

О контроле ориентировки монокристалльных изделий производства турбинных лопаток.

Ф.А. Сидохин²⁾, Н.Н. Потрахов¹⁾, Е.Ф. Сидохин¹⁾,

¹⁾ ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Санкт-Петербург

²⁾ CONCORDIA UNIVERSITY, Montreal, Quebec, Canada

Технологический процесс производства монокристаллических турбинных лопаток связан с необходимостью постоянно контролировать кристаллографическую ориентировку многих вспомогательных изделий и самих лопаток. 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 малогабаритная настольная установка для контроля ориентировки монокристаллических объектов. Представлены результаты сравнительных испытаний метода Лауэ и дифрактометрического метода, проведенных на монокристалльных изделиях из жаропрочных никелевых сплавов четырех моторных заводов.

В целях повышения эксплуатационных характеристик турбинные лопатки изготавливают монокристалльными, применяя для этого метод Бриджмена или метод направленной кристаллизации [1]. При изготовлении лопаток методом направленной кристаллизации в технологическом процессе необходимо контролировать кристаллографическую ориентировку ряда вспомогательных изделий (затравок и конусов, которые являются образцами свидетелями лопаток) и определять ориентировку стержней, используемых для изготовления затравок с помощью ориентированной резки, а также готовых лопаток. При изготовлении лопаток методом Бриджмена определяют кристаллографическую ориентировку оси лопатки, имеющую произвольное положение в пространстве, в частности, для расчета упругих модулей. Определение ориентировки монокристалльных образцов широко применяют также при проведении разнообразных исследований зависимости от ориентировки тех или иных механических характеристик применяемых и разрабатываемых жаропрочных сплавов (усталостной прочности, предела выносливости и др.) [2], поскольку показано, что влияние ориентировки на механические свойства сохраняется вплоть до «предплавильных» температур [3]

Определение кристаллографической ориентировки монокристалльных изделий обычно производят методом Лауэ [4] или дифрактометрическим методом [5], но иногда и косвенными методами. Метод Лауэ, использующий сплошной спектр рентгеновского излучения, прост в исполнении и «требует предельно простое экспериментальное устройство» для реализации [4]: необходимо иметь простой источник рентгеновских лучей, регистратор дифракционного изображения и держатель образца, находящиеся в неподвижном положении во время съемки. Дифрактометрический метод использует характеристическую составляющую рентгеновского излучения и может обеспечить очень высокую точность определений. Однако к средствам его исполнения предъявляются существенно более высокие требования. К тому же обычно приходится использовать универсальный дифрактометр общего назначения, т.к. специализированных дифрактометров для решения данной конкретной задачи не создано. Применительно к массовому контролю ориентировки, например, в производстве турбинных лопаток, такое использование сложного по своей конструкции прибора, как дифрактометр, к тому же сложного в эксплуатации, совершенно не рационально, т.к., с одной стороны, почти все его замечательные свойства оказываются излишними, а, с другой, применять его одновременно для решения других задач не представляется возможным в силу высокой загруженности. При этом следует заметить, что технические средства необходимые для реализации дифрактометрического метода существенно выше по стоимости.

В настоящее время в производственной практике моторных заводов повсеместно применяют дифрактометрический метод, поскольку на момент введения данного контроля метод Лауэ был не достаточно 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. Однако, метод Лауэ существенно производительнее, когда необходимо получить полную информацию обо всех параметрах контроля, т.к. в нем для определения всех параметров используется всего один снимок, а в дифрактометрическом методе необходимо регистрировать и обрабатывать, по крайней мере, не менее двух отражений.

В связи с изложенным представляется целесообразным переход моторных предприятий к применению метода Лауэ и соответствующих приборов для определения ориентировки монокристалльных изделий производства турбинных лопаток.

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

В традиционном способе определения ориентировки монокристаллов методом Лауэ [6] **после того как снята эпиграмма рефлексy (пятна) с эпиграммы копируют на кальку, строят гномостереографические проекции нормалей тех плоскостей, которые дали отражения на эпиграмме, выбирают среди них нормаль, через которую проходит наибольшее число зон и перемещают ее с помощью сетки Вульфа в центр проекций (при этом перемещают все остальные точки сетки нормалей и центр проекций). Затем преобразованную сетку проекций нормалей помещают последовательно на разные стандартные сетки стереографических проекций (сингонии исследуемого кристалла), каждый раз поворачивая сетку вокруг центра стандартной и добиваясь совмещения точек обеих сеток. 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 необходимость находить каждое пятно на эпиграмме и устанавливать его координаты сопряжена с необходимостью распознавать пятна, что оказывается затруднительным, когда пятна имеют сложное, бесформенное строение, обусловленное блочной структурой монокристаллов, которая формируется в процессе их роста и вследствие локальной пластической деформации. Это особенно характерно для металлов и сплавов, в том числе монокристаллов никелевого жаропрочного сплава. [7].

Типичные, но не самые «худшие» эпиграммы, с которыми приходится встречаться при определении ориентировки монокристаллов металлов и сплавов, показаны на рис.1, где приведены эпиграммы монокристаллов Nb, и жаропрочного никелевого сплава.

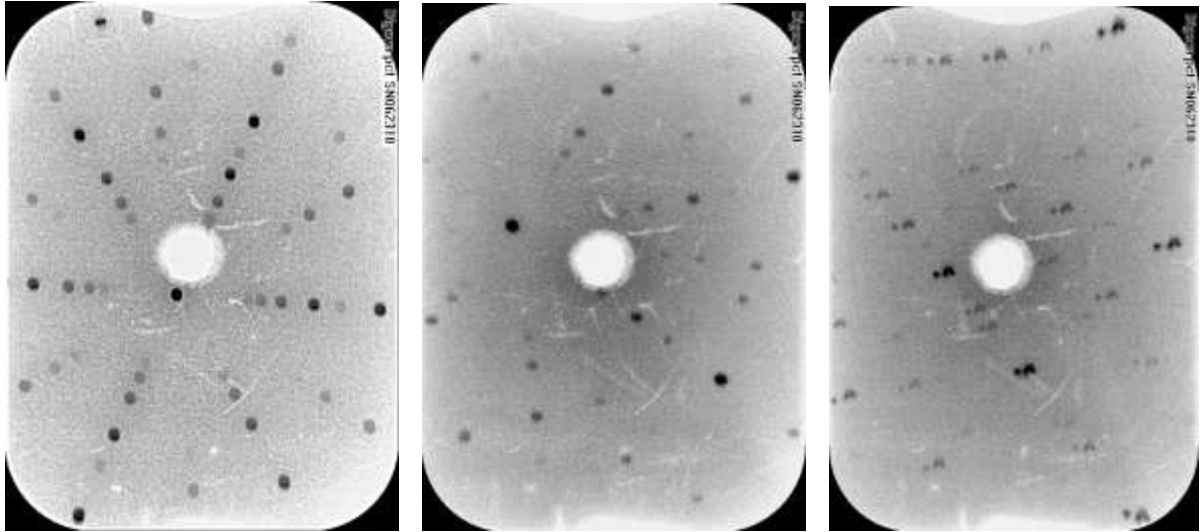


Рис. 1. Примеры эпиграмм монокристаллов Nb (а), и жаропрочных никелевых литейных сплавов ЖС-26 (б) и ЖС-32 (в).

В предлагаемой компьютерной методике обработки снятой эпиграммы для определения ориентировки монокристалла, в отличие от названной выше, **сравнение производят экспериментальной эпиграммы с набором расчетных эпиграмм** (следует иметь в виду, что все последующие действия выполняются на экране монитора). Предварительно, используя набор стандартных стереографических проекций сингонии исследуемого кристалла, следует построить набор расчетных эпиграмм для единичного расстояния L образец – регистратор эпиграммы (например, двумерный полупроводниковый детектор, пленка или экран с фотостимулированным люминофором). Затем расчетные эпиграммы корректируют в соответствии с реальным расстоянием L , при котором выполняют 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, как бы плавно поворачивая в ручную соответствующий ей кристалл вокруг трех взаимно перпендикулярных осей N , H , ω (N -нормаль к плоскости образца, вдоль которой направляют рентгеновский пучок), 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, связанных с реальным кристаллом, в стандартной стереографической проекции.** Одновременно производится определение углов между важными направлениями системы координат образца с любыми кристаллографическими направлениями, интересующими контроль, например, определение 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 монокристалла жаропрочного никелевого сплава, выращенного в турбинной лопатке методом Бриджмена, рис.2.

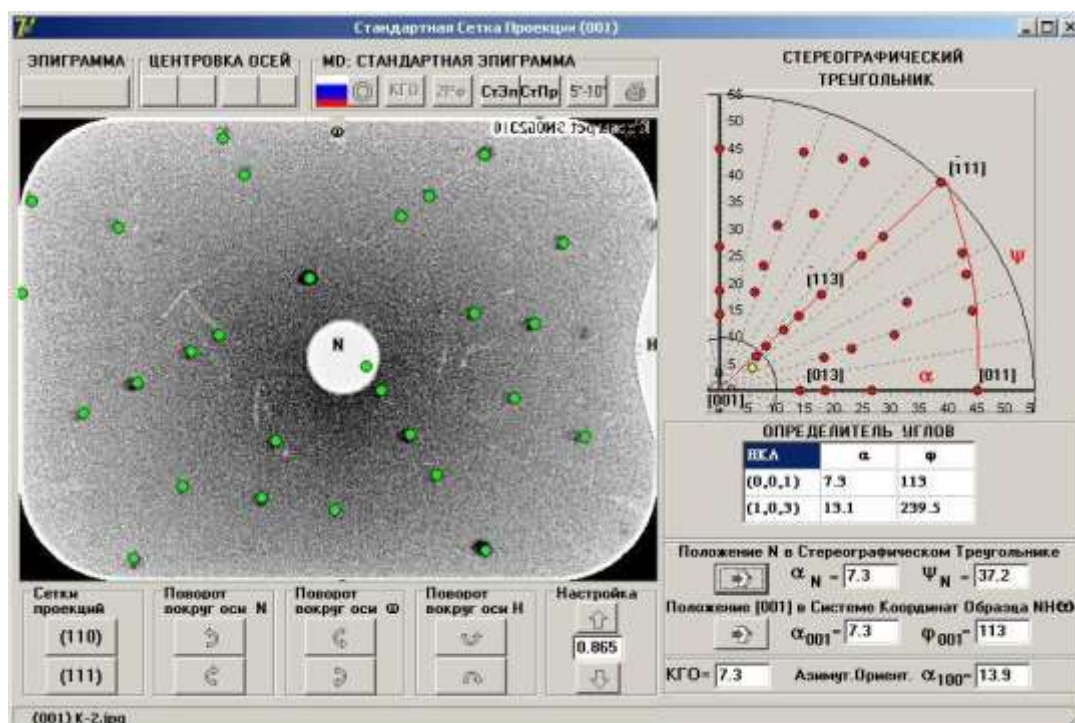


Рис.2. Пример обработки эпиграммы монокристалла из сплава ЖС-32.

Выше описанная процедура определения ориентировки с помощью стандартных эпиграмм обычно используется при работе с объектами, имеющими произвольную пространственную ориентировку, как, например, монокристалльные лопатки, изготовленные методом Бриджмена. Когда же контролируемые изделия имеют ориентировку близкую к какому-нибудь простому кристаллографическому направлению, как лопатки, изготовленные направленной кристаллизацией, на эпиграмме присутствуют легко распознаваемые рефлексы от простых плоскостей типа (001), (110) или (111). В этом случае процедура становится чрезвычайно простой: достаточно указать курсором на один из этих рефлексов и программа сразу же выдает угол между осью лопатки и этой плоскостью (его принято обозначать КГО). Если же курсором указать на два известных рефлекса, то будет автоматически произведен расчет всех параметров контроля лопатки: КГО, азимутальная ориентировка, 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 выше описанным методом предлагается достаточно 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.



Рис.3. Установка ПРДУ «КРОС»

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 эпилграмм, закрепленные на моноблоке. Рядом со штативом располагается блок управления источником рентгеновских лучей, средствами сигнализации и блокировками. При необходимости на оперативном столике монтируется манипулятор или автоматический сменщик образцов. Регистратором эпилграмм в установке является экран с фотостимулированным люминофором многократного действия. Зарегистрированное на экране дифракционное изображение «проявляется» с помощью лазерного считывателя и передается в компьютер для последующей обработки.

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 эпилграмм от монокристаллов жаропрочного никелевого сплава турбинных лопаток экспозиция составляет около 90 сек. Общее время, необходимое для получения данных предусмотренных контролем лопаток, находится в пределах 4-6 мин/образец (без использования сменщика образцов). Установка полностью радиационно-безопасна, что

подтверждается Санитарно-эпидемиологическим заключением, которое освобождает 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 ММПП «Салют» и ММП им.В.В.Чернышева на затравках и конусах, с ОАО «КЛИМОВ» на бандажных полках лопаток из сплава ЖС-26ВИ и совместно с ЗМКБ «Прогресс» непосредственно на лопатках. Ниже приведены результаты, полученные на лопатках ОАО «КЛИМОВ», поскольку они более показательны, так как эти лопатки выращиваются беззатравочным методом Бриджмена и имеют произвольную ориентировку. Результаты, полученные на затравках, конусах и лопатках ничем не отличаются.

Сравнительные испытания проводили на образцах, вырезанных из бандажной полки 16-ти лопаток, которые протравливали для удаления наклепанного слоя.

Определение ориентировки (КГО) дифрактометрическим методом, рекомендованным ФГУП «ВИАМ» [8], выполняли на дифрактометре ДРОН-3М. Съемку производили в характеристическом излучении $K\alpha_{Cu}$. Режимы съемки: напряжение на аноде рентгеновской трубки – 20 кВ, анодный ток – 10 мА. Регистрировали дифракционные отражения: (004) с углом дифракции $\theta_{004} = 59,5^\circ$; (222) – $\theta_{222} = 48,0^\circ$ и (024) – $\theta_{024} = 74,5^\circ$. Диапазон регистрации в каждом случае составлял от 0° до $2\theta_{hkl}$ (119, 96 и 149° соответственно). Точность определений - около $0,2$ град.

Определение ориентировки методом Лауэ выполняли, как описано выше, на установке ПРДУ «КРОС». Съемку производили в сплошном спектре рентгеновского излучения трубки с Мо анодом при фиксированном режиме работы: 24 кВ и 4мА. Пучок излучения направляли перпендикулярно плоскости среза (т.е. вдоль оси лопатки). Расстояние от плоскости среза до регистрирующего детектора (экран с памятью) составляло $20 \pm 0,2$ мм. Размер облучаемой площади – круг диаметром 0,6 мм. Экспозиция при съемке составляла 180 сек. После расчета КГО (α_{001} , α_{111} , α_{012}) и положения оси лопатки в стереографическом треугольнике, выполняемого программным комплексом ПРДУ «КРОС», определяли КГО для всех возможных плоскостей {001}, {111} и {102}. Точность определений - около 1 град.

В качестве иллюстрации в таблице приведены результаты измерений для 3-х образцов. Жирной чертой в таблице подчеркнуты те отражения, которые могут быть зарегистрированы дифрактометрически на образце с данной конкретной ориентировкой.

Результаты определения кристаллографической ориентировки оси лопаток (КГО) дифрактометрическим методом и методом Лауэ.

№ лопатки	[004]			[111]			[024]		
	Дифрактометр. метод	Метод Лауэ		Дифрактометр. метод	Метод Лауэ		Дифрактометр. метод	Метод Лауэ	
8ю20-11	9,8	10	[001]	44,8	46	[111]	18,1	18	[012]
		80	[010]		50	[111]	23,5	26	[102]
		92	[100]		60	[111]	32,4	33	[102]
					64	[111]	35,6	37	[012]
							54,5	53	[021]
							59,0	61	[201]
							68,2	66	[201]
8ю20-24	47,6	46	[001]	9	10	[111]	27,7		
	53,8	57	[010]		64	[111]	30,0	29	[012]
		62	[100]		68	[111]	34,2	33	[102]
					81	[111]	36,4	38	[021]
							43,5	42	[201]
							45,2	47	[120]
							48,3	49	[210]
							66,2	65	[102]
								66	[012]
							70,1	74	[120]
								80	[210]
								82	[021]
								86	[201]
8ю20-51	43,3	46	[001]	22,3	22	[111]	18,5	22	[021]
	48,5	47	[010]	24,5			23,0	24	[012]
		77	[100]		48	[111]	43,1	45	[102]
					81	[111]	47,7	46	[120]
					83	[111]	54,8	58	[201]
							57,8	58	[210]
							58,6	59	[102]
							61,2	59	[120]
							62,8		
							68,9	72	[012]
								73	[021]
								94	[210]
							95	[201]	

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 не плохо для подобных измерений, тем более, что регламентированная точность определения КГО составляет 1°.

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 иметь ввиду, 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. Когда же шаги по специализации предпринимаются, то появляется «Дифрактометр Galaxy XRD 3003», технические характеристики которого для решения задачи контроля ориентировки турбинных лопаток столь же чрезмерны, как у дифрактометра типа ДРОН. Считаем целесообразным провести сравнение технических характеристик дифрактометра Galaxy XRD 3003 и предлагаемой нами установки ПРДУ «КРОС».

**Сравнение технических характеристик
Дифрактометра Galaxy XRD 3003* и Установки ПРДУ «КРОС».**

(*Сведения взяты из Информационного листка ООО «АСК-Рентген»)

N пп	Дифрактометр Galaxy XRD 3003	Комментарии	Установка ПРДУ «КРОС»
1	Предназначен для контроля разориентации монокристаллических блоков в турбинных лопатках методом Лауэ	Разориентация методом Лауэ не определяется. Она рассчитывается по после определения ориентировки 2-х зерен	Предназначена для определения ориентировки монокристалльных изделий, в том числе турбинных лопаток
2	Контролирует образцы с криволинейной поверхностью из материалов с кубической ячейкой по направлениям [100], [110], [111].		Форма поверхности образцов – любая. Ориентировка объектов – произвольная. Любой тип пространственной решетки.
3	Предварительная подготовка поверхности не требуется, но обработка (шлифовка, пескоструйка, травление) повышает точность анализа	Любая обработка поверхности никак не влияет на точность, но качество эпиграмм и достоверность рез-тов ухудшает. Кроме травления.	Может давать информацию об ориентировке кристалла под деформированным слоем и под покрытием при разумных толщинах слоев.
4	Имеются средства визуализации и наведения места съемки под пучок и контроля расстояния до образца.		Имеются средства наведения и контроля расстояний. При необходимости прибор комплектуется микроскопом (металлографическим).
5	Угол падающего и отраженного пучков с поверхностью образца фиксирован и равен 60°	Угол отраженного пучка с поверхностью переменный, зависит от направления нормали отражения.	Направляемый на образец пучок перпендикулярен плоскости регистратора эпиграммы.
6	Диаметр пучка задается сменными коллиматорами диам. 0.5, 1, 2 мм		Диаметр пучка задается сменными коллиматорами диам. от 0.1 до 2 мм.
7	Продолжительность анализа 30 –120 сек.		Экспозиция при съемке зависит от материала объекта. Для жаропрочных сплавов лопаток – около 90 сек.

8	Точность определения разориентации кристаллографических осей 0.5°.	См. выше	Имеется возможность съемки дифракционных топограмм методом Шульца.
9	Допустимые отклонения поверхности образца от горизонтали - 0.5°.		Отклонение поверхности от горизонтали не имеет значения.
10	Макс. размеры образцов 200x20x200 мм. Имеется трехкоординатная подвижка.		Размеры образцов не ограничены. Имеется манипулятор.
11	Источник рентгеновских лучей -рентгеновская трубка с W анодом с линейным фокусом.	Для съемки эпиграмм методом Лауэ следует использовать точечную проекцию фокуса.	Источник рентгеновских лучей - острофокусная рентгеновская трубка БСВ-33 W (серийное производство).
12	Режимы работы источника: Ua= 2-60 кВ, Ia=2-80 мА, Мощность - 3,5 кВт		Режимы работы источника: Ua= 24 кВ, Ia=4 мА, Мощность - 100Вт
13	Применен высокостабилизированный источник питания рентгеновской трубки	Зачем такой источник при съемке эпиграмм остается загадкой.	Применен очень простой по своим параметрам источник питания.
14	Прибор помещен в «лучезащитный» шкаф.		Установка полностью радиационно безопасна, что подтверждено Сан.-эпид. заключением.
15	Детектор – полупроводниковый двумерный плоско-панельный 200x200 мм.	Для контроля монокристалльных лопаток имеет излишние размеры.*	Детектор – экран с памятью. Размеры: 31x41 мм, 57x76 мм или произвольный. Лазерное считывание изображения.
16	Компьютерная обработка		Компьютерная обработка.
17	Габариты (предположит.) – около 1 куб. м.		Габариты 30x40x35 см.
18	Вес (предположительно) – около 200 кг		Вес – 10 кг (без компьютера и считывателя)
19	Стоимость – около 1,2 млн. долл. США (по данным ООО «АСК-Рентген»)		Стоимость – 3 млн.руб.

* Стационарный детектор с большим полем – это безусловное преимущество дифрактометра Galaxy. Однако применительно к контролю монокристалльных изделий моторного производства его вряд ли можно считать таковым. Не обсуждая вопрос о его стоимости, следует заметить, что для определения ориентировки указанных изделий достаточно найти координаты всего двух рефлексов, которые к тому же при контроле изделий, изготавливаемых наиболее распространенным в практике заводов методом направленной кристаллизации, лежат все время в одном и том же поле регистрируемой эпиграммы, и поэтому большой размер поля детектора дифрактометра Galaxy (200x200 мм) излишен.

Дифрактометр Galaxy XRD 3003, как можно видеть из сравнения, имеет технические характеристики, которые не адекватны масштабам объекта контроля и решаемой задаче применительно к монокристалльным изделиям производства турбинных лопаток.

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].

Выводы.

1. Результаты сравнительных испытаний двух известных методов определения ориентировки монокристаллических изделий и сопоставительный анализ технических характеристик дифрактометров типа ДРОН, Seifert XRD 3003 ORL, Galaxy XRD 3003 и установки ПРДУ «КРОС» показывают, что свойства предлагаемой установки оптимальны для решения задачи определения ориентировки изделий из монокристаллов металлов и сплавов, если не требуется слишком высокой точности измерений.

2. Установка ПРДУ «КРОС» имеет существенно меньшие массо-габаритные характеристики, не высокую мощность и напряжение источника рентгеновских лучей и, как следствие, значительно меньшую стоимость. Этому же способствует использование экрана с фотостимулированным люминофором многократного действия в качестве средства регистрации эпитграмм.

3. Программа управления и обработки эпитграмм, комплектующая установку, позволяет получать всю необходимую информацию об ориентировке объектов в течение времени, вполне удовлетворяющего требованиям выполнения контроля в ходе технологического процесса.

4. Все изложенное указывает на то, что метод Лауэ наиболее предпочтителен для контроля, осуществляемого при производстве лопаток газотурбинных двигателей и многих других монокристаллических изделий.

Литература.

1. В.Н.Толораия, Н.Г.Орехов, Е.Н.Каблов «Усовершенствованный метод монокристаллического литья турбинных лопаток ГТД и ГТУ» МИИТОМ, 2002, №7, 11-16.
2. М.Р.Орлов «Технологическое обеспечение ресурса рабочих лопаток первых ступеней турбины авиационных и наземных газотурбинных двигателей», Автореферат дис... докт. техн.наук, М., 2009 г.
3. А.Ф.Сидохин, О.Г.Гигинейшвили, Ш.Ш.Джанджгава, Е.Ф.Сидохин «Влияние ориентировки монокристаллов галлия на ползучесть при температуре 0,997 Тпл», Изв.АН сер. Металлы, 1976, №3, 140-145.
4. А.Тейлор «Рентгеновская металлография», М., изд. Металлургия, 1965, 66-69.
5. В.И.Лисойван, Г.М.Заднепровский, «К методике определения ориентации кристаллографической плоскости в монокристалле на дифрактометре», Аппаратура и методы рентгеновского анализа, Л., 1969, в.IV, 64-70.
6. С.С.Горелик, Ю.А.Скаков, Л.Н.Расторгуев. «Рентгенографический и электронно-оптический анализ», М., изд.МИСИС, 2002, 52.
7. Vipul K.Gupta and Sean R Agnew J.Appl.Crystall. 2009, 42, 116-124.
8. Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, В.Н. Толораия. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М. Машиностроение, 1997, 333 с.