

УДК 669.245

*Н.А. Кузьмина¹, Н.В. Петрушин¹, Е.М. Висик¹, Н.Н. Еремин², С.А. Наприенко¹***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛАУЭ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦА НИКЕЛЕВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА, РАЗРУШЕННОГО В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-3-12

Проведено исследование структуры монокристаллического образца никелевого жаропрочного сплава, хрупко разрушенного при механической обработке резанием. Исследование проводилось методами рентгеновской дифрактометрии – «качания» и Лауэ. Показаны возможности метода Лауэ для исследований локальных дефектов различного происхождения. На основании полученных данных сделано предположение о рекристаллизационной природе структурных дефектов в монокристалле никелевого жаропрочного сплава; дана оценка упругих свойств монокристалла.

Ключевые слова: метод Лауэ, монокристалл, кристаллографическая ориентация, разориентация субзерен, рентгеновская дифракция, дефекты структуры, монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов, рекристаллизация.

*N.A. Kuzmina¹, N.V. Petrushin¹, E.M. Visik¹, N.N. Eremin², S.A. Naprienko¹***APPLICATION OF THE LAUE METHOD TO STUDY THE STRUCTURE OF A NICKEL HEAT-RESISTANT ALLOY SAMPLE DESTROYED DURING MECHANICAL PROCESSING**

A study of the structure of a single-crystal sample of a nickel heat-resistant alloy, brittle destroyed by mechanical cutting. The study was carried out using x-ray diffractometry – «swing» and the Laue method. The possibilities of the Laue method for studying local defects of various origin are shown. Based on the obtained data, an assumption is made about the recrystallization nature of structural defects in a single crystal of a nickel heat-resistant alloy; the elastic properties of the single crystal are estimated.

Keywords: Laue method, single crystal, crystallographic orientation, subgrain misorientation, x-ray diffraction, structure defects, single crystals of nickel heat-resistant alloys, recrystallization.

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» [Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University]; e-mail: info@rector.msu.ru

Введение

К качеству современных конструкционных материалов предъявляются высокие требования. Поскольку в материале структура определяет свойства, то на всех этапах производства необходим контроль качества структуры, диагностика структурных дефектов и причин их возникновения для принятия мер, направленных на исключение дефектов. Структурные исследования проводятся как на этапе создания и испытаний материала, так и в период эксплуатации детали в конструкции с целью ремонта для продления ресурса или утилизации.

В полной мере это касается и жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), применяемых для изготовления ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД), работающих в условиях агрессивной среды сгорающего топлива, высоких температур и действия растягивающих напряжений [1].

Разработка составов современных безуглеродистых ЖНС, предназначенных для литья монокристаллических лопаток ГТД, направлена, как правило, на повышение их длительной прочности и температурной работоспособности [2–6].

Микроструктура и фазовый состав безуглеродистых ЖНС в готовых монокристаллических лопатках формируется при многоступенчатой термической обработке, включающей высокотемпературную гомогенизацию при температуре выше температуры γ' -солвус с последующим охлаждением с высокой скоростью и двухступенчатое старение. В результате на микроскопическом уровне микроструктура монокристаллов этого класса ЖНС представлена только двумя фазами с близкими кристаллографическими параметрами: упрочняющей кубической γ' -фазой с примитивной кубической решеткой (пространственная группа $Pm\bar{3}m$, структурный тип Cu_3Au , $a=0,357$ нм) и неупорядоченной γ -матрицей, т. е. твердым раствором со структурой γ -Ni (с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой ($Fm\bar{3}m$, структурный тип Cu , $a=0,352$ нм) [6].

Хотя монокристаллы ЖНС не обладают совершенной структурой, так как имеют дендритное строение, – их структура может быть фрагментирована. Как и для всех монокристаллов, для ЖНС также характерна анизотропия механических свойств в зависимости от кристаллографического направления структуры [7, 8].

Для безуглеродистых ЖНС существуют ограничения по наличию дефектов в структуре монокристаллической отливки. Дефекты структуры, нарушающие монокристалличность и увеличивающие угол отклонения заданного кристаллографического направления от оси Z изделия, могут стать причиной снижения ресурса лопатки и даже ее разрушения. Дефекты могут иметь различное происхождение [7, 9]:

– р-ростовые, полученные в процессе кристаллизации сплава, связанные с макроскопически неплоским фронтом кристаллизации, дефектами формы, посторонними включениями и т. д.;

– на последующих операциях – вследствие рекристаллизации в процессе высокотемпературной (>1300 °С) гомогенизации – как результат повышенных литейных напряжений либо поверхностного наклепа.

Полученные монокристаллические отливки лопаток подвергаются 100% контролю после травления на наличие дефектов структуры. Визуально годные монокристаллические отливки направляются на определение отклонения от заданной кристаллографической ориентации (КГО) монокристалла. С этой целью применяют рентгеновские методы для определения точных характеристик структуры [10–13]. В производственной практике наиболее распространенным рентгеновским методом определения угла осевого (аксиального) отклонения оси Z отливок ЖНС от заданного кристаллографического направления структуры является метод рентгеновской дифрактометрии – «качания». Другой рентгеновский метод Лауэ позволяет определить угол отклонения оси Z образца не только относительно одного заданного кристаллографического направления [001], но и относительно других направлений структуры – [111] и [011]. Такое измерение можно провести в любой точке отливки ЖНС, а также с помощью специализированной программы рассчитать угол разориентации между отдельными блоками субструктуры [14–16].

Цель данной статьи – исследование дефектов структуры монокристаллического образца из ЖНС, хрупко разрушенного на этапе механической обработки резанием. Хрупкое разрушение – наиболее опасный вид разрушения, происходящий катастрофически быстро под влиянием сравнительно низких напряжений. Поэтому исследования,

направленные на выяснение условий и причин хрупкого разрушения монокристаллов ЖНС, весьма актуальны.

Материалы и методы

Исследование проводили на цилиндрической отливке (длина 70 мм, диаметр 15 мм) из безуглеродистого ЖНС, полученной методом монокристаллического литья, признанной годной по структуре и прошедшей термическую обработку, включающую вакуумную ступенчатую гомогенизацию при температуре выше температуры солвус γ' -фазы (1295 °С) и старение при 1000 °С. Из отливки с помощью механической обработки резанием изготовлен стандартный образец для испытаний. При механическом вытачивании отливки образец сломался, что и привело к поиску причин преждевременного разрушения образца, еще до начала испытаний.

Для проведения металлографических исследований отливку образца подвергали химическому травлению в смеси концентрированной соляной кислоты и перекиси водорода для выявления макроструктуры.

Исследование с помощью рентгеновской дифрактометрии проводили методами «качания» и Лауэ. Съемку структуры образца методом «качания» осуществляли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 с использованием гониометрической приставки ГП-13, а съемку дифрактограмм выполняли в монокроматическом $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении в диапазоне углов $\omega = (\theta_{(004)} - 59^\circ) \dots (\theta_{(004)} + 59^\circ)$. Сканирование осуществляли при постоянном угле дифракции $2\theta_{(004)} = 118,3$ градуса и непрерывном быстром вращении образца. Площадь облучения составляла 113 мм² при размере стандартных щелей дифрактометра 1×12 мм. Рентгеноструктурный анализ кривых «качания» и расчет величины аксиального отклонения Δ от заданного кристаллографического направления (КГО) проводили с использованием компьютерной программы GLRDIF.

При съемке методом Лауэ на рентгеновской установке ПРДУ неподвижный образец облучали полихроматическим пучком острофокусной рентгеновской трубки при площади облучения 0,4 мм². При регистрации дифракционных картин (лауэграмм) в различных точках, перемещение исследуемого образца относительно источника рентгеновского излучения производили строго поступательно вдоль осей X и Y.

Наряду с углом аксиального отклонения $\Delta\text{КГО}_{001}$ метод Лауэ позволяет получить «точку в треугольнике», т. е. положение нормали к исследуемой точке поверхности образца относительно основных кристаллографических направлений структуры. Метод позволяет исследовать изменение структурных характеристик в отливке в интересующих направлениях: роста – от центра к краю, а также исследовать локальные дефекты структуры в любом месте поверхности отливки ЖНС, получая дифракционную картину (лауэграмму) для каждой точки [17].

Лауэграммы регистрировали с помощью пластины с фотостимулируемым люминофором, а затем для визуализации переводили в цифровой формат на сканере высокого разрешения Digora optime.

Обработку полученных изображений дифракционной картины кубического кристалла проводили в автоматическом режиме с помощью программы KROS [18, 19] путем совмещения экспериментального изображения с фрагментом стандартной сферической проекции кубической решетки. Определяли координаты положения нормали (первичного пучка) к поверхности образца в стандартном сферическом треугольнике.

Результаты и обсуждение

Хрупкое разрушение отливки образца ЖНС произошло при комнатной температуре во время механической обработки резанием, при которой он находился под нагрузкой в токарном станке, где происходило сжатие в продольном направлении

и изгиб в поперечном направлении при постоянном вращении. При разрушении образца дальнейшая механическая обработка прекратилась, что позволило определить точку начала разрушения (рис. 1).



Рис. 1. Литая заготовка для изготовления образца для механических испытаний, разрушенная при механической обработке

При визуальном контроле боковой и торцевых поверхностей, протравленных на макроструктуру, какие-либо границы ростовых блоков не обнаружены, т. е. отливка выглядела как монокристаллическая.

Исследование торцевых поверхностей образца. При сравнении рисунка дендритной структуры торцевых поверхностей (рис. 2) видно, что главные оси дендритов имеют разное осевое отклонение в начале (рис. 2, а) и в конце (рис. 2, б) роста образца.

Методом «качания» на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 определили угол аксиального отклонения монокристалла от кристаллографической ориентации [001] ($\Delta\text{КГО}_{001}$) структуры образца на торцах: 4 градуса в начале роста и 34 градуса в конце роста (рис. 1). При измерении угла отклонения $\Delta\text{КГО}_{001}$ методом Лауэ получены аналогичные величины: 4 и 33 градуса соответственно.

Исследование методом Лауэ. Сравнение результатов съемки торцевых поверхностей показывает, что на торце образца с $\Delta\text{КГО}_{001}=4$ градуса совмещаются ось Z образца, направление сжатия и заданное кристаллографическое направление [001] с небольшим (т. е. <10 градусов), около 4 градусов отклонением, в то время как на торце образца с $\Delta\text{КГО}_{001}=34$ градуса совмещаются ось Z образца, направление сжатия и кристаллографическое направление в центре сферического треугольника. В данном образце наблюдается очень сильное изменение $\Delta\text{КГО}$ дендритной структуры. Если предположить ростовую природу данного дефекта, то он может быть связан с нарушением симметричности теплового потока и искривлением фронта роста кристалла. В зависимости от условий в процессе роста, характер изменения угла аксиального отклонения монокристалла может быть монотонным или резким.

Кроме значительного увеличения угла разориентации при исследовании торцевых поверхностей, можно отметить, что рефлексы в верхней части более узкие, что свидетельствует о более совершенной структуре кристалла. На практике, в условиях направленной кристаллизации по затравочной технологии, более совершенная структура характерна для нижней части слитка, близкой к затравке, передающей структуру кристаллу ЖНС. По мере роста от затравки, как правило, дифракционные отражения становятся более широкими, т. е. увеличивается разброс значений отклонения $\Delta\text{КГО}$ отдельных дендритов от заданного в начале роста направления. Именно поэтому к качеству структуры затравок предъявляются более высокие требования: если для отливки ЖНС допустимое отклонение $\Delta\text{КГО}$ не более 10 градусов, то $\Delta\text{КГО}$ затравки должно быть не более 5 градусов.

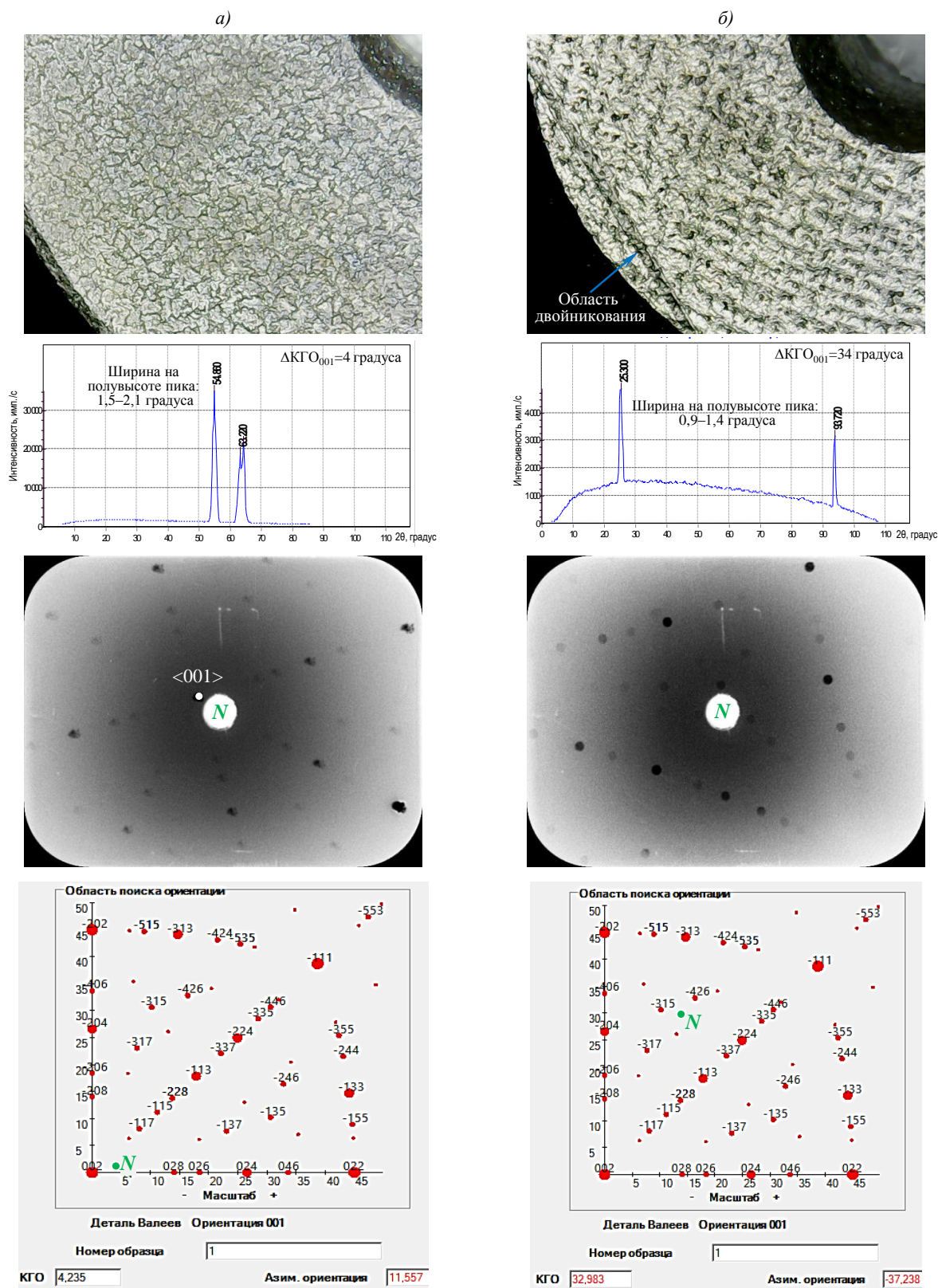


Рис. 2. Вид дендритной структуры протравленных торцевых поверхностей образца, соответствующие им кривые «качания» и рассчитанные по ним значения угла аксиального отклонения направления роста от заданной КГО лауэграммы. Положение точки выхода нормали к поверхности образца (*N*) на сферическом треугольнике (сетка гномостереографических проекций для кубической системы)

Полученные методом Лауэ данные о положении оси Z образца относительно основных кристаллографических направлений структуры (положение в сферическом треугольнике) позволили приблизительно оценить анизотропию свойств материала при комнатной температуре, используя опубликованные экспериментальные данные для никелевых сплавов [7, 20, 21]. Так, при комнатной температуре при изменении отклонения оси Z образца от кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$ с 4 до 34 градусов, модуль упругости E_x увеличивается со 140 до 240 ГПа, а модуль сдвига G_x уменьшается со 120 до 70 ГПа (рис. 3).

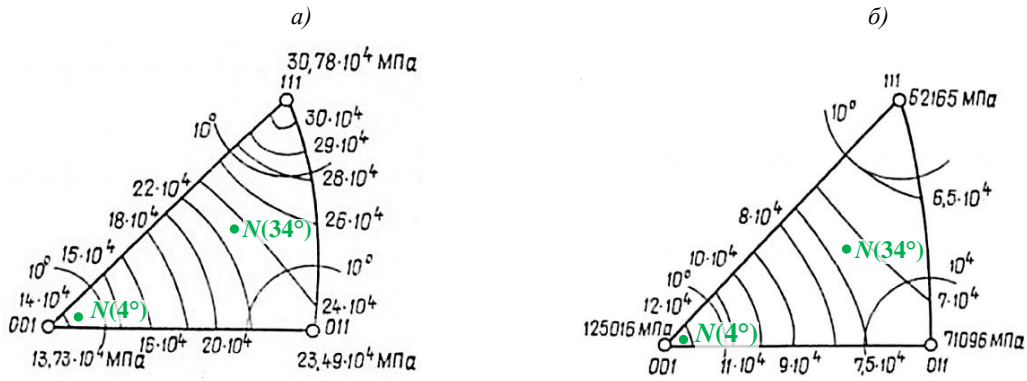


Рис. 3. Аксиально-ориентационная зависимость при температуре 293 К модуля упругости E_x (а) и модуля сдвига G_x (б). Точкой отмечено положение в сферическом треугольнике нормали к поверхности торца образца с $\Delta KГO_{001}$: 4 и 34 градуса

Исследование характера столь значительного изменения структуры слитка ЖНС вдоль направления роста (по боковой поверхности) и поверхности скола образца в дальнейшем исследовании проводилось только методом Лауэ.

Исследование боковой поверхности разрушенного образца. При исследовании методом Лауэ боковой поверхности, прошедшей механическую обработку, наблюдается характерное явление «астеризма», при котором дифракционные пятна на лауэграммах «размазываются» в дуги, свидетельствуя о деформации структуры (рис. 4, а). После прекращения механической обработки из-за разрушения образца, недеформированная поверхность дает четкие очертания дифракционных пятен на лауэграммах (рис. 4, б).

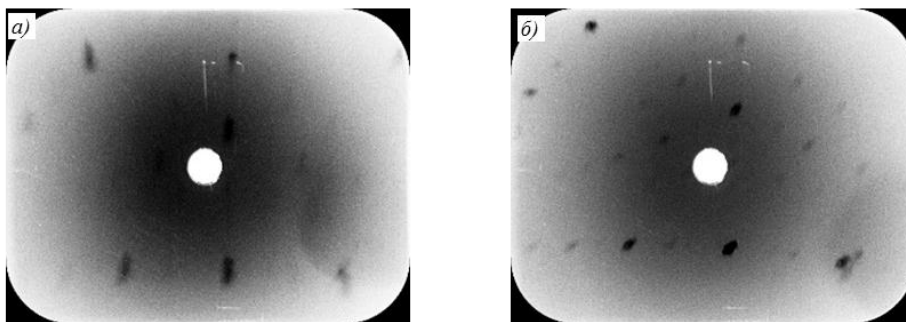


Рис. 4. Лауэграммы, снятые с боковой поверхности образца, деформированной (а) и недеформированной (б) механической обработкой

В табл. 1 приведены значения угла разориентации структуры с двух сторон от линии скола – для верхней, нижней и боковых точек (А и Б) по обе стороны от скола. Расчет показывает значительное и резкое изменение ориентировки структуры вдоль направления роста, следовательно и упругие свойства материала изменялись также скачкообразно.

Резкий переход от одной кристаллографической ориентировки к другой с образованием более совершенного по структуре кристалла свидетельствует не в пользу ростовой природы данного дефекта.

Таблица 1

Значения угла разориентации структуры монокристалла на боковой поверхности с двух сторон от линии скола

Параметр	Верхняя точка скола	Средняя точка скола		Нижняя точка скола
		А	Б	
Угол разориентации, градус	32	35	33	30
Среднее значение, градус	33 ($\Delta 5$)			

Исследование поверхностей скола. Поверхности скола в хрупко разрушенном образце не плоские, а разделены на четыре центрально-симметричных сегмента. На обломке с большим ΔKGO_{001} виден узкий субкристалл, обрывающийся на поверхности излома (рис. 5).

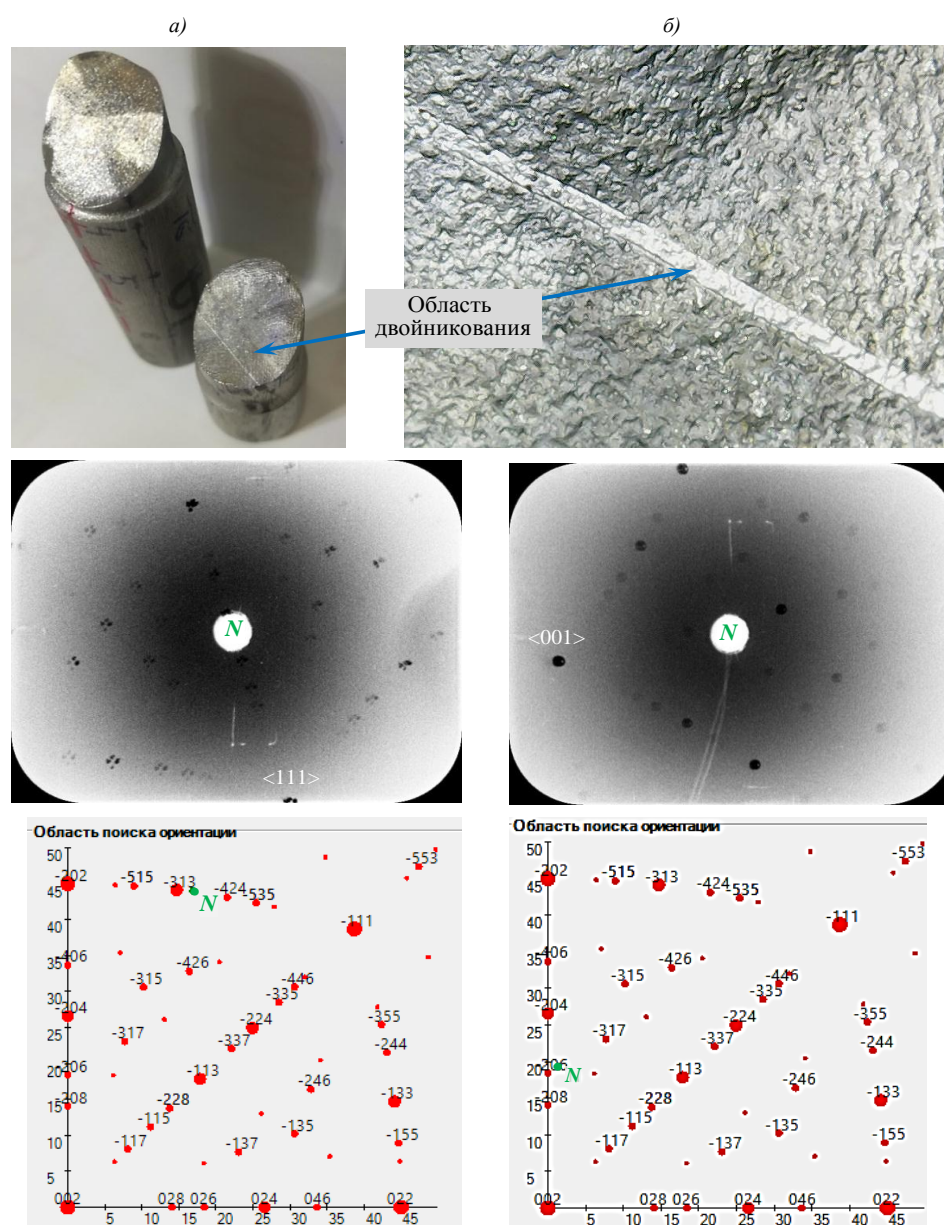


Рис. 5. Сопоставление лауэграмм поверхностей скола в центральной точке

В пяти точках поверхности скола сняли лауэграммы: одну – в центре, четыре – по краям и в таких же ответных точках на другой части образца. На лауэграммах, полученных в краевых точках поверхности скола от обломка (с ориентацией $\Delta\text{КГО}_{001}=4$ градуса), дифракционные пятна имеют неправильные очертания, что естественно для кристалла, полученного в условиях дендритного роста. Однако на лауэграмме центральной части скола дифракционные пятна разделены на четыре четких центрально-симметричных сегмента (рис. 5, а).

В ответных точках на обломке с ориентацией $\Delta\text{КГО}_{001}=34$ градуса дифракционные пятна четкие, узкие, правильной округлой формы, что характерно для высокосовершенных монокристаллов (рис. 5, б).

Рассчитанные значения угла разориентации представлены в табл. 2. Разброс измеренных значений отклонения $\Delta\text{КГО}_{001}$ в разных точках для части образца с $\Delta\text{КГО}_{001}=4$ градуса составляет 3 градуса, в то время как для части с $\Delta\text{КГО}_{001}=34$ градуса – всего 0,2 градуса, что на порядок меньше и также свидетельствует о высокосовершенной структуре этой части кристалла. Следовательно, исследуемый образец представляет собой бикристалл, одна часть которого имеет рстовую структуру, а другая – рекристаллизационную.

Таблица 2

Значения угла разориентации структуры поверхностей скола

Параметр	Верхняя точка скола	Боковая точка скола А	Центр скола	Боковая точка скола Б	Нижняя точка скола
Угол разориентации, градус	31	28	29	28	27
Среднее значение, градус	29 ($\Delta 4$)				

Наблюдаемый результат – следствие объемной рекристаллизации. Такой дефект структуры характерен для безуглеродистых сплавов, кристаллы которых выращены в условиях высокого рстового градиента. Явление рекристаллизации не проявляется непосредственно в литом состоянии сплава, а возникает при последующем гомогенизационном отжиге, обычно при температурах выше температуры растворения γ' -фазы. Одной из причин объемной рекристаллизации могут быть литейные напряжения, возникшие в процессе направленной кристаллизации, при этом рекристаллизованное зерно образуется в объеме монокристалла без какой-либо механической деформации поверхности [22].

О рекристаллизационной природе этого дефекта свидетельствует и наличие переориентированной области – двойника, образовавшегося исключительно в рекристаллизованной части образца (рис. 6). Двойникование происходит для сброса напряжений, вызванных рекристаллизацией структуры [23].

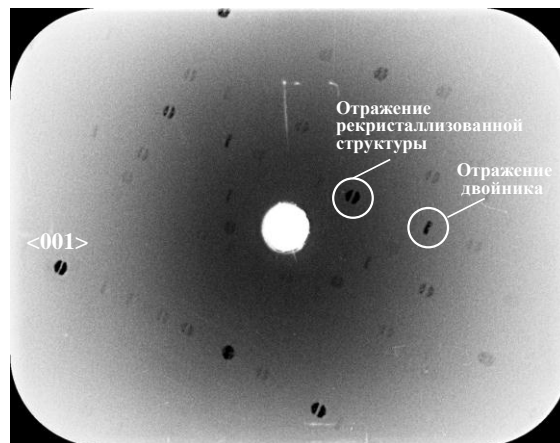


Рис. 6. Лауэграмма поверхности скола рекристаллизованной части образца с двойником

Можно предположить, что после гомогенизационного отжига отливка ЖНС представляла собой бикристалл с большой разориентацией фрагментов. Поскольку ЖНС, предназначенный для литья монокристаллов, не содержит элементов, укрепляющих границы зерен, то на этапе механической обработки (при сравнительно небольшой сжимающей и изгибающей нагрузке) произошел скол образца по границе кристаллов.

Заключения

Исследование дефектов в отливке ЖНС методом Лауэ позволило предположить, что на этапе высокотемпературного гомогенизационного отжига, по-видимому, из-за литейных напряжений произошла рекристаллизация с двойникованием части отливки, в результате чего образовался бикристалл, который на этапе механической обработки, при сравнительно небольшой сжимающей и изгибающей нагрузке, раскололся по межкристаллической поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-508-12010).

Библиографический список

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
3. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Королев А.В. Монокристаллические жаропрочные сплавы: состав, технологии, структура и свойства // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД»*. М.: ВИАМ, 2017. С. 271–303.
4. 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* / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. С. 206–218.
5. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Висик Е.М., Гольнец С.А. Разработка монокристаллического жаропрочного никелевого сплава V поколения // *Металлы*. 2017. №6. С. 38–51.
6. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. №7–8. С. 54–58.
7. Reed R.C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2006. 372 с.
8. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толорайя В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
9. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Орехов Н.Г., Голубовский Е.Р. Анизотропия прочностных характеристик монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. Спецвыпуск. С. 225–236.
10. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Орехов Н.Г., Остроухова Г.А. Структура и ростовые дефекты монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. Спецвыпуск. С. 190–202.
11. Назаркин Р.М., Колодочкина В.Г., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. Изменения микроструктуры монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в процессе длительной эксплуатации турбинных лопаток // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 9–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-9-17.
12. Назаркин Р.М. Рентгенодифракционные методики прецизионного определения параметров кристаллических решеток никелевых жаропрочных сплавов (краткий обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-41-48.

13. Кузьмина Н.А., Пьянкова Л.А. Контроль кристаллографической ориентации монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов методом рентгеновской дифрактометрии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №12 (84). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
14. Хаютин С.Г. О разориентации зерен при направленной кристаллизации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. №6. С. 42–43.
15. Сидохин Е.Ф., Сидохин Ф.А., Хаютин С.Г. О субструктуре монокристаллических лопаток ГТД // Авиационная промышленность. 2009. №1. С. 34–36.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №9 (81). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.
20. Кривко А.И., Епишин А.И., Светлов И.Л. и др. Упругие свойства монокристаллов никелевых сплавов // Проблемы прочности. 1988. №2. С. 68–75.
21. Светлов И.Л., Суханов Н.Н., Самойлов А.И. и др. Температурноориентационные зависимости характеристик кратковременной прочности, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения монокристаллов сплава ЖС6Ф // Проблемы прочности. 1987. №1. С. 51–56.
22. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 272 с.
23. Нейман А.В., Филонова Е.В., Исходжанова И.В. О локальной рекристаллизации в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов // Металлургия и машиностроение. 2013. №1. С. 19–22.