

УДК 539.171.4:539.3

НЕЙТРОННЫЙ ФУРЬЕ-СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТР FSS НА РЕАКТОРЕ ИБР-2: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

© 2022 г. Г. Д. Бокучава^а, *, А. А. Круглов^а, И. В. Папушкин^а, В. В. Журавлев^а,
Т. Б. Петухова^а, С. М. Мурашкевич^а, Л. А. Трунтова^а, Н. Д. Зернин^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

*e-mail: Gizo.Bokuchava@jinr.ru

Поступила в редакцию 18.07.2021 г.

После доработки 18.09.2021 г.

Принята к публикации 25.09.2021 г.

Нейтронный фурье-дифрактометр FSS (Fourier Strain Scanner) использовался в 1990–2010 гг. на стационарном реакторе FRG-1 в научно-исследовательском центре GKSS (Геестахт, Германия) для исследования остаточных напряжений в конструкционных материалах и промышленных изделиях. В 2010 г. реактор FRG-1 был окончательно выведен из эксплуатации. В связи с этим дифрактометр FSS в 2014 г. был перевезен в Лабораторию нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ (Дубна, Россия) и размещен на канале № 13 импульсного реактора ИБР-2. Представлены результаты проведенной модернизации прибора и дальнейшие перспективы его развития.

Ключевые слова: дифракция нейтронов, фурье-дифрактометр, метод обратного времени пролета, остаточные напряжения, микродеформации.

DOI: 10.31857/S1028096022050077

ВВЕДЕНИЕ

Фурье-дифрактометр FSS (Fourier Strain Scanner) на стационарном реакторе FRG-1 в научно-исследовательском центре GKSS (Геестахт, Германия) [1] изначально был создан и оптимизирован для исследования внутренних напряжений в конструкционных материалах и промышленных изделиях с помощью дифракции нейтронов высокого разрешения ($\Delta d/d \approx 4 \times 10^{-3}$, d – межплоскостное расстояние). После остановки реактора FRG-1 дифрактометр FSS был перевезен в Лабораторию нейтронной физики им. И.М. Франка (ЛНФ) ОИЯИ (Дубна, Россия) и установлен на канале № 13 импульсного реактора ИБР-2. В настоящее время помимо проведения научных исследований важным направлением научно-методической деятельности на FSS является дальнейшее развитие нейтронного корреляционного метода обратного времени пролета (RTOF-метода, RTOF – Reverse Time of Flight) для анализа упругого рассеяния нейтронов в кристаллах, а также разработка и тестирование новых детекторов, детекторной электроники и электроники накопления данных. На FSS возможно апробирование новых идей корреляционной нейтронной спектроскопии, которые можно в дальнейшем использовать на создаваемом Европейском им-

пульсном источнике нейтронов ESS и новом нейтронном источнике ЛНФ. FSS по своему устройству аналогичен существующим на ИБР-2 фурье-дифрактометрам ФСД [2] и ФДВР [3]. Но в отличие от этих дифрактометров FSS изначально имел среднюю длину пролетной базы между фурье-прерывателем и детектором ($L \approx 12.37$ м) и сравнительно низкую максимальную скорость вращения прерывателя ($\Omega_{\max} = 2000$ об./мин).

АДАПТАЦИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ДИФРАКТОМЕТРА FSS НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

За прошедшие несколько лет был проведен большой объем работ по строительству канала № 13, который ранее на реакторе ИБР-2 не использовался, развитию его инфраструктуры, созданию биологической защиты, а также по установке и адаптации основных узлов FSS к работе на импульсном источнике и выполнению первых тестовых экспериментов [4] (рис. 1). Основными узлами дифрактометра FSS являются стальной конический коллиматор, зеркальный нейтронный водород, фурье-прерыватель, гониометр для установки образца, два 90° -детектора и электроника накопления и управления.

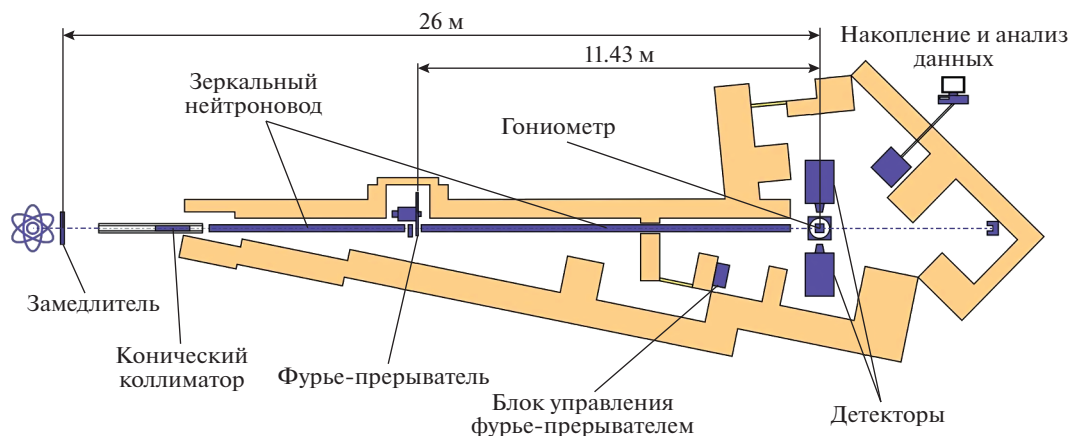


Рис. 1. Схема размещения дифрактометра FSS на канале № 13 реактора ИБР-2.

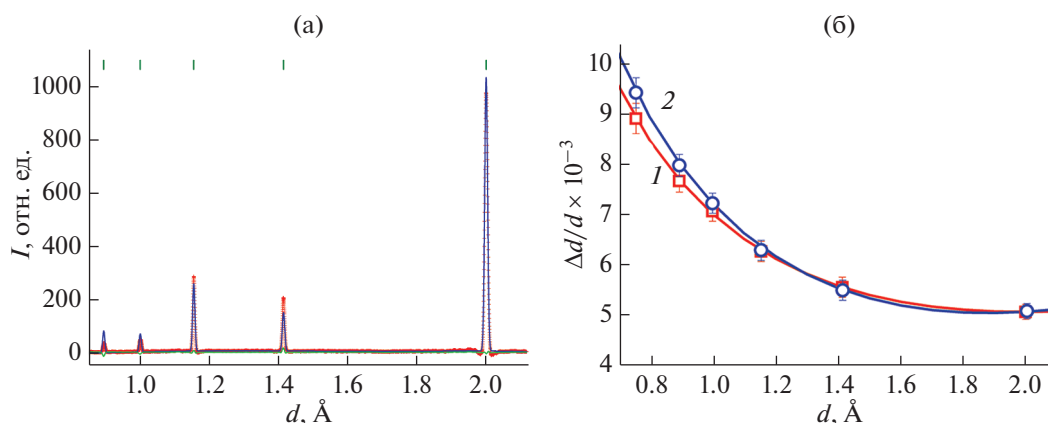


Рис. 2. Первый спектр высокого разрешения образца железа ARMC0, измеренный на FSS детектором Ost и обработанный методом Ритвельда (а). Функция разрешения FSS, измеренная детекторами Ost (1) и West (2) при максимальной скорости прерывателя $\Omega_{\max} = 2000$ об./мин (б).

Зеркальный нейтронотвод

В закладную трубу канала № 13 перед зеркальным нейтронотводом установлен стальной коллиматор конической формы, который предназначен для уменьшения радиационной нагрузки на все последующие элементы установки. Для согласования с нейтронотводом входное и выходное отверстия коллиматора имеют прямоугольные сечения. Угловые размеры отверстий конического коллиматора таковы, что входное сечение нейтронотвода полностью засвечено видимой поверхностью замедлителя. Нейтронотвод расположен между фурье-прерывателем и образцом и предназначен для выведения из пучка быстрых нейтронов и γ -лучей, а также снижения потерь при транспортировке потока тепловых нейтронов к образцу. На первом этапе для формирования падающего пучка тепловых нейтронов на FSS был установлен штатный зеркальный изогнутый нейтронотвод с поперечным сечением 15×108 мм, ра-

диусом кривизны 1900 м и зеркальным покрытием с критическим индексом $m = 1$. Однако данная конфигурация нейтронотвода не позволяет выйти из прямой видимости пучка, что приводит к нежелательному фону на образце. Характеристическая длина волны нейтронотвода составляет $\lambda_c = 2.34$ Å, что приводит к потере дифракционных пиков в случае межплоскостных расстояний меньше 1 Å (рис. 2) и значительно усложняет работу с образцами конструкционных сталей и сплавов (основной сегмент исследований). Кроме того, длительная эксплуатация (более 30 лет) вблизи активной зоны стационарного реактора FRG-1 вызвала значительные радиационные повреждения зеркального покрытия нейтронотвода и ухудшение его характеристик, что привело к большим потерям интенсивности на образце.

Поэтому с целью улучшения характеристик дифрактометра были выполнены расчеты и определены основные параметры нового зеркального

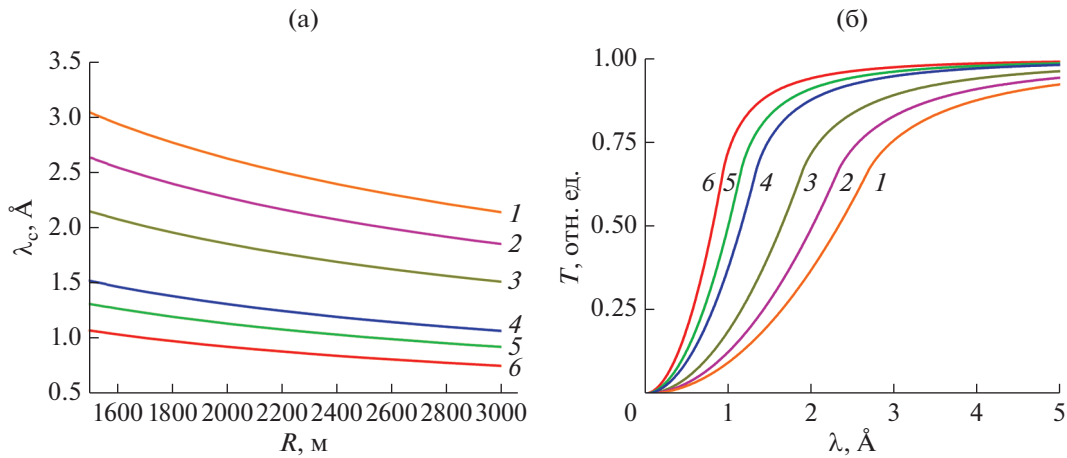


Рис. 3. Характеристическая длина волны λ_c в зависимости от радиуса изгиба R зеркального нейтронновода (а). Функция пропускания $T(\lambda)$ в зависимости от длины волны нейтронов λ (б). Расчеты выполнены для ширины окна нейтронновода $a = 20$ (1, 4), 15 (2, 5), 10 мм (3, 6) и критических индексов зеркального покрытия $m = 1$ (1–3), 2 (4–6).

нейтронновода с более подходящими характеристиками (рис. 3). Новый зеркальный нейтронновод в стальном вакуумном кожухе, установленный на FSS, позволил увеличить поток нейтронов в области коротких длин волн в несколько раз, снизить фон, создаваемый быстрыми нейтронами и гамма-излучением, и заметно уменьшить характеристическую длину волны. Нейтронновод спроектирован плоскопараллельным в горизонтальной плоскости (ширина окна $a = 10$ мм) и линейно сходящимся в вертикальной плоскости (высота входного окна 126 мм, выходного – 50 мм). Общая длина нейтронновода 17.32 м, длина прямого конечного участка 2.8 м. Секции нового нейтронновода покрыты суперзеркальными стеклами на основе Ni/Ti с критическим индексом $m = 2$. Радиус кривизны нейтронновода составляет $R = 1900$ м, характеристическая длина волны $\lambda_c = 0.95$ Å (рис. 4а). На выходе зеркального нейтронновода установлена автоматизированная диафрагма (JJ X-Ray, Дания) из карбида бора с регулируемой апертурой $(0-30) \times (0-80)$ мм для формирования падающего пучка необходимых размеров на исследуемом образце. Сравнительный анализ спектральных распределений, измеренных со старым и новым нейтронноводами, показал существенный сдвиг спектра в область коротких длин волн ($\Delta\lambda \approx 1.4$ Å), что значительно расширяет рабочий диапазон в этой области. При этом наблюдается значительное снижение фона, создаваемого быстрыми нейтронами и гамма-излучением (рис. 4б).

Кроме того, значительное увеличение интенсивности в коротковолновой области дифракционного спектра вследствие замены нейтронновода позволяет уверенно регистрировать до 14 дифракционных пиков в случае ферритной стали (рис. 5а).

Уровень разрешающей способности дифрактометра с новым нейтронноводом, определенный по стандартному образцу, составил $\Delta d/d \approx 5.6 \times 10^{-3}$ при $d = 2$ Å и $\Omega_{\max} = 2000$ об./мин, рабочий диапазон межплоскостных расстояний $d_{hkl} = 0.5-3.5$ Å (рис. 5б, 5в).

Следует отметить, что использование суперзеркальных ($m = 2$) отражающих покрытий стенок нового нейтронновода привело к небольшому увеличению расходимости падающего пучка нейтронов, вследствие чего геометрическая компонента функции разрешения Δd_G^2 несколько увеличилась, и в ней появилась зависимость более высокого порядка ($\sim d^4$) от межплоскостного расстояния: $\Delta d_G^2 = \eta_G^2 d^2 + \eta_{G2}^2 d^4$, где $\eta_G \approx 3.1 \times 10^{-3}$, $\eta_{G2} \approx 1.4 \times 10^{-3}$. Это может несколько усилить эффект уменьшения амплитуды дифракционного пика с увеличением скорости фурье-прерывателя [2].

Фурье-прерыватель

Штатный фурье-прерыватель FSS предназначен для быстрой модуляции первичного пучка нейтронов и состоит из диска ротора диаметром 570 мм, закрепленного на оси двигателя, и пластины статора, установленной неподвижно (рис. 6а). В ходе эксперимента скорость вращения диска меняется от 0 до 2000 об./мин по определенному закону (частотное окно). Диск прерывателя имеет 1024 щели шириной 0.75 мм. В качестве поглотителя нейтронов используют тонкие полоски металлического гадолиния размерами 0.75×75 мм и толщиной около 0.25 мм, которые размещены в соответствующих углублениях в

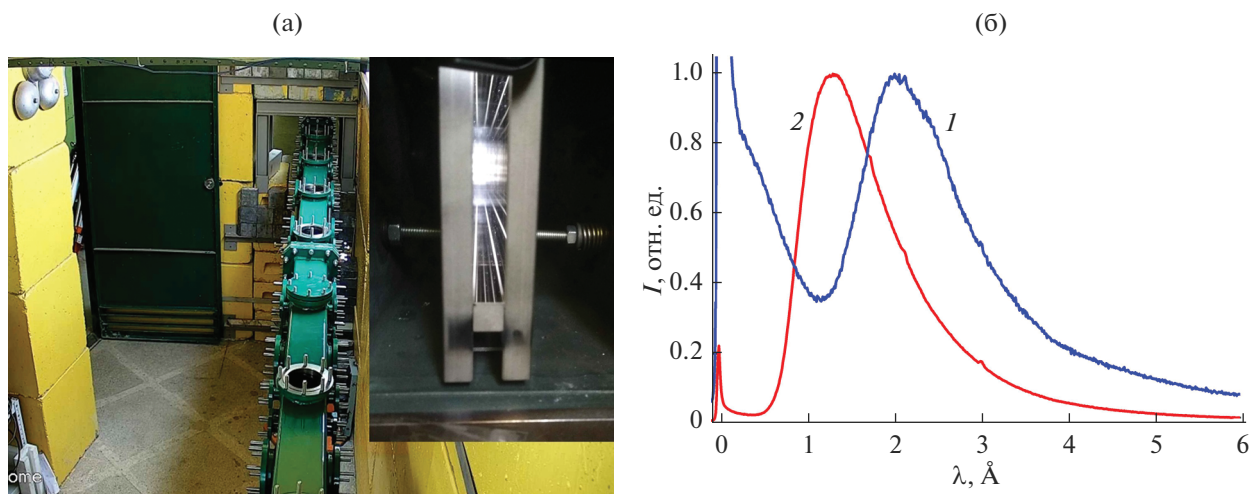


Рис. 4. Вакуумный кожух и зеркальные секции нового зеркального нейтронвода FSS (а). Сравнение спектральных распределений, измеренных на образце ванадия на FSS со старым (1) ($\lambda_c = 2.34$ Å) и новым (2) ($\lambda_c = 0.95$ Å) нейтронводами (б).

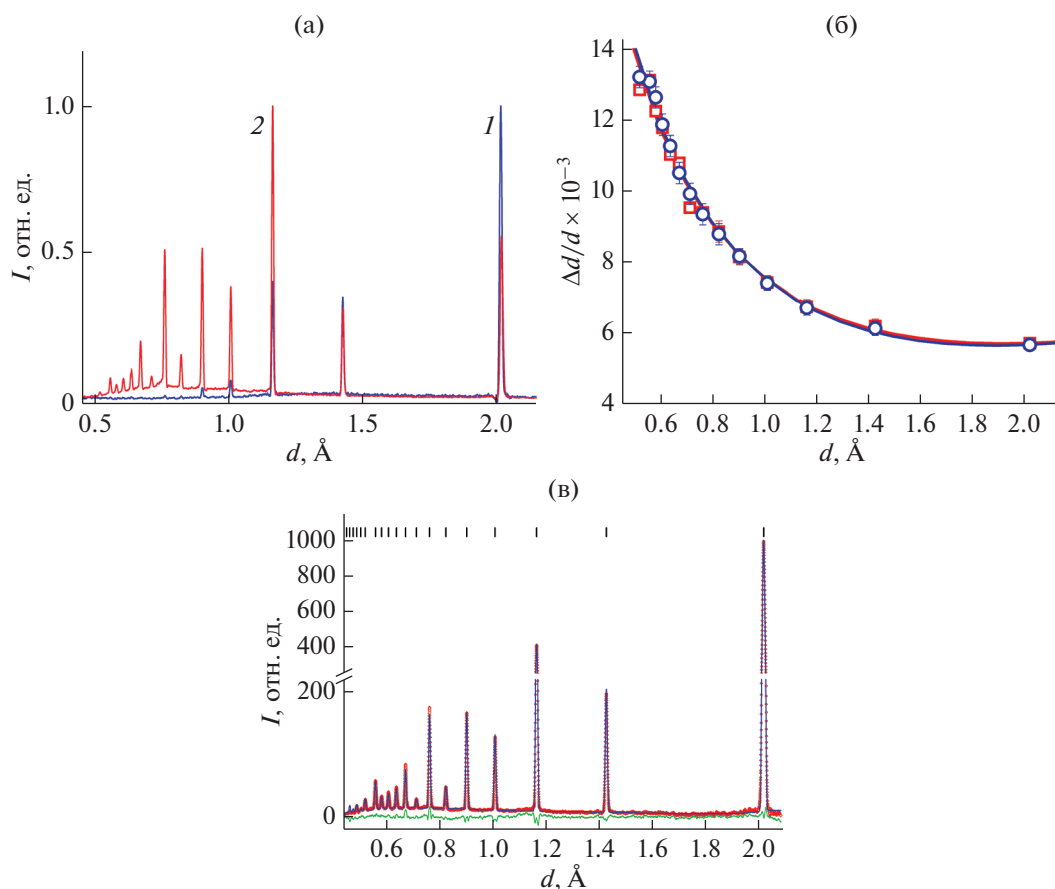


Рис. 5. Сравнение дифракционных RTOF-спектров, измеренных на FSS со старым (1) и новым (2) нейтронводами (а). Функция разрешения FSS, измеренная с новым нейтронводом при максимальной скорости прерывателя $\Omega_{\max} = 2000$ об./мин (квадраты – детектор Ost, кружки – детектор West) (б). Дифракционный RTOF-спектр высокого разрешения образца железа ARMCO, измеренный на FSS с новым нейтронводом ($\Omega_{\max} = 2000$ об./мин) и обработанный методом Ритвельда (в).

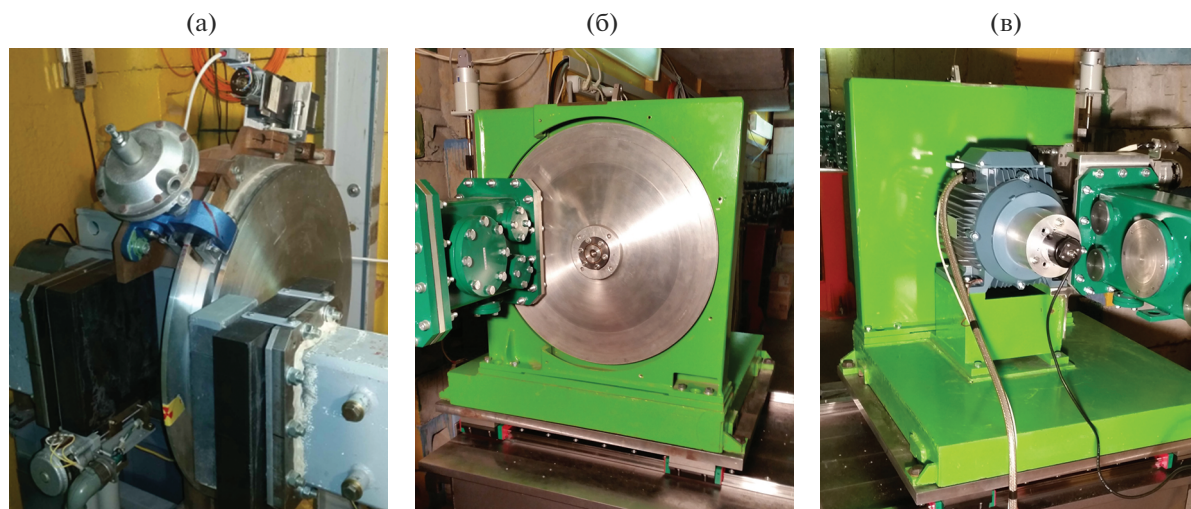


Рис. 6. Старый фурье-прерыватель FSS, установленный в штатном положении в разрыве старого зеркального нейтронновода (а). Новый фурье-прерыватель FSS: б – вид спереди, защитный кожух диска снят; в – вид сзади.

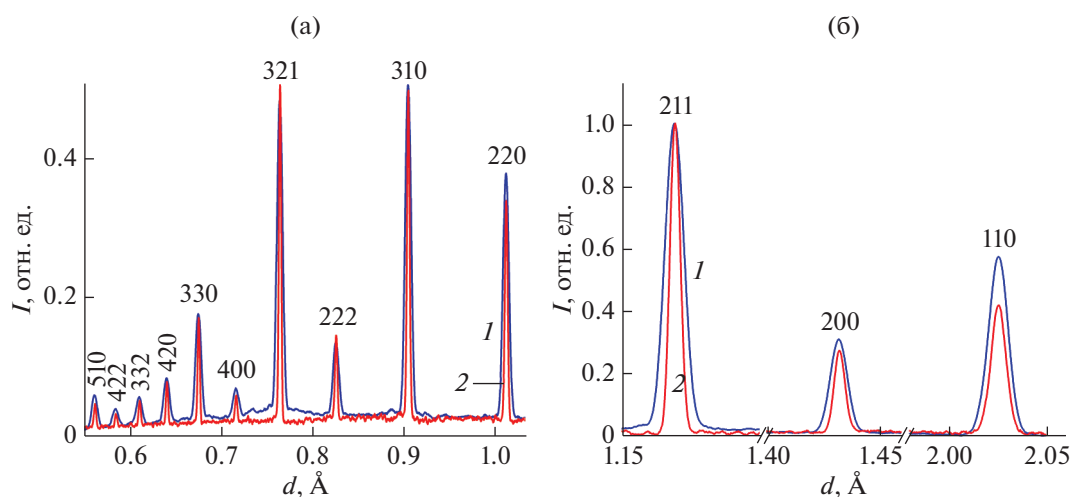


Рис. 7. Сравнение дифракционных RTOF-спектров высокого разрешения, измеренных на стандартном образце железа со старым (1) ($\Omega_{\max} = 2000$ об./мин) и новым (2) ($\Omega_{\max} = 6000$ об./мин) фурье-прерывателями, d_{hkl} : а – 0.55–1.033; б – 1.15–2.05 Å.

диске и зафиксированы прижимным ободом. На оси двигателя установлен инкрементальный магнитный энкодер для измерения скорости и ускорения диска, сигнал которого поступает на RTOF-анализатор. Существенным недостатком данного прерывателя является низкая максимальная скорость вращения ($\Omega_{\max} = 2000$ об./мин), обусловленная его конструкцией. Поэтому для улучшения разрешающей способности FSS был установлен новый фурье-прерыватель с максимальной скоростью вращения $\Omega_{\max} = 6000$ об./мин, ранее использовавшийся на дифрактометре ФСД [5] и прошедший модернизацию (рис. 6б). Новый

прерыватель установлен на платформе прецизионного перемещения, что позволяет при необходимости дистанционно вводить прерыватель в пучок и выводить из пучка и оперативно переключаться между режимами TOF (высокая светосила) и RTOF (высокое разрешение).

Результаты тестовых дифракционных экспериментов на стандартном образце железа показали, что после замены фурье-прерывателя разрешающая способность FSS значительно улучшилась из-за уменьшения временной компоненты функции разрешения (рис. 7, 8). Фактор выигрыша для полной функции разрешения FSS дости-

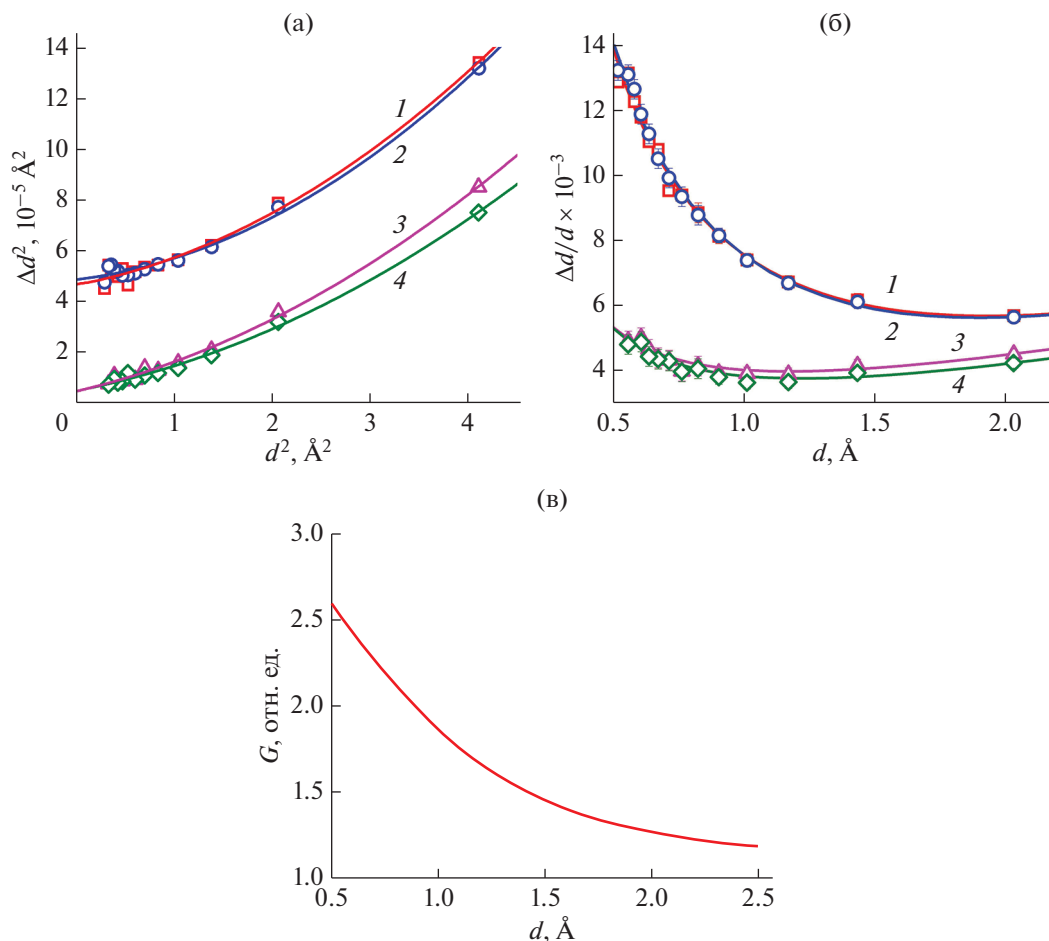


Рис. 8. Сравнение квадратов ширин пиков $\Delta d^2(d^2)$ (а) и функций разрешения $\Delta d/d$ (б), измеренных детекторами Ost (1, 3) и West (2, 4) на стандартном образце железа со старым ($\Omega_{\max} = 2000$ об./мин) и новым ($\Omega_{\max} = 6000$ об./мин) прерывателями. Фактор выигрыша $G = R_{(2000)}/R_{(6000)}$ для функции разрешения $\Delta d/d$ детектора Ost на FSS при увеличении максимальной скорости прерывателя от 2000 до 6000 об./мин (в).

гает значений $G = 2.6$ при $d_{hkl} = 0.5 \text{ \AA}$ и $G = 1.19$ при $d_{hkl} = 2.5 \text{ \AA}$ при увеличении максимальной скорости прерывателя от 2000 до 6000 об./мин.

Детекторная система

На FSS установлены два нейтронных детектора Ost и West при углах рассеяния $2\theta = \pm 90^\circ$, которые позволяют регистрировать дифракционные спектры с двумя взаимно перпендикулярными векторами рассеяния. Детекторы Ost и West собраны из 12 и 15 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) соответственно с наклеенными на них сцинтилляционными стеклами NE912 (^6Li). Для обеспечения высокого уровня разрешающей способности дифрактометра элементы каждого детектора должны быть расположены в пространстве в соответствии с временной фокусировкой. Поэтому для новой геометрии дифрактометра

FSS были проведены расчеты оптимальных положений в пространстве отдельных ФЭУ детекторов Ost и West, а также выполнены сборка элементов и защиты детекторов, подключение и выбор рабочих режимов обоих детекторов (рис. 9). Диапазон углов $\Delta(2\theta)$ в плоскости рассеяния составляет 8° для детектора Ost и 10° для детектора West. При необходимости перед детекторами могут устанавливаться радиальные коллиматоры с фокусным расстоянием $F = 230$ мм и пространственным разрешением 1 или 2 мм, обеспечивающие выделение малого рассеивающего объема в глубине исследуемого образца. Радиальные коллиматоры установлены на платформах перемещения, которые позволяют дистанционно вводить их в рассеянный пучок и выводить из пучка, что позволяет формировать необходимым образом рассеянный пучок нейтронов в эксперименте.

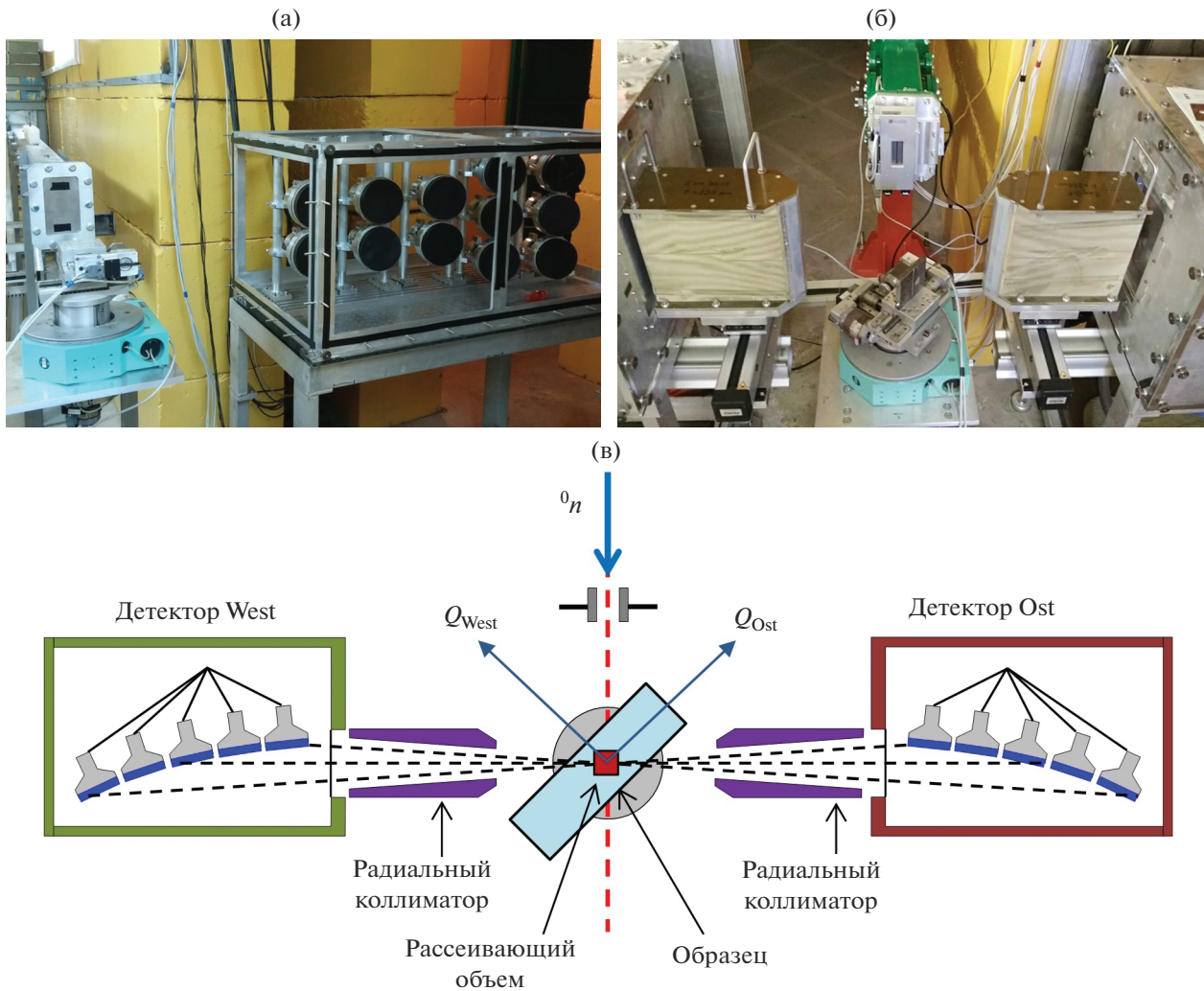


Рис. 9. Детектор Ost из 12 ФЭУ с демонтированной защитой (а). Место образца на дифрактометре FSS (б), видны: окончание зеркального нейтронвода с диафрагмой, гониометр с исследуемым образцом, детекторы Ost и West с установленными перед ними радиальными коллиматорами. Схема эксперимента по изучению остаточных напряжений в объемном образце на FSS с помощью двух детекторов при углах рассеяния $2\theta = \pm 90^\circ$ (в).

Система накопления данных и окружение образца

Так же, как и на остальных фурье-дифрактометрах, на FSS для накопления данных используют RTOF-анализаторы MPD-32, работающие в режиме регистрации всех событий в списочном режиме, что позволяет задавать необходимые параметры шкалы времени пролета и обеспечивать высокую точность электронной фокусировки для отдельных элементов детекторов [6, 7]. В качестве системы управления дифрактометром используется программный комплекс Sonix+ на платформе Windows (PC), позволяющий посредством набора команд (скриптов) на языке программирования Python гибко формировать программу

эксперимента. Табл. 1 содержит основные текущие параметры фурье-дифрактометра FSS.

В составе оборудования FSS имеется гониометр (X, Y, Z, Ω) для прецизионного позиционирования образца с нагрузочной способностью 60 кг и с дополнительной регулировкой по вертикали. Для контроля положения образца используют юстировочные линейные лазеры, визуализирующие направления падающего и рассеянного пучков нейтронов. Для фотофиксации положения образца при сканировании используют FullHD веб-камеру, которая автоматически сохраняет снимки перед стартом экспозиции нейтронного спектра при каждом изменении положения образца в эксперименте.

Таблица 1. Основные параметры дифрактометра FSS на канале № 13 реактора ИБР-2

Изогнутый нейтронный канал:	Зеркальный, покрытие Ni/Ti ($m = 2$)
– длина, м	17.32
– радиус кривизны, м	1900
Размер нейтронного пучка на месте образца (переменный), мм	$(0-10) \times (0-50)$
Расстояние замедлитель—образец, м	27.2
Расстояние прерыватель—образец, м	11.43
Фурье-прерыватель (диск):	Высокопрочный Al сплав
– внешний диаметр, мм	540
– ширина щели, мм	0.7
– число щелей	1024
– максимальная скорость вращения, об./мин	6000
– максимальная частота модуляции пучка, кГц	102.4
Ширина импульса тепловых нейтронов:	
– в режиме низкого разрешения, мкс	340
– в режиме высокого разрешения, мкс	9.8
Плотность потока нейтронов на образце (без прерывателя), $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	1.2×10^6
Детекторы ($2\theta = \pm 90^\circ$)	${}^6\text{Li}$, с временной фокусировкой
Разрешение детекторов $\Delta d/d$ ($d = 1-1.5 \text{ \AA}$)	4×10^{-3}
Диапазон d_{hkl} , Å	0.5–3.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки чувствительности прибора к сдвигам и уширению дифракционных пиков были проведены эксперименты по сканированию различных образцов со сварными швами. Малый измеряемый объем размером $2 \times 2 \times 10$ мм в глубине материала образца выделялся с помощью радиальных коллиматоров, установленных перед детекторами Ost и West. В первом эксперименте было проведено сканирование образца стальной пластины EBW толщиной 10 мм поперек сварного шва, выполненного с помощью электронно-лучевой сварки (рис. 10а). По результатам измерений для образца стальной пластины EBW получены распределения среднеквадратичных микродеформаций кристаллической решетки $\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle}$, оцененные из уширения дифракционных пиков по сравнению со стандартным образцом, а также распределения остаточных деформаций и напряжений, полученные из смещений пиков (рис. 10б–10г).

Во втором эксперименте было измерено распределение среднеквадратичной микродеформации в образце-свидетеле для ударных тестов по Шарпи, восстановленном с помощью электронно-лучевой сварки. Сканирование образца осу-

ществляли поперек сварных швов. Вклад среднеквадратичной микродеформации кристаллической решетки $\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle}$ в общую ширину пика оценивали по модифицированным зависимостям Вильямсона–Холла $\Delta d^2(d^2)$ с учетом анизотропного уширения пиков. Максимальные уровни микродеформации наблюдаются в центрах сварных швов ($\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle} \approx 3.4 \times 10^{-3}$ и $\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle} \approx 3.1 \times 10^{-3}$). На удалении от сварных швов уровень микродеформации спадает до величин, характерных для исходного стального материала ($\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle} \approx 1 \times 10^{-3}$) (рис. 11). Полученные данные достаточно хорошо согласуются с результатами, ранее полученными на дифрактометре ФСД [8, 9].

В целом, достигнутые характеристики FSS (точность определения сдвигов и уширения дифракционных пиков) примерно соответствуют уровню дифрактометра ФСД [10]. Тем не менее следует отметить, что по светосиле FSS существенно уступает ФСД из-за меньшего телесного угла нейтронных детекторов, что приводит к более длительным экспозициям (примерно в четыре раза) при регистрации дифракционных спектров.

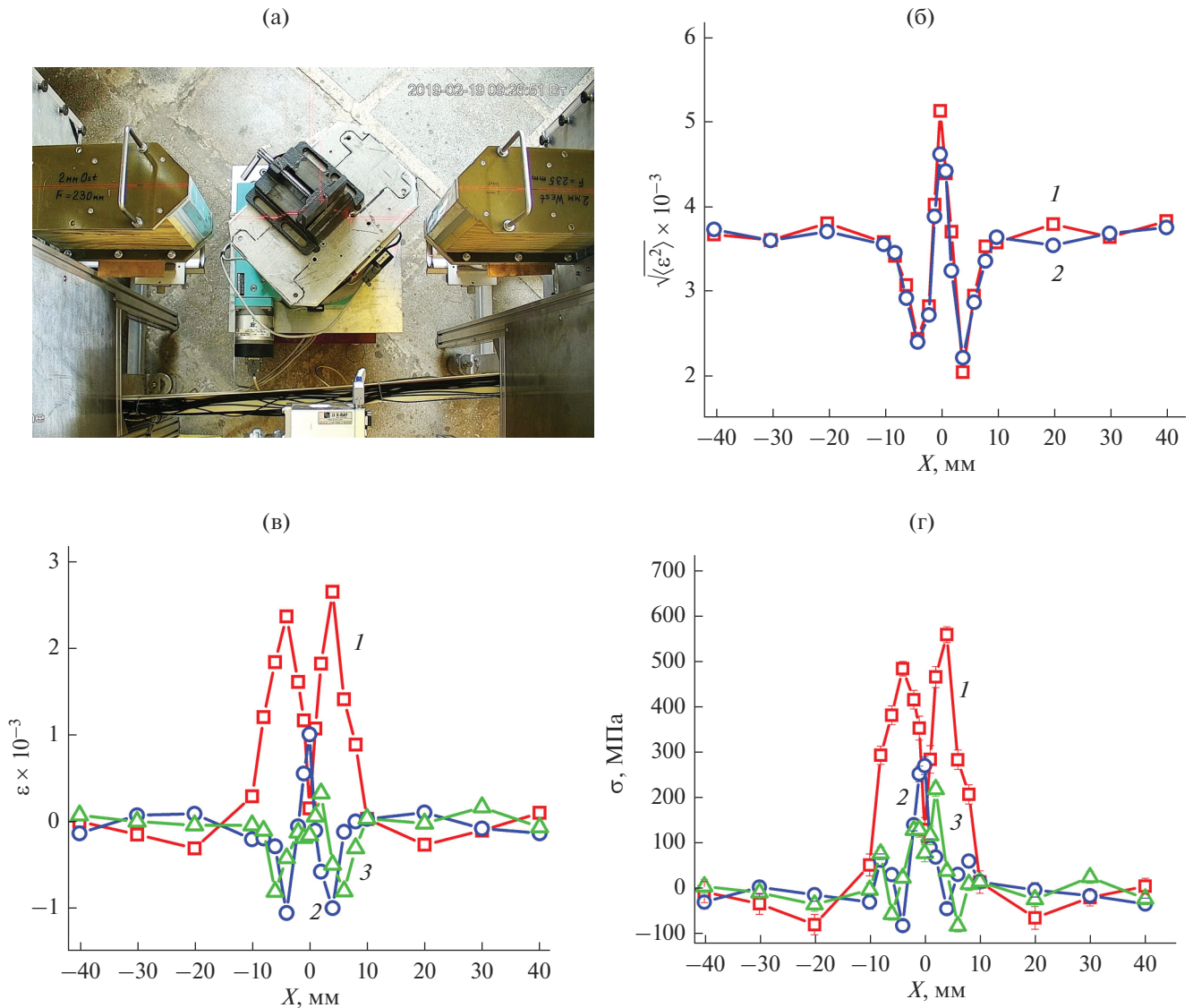


Рис. 10. Снимок веб-камеры образца стальной пластины EBW со сварным швом во время эксперимента на дифрактометре FSS (а): пересечение лучей лазеров указывает текущую точку измерения. Измеренные на образце EBW распределения: б – среднеквадратичных микродеформаций $\sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle}$ детекторами Ost (1), и West (2); в – остаточных деформаций ε_X (1), ε_Y (2), ε_Z (3); г – остаточных напряжений σ_X (1), σ_Y (2), σ_Z (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основные работы по адаптации и модернизации дифрактометра FSS на канале № 13 ИБР-2 выполнены успешно. Дальнейшее развитие FSS включает в себя работы по увеличению светосилы дифрактометра, снижению уровня фона, улучшению параметров фурье-анализа и оснащению дифрактометра дополнительными устройствами (нагрузочными машинами, печами и другими устройствами) для задания внешних условий на образце.

В частности, приоритетной является задача по развитию детекторной системы и увеличению светосилы дифрактометра. Одним из вариантов является создание широкоапертурной детекторной системы на основе сцинтиллятора ZnS(Ag) с комбинированным использованием электронной и временной фокусировок, аналогичной 90°-детекторам ASTRA на ФСД [11]. Данная схема позволяет относительно легко увеличить телесный угол детекторной системы при сохранении высокого разрешения по межплоскостному расстоянию. Одним из недостатков данного ва-

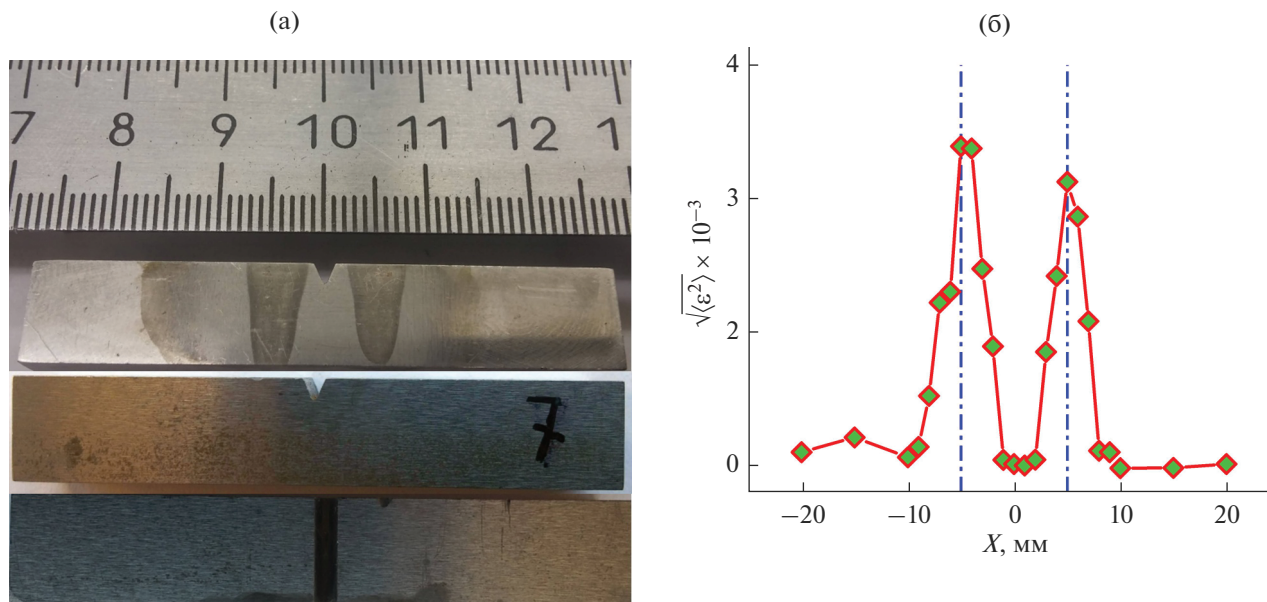


Рис. 11. Образец-свидетель для ударных тестов по Шарпи, восстановленный с помощью электронно-лучевой сварки (а), видны: два сварных шва и надрез в середине образца. Измеренное распределение среднеквадратичной микродеформации $\sqrt{\langle \epsilon^2 \rangle}$ при сканировании поперек сварных швов (б), вертикальные штрихпунктирные линии указывают центры сварных швов.

рианта является довольно большой вклад геометрической компоненты в функцию разрешения из-за малого скользящего угла падения нейтронов на поверхность сцинтиллятора, что приводит к заметному влиянию эффекта уменьшения амплитуды пика с увеличением скорости прерывателя.

Альтернативным вариантом развития детекторной системы является создание сцинтилляционного (на основе ZnS(Ag) или ^6Li -стекла) позиционно-чувствительного детектора (ПЧД) высокого разрешения для накопления данных в RTOF-режиме, что представляет интерес для дальнейшего развития корреляционной фурье-дифрактометрии с учетом перспектив использования RTOF-метода на новом нейтронном источнике ЛНФ. Предварительные оценки показывают, что детектор с позиционной чувствительностью около 2 мм при угле рассеяния $2\theta = 90^\circ$ может улучшить разрешение фурье-дифрактометра примерно в два раза за счет соответствующего уменьшения геометрического вклада в функцию разрешения. Следует заметить, что применение подобного ПЧД потребует также разработки новой версии электроники корреляционного анализа в списочном режиме (блок MPD), которая будет обладать большим быстродействием, большим количеством детекторных входов и дополнительными возможностями по обработке детекторных сигналов. Помимо ожидаемого увеличения светосилы и разрешения дифрактометра

детекторы такого типа также могут существенно расширить экспериментальные возможности фурье-дифрактометров (исследование монокристаллов, ориентационных эффектов в материалах). Один из первых прототипов такого детектора с пространственным разрешением около 0.45 мм и эффективностью регистрации тепловых нейтронов ($\lambda = 2.5 \text{ \AA}$) около 10% предложен в [12]. Впоследствии подобные ПЧД на основе сцинтиллятора ZnS(Ag) со значительно улучшенными характеристиками были изготовлены и установлены на нейтронных дифрактометрах по времени пролета SENJU [13, 14] и TAKUMI [15] в научном центре J-PARC (Токай, Япония).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.П. Булкину А.А. Кустову, А.Н. Черникову за помощь в модернизации и наладке дифрактометра FSS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schröder J., Kudryashev V.A., Keuter J.M. et al. // J. Neutron Res. 1994. V. 2. P. 129. <https://doi.org/10.1080/10238169408200025>
2. Bokuchava G. // Crystals. 2018. V. 8. P. 318. <https://doi.org/10.3390/cryst8080318>
3. Балагуров А.М., Бобриков И.А., Бокучава Г.Д. и др. // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46. № 3. С. 453. http://www1.jinr.ru/PePan/v-46-3/01_balag.pdf

4. *Bokuchava G., Kruglov A., Papushkin I. et al.* Fourier Diffractometer FSS at the IBR-2 Pulsed Reactor // Proc. Eur. Conf. on Neutron Scattering (ECNS 2019). Saint Petersburg, 2019. Book of Abstracts. P. 442. <http://ecns2019.com>
5. *Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kuzmin E.S. et al.* // Z. Kristallogr. 2006. Suppl. Iss. № 23. P. 217. <https://doi.org/10.1524/9783486992526-038>
6. *Bokuchava G.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 964. P. 163770. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163770>
7. *Bokuchava G.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 983. P. 164612. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164612>
8. *Bokuchava G., Petrov P.* // Metals. 2020. V. 10. Iss. 5. P. 632. <https://doi.org/10.3390/met10050632>
9. *Бокучава Г.Д., Петров П., Папушкин И.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 11. С. 22. <https://doi.org/10.7868/S0207352816110032>
10. *Bokuchava G.D., Papushkin I.V., Tamonov A.V. et al.* // Rom. J. Phys. 2016. V. 61. № 3–4. P. 491. http://www.nipne.ro/rjp/2016_61_3-4/0491_0505.pdf
11. *Kuzmin E.S., Balagurov A.M., Bokuchava G.D. et al.* // J. Neutron Res. 2002. V. 10. № 1. P. 31. <https://doi.org/10.1080/10238160290027748>
12. *Горин А., Герар Б., Киянаги Й. и др.* Визуализация потоков нейтронов с помощью позиционно-чувствительного детектора на спектросмещающих волокнах. Препринт ИФВЭ 2002-41. Протвино, 2002. 7 с. <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2002/02-41-w.htm>
13. *Kawasaki T., Nakamura T., Toh K. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 735. P. 444. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.057>
14. *Nakamura T., Toh K., Ebine M. et al.* A Large Area Position-Sensitive Scintillation Neutron Detector for Upgrading SENJU Diffractometer // Proc. IEEE Nuclear Science Symp. and Medical Imaging Conf. (NSS/MIC). Manchester, 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059981>
15. *Nakamura T., Kawasaki T., Toh K. et al.* // JPS Conf. Proc. 2021. V. 33. P. 011097. <https://doi.org/10.7566/JPSCP.33.011097>

Neutron Fourier Stress Diffractometer FSS at IBR-2 Reactor: Results of Upgrade and Further Development Prospects

**G. D. Bokuchava^{1, *}, A. A. Kruglov¹, I. V. Papushkin¹, V. V. Zhuravlev¹, T. B. Petukhova¹,
S. M. Murashkevich¹, L. A. Truntova¹, N. D. Zernin¹**

¹*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia*

**e-mail: Gizo.Bokuchava@jinr.ru*

Neutron Fourier diffractometer FSS (Fourier Strain Scanner) was used in 1990–2010 at the stationary reactor FRG-1 at the GKSS research center (Geesthacht, Germany) to study residual stresses in structural materials and industrial products. In 2010, the FRG-1 reactor was finally decommissioned. In this regard, the FSS diffractometer in 2014 was transported to the Frank Laboratory of Neutron Physics of JINR (Dubna, Russia) and was located on beamline No. 13 of the pulsed reactor IBR-2. The results of the instrument upgrade and further prospects for its development are presented.

Keywords: neutron diffraction, Fourier diffractometer, reverse time-of-flight method, residual stress, microstrain.