



УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-6-6

**ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА
СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

Л.М. Шишкарева

Н.А. Кузьмина

кандидат геолого-минералогических наук

Январь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-6-6

Л.М. Шишкарёва, Н.А. Кузьмина

ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

В таком высокотехнологичном процессе, как производство монокристаллических изделий, контроль качества приобретает особенно важное значение. Рентгенографические методы исследования совершенства структуры кристаллов являются перспективными технологиями, позволяющими осуществлять быстрый, точный и достаточно простой контроль монокристаллических изделий на различных этапах производства.

Статья посвящена обзору существующих современных методик рентгенодифракционного контроля, анализу их недостатков и выработке рекомендаций, позволяющих оптимизировать процесс контроля монокристаллических литейных изделий.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, рентгеновская дифрактометрия, метод Лауэ, метод качания, полюсные фигуры, мисфит.

L.M. Shishkareva, N.A. Kuzmina

REVIEW OF METHODS FOR DETERMINING THE QUALITY OF THE STRUCTURE OF SINGLE-CRYSTAL CASTINGS FROM SUPERALLOYS

Quality control in industrial production level is determined and provides the properties and characteristics of the final product. In such a high-process as the production of single crystal articles, quality control becomes particularly important. X-ray diffraction methods for studying the structure of crystals are the perfect advanced technologies that allow for fast, accurate and simple enough control of single-crystal products at various stages of production.

The article provides an overview of existing modern X-ray diffraction techniques to control, analyze their weaknesses and make recommendations to optimize process control of single crystal castings.

Key words: heat-resistant alloys, X-ray diffraction, Laue method, swing, pole figures, misfit.

В авиационном двигателестроении основные требования к материалам, применяемым для изготовления лопаток турбин, обусловлены развитием конструкции двигателей – непрерывным повышением жаропрочности, пластичности, сопротивления термической и малоцикловой усталости, стойкости к воздействию газовой среды [1]. Для их изготовления используют жаропрочные сплавы на никелевой основе. Особое место среди жаропрочных сплавов занимают литейные сплавы, которые широко применяются в современных газотурбинных двигателях (ГТД), поэтому к их структурному совершенству предъявляются жесткие требования [2, 3]. Для решения производственных задач используется метод рентгеновской дифрактометрии. Первые эксперименты проводились на монокристаллах никеля: отливались по технологии, разработанной И.М. Демонисом, которая позволила исследовать монокристаллическую структуру никелевых сплавов с дендритно-ячеистой структурой и разработать методы травления для выявления микроструктуры и определения кристаллографической ориентации отливок [4, 5].

Контроль качества структуры монокристалла

Одним из первых для контроля качества литых изделий стал применяться метод, открытый в 1912 году немецким физиком М. Лауэ, – простейший метод получения рентгенограмм монокристаллов. В *методе Лауэ* используется непрерывный белый спектр рентгеновского излучения, который направляется на неподвижный образец. Рентгенограммы, снятые по методу Лауэ, называют *лауэграммами*. Расположение дифракционных пятен на лауэграммах (рис. 1) зависит от симметрии кристалла и его ориентации относительно падающего луча и позволяет установить его принадлежность к одной из 11 лауэвских групп симметрии и определить направление кристаллографических осей (ориентировать) с точностью до нескольких угловых минут. По характеру пятен на лауэграммах и, особенно, появлению астеризма можно выявить внутренние напряжения и некоторые другие дефекты кристаллической структуры [6]. Методом Лауэ проверяют качество монокристаллов с целью выбора образца для более полного структурного исследования.

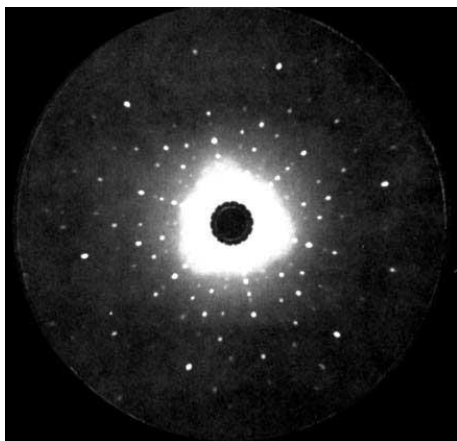


Рисунок 1. Расположение дифракционных пятен на лауэграмме

Метод Лауэ является длительной и дорогостоящей операцией, поэтому для контроля качества структуры монокристаллических лопаток при массовом производстве разработаны автоматизированные системы определения пространственной ориентации структуры методом обратной рентгено съемки по Лауэ в реальном масштабе времени. Одной из современных является полностью компьютеризированная установка GALAXY. Функция контролера заключается только в установке лопатки в специальный держатель и ориентации изображения для последующего анализа. Генерация изображения и его расшифровка производятся мгновенно – скорость контроля одной лопатки составляет 1 мин. Установка обеспечивает высокое качество изображения, которое невозможно получить устаревшими фотографическими методами. Результаты контроля хранятся в памяти компьютера и могут быть воспроизведены на принтере [7].

Достоинства – часто является исходным методом оценки структуры монокристалла [8].

Недостатки – по виду лауэграммы без дополнительного исследования невозможно установить, отражения каких порядков наблюдаются, а каких – отсутствуют, так как разные пятна лауэграммы создаются лучами различной длины волны [8].

Контроль аксиальной и азимутальной ориентаций монокристаллических лопаток можно осуществлять не только методом Лауэ, но и методом рентгеновской дифрактометрии.

Определение кристаллографической ориентации (КГО)

Контроль ориентации структуры отливки проводится на конусах-кристалловодах, отрезанных от лопаток. Плоскость поперечного реза должна быть перпендикулярна оси лопатки. Монокристаллической отливкой из жаропрочного никелевого сплава принято считать отливку, состоящую из одного зерна, в которой максимальная угловая разориентация образующих ее фрагментов не превышает 5 град [9]. Рентгеноструктурный контроль ориентации структуры конусов осуществляется на дифрактометрах типа ДРОН с использованием стандартной гониометрической приставки (ГП-13). Рентгено съемка осуществляется с поперечного шлифа конуса, закрепленного в держателе приставки. Перед рентгеноструктурной съемкой требуется травление исследуемой поверхности – для того, чтобы снять наклеп и выявить дендритную структуру. С целью повышения точности контроля облучается по возможности бóльшая площадь сечения конуса [2].

Для определения угла отклонения КГО счетчик дифрактометра устанавливается неподвижно в положение $2\theta_{001}$, соответствующее отражению четвертого порядка от плоскостей $\langle 001 \rangle$ (в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении $2\theta_{001}=118,5$ град), а исследуемый конус, вращаясь в держателе приставки вокруг нормали к поверхности шлифа со скоростью 60 об/мин, одновременно поворачивается с помощью маршевого двигателя вокруг главной оси гониометра, т. е. относительно первичного рентгеновского луча, в диапазоне углов 75–45 град (по лимбу образца) [10]. В зависимости от фрагментации монокристаллической структуры конуса и степени разориентировки каждого из фрагментов рефлекс отражения может состоять из одного (рис. 2, а) или нескольких отдельно стоящих или накладывающихся друг на друга пиков (рис. 2, б), каждый из которых соответствует отражению от отдельного фрагмента.

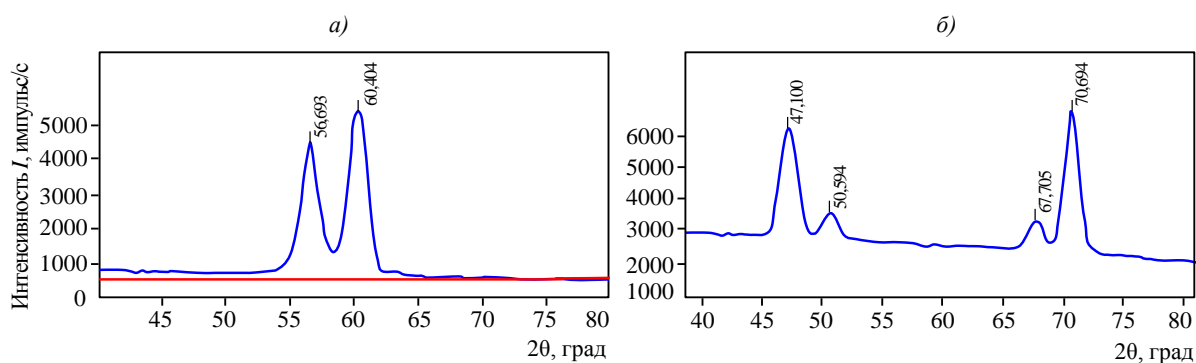


Рисунок 2. Рефлексы отражения от монокристаллического (а) и блочного (б) образцов

Дифрактометрический метод качания позволяет судить о разориентации отдельных фрагментов монокристалла и об их числе по уширению и форме спектральной рентгеновской линии.

Достоинства – простая методика съемки и высокая скорость.

Недостатки – ограничение размера образца размерами держателя.

Разметка монокристаллических заготовок под ориентированную вырезку затравок

Для изготовления отливок заданной кристаллографической ориентации используются затравки, полученные методом ориентированной вырезки из затравочной заготовки. Аксиальная ориентация затравочных заготовок характеризуется отклонением оси заготовки от требуемого кристаллографического направления (выводится в отражающее положение и ставится вертикальная метка). После разметки заготовки и ориентированной резки вся партия затравок, полученных из одной заготовки, подвергается

травлению для удаления деформированного при вырезке слоя и выявления дендритной структуры. Далее проводят рентгеноструктурный контроль затравки по методу качания [11]. Указанные затравки применяются для получения монокристаллических турбинных лопаток с заданной кристаллографической ориентацией в аксиальном и азимутальном направлениях.

Контроль ориентации монокристаллических лопаток по фигурам травления

Определение и контроль ориентации проводится по следам травления, образующимся в результате выявления дендритной структуры отливки. Данная методика применяется преимущественно для полученных направленной кристаллизацией отливок с макроскопически плоским фронтом роста, когда направление теплоотвода одинаково по всей поверхности фронта роста и совпадает с направлением кристаллизации. Дендритная структура выявляется лишь при сильном травлении поверхности образца. Поскольку для турбинной лопатки данная операция неприемлема, то металлографический контроль ее ориентации следует проводить на вспомогательных частях отливки – конусах-кристалловодах, передающих монокристаллическую структуру затравки непосредственно телу лопатки, или на цилиндрах-свидетелях у выходной кромки пера лопатки, которые кристаллизуются одновременно с лопаткой и предназначены для изготовления образцов с целью контроля механических свойств материала [12]. Контроль ориентации турбинной лопатки проводится по фигурам травления на поперечном и двух взаимно перпендикулярных продольных сечениях конуса или на цилиндрической поверхности цилиндра-свидетеля. Поперечныерезы контролируемых элементов отливки выполняются обычно на отрезных станках с вулканитовым диском, продольные сечения конуса готовят на плоскошлифовальных станках или наждачным камнем. Достоверность определения ориентировки зависит от точности выполняемых резов, поэтому параллельность продольных сечений, а также перпендикулярность поперечного реза с осью лопатки должны быть, безусловно, обеспечены. Сечения, предназначенные для исследования, подвергаются травлению в концентрированной соляной кислоте и перекиси водорода, смеси азотной и плавиковой кислот с водой и других [2].

В отличие от лопаток к поверхностям цилиндров-свидетелей, заготовок для изготовления затравок и образцов для механических испытаний особых требований по чистоте не предъявляется – определение ориентации проводят непосредственно по фигурам травления на их цилиндрической поверхности (рис. 3).

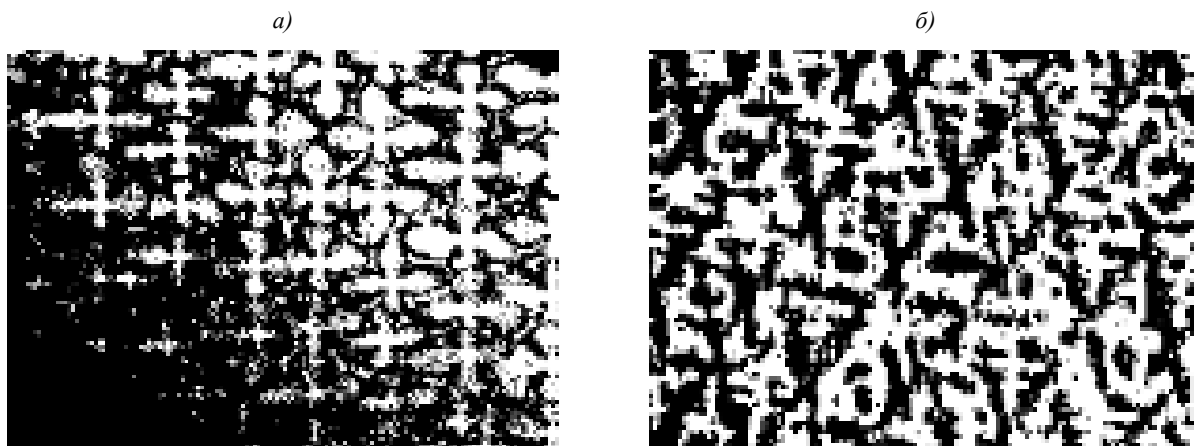


Рисунок 3. Дендритная структура образцов из никелевых жаропрочных сплавов с КГО [111] (а) и [001] (б)

Достоинства – возможность определения качества структуры по любым размерам образцов и поверхностям.

Недостатки – результаты определения КГО приблизительные.

Вышеуказанные методики относятся к производственным – они просты и не продолжительны. Однако существуют исследовательские методики, применяемые при создании и разработке жаропрочных сплавов: фазовый анализ, мисфит, полюсные фигуры и т. д.

Метод полюсных фигур позволяет получать необходимый набор координат для каждого блока структуры и прямые полюсные фигуры (ППФ), удобные для описания и анализа текстур. Полюсными фигурами поликристалла называются гномостереографические проекции определенной кристаллографической плоскости (hkl) всех кристаллических зерен этого поликристалла. Положение точек полюсной фигуры определяется двумя углами: α и β , где α – радиальная координата, изменяющаяся от 0 до 90 град; β – азимутальная координата, изменяющаяся от 0 до 360 град [6, 13].

Дифрактометрический анализ текстуры с использованием ППФ основан на измерении интенсивности (I_{hkl}) отражения от определенных атомных плоскостей (hkl) при разном положении образца по отношению к падающему пучку света, которое создается путем его вращения вокруг определенных кристаллографических направлений. Метод ППФ может быть использован и для оценки структурного совершенства монокристаллических отливок жаропрочных сплавов (ЖС). На рентгеновских дифрактометрах типа ДРОН прямые полюсные фигуры монокристаллов можно получить с помощью гонио-

метрической приставки ГП-14 [14], предназначенной для исследования монокристаллических образцов. Монокристаллы ЖС состоят из дендритов, имеют мозаичное строение и субзерна. С точки зрения рентгеноструктурного анализа каждое субзерно, которое можно назвать блоком, является монокристаллом (рис. 4).

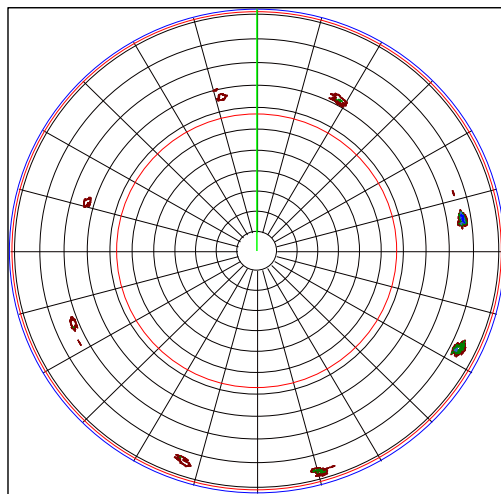


Рисунок 4. Полюсная фигура {133} монокристаллического никелевого сплава

Достоинства – метод ППФ позволяет получить более достоверную картину структурного совершенства кристаллов, точно определить не только аксиальное отклонение структуры от заданного направления, но и азимутальное, а также истинную величину разориентации между блоками кристалла.

Недостатки – более долгая съемка по сравнению с методом качания.

Фазовый анализ монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов

Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов не являются идеальными и состоят из макроблоков с мозаичной структурой, что затрудняет проведение фазового анализа. Данная методика обеспечивает проведение качественного фазового анализа с учетом вышеперечисленных особенностей. Все измерения проводят с одного плоского шлифа. Для фазового анализа монокристаллов, в отличие от поликристаллов, необходимо определить ориентацию требуемых кристаллографических плоскостей образца, например (111), (200), (220), (311), и вывести их в отражающее положение [15]. Затем расчетным методом выделяют один наиболее представительный блок монокристалла. После этого для каждого выбранного направления (плоскости) проводят $(\theta/2\theta)$ -сканирование в широком интервале брегговских углов [16]. Полученные дифрактограммы индицируют: определяют межплоскостное расстояние для каждого рефлекса.

С помощью специализированного программного обеспечения производят поиск фаз по межплоскостным расстояниям.

Эта методика позволяет провести качественный фазовый анализ образцов монокристалла жаропрочных никелевых сплавов и определить параметры структуры γ - и γ' -фазы.

Определение параметров размерного несоответствия периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз (γ/γ' -мисфит) в никелевых жаропрочных сплавах

В процессе создания и изучения никелевых жаропрочных сплавов большое значение придается структурным параметрам, характеризующим степень упрочнения и термическую стабильность фаз. Среди большого набора таких параметров используются и периоды кристаллических решеток твердых растворов никеля γ - и γ' -фазы на основе Ni_3Al , а также размерное несоответствие этих периодов [17].

Несоответствие параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз обусловлено химическим составом и различием коэффициентов термического расширения этих фаз. Известно, что при высокой степени несоответствия периодов решеток заметно увеличивается твердость никелевых сплавов после старения. Существует мнение, что высокая степень размерного несоответствия является важным фактором при температурах, меньших $0,6T_{\text{пл}}$, однако при более высоких температурах, когда интенсивно протекают диффузионные процессы, вероятно, требуется нулевое размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз [17]. Следует отметить, что при температуре перехода размерного несоответствия через нулевое значение наблюдается воспроизводимая при повторных нагревах структурная нестабильность фаз, которая проявляется в непрерывном во времени изменении профиля дифракционной линии. Долговечность сплавов увеличивается при уменьшении абсолютных значений параметра несоответствия кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в отрицательной области его значений. Эта зависимость хорошо согласуется с поведением никелевых сплавов, содержащих небольшое количество γ' -фазы [18].

Жаропрочные свойства никелевых сплавов при высоких температурах зависят не только от абсолютного значения несоответствия периодов решеток фаз, но и от знака несоответствия. Можно предположить, что образование дислокации несоответствия на границе γ - и γ' -фаз в зависимости от знака несоответствия будет определяться упругими свойствами фаз [19]. Таким образом, можно ожидать, что стабильность структуры и свойств жаропрочных никелевых сплавов, у которых $G_{\gamma'} > G_{\gamma}$, будет выше в области вы-

соких температур при положительном несоответствии периодов решеток γ - и γ' -фаз ($\Delta\alpha_{\gamma-\gamma'}>0$) по сравнению со сплавами, у которых $\Delta\alpha_{\gamma-\gamma'}<0$.

Вышеописанные методы контроля качества монокристаллов жаропрочных сплавов нашли широкое применение как на производстве, так и в научно-исследовательских лабораториях. Однако создание современных жаропрочных сплавов, легированных тугоплавкими элементами (например, Re, Rh и Mo), приводит к образованию структуры, которая кроме фаз γ и γ' содержит топологически плотно упакованные (ТПУ) фазы, и, как следствие, к усложнению фазового состава и изменению механизма его твердорастворного упрочнения. Метод рентгеновской дифрактометрии позволяет разработать методики измерения параметров свободных от напряжений фаз γ и γ' , остаточных напряжений после полной термической обработки, а также после испытаний на длительную прочность, осуществить фазовый анализ сложнолегированных жаропрочных сплавов.

Исследование новых сплавов неразрывно связано с комплексным анализом структуры и свойств материала. Для этого необходимо создавать новые методы неразрушающего контроля, позволяющие выявить параметры или особенности структуры материала, отвечающие за его свойства. При этом рентгенографическое исследование должно составлять лишь часть общего комплексного исследования данной производственной задачи, разрешаемой одновременно различными методами. Только в тесной связи с методами электронной микроскопии, спектрометрии, металлографии, механическими и физическими испытаниями рентгенография может внести значительный вклад в создание новых жаропрочных сплавов.

Такой комплексный подход позволит значительно сократить продолжительность разработки сплавов, повысить информационную эффективность эксперимента, обеспечить достоверность и высокую точность результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С., Крымов В.В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов. М.: Высшая школа. 1998. С. 214–217.
2. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1997. 336 с.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 38–52.

4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
5. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).
6. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС. 2002. 360 с.
7. 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.
8. Бокий Г.Б., Порай-Кошиц М.А. Рентгеноструктурный анализ //Издательство Московского университета. 1964. Т. 1. С. 220.
9. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов $\langle 001 \rangle$ высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
10. Кузьмина Н.А., Васикова Л.М. Влияние скорости вращения образца на качество спектра при определении кристаллографической ориентации монокристалльных отливок жаропрочных сплавов //Металлургия машиностроения. 2009. №5. С. 19–20.
11. Толорайя В.Н., Кузьмина Н.А., Демонис И.М., Васикова Л.М. Методы контроля ростовой структуры монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов /В сб. тезисов докл. Международной науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения». М.: ВИАМ. 2007. С. 74.
12. Жаропрочный сплав на основе никеля для монокристаллического литья: пат. 2465359 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011.
13. Тренинков И.А., Алексеев А.А., Поляков С.Н. Методика определения остаточных напряжений в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов на дифрактометре широкого назначения с использованием $\text{Cu } K_{\beta}$ -излучения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 8–12.
14. Кузьмина Н.А., Езубченко С.Н. Методика получения прямых полюсных фигур от монокристаллов жаропрочных сплавов //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 33–34.
15. Тренинков И.А., Алексеев А.А., Петрушин Н.В. Дифрактометрический

качественный фазовый анализ монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов //В сб. тезисов докл. Международной науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения». М.: ВИАМ. 2007. С. 138.

16. Тренингов И.А., Алексеев А.А., Зайцев Д.В., Филонова Е.В. Исследования фазовых и структурных изменений, а также остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести в сплаве ВЖМ4 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 11–19.
17. Светлов И.Л., Олдаковский И.В., Петрушин Н.В., Игнатова И.А. Концентрационная зависимость периодов решеток γ - и γ' -фаз никелевых жаропрочных сплавов //Металлы. 1991. №6. С. 150–156.
18. Протасова Н.А., Светлов И.Л., Бронфин М.Б., Петрушин Н.В. Размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов //ФММ. 2008. Т. 106. №5. С. 512–519.
19. Протасова Н.А., Светлов И.Л. Влияние отжига на характер структурно-фазового несоответствия в монокристаллах никелевых сплавов //Материаловедение. 2012. №5. С. 44–50.

References list

1. Abraimov N.V., Eliseev Yu.S., Krymov V.V. Aviatsionnoe materialovedenie i tehnologiya obrabotki metallov [Aviation material science and metal processing methods]. М.: Vysshaya shkola. 1998. S. 214–217.
2. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B. i dr. Monokristally nikelovykh zharoprochnykh spлавov [Single crystals of nickel heat-resistant alloys]. М.: Mashinostroenie. 1997. 336 s.
3. Kablov E.N., Petrushin N.V., Elyutin E.S. Monokristallicheskie zharoprochnye splavy dlya gazoturbinnyykh dvigateley [Single crystal heat-resistant alloys for gas-turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. 2011. №SP2. S. 38–52.
4. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevyye liteynyye zharoprochnyye splavy novogo pokoleniya [Nickel heat-resistant casting alloys of new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 36–52.
5. Kablov E.N., Gerasimov V.V., Visik E.M., Demonis I.M. Rol' napravlennoy kristallizatsii v resursosberegayushey tehnologii proizvodstva detaley GTD [Role of directional solidification in the resource-saving technology of gas-turbine engines production] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 01 (viam-works.ru).

6. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz [Radiographic and optoelectronic analysis]. M.: MISiS. 2002. 360 s.
7. Sidohin F.A., Sidohin A.F., Sidohin E.F. Ob opredelenii kristallograficheskoy orientatsii monokristallov metodom Laue [On determination of crystallographic orientation of monocrystals using Laue method] //Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2009. T. 75. №1. S. 35–37.
8. Bokiy G.B., Poray-Koshits M.A. Rentgenostrukturnyj analiz [X-ray crystallographic analysis]. M.: Izd-vo MGU. 1964. T. 1. S. 220.
9. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyyh svoystv monokristallov $\langle 001 \rangle$ vysokorenievogo nikellevogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v usloviyah vysokogradientnoy napravlennoy kristallizatsii [Structural features and heat-resistant properties of monocrystals $\langle 001 \rangle$ of high-Re heat-resistant nickel-based alloy, obtained under high-gradient directional solidification conditions] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
10. Kuz'mina N.A., Vasikova L.M. Vliyanie skorosti vrascheniya obraztza na kachestvo spektra pri opredelenii kristallograficheskoy orientatsii monokristal'nyh otlivok zharoprochnyyh splavov [An influence of the spin rate of a sample on the spectrum quality when determining crystallographic orientation of single crystal castings made of heat-resistant alloys] //Metallurgiya mashinostroeniya. 2009. №5. S. 19–20.
11. Tolorayya V.N., Kuz'mina N.A., Demonis I.M., Vasikova L.M. Metody kontrolya rostovoy struktury monokristallicheskih otlivok nikellevyyh zharoprochnyyh splavov [Growth structure control methods for single crystal castings made of nickel heat-resistant alloys] /V sb. tezisov dokl. Mezhdunarodnoy nauch.-tehnic. konf. «Aktual'nye voprosy aviatsionnogo materialovedeniya». M.: VIAM. 2007. S. 74.
12. Zharoprochnyj splav na osnove nikelya dlya monokristallicheskogo lit'ya [Nickel-based heat-resistant alloy for single crystal casting]: pat. 2465359 Ros. Federatsiya; opubl. 15.09.2011.
13. Treninkov I.A., Alekseev A.A., Polyakov S.N. Metodika opredeleniya ostatochnyyh napryazheniy v monokristallah zharoprochnyyh nikellevyyh splavov na difraktometre shirokogo naznachaeniya s ispol'zovaniem $\text{Cu } K_{\beta}$ -izlucheniya [Methods to determine residual stresses in single crystals of nickel-based heat-resistant alloys using versatile diffractometer with $\text{Cu } K_{\beta}$ -radiation] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 8–12.

14. Kuz'mina N.A., Ezubchenko S.N. Metodika polucheniya pryamyh polyusnyh figur ot monokristallov zharoprochnykh splavov [Methods to obtain straight pole figures from heat-resistant alloys monocrystals] //Metallurgiya mashinostroeniya. 2012. №3. S. 33–34.
15. Treninkov I.A., Alekseev A.A., Petrushin N.V. Difraktometricheskij kachestvennyj fazovyy analiz monokristallov zharoprochnykh nikelovykh splavov [Diffractometric qualitative phase analysis of single crystals of nickel heat-resistant alloys] /V sb. tezisov dokl. Mezhdunarodnoy nauch.-tehnich. konf. «Aktual'nye voprosy aviatsionnogo materialovedeniya». M.: VIAM. 2007. S. 138.
16. Treninkov I.A., Alekseev A.A., Zaytsev D.V., Filonova E.V. Issledovaniya fazovykh i strukturnykh izmeneniy, a takzhe ostatochnykh napryazheniy v protsesse vysokotemperaturnoy polzuchesti v splave VZhM4 [Reserch of phase and structural changes and residual stresses in VZhM4 alloy in the course of high-temperature creep] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 11–19.
17. Svetlov I.L., Oldakovskiy I.V., Petrushin N.V., Ignatova I.A. Kontsentratsionnaya zavisimost' periodov reshetok γ - i γ' -faz nikelovykh zharoprochnykh splavov [Concentration dependence of γ - and γ' -phase lattice spacing in nickel heat-resistant alloys] //Metally. 1991. №6. S. 150–156.
18. Protasova N.A., Svetlov I.L., Bronfin M.B., Petrushin N.V. Razmernoe nesootvetstvie periodov kristallicheskih reshetok γ - i γ' -faz v monokristallah zharoprochnykh nikelovykh splavov [Dimectional discrepancy of γ - and γ' -phase lattice spacing in heat-resistant single crystal nickel-based alloys] //FMM. 2008. T. 106. №5. S. 512–519.
19. Protasova N.A., Svetlov I.L. Vliyanie otzhiga na harakter strukturno-fazovogo nesootvetstviya v monokristallah nikelovykh splavov [Influence of annealing on the nature of structural-phase discrepancy in single crystals of nickel-based alloys] //Materialovedenie. 2012. №5. S. 44–50.