

УДК 669.245

*Н.А. Кузьмина¹, В.А. Лифшиц², Е.Н. Потрахов², Н.Н. Потрахов²***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК НИКЕЛЕВЫХ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ РЕНТГЕНОВСКИМИ
ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ «КАЧАНИЯ» И ЛАУЭ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25

В статье сравниваются возможности рентгеновских методов «качания» и Лауэ для массового контроля качества структуры монокристаллических отливок жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС). Сделан вывод, что оба метода дают близкие результаты при определении аксиальной ориентации монокристаллов. При определении разориентации блочной субструктуры метод «качания» позволяет найти величину аксиального отклонения каждого блока относительно оси Z образца, т. е. относительно направления главного действующего напряжения, а метод Лауэ позволяет рассчитать углы разориентации блоков относительно ориентации основного кристалла. Отмечается преимущество метода Лауэ при определении угла разориентации блоков, так как он позволяет тестировать разориентацию блоков отливки сложной формы.*

Ключевые слова: монокристалл, кристаллографическая ориентация, разориентация субзерен, лауэграмма, рентгеновская дифракция.

*N.A. Kuzmina¹, V.A. Lifshitz², E.N. Potrakhov², N.N. Potrakhov²***COMPARATIVE STRUCTURE CONTROL OF SINGLE-CRYSTAL
CASTINGS OF NICKEL SUPERALLOYS X-RAY DIFFRACTION METHODS
OF OSCILLATION AND LAUE**

The article compares the possibilities of x-ray swing and Laue methods for mass control of the structure perfection of single-crystal castings of nickel heat-resistant alloys. It is concluded that both methods give similar results in determining the axial orientation of single crystals. In determining the misalignment of the block substructure, the swing method allows us to find the axial deviation of each block relative to the Z axis of the sample, that is, relative to the direction of the main acting voltage, and the Laue method allows us to calculate the angles of disorientation of the blocks relative to the orientation of the main crystal. The advantage of the method of Laue in determining the angle of disorientation blocks, as it allows you to test the disorientation of casting blocks of complex shape.

Keywords: single crystal, crystallographic orientation, subgrain disorientation, lauegram, x-ray diffraction.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» [Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)»]; e-mail: info@eltech-med.com

* Кристалл, занимающий в отливке наибольший объем.

Введение

Монокристаллы жаропрочных сплавов на никелевой основе используются в качестве конструкционного материала для изготовления лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ), работающих в условиях воздействия высоких температур и напряжений [1–3]. Генеральный конструктор Н.Д. Кузнецов – создатель большой серии газотурбинных двигателей с высокими показателями качества – утверждал, что колесо турбины первой ступени является «солнечным сплетением» двигателя. Качественное изготовление лопаток турбины – залог надежности работы изделия.

Повышение ресурса лопаток высокотемпературных турбин связано не только с разработкой специальных литейных жаропрочных сплавов, но и с методами управления процессом кристаллизации отливки из этих сплавов, которые обеспечивают формирование заданной структуры, гарантирующей сохранение необходимых прочностных характеристик детали в течение заданного ресурса работы [4–6]. Монокристаллические турбинные лопатки из жаропрочных сплавов отличаются большой чувствительностью к степени их структурного совершенства. Качество структуры монокристалла оказывает большое влияние на упругие, прочностные и пластические характеристики изделий и является важнейшим технологическим критерием, который определяет выход годной продукции и ее себестоимость.

Монокристаллы жаропрочных сплавов в условиях дендритного роста не обладают совершенной структурой и относятся к категории несовершенных – их структура может быть фрагментирована, содержать макроблоки и посторонние кристаллы [7–9].

Информация о совершенстве структуры монокристаллов ЖНС позволяет прогнозировать свойства изделия. Качество структуры оценивается по соответствию направления главных действующих напряжений продольной оси Z изделия и кристаллографического направления структуры – аксиальная кристаллографическая ориентация (КГО). Для отливок ЖНС такими направлениями в гранецентрированной кубической (ГЦК) структуре являются $[001]$ и $[111]$. Другим важным критерием качества является степень монокристалличности – о качестве судят по наличию в отливке посторонних кристаллов и величине разориентации между отдельными фрагментами кристалла [10, 11]. При оценке структурного совершенства монокристаллической лопатки к различным ее частям предъявляются неодинаковые требования, зависящие от конкретных изделий и условий их работы. Допустимые отклонения от КГО и разориентации для различных изделий регламентируются производителем.

На различных этапах производства – начиная от разработки жаропрочного сплава для монокристаллического литья, испытаний образцов для получения характеристик прочности сплава и заканчивая производством монокристаллических лопаток ГТУ и ГТД – контролю совершенства структуры и определению отклонения от кристаллографической ориентации (КГО) подвергаются 100% образцов и лопаток, годных по макроструктуре. Кроме того, при использовании затравочной технологии литья контролируются также 100% затравочных заготовок и затравок.

Помимо визуального и металлографического контроля поверхности монокристаллических отливок, для оценки совершенства кристаллической структуры используются методы рентгеновской дифрактометрии: метод «качания» в монохроматическом рентгеновском излучении и метод Лауэ в излучении сплошного (белого) спектра [12]. Поскольку к различным видам монокристаллических отливок предъявляются различные требования степени совершенства структуры, а сами отливки отличаются по форме и размерам, то это определяет целесообразность применения того или иного рентгеновского метода оценки их структуры.

Цель данной статьи – сравнить возможности этих двух рентгеновских методов применительно к оценке качества структуры монокристаллических отливок ЖНС для массового контроля.

Материалы и методы

Для сравнительного тестирования методов рентгеновской дифрактометрии – метода «качания» и метода Лауэ – выбран монокристаллический образец ЖНС, полученный методом направленной кристаллизации с ориентацией продольной оси [111] и прошедший испытания на длительную прочность. Металлографическим методом выявлена блочная субструктура, состоящая по крайней мере из трех блоков. На торцевой и боковой поверхности образца видна четкая граница между двумя блоками, по которой прошла трещина при испытании на длительную прочность (рис. 1, а), а также «размытая» граница между блоками, по которой разрушения кристалла не произошло (рис. 1, б, в).

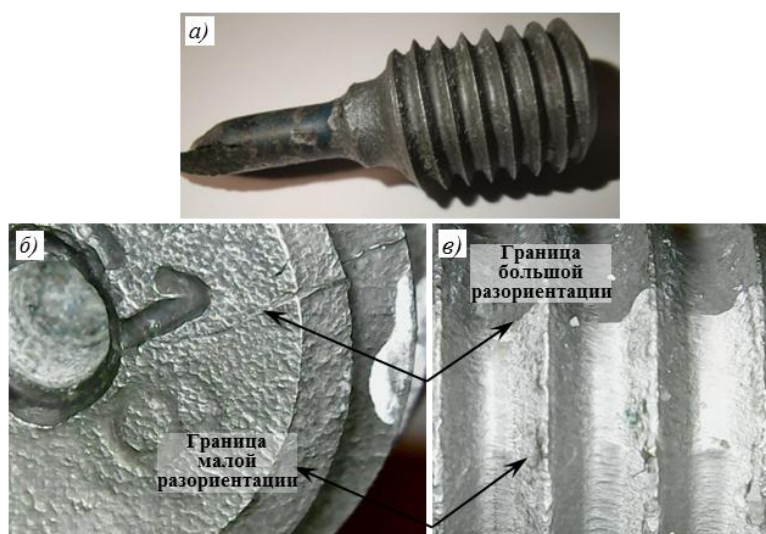


Рис. 1. Исследуемый образец жаропрочного никелевого сплава (а), разрушенный при испытаниях на длительную прочность, а также торцевая (б) и боковая (в) поверхности образца (стрелками указаны границы блоков)

Съемку осуществляли на широко распространенном рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-4 и на многофункциональной передвижной рентгенодифракционной установке ПРДУ, работающей по методу Лауэ. Основные параметры съемок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры рентгеновских съемок

Характеристики	Дифрактометр ДРОН-4	Установка ПРДУ (метод Лауэ)
Материал анода рентгеновской трубки	Cu	W
Режим съемки	20 кВ, 10 мА	25 кВ, 4,5 мА
Требования к подготовке образцов	Травление. Необходимо наличие плоской площадки, перпендикулярной исследуемому направлению в отливке (например ось Z), возможность закрепления образца в держателе	Травление (в том числе на макроструктуру). Съемка возможна в любой интересующей точке поверхности отливки, выведенной на расчетное расстояние прибора (20±1 мм)
Диаметр облучаемой поверхности	12 мм	0,7 мм

Определение углового отклонения от кристаллографической аксиальной ориентации отливок ЖНС по методу «качания» осуществляется с использованием гониометрической приставки [13, 14] и основано на том, что продольная ось образца Z совмещается с оптической осью прибора (φ). На рис. 2 показано положение нормали в середине интервала ($\omega=0$). Каждый обнаруженный рефлекс $\{hkl\}$ регистрируется дважды – симметрично по обе стороны от середины интервала сканирования. При реализации метода «качания» детектор неподвижен ($2\theta=\text{const}$) – происходит быстрое вращение оси приставки φ образца вокруг нормали при движении по шкале ω . Сплошное сканирование $\omega \cdot \varphi$ обеспечивает поиск рефлексов внутри прямого кругового конуса с углом 2θ при вершине. Фиксированное положение детектора $2\theta_{(hkl)}$ для основных кристаллографических направлений в ГЦК-структуре ЖНС соответствует брэгговскому углу отражения: плоскости (004) – для направления [001], плоскости (222) – для направления [111] и плоскости (022) – для направления [011].

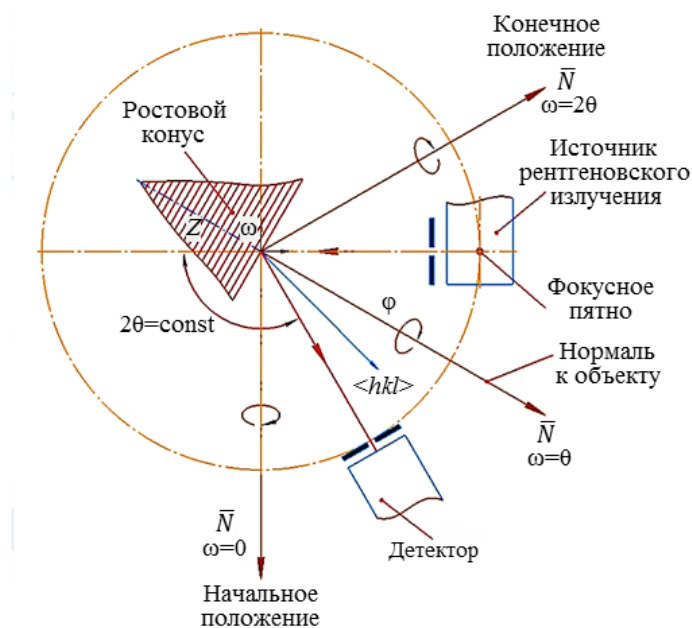


Рис. 2. Рентгенооптическая схема съемки по методу «качания» на дифрактометре ДРОН-4. Показаны положения нормали \bar{N} к поверхности образца при минимальном угле ($\omega=0$), в середине интервала ($\omega=\theta$) и максимальном угле поворота ($\omega=2\theta$) столика образца

Отражения от плоскостей заданного кристаллографического направления $[hkl]$ фиксируются управляющим контролером и выводятся на экран компьютера в виде максимумов интенсивности. Рефлекс отражения может состоять из одного или нескольких отдельно стоящих или накладывающихся друг на друга пиков. Простой одиночный рефлекс, совпадающий с углом $\theta_{(hkl)}$, позволяет охарактеризовать структуру как монокристаллическую с нулевым отклонением выбранного кристаллографического направления структуры от нормали \bar{N} к поверхности образца (нормаль должна совпадать с осью Z отливки). Одна пара симметричных относительно угла $\theta_{(hkl)}$ рефлексов характеризует монокристаллическую структуру с отклонением от нормали к поверхности образца, где величина отклонения от КГО соответствует половине углового расстояния между симметричными относительно угла $\theta_{(hkl)}$ максимумами интенсивности рефлексов. Наличие дополнительных рефлексов свидетельствуют о присутствии блоков в структуре образца.

Для данной работы образец исследован с торцевой плоскости методом «качания» в максимальном диапазоне углов 0–96 градусов, для заданного кристаллографического направления $[111] - \theta_{(222)} = 48,1$ градуса.

Для определения отклонения от КГО методом Лауэ съемку выполняли в точках, отмеченных на этом же образце ЖНС с торцевой, а также боковой поверхности, и регистрировали обратную лауэграмму, получаемую при облучении неподвижного кристалла полихроматическим узким первичным пучком (рис. 3). По умолчанию расстояние «образец–плоскость детектора» выбирается равным 20 мм, на эту величину выставлена точка пересечения сфокусированных лазерных указателей (отклонение ± 1 мм программа учитывает автоматически при финишном совмещении меток на стереограмме и узлов стандартной сетки).

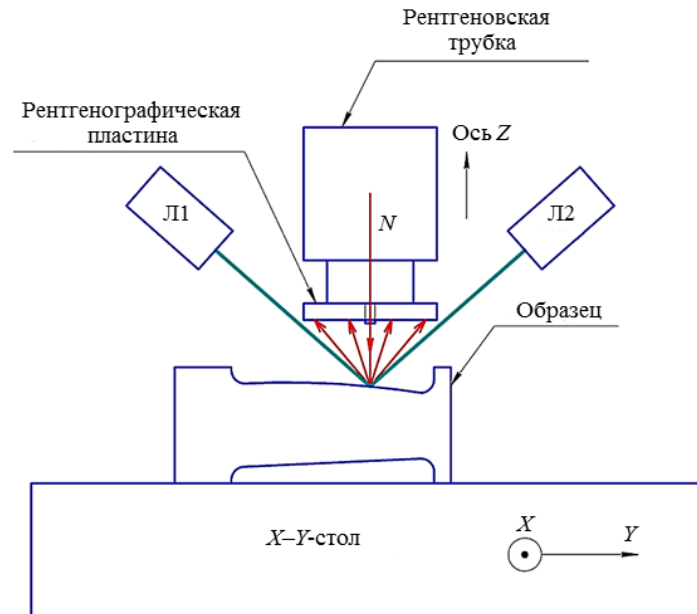


Рис. 3. Рентгенооптическая схема съемки симметричной обратной лауэграммы на установке ПРДУ (Л1, Л2 – лазерные указатели)

Возникающее рассеянное излучение регистрировали двухмерным позиционно чувствительным детектором – рентгенографической пластиной с фотостимулируемым люминофором. Затем для визуализации полученные дифракционные картины переводили в цифровой формат на сканере высокого разрешения Digora optime [15]. Обработку обратной лауэграммы кубического кристалла в программе KROS [16] выполняли в автоматическом режиме. Для лауэграммы, преобразованной в стереографическую проекцию, программа находит совпадающий с ней фрагмент стандартной сетки для расчета ГЦК-лауэграмм. При этом из углов поворота точечного комплекса кубического кристалла вокруг приборных осей X , Y и Z определяют матрицу ориентации кристалла в приборных координатах. Два элемента матрицы (косинус угла между осями $[001]$ и Z ; косинус угла между осями $[100]$ и X) дают соответственно два контролируемых параметра – аксиальную (КГО) и азимутальную составляющие ориентации кристалла. Для наглядной качественной оценки ориентации на «стереографическом треугольнике» дополнительно отображается ось первичного пучка – точка N^* .

* Точка N в стереографическом треугольнике показывает взаимное расположение вертикальной приборной оси Z и кристаллографических осей – и когда ось первичного пучка перпендикулярна поверхности образца, и когда неперпендикулярна поверхности.

В настоящее время автоматический поиск ориентации и автоматический анализ набора решений с определением минимальной разориентации лауэграмм от образцов, выращенных в направлении [111], в программе KROS находится в стадии доработки, поэтому в данной работе отклонение монокристалла с ориентировкой [111] определялось от направления [001].

Результаты и обсуждение

Съемка на дифрактометре ДРОН-4 по методу «качания»

Экспериментальная дифрактограмма – кривая «качания» – получена от направления [111] (в медном излучении при угле $\theta_{222}=48,1$ градуса). Продолжительность съемки в диапазоне углов от 0–96 градусов составила 9 мин. Шаг регистрации интенсивности по углу составляет 0,24 градуса, скорость перемещения столика образца вокруг главной оси гониометра ω : 13,3 градус/мин. На дифрактограмме видно (рис. 4), что в образце присутствуют три блока: основной кристалл характеризуется нулевым отклонением, второй блок имеет небольшое отклонение от кристаллографического направления [111] в 2,29 градуса, третий блок имеет большое отклонение в 31,3 градуса.

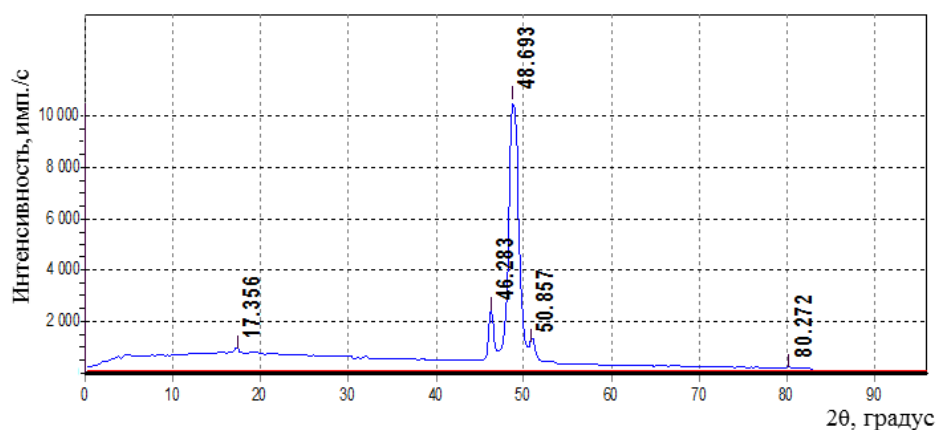


Рис. 4. Дифрактограмма – кривая «качания» образца из жаропрочного никелевого сплава с направленной структурой <111>, снятая с торца

Полученные дифракционные рефлексы представляет собой кривые распределения величины аксиального отклонения от каждого из блоков на облучаемой поверхности. Ширина распределения может быть охарактеризована через угловую величину – ширину на полувысоте пика. Таким образом, величина отклонения от КГО может изменяться по площади образца на ширину пика на полувысоте (табл. 2).

Таблица 2

Угол отклонения от кристаллографической ориентации (КГО) и ширина распределения КГО для основного кристалла и субкристаллов образца ЖНС

Фрагменты образца	Отклонение от КГО, градус	Ширина распределения КГО (средняя для пары пиков), градус
Основной кристалл	0,12	1,18
Субкристалл с малоугловым отклонением	2,29	0,68
Субкристалл с большеугловым отклонением	31,33	0,48

Для съемки по методу «качания» образец – его плоская (в данном случае торцевая) поверхность – размещается в центре держателя и таким образом выводится в отражающее положение, согласно оптической схеме прибора. Высота линейной проекции фокуса трубки и размеры щелевых устройств дифрактометра ДРОН-4 позволяют контролировать шлифы диаметром до 12 мм. Диаметр образца в торце составляет 8 мм, получаемая дифракционная картина содержит информацию о структурном совершенстве всей исследуемой поверхности.

Получаемые на экране компьютера изображения дифракционных максимумов являются проекцией на плоскость изменения интенсивности в координатах перемещения образца по шкале ω и одновременного вращения относительно оси приставки φ и содержат информацию только об аксиальной составляющей отклонения каждого из блоков.

Точность вычисления угла с учетом шага регистрации интенсивности варьируется от 0,24 до 0,5 градуса.

При съемке по методу Лауэ на установке ПРДУ неподвижный кристалл облучается полихроматическим узким малорасходящимся первичным пучком острой рентгеновской трубки, площадь облучения поверхности образца при этом составляет 0,4 мм². Получаемая таким образом лауэграмма содержит информацию о структурном совершенстве площадки размером 0,4 мм², т. е., можно сказать, точки. Время экспозиции зависит от степени травления поверхности и составляет обычно 4–6 мин. При тестировании структуры образца по методу Лауэ особых требований и ограничений к размеру и форме образцов не предъявляется, размерные ограничения связаны только с габаритами рентгенозащитной камеры.

Автоматизированное совмещение экспериментальной и расчетной лауэграмм дает возможность быстро (в течение 10–20 с) получить аксиальную и азимутальную составляющие точки N , т. е. выхода нормали к облучаемой поверхности на сетку гномостереографических проекций для кубической системы.

При наличии в отливке субзерен (блоков) на произвольно ориентированной поверхности образца производят парные съемки: одну съемку выполняют в области основного кристалла – рядом с границей субзерна, вторую – также рядом с границей, но в области субзерна. Перемещение точки, в которой скрещиваются пучки микролазеров (в эту точку будет направлен первичный пучок при съемке лауэграммы), производится строго поступательными подвижками образца вдоль осей X и Y и поступательным перемещением источника излучения вдоль оси Z . Из двух полученных лауэграмм после определения их матриц ориентации будет получена величина разориентации основного кристалла и субзерна.

На рис. 5 приведены результаты тестирования структуры образца с торцевой поверхности. Съемку лауэграмм проводили для каждого блока отдельно; полученные изображения обрабатывали автоматически и определяли углы разориентации основного кристалла с субзернами. Результаты расчетов представляют в графическом виде с обозначением точки нормали N к поверхности относительно кристаллографических направлений $[001]$, $[111]$ и $[011]$ и в табличной форме, где приведены углы отклонения от направлений $[001]$, $[010]$ и $[100]$. Основной кристалл (рис. 5, а) имеет отклонение от кристаллографического направления $[001]$ в 53,99 градуса, что почти равно углу между направлениями $[001]$ и $[111]$ в кубической системе. Субзерно 1 (рис. 5, б) имеет небольшой угол разориентации 2,9 градуса, а субзерно 2 имеет большую разориентацию в 30,7 градуса (рис. 5, в).

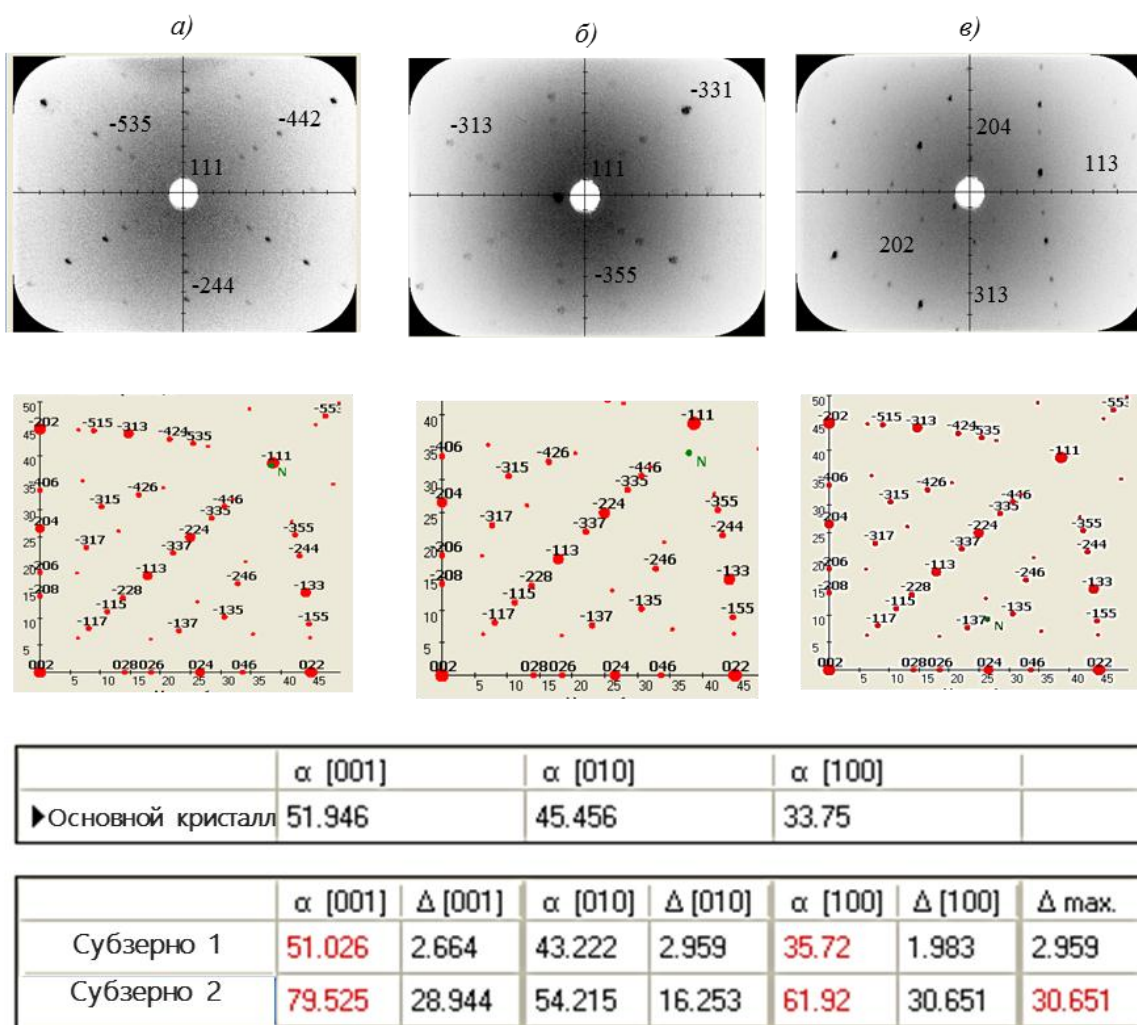


Рис. 5. Лауэграммы, снятые с торцевой поверхности монокристаллического образца с аксиальной ориентацией [111], и положение нормали к поверхности в стереографическом треугольнике. В таблице приведены углы отклонения от направлений [001], [010] и [100], а также Δ_{\max} – угол разориентации основного кристалла и субзерна (блока):

a – основной кристалл; *b* – субзерно 1 с малой разориентацией; *в* – субзерно 2 с большой разориентацией

Съемка с боковой поверхности целесообразна при наличии субзерен в структуре и главным образом предназначена для определения угла их разориентации. Для боковой цилиндрической поверхности образца параллельным перемещением удастся вывести в отражающее положение точки только от одной пары зерен, расположенных по обе стороны от границы (рис. 6).

В табл. 3 представлены для сравнения результаты измерения отклонений от КГО двумя методами с торцевой поверхности образца, а также добавлены результаты измерений по методу Лауэ с боковой поверхности образца. Оба метода могут применяться для массового контроля величины отклонения от КГО затравок, для которых монокристаллическая структура является необходимым условием годности, а также ростовых конусов образцов и лопаток из ЖНС, признанных монокристаллическими при визуальном контроле.

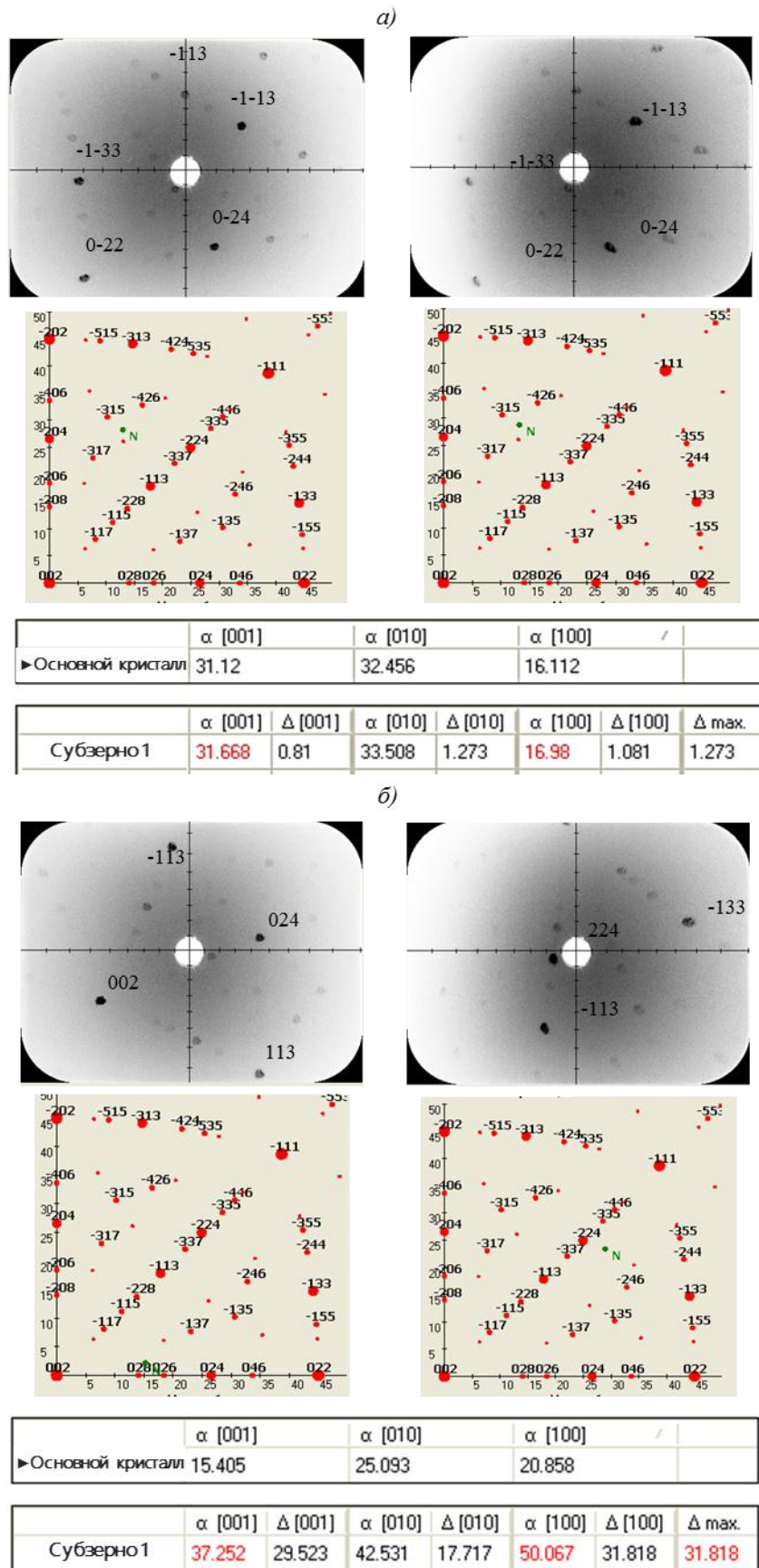


Рис. 6. Лауэграммы, снятые с боковой поверхности исследуемого образца, – основной кристалл и блоки с малой (а) и большой разориентацией (б)

Результаты измерения аксиального отклонения кристаллографической ориентации в исследуемом образце (основного кристалла и двух субзерен) методом «качания» на дифрактометре ДРОН-4 и методом Лауэ на установке ПРДУ

Установка	Основной кристалл (отклонение от КГО)	Субзерно 1 (малая разориентация)	Субзерно 2 (большая разориентация)	Место съемки на образце	Продолжительность съемки, мин
	градус				
ДРОН-4	0 от направления [111]	2,3	31,5	Торец	9
		относительно оси φ вращения приставки			
ПРДУ	51,9 от направления [001]	3,0	30,7	Торец	10 (в трех точках по 200 с)
		относительно основного кристалла			
	15,4 (рис. 4); 31,1 (рис. 5) от направления [001]	1,3	31,8	Боковая поверхность	13 (в четырех точках по 200 с)

Следует иметь в виду, что точность двух методов при определении отклонения от КГО существенно зависит от степени совершенства кристалла, а источники ошибок могут быть качественно разными при различных методах съемки. В любом случае она ограничена точностью реза отливки, обычно не превышающей 1 градус.

Заключения

Тестируемые при производстве лопаток ГТД затравки и ростовые конусы имеют торцевую плоскую площадку, перпендикулярную продольной оси. Диаметр затравок составляет 5–7 мм, а диаметр заготовок образцов для механических испытаний находится в пределах 12 мм, что соответствует высоте стандартных щелей дифрактометра ДРОН-4. Ростовые конусы, отрезанные от отливок лопаток, при условии, что вся их поверхность попадает в зону рентгеновского облучения, также удобно тестировать методом «качания» при массовом контроле качества структуры.

Оба метода – и «качания», и Лауэ – дают практически одинаковый результат измерения аксиальной составляющей отклонения заданного кристаллографического направления от оптической оси прибора, совмещенной с исследуемым направлением в образце. Съемка одного образца занимает приблизительно одинаковое время. Поэтому оба метода могут применяться для массового контроля величины отклонения от КГО затравок, для которых монокристаллическая структура является необходимым условием годности, а также ростовых конусов образцов и лопаток из ЖНС, признанных годными по структуре при визуальном контроле.

Точность обоих методов при определении отклонения от КГО ограничена точностью реза отливки, обычно не превышающей 1 градус.

Если при визуальном контроле отливки обнаружена субструктура, то необходимо определить аксиальную составляющую разориентации субзерен методом «качания» и при условии, что она не превышает требуемую по техническим условиям величину, отливку можно дополнительно протестировать методом Лауэ. Это позволит определить дополнительно к аксиальному еще и азимутальное отклонение для каждого блока структуры – положение точки выхода оси Z образца (при условии, что она совмещена с нормалью к исследуемой поверхности) относительно кристаллографических направлений [001], [111] и [011] (в стереографическом треугольнике), а также автоматически рассчитать угол разориентации основного кристалла и субзерен относительно друг друга.

Для определения угла разориентации основного кристалла и субзерен на поверхности отливки из ЖНС сложной формы удобен метод Лауэ. Он позволяет получать дифракционную картину практически с любой точки поверхности, протравленной на макроструктуру, и автоматически рассчитать углы разориентации блоков. При этом особых требований и ограничений к размеру и форме образцов не предъявляется, размерные ограничения связаны только с габаритами рентгенозащитной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
2. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
3. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Технология получения монокристаллических отливок турбинных лопаток ГТД заданной кристаллографической ориентации из ренийсодержащих жаропрочных сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. М.: Наука, 2006. С. 206–219.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 25–31.
5. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Исследование влияния переменного управляемого температурного градиента на особенности структуры, фазовый состав, свойства высокотемпературных жаропрочных сплавов при их направленной кристаллизации // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2016. №6 (111). С. 43–61.
6. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Орехов Н.Г., Голубовский Е.Р. Анизотропия прочностных характеристик монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. Спецвыпуск. С. 225–236.
7. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Орехов Н.Г., Остроухова Г.А. Структура и ростовые дефекты монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. Спецвыпуск. С. 190–202.
8. Назаркин Р.М., Колодочкина В.Г., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. Изменения микроструктуры монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в процессе длительной эксплуатации турбинных лопаток // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 9–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-9-17.
9. Назаркин Р.М. Рентгенодифракционные методики прецизионного определения параметров кристаллических решеток никелевых жаропрочных сплавов (краткий обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-41-48.
10. Хаютин С.Г. О разориентации зерен при направленной кристаллизации // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. №6. С. 42–43.
11. Сидохин Е.Ф., Сидохин Ф.А., Хаютин С.Г. О субструктуре монокристаллических лопаток ГТД // *Авиационная промышленность*. 2009. №1. С. 34–36.
12. Сидохин Ф.А., Сидохин А.Ф., Сидохин Е.Ф. Об определении кристаллографической ориентации монокристаллов методом Лауэ // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т. 75. №1. С. 35–37.
13. Лисойван В.И., Заднепровский Г.М. К методике определения ориентации кристаллографической плоскости в монокристалле на дифрактометре // *Аппаратура и методы рентгеновского анализа*. 1969. Вып. 4. С. 64–70.
14. Хейкер Д.М. Рентгеновская дифрактометрия монокристаллов. Л.: Машиностроение, 1973. 256 с.
15. Потрахов Н.Н., Хаютин С.Г., Лифшиц В.А., Осес Р. Установка ПРДУ-КРОС для экспрессного определения кристаллографической ориентации кубических монокристаллов по обратным лауэграммам // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. №8. С. 27–30.
16. Осес Р., Лифшиц В.А., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н. Программа расшифровки обратных лауэграмм ГЦК-монокристаллов для определения кристаллографической ориентации образцов (КГО-анализ): свид. о гос. рег. Программы для ЭВМ. №201164448. 2011.