
Научная статья

УДК 539.26

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26

БЛОЧНОСТЬ И СУБСТРУКТУРА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВКАХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Н.А. Кузьмина¹, Г.А. Остроухова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. В работе дано сравнение основных методов контроля субструктуры отливок из никелевых жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой заданной кристаллографической ориентации: визуального, рентгеновских методов «качания» и Лауэ, а также результатов определения разориентации субструктуры – методом «качания» относительно продольной оси отливки и полной разориентации субструктуры, определенной по лауэграммам. На основании проведенного сравнения сделан вывод о границах чувствительности при визуальном контроле структуры.

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

Для цитирования: Кузьмина Н.А., Остроухова Г.А. Блочность и субструктура в монокристаллических отливках никелевых жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26.

Scientific article

BLOCKINESS AND SUBSTRUCTURE IN SINGLE-CRYSTAL CASTINGS OF NICKEL HEAT-RESISTANT ALLOYS

N.A. Kuzmina¹, G.A. Ostroukhova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper defines two groups of defects characteristic of single crystals of NGC: substructure and blockiness. The most common causes of their occurrence are considered. The comparison of the main methods of substructure control: visual, swing and Laue and the results of determining the disorientation of the substructure by the method of swing relative to the longitudinal axis of the casting and the complete disorientation of the substructure determined by lauegrams is given. Based on the comparison, a conclusion is made about the limits of sensitivity during visual inspection of the structure.

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

For citation: Kuzmina N.A., Ostroukhova G.A. Blockiness and substructure in single-crystal castings of nickel heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26.

Введение

В связи с экстремальными условиями работы авиационных двигателей разработчики предъявляют высокие требования к характеристикам турбинных лопаток из современных жаропрочных сплавов на основе никеля, которые во многом определяются качеством кристаллической структуры отлитых лопаток [1–6].

Турбинные лопатки с монокристаллической структурой заданной кристаллографической ориентации (КГО) из никелевых жаропрочных сплавов, получаемые методом направленной кристаллизации, являются одними из самых ответственных и дорогостоящих деталей двигателя [7–19]. Поэтому на каждом этапе их производства проводится строгий контроль качества. Контроль ростовой структуры отливки будущей турбинной лопатки проводится в самом начале технологической цепочки производства этой важнейшей детали авиационного двигателя [20–28]. К характеристикам ростовой структуры монокристаллических отливок лопаток предъявляются требования по отклонению от КГО, которые кратко можно записать в виде

$$\alpha_{001}^{\text{акс}} \leq 10 \text{ градусов}, \alpha_{100}^{\text{азим}} \leq 10 \text{ градусов}, \Delta\alpha_{001} \leq 3 \text{ градусов},$$

где α – угол отклонения от КГО; $\Delta\alpha$ – угол разориентации субструктуры.

Для контроля ростовой структуры используется комплексная методика, включающая: визуальный контроль протравленной отливки, металлографический контроль КГО, дифрактометрический контроль КГО в монохроматическом рентгеновском излучении и контроль разориентации по методу Лауэ.

Визуальный контроль протравленной поверхности отливки выявляет брак макроструктуры отливки по наличию границ зерен или участков с иной отражающей способностью, чем основная поверхность отливки. Операция по выявлению границ зерен является во многих случаях субъективной, но на производстве другого метода контроля макроструктуры на монокристалличность, кроме визуального, не существует.

Визуальный контроль качества отливок основан на взаимодействии рассеянно-отраженного света с контролируемой поверхностью объекта контроля. Этот метод применяется без какого-либо оборудования и позволяет выявить дефекты на поверхности отливки. К недостаткам метода можно отнести зависимость от субъективных факторов, таких как острота зрения, усталость, опыт работы проверяющего, а также от условий работы – освещенности и оптического контраста материала объекта. Тем не менее простота, небольшая трудоемкость и информативность визуального контроля делают его обязательным этапом, предшествующим проведению дальнейшего неразрушающего контроля рентгеновскими методами.

Отливки с видимыми границами (с посторонними кристаллами) – бракуются по макроструктуре; отливки лопаток с «размытыми» (нечетко выявляемыми границами зерен – субзернами (блоками)), собирают в отдельную партию и вместе с монокристаллическими лопатками передают для контроля КГО.

Субструктура (блочность, субзерна) образуется по мере роста монокристалла отливки в условиях направленной кристаллизации. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов обладают дендритным строением, но из-за конвекции расплава на фронте кристаллизации, вызванной наличием радиальной составляющей термического градиента кристаллизации, растущие дендриты могут отклоняться и/или разворачиваться относительно оси роста монокристалла, увеличивая степень разориентации в структуре по мере роста монокристалла. Если искривление фронта кристаллизации

приводит к отклонению осей дендритов, растущих вдоль вектора температурного градиента, на угол до 10 градусов, то возникает малоугловая граница (структурный дефект – субструктура или субзерно) вследствие кручения или наклона дендритных осей первого порядка в монокристаллической структуре. Визуально такой дефект воспринимается как нечеткая, «размытая» граница. Такие дефекты в единичном количестве допускаются на пере лопатки, так как не снижают механических свойств при условии разориентации $\Delta\alpha_{001} < 3$ градусов [12]. На производстве отливки с нечетко выраженной, «размытой» границей, являющейся границей между субзернами в монокристаллической структуре, визуально сравнивают с контрольными отливками (эталоны), имеющими разориентацию блоков, не превышающую 3 градусов, бракуют или передают на следующий этап контроля структуры.

Первоначальный контроль аксиальной и азимутальной ориентации проводят металлографическим методом по фигурам травления, выявляющим дендритно-ячеистую структуру на поверхности отливки. Контроль проводят на стартовых конусах, отрезанных от отливки по сечению, строго перпендикулярному оси роста (ось Z) отливки. Поскольку погрешность по методике составляет 2 градуса, то конусы и, соответственно, отливки с углом отклонения α_{001} от 8 до 12 градусов отбирают в отдельную группу и передают на контроль дифрактометрическим методом на приборах типа ДРОН или с использованием метода Лауэ в камере передвижной рентгенодифракционной установки (ПРДУ), если исследуемые конусы имеют монокристаллическую структуру и не содержат посторонних кристаллов.

Отливки с углом $\alpha_{001} < 8$ градусов считают годными по ориентации, отливки с углом $\alpha_{001} > 12$ градусов бракуют. Аналогично группируют и отливки по азимутальной ориентации.

Окончательный контроль ориентации проводят на дифрактометрах при съемке стартовых конусов с углом отклонения α_{001} от 8 до 12 градусов. Отбирают и признают годными по ориентации отливки с углом α_{001} не более 10 градусов.

Группу отливок с субзернами, годными по отклонению от заданной КГО, передают на контроль разориентации методом Лауэ.

Определение ориентации целесообразно проводить на приборе типа ДРОН, а съемку по методу Лауэ – для оценки разориентации субзерен.

Контроль структуры дифрактометрическим методом «качания»

На следующий этап контроля рентгеновскими методами попадают только отливки лопаток, не имеющие на своей поверхности видимых границ [29–31]. Рентгеновский контроль, в отличие от визуального контроля поверхности, дает информацию о градусе отклонения от заданной КГО и качестве структуры в объеме отливки. Для массового контроля в серийном производстве турбинных лопаток метод «качания» – самый простой и быстрый, его проводят только для стартовых (ростовых) конусов, отрезанных от лопаток и протравленных до выявления дендритной структуры. Этот метод позволяет сканировать поверхность реза ростового конуса и получать информацию о структуре со всей облучаемой поверхности сечения. Диаметр пятна облучения 12 мм определяется стандартными щелями, установленными перед источником излучения. Рентгеновский контроль позволяет с точностью до градуса определить угол отклонения геометрической продольной оси лопатки от заданного кристаллографического направления, а также выявить наличие малоугловой субструктуры. Кривая «качания» характеризует монокристалл по отклонению основной массы дендритов от заданной КГО, а ширина пика дает представление об угловой величине осевой разориентации дендритов в объеме отливки монокристалла. Соответственно, при расчетах разориентации субзерна

для этого метода учитывается только аксиальная составляющая структуры и отсутствуют данные для учета возможного азимутального кручения осей дендритов в плоскости. Угол разориентации определяется как арифметическая разность между углами отклонения КГО основного кристалла и субзерна.

Аксиальная и азимутальная составляющие КГО для оценки субструктуры лопатки имеют разную значимость. Преимущественными деформациями лопатки являются растяжения в пере лопатки в направлении оси Z, вызванные центробежными силами. В то же время напряжения кручения, вызванные действием центробежных сил, в слабо-закрученных лопатках невелики. Поэтому для оценки качества структуры монокристаллической лопатки аксиальная составляющая величины КГО имеет большее значение, чем азимутальная.

Контроль структуры методом Лауэ

Для массового контроля КГО отливки и определения угла отклонения α_{hkl} от заданной КГО можно применять метод Лауэ в камере ПРДУ. Общий вид ПРДУ и рентгенооптическая схема съемки обратной лауэграммы на этой установке показаны на рис. 1.

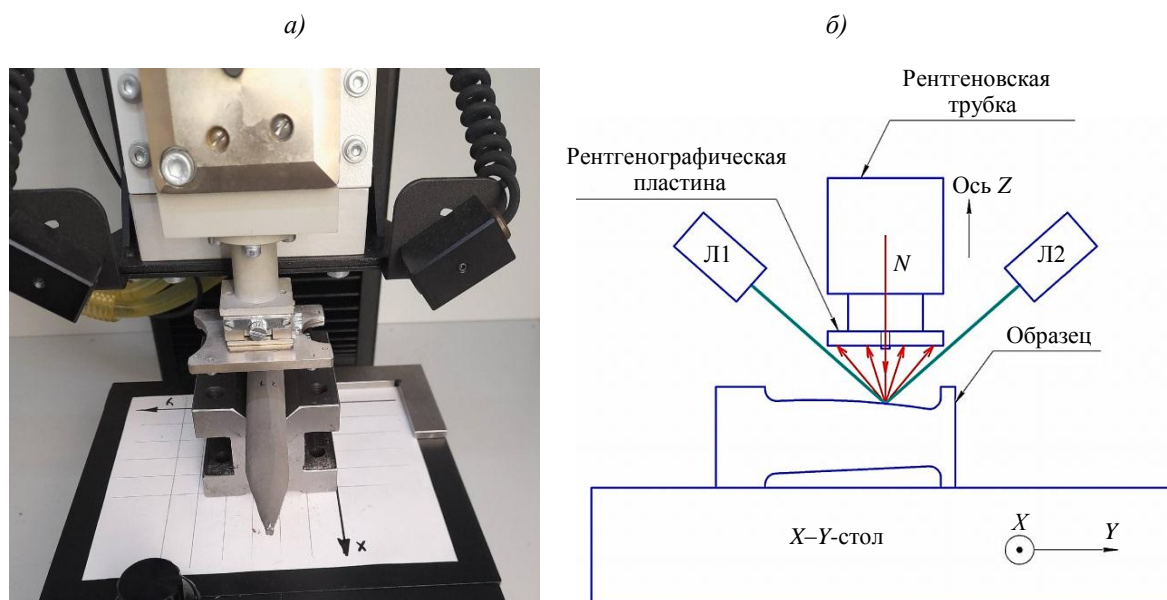


Рис. 1. Общий вид (а) передвижной рентгенодифракционной установки (ПРДУ) и рентгенооптическая схема (б) съемки обратной лауэграммы в камере ПРДУ (Л1, Л2 – лазерные указатели)

Метод Лауэ позволяет локально исследовать структурные характеристики в отливке и проследить их изменение в интересующем направлении: роста или от центра к краю. Получить дифракционную картину (лауэграмму) можно в любой интересующей точке отливки, т. е. локально исследовать дефекты структуры поверхности. Локальность метода Лауэ позволяет через замеры каждой области отливки (наряду с углом аксиального отклонения от КГО [001]) рассчитать полную разориентацию субструктуры относительно основного (самого большого по объему) кристалла и с учетом их разворота относительно направлений X, Y, Z. При съемке по методу Лауэ неподвижный кристалл облучается полихроматическим узким малорасходящимся первичным пучком острофокусной рентгеновской трубки. Получаемая таким образом лауэграмма содержит информацию о структурном совершенстве отливки в точке. Как при определении

КГО методом «качания», так и при исследовании методом Лауэ все исследуемые поверхности должны быть протравлены до выявления дендритной структуры. Режим регистрации лауэграммы: напряжение 25 кВ, ток 4,5 мА. Продолжительность экспозиции зависит от степени травления поверхности и составляет обычно от 4 до 6 мин.

Цель данной статьи – дать представление об исследовании структуры в монокристаллических отливках никелевых жаропрочных сплавов визуальным и рентгеновским методами, а также показать значение каждого из этапов для контроля структуры с целью выявления и исключения брака. На основании проведенного сравнения сделан вывод о границах чувствительности при визуальном контроле структуры.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования взяты отливки заготовок образцов для механических испытаний из никелевого жаропрочного сплава, полученные методом направленной кристаллизации на установке УВНК-9А затравочным способом от затравок системы Ni–W с КГО [001].

Заготовки протравлены в смеси HF + HNO₃ + H₂O до выявления макроструктуры для проведения визуального контроля на монокристалличность. Отобраны три отливки.

Затем от отливок на отрезном станке под прямым углом к оси Z отливки отрезают стартовые конусы, протравлены в растворе того же состава до выявления дендритной структуры и переданы для определения КГО.

Для измерения угловой величины разориентации субструктуры применены рентгеновские методы «качания» и Лауэ.

Исследование методом «качания» проводили на ростовых конусах. При получении кривых «качания» регистрацию отражений проводили в «мягком» режиме при напряжении 20 кВ и токе 10 мА, при непрерывном быстром вращении образца относительно оси Z в диапазоне углов ±60 градусов и неподвижном детекторе в положении отражения (004) для сплава на основе никеля: угол $2\theta = 118,3$ градуса. Пятно облучения образца диаметром ~12 мм определяли стандартными щелями дифрактометра. Обработку полученных кривых «качания» и расчет угла отклонения оси Z образца от направления <001> структуры (определение КГО) проводили с помощью отечественного программного обеспечения GIRDIF.

Исследование структуры методом Лауэ в камере ПРДУ проводили на неподвижном образце – на ростовых конусах с поверхности реза. Регистрацию лауэграмм осуществляли в полихроматическом излучении острофокусной рентгеновской трубки. Исследуемую поверхность образца устанавливали в держателе параллельно поверхности X–Y столика, т. е. по нормали к падающему первичному пучку. Расстояние «образец–трубка» регулировали с помощью подъемного механизма и лазерных указателей. Диаметр пятна облучения составлял ~2 мм. При съемке лауэграмм в различных точках образца перемещение осуществляли строго поступательно вдоль осей координатного столика с образцом. Отражения регистрировали на пластинке, покрытой рентгеночувствительным люминофором. С пластинки лауэграммы считывались на сканере высокого разрешения Digoga optime и переводились на экран монитора в цифровом формате.

Лауэграммы обрабатывали автоматически в программе KROS путем совмещения сферической стандартной проекции для кубической системы отражений с экспериментальными отражениями лауэграммы. Производили расчет угла отклонения кристаллографического направления <001> от оси Z по положению нормали к поверхности относительно осей кристаллической структуры, т. е. определяли точку в стереографическом треугольнике и разориентацию в субструктуре между основным кристаллом отливки и посторонним кристаллом.

Возникающее дифрагированное излучение регистрируют на рентгенографической пластине с фотостимулируемым люминофором. Полученные лауэграммы визуализируют на сканере высокого разрешения Digoga optime.

Обработку лауэграмм и определение угла отклонения от заданной КГО выполнили в автоматическом режиме в программе KROS. На мониторе компьютера в рабочем окне программы отмечали наиболее яркие рефлексы обратной лауэграммы (обычно 10–15), после чего запускали автоматизированное совмещение экспериментальной и расчетной лауэграмм, что дает возможность быстро (в течение 5–20 с) вычислить КГО – угол α_{001} между осью Z монокристалла (совмещена с нормалью к поверхности N) и направлением кубической структуры [001], а также найти положение оси в стандартном стереографическом треугольнике.

При наличии в отливке субзерен (блоков) на произвольно ориентированной поверхности образца проводили парные съемки: одну съемку выполняли в области основного кристалла (занимающего наибольший объем) – рядом с границей субзерна, вторую – также рядом с границей, но в области субзерна. Перемещение точки, в которой скрещиваются лучи лазеров (в эту точку направлен первичный пучок при съемке лауэграммы), проводили строго поступательными подвижками образца вдоль осей X и Y и поступательным перемещением источника излучения вдоль оси Z .

Обработку лауэграмм, полученных от основного кристалла и от субзерна, проводили так же, как при определении аксиального отклонения. Из двух полученных лауэграмм после определения их матриц ориентации получена величина разориентации основного кристалла и субзерна.

Отливки считаются годными, если КГО и разориентация соответствуют следующим требованиям:

- допустимое отклонение продольной геометрической оси отливки от КГО [001] не более 10 градусов – $\alpha_{001} \leq 10$ градусов (аксиальная ориентация отливки);
- допустимая величина разориентации соседних субзерен или субзерна и основного кристалла не должна превышать 3 градусов по всем трем кристаллографическим направлениям $\langle 001 \rangle$ ($\Delta\alpha_{001} \leq 3$ градусов), если допустимая разориентация субзерен не оговаривается иначе в технических условиях (ТУ) на данную отливку.

Результаты и обсуждение

По результатам визуального контроля на боковой поверхности первой заготовки не выявлено видимых границ субструктуры (рис. 2, *a*). Отливка заготовки признана монокристаллической и отрезанный конус заготовки передан для измерения КГО рентгеновскими методами.

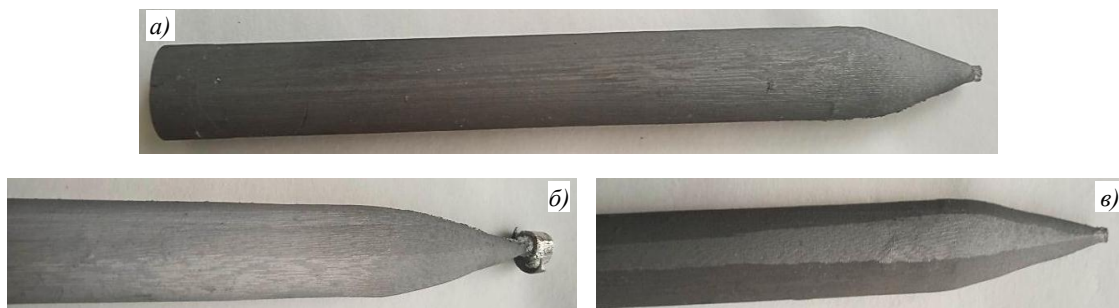


Рис. 2. Боковая поверхность отливок из никелевого жаропрочного сплава, протравленная до выявления дендритной структуры, с монокристаллической структурой (*a*), с «размытой» границей слабоконтрастной субструктуры (*b*) и с более контрастной субструктурой (*в*)

На двух других отливках наблюдается структурный дефект «малоугловая граница» – структура с «размытой» или слабоконтрастной линией между двумя участками поверхности отливки – субзернами (блоками): на одной – менее контрастное видимое наличие ростовой субструктуры (рис. 2, б), на другой – более контрастное (рис. 2, в). От отливок отрезаны ростовые конусы для замера параметров структуры рентгеновскими методами.

По результатам визуального контроля вторая и третья отливки не являются монокристаллическими и в зависимости от требований ТУ считаются браком по структуре или передаются на контроль рентгеновскими методами, как имеющие дефект структуры. Для представления о чувствительности визуального контроля отрезанные ростовые конусы исследовали рентгеновскими методами (рис. 3). Результаты замеров параметров структуры трех образцов представлены на рис. 4–6. Для сравнения приведены определения КГО и разориентации методами «качания» и Лауэ для каждого из трех образцов с монокристаллической и дефектными структурами.



Рис. 3. Ростовые конусы отливок из никелевого жаропрочного сплава, протравленные до проявления дендритной структуры, с монокристаллической структурой (а), с «размытыми» границами (б) и с более контрастными границами (в)

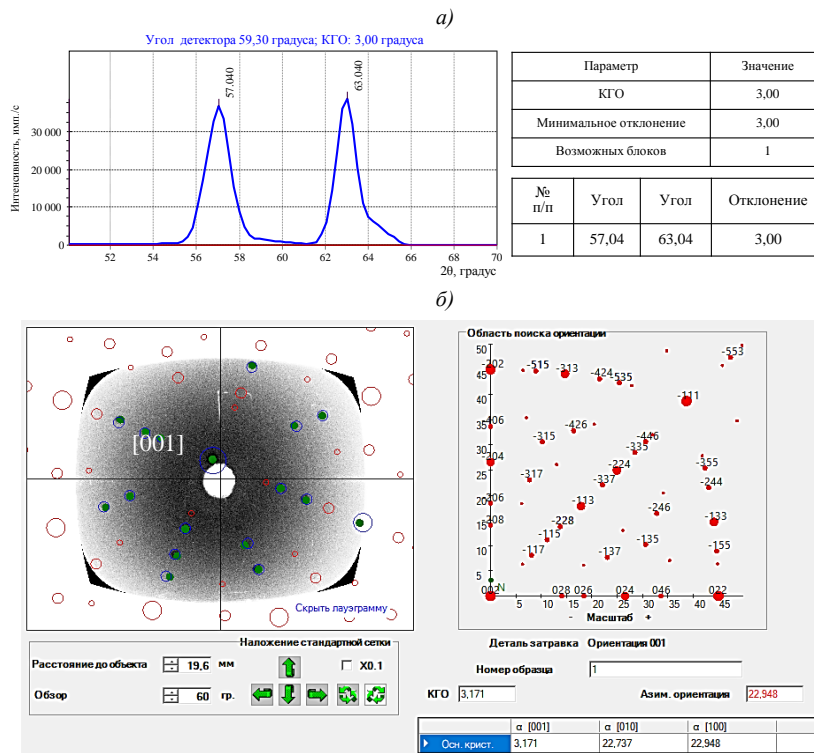


Рис. 4. Результаты замеров угла отклонения кристаллографической ориентации (КГО) образца с монокристаллической структурой по визуальному контролю, а также определения КГО методами «качания» (а) и Лауэ (б)

На поверхности реза конуса монокристаллического образца, так же как и на боковой поверхности, не видны границы субструктуры (рис. 3, а). Кривая «качания», полученная на дифрактометре ДРОН-4М, имеет характерный вид для монокристаллической структуры – пара симметричных относительно положения детектора рефлексов. За величину угла отклонения от направления $\langle 001 \rangle$ принимают половину углового расстояния между значениями максимумов рефлексов. Для данного образца эта величина составила 3 градуса (рис. 4, а). Измерения отклонения КГО образца на ПРДУ по методу Лауэ также показывают 3 градуса от КГО $[001]$ (рис. 4, б).

Для отливок, имеющих дефекты структуры, проведены аналогичные измерения, а также определена разориентация субструктуры.

На протравленной поверхности реза ростового конуса отливки со слабоконтрастной субструктурой «размытых» границ субструктуры не видно, но наличие блочности проявилось на кривой «качания» в виде сложного рефлекса при съемке на дифрактометре ДРОН-4М. Отклонение от КГО $[001]$ основного кристалла составляет 1,68 градуса, субкристалла: 2,88 градуса; аксиальная разориентация вычислена как арифметическая разность максимумов от двух соседних рефлексов – приблизительно 1 градус. Такая малая разориентация на поверхности реза не видна глазом, но определяется рентгеновским методом «качания». На ПРДУ возможно выполнить замер КГО в точке на поверхности отливки. Определение разориентации второго образца на торце невозможно, поскольку «размытая» граница субструктуры на торце визуально не видна. Методом Лауэ определена истинная КГО монокристалла второго образца по зарегистрированным лауэграммам, которая составила ~ 1 градус от КГО $[001]$ (рис. 5).

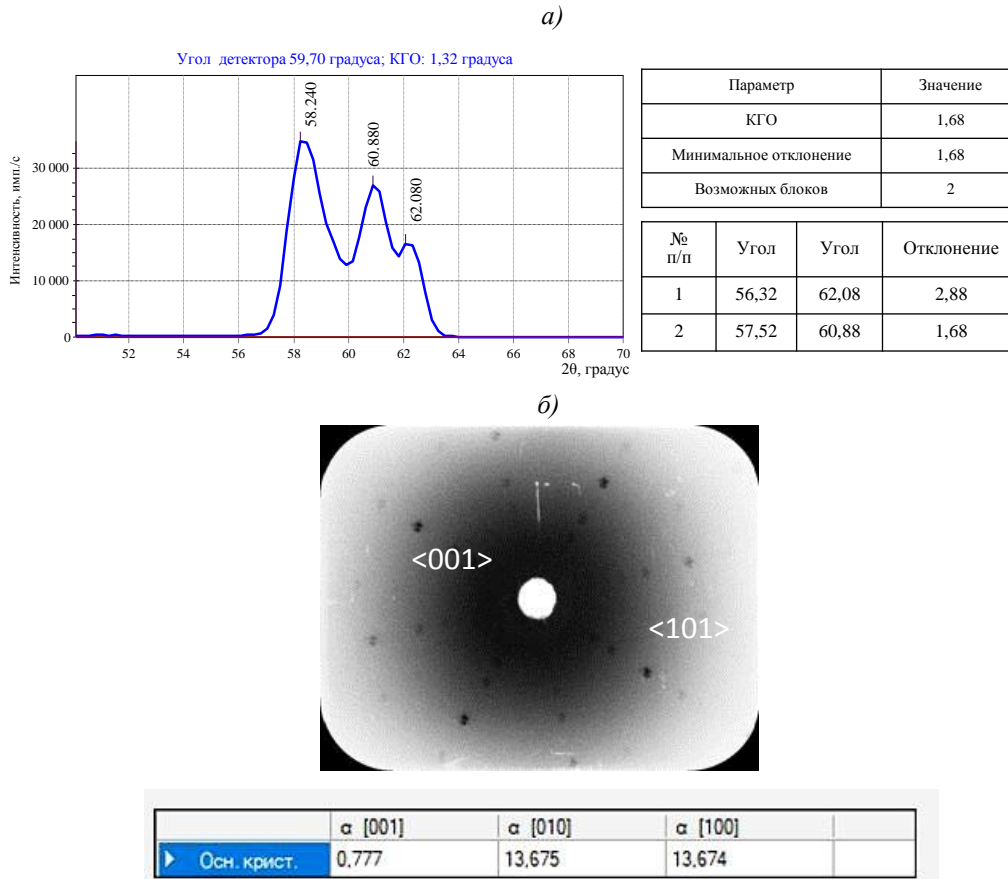


Рис. 5. Результат исследования субструктуры со слабой контрастностью по торцевой поверхности конуса при определении отклонения от кристаллографической ориентации (КГО) и аксиальной разориентации методами «качания» (а) и Лауэ (б)

Более контрастная субструктура третьего образца проявилась на кривой «качания» при определении отклонения от КГО [001] на дифрактометре ДРОН-4М в виде сложного рефлекса: наиболее интенсивная пара рефлексов от основного кристалла и два слабых отражения от субкристалла. Угол отклонения от КГО [001] основного кристалла составляет 1,74 градуса. Отражение от субзерна имеет более низкую интенсивность из-за относительно малого его объема, проявляется на кривой «качания» только с одной стороны и имеет отклонение 10,62 градуса от КГО [001]. Аксиальная разориентация вычислена как арифметическая разность максимумов от двух соседних рефлексов – приблизительно 9 градусов.

Поскольку на торцевой и боковой поверхностях образца граница субструктуры видна визуально, то на торце ростового конуса возможно поставить точки с двух сторон от «размытой» границы для проведения замера ориентации на ПРДУ. Методом Лауэ определена истинная разориентация между двумя кристаллами третьего образца по зарегистрированным лауэграммам, которая составила ~10 градусов (рис. 6).

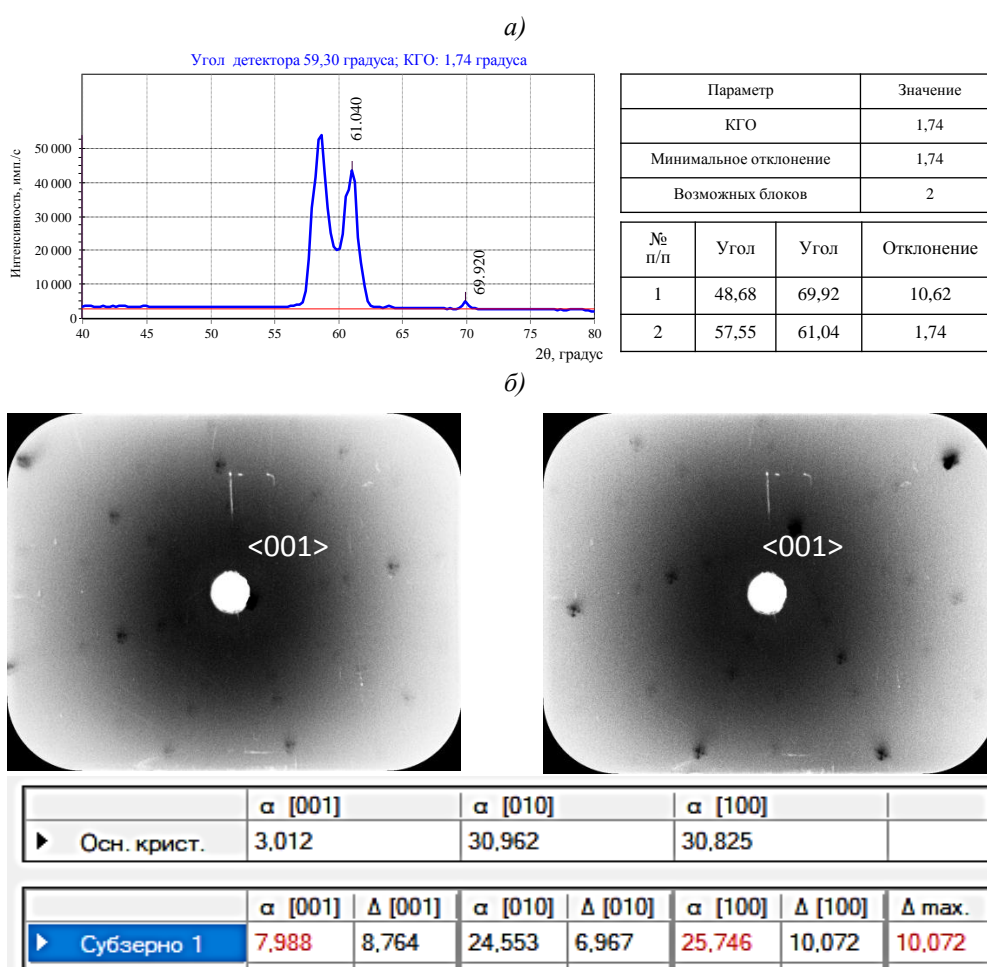


Рис. 6. Результат исследования субструктуры с большей контрастностью по торцу ростового конуса при определении отклонения от кристаллографической ориентации (КГО) и аксиальной разориентации методом «качания» (а) и разориентации субструктуры – методом Лауэ (б)

Заключения

Каждый из имеющихся этапов контроля структуры отливок из никелевых жаропрочных сплавов важен и информативен для выявления и исключения брака. Визуальный

контроль выявляет видимые границы структуры. Рентгеновские методы применяют для количественной оценки угла отклонения оси Z отливки от заданной КГО и оценки разориентации субструктуры, когда она допустима ТУ на отливку.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о границах чувствительности при визуальном контроле структуры, который является первым и основным при определении монокристалличности отливки.

При визуальном контроле можно обнаружить не только большеугловые дефекты – посторонние кристаллы, но и малоугловые дефекты – границы субструктуры от 3 градусов, которые воспринимаются как «размытая» граница.

Визуальный контроль позволяет разделить подлежащие контролю структуры отливки на три группы: годные – монокристаллические, которые подлежат контролю КГО рентгеновским методом; забракованные по структуре – как имеющие посторонний кристалл или субструктуру с разориентацией >3 градусов, а также условно годные – имеющие малоугловой дефект и подлежащие контролю КГО и разориентации структуры рентгеновскими методами.

Разориентация субструктуры <3 градусов субъективно может быть пропущена и отливка попадет в группу монокристаллических. В этом случае при определении КГО отливки на дифрактометрах типа ДРОН будет получен сложный рефлекс и по кривой «качания» установлено наличие субзерна и количественно оценено отклонение его и основного кристалла от заданной КГО.

Контроль КГО, проводимый на дифрактометре ДРОН, позволяет выявить субструктуру с разориентацией в интервале 0–3 градуса, а контроль на ПРДУ возможен при визуализации границы.

Для определения разориентации на ПРДУ визуальный контроль позволяет поставить точки на поверхности отливки с двух сторон от границы субзерна, если она видна, и подтвердить годность отливки в соответствии с ТУ.

Годными по структуре следует считать отливки из первой и третьей группы визуального контроля, отвечающие ТУ по отклонению от заданной КГО и разориентации структуры.

Список источников

1. Герасимов В.В., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // Труды ВИАМ. 2015. № 3. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
3. Висик Е.М., Тихомирова Е.А., Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Герасимов В.В., Живушкин А.А. Технологическое опробование нового жаропрочного сплава с низкой плотностью при литье монокристаллических лопаток ГТД // Металлург. 2017. № 2. С. 80–86.
4. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Висик Е.М., Голынец С.А. Разработка монокристаллического жаропрочного никелевого сплава V поколения // Металлы. 2017. № 6. С. 38–51.
5. Висик Е.М., Герасимов В.В., Петрушин Н.В., Колядов Е.В., Филонова Е.В. Технологическое опробование литья монокристаллических лопаток из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ20 пониженной плотности // Литейщик России. 2018. № 5. С. 17–21.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Сидоров В.В., Демонис И.М. Разработка монокристаллических высокорениевых жаропрочных никелевых сплавов методом компьютерного конструирования // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 1. С. 22–36.

7. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 02. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
8. Петрушин Н.В., Висик Е.М., Горбовец М.А., Назаркин Р.М. Структурно-фазовые характеристики и механические свойства монокристаллов жаропрочных никелевых ренийсодержащих сплавов с интерметаллидно-карбидным упрочнением // Металлы. 2016. № 4. С. 57–70.
9. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. Оптимизация технологии изготовления керамических стержней для улучшения качества литых лопаток газотурбинных двигателей // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 3–4 (27). Ст. 04. URL: <https://materialsnews.ru> (дата обращения: 13.05.2022).
10. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Сурова В.А., Ечин А.Б. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и свойства ренийсодержащего монокристаллического сплава // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 8 (614). С. 33–35.
11. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
12. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толорайя В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
13. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Особенности структуры и свойства никелевого монокристаллического жаропрочного сплава, полученного в условиях переменного температурного градиента на фронте роста // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-1-1.
14. Бакрадзе М.М., Ечин А.Б. Расчет температурных полей внутри отливки численным методом и с помощью компьютерного моделирования // Технология металлов. 2021. № 6. С. 31–38.
15. Висик Е.М., Колядов Е.В., Оспенникова О.Г., Герасимов В.В., Филонова Е.В. Влияние технологических режимов литья на структуру монокристаллических лопаток из безуглеродистого жаропрочного никелевого сплава // Технология металлов. 2018. № 1. С. 19–26.
16. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М., Межин Ю.А. Литье методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры на фронте кристаллизации // Литейное производство. 2016. № 8. С. 24–26.
17. Толорайя В.Н., Некрасов С.Н., Остроухова Г.А. Сравнительный анализ структуры и свойств отливок из жаропрочных сплавов, полученных на установках типа УВНК и ПМП // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 5–6 (31). Ст. 01. URL: <https://materialsnews.ru> (дата обращения: 13.05.2022).
18. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М. Влияние осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации на макро- и микроструктуру сплава ЖС32 // Литейное производство. 2014. № 6. С. 28–31.
19. Висик Е.М., Герасимов В.В., Колядов Е.В., Кузьмина Н.А. Влияние технологических режимов литья на параметры структуры монокристаллов новых жаропрочных сплавов // Металлургия машиностроения. 2016. № 5. С. 27–31.
20. Кузьмина Н.А., Петрушин Н.В., Висик Е.М., Еремин Н.Н., Наприенко С.А. Применение метода Лауэ для исследования структуры образца никелевого жаропрочного сплава, разрушенного в процессе механической обработки // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-3-12.
21. Толорайя В.Н., Филонова Е.В., Чубарова Е.Н., Комарова Т.И., Остроухова Г.А. Исследование влияния ГИП на микропористость в монокристаллических отливках безуглеродистых жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1 (18). С. 20–26.
22. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Остроухова Г.А., Алешин И.Н. Исследование ростовых дефектов типа полосчатость в монокристалльных отливках из безуглеродистых жаропрочных сплавов // Двигатель. 2010. № 6 (72). С. 14–16.

23. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М. О специфических дефектах отливок после направленной кристаллизации // *Литейное производство*. 2015. № 7. С. 11–13.
24. Синичкина Т.С., Беликов А.В., Висик Е.М. Проблема возникновения пригара на отливках из сплава ЖС-32 // *Литейное производство*. 2015. № 2. С. 18–20.
25. Кузьмина Н.А., Пьянкова Л.А. Контроль кристаллографической ориентации монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов методом рентгеновской дифрактометрии // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 02. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
26. Хаютин С.Г. О разориентации зерен при направленной кристаллизации // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 6. С. 42–43.
27. Сидохин Е.Ф., Сидохин Ф.А., Хаютин С.Г. О субструктуре монокристаллических лопаток ГТД // *Авиационная промышленность*. 2009. № 1. С. 34–36.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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://viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.

References

1. Gerasimov V.V., Petrushin N.V., Visik E.M. Improvement of casting technology and composition of single crystal blades made of heat-resistant intermetallic alloy. *Trudy VIAM*, 2015, no. 3, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V., Visik E.M. Single-crystal nickel-based superalloy of a new generation with low-density. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
3. Visik E.M., Tikhomirova E.A., Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Gerasimov V.V., Zhivushkin A.A. Technological testing of a new heat-resistant alloy with low density during casting of single-crystal GTE blades. *Metallurg*, 2017, no. 2, pp. 80–86.
4. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Visik E.M., Golynets S.A. Development of single-crystal heat-resistant nickel alloy of the 5th generation. *Metally*, 2017, no. 6, pp. 38–51.
5. Visik E.M., Gerasimov V.V., Petrushin N.V., Kolyadov E.V., Filonova E.V. Technological testing of casting of single-crystal blades from heat-resistant nickel alloy VZhL20 of low density. *Liteyshchik Rossii*, 2018, no. 5, pp. 17–21.
6. Kablov E.N., Petrushin N.V., Sidorov V.V., Demonis I.M. Development of single-crystal high-rhenium heat-resistant nickel alloys by computer design. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 1, pp. 22–36.
7. Kolyadov EV, Visik EM, Gerasimov VV, Arginbaeva E.G. The influence of directional solidification parameters on the structure and properties of the intermetallic alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
8. Petrushin N.V., Visik E.M., Gorbovets M.A., Nazarkin R.M. Structural-phase characteristics and mechanical properties of single crystals of heat-resistant nickel-rhenium-containing alloys with intermetallic-carbide hardening. *Metally*, 2016, no. 4, pp. 57–70.

9. Ospennikova O.G., Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V. Optimization of technology for the manufacture of ceramic rods to improve the quality of cast blades of gas turbine engines. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2017, no. 3–4 (27), paper no. 04. Available at: <https://materialsnews.ru> (accessed: May 13, 2022).
10. Bondarenko Yu.A., Kablov E.N., Surova V.A., Echin A.B. Influence of high-gradient directional crystallization on the structure and properties of a rhenium-containing single-crystal alloy. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2006, no. 8 (614), pp. 33–35.
11. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
12. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B., Tolorayya V.N., Gavrilin O.S. *Single crystals of nickel heat-resistant alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1997, 336 p.
13. Echin A.B., Bondarenko Yu.A. Structural features and properties of single-crystal Ni-based superalloy produced under conditions of variable temperature gradient on the solidification front. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-1-1.
14. Bakradze M.M., Echin A.B. Calculation of temperature fields inside the casting by numerical method and using computer simulation. *Tekhnologiya metallov*, 2021, no. 6, pp. 31–38.
15. Visik E.M., Kolyadov E.V., Ospennikova O.G., Gerasimov V.V., Filonova E.V. Influence of technological modes of casting on the structure of single-crystal blades from a carbon-free heat-resistant nickel alloy. *Tekhnologiya metallov*, 2018, no. 1, pp. 19–26.
16. Kolyadov E.V., Gerasimov V.V., Visik E.M., Mezhin Yu.A. Casting by the method of directional crystallization with a controlled temperature gradient at the crystallization front. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 8, pp. 24–26.
17. Toloraya V.N., Nekrasov S.N., Ostroukhova G.A. Comparative analysis of the structure and properties of castings from heat-resistant alloys obtained on installations such as UVNK and PMP. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2018, no. 5–6 (31), paper no. 01. Available at: <https://materialsnews.ru> (accessed: May 13, 2022).
18. Kolyadov E.V., Gerasimov V.V., Visik E.M. Influence of axial and radial temperature gradients at the crystallization front on the macro- and microstructure of ZhS32 alloy. *Liteynoe proizvodstvo*, 2014, no. 6, pp. 28–31.
19. Visik E.M., Gerasimov V.V., Kolyadov E.V., Kuzmina N.A. Influence of technological modes of casting on the structure parameters of monocrystals of new heat-resistant alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2016, no. 5, pp. 27–31.
20. Kuzmina N.A., Petrushin N.V., Visik E.M., Eremin N.N., Naprienko S.A. Application of the Laue method to study the structure of a nickel heat-resistant alloy sample destroyed during mechanical processing. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-3-12.
21. Tolorajya V.N., Filonova E.V., Chubarova E.N. i dr. Research of influence of HIP on microporosity in single-crystal casting of carbon-free hot strength alloys. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 20–26.
22. Kablov E.N., Tolorayya V.N., Ostroukhova G.A., Aleshin I.N. Investigation of growth defects of the banding type in single-crystal castings from carbon-free heat-resistant alloys. *Dvigatel*, 2010, no. 6 (72), pp. 14–16.
23. Kolyadov E.V., Gerasimov V.V., Visik E.M. About specific defects of castings after directional crystallization. *Liteynoe proizvodstvo*, 2015, no. 7, pp. 11–13.
24. Sinichkina T.S., Belikov A.V., Visik E.M. The problem of burn formation on castings from ZhS-32 alloy. *Liteynoe proizvodstvo*, 2015, no. 2, pp. 18–20.
25. Kuzmina N.A., Pyankova L.A. Control of crystallographic orientation of monocrystalline nickel castings heat-resistant alloys by x-ray diffractometry. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.

26. Khayutin S.G. On misorientation of grains during directional crystallization. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 6, pp. 42–43.
27. Sidokhin E.F., Sidokhin F.A., Khayutin S.G. On the substructure of single-crystal GTE blades. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2009, no. 1, pp. 34–36.
28. Sidokhin F.A., Sidokhin A.F., Sidokhin E.F. On the determination of the crystallographic orientation of single crystals by the Laue method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2009, vol. 75, no. 1, pp. 35–37.
29. Potrakhov N.N., Khayutin S.G., Lifshits V.A., Oses R. PRDU-KROS setup for express determination of the crystallographic orientation of cubic single crystals from inverse Laue patterns. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2015, vol. 81, no. 8, pp. 27–30.
30. Oses R., Lifshits V.A., Potrakhov E.N., Potrakhov N.N. The program for deciphering the inverse Laue patterns of FCC single crystals to determine the crystallographic orientation of samples (CGO analysis): certificate. about State Reg. Computer programs, no. 201164448. 2011.
31. Kuzmina N.A., Lifshits V.A., Potrakhov E.N., Potrakhov N.N. Comparative structure control of single-crystal castings of nickel superalloys x-ray diffraction methods of oscillation and Laue. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.

Информация об авторах

Кузьмина Наталья Александровна, старший научный сотрудник, к.г.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Остроухова Галина Алексеевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Natalia A. Kuzmina, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Geol. & Mineral.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Galina A. Ostroukhova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.08.2022.
The article was submitted 08.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 15.08.2022.