

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ ЛАУЭ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТИРОВКИ И РАЗОРИЕНТИРОВКИ БЛОКОВ МОНОКРИСТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

© 2011 Е. А. Тихомирова¹, Е. Ф. Сидохин²

¹ОАО «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург

²ЗАО «НТЦ Экспертцентр», г. Москва

Технологический процесс изготовления монокристалльных турбинных лопаток предусматривает контроль кристаллографической ориентировки как готовых лопаток, так и многих вспомогательных изделий. Наиболее простым в исполнении, экспрессным и предельно простым в отношении технических средств его реализации является метод Лауэ. В статье представлена оригинальная компьютерная методика обработки обратных лауэграмм (эпиграмм) и специализированная малогабаритная настольная установка для контроля ориентировки монокристаллических объектов и разориентировки между блоками в них. Представлены результаты сравнительных испытаний метода Лауэ и дифрактометрического метода, проведенных на монокристалльных изделиях из жаропрочных никелевых сплавов четырех моторных заводов.

Монокристаллические образцы и лопатки, аксиальная и азимутальная ориентация, ориентационный фактор, системы скольжения.

В целях повышения эксплуатационных характеристик турбинные лопатки изготавливают монокристалльными, применяя для этого метод Бриджмена или метод направленной кристаллизации от затравок [1]. При изготовлении лопаток методом направленной кристаллизации от затравок в технологическом процессе необходимо контролировать кристаллографическую ориентировку (КГО) затравок и конусов, которые являются образцами-свидетелями лопаток, определять ориентировку стержней, используемых для изготовления затравок с помощью ориентированной резки, а также готовых лопаток. Необходимо также контролировать непосредственно в лопатках разориентировку крупных блоков, выявляемых металлографическим травлением. Производят также определение ориентировки монокристалльных образцов, предназначенных для исследования ориентационной зависимости механических свойств и эксплуатационных характеристик применяемых и разрабатываемых жаропрочных сплавов (усталостной прочности, предела выносливости и др.) [2], поскольку показано, что влияние ориентировки сохраняется вплоть до «предплавленных» температур [3].

Определение кристаллографической ориентировки монокристалльных изделий можно производить методом Лауэ [4] или дифрактометрическим методом [5]. Метод Лауэ, использующий сплошной спектр рентгеновского излучения, прост в исполнении и «требует предельно простое эксперимен-

тальное устройство» для реализации [4]: необходим простой источник рентгеновских лучей, регистратор дифракционного изображения и держатель образца, находящиеся в неподвижном положении во время съемки. Дифрактометрический метод использует характеристическую составляющую рентгеновского излучения. Он может обеспечить очень высокую точность определений, но к средствам его исполнения предъявляются существенно более высокие требования.

В исследовательской практике его применение оправдано, но для контроля ориентировки монокристалльных изделий в производстве, например турбинных лопаток, нерационально, поскольку почти все многочисленные свойства дифрактометра оказываются излишними, а воспользоваться ими для решения других задач не представляется возможным в силу чрезвычайно высокой загруженности. Тем не менее, в настоящее время в производственной практике отечественных моторных заводов повсеместно применяют дифрактометрический метод, поскольку на момент введения контроля метод Лауэ был недостаточно производителен, чтобы обеспечить технологический процесс. Однако в настоящее время благодаря созданию новых средств регистрации дифракционного изображения и компьютерных средств обработки экспрессность его сравнима с экспрессностью дифрактометрического метода, если сравнивать по одной экспозиции и одной обработке спектра. Когда же необходимо получить полную информацию

обо всех параметрах контроля, метод Лауэ существенно производительнее, т.к. в нем для этого **достаточно всего одного снимка**.

Контролю монокристалльных изделий в производстве турбинных лопаток присущи две главные особенности: невысокая точность измерений угла – около 1° , но чрезвычайно высокая загрузка – временами сотни образцов в день.

Основные задачи, с которыми встречаются в производственном контроле моторные заводы и исследовательские лаборатории, состоят в следующем:

1. Отбраковывать затравки, которые превышают по КГО заданный норматив.
2. Определять аксиальную и азимутальную ориентировку затравок.
3. Производить азимутальное ориентирование затравок для изготовления лопаток с заданной азимутальной ориентировкой.
4. Производить подготовку стержней, предназначенных для изготовления из них затравок, к ориентированной резке.
5. Определять аксиальную и азимутальную ориентировку конусов.
6. Определять разориентировку фрагментов (зерен) в лопатках и ориентировку этих фрагментов относительно важных направлений лопатки.
7. Устанавливать положение оси лопатки в стереографическом треугольнике.
8. Рассчитывать ориентационные факторы (фактор Шмида) систем скольжения и положение следов скольжения на поверхности образцов.

В связи с изложенным целесообразен переход моторных предприятий к применению метода Лауэ и соответствующих приборов для определения ориентировки монокристалльных изделий в производстве турбинных лопаток.

Ниже описывается методика исполнения метода Лауэ, малогабаритная установка для его осуществления и результаты сравнительных испытаний названных методов.

В традиционном способе реализации метода Лауэ [6] по положению рефлексов на снятой эпиграмме определяют положение нормалей плоскостей, которые дали отражения. Полученную сетку нормалей преобразуют и сопоставляют с одной из сеток стандартных проекций. После того, как достигнуто совмещение на одной из стандартных проекций, с помощью сетки Вульфа

определяют угловые координаты первоначального центра и другие координаты относительно основных кристаллографических направлений.

Значительное повышение экспрессности измерений и возможностей метода достигнуто благодаря применению компьютерной обработки и мощным программным средствам.

Однако чтобы находить пятна на эпиграмме и устанавливать их координаты, программе необходимо их распознавать, что делать затруднительно, если пятна имеют сложное, бесформенное, не повторяющееся строение вследствие развитой блочной структуры монокристаллов, формирующейся при кристаллизации и пластической деформации. Особенно характерно это для металлов и сплавов, в том числе монокристаллов никелевого жаропрочного сплава [7].

Типичные эпиграммы, с которыми приходится встречаться при определении ориентировки монокристаллов металлов и сплавов, показаны на рис. 1, где приведены эпиграммы монокристаллов Nb и двух жаропрочных никелевых сплавов.

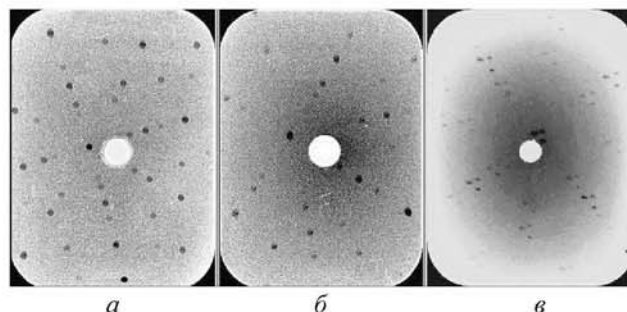


Рис. 1. Примеры эпиграмм монокристаллов Nb (а), и жаропрочных никелевых литейных сплавов ЖС-26 (б) и ЖС-32 (в)

Чтобы обойти эти трудности, в предлагаемой компьютерной методике обработки для определения ориентировки монокристалла, в отличие от названной выше, не устанавливают положение каждого рефлекса, а сравнивают **экспериментальную эпиграмму с набором расчетных эпиграмм** (следует иметь в виду, что все действия выполняются на экране монитора). Предварительно, используя набор стандартных стереографических проекций сингонии исследуемого кристалла, следует построить набор расчетных эпиграмм для единичного расстояния образец – регистратор эпиграммы (напри-

мер, двумерный полупроводниковый детектор, пленка или экран с фотостимулированным люминофором). Затем расчетные эпиграммы корректируют в соответствии с реальным расстоянием, при котором выполняются съемки. **На снятую экспериментальную эпиграмму, выведенную на экран монитора, накладывают одну за другой расчетные эпиграммы из созданного набора.** Каждый раз при этом расчетную эпиграмму, помещенную над экспериментальной, преобразуют в ручную, как бы плавно поворачивая кристалл вокруг трех взаимно перпендикулярных осей N , H , ω (N -нормаль к плоскости образца, вдоль которой направляют рентгеновский пучок) либо вокруг любого произвольно выбранного на эпиграмме направления, добиваясь визуального совмещения пятен-рефлексов реальной и расчетной эпиграмм. **После успешного выполнения этой процедуры с одной из расчетных эпиграмм программа производит расчет и устанавливает положение внешних осей изделия относительно кристаллографических направлений.** Одновременно производится определение углов между важными направлениями системы координат образца с любыми кристаллографическими направлениями, интересующими контроль, например определение аксиальной, азимутальной ориентировки лопатки и координат оси лопатки в стереографическом треугольнике.

Для практического осуществления процедуры преобразования расчетной эпиграммы, выполнения расчетов и необходимого сервиса создана компьютерная программа управления, включающая наборы расчетных эпиграмм для кристаллов с ГЦК, ОЦК и ГПУ пространственными решетками.

Определение ориентировки с помощью предлагаемой методики обработки эпиграмм и программы управления иллюстрируется на примере монокристалльной турбинной лопатки, выращенной из жаропрочного никелевого сплава методом Бриджмена (рис. 2).

Вышеописанная процедура определения ориентировки с помощью стандартных эпиграмм обычно используется при работе с объектами, имеющими произвольную пространственную ориентировку. Когда же производят контроль изделий, у которых ориентировка регламентирована (например, 10°), на эпиграмме присутствуют легко рас-

познаваемые рефлексы от простых плоскостей типа (001), (110) или (111).

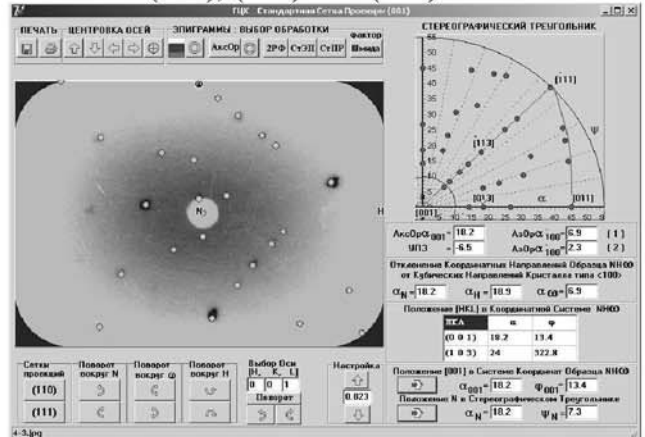


Рис. 2. Пример обработки эпиграммы монокристалла из сплава ЖС-32

В этом случае процедура становится чрезвычайно простой: достаточно на эпиграмме указать курсором на один из этих рефлексов, и программа сразу же выдает угол между осью лопатки и нормалью этой плоскости. Если же курсором указать на два известных рефлекса, то будет автоматически произведен расчет всех параметров контроля лопатки - углы аксиальной и азимутальной ориентировки, координаты оси лопатки в стереографическом треугольнике - и показано ее положение в треугольнике.

Поскольку контролируемые объекты производства монокристалльных турбинных лопаток имеют не слишком большие размеры и вес, для их контроля вышеописанным методом предлагается простая и компактная рентгеновская установка, внешний вид которой показан на рис. 3 (без кожуха радиационной защиты). О ее габаритах можно судить по лежащей на оперативном столике прибора турбинной лопатке одного из моторных заводов. Установка включает в себя моноблок малогабаритного источника рентгеновских лучей с серийной рентгеновской трубкой типа БСВ-33, закрепленный на кронштейне штатива; размещенный под моноблоком оперативный столик для установки объектов контроля с возможностью поворота вокруг оси рентгеновского пучка и поступательного перемещения по двум перпендикулярным ей направлениям, а также коллиматор рентгеновского пучка и держатель съемного регистратора эпиграмм, закрепленные на моноблоке. Рядом со штативом располагается блок управления источником рентгеновских лучей со средствами сигнализации и блокировками. При не-

обходимости на оперативном столике монтируется манипулятор или автоматический сменщик образцов. Регистратором эпиграмм в установке является экран с фотостимулированным люминофором многоцветного действия. Зарегистрированное на экране дифракционное изображение «проявляется» с помощью лазерного считывателя и передается в компьютер для последующей обработки.



Рис.3. Установка РДУ «КРОС-2» для определения кристаллографической ориентировки монокристаллов

Высоковольтный источник питания обеспечивает работу маломощной (около 150 Вт) острофокусной рентгеновской трубки БСВ-33W (или с другим анодом) в фиксированном режиме: высокое напряжение - 24 кВ и анодный ток - 4 мА. Размеры фокуса трубки - 100x100 мкм. Расстояние от объекта контроля до плоскости регистратора составляет 20, 40 или 100 мм. Размеры рентгеновского пятна на плоскости объекта изменяются посредством набора сменных вставок коллиматора в пределах от 0,1 до 2 мм. Предусмотрен специальный коллиматор для съемки рентгеновских топограмм методом Шульца с целью исследования субструктуры. При данных условиях съемки эпиграмм от монокристаллов жаропрочного никелевого сплава турбинных лопаток экспозиция составляет около 90 с. Общее время, необходимое для получения данных, предусмотренных контролем лопаток, находится в пределах 4-6 мин/образец (без использования сменщика образцов). Установка полностью радиационнобезопасна, что подтверждено экспертным заключением, которое освобождает установку от радиационного контроля и учета и от необходимости получения разрешения (лицензии) на работу с установкой.

Сравнительные испытания двух методов (дифрактометрического метода и метода Лауэ) были проведены совместно с ФГУП ММП «Салют» и ОАО «ММП имени В.В.Чернышева» на затравках и конусах, с ОАО «КЛИМОВ» - на бандажных полках лопаток из сплава ЖС26ВИ, с ЗМКБ «Прогресс» - непосредственно на лопатках.

Определение аксиальной ориентировки дифрактометрическим методом, рекомендованным ФГУП «ВИАМ» [8], выполняли на дифрактометре ДРОН. Съемку производили в излучении $K\alpha$ Cu обычно при напряжении на аноде рентгеновской трубки около 20 кВ и анодном токе - 10 мА. Регистровали дифракционные отражения: (004), (222) и (024) в диапазоне $0^\circ - 2\theta_{hkl}$. Точность определений - около 0,2 град.

Определение ориентировки методом Лауэ выполняли, как описано выше, на установке, представленной на рис. 3. Съемку производили в сплошном спектре рентгеновского излучения трубки с Mo анодом. Пучок излучения направляли перпендикулярно плоскости пластины регистратора через отверстие в ней. Расстояние от точки падения рентгеновского пучка на контролируемую поверхность изделия до плоскости детектора (экран с памятью) составляло $20 \pm 0,2$ мм. Размер облучаемой площади - круг диаметром 0,6 мм. Экспозиция при съемке составляла 180 с. Точность определений - около 1 град. Проведенные испытания показали, что сравниваемые методы дают вполне сопоставимые результаты. Среднее отклонение по всем типам испытывавшихся образцов и разных отражений не превышает 1° , что очень неплохо для подобных измерений, тем более что регламентированная точность определения угла аксиальной ориентировки составляет 1° .

В качестве примера определения разориентировки крупных блоков в лопатках приводим результаты, полученные в работе, проводимой в ММП им. В.В.Чернышева. В целях исследования влияния субграниц на прочностные свойства были отобраны лопатки, в которых металлографическое травление выявило несколько продольных границ. Для определения величины разориентировки смежных блоков снимали эпиграммы по обе стороны границы, которые использовали затем для выполнения расчетов. При этом разориентировка описывается

двумя способам: как угол $\Delta\alpha$ между кубическими направлениями в смежных блоках (по ТУ ФГУП «ВИАМ») и как длина β (модуль) и угловое положение вектора разориентировки (γ, δ) в осях лабораторной системы координат образца. Результаты показаны в табл. 1, где приведены одновременно для каждого из блоков лопатки их аксиальные и азимутальные углы. Хотелось бы обратить

внимание на очень высокую чувствительность металлографического травления к выявлению границ блоков (до долей градуса). Именно его и следует рекомендовать для решения этой задачи, а не дифрактометрический метод (с помощью кривых качания), который не может дать всеобъемлющей картины по лопатке.

Таблица 1. Результаты определения разориентировки блоков лопаток

№ п/п	№ лопатки	Тип	АксОр α_{001}	АзОр α_{100}	Угол разориентировки			Угол раз-ки β	Коорд. оси γ	Коорд. оси δ
					$\Delta\alpha_{001}$	$\Delta\alpha_{010}$	$\Delta\alpha_{100}$			
	к123-а	Кр	6.5	24.1						
	к123-б	Зр	6.5	23.5	0.5	0.8	0.7	0.8	28.2	154.5
	к582-а	Кр	4.3	13.5						
	к582-б	Зр	4.2	11.7	0.4	1.9	1.8	1.9	17.8	292.6
	к94-а	Кр	5	30.1						
	к94-б	Зр	3.8	31.2	1.8	1.7	1.6	2.1	58.8	100.8
	ж17-а	Кр	1.8	40.4						
	ж17-б	Зр	1.8	43.0	0.7	2.7	2.6	2.7	17.2	34.5
	и402-а	Кр	12.6	11.5						
	и402-б	Зр	12.3	12.1	1.4	2.4	2.7	2.8	43.5	323.6
	е972-а	Кр	10.9	30.3						
	е972-б	Зр	11.3	27.2	0.8	3.5	3.6	3.6	23.7	332.8
	к534-а	Кр	5.5	39.6						
	к534-б	Зр	4.2	38.8	4.8	4.1	2.8	4.9	75.9	197.2
	к532-а	Кр	9.8	15.9						
	к532-б	Зр	5.5	16.9	4.4	3.1	4.3	4.9	63.5	230
	к273-а	Кр	9.2	20						
	к273-б	Зр	12.1	17.5	3	5.2	6	6	34.9	37.8
	к85-а	Кр	7.9	9						
	к85-б	Зр	5.6	4.6	3.2	5.2	6	6	27.5	170.9
	и397-а	Кр	3.1	26						
	и397-б	Зр	4.8	23.9	5.8	3.7	5.5	6.3	71.1	354.6
	е275-а	Кр	6.6	10.7						
	е275-б	Зр	2.6	6.2	9.1	2.2	9.3	9.3	75.8	185.8
	е273-а	Кр	10	37.9						
	е273-б	Зр	8.8	32.4	8	9.9	5.9	9.9	61.8	297.8
	к606-а	Кр	4.6	18.7						
	к606-б	Зр	8.3	11.7	6.4	10.3	8.3	10.4	33.2	60.5
	е874-а	Кр	5.8	12.4						
	е874-б	Зр	5	21.6	8.7	12	12.8	13.8	42	53.9
	и291-а	Кр	6.2	34.5						
	и291-б	Зр	10.3	40.4	13.8	10.6	13.3	15.5	67.1	251.2
	к521-а	Кр	12.8	12.6						
	к521-б	Зр	12.3	7.2	15.7	15.3	7.3	16.3	63.6	110.6
	к525-а	Кр	15.4	22.7						
	к525-б	Зр	6.1	33.1	10.5	14.2	17.7	17.7	33.1	215.1

Примечание: Кр - основной кристалл, Зр – второй кристалл.

В числе дополнительных возможностей обработки эпиграммы имеется опция, которая позволяет рассчитать ориентационные факторы систем скольжения (факторы Шмида) и положение линий скольжения на исследуемой поверхности образца (рис. 4). Эта процедура, которая выполняется одним нажатием (Фактор Шмида), представляет интерес для исследователей, работающих с монокристалльными образцами для различного типа испытаний (ползучесть, длительная прочность, растяжение, термоусталость и др.).

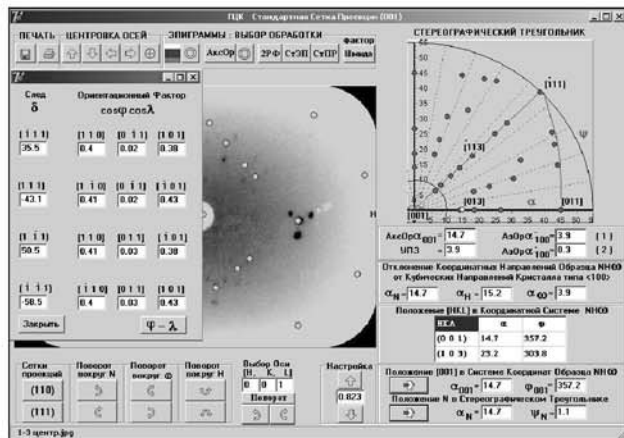


Рис. 4. Определение ориентационных факторов систем скольжения и положения линий скольжения

По имеющимся сведениям зарубежные фирмы используют в своей практике в качестве средства контроля метод Лауэ, для чего разработаны и выпускаются соответствующие рентгеновские установки, например Seifert XRD 3003 ORL или «Скорпио» [1]. Однако следует заметить, что известные зарубежные установки предназначены для исследования широкого круга объектов, в частности «образцов большого размера и неограниченного веса», как указано в информации по Seifert XRD 3003 ORL. Они не специализированы для контроля объектов, с которыми работают отечественные моторные заводы (затравки, конуса, стержни, лопатки, образцы). Дифрактометр Galaxy XRD 3003 (модификация Seifert XRD 3003 ORL) предназначен для контроля лопаток, но имеет технические характеристики столь же чрезмерные, как у дифрактометра типа ДРОН. У этих приборов много достоинств, например стационарный детектор с большим полем (200x200 мм). Однако применительно к контролю монокристалльных изделий моторного производства это достоинство не

принципиальное, поскольку для определения ориентировки указанных изделий достаточно найти координаты всего одного-двух рефлексов, которые к тому же согласно регламенту должны лежать в определенной зоне регистрируемой эпиграммы, и поэтому большой размер поля детектора дифрактометра Galaxy (200x200 мм) остается невостребованным.

Дифрактометр Galaxy XRD 3003, если взглянуть на его технические характеристики с позиции необходимости, не адекватен масштабам объекта контроля. Он имеет чрезмерно избыточные мощность, габариты, вес и стоимость для решения такой простой технической задачи, как контроль и определение ориентировки монокристаллов с ГЦК пространственной решеткой на изделиях ограниченных размеров и веса, таких как лопатки, затравки, конуса и стержни. В дифрактометре Galaxy XRD 3003 утрачено одно из главных достоинств метода Лауэ – возможность использовать «предельно простое экспериментальное устройство» [4].

Значительным достоинством предлагаемой установки РДУ «КРОС-2» для производства, в связи с ее небольшими габаритами, является возможность организовать рабочее место, удобное для персонала и способствующее повышению производительности контроля, т.к. оператор работает сидя около установки и ему не надо вставлять каждые 5-7 минут, чтобы произвести замену контролируемого образца, как это приходится делать и на дифрактометре ДРОН и на дифрактометре Galaxy XRD 3003.

Выводы

1. Предложенная методика, реализующая принцип Лауэ, и программное обеспечение обработки эпиграмм, комплектующее установку, позволяют получать всю необходимую информацию об ориентировке объектов в течение времени, которое вполне удовлетворяет требованиям выполнения контроля в ходе технологического процесса.

2. Метод Лауэ при современных средствах регистрации дифракционной картины и компьютерной обработке первоначальной информации наиболее предпочтителен для контроля, осуществляемого при производст-

ве лопаток газотурбинных двигателей и других монокристаллических изделий.

Библиографический список

1. Толорайя, В.Н. Усовершенствованный метод монокристаллического литья турбинных лопаток ГТД и ГТУ [Текст] / В.Н. Толорайя, Н.Г. Орехов, Е.Н. Каблов // МиТОМ.-2002. -№7. -С. 11-16.

2. Орлов, М.Р. Технологическое обеспечение ресурса рабочих лопаток первых ступеней турбины авиационных и наземных газотурбинных двигателей [Текст] / М.Р. Орлов // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - М., 2009.

3. Влияние ориентировки монокристаллов галлия на ползучесть при температуре 0,997 Тпл [Текст] / А.Ф. Сидохин, О.Г. Гигинейшвили, Ш.Ш. Джанджгава [и др.] // Изв. АН. Сер. Металлы. -1976.-№3. -С.140-145.

4. Тейлор, А. Рентгеновская металлография [Текст] / А. Тейлор - М.: Металлургия, 1965. - С.66-69.

5. Лисойван, В.И. К методике определения ориентации кристаллографической плоскости в монокристалле на дифрактометре [Текст] / В.И. Лисойван, Г.М. Заднепровский // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. - 1969. -№4. - С. 64-70.

6. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев - М.: МИСИС, 2002. - 52с.

7. Vipul, K. Gupta and Sean R Agnew // Application Crystall. -2009.- № 42.- P. 116-124.

8. Шалин, Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, В.Н. Толорайя – М.: Машиностроение, 1997. - 333 с.

THE LAUE BACK-REFLECTION METHOD FOR DETERMINATION OF ORIENTATION AND SUBGRAINS DISORIENTATION OF BLADE MANUFACTURE SINGLE-CRYSTAL PIECES

© 2011 E. A. Tikhomirova¹, E. F. Sidokhin²

¹JSC «KLIMOV», S.-Petersburg

²JSC «NTC Expertcentre», Moscow

The technological production process for single-crystal turbine blades requires control of the crystallographic orientation in both manufactured blades, as well as in many auxiliary pieces. The Laue back-reflection method is the simplest and quickest method for these tasks. It is also the quickest and simplest method in terms of technical equipment requirements. The paper presents an original computerised method for processing back-reflection Laue images (epigrams) and a specialised, small table-top unit to determine the orientation of single-crystal objects, as well as disorientation between grains in the object. Comparative results using the Laue method and diffractometry method for testing single-crystal items made from heat-resistant metal alloys from four engine plants are presented.

Single samples and blades, axial and azimuthal orientation, orientation factor, slide systems.

Информация об авторах

Тихомирова Елена Александровна, инженер 1 категории ОАО «Климов», г.Санкт-Петербург. Тел.: (812) 295-01-01, доб. 163, (812) 295-42-94, доб. 139. E-mail: uc@klimov.ru, tixomirova00@mail.ru. Область научных интересов: металлографические исследования.

Сидохин Евгений Федорович, ведущий специалист ЗАО «НТЦ Экспертцентр», г. Москва. Тел.: (495) 535-08-77, 534-94-64. E-mail: esidohin@yandex.ru. Область научных интересов: металловедение и физика металлов.

Tikhomirova Elena Aleksandrovna, Engineer of 1 rang of Klimov JSC, Saint-Petersburg. Phone: (812) 295-01-01, ext. 163, (812) 295-42-94, ext. 139. E-mail: uc@klimov.ru, tixomirova00@mail.ru. Area of research: metallografical research.

Sidokhin Evgeniy Fedorovich, engineer of NTC Expertcentre JSC, Moscow. Phone: (495) 535-08-77, 534-94-64. E-mail: esidohin@yandex.ru. Area of research: material science and physics of metal.