

## ДВУХКРИСТАЛЬНЫЙ МОНОХРОМАТОР ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТРИИ

© 2017 г. В. Т. Эм<sup>а,\*</sup>, А. М. Балагуров<sup>б</sup>, В. П. Глазков<sup>а</sup>, И. Д. Карпов<sup>а</sup>, Р. Mikula<sup>с</sup>, Н. Ф. Мирон<sup>а</sup>, В. А. Соменков<sup>а</sup>, В. В. Сумин<sup>б</sup>, J. Šaroun<sup>с</sup>, М. Н. Шушунов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141900, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>с</sup> Институт ядерной физики АН ЧР, Чехия, Ретц

\*e-mail: vtem9@mail.ru

Поступила в редакцию 12.08.2016 г.

Рассмотрена проблема создания специализированного нейтронного дифрактометра для измерения внутренних напряжений в объемных материалах и изделиях в условиях ограниченного пространства для его размещения на горизонтальном канале реактора. Показано, что оптимальным является использование двойного монохроматора из пиролитического графита и фокусирующего изогнутого идеального монокристалла кремния. Дифрактометр с таким монохроматором, созданный на реакторе ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт”, при мощности реактора 6 МВт сравним по светосиле и разрешению с современными стресс-дифрактометрами на более мощных реакторах.

DOI: 10.7868/S0032816217040048

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря сравнительно большой проникающей способности нейтронов в большинстве материалов дифракция нейтронов является единственным неразрушающим методом, позволяющим измерить распределение напряжений в массивных объемных изделиях [1, 2]. Поэтому в последние 10–15 лет метод интенсивно развивался во многих нейтронных центрах для решения научных и прикладных задач, связанных с измерением внутренних напряжений. Он основан на измерении дифракции от сравнительно малого (1–100 мм<sup>3</sup>) выделенного объема (пробный объем или gauge volume) внутри массивного образца (рис. 1). Выделение пробного объема осуществляется с помощью щелей, установленных в падающем и рассеянном пучках нейтронов. Обычно щели делают в пластинах из кадмия, который хорошо поглощает тепловые нейтроны. По смещению дифракционных пиков от положений, определяемых параметром решетки недеформированного материала, определяются компоненты тензора деформации  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений  $x, y, z$  при трех ориентациях образца [1] и, пользуясь обобщенным законом Гука, вычисляются компоненты тензора напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ :

$$\sigma_x = E[(1 - 2\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)] / (1 + \nu)(1 - 2\nu),$$

$$\sigma_y = E[(1 - 2\nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)] / (1 + \nu)(1 - 2\nu),$$

$$\sigma_z = E[(1 - 2\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)] / (1 + \nu)(1 - 2\nu),$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

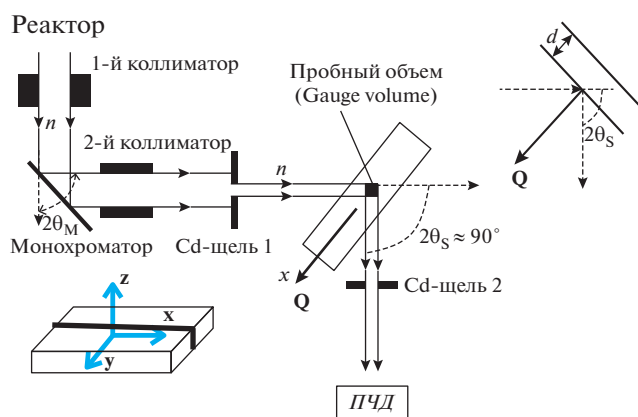


Рис. 1. Схема нейтрон-дифракционного метода измерения внутренних напряжений на стационарном реакторе;  $x, y, z$  – главные направления ( $x$  – продольное,  $y$  – поперечное,  $z$  – нормальное) в образце. При измерении компоненты деформации  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  образец устанавливается так, чтобы соответствующее главное направление  $x, y, z$  совмещалось с вектором рассеяния  $Q$ . ПЧД – позиционно-чувствительный детектор.

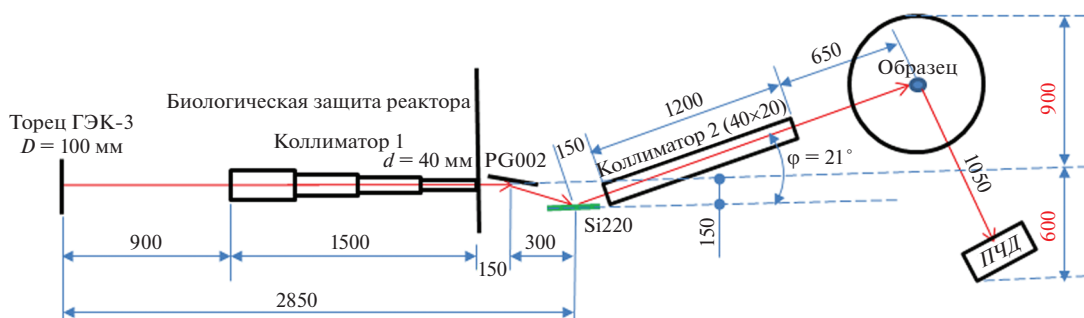


Рис. 2. Вариант схемы стресс-дифрактометра на ГЭК-3 реактора ИР-8 с двухкристалльным монохроматором PG002/Si220.

Совмещая точки образца, в которых нужно измерить напряжения, с центром пробного объема, можно измерить распределение напряжений по образцу.

Проблемой метода является то, что из-за недостаточной яркости существующих источников нейтронов измерения занимают сравнительно длительное время, и это ограничивает возможности метода по пространственному разрешению ( $\sim 1 \text{ мм}^3$ ) и по глубине ( $\sim 40 \text{ мм}$  для стали) [3, 4]. Поэтому очень важна оптимизация всех узлов стресс-дифрактометра для повышения его светосилы при сохранении высокого разрешения. При решении этой проблемы для нейтронного дифрактометра на стационарном реакторе ключевым моментом является оптимизация монохроматора.

В данной работе рассмотрена проблема создания компактного и в то же время светосильного стресс-дифрактометра в условиях ограниченного пространства для его размещения на стационарном реакторе ИР-8 в НИЦ “Курчатовский институт”, имеющем 12 горизонтальных экспериментальных каналов и сравнительно небольшую толщину (1.8 м) биологической защиты. С помощью предварительных расчетов и экспериментов был проведен анализ различных вариантов монохроматора. Выбран, изготовлен и испытан двойной монохроматор, позволивший создать компактный стресс-дифрактометр, сравнимый по светосиле и разрешению с современными стресс-дифрактометрами на существенно более мощных, чем ИР-8, реакторах.

## 2. МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ В СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТРИИ. РАСЧЕТЫ И ОЦЕНКИ

Обычно в стресс-дифрактометрии используется угол дифракции  $2\theta_s \approx 90^\circ$ , который при заданной ширине щелей обеспечивает максимальное пространственное разрешение и минимальное изменение пробного объема при переориентации

образца для измерения различных компонент деформации [1]. Известно, что для мозаичного монохроматора высокое разрешение дифрактометра при угле рассеяния от образца  $2\theta_s$  достигается, когда угол дифракции на монохроматоре равен или несколько больше угла рассеяния  $2\theta_M \geq 2\theta_s$  [5]. Поскольку для одной и той же длины волны нейтронов интенсивность отраженного монохроматического пучка падает с увеличением угла, то используется угол монохроматора  $2\theta_M \approx 90^\circ$ , что позволяет получить оптимальное соотношение между интенсивностью и приемлемым для стресс-дифрактометрии разрешением  $\Delta d/d \approx 3 \cdot 10^{-3}$ . При типичных в стресс-дифрактометре расстояниях монохроматор–образец  $L_{MS} \approx 2 \text{ м}$  и образец–детектор  $L_{SD} \approx 1 \text{ м}$  для размещения стресс-дифрактометра с углом монохроматора  $2\theta_M \approx 90^\circ$  необходимо большое пространство ( $\sim 2.5 \text{ м}$ ) в сторону от оси канала. Поэтому, чтобы не мешать установкам на соседних каналах, обычно кристалл-монохроматор устанавливается на расстоянии 2–3 м от внешней стенки биологической защиты реактора [6–9], и используется фокусировка в вертикальной и горизонтальной плоскостях для компенсации потери в интенсивности, связанной с увеличением расстояния от торца горизонтального канала реактора.

Значительный прогресс в стресс-дифрактометрии был достигнут благодаря использованию фокусирующих в горизонтальной плоскости монохроматоров из изогнутых совершенных монокристаллов кремния [10, 11]. Подобрать оптимальную геометрию отражения, радиус кривизны и толщину кристалла, можно, по сравнению с плоским мозаичным кристаллом, почти на порядок повысить интенсивность дифракционного пика при том же разрешении. Оптимальный радиус кривизны зависит от угла рассеяния дифракционного пика, и разрешение резко ухудшается при отклонении от угла рассеяния, для которого оптимизировался радиус кривизны. Однако для стресс-дифрактометрии на стационарном реакторе такое поведение разрешения вполне допу-

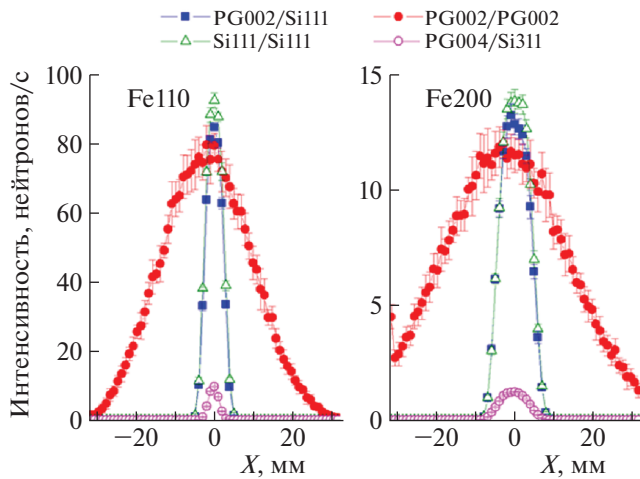


Рис. 3. Отражения Fe110 и Fe200, рассчитанные для различных комбинаций кристаллов в двойных монохроматорах PG/Si.

стимо, поскольку измеряется один дифракционный пик. В отличие от мозаичных кристаллов, перед фокусирующим монохроматором из идеального кристалла нет необходимости устанавливать соллеровский коллиматор для получения высокого разрешения. Эксперименты показали [12], что оптимальным для стресс-дифрактометрии является использование плоскости (220) монокристалла кремния (Si220-монохроматор) в симметричной геометрии отражения при угле монохроматора ( $2\theta_M \approx 50^\circ$ ), значительно меньшем  $90^\circ$ . Однако и в этом случае для размещения прибора необходимо свободное пространство с расстоянием  $\sim 1.7$  м от оси канала.

### 3. ДВУХКРИСТАЛЬНЫЙ МОНОХРОМАТОР С ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

В схеме двухкристального (двойного) монохроматора из одинаковых кристаллов, с отражением от одинаковых плоскостей, падающий на образец монохроматический пучок параллелен первичному пучку. Такая схема позволяет изменять длину волны нейтронов, не смещая прибор, уменьшить фон быстрых нейтронов и  $\gamma$ -излучения и более компактно разместить стресс-дифрактометр ( $\sim 1.4$  м от оси канала) ближе к стенке биологической защиты реактора [1]. Такой двухкристальный монохроматор из одинаковых мозаичных кристаллов был давно предложен и успешно используется на нескольких установках на реакторе ИР-8 Курчатовского института [13]. Однако для стресс-дифрактометрии эта схема оказалась непригодной из-за большой потери в интенсивности при углах монохроматора  $2\theta_M \approx 90^\circ$ , что необходимо для поддержания хорошего разрешения. Соответственно был рассмотрен ва-

риант двойного монохроматора, одним из кристаллов которого является изогнутый в горизонтальной плоскости совершенный монокристалл кремния.

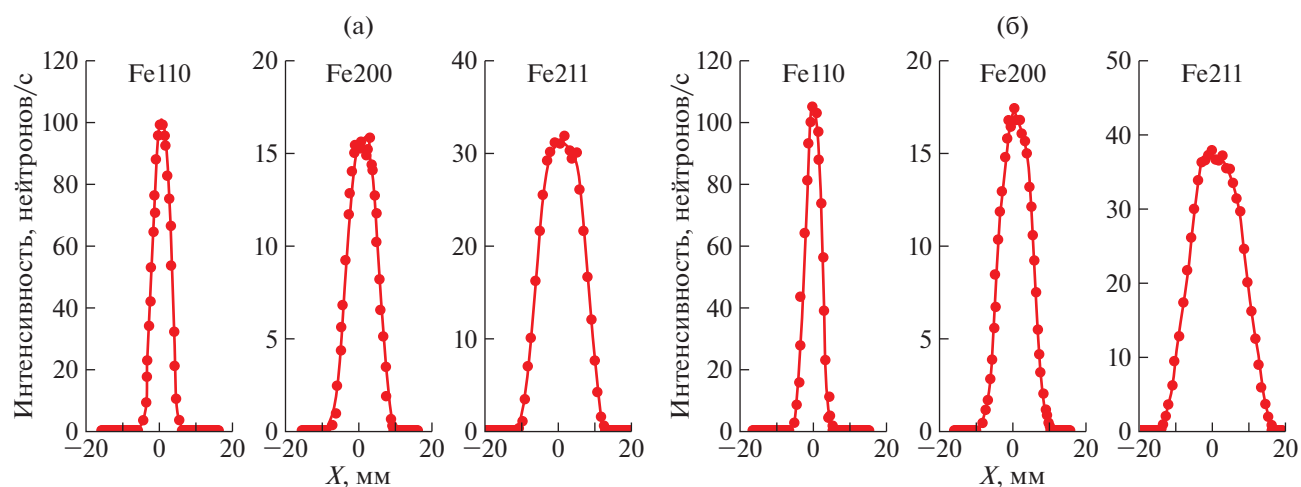
Методом симуляции Монте-Карло были проведены расчеты различных вариантов двойных монохроматоров из пиролитического графита (PG) и изогнутого идеального монокристалла кремния (Si) для геометрии горизонтального экспериментального канала № 3 (ГЭК-3) реактора ИР-8 (рис. 2). Для расчетов использовался модуль SIMERS, версия 6.0.3, пакета программ RESTRAX [14, 15]. Рассчитывались профили дифракционных пиков от стержня из ферритной стали (ОЦК-решетка – объемно-центрическая кубическая) диаметром 3 и высотой 20 мм с кадмиевыми шелями шириной 2 мм на падающем и отраженном от образца пучках нейтронов. В расчетах предполагалось, что для измерения дифракционного пика используется позиционно-чувствительный детектор с рабочим окном 128 (ширина)  $\times$  50 (высота) мм и пространственным разрешением 1.5 мм.

Для сравнения различных вариантов монохроматоров использовался фактор качества (FoM), который пропорционален интегральной интенсивности дифракционного пика ( $I$ ) и обратно пропорционален квадрату полуширины пика ( $W_{1/2}$ ) [16]:

$$FoM = I/(W_{1/2})^2 \text{ctg}^2 \theta_s.$$

Рассматривались пары одинаковых кристаллов PG002/PG002 и Si111/Si111, когда угол между выходящим монохроматическим пучком нейтронов и осью канала  $\varphi = 0$  (рис. 2), что позволяет непрерывно изменять длину волны нейтронов, не перемещая прибор. Рассматривались также пары PG/Si с близкими межплоскостными расстояниями: PG002 ( $d = 3.348 \text{ \AA}$ )/Si111 ( $d = 3.135 \text{ \AA}$ ) и PG004 ( $d = 1.677 \text{ \AA}$ )/Si311 ( $d = 1.635 \text{ \AA}$ ), для которых угол  $\varphi$  сравнительно мал и при изменении длины волны  $\lambda$  от 1.5 до 2.4  $\text{\AA}$  изменяется в пределах  $1.8^\circ \leq \varphi \leq 3.1^\circ$ . Поэтому при изменении длины волны достаточно переместить прибор в поперечном направлении от оси канала в пределах  $\pm 2.3$  см, чтобы совместить центр прибора с монохроматическим пучком. Результаты расчетов различных комбинаций кристаллов показаны на рис. 3, из которого следует, что лучший вариант – это комбинация Si/Si.

Этот вариант – два кристалла Si111/Si111 – был, тем не менее, отклонен, так как на практике трудно оптимизировать кривизну обоих кристаллов. В случае пары PG004/Si311 разрешение лучше, но интенсивность на порядок ниже, чем в случае пары PG002/Si111. Поэтому, если рассматривать вариант прибора с переменной длиной волны, то лучшим выбором является использование пары PG002/Si111. Однако более подробное



**Рис. 4.** Рассчитанные отражения Fe110, Fe200 и Fe211 при разных длинах волн (**а** –  $\lambda = 1.6 \text{ \AA}$ , **б** –  $\lambda = 2 \text{ \AA}$ ) для двойного монохроматора PG002/Si111.

рассмотрение характеристик прибора с использованием пары PG002/Si111 на примере измерения отражений 110, 200, 211 ферритной стали показало, что во всем интервале длин волн ( $1.5\text{--}2.4 \text{ \AA}$ ) только одно отражение 110 может быть измерено с приемлемым разрешением (рис. 4). При этом угол рассеяния отражения 110 существенно отличается от  $90^\circ$  и не очень удобен для измерения напряжений:  $2\theta_s(110) = 43.5^\circ$  ( $\lambda = 1.5 \text{ \AA}$ ),  $2\theta_s(110) = 59.2^\circ$  ( $\lambda = 2 \text{ \AA}$ ),  $2\theta_s(110) = 72^\circ$  ( $\lambda = 2.4 \text{ \AA}$ ). Следовательно, изменение длины волны теряет смысл. Поэтому использование пары PG002/Si111 для стресс-дифрактометра нецелесообразно.

#### 4. ДВУХКРИСТАЛЬНЫЙ МОНОХРОМАТОР С ФИКСИРОВАННОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

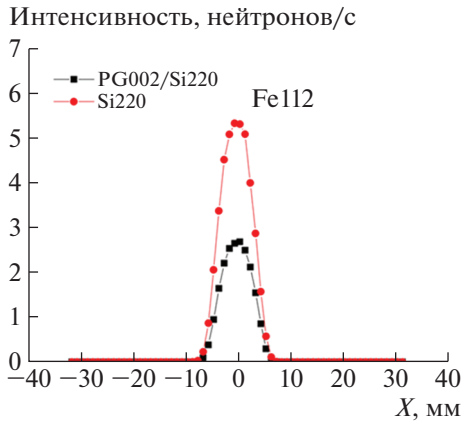
Как альтернативный вариант была рассмотрена схема двухкристального монохроматора с фиксированной длиной волны. В качестве второго кристалла был выбран оптимальный для однокристальной схемы изогнутый кристалл Si220 с углом монохроматора  $2\theta_M \approx 50^\circ$  ( $\lambda \approx 1.6 \text{ \AA}$ ) [11]. В качестве первого монохроматора был выбран PG002 ( $2\theta_{M1} \approx 27^\circ$ ,  $\lambda \approx 1.6 \text{ \AA}$ ), поскольку плоскости 002 графита имеют максимальный коэффициент отражения нейтронов. Расчеты показали, что при указанной схеме монохроматизации достигается хорошее разрешение ( $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ ) отражения 211 ( $2\theta_s \approx 90^\circ$ ) ферритной стали, а интенсивность примерно в 2 раза меньше (рис. 5), чем в

случае однокристального монохроматора Si220, помещенного в то же место, что и в двойном монохроматоре.

Для измерения макроскопических напряжений в металлах типа сталей рекомендуется [1] использовать отражения от плоскостей (112) в случае ОЦК-решетки и отражения от плоскостей (311) в случае ГЦК-решетки (гранцентрированной кубической), поскольку эти плоскости наименее чувствительны к влиянию микронапряжений. Поэтому обычно выбирают длину волны в интервале  $1.5\text{--}1.7 \text{ \AA}$ , что позволяет измерять указанные отражения в сталях на углах рассеяния, близких к  $90^\circ$ .

В работе [17] было показано, что максимальную глубину измерения напряжений в сталях можно существенно увеличить, используя нейтроны с длинами волн, соответствующими локальным минимумам полного сечения нейтронов вблизи брэгговских скачков. Поэтому была выбрана длина волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$  вблизи брэгговского скачка (321) в ферритной стали (рис. 6). Использование излучения с такой длиной волны удобно также тем, что угол рассеяния для металлов, наиболее широко используемых в промышленности, находится вблизи  $90^\circ$ . Ниже приведены значения угла рассеяния  $2\theta_s$  отражений от плоскостей, рекомендуемых для измерения внутренних напряжений, при  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$  для металлов, наиболее широко используемых в промышленности:

Металл/решетка (плоскость отражения)	Fe/ОЦК (211)	Fe/ГЦК (311)	Al/ГЦК (311)	Cu/ГЦК (311)	Ni/ГЦК (311)	Cr/ОЦК (211)
$2\theta_s$ , градус	83.8	91.6	79.4	91.4	94.5	82.94



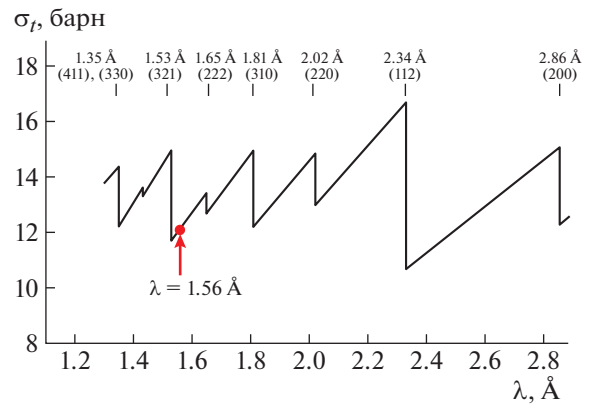
**Рис. 5.** Отражение Fe112 ферритной стали для двойного монохроматора PG002/Si220 и однокристалльного монохроматора Si220 (без предварительного монохроматора), установленного на том же месте, что и в двойном монохроматоре.

При длине волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$  для пары PG002/Si220 угол  $\varphi = 21^\circ$ , что позволяет компактно разместить прибор (0.9 м от оси канала в одну сторону и 0.7 м в другую) и установить монохроматор близко (0.45 м) к стенке реактора (рис. 2). Поскольку не используется соллеровский коллиматор перед монохроматором, то по сравнению с традиционной однокристалльной схемой выигрыш в интенсивности за счет уменьшения расстояния между монохроматором и светящимся торцом горизонтального канала ( $\approx 4$  раза) больше, чем потеря интенсивности ( $\approx 2$  раза), связанная с использованием двойного монохроматора.

### 5. ЭКСПЕРИМЕНТ

На горизонтальном канале ГЭК-3 реактора ИР-8 был собран блок двойного монохроматора PG002/Si220 с биологической защитой и проведены эксперименты по выводу монохроматического пучка нейтронов с длиной волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$ . Эксперименты проводились при мощности реактора 6 МВт (максимальная мощность реактора 8 МВт).

Оптимизация кривизны кристалла Si220 проводилась путем измерения дифракционного пика (112) от стержня из ферритной стали  $\varnothing 2 \text{ мм}$  и высотой  $h = 40 \text{ мм}$ , который устанавливался в центре дифрактометра на расстоянии 2 м от монохроматора Si220 и имитировал пробный объем  $120 \text{ мм}^3$ . Для измерения дифракционного пика использовался разработанный в ОИЯИ двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор с рабочим окном  $150$  (ширина)  $\times$   $250$  (высота) мм и эффективностью 60% (при  $\lambda = 1.6 \text{ \AA}$ ). Шири-



**Рис. 6.** Зависимость полного сечения  $\sigma_\gamma$  нейтронов от длины волны для ферритной стали (ОЦК-решетка).

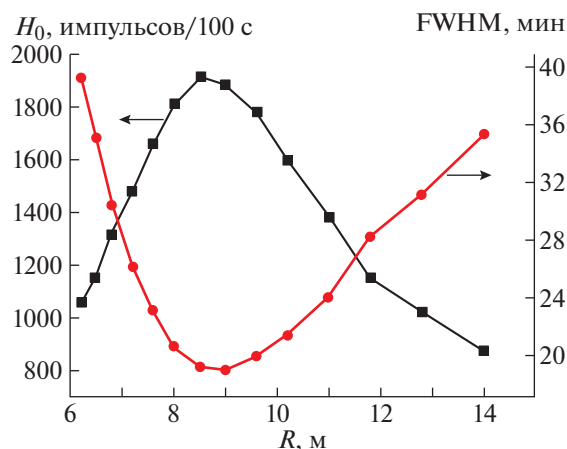
на одного канала соответствовала  $0.0263^\circ$  по углу рассеяния  $2\theta_s$ .

Первый монохроматор PG002 размерами  $150 \times 50 \times 3 \text{ мм}$  был составлен из трех пластин пиролитического графита размерами  $50 \times 50 \times 3 \text{ мм}$ . Испытывались два варианта первого монохроматора, составленного из пластин мозаичностью  $\eta = 1^\circ$  и  $\eta = 40'$ . Для оптимизации кривизны второго монохроматора Si220 использовалось изгибное устройство, разработанное в Институте ядерной физики Чешской академии наук [10]. Испытывались два варианта второго монохроматора Si220: “сэндвич”, составленный из сложенных стопкой трех монокристаллов размерами  $200 \times 40 \times 1.3 \text{ мм}$  (общая толщина 3.9 мм) и один монокристалл размерами  $200 \times 40 \times 4.2 \text{ мм}$ . Для длины волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$  был установлен угол первого монохроматора (PG002)  $2\theta_{M1} = 26.9^\circ$  и второго (Si220)  $2\theta_{M2} = 47.9^\circ$  так, что угол между выходящим монохроматическим пучком нейтронов и осью канала составил  $\varphi = 21^\circ$ .

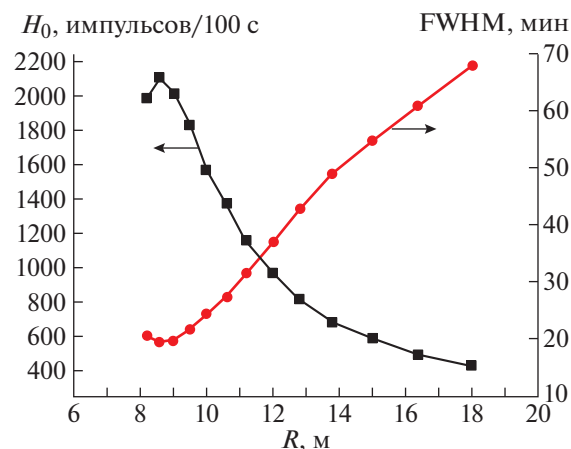
На рис. 7 приведена зависимость высоты  $H_0$  и полуширины FWHM дифракционного пика Fe 112 от стержня из ферритной стали в зависимости от кривизны монохроматора Si220 (“сэндвич”) при мозаичности первого монохроматора  $\eta = 1^\circ$ . Видно, что оптимальное соотношение амплитуды пика и разрешения  $\Delta d/d = 3 \cdot 10^{-3}$  достигается при радиусе кривизны  $R \approx 8.5 \text{ м}$ .

Замена пластин пиролитического графита на пластины с мозаичностью  $40'$  не привела к заметному изменению интенсивности и полуширины дифракционного пика. В то же время использование одного монокристалла Si220 ( $200 \times 40 \times 4.2 \text{ мм}$ ) привело к увеличению интенсивности дифракционного пика ( $\sim 10\%$ ) без заметного ухудшения в разрешении (рис. 8).

В таблице для сравнения приведены результаты аналогичных измерений с однокристалльным



**Рис. 7.** Зависимость высоты  $H_0$  и полуширины FWHM дифракционного пика Fe112 от радиуса кривизны  $R$  кристалла кремния Si220 (“сэндвич”  $200 \times 40 \times (1.3 \times 3)$  мм) в двойном монохроматоре PG002/Si220. Образец – стержень из ферритной стали ( $\varnothing 2$  мм,  $h = 40$  мм).



**Рис. 8.** Зависимость высоты  $H_0$  и полуширины FWHM дифракционного пика Fe112 от радиуса кривизны  $R$  кристалла кремния Si220 (один монокристалл  $200 \times 40 \times 4.2$  мм) в двойном монохроматоре PG002/Si220. Образец – стержень из ферритной стали ( $\varnothing 2$  мм,  $h = 40$  мм).

монохроматором Si220 при  $\lambda = 1.64 \text{ \AA}$  на реакторе ХАНАРО (HANARO) мощностью 30 МВт в Корее [9]. Из таблицы видно, что фактор качества FoM в нашей установке на 20% ниже. С учетом того, что для  $\lambda = 1.55 \text{ \AA}$  фактор качества FoM на 15% ниже, чем для  $\lambda = 1.64 \text{ \AA}$  [17], разница в FoM между установками для одной и той же длины волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$  незначительна.

Проведены эксперименты для оценки возможностей прибора с двойным монохроматором на ИР-8 для измерения напряжений в образцах большой толщины. Измеренный за один час дифракционный пик Fe112 от ферритной стали объемом  $120 \text{ мм}^3$  (стержень  $\varnothing 2$  мм,  $h = 40$  мм) при длине пути нейтронов в материале  $l_m = 80$  мм (80 мм ферритной стали на пути падающего на образец пучка) показан на рис. 9.

Отношение высоты пика к фону  $H_0/y_0 = 2.3$  несколько лучше, чем  $H_0/y_0 = 1$  [18] на стресс-дифрактометре в Национальном институте стандартов и технологий (NIST) США на реакторе мощностью 20 МВт. Ошибка в определении деформации  $100 \text{ мк}$  ( $1 \text{ мк} = 1 \text{ микрострейн} = 10^{-6}$ ) такая же, как в стресс-дифрактометре на реакторе ХАНАРО [17].

Измерение дифракционного пика от ферритной стали объемом  $1 \text{ мм}^3$  в течение одной минуты (рис. 10) дало ошибку в измерении деформации  $80 \text{ мк}$ , сравнимую с ошибкой  $50 \text{ мк}$  для стресс-дифрактометра на реакторе ОПАЛ (OPAL) мощностью 20 МВт в Австралии [19]. Однако следует учесть, что возможности прибора на ИР-8, использующего длину волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$ , для измерения напряжений в ферритной стали на глубине должны быть лучше [17].

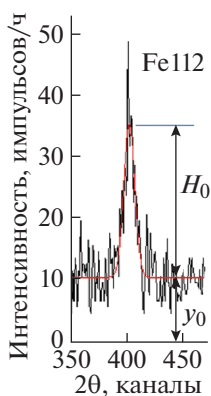
## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании напряжений на стационарном реакторе анализируется угловое положение одного дифракционного пика на угле рассеяния  $2\theta_s \approx 90^\circ$ . При таких углах рассеяния в схеме с однокристалльным монохроматором необходимо большое пространство в стороне от оси канала для получения приемлемого для стресс-дифрактометрии разрешения  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ . Поэтому для создания компактного стресс-дифрактометра целесообразно использовать двухкристалльный монохроматор.

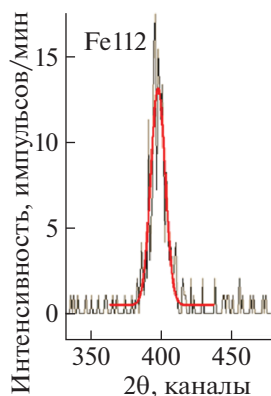
Анализ вариантов двойных монохроматоров с переменной длиной волны из пиролитического графита и изогнутых идеальных монокристаллов кремния показал, что такая схема монохроматизации не позволяет получить оптимальное соотношение интенсивности и разрешения, приемлемое для измерения внутренних напряжений. По-

Характеристики дифракционного пика (112) от стержня из ферритной стали ( $\varnothing 2$  мм,  $h = 40$  мм), измеренного за 3 мин с однокристалльным монохроматором Si220 на реакторе ХАНАРО [12] и двухкристалльным монохроматором PG002/Si220 на ИР-8 ( $I_{\text{имп}}$  – интегральная интенсивность дифракционного пика в импульсах)

Монохроматор	$\lambda$ , $\text{\AA}$	$\theta_s$ , градус	FWHM	$I_{\text{имп}}$	FoM, %
Si220 (ХАНАРО, 30 МВт)	1.64	45	19.4	63000	100
PG002/Si220 (ИР-8, 6 МВт)	1.56	41.8	19.4	61360	80



**Рис. 9.** Отражение Fe112 от ферритной стали объемом 120 мм<sup>3</sup> при длине пути в материале  $l_m = 80$  мм, измеренное за 1 ч при мощности реактора 6 МВт (1 канал = = 0.0263°). Отношение высоты пика к фону  $H_0/y_0 = 2.3$ , ошибка в определении деформации  $E_{гг}(\epsilon) = 100$  мк.



**Рис. 10.** Отражение Fe112 от ферритной стали объемом 1 мм<sup>3</sup> (стержень  $\varnothing 1$  мм,  $h = 1$  мм), измеренное за 1 мин при мощности реактора 6 МВт (1 канал = = 0.0263°). Ошибка в определении деформации  $E_{гг}(\epsilon) = 80$  мк.

этому впервые была предложена и реализована схема двойного монохроматора PG002/Si220 с фиксированной длиной волны  $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$ , которая позволяет создать компактный и светосильный стресс-дифрактометр. По сравнению с однокристалльным монохроматором интенсивность в такой схеме примерно в 2 раза выше при том же разрешении. На реакторе ИР-8 при мощности 6 МВт прибор с таким двойным монохроматором по своим возможностям сопоставим с современными стресс-дифрактометрами на более мощных реакторах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ грант № 16-12-10065.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hutchings M.T., Withers P.J., Holden T.M., Lorentzen T. Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction. London: Taylor and Francis, 2005. doi 10.1201/9780203402818
2. Withers P.J. // J. Appl. Cryst. 2004. V. 37. P. 596. doi 10.1107/S0021889804012737
3. Withers P.J. // J. Appl. Cryst. 2004. V. 37. P. 607. doi 10.1107/S0021889804012750
4. Santisteban, J.R., Daymond M.R., James J.A., Edwards L. // J. Appl. Cryst. 2006. V. 39. P. 812. doi 10.1107/S0021889806042245
5. Нозик Ю.З., Озеров П.П., Хенниг К. Структурная нейтронография. М.: Атомиздат, 1979.
6. Pirling T., Bruno G., Withers P.J. // Mater. Sci. Eng. 2006. V. A437. P.139. doi 10.1016/j.msea.2006.04.083
7. Hofmann M., Schneider R., Seidl G.A., Rebelo-Kornmeier J., Wimpory R.C., Garbe U., Brokmeier H.G. // Physica B. 2006. V. 385-386. P. 1035. doi 10.1016/j.physb.2006.05.331
8. Kirstein O., Garbe U., Luzin V. // Mater. Sci. Forum. 2010. V. 652. P. 86. doi 10.4028/www.scientific.net/MSF.652.86
9. Lee C., Moon M., Em V.T., Choi E., Cheon J., Nam U., Kong K. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2005. V. 545. P. 480. doi 10.1016/j.nima.2005.01.337
10. Mikula P., Kulda J., Lukáš P., Vrána M., Wagner V. // 1994 Nucl. Instrum. and Methods. A. 1994. V. 338. P. 18. doi 10.1016/0168-9002(94)90156-2
11. Stoica A.D., Popovici M., Hubbard C.R., Spooner S. // Proc. Intern. Conf. on Residual Stresses (ICRS-6). Oxford, UK. 2000. P. 1264.
12. Moon M.K., Lee C.H., Em V.T., Mikula P., Hong K.P., Choi Y.N., Cheon J.K., Choi Y.N., Kim S.A., Kim S.K., Jin K.C. // Physica B. 2005. V. 369. P. 1. doi 10.1016/j.physb.2005.06.041
13. Энтин И.П., Глазков В.П., Моряков В.П., Наумов И.В., Соменков В.А., Шильштейн С.Ш. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 56.
14. Freund A. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1983. V. 213. P. 495. doi 10.1016/0167-5087(83)90447-7
15. Šaroun J. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2004. V. 529. P. 162. doi 10.1016/j.nima.2004.04.197
16. Johnson M.W., Daymond M.R. // J. Appl. Cryst. 2002. V. 35. P. 49. doi 10.1107/S002188980101891X
17. Woo W., Em V.T., Seong B.S., Mikula P., Shin E., Joo J., Kang M. // J. Appl. Cryst. 2011. V. 44. P. 747. doi 10.1107/S0021889811018899
18. <http://www.ncnr.nist.gov/instruments/bt8/19>
19. <http://www.ansto.gov.au/ResearchHub/Bragg/Facilities/Instruments/>