
Научная статья

УДК 539.26

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-21-32

РАЗВИТИЕ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА В ВИАМ К 130-летию со дня рождения Е.Ф. Бахметева, первого руководителя рентгеновской лаборатории института

Н.А. Кузьмина¹

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

***Аннотация.** Представлена история развития рентгеноструктурного анализа в ВИАМ в разные периоды существования института. Рассказывается о деятельности первого руководителя рентгеновской лаборатории – Евгения Федоровича Бахметева, выдающегося специалиста в области рентгеноструктурного исследования металлов и сплавов, основателя и разработчика теории рекристаллизации металла. Прослеживается развитие рентгеновской исследовательской аппаратуры в историческом контексте задач по разработке новых материалов и методик контроля структуры сплавов.*

***Ключевые слова:** рентгеноструктурный анализ, физика металлов, биография, архивные документы, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов*

***Для цитирования:** Кузьмина Н.А. Развитие рентгеноструктурного анализа в ВИАМ. К 130-летию со дня рождения Е.Ф. Бахметева, первого руководителя рентгеновской лаборатории института // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-21-32.*

Scientific article

DEVELOPMENT OF X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS IN VIAM On the 130th anniversary of the birth of E.F. Bakhmetev, the first head of the x-ray laboratory of the institute

N.A. Kuzmina¹

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

***Abstract.** Presents the history of the development of x-ray diffraction analysis in VIAM in different periods of the institute's existence. The article describes the activities of the first head of the x-ray Laboratory, Evgeny Fedorovich Bakhmetev, an outstanding specialist in the field of x-ray structural research of metals and alloys, the founder and developer of the theory of metal recrystallization. The development of x-ray research equipment is traced in the historical context of the tasks of developing new materials and methods for controlling the structure of alloys.*

***Keywords:** x-ray diffraction analysis, metal physics, biography, archival documents, All-Russian Research Institute of Aviation Materials*

***For citation:** Kuzmina N.A. Development of x-ray diffraction analysis in VIAM. On the 130th anniversary of the birth of E.F. Bakhmetev, the first head of the x-ray laboratory of the institute. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-21-32.*

Метод структурного рентгеноанализа несравнимо богаче просвечивания как по широте охватываемых явлений, так и по своим результатам.
Е.Ф. Бахметев

История рентгеноструктурных исследований во Всесоюзном (Всероссийском) институте авиационных материалов (ВИАМ; в настоящее время – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) берет свое начало в 1904 г. в Московском высшем техническом училище (МВТУ), когда выпускник 1897 г. Анатолий Михайлович Бочвар организовал новую лабораторию по исследованию металлов. Особое внимание в лаборатории уделялось изучению методов и средств определения механических свойств металлов и сплавов. Для полного завершения круга задач, решаемых металловедением, необходимо было исследование, объясняющее поведение материалов под нагрузкой – учение о структуре. Для этого в 1906–1909 гг. он создал одну из первых в России лабораторий металлографии, где систематически проводились научные работы и развивалось учение о структуре и свойствах металлов и сплавов. Продолжателем этих работ стал его талантливый ученик Иван Иванович Сидорин.

В 1924 г. дирекция МВТУ назначила И.И. Сидорина заведующим механической лабораторией. Он значительно расширил ее, дополнив лабораторией для термообработки металлов и кабинетом металлографических исследований. В 1925 г. Иван Иванович организовал в МВТУ два совершенно новых курса – по металловедению и по автомобильным и авиационным материалам.

К моменту образования ВИАМ, в 1930-е гг., уже было опубликовано значительное количество отечественных и зарубежных работ, посвященных вопросам применения рентгеновских лучей для решения задач, связанных со строением, составом и физическими свойствами материалов. Однако долгое время эти публикации носили чисто исследовательский характер и были малопригодны для прикладного использования – наблюдалась их оторванность от производства.

Довоенный период – 1932–1941 гг. В 1932 г. И.И. Сидорин с группой сотрудников перешел работать из Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ) в только что созданный Всесоюзный институт авиационных материалов заместителем начальника по научно-технической работе. Вместе с ним его коллеги по научной работе – высококлассные специалисты – успешно сочетали педагогическую и исследовательскую деятельность. Рентгеноструктурные исследования в ВИАМ с самого начала существования института носили прикладной характер. Так, в частности, первыми объектами исследования в рентгеновской лаборатории были штамповки из легких алюминиевых сплавов: головка и шток шатуна мотора, лопасти пропеллера. Ставилась задача определения порога рекристаллизации при данных условиях деформирования. Наряду с металлографией применяли рентгеноструктурный метод Лауэ – съемку в «белом» излучении. По степени «резкости» отражений текстуры разработали методику определения начала рекристаллизации сплава (рис. 1). Момент появления новых кристаллитов, отражаемых на рентгенограмме, означал для технолога переход от горячего прессования к холодному при ковке-штамповке авиационных деталей. В продолжение этих исследований по характеру текстуры были найдены кристаллографические оси в различных участках деталей. После многочисленных испытаний на разрывной машине, измерений твердости были установлены связи свойств с рентгеноструктурными данными. При штамповке деталей сравнивали разные по составу сплавы (лауталь и дюралюмин) – их способность к рекристаллизации. При этом рентгеноанализ оказался более структурно-чувствительным методом, чем металлография.

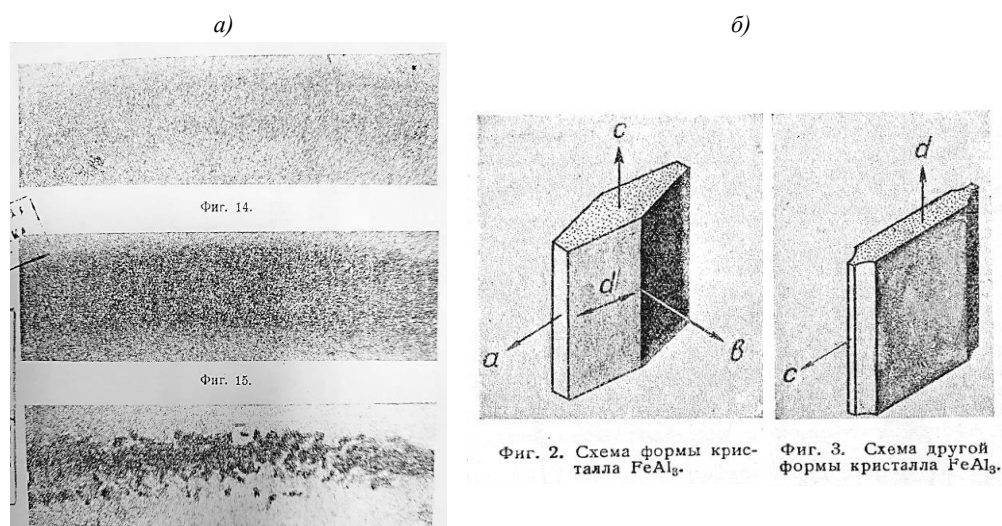


Рис. 1. Характер линий дебаеграмм (а) и монокристаллы соединения FeAl_3 , полученные Е.Ф. Бахметевым путем медленного остывания расплава (б)

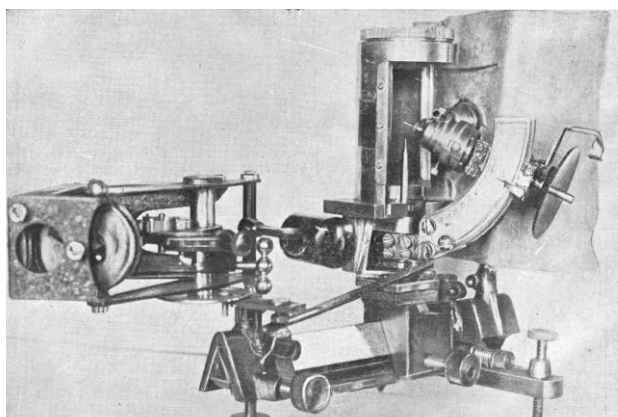
Метод рентгеноструктурного анализа позволил получить представление о процессах, протекающих при штамповке и дальнейшей термической обработке, – по распределению областей рекристаллизации в объеме детали. Последовавшая затем проработка методики рентгеноструктурного исследования явления рекристаллизации была направлена на определение напряжений в материале, относительной величины кристаллитов, изменений фазового состояния – например, выделение химического соединения CuAl_2 из твердого раствора. Большой объем экспериментальных работ, выполненных в ВИАМ, позволил увидеть сложную корреляцию скорости деформирования, температуры, рекристаллизации и фазовых изменений в сплаве. Разрешены были и теоретические вопросы определения кристаллографических осей в резко выраженных несимметричных структурах; исследованы взаимосвязь скорости деформирования, температуры и рекристаллизации, а также участие изменения фазового состава сплава в этих явлениях.

С начала образования ВИАМ рентгеновской лабораторией руководил Евгений Федорович Бахметев. Обладая организаторским талантом, глубокими знаниями в области исследования металлов и сплавов, он развернул прикладные исследования авиационных материалов в лучших традициях фундаментальных научных школ России. Хорошее знание иностранных языков помогало освоить научный потенциал зарубежных исследователей. К решению каждой прикладной задачи Е.Ф. Бахметев подходил с присущей ему основательностью: от глубокой, часто критической, проработки имеющейся отечественной и иностранной литературы по фундаментальным исследованиям, через грамотно поставленный научный эксперимент, к внедрению достижений непосредственно в производство, на заводы. Под его руководством проводилось активное исследование металлов и сплавов методами рентгеновской дифрактометрии, сравнительно недавно (в 1912 г.) открытыми немецким физиком М. Лауэ. В своей работе Е.Ф. Бахметев показал, насколько «метод структурного анализа несравнимо богаче просвечивания как по широте охватываемых явлений, так и по своим результатам».

За недолгий период работы в области авиационных материалов Евгений Федорович опубликовал более 30 статей, посвященных исследованию легких алюминиевых сплавов методами рентгеноструктурного анализа. Особо следует

отметить сборник «Рекристаллизация металла» (1932 г.), где была опубликована статья «К теории рекристаллизации» (авторы работы под руководством Е.Ф. Бахметева – А.А. Бочвар, Г.С. Жданов и Я.С. Уманский), ставшая исторически первой публикацией по данному направлению исследований. В техническом отчете ВИАМ за 1932 г. имеются сведения о работе рентгеновской лаборатории и ее научной деятельности по следующим темам: «Термическая обработка дюралюмина», «Экспериментальная проверка расчетов рентгеноструктур холодного проката», «Рентгеноисследование явления рекристаллизации в процессе горячего деформирования»; подтемам: «Рентгенографическое исследование влияния скорости деформирования на структуру сплава, прессованного при высоких температурах», «Рентгеноанализ структуры металла, деформированного ударом при высоких температурах», «Структура прессованного дюралюмина после термической обработки», «Исследование теплового эффекта в дюралюмине при деформировании его ударом», «Рентгеноанализ рекристаллизации сложного сплава», «Примеры рентгеноанализа структуры алюминиевых сплавов после заводской «горячей» обработки», «Механизм структурных изменений металла, зависящих от температуры, скорости и степени деформирования», «Применение результатов рентгенографического исследования структур прессованного дюралюмина в практике технологического процесса». Разработанная в ВИАМ теория рекристаллизации сплавов впоследствии стала основой для создания жаропрочных сплавов.

Для выполнения исследований Е.Ф. Бахметев создал оригинальную камеру вращения для получения дифрактограмм от монокристаллов (рис. 2).



Фиг. 13. Камера для съемок рентгенограмм колебани с монокристаллов, позволяющая кристалл, юстированный по какой-либо одной оси на тонометрической головке, снимать во время колебани вокруг другой оси.

Рис. 2. Камера вращения, сконструированная Е.Ф. Бахметевым, для получения дифрактограмм от монокристаллов

В 1933 г. вышел сборник работ рентгенографической лаборатории, посвященный изучению явлений, имеющих место при деформировании легких алюминиевых сплавов при высоких температурах, методами рентгеноструктурного анализа. Всесторонне исследовались остаточные искажения атомной решетки прессованного дюралюмина, тепловые эффекты и структурные искажения при деформации прессованием и ударом. Результаты исследований позволили чрезвычайно расширить применение структурного рентгеноанализа в отношении явлений технологических процессов штамповки, более глубоко понять их, а следовательно, способствовали более оптимальному выбору технологических приемов для повышения качества штамповок [1–6].

Рентгенографические исследования обязательно вводились в практику заводских лабораторий и составляли часть общего комплексного исследования конкретной производственной задачи, разрешаемой одновременно методами рентгенографии, металлографии, а также с помощью механических и физических испытаний. Сотрудники рентгеновской лаборатории ВИАМ внедрили методики рентгеноструктурного исследования в производство и организовали рентгенографические лаборатории на многих заводах. Работа проводилась комплексно: физик-рентгенолог глубоко знакомился с технологией производства и другими методами исследования, а инженер-технолог повышал свою квалификацию путем основательного изучения физики и рентгенографии, что в результате помогло решить проблему «общего языка» между физиками и инженерами, разработать методики производственного контроля, а также сократить разрыв между фундаментальными и прикладными исследованиями.

Послевоенный период – до 1991 г. Развитие рентгеноструктурного анализа всегда было неразрывно связано с решением стоящих перед институтом задач, направленных на создание новых материалов и технологий их получения. Так, в послевоенные годы в ВИАМ академик АН СССР Сергей Тимофеевич Кишкин предложил метод литья взамен штамповки лопаток двигателя. Началась разработка литейных жаропрочных сплавов и технологий получения литых турбинных лопаток с поликристаллической структурой. Структурные исследования в этой области были направлены на получение регламентированной однородной, равноосной, мелкозернистой макроструктуры отливки. Для контроля такой макро- и микроструктуры в ВИАМ и на производстве применяли в основном методы металлографии.

С начала 1970-х гг. в институте начинают разрабатывать жаропрочные никелевые сплавы и технологию для направленного и монокристаллического литья под руководством профессора Дмитрия Андреевича Петрова и члена-корреспондента АН СССР Алексея Тихоновича Туманова. При разработке технологии монокристаллического литья из жаропрочных никелевых сплавов изучали анизотропию физико-механических свойств монокристалла. Ученые предполагали, что взаимодействие дислокаций в пересекающихся системах скольжения имеет большое значение в деформационном упрочнении образцов различных ориентировок. Необходимо было задать рациональную ориентацию кристаллической структуры лопатки относительно направлений главных действующих напряжений для достижения максимального ресурса работы изделия. Для исследования структурно-чувствительных характеристик прочности монокристаллов, наряду с традиционными методами контроля – визуальным и металлографическим, привлекаются рентгеноструктурные методы [7–9].

Одновременно с развитием материалов и технологий совершенствовалось оборудование для испытаний материалов, что позволило достичь качественно нового уровня при проведении исследований. Самыми распространенными стали рентгеновские дифрактометры общего назначения ДРОН – с горизонтальным гониометром и сцинтилляционным детектором. Рентгеноструктурные исследования проводили на установках ДРОН-2 или ДРОН-3 методом качания для основных кристаллографических направлений. Регистрацию дифракционных максимумов осуществляли с помощью самопишущего потенциометра на бумажной ленте (рис. 3). Для рентгенографического исследования осевой и азимутальной текстур применяли методику полюсных фигур, по которым определяли степень упорядоченности расположения дендритов как в осевом, так и в азимутальном направлениях. Для изучения влияния кристаллографической ориентации на разрушение монокристаллов жаропрочного сплава марки ЖС6Ф в 1985 г. в институте были разработаны и внедрены ускоренный рентгенодифрактометрический метод определения кристаллографической ориентировки монокристаллов, а также расчетные методики и

графическое представление результатов рентгеновского исследования в стереографическом треугольнике, включающее модули упругости, коэффициенты Пуассона и величины термических напряжений (приближенная оценка). Определена была температурная и ориентационная зависимость характеристик кратковременной и длительной прочности и упругости монокристаллов первых сложнoleгированных жаропрочных никелевых сплавов марок ВКЛС20, ЖС6У, ЖС26 и создан научный задел для их дальнейшей разработки [7–11].

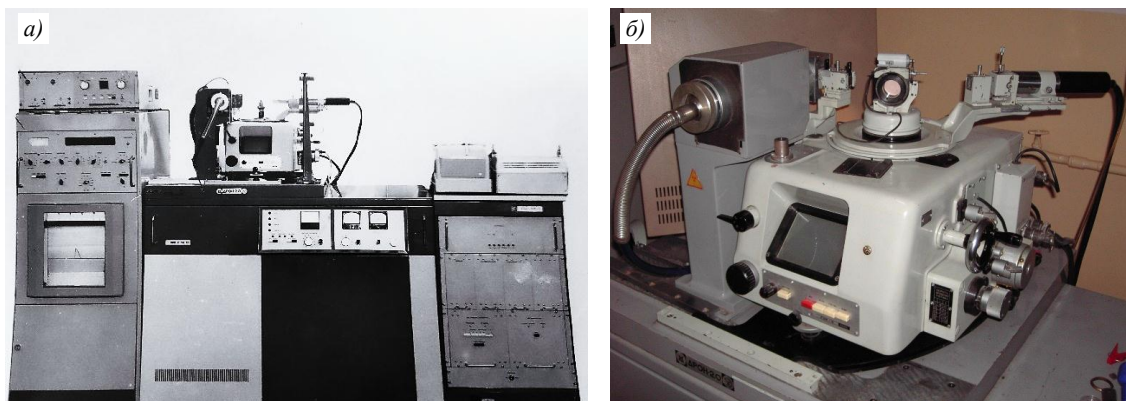


Рис. 3. Дифрактометр общего назначения ДРОН-2 (1977 г.): а – общий вид установки; б – горизонтальный гониометр ГУР-5

В лаборатории жаропрочных сплавов в период разработки технологии получения литых лопаток вместе с научными исследованиями новых сплавов и их развитием были разработаны для рентгеновских аппаратов ДРОН методики рентгеновского производственного контроля кристаллической структуры отливок с определенной ориентацией структуры. Рентгеновские дифрактометры типа ДРОН стали самым распространенным оборудованием и активно применяются в ВИАМ в настоящее время. Это надежный универсальный отечественный прибор, оснащенный различными гониометрическими приставками, предназначенными для исследований широкого круга кристаллических материалов дифрактометрическими методами.

Постсоветский период – с 1991 г. по настоящее время. Очевидно, что с развитием материаловедения, методов исследования и оборудования неразрывно связан и рентгеноструктурный анализ, широко применяемый при разработках новых авиационных материалов, уровень которых стал более высоким и качественным. В настоящее время лаборатории института оснащены современными автоматизированными высокоточными приборами – дифрактометрами Empyrean PANalytical, D8 DISCOVER, ДРОН-8 с вертикальным гониометром и программным комплексом для управления и сбора данных Data Collection, которые предназначены для решения исследовательских задач института, например прецизионных исследований создаваемых материалов (рис. 4).

Эти приборы обладают высокой точностью угловых измерений и чувствительностью к малым количествам вещества. Высокоразрешающие двумерные и линейные детекторы сокращают продолжительность съемки, поскольку позволяют получить набор дифракционных отражений вещества сразу в широком угловом диапазоне.

Жаропрочные никелевые сплавы основаны на твердорастворном и дисперсионном упрочнении металлической матрицы – фаз γ и γ' . Дислокационную структуру таких сплавов исследуют методами просвечивающей электронной микроскопии. Методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии

определяют значения размерного несоответствия периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз при механических испытаниях на прочность. Современные мощные рентгеновские дифрактометры позволяют судить об изменениях структуры по дифракционному расщеплению на рентгенограммах.

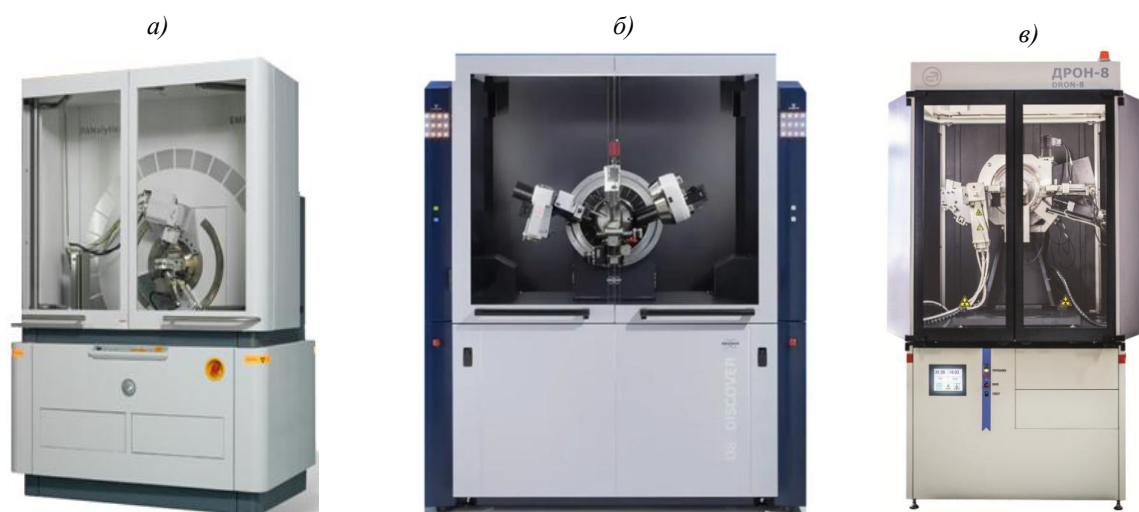


Рис. 4. Современные высокоточные рентгеновские дифрактометры Empyrean PANalytical (а), D8 DISCOVER (б) и ДРОН-8 (в)

Оснащение приборов позволяет наблюдать структурные изменения кристаллических материалов при нагревании и исследовать закономерности формирования структурно-фазового состояния различных групп сплавов в режиме реального времени – изменение структуры при изменении температуры с помощью высокотемпературных камер НТК-1200N с вольфрамовым нагревателем и НТК-2000N (Anton Paar) с платиновым нагревателем.

Ведутся также работы по исследованию монокристаллов металлов и сплавов методами рентгеноструктурного анализа для решения таких задач, как определение остаточных напряжений в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов, влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава, исследование его фазовых и структурных изменений в процессе высокотемпературной ползучести [12–20].

Качество кристаллической структуры монокристаллических отливок лопаток – важнейший технологический производственный критерий, определяющий выход годной продукции и ее себестоимость. Наряду с исследованиями на высокоточных рентгеновских аппаратах совершенствуются методики для производственного контроля качества структуры отливок и технологии выращивания монокристаллов из жаропрочных никелевых сплавов [21–32]. Контроль осуществляется по методу «качания». Для этого традиционно применяют дифрактометры с горизонтальным гониометром. Метод «качания» для контроля данных сплавов имеет специфику: «мягкий» режим съемки (кВ/мА) и невысокую требуемую точность угловых измерений, что дает возможность проводить аналогичные измерения на компактных дифрактометрах настольного типа.

Однако отсутствие в продаже современных компактных дифрактометров с горизонтальным гониометром компенсируют автоматизацией их существующих моделей: с микропроцессорной системой автоматизации МСАРД производства ООО «Эталон СЦ» или системой автоматизации для контроля затравок «Разбраковщик» производства ООО «Ирис» (рис. 5).



Рис. 5. Дифрактометр ДРОН-4 (а) с микропроцессорной системой автоматизации МСАРД (б) и автоматизированный дифрактометр ДРОН-1,5 (в) с системой автоматизации для контроля затравок «Разбраковщик»

Для контроля отливок сложной геометрической формы на производстве востребован метод Лауэ – съемка в «белом» спектре, для этого используют компактную переносную рентгеновскую установку ПРДУ-КРОС производства ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» (рис. 6). Многоразовые пластины с люминофором исключают рутинные операции – проявление и сушку традиционной фотопленки. Вспомогательное оборудование (сканер) переводит экспериментальные лауэграммы на монитор компьютера. Созданные специально для кристаллов кубической сингонии программы сокращают процесс обработки лауэграмм до 10–20 с.

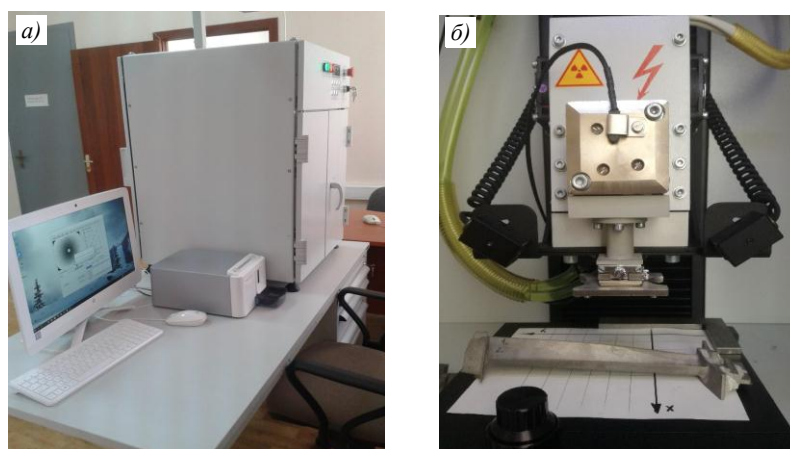


Рис. 6. Многофункциональная переносная рентгеновская установка: а – общий вид рабочего места; б – вид внутреннего устройство камеры

Острофокусная трубка с вольфрамовым анодом дает высокоинтенсивный первичной пучок. Габариты рентгенозащитной камеры приспособлены для исследования отливок типовых размеров. Так, старый метод Лауэ стал современным инструментом рентгеноструктурного анализа, доступным как для исследовательских, так и для прикладных задач на производстве.

Заключение

Авиационное материаловедение находится в авангарде всей науки материаловедения в целом. Оно не только изучает свойства материалов, его главная цель –

это научно обоснованный прогноз поведения применяемых в технике материалов. На всем протяжении 90-летней истории ВИАМ один из высокотехнологичных методов – рентгеноструктурный анализ – сопровождает разработку авиационных материалов и сплавов, а также исследования взаимосвязи структуры и свойств материалов. С увеличением объемов исследований и созданием новых видов авиационных материалов и технологий постоянно расширялась и обновлялась база исследовательского оборудования – в частности, высокоточных мощных рентгеновских дифрактометров. Ввиду возрастающих требований к качеству структуры монокристаллических литых изделий из жаропрочных никелевых сплавов на производстве, актуально создание в перспективе специализированных компактных дифрактометров с горизонтальным гониометром, работающих в монохроматическом излучении.

Список источников

1. Бочвар А.А., Жданов Г.С., Уманский Я.С., Бахметев Е.Ф. К теории рекристаллизации // Рекристаллизация металла. М.; Л.: Госмашметиздат, 1932. Т. II. Вып. 2. С. 161–172.
2. Бахметев Е.Ф., Косолапов Г.Ф. Рентгенографическое определение остаточного искажения атомной решетки у пресованного дуралюмина // О природе структурных изменений во время деформирования металла при повышенных температурах / Е.Ф. Бахметев, М.Д. Воздвиженский, С.И. Губкин, Г.Ф. Косолапов, Б.М. Ровинский. М.; Л.: Цветметиздат, 1933. С. 74–85.
3. Бахметев Е.Ф., Ровинский Б.М. Исследование теплового эффекта в дуралюмине при деформировании его ударом // О природе структурных изменений во время деформирования металла при повышенных температурах / Е.Ф. Бахметев, М.Д. Воздвиженский, С.И. Губкин, Г.Ф. Косолапов, Б.М. Ровинский. М.; Л.: Цветметиздат, 1933. С. 61–73.
4. Трапезников А.К. Рентгенографическое исследование структуры CuAl_2 . М.; Л.: Сектор ведомственной и заочной литературы, 1934. 28 с. (Труды ВИАМ; вып. 25).
5. Кожина Н.К. К методике рентгеноанализа рекристаллизации дуралюмина. М.; Л.: Госмашметиздат, 1934. 16 с. (Труды ВИАМ; вып. 17).
6. Бахметев Е.Ф. Рентгенографическое определение структуры FeAl_3 . М.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. 38 с. (Труды ВИАМ; вып. 35).
7. Логунов А.В., Петрушин Н.В., Кулешова Е.А., Должанский Ю.М. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 6. С. 16–20.
8. Светлов И.Л., Суханов Н.Н., Кривко А.И. Температурно-ориентационная зависимость характеристик кратковременной прочности, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения монокристаллов ЖС6Ф // Проблемы прочности. 1987. № 4. С. 51–56.
9. Кривко А.И., Епишин А.И., Светлов И.Л., Самойлов А.И. Упругие свойства монокристаллов никелевых сплавов // Проблемы прочности. 1988. № 2. С. 68–75.
10. Чумаков В.А., Степанов В.М., Иванов В.Г. и др. Технология литья лопаток газотурбинных двигателей по методу направленной кристаллизации // Литейное производство. 1978. № 1. С. 23–24.
11. 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.
12. Тренингов И.А., Алексеев А.А., Зайцев Д.В., Филонова Е.В. Исследования фазовых и структурных изменений, а также остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести в сплаве ВЖМ4 // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 11–19.
13. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al-Cu-Mg-Li-Zn // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 4. С. 7–12.

14. Тренингов И.А., Алексеев А.А., Поляков С.Н. Методика определения остаточных напряжений в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов на дифрактометре широкого назначения с использованием $\text{Cu } K_{\beta}$ -излучения // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 1. С. 8–12.
15. Кочубей А.Я., Медведев П.Н. Применение прямых полюсных фигур в исследованиях процессов структурообразования при нагревах деформированных металлов и сплавов // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 5 (23). Ст. 2. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 16.01.2023).
16. Медведев П.Н., Мубояджян С.А. Рентгеноструктурные исследования электронно-лучевого керамического слоя теплозащитного покрытия на основе $\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1 (49). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-3-3.
17. Наприенко С.А., Медведев П.Н., Раевских А.Н., Попов М.А. Дифракционные методы исследования при анализе зоны пластической деформации под поверхностью разрушения // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2019. № 4 (127). С. 97–110.
18. Васильев А.И., Панин П.В., Путьрский С.В., Рогалев А.М. Исследование влияния горячего изостатического прессования и термической обработки на структуру и свойства синтезированных заготовок материала марки ВТ6-ПС // *Труды ВИАМ*. 2021. № 7 (101). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-22-30.
19. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства интерметаллидных сплавов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
20. Житнюк С.В., Медведев П.Н., Сорокин О.Ю., Качаев А.А. Исследование кристаллографической текстуры корундовой керамики, полученной методом искрового плазменного спекания // *Кристаллография*. 2022. Т. 67. № 2. С. 194–200.
21. Кузьмина Н.А., Езубченко С.Н. Методика получения прямых полюсных фигур от монокристаллов жаропрочных сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 3. С. 33–34.
22. Кузьмина Н.А., Васикова Л.М. Влияние скорости вращения образца на качество спектра при определении кристаллографической ориентации монокристалльных отливок жаропрочных сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 5. С. 19–20.
23. 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: 16.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.
24. 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: 12.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
25. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов $\langle 001 \rangle$ высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4. С. 25–31.
26. Базылева О.А., Бондаренко Ю.А., Тимофеева О.Б., Чабина Е.Б. Интерметаллидные композиции на основе Ni_3Al , легированные рением // *Металлургия машиностроения*. 2011. № 4. С. 30–34.
27. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. О направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с использованием охладителя // *Литейное производство*. 2011. № 5. С. 36–39.
28. Бондаренко Ю.А., Базылева О.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В // *Литейное производство*. 2012. № 6. С. 12–16.

29. Базылева О.А., Бондаренко Ю.А., Тимофеева О.Б., Хвацкий К.К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и свойства сплава ВКНА-1В // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 4. С. 8–12.
30. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Влияние условий направленной кристаллизации на структуру деталей типа лопатки ГТД // *Литейное производство*. 2012. № 7. С. 14–16.
31. Кузьмина Н.А., Езубченко С.Н. Методика получения прямых полюсных фигур от монокристаллов жаропрочных сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 3. С. 33–34.
32. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.

References

1. Bochvar A.A., Zhdanov G.S., Umansky Ya.S., Bakhmetev E.F. On the theory of recrystallization. *Metal recrystallization*. Moscow; Leningrad: Gosmashmetizdat, 1932, vol. II, is. 2, pp. 161–172
2. Bakhmetev E.F., Kosolapov G.F. X-ray determination of the residual distortion of the atomic lattice in pressed duralumin. *On the nature of structural changes during metal deformation at elevated temperatures*. Moscow; Leningrad: Tsvetmetizdat, 1933, pp. 74–85.
3. Bakhmetev E.F., Rovinsky B.M. Investigation of the thermal effect in duralumin during impact deformation. *On the nature of structural changes during metal deformation at elevated temperatures*. Moscow; Leningrad: Tsvetmetizdat, 1933, pp. 61–73.
4. Trapeznikov A.K. *X-ray study of the CuAl₂ structure*. Moscow; Leningrad: Sector of departmental and correspondence literature, 1934, 28 p.
5. Kozhina N.K. *To the method of X-ray analysis of duralumin recrystallization*. Moscow; Leningrad: Gosmashmetizdat, 1934, 16 p.
6. Bakhmetev E.F. *X-ray determination of the structure of FeAl₃*. Moscow: ONTI NKTP USSR, 1935, 38 p.
7. Logunov A.V., Petrushin N.V., Kuleshova E.A., Dolzhansky Yu.M. Predicting the influence of structural factors on the mechanical properties of heat-resistant alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1981, no. 6, pp. 16–20.
8. Svetlov I.L., Sukhanov N.N., Krivko A.I. Temperature-orientational dependence of short-term strength characteristics, Young's modulus and coefficient of linear expansion of ZhS6F single crystals. *Problemy prochnosti*, 1987, no. 4, pp. 51–56.
9. Krivko A.I., Epishin A.I., Svetlov I.L., Samoilov A.I. Elastic properties of single crystals of nickel alloys. *Problemy prochnosti*, 1988, no. 2, pp. 68–75.
10. Chumakov V.A., Stepanov V.M., Ivanov V.G. et al. Casting technology for gas turbine engine blades using the method of directed crystallization. *Liteynoe proizvodstvo*, 1978, no. 1, pp. 23–24.
11. Krivko A.I., Epishin A.I., Svetlov I.L., Samoilov A.I. Calculation of thermal stresses and thermal stability of anisotropic materials. Message II. *Problemy prochnosti*, 1989, no. 4, pp. 43–48.
12. Treninkov I.A., Alekseev A.A., Zaitsev D.V., Filonova E.V. Researches of phase and structural changes, and also residual stresses in the course of high-temperature creep in VZhM4 alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 2, pp. 11–19.
13. Oglodkov M.S., Hohlatova L.B., Kolobnev N.I., Alekseev A.A., Lukina E.A. Influence of thermomechanical processing on properties and Al–Cu–Mg–Li–Zn system alloy structure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2010, no. 4, pp. 7–11.
14. Treninkov I.A., Alekseev A.A., Polyakov S.N. Method of determination of residual stress in monocrystals of nickel superalloys using diffractometer of wide application with Cu K_β-radiation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2010, no. 1, pp. 8–12.
15. Kochubey A.Ya., Medvedev P.N. The use of direct pole figures in the study of structure formation processes during heating of deformed metals and alloys. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 5 (23), paper no. 2. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: January 16, 2023).
16. Medvedev P.N., Muboyadzhyan S.A. X-ray diffraction studies of electron beam ceramic thermal barrier coating layer based on ZrO₂-Y₂O₃. *Trudy VIAM*, 2017, no. 1 (49), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-3-3.

17. Naprienko S.A., Medvedev P.N., Raevskikh A.N., Popov M.A. Diffraction methods of research in the analysis of the plastic deformation zone under the fracture surface. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2019, no. 4 (127), pp. 97–110.
18. Vasilev A.I., Panin P.V., Putyrskiy S.V., Rogalev A.M. Investigation of hot isostatic pressing and heat treatment effect on structure and mechanical properties of 3D-printed samples made from VT6-PS grade material. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-22-30.
19. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Arginbaeva E.G. The influence of directional solidification parameters on the structure and properties of the intermetallic alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
20. Zhitnyuk S.V., Medvedev P.N., Sorokin O.Yu., Kachaev A.A. Investigation of the crystallographic texture of corundum ceramics obtained by spark plasma sintering. *Kristallografiya*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 194–200.
21. Kuzmina N.A., Ezubchenko S.N. Method for obtaining direct pole figures from single crystals of heat-resistant alloys. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2012, no. 3, pp. 33–34.
22. Kuzmina N.A., Vasikova L.M. Influence of the sample rotation speed on the quality of the spectrum in determining the crystallographic orientation of single-crystal castings of heat-resistant alloys. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2009, no. 5, pp. 19–20.
23. 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: January 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.
24. 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: October 12, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
25. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Kablov D.E. Features of structure and heat resisting properties of monocrystals of <001> high-rhenium nickel hot strength alloys received in the conditions of high-gradient directed crystallization. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 4, pp. 25–31.
26. Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Timofeeva O.B., Chabina E.B. Intermetallic compositions based on Ni₃Al alloyed with rhenium. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2011, no. 4, pp. 30–34.
27. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. About the directed crystallization of heat-resistant alloys with the use of a cooler. *Liteynoe proizvodstvo*, 2011, no. 5, pp. 36–39.
28. Bondarenko Yu.A., Bazyleva O.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. High-gradient directional crystallization of parts from alloy VKNA-1V. *Liteynoe proizvodstvo*, 2012, no. 6, pp. 12–16.
29. Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Timofeeva O.B., Khvatsky K.K. Influence of crystallographic orientation on the structure and properties of the VKNA-1V alloy. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2012, no. 4, pp. 8–12.
30. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. Influence of directional crystallization conditions on the structure of GTE blade-type parts. *Liteynoe proizvodstvo*, 2012, no. 7, pp. 14–16.
31. Kuzmina N.A., Ezubchenko S.N. Method for obtaining direct pole figures from single crystals of heat-resistant alloys. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2012, no. 3, pp. 33–34.
32. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.02.2023.
The article was submitted 09.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 13.02.2023.