

УДК 539.26

*Н.А. Кузьмина<sup>1</sup>, В.А. Лифшиц<sup>2</sup>, Е.Н. Потрахов<sup>2</sup>, Н.Н. Потрахов<sup>3</sup>***СПЕЦИФИКА ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ МЕТОДОВ  
«КАЧАНИЯ» И ЛАУЭ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА  
СТРУКТУРЫ ОТЛИВОК НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-75-83

*Системно проанализированы и обоснованы характеристики оборудования, работающего в монохроматическом излучении по методу «качания» и в полихроматическом излучении по методу Лауэ, применительно к специфике контролируемых образцов в технологии монокристаллического литья из никелевых жаропрочных сплавов. Основное применение метода «качания» – массовый контроль затравочных заготовок, затравок, ростовых конусов образцов и лопаток. Основное применение метода Лауэ – локальные замеры разориентации блоков в отливке турбинной лопатки, определение разориентации кристаллографической ориентации в контролируемых зонах на лопатке. Предложена оптимизированная комплектация для компактной модификации дифрактометра, работающего в монохроматическом излучении, для массового контроля структуры на производстве.*

**Ключевые слова:** монокристалл, кристаллографическая ориентация, разориентация субзерен, лауэграмма, рентгеновская дифракция, производственная технология монокристаллического литья.

*N.A. Kuzmina<sup>1</sup>, V.A. Lifshitz<sup>2</sup>, E.N. Potrakhov<sup>2</sup>, N.N. Potrakhov<sup>3</sup>***SPECIFICITY OF APPLICATION OF X-RAY METHODS OF «SWING»  
AND LAUE IN DETERMINING THE QUALITY OF THE STRUCTURE  
OF CASTINGS OF NICKEL HEAT-RESISTANT ALLOYS**

*Systematically analyzes and justifies the characteristics of equipment operating in monochromatic radiation by the «swing» method and in polychromatic radiation by the Laue method in relation to the specifics of controlled samples in the technology of single-crystal casting from nickel heat-resistant alloys. The main application of the «swing» method is the mass control of seed blanks, seedings, growth cones of samples and blades. The main application of the Laue method is local measurements of block misorientation in the casting of the turbine blade, determination of the crystallographic orientation misorientation in controlled areas on the blade. An optimized configuration is proposed for a compact modification of a diffractometer operating in monochromatic radiation for mass control of the structure in production.*

**Keywords:** single crystal, crystallographic orientation, subgrain disorientation, lauegram, x-ray diffraction, production technology of single crystal casting.

<sup>1</sup>Федеральное 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

<sup>2</sup>Закрытое акционерное общество «Электронная Техника-Медицина» [Joint stock company «Electronic Technique-Medicine»]; e-mail: info@eltech-med.com

<sup>3</sup>Федеральное 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

### Введение

Более ста лет прошло с момента открытия явления дифракции рентгеновских лучей в кристаллической структуре. В 1912 г. немецкий физик Макс фон Лауэ опубликовал результаты исследования дифракции полихроматического (белого) излучения в кристаллах. В 1914 г. английский кристаллограф В.Л. Брэгг и русский кристаллограф Г.В. Вульф независимо друг от друга опубликовали закон – условие дифракции монохроматического рентгеновского излучения в кристаллической структуре. Закон Брэгга–Вульфа позволяет определять межплоскостные расстояния в кристалле, так как длина волны монохроматического излучения обычно известна с высокой точностью, а углы отражения достаточно точно можно измерять экспериментально.

Рентгеноструктурный анализ – важнейший инструмент материаловедения. Основной задачей рентгеноструктурного анализа является определение симметрии элементарной ячейки кристалла по расположению дифракционных рефлексов на рентгенограмме – это, прежде всего, инструмент изучения строения материала и положения атомов в пространстве элементарной ячейки. Чрезвычайная сложность объектов исследования и задач современного материаловедения стимулирует совершенствование рентгеновских аппаратов и технику расчетов. Создаваемая аппаратура имеет специфику, обусловленную решаемыми исследовательскими задачами.

За столетнюю историю рентгеноструктурного анализа разработано множество методик измерения дифракционных картин и их анализа. Но все методы рентгеновской дифрактометрии можно разбить на две группы: работающие в полихроматическом или в монохроматическом излучении. В свою очередь, методы, основанные на монохроматической дифракции, делятся на исследования монокристаллов и поликристаллов – так называемый метод «порошка».

#### *Дифрактометры, работающие в монохроматическом излучении*

Развитие рентгеновских дифрактометров, работающих в монохроматическом излучении, идет в двух направлениях:

- стационарные крупногабаритные и мощные универсальные установки;
- передвижные, малогабаритные, специализированные приборы.

Рентгеновские дифрактометры с большим гониометром позволяют проводить угловые измерения с высокой точностью. Источники рентгеновского излучения становятся интенсивнее с каждым годом, выводя на новый уровень прецизионность и чувствительность современных исследовательских методов [1]. Высокая интенсивность излучения повышает чувствительность метода и позволяет выявлять самые малые количества веществ в пробах. Такие дифрактометры используют для сложных исследовательских задач, связанных с открытием или созданием новых материалов, расшифровкой сложных структур органических соединений – белков, витаминов, вирусов [2–6].

С созданием быстрорегирующей аппаратуры точечные сцинтилляционные детекторы рентгеновского излучения вытесняются линейными и двумерными детекторами с высоким временным и пространственным разрешением. Такие детекторы позволяют получить набор дифракционных отражений вещества сразу для широкого углового диапазона и таким образом сократить время регистрации дифрактограмм [7].

Компактные, настольные модели дифрактометров имеют гониометр меньшего радиуса и точность угловых измерений приблизительно на порядок меньше, чем на стационарных дифрактометрах, но достаточную, чтобы решать стандартные задачи рентгенофазового или рентгеноструктурного анализа. Размеры и масса прибора не позволяют генерировать излучение высокой интенсивности, что, с одной стороны, делает современные компактные дифрактометры более радиационнобезопасными, а с другой –

вынуждает использовать острофокусные трубки, что также позволяет получать «структурную» информацию даже от малого количества образца [8, 9].

Компактные модели удобны для обучения специалистов, а также на предприятиях для проведения однотипных рентгеновских исследований, когда необходим контроль структуры изделий. В работе [10] дан обзор, например, компактных рентгеновских дифрактометров, имеющих в коммерческой продаже в РФ. Из семнадцати моделей дифрактометров: двенадцать – предназначены для задач фазового анализа; специализированных моделей – пять, из которых три – предназначены для определения величины остаточных напряжений в поверхностном слое опытных образцов и только две (дифрактометр компаратор КОР (ООО «Институт рентгеновской оптики») и дифрактометр D2 CRYSO (фирма Bruker Nano AXS GmbH, ФРГ)) – для определения отклонения от заданной кристаллографической ориентации на пластинах (срезах) монокристаллических образцов.

#### *Приборы, работающие в полихроматическом излучении по методу Лауэ*

Метод Лауэ, явившийся исторически первым методом рентгеноструктурного анализа, не стал основным для научных исследований, а применялся на начальном этапе для определения симметрии и ориентировки кристалла. Для этих целей в 1950 г. на физическом факультете МГУ была сконструирована камера РКСО (рис. 1) [2]. Дифрагированное излучение фиксировалось на плоской фотопленке. После проявки фотопленки на лауэграммах вручную определяли симметрию полученных отражений, а угловые измерения проводили с помощью сетки Вульфа.

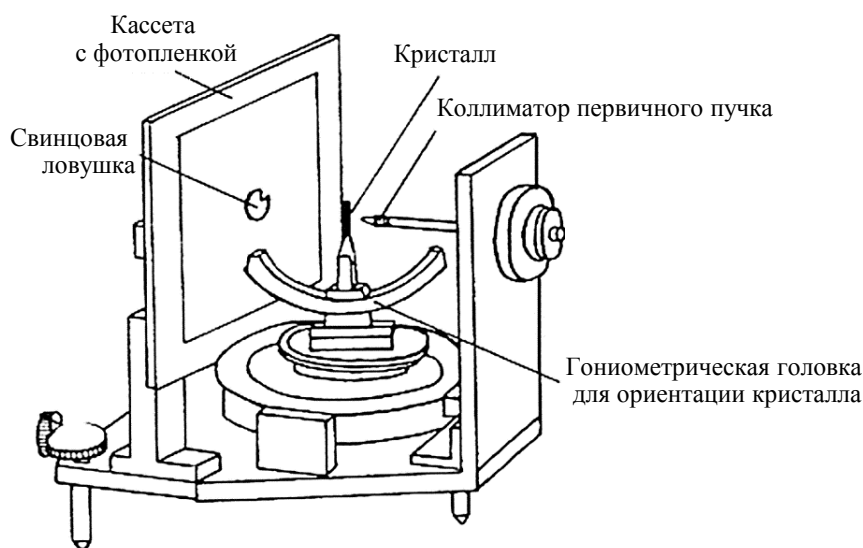


Рис. 1. Камера РКСО для определения симметрии и ориентировки кристалла

Однако метод Лауэ оказался востребован для решения производственных задач – исследования монокристаллов, не пригодных по форме и размерам для контроля на дифрактометрах общего назначения. Разработка техники старейшего дифракционного метода – статической съемки по Лауэ – была направлена на автоматизацию определения ориентации структуры в изделии и разориентации ее фрагментов при обработке лауэграмм [11, 12].

За рубежом для контроля структуры монокристаллических лопаток созданы полностью автоматизированные высокомо мощные специальные установки – XRD 3003

Galaxy, Scorpio, MWL120. Точная механика этих приборов позволяет оператору произвольно перемещать контролируемый объект относительно первичного пучка и наблюдать изменение картины Лауэ на мониторе компьютера в режиме реального времени.

Отечественные приборостроители воспользовались достижениями рентгеновской медицинской техники, тесно связанной с микрофокусной рентгенографией, и создали компактную рентгеновскую установку ПРДУ-КРОС, работающую по методу Лауэ. Применение многоразовых пластин с фотостимулируемым люминофором позволило исключить длительные и трудоемкие операции, связанные с проявлением и сушкой традиционной фотопленки. Благодаря вспомогательному оборудованию – сканеру – стало возможно переводить экспериментальные лауэграммы на экран компьютера. Созданные специально для кристаллов кубической сингонии программы, в свою очередь, позволяют автоматизировать процесс обработки лауэграмм, сокращая время до 10–20 с (рис. 2). Использование острофокусной трубки с вольфрамовым анодом позволило получить первичный пучок высокой интенсивности при относительно небольших размерах установки. Габариты рентгенозащитной камеры достаточны для исследования лопаток типовых размеров [13].

Таким образом, метод Лауэ, известный с 1912 г., стал современным инструментом рентгеноструктурного анализа, доступным не только для исследовательских задач, но и для технологического процесса, т. е. стал иметь сугубо прикладное назначение для неразрушающего контроля большого количества однотипных образцов на производстве, где от метода исследования требуется простота, скорость и надежность.

В настоящее время при производстве монокристаллических литых лопаток применяют рентгеновские методы контроля структуры: метод Лауэ – в полихроматическом излучении, метод «качания» – в монохроматическом излучении. Специфика применяемого оборудования определяется особенностями объектов контроля и нормативными требованиями к их структуре [14–18].

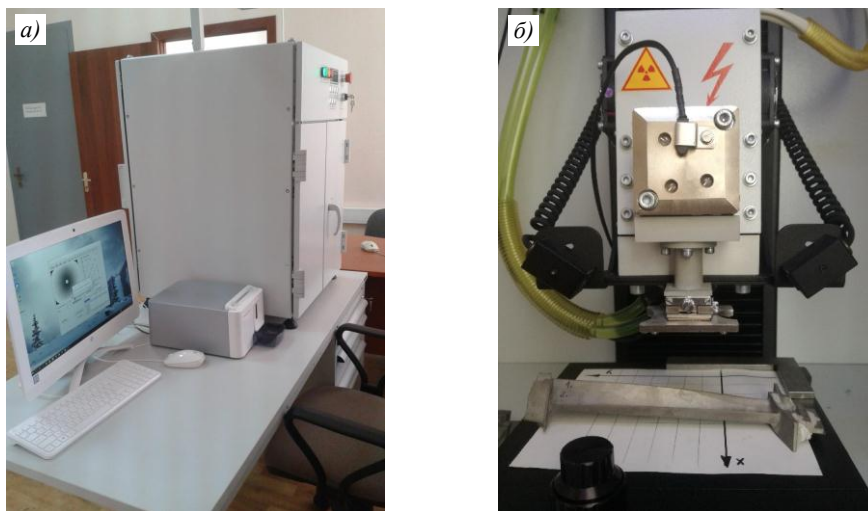


Рис. 2. Общий вид современной установки Лауэ (а) и блок рентгеновского излучения и столик для позиционирования объектов контроля (б)

Цель данной работы – системно проанализировать и обосновать характеристики оборудования, работающего в полихроматическом излучении по методу Лауэ и в монохроматическом излучении по методу «качания», применительно к специфике контролируемых образцов, изготовленных по технологии монокристаллического литья из никелевых жаропрочных сплавов.

## Материалы и методы

В данной работе выполнено сравнение двух методик измерения: по методу Лауэ в полихроматическом излучении на компактной многофункциональной рентгеновской установке ПРДУ и регистрация дифракционной картины методом «качания» в монохроматическом излучении на полноразмерном дифрактометре общего назначения ДРОН-4. Объекты измерения – монокристаллические отливки из никелевых жаропрочных сплавов.

## Результаты и обсуждение

### *Специфика объектов и средств контроля*

**Связь геометрической формы отливки и ее структуры.** Структура никелевых сплавов на основе системы Ni–Ni<sub>3</sub>Al – кубическая гранецентрированная и кубическая примитивная – давно известна. Хорошо изучена анизотропия свойств длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов в различных кристаллографических направлениях при различных температурах. Как наиболее оптимальное по свойствам выбрано направление <001>. Свойство длительной прочности изделий во многом определяется тем, насколько точно заданное кристаллографическое направление структуры сплава совпадает с направлением действия главных растягивающих напряжений – осью Z образца для испытаний или лопатки двигателя [19–24].

На дифракционном порошковом спектре никелевых жаропрочных сплавов, полученном в медном излучении, направлению структуры <001> соответствуют два отражения (002) и (004). В зависимости от состава сплава угол отражения может колебаться около значений  $2\theta_{(002)} \approx 51,4$  градуса и  $2\theta_{(004)} \approx 118,3$  градуса. Для определения угла отклонения от заданной кристаллографической ориентации (КГО) можно использовать оба отражения. Помимо отражений (002) и (004) могут быть использованы отражения (001) и (003) от структуры Ni<sub>3</sub>Al. Для качания кристалла около точного положения детектора предпочтителен традиционный точечный детектор, хотя линейные или двумерные детекторы, предназначенные для получения поликристаллических (порошковых) дифрактограмм, также могут быть использованы как в режиме «открытой щели» (совмещенных пикселей детектора), так и в режиме индивидуальных детекторов.

Используя анизотропию свойств, геометрическую форму изделий из никелевых жаропрочных сплавов и направление структуры связывают, все измерения проводят относительно оси Z отливки. Это позволяет обходиться без специальных текстурных приставок в любом из двух методов. В методе «качания» используется обычная приставка для порошкового анализа, в которой поверхность реза позиционируется плоскопараллельно краям стандартной кюветы или держателя.

В методе Лауэ для определения отклонения от КГО посредством специальных ложементов ось Z отливки ориентируют вертикально и совмещают с первичным пучком излучения, направленным всегда вертикально по отношению к столику для позиционирования образцов (рис. 2).

**Требования к качеству структуры.** Определяемые характеристики структуры имеют предельные значения, указанные в нормативных документах, превышение которых является признаком брака. Требования по качеству структуры предъявляются к аксиальному отклонению ( $a$ ) направления <001> от оси Z и к аксиальной разориентации ( $\Delta a$ ), если структура отливки фрагментирована, которые обычно составляют:  $a \leq 10$  градусов,  $\Delta a \leq 3$  градуса.

Монокристаллы никелевого жаропрочного сплава не являются идеальными кристаллами, а имеют дендритное строение. Требования по качеству предъявляются ко всему объему отливки, поэтому важно получать данные о структуре со всей площади

реза, перпендикулярного исследуемому направлению в отливке – оси  $Z$ . Для этих целей необходим широкий пучок излучения, облучающий всю поверхность образца. Это возможно только на дифрактометре с щелевым пучком излучения при быстром вращении образца. На дифрактометре ДРОН-4 высота стандартных щелей составляет 12 мм, ширина 1–2 мм, таким образом, сканируется вся поверхность, попадающая в зону облучения. Обычно этого достаточно для контроля структуры затравочных заготовок, затравок и ростовых конусов. В методе «качания» кривая «качания» – это распределение углов отклонения от заданной КГО, где интенсивность кривой качания складывается из отражений от каждого дендрита.

Приборы с острофокусными трубками не дают полной картины структуры монокристаллических отливок из никелевых жаропрочных сплавов. Так, установка ПРДУ-КРОС имеет острофокусную трубку с размером фокусного пятна  $0,1 \times 0,1$  мм, а диаметр площади облучения составляет  $\sim 2$  мм, следовательно, получаемая информация о структуре отливки в одной точке неполная, т. е. ограниченная измерениями для небольшой группы дендритов.

**Размеры объектов контроля** литых монокристаллических изделий в данной технологии производства значительно варьируются (где  $d$  – диаметр,  $h$  – высота): затравочные заготовки –  $d = 5–8$  мм,  $h = 200$  мм; затравки –  $d = 5–8$  мм,  $h = 4–6$  мм; ростовые конусы образцов или лопаток –  $d = 12–15$  мм,  $h = 20–40$  мм; образцы для испытаний –  $d = 12–15$  мм,  $h = 220$  мм; лопатки –  $h = 100$  мм и более. Затравочные заготовки, затравки, ростовые конусы и образцы можно закреплять в держателе образцов на дифрактометре типа ДРОН с горизонтальным гониометром.

Контроль структуры отливок сложной геометрической формы, таких как лопатки, возможен в условиях стационарной съемки на установке ПРДУ-КРОС, рентгенозащитная камера которой позволяет размещать объекты разных размеров, а специальные ложементы – позиционировать относительно первичного пучка объекты сложной геометрической формы.

**Точность измерений.** В методе «качания» измерения проводятся с точностью до 0,01 градуса на приборе типа ДРОН, а в методе Лауэ точность вычисления угла отклонения от КГО составляет 0,3 градуса на приборе ПРДУ. В технологии монокристаллического литья из никелевых жаропрочных сплавов точность обеих методик контроля ограничена точностью реза: на отрезном круге 1 градус, а электроискровым методом 0,5 градуса. Дополнительно вклад в погрешность измерения вносит и неточность позиционирования отливки в держателе. Следовательно, для методики контроля отклонения КГО по методу «качания» приборная точность (т. е. высокая разрешающая угловая способность) 0,005 градуса, обеспечиваемая полноразмерным гониометром ГУР-9 на дифрактометре ДРОН-4, не актуальна.

Контрастность дифракционной картины зависит от многих факторов: отражающей способности атомов исследуемого материала, его кристаллической структуры, материала анода, мощности излучения установки, длительности экспозиции, подготовки поверхности – удаления наклепанного слоя травлением. Последний фактор (травление) относится к этапу пробоподготовки и в данной статье не рассматривается.

**Материал анода.** Выбор материала мишени анода рентгеновской трубки для съемки в монохроматическом излучении определяется составом исследуемых объектов. Уменьшение поглощения излучения кристаллом и, следовательно, высокая интенсивность дифрагированных отражений достигаются при условии, когда атомный номер материала анода меньше атомного номера материала объекта исследования. Для никелевых сплавов наилучшим материалом анода является медь. Высокая интенсивность

дифрагированных отражений от монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов позволяет проводить регистрацию импульсов в «мягком» режиме – обычно при напряжении 20 кВ и токе 10 мА. Высокая потенциальная мощность полноразмерного исследовательского дифрактометра ДРОН-4 остается невостребованной.

При экспозиции в полихроматическом излучении по методу Лауэ используется рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом для получения интенсивного первичного пучка при невысокой мощности установки. Регистрацию отражений обычно проводят при напряжении 25 кВ и токе 4,5 мА.

**Длительность съемки** по методу «качания» зависит от углового диапазона качания и скорости поворота столика с образцом. Высокая интенсивность дифрагированных отражений позволяет задавать высокую скорость поворота столика: 13–17 градусов/мин. В зависимости от диапазона качания и скорости перемещения столика длительность съемки составляет приблизительно: 2–3 мин – для затравки ( $\pm 10$  градусов), 4–6 мин – для образцов и ростовых конусов образцов из никелевых жаропрочных сплавов ( $\pm 20$  градусов), 8–12 мин – для затравочных заготовок ( $\pm 30$  градусов).

Для получения контрастной картины дифрагированных отражений по методу Лауэ на установке ПРДУ достаточно 1,5–2 мин для экспозиции отливок из никелевых жаропрочных сплавов в одной точке. Соответственно, продолжительность съемки одного образца кратна числу точек исследования на его поверхности. Программное обеспечение, созданное специально для кубических структур, освобождает оператора от рутинного труда по совмещению экспериментальной и теоретической сеток дифракционных максимумов [25]. Расчеты угла отклонения оси Z отливки от направления КГО и угла разориентации блоков автоматизированы и занимают обычно не более 0,5–1 мин.

### Заключения

Проведенный анализ специфики оборудования, методик и объектов контроля для технологии монокристаллического литья из никелевых жаропрочных сплавов позволяет сделать следующие выводы.

Контроль структуры в полихроматическом излучении по методу Лауэ соответствует требованиям производственного контроля аксиальной ориентации в точке и разориентации блоков кристаллов в лопатке из никелевого жаропрочного сплава, которым полностью отвечает компактная передвижная рентгеновская установка ПРДУ-КРОС (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Технопарк СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург).

При методе «качания» в монохроматическом излучении имеющиеся в коммерческой продаже компактные специализированные дифрактометры, предназначенные для определения отклонения КГО, для контроля структуры по технологии монокристаллического литья из никелевых жаропрочных сплавов конструктивно не подходят. В связи с этим на производстве используются широко распространенные мощные стационарные исследовательские универсальные дифрактометры типа ДРОН с горизонтальным гониометром.

Специфика применения метода «качания» для контроля монокристаллических отливок из никелевых жаропрочных сплавов – это «мягкий» режим регистрации дифракционных отражений и относительно невысокая требуемая точность измерений. Все это дает возможность проводить аналогичные измерения на дифрактометре настольного типа. С учетом возрастающих требований к качеству структуры монокристаллических литых изделий из никелевых жаропрочных сплавов на производстве, создание специализированного компактного дифрактометра, работающего в монохроматическом излучении, является актуальным.

**Библиографический список**

1. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: Физматлит, 2007. 672 с.
2. 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.
3. Хейкер Д.М. Рентгеновская дифрактометрия монокристаллов. Л.: Машиностроение, 1973. 256 с.
4. Шамрай В.Ф., Лифшиц В.А., Серебряный В.Н. и др. Опыт использования дифрактометра ДРОН-7 с приставкой ПГТМ для исследования текстур // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 1. С. 32–35.
5. 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.
6. 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.
7. Гоганов Д.А., Казанский Б.В., Клименская Д.А. и др. Позиционно-чувствительные детекторы мягкого рентгеновского излучения и их применение // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 109–116.
8. Пьянкова Л.А., Елохин В.А., Архипов С.Н. и др. Контроль функциональных слоев ВТСП-2 с помощью текстурной приставки рентгеновского дифрактометра «Дифрей-401» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 82 (10). С. 44–46.
9. Абызов А.М. Рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ на минидифрактометре «Дифрей»: учеб. пособие. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2008. 95 с.
10. Назаркин Р.М. Малогабаритные рентгеновские дифрактометры для задач структурно-фазового анализа (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-89-99.
11. Уманский М.М. Аппаратура рентгеноструктурных исследований. М.: Физматгиз, 1960. 348 с.
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. 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.
14. Кузьмина Н.А., Лифшиц В.А., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н. Сравнительный контроль структуры монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов рентгеновскими дифракционными методами «качания» и Лауэ // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.
15. 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.
16. 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.
17. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Технология получения монокристаллических отливок лопаток ГТД заданной кристаллографической ориентации из ренийсодержащих жаропрочных сплавов // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 206–219.

18. 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 (21). С. 25–31.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Сидохин Е.Ф., Сидохин Ф.А., Хаютин С.Г. О субструктуре монокристаллических лопаток ГТД // *Авиационная промышленность*. 2009. № 1. С. 34–36.
23. Макро- и микроструктура никелевых жаропрочных сплавов, предназначенных для монокристалльного литья лопаток. URL: [https://studme.org/151298/tehnika/makro\\_mikrostruktura\\_nikelevyh\\_zharoprochnyh\\_splavov\\_prednaznachennyh\\_monokristalnogo\\_litya\\_lopatok](https://studme.org/151298/tehnika/makro_mikrostruktura_nikelevyh_zharoprochnyh_splavov_prednaznachennyh_monokristalnogo_litya_lopatok) (дата обращения: 14.10.2020).
24. Петрушин Н.В., Висик Е.М., Елютин Е.С. Усовершенствование химического состава и структуры литейного жаропрочного никелевого сплава с малой плотностью. Часть 2 // *Труды ВИАМ*. 2021. № 4 (98). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-3-15.
25. Осес Р.Х., 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. регистр. прог. для ЭВМ № 2011614448 от 06.06.2011.