

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-3-13

## ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК С ЗАДАННОЙ АКСИАЛЬНОЙ И АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЯМИ

*В.Н. Толорайя<sup>1</sup>, Г.А. Остроухова<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы определения и оценки кристаллографической ориентации (КГО) монокристаллических отливок из никелевых жаропрочных сплавов, получаемых методом направленной кристаллизации. Описаны способы задания аксиальной и азимутальной КГО в отливках при использовании затравочных кристаллов (затравок) из сплавов системы Ni–W. Представлены способы, позволяющие получать отливки турбинных лопаток с монокристаллической структурой заданной пространственной ориентации  $\langle 100 \rangle$ , что для охлаждаемых лопаток позволяет значительно снизить уровень термических напряжений.

**Ключевые слова:** затравка, турбинная лопатка, монокристаллическая структура, кристаллографическая ориентация (КГО), аксиальная КГО, азимутальная КГО, металлографический и дифрактометрический метод

**Для цитирования:** Толорайя В.Н., Остроухова Г.А. Получение монокристаллических отливок с заданной аксиальной и азимутальной ориентациями // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-3-13.

Scientific article

## PRODUCTION OF SINGLE-CRYSTAL CASTINGS WITH A GIVEN AXIAL AND AZIMUTHAL ORIENTATIONS

*V.N. Toloraya<sup>1</sup>, G.A. Ostroukhova<sup>1</sup>*

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

**Abstract.** Deals with the issues of determining and evaluating the crystallographic orientation (CGO) of single-crystal castings from nickel heat-resistant alloys obtained by the method of directed crystallization. The methods of setting the axial and azimuthal CGO in castings using seed crystals (seedings) from alloys of the Ni–W system are described. Presents methods for obtaining castings of turbine blades with a single-crystal structure of a given spatial orientation  $\langle 100 \rangle$ , which allows significantly reducing the level of thermal stresses for cooled blades.

**Keywords:** seed, turbine blade, single-crystal structure, crystallographic orientation (CGO), axial CGO, azimuthal CGO, metallographic and diffractometric method

**For citation:** Toloraya V.N., Ostroukhova G.A. Production of single-crystal castings with a given axial and azimuthal orientations. *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-3-13.

### Введение

Целью работы является практическое решение проблемы получения отливок турбинных лопаток с монокристаллической структурой заданной кристаллографической ориентации (КГО) – аксиальной [001] и азимутальной [100]. Получение монокристаллических отливок заданной аксиальной и азимутальной КГО возможно осуществить только с применением затравочной технологии литья [1–4]. Зарубежная технология, основанная на методе отбора одного кристалла из множества кристаллов, такой возможности не дает.

Кристаллографическая ориентация монокристаллической отливки турбинной лопатки означает, что вертикальная ось (ось  $Z$ ) отливки должна с определенной точностью соответствовать кристаллографическому направлению  $[hkl]$ . В частности, кристаллографическое направление [001] должно образовывать с вертикальной (продольной) осью отливки лопатки угол  $<10$  градусов. Это условие называется заданной аксиальной кристаллографической ориентацией [001]. Для никелевых жаропрочных сплавов, являющихся материалом для турбинных лопаток современных авиационных двигателей, существует ориентационная зависимость прочностных и упругих свойств [5, 6].

Если кристаллографическая ориентация отливки связана не только с аксиальной, но и с азимутальной ориентацией, т. е. с ориентацией относительно оси, лежащей в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ , то такая структура монокристалла (и отливка) называется дважды кристаллографически ориентированной. За счет азимутальной ориентации можно получить преимущества в термостойкости для охлаждаемых турбинных лопаток. В работах [7, 8] приведены данные по влиянию азимутальной ориентации на термостойкость монокристаллических образцов, имитирующих перо охлаждаемой лопатки. Показано, что наименее термонапряженное состояние реализуется тогда, когда одно из направлений [001] расположено по нормали к поверхности пера лопатки.

Максимальное преимущество в термостойкости лопатки с КГО [001] можно получить в случае ориентации области с максимальным термическим напряжением в кристаллографическом направлении [100] – направлении, имеющем минимальный модуль упругости. Для получения дважды ориентированной отливки лопатки методом направленной кристаллизации, на затравку [001] необходимо нанести разметку, соответствующую азимутальному направлению [100], и установить затравку в литейную форму в нужном положении [9].

### Материалы и методы

Материалом для затравочных кристаллов (затравок) является сплав системы Ni–W с содержанием вольфрама от 24 до 30 % (по массе), допускается содержание углерода до 0,08 % (по массе) для повышения технологичности процесса направленной кристаллизации при получении затравочных заготовок.

Метод двойного ориентирования монокристаллических отливок турбинных лопаток в аксиальном и азимутальном направлениях заключается в совмещении с определенной точностью вертикальной (аксиальной) оси  $Z$  отливки с направлением [001], а в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$  отливки (азимутальной), – в совмещении КГО [100] с заданным геометрическим направлением лопатки, для которого наблюдается максимальный уровень термических напряжений. Двойное ориентирование дает преимущество в термостойкости охлаждаемых лопаток с КГО [001], в других ориентациях преимущества прочностных характеристик практически не наблюдается. В работе [10] подробно описано преимущество в уровнях термических напряжений в зависти от аксиальной ориентации турбинной лопатки.

Для получения монокристаллической отливки турбинной лопатки с дважды ориентированной структурой  $\langle 001 \rangle$  необходимо, прежде всего, использовать затравку с аксиальной кристаллографической ориентацией  $[001]$ . Для задания азимутальной ориентации монокристаллической отливки на рабочий торец затравки КГО  $[001]$  требуется нанести разметку (риск), параллельную направлению  $[100]$ . На керамическую литейную форму для отливки лопаток в области затравочного кармана требуется также нанести риск, соответствующую положению КГО  $[100]$  для лопатки в литейном блоке.

При установке затравки в затравочную полость литейной формы необходимо совместить риск на затравке с риском на форме, т. е. установить затравку в затравочной полости рабочим торцом перпендикулярно оси  $Z$  отливки и задать азимутальную ориентацию отливки лопатки поворотом затравки до совмещения риска с заданным геометрическим направлением  $[100]$  на затравке с риском на литейной форме лопатки. Далее зафиксировать затравку в форме, а значит, задать направление КГО  $[100]$  для отливки, и проводить плавку [11].

Технологический процесс определения и разметки азимутальной ориентации  $[100]$  на монокристаллических затравках КГО  $[001]$  осуществляется металлографическим или рентгеноструктурным методами:

- металлографическая методика определения направления  $[100]$  на рабочей поверхности затравки по следам травления, выявляющего дендритно-ячеистую структуру монокристалла системы Ni–W, соответствующую кристаллографическому направлению  $\langle 001 \rangle$ ;
- дифрактометрическая методика определения направления  $[100]$  на рабочей поверхности затравки по следам плоскостей  $\{420\}$ , выведенным в отражающее положение.

Разметка монокристаллической затравки КГО  $[001]$  проводится путем нанесения на рабочий торец затравки линии (риски), параллельной определяемому азимутальному направлению  $[100]$ .

#### *Определение азимутальной ориентации $[100]$ металлографическим методом*

Определение азимутальной ориентации на затравке с аксиальной ориентацией  $[001]$  по фигурам травления, выявляющим дендритную структуру (металлографический метод), основано на том, что дендритные ветви в металлах (в том числе и в никеле) с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой развиваются вдоль направлений  $\langle 001 \rangle$ , выстраиваясь параллельными рядами вдоль плоскостей  $\{001\}$  с отклонением до  $\sim 3$  градусов, декорируя тем самым пространственное расположение плоскостей  $\{420\}$  и направлений  $\langle 001 \rangle$ .

На рис. 1 показана затравка и схематически морфология структур дендритных осей первого порядка, выявленных на протравленных рабочих (базовых) поверхностях затравок  $[001]$ , которые возникают при направленной кристаллизации сплава системы Ni–W. Структура затравок (рис. 1, *а*) формируется при макроскопически плоском фронте роста, структуры (рис. 1, *б*, *в*) – при вогнутом в сторону твердой фазы фронте роста [12]. Фигуры травления выявляют на поверхностях затравок травлением в смеси  $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ .

На рис. 1, *а* направление роста дендритов и температурный градиент на фронте роста совпадают с нормалью к базовой поверхности затравки, структура затравки формируется осями дендритов первого порядка одного направления  $\langle 001 \rangle$ , образующего минимальный угол с осью теплоотвода. В этом случае риску, соответствующую направлению  $[100]$ , следует проводить параллельно дендритному ряду осей первого порядка.

В случае роста осей первого порядка вдоль двух (рис. 1, *б*) или четырех (рис. 1, *в*) направлений  $\langle 001 \rangle$ , риску, соответствующую направлениям  $[100]$  или  $[010]$ , ставят вдоль дендритного ряда ветвей КГО  $\langle 001 \rangle$ , растущих от одной оси первого порядка.

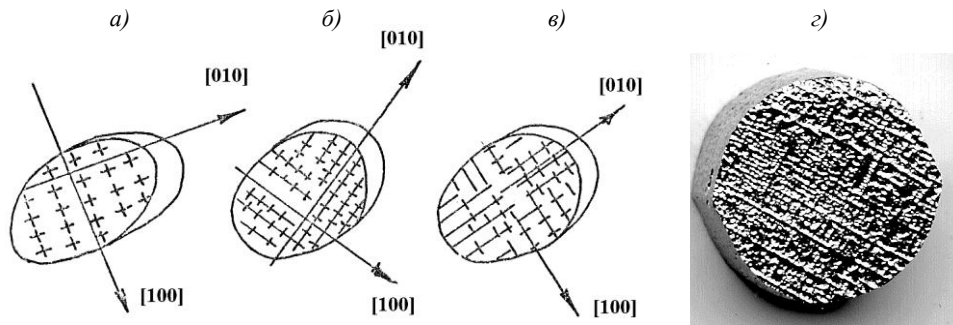


Рис. 1. Характерная морфология дендритных ветвей затравок с ориентацией [001]

В модельной пресс-форме, формирующей затравочную полость в модельном блоке литейной формы, выполняется риска, соответствующая требуемому направлению [100] в азимутальной плоскости, которая в процессе изготовления формы переносится на керамику затравочной полости.

Затравку устанавливают в затравочную полость готовой литейной формы, размеченной поверхностью вверх, с помощью пинцета разворачивают затравку вокруг нормали к ее поверхности на требуемый угол до совмещения риски на затравке с риской на форме и фиксируют подмазкой из микропорошков электрокорунда со связующим – гидролизованным раствором этилсиликата-40.

*Определение азимутальной ориентации рентгеноструктурным методом*

Определение азимутальной ориентации проводится путем фиксации следов плоскостей {420} на рабочем торце затравки. С целью повышения точности измерений для разметки используются отражения не от ближайших к плоскости (001) плоскостей (024), (0 $\bar{2}$ 4), (204), ( $\bar{2}$ 04) с угловым расстоянием 26,5 градуса от КГО <001>, а от плоскостей (402), (0 $\bar{4}$ 2), (042), ( $\bar{4}$ 02) с угловым расстоянием 63,5 градуса от КГО <001>.

При точной аксиальной ориентации торца затравки ( $\alpha_{001} = 0$  градусов) линия пересечения плоскостей (402), ( $\bar{4}$ 02) с плоскостью (001) (следы этих плоскостей) совпадают с направлением [010], а плоскостей (042), (0 $\bar{4}$ 2) – с направлением [100].

Рентгеновская съемка проводится на дифрактометрах типа ДРОН-3 с использованием гониометрической приставки ГП-2 по методике, близкой к методике разметки заготовки для ориентированной вырезки затравок [13–15].

На рис. 2 представлена схема кристаллографических плоскостей, от которых проводится съемка при определении азимутальной ориентации рентгеноструктурным методом.

Счетчик дифрактометра устанавливается в положение  $2\theta_{240}$ , которое для чистого никеля в излучении  $\text{Cu } K_{\alpha 1}$  равно  $2 \times 78^{\circ} 03' = 156^{\circ} 06'$ . Поскольку легирование вольфрамом увеличивает параметры решетки никеля, то необходимо проводить корректировку угла  $\theta$  на конкретный состав сплава затравки.

Затравка устанавливается в держатель приставки ГП-2. Съемку проводят при быстром вращении вокруг нормали к плоскости рабочего торца (скорость вращения – от 60 до 66 об/мин). Диапазон углов поворота вокруг главной оси гониометра при закрепленном лимбе образца и счетчика (образец вращается вокруг оси гониометра, счетчик закреплен в положении  $2\theta_{240}$ ) составляет:

$$\alpha_{240} = \beta - \theta_{240} = \pm(55 \div 70) \text{ градусов,}$$

где  $\beta$  – текущие показатели шкалы образца гониометра.

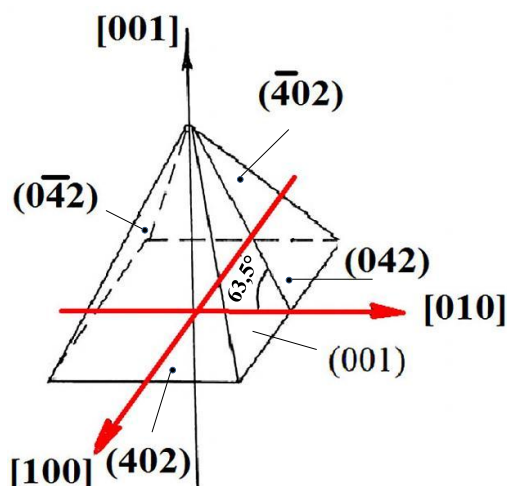


Рис. 2. Кристаллографические плоскости, от которых проводится съемка при определении азимутальной ориентации рентгеноструктурным методом

Указанный диапазон углов съемки  $\alpha_{240}$  выбран с учетом максимального отклонения аксиальной ориентации затравки от КГО [001] ( $\alpha_{001}$  – не более 5 градусов). Затравки с большим отклонением бракуются на ранних стадиях контроля.

Знаки «±» соответствуют симметричным рефлексам  $\{420\}$ , полученным при повороте образца вокруг оси гониометра по часовой или против часовой стрелки. Для сокращения времени при съемке допускается пользоваться только положительным или только отрицательным диапазоном углов поворота образца.

В указанном диапазоне определяют и фиксируют углы, соответствующие максимумам отражений от плоскостей  $\{420\}$ . Всего на затравке в этом интервале углов (при условии  $\alpha_{001} \leq 5$  градусов) может быть от одного до четырех таких рефлексов.

Образец (затравка), развернутый вокруг оси гониометра на угол  $\alpha_1$ , соответствующий максимуму первого рефлекса, медленно поворачивается в приставке ГП-2 вокруг нормали к его поверхности со скоростью 0,1 об/мин и повторно выходит в положение максимальной интенсивности рефлекса. Это положение соответствует случаю, когда плоскость  $\{420\}$  становится параллельной главной (вертикальной) оси гониометра. Тогда линия пересечения плоскости  $\{420\}$  с плоскостью торца затравки (след) совпадает с этой осью, т. е. становится строго вертикальной. Найденное положение следует зафиксировать на рабочем торце затравки риску. Такие же операции проводятся со всеми выявленными рефлексам в вышеуказанном диапазоне углов  $\alpha_{240}$ .

#### *Разметка монокристаллической затравки КГО [001]*

Разметка затравки КГО [001] рентгеноструктурным методом (как и разметка по следам травления) проводится путем нанесения на рабочий торец затравки линии (риски), параллельной направлениям [100] или [010], лежащим в плоскости (001).

При аксиальной ориентации затравки 0 градусов от КГО [001] и съемке при быстром вращении, отражения от плоскости  $\{420\}$  на «кривой качания» – графике дифрактометрического определения кристаллографической ориентации – соединяются в один пик с углом  $\alpha_{240}$ , равным 63,5 градуса (рис. 3, а). На торце затравки в этом случае будут наблюдаться два взаимно перпендикулярных следа: от плоскостей (042), (0 $\bar{4}$ 2) – след параллелен направлению [100], от плоскостей (402), (4 $\bar{0}$ 2) – след параллелен направлению [010] (рис. 3, б).

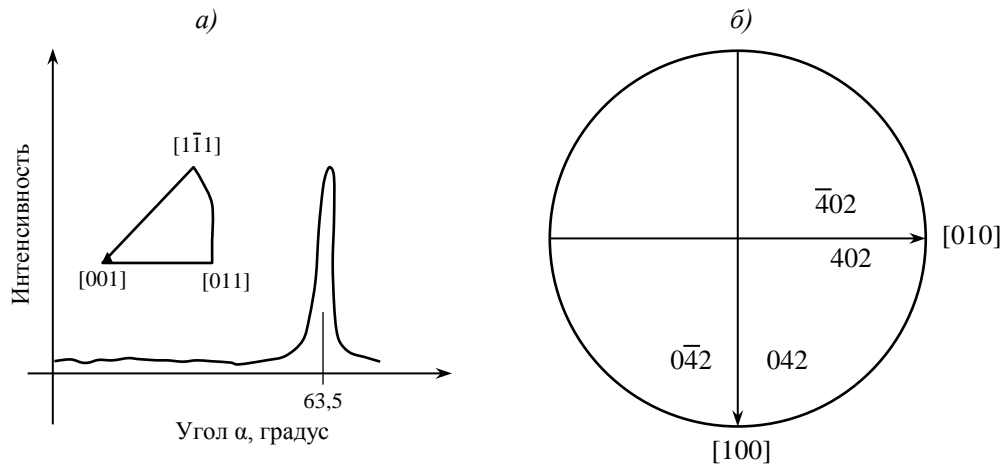


Рис. 3. Аксиальная ориентация затравки с отклонением 0 градусов от КГО [001]: отражения (а), следы от плоскостей (б)

При аксиальной ориентации затравки 0 градусов от КГО [001], допускается использовать только одно отражение от любой из четырех плоскостей  $\{420\}$  – например, от (402).

Для разметки азимутальной ориентации достаточно определить один след на торце затравки и провести риску, параллельную ему. В данном случае можно использовать любой из двух следов от плоскости  $\{420\}$  на торце затравки. При отклонении аксиальной ориентации затравки от ориентации [001] возникают отклонения следов плоскости  $\{420\}$  от направления  $\langle 100 \rangle$ .

На рис. 4 показано появление неточности азимутальной ориентации при отклонении аксиальной ориентации на 5 градусов в направлении от КГО [001] к КГО [011] стереографического треугольника. При быстром вращении образца на рентгенограмме возникают три максимума: первый – слившийся максимум от плоскостей (402) и  $\bar{4}02$ , второй и третий – от плоскостей (042) и  $0\bar{4}2$  под углами соответственно 61,7; 58,5 и 68,5 градусов.

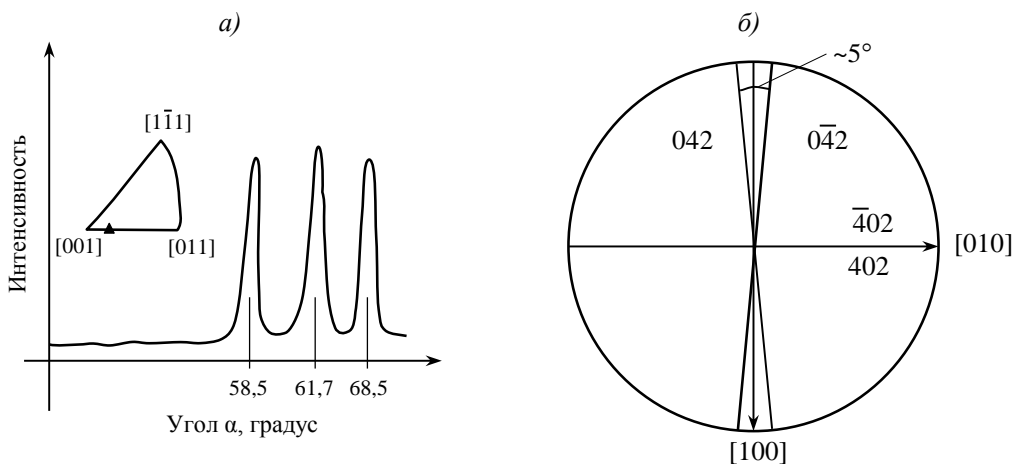


Рис. 4. Азимутальная ориентация затравки при  $\beta = 0$  и отклонении аксиальной ориентации на 5 градусов в направлении от КГО [001] к КГО [011]: отражения (а), следы от плоскостей (б)

Определение азимутальной ориентации с минимальной погрешностью следует проводить на рефлексе с наименьшим отклонением по абсолютной величине  $\Delta = \alpha_{420^\circ} - 63,5^\circ$ , т. е.  $63,5^\circ - 61,7^\circ = 2,8$  градуса от следа плоскости (402).

На рис. 5 показана азимутальная ориентация затравки при отклонении аксиальной ориентации на 5 градусов в направлении от КГО [001] к КГО  $[1\bar{1}1]$  (большая сторона стандартного стереографического треугольника). В этом случае возникает погрешность в определении азимутальной ориентации, равная 3,5 градуса для всех следов от плоскостей {420} на рабочем торце затравок КГО [001]. Ни одно из направлений  $\langle 100 \rangle$  не остается в плоскости рабочего торца затравки, однако погрешность азимутальной ориентации меньше, чем отклонение аксиальной ориентации (3,5 градуса, а не 5 градусов).

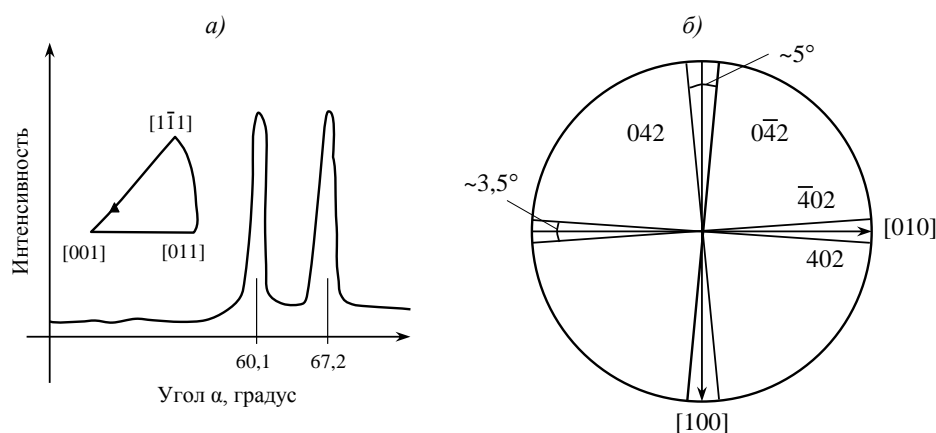


Рис. 5. Азимутальная ориентация затравки при  $\beta = 45$  градусов и отклонении аксиальной ориентации на 5 градусов в направлении от КГО [001] к КГО  $[1\bar{1}1]$ : отражения (а), следы от плоскостей (б)

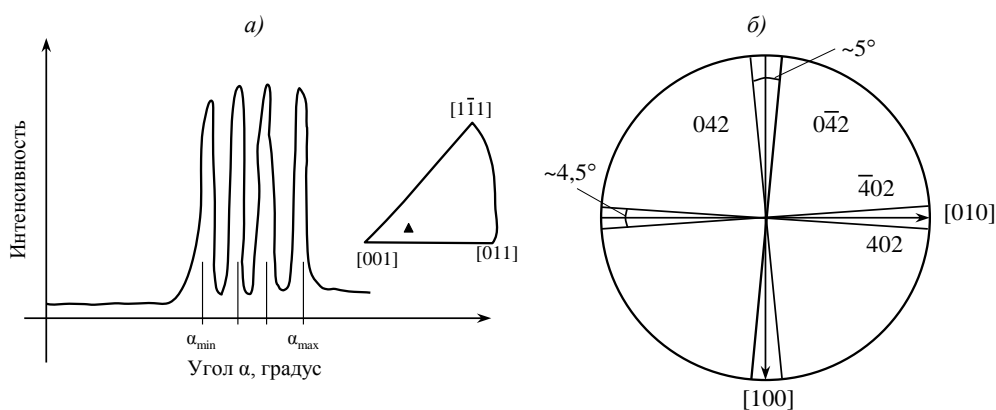


Рис. 6. Азимутальная ориентация затравки при  $\beta = 15-30$  градусов и отклонении аксиальной ориентации на 5 градусов в произвольном направлении от КГО [001]: отражения (а), следы от плоскостей (б)

На рис. 6 показано появление погрешности в определении азимутальной ориентации при отклонении аксиальной ориентации на 5 градусов в произвольном направлении от КГО [001]. При съемке с быстрым вращением образца вокруг его нормали в обоих случаях возникают четыре рефлекса при углах  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ . Для определения азимутальной ориентации с минимальной погрешностью выбирают тот рефлекс, у которого величина  $\Delta = |63,5^\circ - \alpha_n|$  наименьшая по абсолютной величине по сравнению с остальными тремя. Далее при медленном вращении вокруг нормали к образцу определяют максимум интенсивности данного рефлекса и наносят на рабочий торец затравки риску КГО  $\langle 100 \rangle$ .

В таблице представлены значения углов между  $\alpha_{240}$  и нормалью к рабочей поверхности затравки в зависимости от величины и ориентации отклонения аксиальной ориентации затравки от направления [001] (последнее приведено в полярных координатах, где  $\alpha$  – угол между нормалью к торцу затравки и КГО [001],  $\beta$  – направление отклонения нормали от КГО [001]) (рис. 7).

**Величины углов  $\langle\alpha_{240}\rangle$  в зависимости от величины и ориентации отклонения аксиальной ориентации затравки от направления [001]**

Аксиальная ориентация затравки, градус		Углы между направлениями $\langle 420 \rangle$ и нормалью к торцу затравки, градус							
$\alpha_{001}$	$\beta_{001}$	[402]	$\Delta$	[042]	$\Delta$	$[\bar{4}02]$	$\Delta$	$[0\bar{4}2]$	$\Delta$
0	0–45	63,5	<u>0</u>	63,5	<u>0</u>	63,5	<u>0</u>	63,5	<u>0</u>
5	0	58,5	5,0	63,7	<u>0,2</u>	68,5	5,0	63,7	<u>0,2</u>
5	15	58,8	4,7	62,4	<u>1,1</u>	68,4	4,9	65,0	1,5
5	30	59,3	4,2	61,2	<u>2,3</u>	68,0	4,5	66,2	2,7
5	45	60,1	<u>3,3</u>	60,1	<u>3,3</u>	67,2	<u>3,3</u>	67,2	<u>3,3</u>

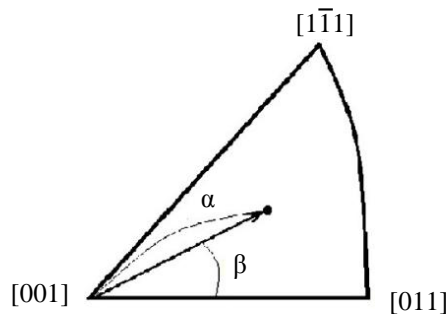


Рис. 7. Кристаллографическая ориентация затравки в стереографическом треугольнике, где  $\alpha$  – угол между нормалью к торцу затравки и КГО [001] – от 0 до  $54^{\circ}44'$ ;  $\beta$  – направление отклонения нормали от КГО [001] – от 0 до 45 градусов

В таблице подчеркнутым шрифтом отмечены рефлексы  $\{420\}$ , по следам которых размечается азимутальная ориентация  $\langle 100 \rangle$ . Разность  $\Delta = |63,5^{\circ} - \alpha_n|$  данных рефлексов наименьшая по абсолютной величине по сравнению с остальными тремя отражениями от совокупности плоскостей  $\{420\}$ .

*Разметка затравок для получения дважды ориентированной структуры отливки*

Для получения дважды ориентированной структуры с ориентацией [001], на базовой поверхности монокристаллических затравок ( $\alpha_{001}$  – не более 5 градусов), признанных годными, под бинокулярным микроскопом по рельефным признакам осей дендритов КГО [001] отмечено маркером в виде риски направление [100], как показано на рис. 8.



Рис. 8. Затравки с указанным направлением КГО [100]

Контроль КГО партии затравок, полученных из одной затравочной заготовки методом ориентированной вырезки, проводят на одной затравке из партии рентгеноструктурным методом. Годными по аксиальной ориентации считаются затравки с отклонением от заданной ориентации  $\alpha_{hkl}$  менее 5 градусов. Годными по азимутальной ориентации считаются затравки с отклонением от заданной ориентации  $\alpha_{100}$  менее 5 градусов.

### Результаты и обсуждение

Для получения монокристаллических отливок турбинных лопаток с дважды ориентированной структурой  $\langle 001 \rangle$  использовали затравки с аксиальной кристаллографической ориентацией  $[001]$  и разметкой азимутальной ориентации в виде риски, параллельной направлению  $[100]$  на рабочем торце затравки КГО  $[001]$ . В пресс-форме для изготовления выплавляемой модели отливки турбинной лопатки в области, формирующей затравочную полость, нанесена риска, соответствующая положению КГО  $[100]$  для лопатки.

При установке затравки в затравочную полость литейной формы для каждой лопатки в блоке совместили риску на затравке с риской на форме, т. е. установили затравку в затравочной полости рабочим торцом перпендикулярно оси  $Z$  отливки и задали азимутальную ориентацию отливке лопатки поворотом затравки до совмещения риски с заданным геометрическим направлением  $[100]$  на затравке с риской на литейной форме лопатки. Далее зафиксировали затравку в форме керамической массой и провели плавку на установке для направленной кристаллизации. В результате отлита лопатка с двойным ориентированием, фрагменты которой представлены на рис. 9.

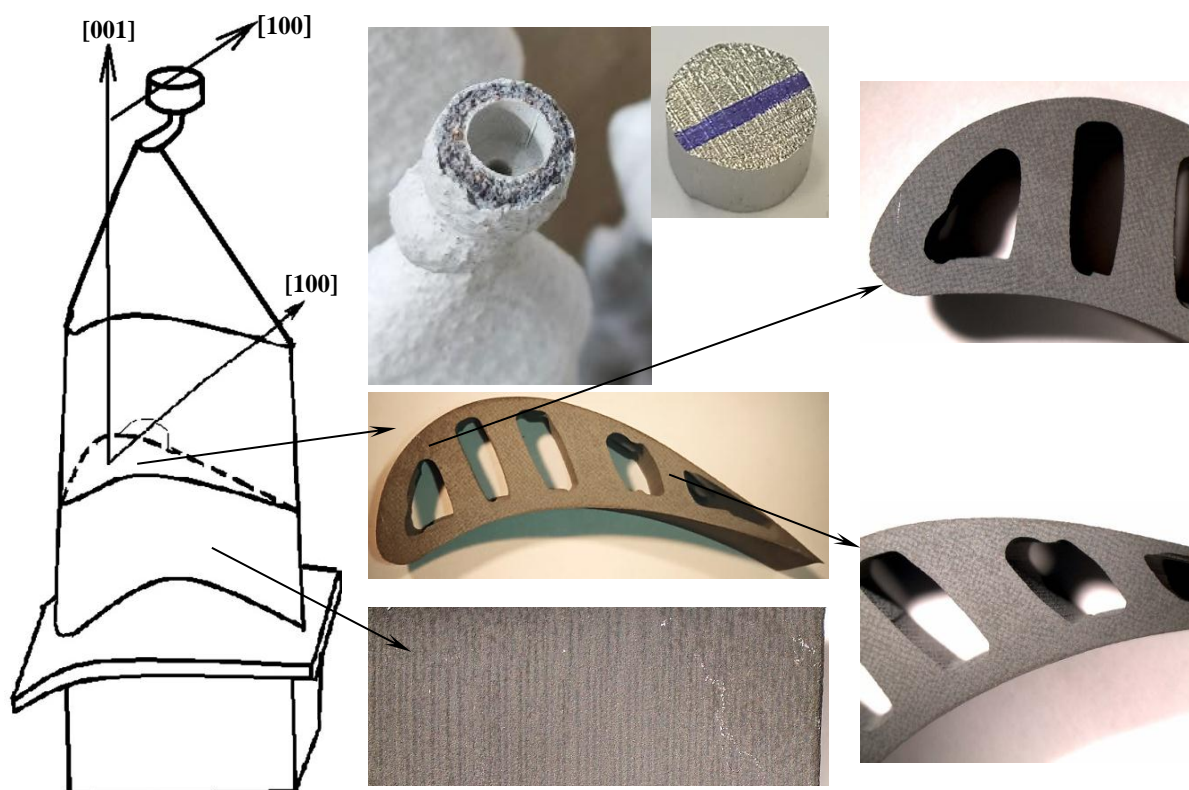


Рис. 9. Фрагменты пера монокристаллической лопатки КГО  $[100]$ , полученной методом двойного ориентирования и затравочного кармана керамической формы с риской для установки дважды ориентированной затравки

**Заключения**

Представлены способы определения азимутальной ориентации и разметки монокристаллических затравок КГО [001], полученные из сплава системы Ni–W.

Применение затравок с заданной аксиальной и азимутальной КГО позволяет получать монокристаллические отливки турбинных лопаток из никелевых жаропрочных сплавов с заданной пространственной кристаллографической ориентацией <001>.

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

**Список источников**

1. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Демонис И.М., Орехов Н.Г. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2007. № 2. С. 60–70.
2. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Технология получения монокристаллических отливок турбинных лопаток ГТД заданной кристаллографической ориентации из ренийсодержащих жаропрочных сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект* С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 206–218.
3. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-72-103.
4. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // *Труды ВИАМ*. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
5. Copley S.M., Kear V.H. Temperature and orientation dependence of the flow stress of stoichiometric Ni<sub>3</sub>Al ( $\gamma'$ -phase) // *Materials Science and Engineering*. 1972. Vol. 10. P. 87–95.
6. Светлов И.Л., Суханов Н.Н., Кривко А.И. Температурно-ориентированная зависимость характеристик кратковременной прочности, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения монокристаллов ЖС6Ф // *Проблемы прочности*. 1987. № 4. С. 51–56.
7. Светлов И.Л., Епишин А.И., Кривко А.И. Анизотропия коэффициента Пуассона монокристаллов никелевого сплава // *ДАН СССР*. 1988. Т. 302. № 6. С. 1372–1375.
8. Кривко А.И., Епишин А.И., Светлов И.Л., Самойлов А.И. Расчет термических напряжений и термостойкость анизотропных материалов. Сообщение I // *Проблемы прочности*. 1989. № 2. С. 3–9.
9. Кривко А.И., Епишин А.И., Светлов И.Л., Самойлов А.И. Расчет термических напряжений и термостойкость анизотропных материалов. Сообщение II // *Проблемы прочности*. 1989. № 4. С. 43–48.
10. Дальнев Р.А., Светлов И.Л., Бычков Н.Г. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава // *Проблемы прочности*. 1988. № 11. С. 3–9.
11. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толорайя В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. С. 162–166.
12. 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. № 55. С. 190–202.
13. 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: 12.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.
14. 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://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
15. 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: 24.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-89-99.

## References

1. Kablov E.N., Toloraya V.N., Demonis I.M., Orekhov N.G. Directed crystallization of heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 60–70.
2. Toloraya V.N., Kablov E.N., Demonis I.M. The technology for obtaining monocrystalline castings of turbine blades of the GTD of a given crystallographic orientation from rnis-containing heat-resistant alloys. *Foundry heat-resistant alloys. The effect of S.T. Kishkin*. Moscow: Nauka, 2006, pp. 206–218.
3. Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Single-crystal Ni-based superalloys for turbine blades of advanced gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-72-103.
4. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 24, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
5. Copley S.M., Kear B.H. Temperature and Orientation Dependence of the Flow Stress of Stoichiometric Ni<sub>3</sub>Al ( $\gamma'$ -phase). *Materials Science and Engineering*, 1972, vol. 10, pp. 87–95.
6. Svetlov I.L., Sukhanov N.N., Krivko A.I. The temperature-oriented dependence of the characteristics of short-term strength, the youth module and the linear expansion of the ZhS6F monocrystals. *Problemy prochnosti*, 1987, no. 4, pp. 51–56.
7. Svetlov I.L., Epishin A.I., Krivko A.I. Anisotropy of the Poisson of the Nickel alloy monocrystals. *Dan USSR*, 1988, vol. 302, no. 6, pp. 1372–1375.
8. Krivko A.I., Epishin A.I., Svetlov I.L., Samoilov A.I. Calculation of thermal stresses and thermal resistance of anisotropic materials. Message I. *Problemy prochnosti*, 1989, no. 2, pp. 3–9.
9. Krivko A.I., Epishin A.I., Svetlov I.L., Samoilov A.I. Calculation of thermal stresses and thermal resistance of anisotropic materials. Message II. *Problemy prochnosti*, 1989, no. 4, pp. 43–48.
10. Dalnev R.A., Svetlov I.L., Bychkov N.G. Orientation dependence of thermal fatigue of nickel alloy monocrystals. *Problemy prochnosti*, 1988, no. 11, pp. 3–9.
11. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B., Toloraya V.N., Gavrilin O.S. *Monocrystals of nickel heat-resistant alloys*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1997, pp. 162–166.
12. Toloraya V.N., Kablov E.N., Orekhov N.G., Ostroukhova G.A. The structure and growth defects of the monocrystals of nickel heat-resistant alloys. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2005, no. S5, pp. 190–202.
13. 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: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.
14. 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: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
15. Nazarkin R.M. Small-sized x-ray diffractometers for structure and phase analysis purposes (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 24, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-89-99.

*Информация об авторах*

**Толорайя Владимир Николаевич**, ведущий научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Остроухова Галина Алексеевна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Vladimir N. Toloraya**, Leading Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Galina A. Ostroukhova**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 01.07.2021; получена после доработки 10.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.01.2022.

The article was submitted 01.07.2021; received in revised form 10.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 10.01.2022.