

УДК 539.262

Р.М. Назаркин<sup>1</sup>**МАЛОГАБАРИТНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ДИФРАКТОМЕТРЫ  
ДЛЯ ЗАДАЧ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО АНАЛИЗА (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-89-99

*Данный обзор по современным приборам рентгеновской дифрактометрии, имеющимся в коммерческой продаже на территории Российской Федерации, подготовлен для научных и инженерно-технических работников, студентов и аспирантов. Обзор будет полезен для специалистов, ведущих исследования и разработки в области металлургии, материаловедения, технологии материалов, кристаллографии и физики твердого тела. Рассмотрены основные схемы и методы дифракционных экспериментов, представлены технические характеристики и внешний вид настольных рентгеновских дифрактометров.*

**Ключевые слова:** рентгеновский структурный анализ, оборудование, рентгеновский дифрактометр, рентгеновская трубка, фазовый анализ, периоды кристаллических решеток.

R.M. Nazarkin<sup>1</sup>**SMALL-SIZED X-RAY DIFFRACTOMETERS  
FOR STRUCTURE AND PHASE ANALYSIS PURPOSES (review)**

*This review on the modern devices of a x-ray diffractometry which are available on commercial sale in the territory of the Russian Federation, is prepared for research scientists and engineering personnel, students and postgraduate students. The review will be useful to the experts conducting researches and development in the field of metallurgy, materials science, technology of materials, a crystallography and solid state physics. The principal schemes and methods of diffraction experiments are considered, the technical characteristics and exterior of desktop x-ray diffractometers are presented.*

**Keywords:** x-ray diffraction analysis, equipment, x-ray diffractometer, x-ray tube, phase analysis, crystal lattice periods.

<sup>1</sup>Федеральное 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

**Введение**

Необходимость создания и внедрения новых материалов [1] для авиакосмической промышленности и технологий их производства [2] в связи с потребностью в разработке техники нового поколения [3] требует использования в том числе и дифракционных методов анализа для исследования кристаллической структуры, и фазового анализа [4, 5].

Рентгеновские дифрактометры являются основным исследовательским инструментом при проведении фазового анализа и определении периодов кристаллических решеток фаз в сплавах [6]. Рентгеновские методики, основанные на дифрактометрии, используются также при текстурном анализе материалов и определении уровня остаточных макронапряжений в поверхностном слое деталей машин [7]. Большинство выпускаемых рентгеновских дифрактометров относится к крупногабаритным стационарным приборам массой несколько сотен килограммов, занимающим установочную

площадь несколько квадратных метров [8]. Однако в последние десятилетия начали производиться и малогабаритные дифрактометры в настольном и переносном исполнении, что позволяет устанавливать приборы в необорудованных помещениях, использовать их в полевых условиях, перемещать при необходимости с места на место [9]. Несмотря на то что малогабаритные рентгеновские дифрактометры не могут полностью заменить стационарные приборы, их использование для рутинных задач заводского контроля и в учебных целях является целесообразным. В данной работе рассмотрены рентгеновские дифрактометры в настольном исполнении, аттестованные Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и внесенные в Госреестр СИ (Государственный реестр средств измерений).

### Материалы и методы

Основным методом [6, 10] получения данных о структуре веществ и материалов при проведении рентгеноструктурного анализа является съемка рентгенограмм с записью дифракционных пиков в геометрии Брэгга–Брентано ( $2\theta/\omega$ , где  $2\theta$  – угол поворота счетчика;  $\omega$  – ось поворота образца) с последующим определением межплоскостных расстояний из уравнения Вульфа–Брэгга:

$$2d_{HKL} \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda, \quad (1)$$

откуда

$$d_{HKL} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta}, \quad (2)$$

где  $d$  – межплоскостное расстояние, нм;  $\theta$  – угол рентгеновской дифракции соответствующего пика исследуемой фазы или вещества;  $n$  – порядок отражения дифракционного пика;  $\lambda$  – длина волны характеристического излучения рентгеновской трубки, нм;  $H, K, L$  – индексы интерференции.

Рентгенооптическая схема съемки образцов в геометрии Брэгга–Брентано приведена на рис. 1.

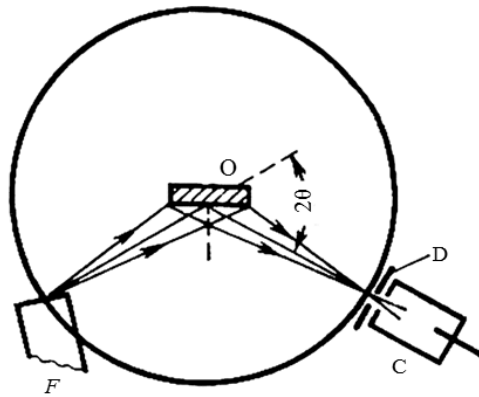


Рис. 1. Схема фокусировки при съемке в геометрии Брэгга–Брентано [10]:

$F$  – фокус рентгеновской трубки;  $O$  – плоский образец;  $D$  – щель счетчика;  $C$  – счетчик;  $2\theta$  – угол отражения

В рентгеновских дифрактометрах в настольном исполнении широкое применение нашла рентгенооптическая схема съемки образцов по Дебаю–Шерреру (рис. 2), практически полностью вышедшая из применения в стационарных рентгеновских дифрактометрах. По сравнению с геометрией Брэгга–Брентано, схема съемки по Дебаю–Шерреру отличается еще большей простотой и до массового внедрения автоматизированной рентгеновской дифрактометрии использовалась в структурном анализе поликристаллов, где в качестве детектора применялась фотопленка. В настоящее время для записи рентгенограмм фотопленка заменяется изогнутыми координатными детекторами [9].

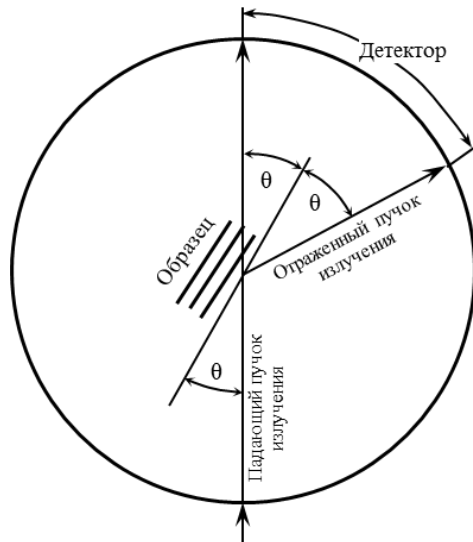


Рис. 2. Схема фокусировки при съемке по Дебаю–Шерреру [11]: образец и рентгеновская трубка неподвижны; изогнутый координатный детектор (ИКД) либо неподвижен, либо может перемещаться по окружности гониометра

Найденные значения межплоскостного расстояния  $d_{HKL}$  (для пиков с максимальным углом дифракции  $2\theta$ ) затем используются для расчета периодов кристаллической решетки вещества или фазы – например, для веществ и фаз с кубической кристаллической решеткой используется уравнение

$$a = d_{HKL} \cdot \sqrt{H^2 + K^2 + L^2}. \quad (3)$$

При съемке рентгенограмм в максимальном диапазоне сканирования по углам  $2\theta$ , по межплоскостным расстояниям пиков  $d_{HKL}$  и их интенсивности также можно: идентифицировать химические вещества и фазы, проводя качественный рентгеновский фазовый анализ при помощи банков данных спектров химических веществ и фаз; определить предельную растворимость легирующего элемента в твердом растворе сплава; определить периоды кристаллической решетки мартенсита и содержание углерода. По соотношению интенсивностей дифракционных пиков идентифицированных фаз и химических веществ, после выполнения качественного рентгеновского фазового анализа, может проводиться полуколичественный и количественный фазовый анализ.

При съемке рентгенограмм – как в геометрии Брэгга–Брентано, так и в геометрии Дебая–Шеррера – для облегчения работы исследователей и с целью устранения систематических ошибок при проведении фазового анализа применяются бета-фильтры и кристаллы-монокроматоры, позволяющие устранить «лишние»  $K\beta$ -линии и снизить интенсивность фонового излучения. Бета-фильтры и кристаллы-монокроматоры могут устанавливаться как на первичном, так и на отраженном пучке [12].

Кроме того, используя рентгенограммы, снятые в геометрии Брэгга–Брентано, можно решать задачи по определению уровня микронапряжений (напряжений II рода) в кристаллитах и размеров областей когерентного рассеяния (частиц дисперсной фазы в сплавах) по физическому уширению рентгеновских дифракционных пиков [6, 12].

Для рентгеноструктурного анализа монокристаллов, исследования кристаллографической текстуры с построением прямых полюсных фигур, анализа остаточных микронапряжений в поверхностном слое требуются специализированные гониометрические приставки либо дифрактометры, обеспечивающие не только независимое

перемещение счетчика и образца по осям  $2\theta$  и  $\omega$  соответственно, но и поворот вокруг собственной оси образца  $\varphi$ , а также наклон в плоскости, перпендикулярной падающему первичному пучку излучения рентгеновской трубки по оси  $\chi$  [13, 14]. Принципиальная схема четырехкружного рентгеновского гониометра, основанного на геометрии съемки по Брэггу–Брентано и одного из наиболее распространенных среди предназначенных для анализа монокристаллов, остаточных макронапряжений и текстуры исследуемых образцов, показана на рис. 3.

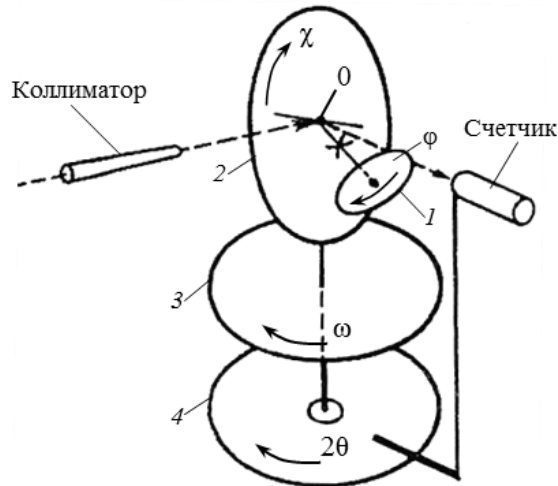


Рис. 3. Принципиальная схема четырехкружного гониометра для анализа монокристаллов и текстуры монокристаллических образцов [14]:

1 – ось поворота вокруг собственной оси  $\varphi$ ; 2 – ось наклона образца  $\chi$ ; 3 – ось вращения гониометра  $\omega$ ; 4 – ось поворота счетчика углов  $2\theta$

Однако, в отличие от стационарных дифрактометров, большинство из которых универсальны и могут быть использованы практически для всех задач рентгеноструктурного анализа, для настольных дифрактометров характерна узкая специализация выпускаемых приборов. Данное обстоятельство вызвано необходимостью обеспечения максимальной миниатюризации прибора при сохранении требуемого уровня точности результатов. Узкоспециализированные дифрактометры предназначены главным образом для задач заводского контроля, где главную роль играет экспрессность проводимого анализа с сохранением воспроизводимости и точности результатов. Наиболее распространенные задачи рентгеновского анализа, для которых разработаны специализированные дифрактометры в настольном исполнении, – контроль ориентировки среза монокристаллов и определение остаточных макронапряжений в поверхностном слое.

В табл. 1 приведены технические характеристики настольных рентгеновских дифрактометров общего назначения, предназначенных для съемки рентгенограмм по Брэггу–Брентано или Дебаю–Шерреру, используемых в основном для решения задач фазового анализа и определения периодов кристаллических решеток фаз и индивидуальных веществ.

На рис. 4 представлен внешний вид настольных рентгеновских дифрактометров, характеристики которых даны в табл. 1.

В табл. 2 представлены технические характеристики настольных специализированных рентгеновских дифрактометров, предназначенных для определения величины остаточных напряжений в поверхностном слое опытных образцов и деталей машин

и отклонения кристаллографической ориентации (КГО) монокристаллов от заданной оси роста на срезах монокристаллических образцов.

Таблица 1

**Технические характеристики настольных рентгеновских дифрактометров для фазового анализа**

Рентгеновский дифрактометр	Номер в реестре ГСИ	Мощность, В·А	Радиус гониометра, мм	Диапазон сканирования угла $2\theta$	Абсолютная погрешность измерений	Габариты Д×Ш×В, мм	Масса, кг
ДР-01 «Радан»	39121-08	1000	120	-60÷+160	±0,1	495×395×505	41
ДР-02 «Радан»						485×495×535	57
ДР-03 «Радан»			200				
ДРН-01 «Фарад»	26598-04	200	–	-8÷+140	±0,08	520×417×180	20
ДРН-02 «Фарад»			–	-20÷+140			
D2 Phaser	43676-10	600	140	-3÷+145	±0,02	610×600×700	95
MiniFlex600	62118-15	1000	150	-3÷+145	±0,02	560×700×460	80
ДНР-401 «Дифрей»	35586-07	250	114	-100÷+154	±0,08	560×280×540	30
ДНР-402 «Дифрей»				+20÷+75			
ДНР-403 «Дифрей»				-100÷+154			45
ARL Equinox 100	70030-17	3500	180	0÷+110	±0,15	520×750×530	65
ARL Equinox 1000		7000				715×750×996	90

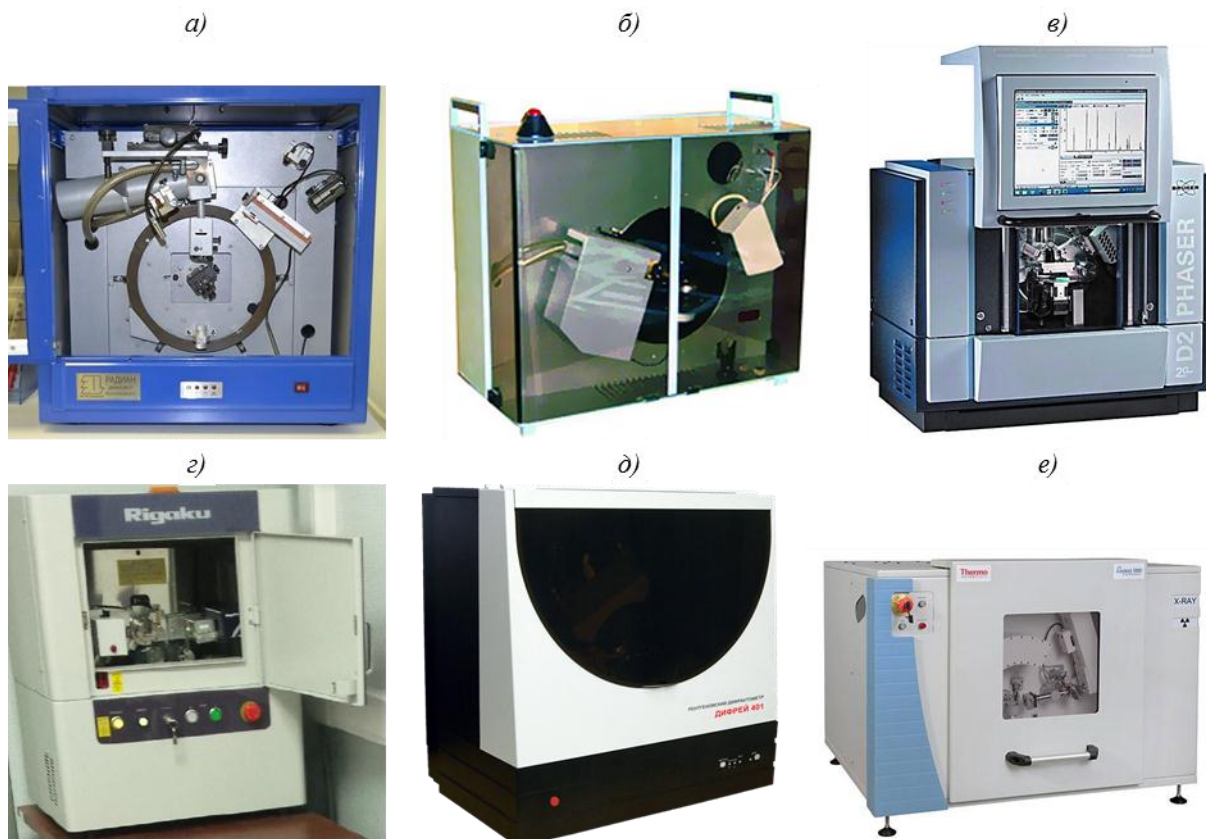


Рис. 4. Внешний вид настольных рентгеновских дифрактометров для задач фазового анализа:  
*a* – ДР-01 «Радан»; *б* – ДРН «Фарад»; *в* – D2 Phaser; *г* – MiniFlex600; *д* – ДНР-401 «Дифрей»; *е* – ARL Equinox 1000

Технические характеристики настольных рентгеновских дифрактометров специализированного назначения

Рентгеновский дифрактометр	Номер в реестре ГСИ	Назначение	Мощность, В·А	Диапазон сканирования	Абсолютная погрешность измерений	Габариты Д×Ш×В, мм	Масса, кг
				2θ			
«Уран»	68219-17	Анализ макронапряжений	100	+104÷+160	±0,1	760×560×545	25
ДРП	60386-15		250	+100÷+164	±0,3	400×300×400	16
Xstress 3000 G2/G3	53988-13		600	+125÷+162	±0,25	492×574×555	41
Дифрактометр-компаратор КОР	25040-03	Определение ориентации среза монокристаллов	150	+20÷+130	±0,0045	700×600×400	30
D2 CRYSO	38721-08		150	+59÷+134	±0,02	560×540×500	60

На рис. 5 и 6 изображены схемы проведения анализа остаточных макронапряжений в поверхностном слое поликристаллических образцов рентгеновским методом – так называемым методом  $\sin^2\psi$ . Сущность метода состоит в определении величины смещения дифракционных пиков ( $HKL$ ) по углу  $2\theta$  при изменении угла наклона образца  $\psi$  от 0 до  $\psi_{\max}$  с дальнейшим построением графической зависимости угла дифракции  $\theta$  от величины  $\sin^2\psi$ . По углу наклона получившейся линии определяют величину остаточных напряжений  $\sigma$  согласно формуле

$$\sigma = \frac{-E}{2(1+\mu)} \cdot \cot\alpha, \quad (4)$$

где  $E$  – модуль упругости для исследуемого материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\cot\alpha$  – котангенс угла наклона построенной по результатам рентгеновского структурного анализа линейной зависимости положения дифракционных пиков от величины  $\sin^2\psi$  [12, 15].

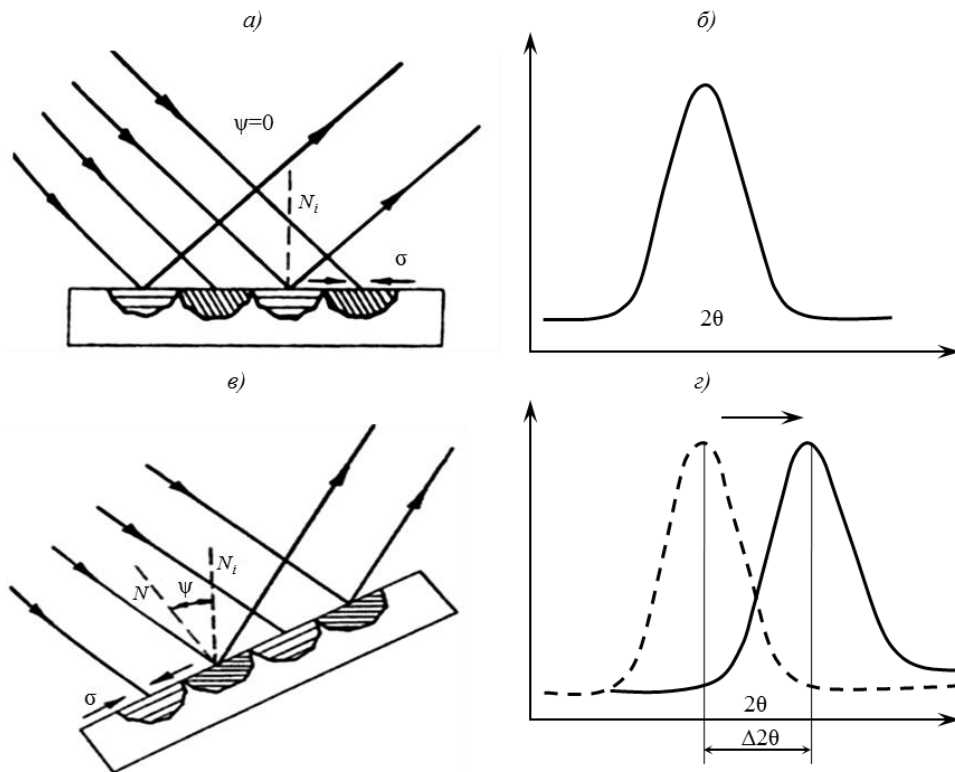


Рис. 5. Схема рентгеновской съемки (а, в) и рентгенограммы (б, г) при определении остаточных макронапряжений методом  $\sin^2\psi$  при угле наклона  $\psi$ , равном 0 (а, б) и  $\psi$ ; градусов (в, г) [16]

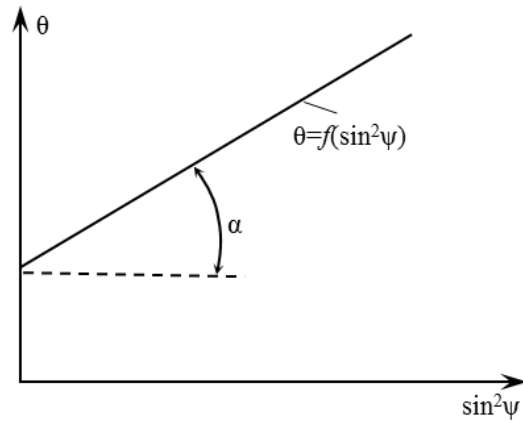


Рис. 6. Расчетная схема [16] для определения величин остаточных напряжений в поверхностном слое поликристаллических образцов по углу наклона  $\alpha$  функции  $\theta=f(\sin^2\psi)$

На рис. 7 показан внешний вид специализированных настольных рентгеновских дифрактометров для определения остаточных напряжений.

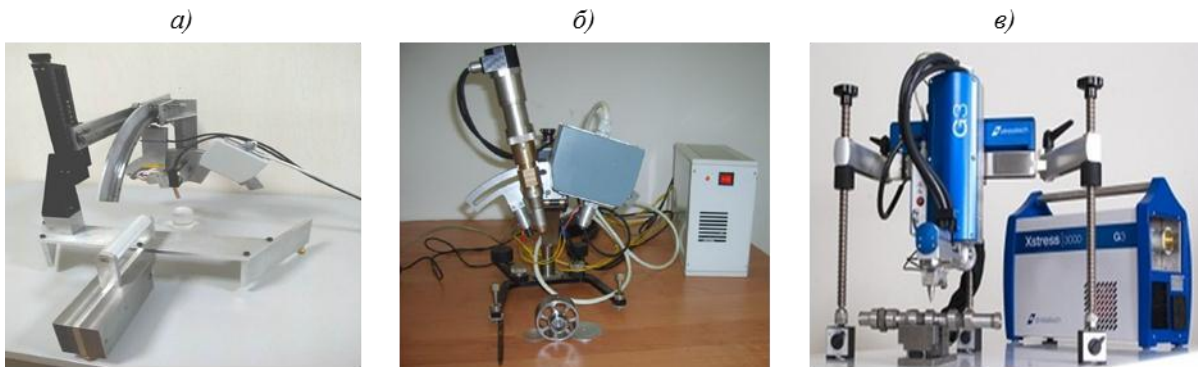


Рис. 7. Внешний вид рентгеновских дифрактометров в настольном исполнении для анализа остаточных напряжений в поверхностном слое материалов: «Уран» (а), ДРП (б) и Xstress 3000 G3 (в)

На рис. 8 представлена принципиальная схема рентгеновского дифрактометра для ориентирования среза монокристаллов.

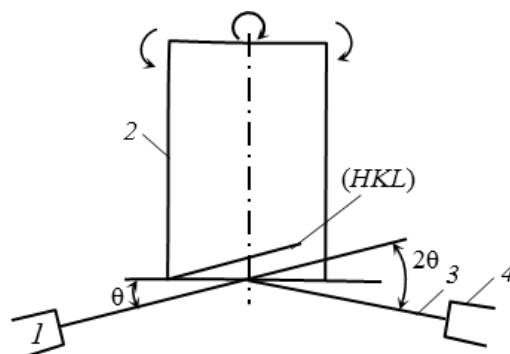


Рис. 8. Схема дифрактометра для определения отклонения кристаллографической ориентации монокристаллов от заданной оси роста [17]:

1 – источник излучения (рентгеновская трубка); 2 – монокристалл; 3 – отраженный пучок излучения; 4 – счетчик

Определение отклонения оси роста монокристаллического образца от заданной оси производится путем анализа рентгенограммы, получаемой при вращении источника рентгеновского излучения вокруг брэгговской оси, лежащей в плоскости поверхности среза исследуемого монокристалла.

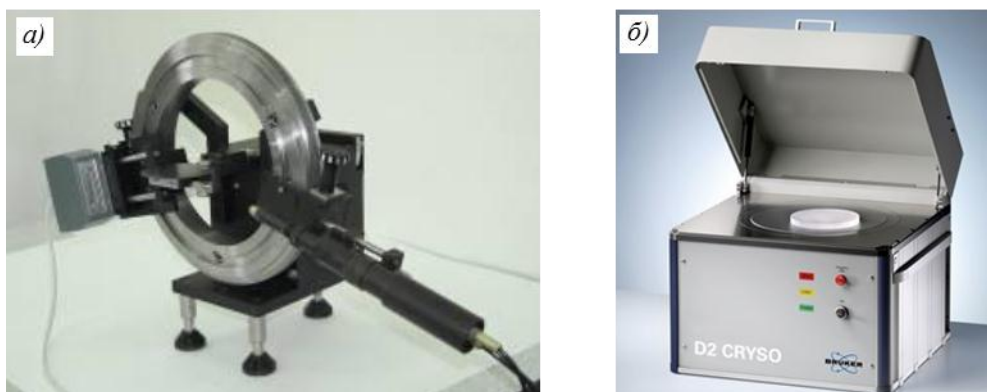


Рис. 9. Внешний вид настольных рентгеновских дифрактометров для анализа ориентации монокристаллов:

*а* – компаратор КОР; *б* – D2 CRYSO

На рис. 9 показан внешний вид специализированных настольных рентгеновских дифрактометров для анализа ориентации монокристаллов.

### Результаты и обсуждение

Несмотря на тот факт, что по своим техническим характеристикам настольные рентгеновские дифрактометры не могут полностью заменить стационарные, в ряде случаев их применение целесообразно и оправдано. Так, по научно-техническим литературным данным, рентгеновские дифрактометры «Радиян» (ЗАО «НТЦ Экспертцентр») успешно применялись для оценки уровня внутренних напряжений по уширению дифракционного пика фазы [18] и качественного рентгеновского фазового анализа [19]. Рентгеновский дифрактометр «Фарад» (ЗАО «НТЦ Экспертцентр») рекомендован для использования в заводских лабораториях [20] для задач фазового анализа и определения толщины покрытий [21, 22]. Дифрактометр D2 Phaser (фирма Bruker AXS GmbH, ФРГ) используется для задач фазового анализа различных веществ и материалов [22, 23]. На рентгеновском дифрактометре MiniFlex 600 (Rigaku Corp., Япония) исследователями продемонстрирована возможность проведения фазового анализа и определения периода кристаллической решетки для монокристалла кремния при съемке в геометрии Брэгга–Брентано для порошковых образцов [24], а также определен размер областей когерентного рассеяния и проведен фазовый анализ интерметаллидов [25]. Рентгеновские дифрактометры «Дифрей» (ОАО «Научные приборы»), укомплектованные текстурной приставкой ТПП-1, могут использоваться для анализа текстуры на массивных образцах и в покрытиях [26] помимо проведения качественного и количественного [27] фазового анализа. В работе [28] сообщается, что рентгеновский дифрактометр ARL Equinox 100 (фирма Thermo Fisher Scientific INEL SAS, Франция) использовался для уточнения параметров кристаллической структуры вещества методом Ритвельдда.

Специализированные настольные дифрактометры для определения остаточных напряжений благодаря возможности работы в полевых условиях, в том числе с крупногабаритными деталями, нашли широкое применение в промышленности. Так, рентгеновский дифрактометр «Уран» (ООО «Энергоприбор») используется для неразрушающего контроля на транспорте [29]. Применение рентгеновского дифрактометра ДРП

(ЗАО «НПЦ Промтехдиагностика») для анализа остаточных макронапряжений в поверхностном слое описано в работе [30]. Определение остаточного аустенита и величины макронапряжений в углеродистых сталях с помощью рентгеновского дифрактометра Xstress 3000 (фирма Stresstech OY, Финляндия) описано в работе [31].

Применение дифрактометра-компаратора KOP (ООО «Институт рентгеновской оптики») с поликапиллярной оптикой (линзы Кумахова) для анализа ориентации срезов монокристаллов описано в работе [32], дифрактометра D2 CRYSO (фирмы Bruker Nano AXS GmbH, ФРГ) – в работе [33].

Как следует из вышеизложенного, при наличии сменных приставок с возможностью перемещения по четырем осям ( $2\theta$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  и  $\chi$ ) настольный дифрактометр становится универсальным прибором, позволяющим решать задачи не только фазового анализа и определения величины периодов кристаллических решеток фаз, но и проводить анализ монокристаллов и кристаллографических текстур, определять остаточные макронапряжения в поверхностном слое.

Узкоспециализированные дифрактометры в настольном исполнении, предназначенные для нужд промышленности, отличаются экспрессностью проводимых измерений, способны работать в «конвейерном» режиме, а компактность дифрактометров для определения остаточных напряжений становится их главным преимуществом, позволяя проводить анализ на поверхности готовых металлоизделий, в том числе крупногабаритных – таких как шестерни и валы машин и механизмов, лопатки компрессоров и турбин двигателей и энергетических установок с поликристаллической структурой, лопасти винтов летательных аппаратов, железнодорожные рельсы, металлические трубы и трубопроводы различного назначения, что невозможно без разрушения готовых деталей и узлов при использовании стационарных рентгеновских дифрактометров.

### Заключения

Таким образом, в научно-технических литературных источниках показано, что настольные дифрактометры позволяют решать широкий круг задач при рентгеновском структурном анализе.

Использование настольных дифрактометров оправдано для целей заводского контроля, позволяя размещать рентгеновскую лабораторию непосредственно в цехах, а при наличии автономного энергоснабжения – и в полевых условиях. Это обстоятельство для исследователей компенсирует меньшую точность настольных приборов по сравнению со стационарными. Следует отметить, что для учебных целей использование настольных рентгеновских дифрактометров также будет целесообразным за счет небольших габаритов приборов, малой мощности (не более 100 Вт) их рентгеновских трубок, радиационной защищенности, возможности размещения в помещениях без водопровода, наглядности в использовании и простоты устройства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №5. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-55-71.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. №7–8. С. 54–58.

4. Шишкарёва Л.М., Кузьмина Н.А. Обзор методик определения качества структуры монокристаллических отливок жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №1. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-6-6.
5. Моисеева Н.С., Назаркин Р.М. Межфазные напряжения в монокристаллических литейных никелевых жаропрочных сплавах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №11. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-1-1.
6. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов. 4-е изд. доп. и перераб. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
7. Русаков А.А. Рентгенография металлов: учеб. для вузов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
8. Исаенкова М.Г., Перлович Ю.А., Скрытый В.И., Соколов Н.А., Яльцев В.Н. Рентгеновская дифрактометрия: учеб. пособие. М.: МИФИ, 2007. 60 с.
9. Абызов А.М. Рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ на минидифрактометре «Дифрей»: учеб. пособие. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2008. 95 с.
10. Трушин В.Н., Андреев П.В., Фадеев М.А. Рентгеновский фазовый анализ поликристаллических материалов: электронное учеб.-методич. пособие. Н. Новгород: ННГУ, 2012. 89 с.
11. Гинье А. Рентгенография кристаллов. Теория и практика. Пер. с фр. М.: Наука, 1961. 604 с.
12. Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А., Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 с.
13. Шамрай В.Ф., Лифшиц В.А., Серебряный В.Н. и др. Опыт использования дифрактометра ДРОН-7 с приставкой ПГТМ для исследования текстур // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. №1. С. 32–35.
14. Суворов Э.В. Дифракционный структурный анализ: уч. пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2019. 272 с.
15. Подзей А.В., Сумма А.Н., Евстигнеев М.И. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
16. Расчеты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций. Определение макронапряжений рентгеновским методом: МР 103–83. М.: ВНИИНМАШ, 1983. 63 с.
17. Корнев Г.Д. Технологический контроль в электронном производстве: учеб. пособие. М.: МИЭМ, 1988. 74 с.
18. Мурзин С.П., Трегуб В.И. Оценка уровня внутренних напряжений в приповерхностном слое нанопористых металлических материалов // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. №4. С. 91–95.
19. Головина Е.И., Иванова И.А., Ивков С.А. Оценка рентгенофазового анализа пыли от дробеструйных установок литейного производства // Науковедение: Интернет-журнал. 2017. Т. 9. №2. С. 62. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/42TVN217.pdf> (дата обращения: 29.07.2019).
20. Париллов И.В., Сиротинкин В.П., Сидохин А.Ф., Сидохин Е.Ф. Рентгеновский дифрактометр с координатным детектором // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. №7. С. 32–36.
21. Сидохин Ф.А., Сидохин А.Ф., Сидохин Е.Ф. Рентгенографический контроль металлокорда на дифрактометре с координатным детектором // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. №8. С. 45–46.
22. Куликов Н.А., Попова Н.А., Лукин Е.С. Синтез наноструктурированных порошков состава иттрий–алюминиевый гранат–лиганд в технологии получения лазерной керамики // Actualscience. 2016. Т. 2. №12. С. 135–136.
23. Орлова Л.А., Солнцев С.Ст., Чайникова А.С., Попович Н.В., Денисова В.С. Алюмосиликатные композиты с неоксидными наполнителями // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 03. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 29.07.2019).

24. Jesche A., Fix M., Kreyssig A. et al. X-Ray diffraction on large single crystals using a powder diffractometer // *Philosophical magazine*. 2016. Vol. 96. Issue 20. P. 2115–2124.
25. Казанцева Л.А., Курзина И.А., Косова Н.И. и др. Синтез гидридов титана и получение сплавов на их основе // *Вестник Томского государственного университета. Сер.: Химия*. 2015. №2. С. 69–75.
26. Пьянкова Л.А., Елохин В.А., Архипов С.Н. и др. Контроль функциональных слоев ВТСП-2 с помощью текстурной приставки рентгеновского дифрактометра «Дифрей-401» // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. Т. 82. №10. С. 44–46.
27. Штукенберг А.Г., Максимова Л.Н., Архипов С.Н., Пьянкова Л.А. Количественный рентгенофазовый анализ электролитов методами калибровок и Ритвельда // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. №4. С. 37–43.
28. Cherednichenko K.A., Solozhenko V.L. Structure and equation of state of tetragonal boron subnitride B50N2 // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 122. P. 155901. DOI: 10.1063/1.4996854.
29. Рентгеновский дифрактометр: пат. 2664774 Рос. Федерация; заявл. 21.11.17; опубл. 22.08.18.
30. Котелкин А.В., Звонков А.Д., Лютцау А.В. и др. Влияние наноразмерной упрочняющей фазы на особенности поведения алюминиевого сплава 1953Т1 при циклической нагрузке // *Известия высших учебных заведений. Сер.: Цветная металлургия*. 2011. №4. С. 44–49.
31. Hosseini S.B., Karlsson B., Vuoristo T., Dalaei K. Determination of Stresses and Retained Austenite in Carbon Steels by X-rays – A Round Robin Study // *Experimental Mechanics*. 2011. DOI: 10.1007/s11340-010-9338-2.
32. Кумахов А.М., Тешев Р.Ш., Кумахов А.А. Использование протяженной области фокуса поликапиллярной линзы в основных схемах дифрактометрии // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. №4–1. С. 20–24.
33. Montag B.W., Reichenberger M.A., Sunded M. Bulk Crystal Growth and High – Resolution X-ray Diffraction Results of LiZnAs Semiconductor Material // *Journal of Electronic Materials*. 2017. Vol. 46. No. 8. P. 4875–4882. DOI: 10.1007/s11664-017-5471-3.