вычисление полных ПФ из измеренных неполных ПФ.** В качестве примера применения программы и демонстрации корректности расчетов проведем сравнение полных ПФ, вычисленных из ФРО, которая была рассчитана по серии неполных ненормированных ПФ, построенных по экспериментальным дифракционным данным.

Были измерены три полные полюсные фигуры для прокатки алюминия. Для расчета ФРО использовали части ПФ до  $\chi = 70^\circ$ , приведенные на рис. 8.

По этим неполным ПФ мы рассчитали ФРО, а затем из ФРО вычислили полные ПФ (рис. 9).



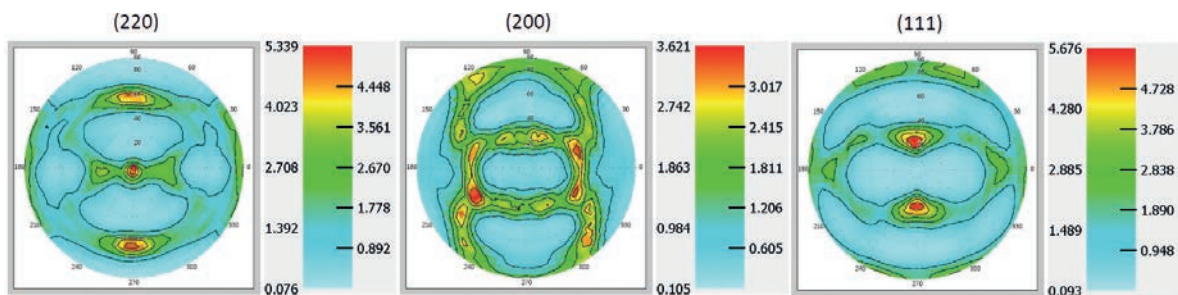


Рис. 10. Полные ПФ, вычисленные из ФРО, показанной на рис. 9

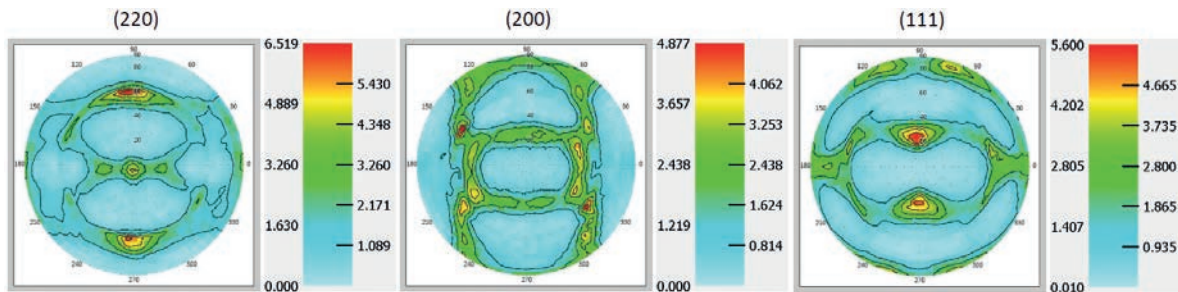


Рис. 11. Полные экспериментальные ПФ

Из сравнения ПФ, приведенных на рис. 8, 10 и 11, очевидно, что по краям неполных ПФ отсутствуют максимумы, которые появляются на ПФ, вычисленных из ФРО, а также наблюдаются на полных измеренных ПФ. Отметим также высокую степень соответствия вычисленных и измеренных ПФ не только качественно, но и по количественным критериям.

#### Список источников

1. Лобанов М.А., Юровских А.С., Кардонина Н.И., Русаков Г.М. Методы исследования текстур в материалах. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2014.
2. Виглин А.С. Количественная мера текстуры поликристаллического материала. Тектурная функция // ФТТ. 1960. Т. 2, № 10. С. 2463–2476.

3. Roe R.J. Description of Crystallite Orientation in polycrystalline Materials. General Solution to Pole Figures Inversion // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36, No 6. P. 2024–2031.

4. Bunge H.-J., Zur Darstellung allgemeiner Texturen // Z. Metallkde. 1965. Vol. 56. P. 872–874.

5. Bunge H.-J. Texture Analysis in Materials Science. Göttingen: Cuvellier Verlag, 1993.

6. Matthies S., Vinel G.W., Helming K. Standard Distributions in Texture Analysis. Berlin: Akademie-Verlag, 1987.

7. Pawlik K., Pospiech J., Lücke K. The ODF Approximation From Pole Figures With the Aid of the ADC Method // Textures and Microstructures. 1991. No. 14. P. 25–30.

8. Ivanova T.M., Nikolayev D.I. // Phys. Status Solidi B, 2001. 228. P. 825–836.

Статья поступила в редакцию 25.05.2023; одобрена после рецензирования 09.06.2023; принята к публикации 09.06.2023



Эффективные решения для металлургии и машиностроения - анализ фазового состава и структурного состояния (текстуры и остаточные напряжения) поликристаллических материалов, а также определение ориентации и качества монокристаллов

### Многофункциональный дифрактометр ДРОН-8Н

Трехосная фхз приставка (размер образцов (Ø x h): 100 x 20 мм).

Комплект для установки двух детекторов (точечный и линейный стриповый ПЧД) с программным переключением.



### Настольный рентгеновский дифрактометр КОЛИБРИ

Двухосная фх приставка (размер образцов (Ø x h): пластины 30 x 10 мм, стержни 15 x 100 мм).

Точечный сцинтилляционный детектор или линейный стриповый ПЧД.



Вертикальный  $\theta$ - $\theta$  гониометр с горизонтальным положением образца.

Встроенная система охлаждения.

Полностью заводская настройка.

Удаленное подключение и управление экспериментом.

### Аналитическое программное обеспечение:

Комплекс КДА («Кристаллография и дифракционный анализ»).

Программа для фазового анализа со встроенной картотекой порошковых стандартов.

Комплекс «Текстура».

Программа MacroStress.

