УДК 620.179.15

ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕЖДУНАРОДНОМ СТАНДАРТНОМ ОБРАЗЦЕ VAMAS НА ДИФРАКТОМЕТРЕ СТРЕСС РЕАКТОРА ИР-8

© 2019 г. И.Д. Карпов[1,2,*], В.Т. Эм[1,], В.В. Сумин[***]**

[1]*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, 1*
[2]*Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Россия 119333 Москва, Ленинский пр-т, 59*
*E-mail: *karpov_id@nrcki.ru; **em_vt@nrcki.ru; ***sumin@nf.jinr.ru*

Поступила в редакцию 30.01.2019; после доработки 15.02.2019;
принята к публикации 15.02.2019

Представлены результаты измерения остаточных деформаций/напряжений в международном стандартном образце VAMAS на нейтронном дифрактометре СТРЕСС, установленном на горизонтальном канале реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт». Результаты измерений хорошо согласуются с расчетными значениями напряжений. Измерения показали, что дифрактометр СТРЕСС по своим возможностям измерения напряжений сравним с современными дифрактометрами на более мощных реакторах.

Ключевые слова: внутренние напряжения, остаточные напряжения, деформации, нейтронная дифракция, стресс-дифрактометр, стандартный образец.

DOI:10.1134/S0130308219040092

1. ВВЕДЕНИЕ

Из существующих неразрушающих методов определения остаточных деформаций (напряжений) только два метода имеют международные стандарты: нейтронной [1] и рентгеновской дифракции [2], причем последний пригоден только для определения двухосных напряжений на плоской поверхности изделия. Благодаря большой проникающей способности нейтронов в большинстве материалов метод нейтронной дифракции является в настоящее время единственным методом, способным измерить тензор деформаций/напряжений внутри массивного изделия толщиной в несколько десятков миллиметров (50 мм в стали) [3]. Поэтому в последние 10—15 лет во всех ведущих нейтронных центрах были созданы специализированные стресс-дифрактометры [4—6]. В 2016 г. в НИЦ «Курчатовский институт» на реакторе ИР-8 был запущен нейтронный дифрактометр для исследования внутренних деформаций/напряжений СТРЕСС [7—8].

Для сравнения различных нейтронных стресс-дифрактометров и оценки возможностей нейтронного метода для измерения остаточных напряжений, в рамках международной программы VAMAS (Versailles Project on Advanced Material and Standards), был создан стандартный образец из алюминиевого сплава Al7050, который был измерен в 11 нейтронных центрах Европы и США [9].

Целью настоящей работы было провести измерение напряжений в стандартном международном образце VAMAS на нейтронном дифрактометре СТРЕСС для оценки возможностей прибора.

2. НЕЙТРОН-ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Нейтронный метод измерения напряжений основан на измерении дифракции от сравнительно маленького (1—300 мм^3) пробного объема («gauge volume») внутри массивного образца. Выделение пробного объема обычно осуществляется с помощью щелей (Щ1, Щ2) в хорошо поглощающих тепловые нейтроны кадмиевых (Cd) пластинах, установленных в падающем и рассеянном пучках нейтронов (рис.1).

В стресс-дифрактометрах на стационарных реакторах, как правило, используется фиксированная длина волны нейтронов и измеряется один дифракционный пик. Согласно закону Вульфа—Брэгга:

$$2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} = \lambda ,$$

где d_{hkl} — межплоскостное расстояние отражающих плоскостей кристаллической решетки с миллеровскими индексами hkl; λ — длина волны нейтронов; θ_{hkl} — брэгговский угол рассеяния. Из закона следует, что при фиксированной длине волны нейтронов λ, межплоскостное расстояние d

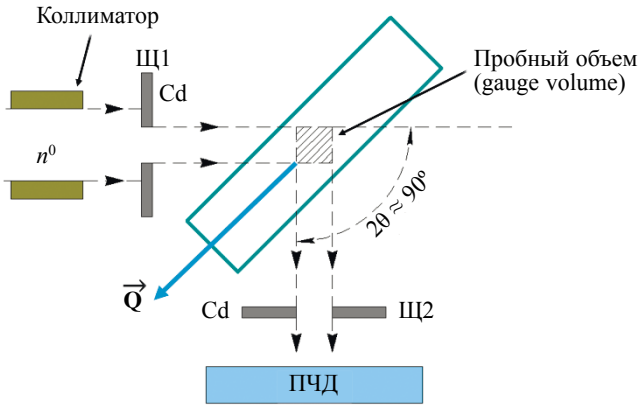

Рис.1. Схема нейтрон-дифракционного метода измерения внутренних напряжений на стационарном реакторе. При измерении компоненты деформации ε_x (ε_y, ε_z) образец устанавливается так, чтобы соответствующее главное направление **x** (**y**, **z**) совмещалось с вектором рассеяния **Q**.

(здесь и далее миллеровские индексы опущены) однозначно определяется угловым положением дифракционного пика 2θ. Деформация в направлении нормали к отражающим плоскостям (направлении вектора рассеяния нейтронов **Q**) определяется по смещению дифракционного пика от положения, определяемого межплоскостным расстоянием в недеформированном материале:

$$\varepsilon = (d - d_0)/d_0 \approx -\operatorname{ctg}\theta_0\,(\theta - \theta_0),$$

где d и d_0 — межплоскостные расстояния в деформированном и недеформированном состояниях материала, а 2θ и $2\theta_0$ — соответствующие углы рассеяния. Смещение дифракционного пика можно измерить точнее и быстрее, если использовать позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) нейтронов.

Деформация является тензором второго ранга, поэтому чтобы определить тензор деформации необходимо в каждой точке образца измерить три компоненты тензора деформации ε_x, ε_y, ε_z вдоль трех взаимно перпендикулярных главных направлений **x, y, z** в образце при трех ориентациях образца. Далее, пользуясь обобщенным законом Гука, вычисляются компоненты тензора напряжения σ_x, σ_y, σ_z по формулам (1):

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= E\,[(1-2\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)]/[(1+\nu)(1-2\nu)];\\
\sigma_y &= E\,[(1-2\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)]/[(1+\nu)(1-2\nu)];\\
\sigma_z &= E\,[(1-2\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)]/[(1+\nu)(1-2\nu)],
\end{aligned} \tag{1}$$

где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона.

Упругие постоянные E и ν различны для разных плоскостей кристалла (*hkl*). Поэтому, если деформации измеряются с помощью отражений от плоскостей (*hkl*), то нужно использовать соответствующие значения E_{hkl} и ν_{hkl}. Например, для алюминиевого сплава Al7050, для плоскостей (113) модуль Юнга E_{113} = 71,3 ГПа и коэффициент Пуассона ν_{113} = 0,34 [9].

3. НЕЙТРОННЫЙ ДИФРАКТОМЕТР СТРЕСС

Нейтронный дифрактометр СТРЕСС для исследования внутренних деформаций/напряжений установлен на горизонтальном экспериментальном канале № 3 (ГЭК-3) исследовательского реактора ИР-8 (максимальная мощность 8МВт) НИЦ «Курчатовский институт». Особенностью этого прибора (рис. 2) является то, что в нем, впервые в стресс-дифрактометрии, использован двойной монохроматор PG002/Si220, состоящий из пластины плоского пиролитического графита с отражающей плоскостью (002) и фокусирующего в горизонтальной плоскости изогнутого идеального монокристалла кремния с отражающей плоскостью (220).

Использование двойного монохроматора позволило уменьшить уровень фона и расположить монохроматор и прибор ближе к выходу из канала реактора, что повысило светосилу прибора [7—8]. Монохроматор выводит монохроматический пучок нейтронов с длиной волны λ = 1,55 Å, которая позволяет увеличить глубину проникновения нейтронов в ферритной стали [9] и удобна

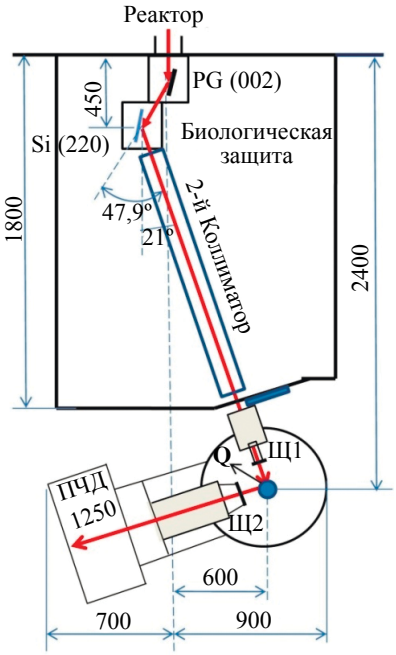

Рис. 2. Схема дифрактометра СТРЕСС: PG — пиролитический графит; Щ1, Щ2 — кадмиевые щели на падающем и отраженном пучках; ПЧД — позиционно-чувствительный детектор.

для измерения напряжений для большинства металлов, используемых в промышленности [7]. Используется ПЧД с гелиевым наполнением с рабочим окном 250(В)×150(Ш) мм^2 и ценой одного канала 0,0261°. На угле рассеяния 2θ = 90° угловое разрешение $\Delta d/d = 3\cdot10^{-3}$. Кадмиевые щели (Щ1, Щ2), выделяющие пробный объем в центре дифрактометра, устанавливаются соответственно на подвижных коллиматорах в падающем и отраженном пучках нейтронов. Ширину щелей можно варьировать в пределах 0,5—5 мм, а высоту в пределах 0,5—30 мм. Расстояние от центра дифрактометра до кадмиевых щелей может изменяться в пределах 0—300 мм, что позволяет установить образец размерами ~ 500мм. На столе дифрактометра установлен сканер, который позволяют перемещать образец в трех взаимно перпендикулярных направлениях **X**, **Y**, **Z**. На верхней платформе сканера установлена гониометрическая головка, которая позволяет совместить направления **x, y, z** системы координат в образце с направлениями сканера **X, Y, Z**. Максимальный вес образца — 50 кг.

4. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕЖДУНАРОДНОМ ОБРАЗЦЕ VAMAS

Образец VAMAS диаметром 50 мм и высотой 50 мм (рис. 3) изготовлен из алюминиевого сплава Al7050. Остаточные деформации и соответствующие напряжения в образце создаются за счет тугой посадки поршня (диаметр 25,015 мм, высота 50 мм) в цилиндр (внутренний диаметр 24,985 мм, внешний диаметр 50 мм, высота 50 мм). Поршень, охлажденный до температуры жидкого азота, быстро вынимался из жидкого азота и вставлялся без приложения силы в цилиндр, выдержанный при температуре 50°С. Из того же алюминиевого листа, который использовался для изготовления цилиндра и поршня, был изготовлен еще один поршень (рис. 3*а*) для измерения межплоскостных расстояний d_0 в ненапряженном состоянии.

а *б*

Рис. 3. Стандартный образец VAMAS и d_0-образец (*а*); направления аксиальной (ε_{axial}), радиальной (ε_{radial}) и тангенциальной (ε_{hoop}) компонент деформации (*б*).

Главными направлениями в образце VAMAS были выбраны радиальное (radial), тангенциальное (hoop) и аксиальное (axial), как показано на рис. 3*б*. Измерялись соответствующие компоненты тензора деформации ε_{radial}, ε_{axial} и ε_{hoop} (рис. 4).

В падающем и дифрагированных пучках нейтронов использовались кадмиевые щели шириной 2 мм, установленные, соответственно, на расстоянии 40 и 50 мм от центра дифрактометра. Высота пучка составляла 10 мм (GV = 2×2×10 мм^3) при измерении радиальной и тангенциальной компоненты и 3 мм (GV = 2×2×3 мм^3) при измерении аксиальной компоненты. Согласно рекомендациям [9], для измерений использовали отражение 311 ГЦК-решетки алюминия, которое мало-

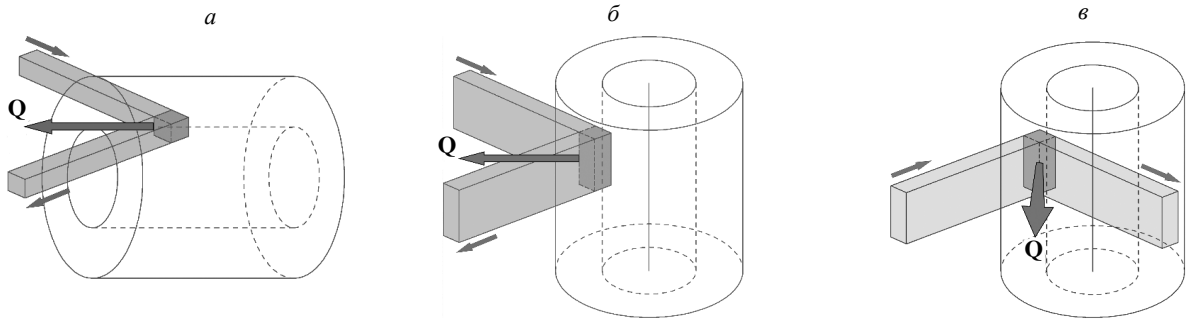

Рис. 4. Схема измерения компонент деформации в образце VAMAS:
а — аксиальная (ε_{axial}); *б* — радиальная (ε_{radial}); *в* — тангенциальная (ε_{hoop}) компоненты деформации; **Q** — вектор рассеяния.

чувствительно к микроискажениям. Измерения проводили на расстоянии 20 мм от торца образца вдоль диагонали в точках с координатами r = 0, ±5, ±10, ±11,25, ±12, ±12,5, ±13, ±14, ±17, ±20, ±23, ±25 мм. Из-за сильной текстуры интенсивность отражения 311 при измерении аксиальной компоненты низка. Поэтому, обычно при измерении аксиальной компоненты используют отражение 220. В этом случае, из-за отличия упругих постоянных для плоскостей (311) и (220) значения напряжений могут отличаться от значений, получаемых при измерении всех трех компонент используя одно отражение 311 [11]. Светосила дифрактометра СТРЕСС была достаточна, чтобы измерить аксиальную компоненту используя отражение 311. Для измерения деформации с статистической погрешностью ±100 με (1με = 10^{-6}) время измерения аксиальной компоненты было ≈ 15 мин, а радиальной и тангенциальной компонент в центре образца ≈ 2 мин. Времена сравнимы с временами измерения этого же образца на стресс-дифрактометре на реакторе ХАНАРО мощностью 30 МВт [11], который позволяет измерить напряжения в стальных пластинах толщиной 50 мм [12]. Экспериментально измеренные значения деформаций вдоль диаметра сборки цилиндр — поршень приведены на рис. 5. Значения напряжений, рассчитанные по формулам (1), приведены на рис.6.

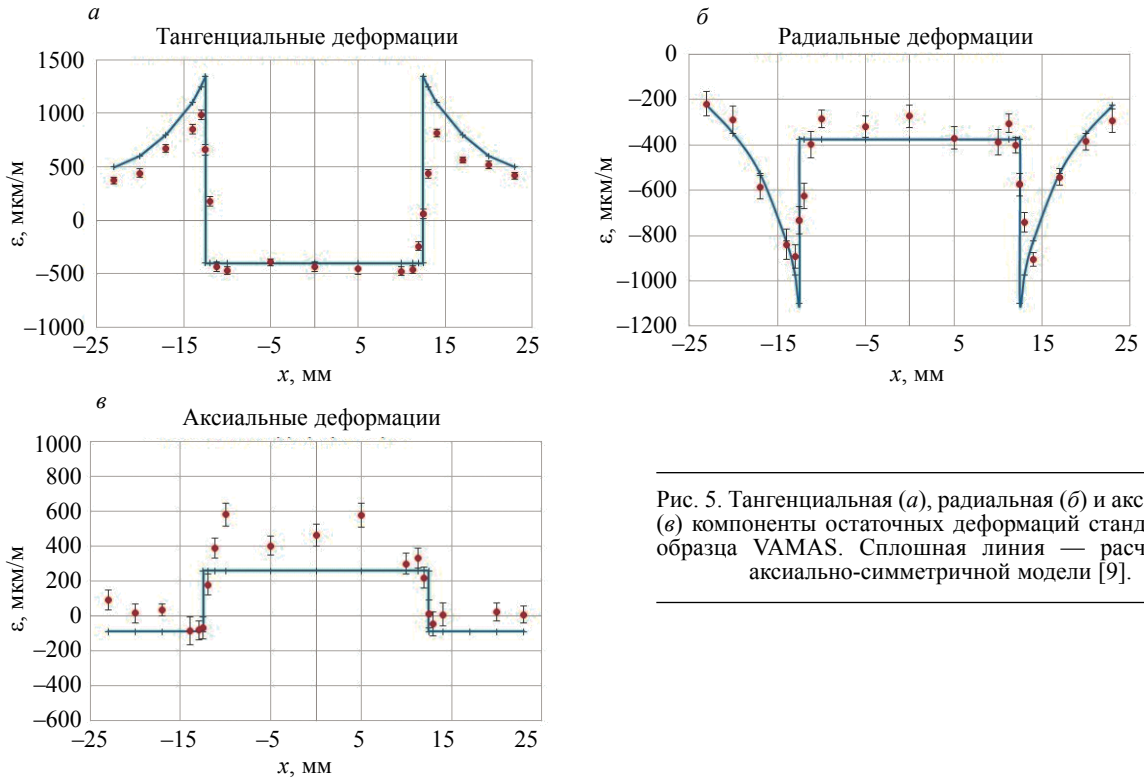

Рис. 5. Тангенциальная (*а*), радиальная (*б*) и аксиальная (*в*) компоненты остаточных деформаций стандартного образца VAMAS. Сплошная линия — расчеты по аксиально-симметричной модели [9].

Результаты измерений в пределах ошибок эксперимента согласуются с данными, полученными другими нейтронными стресс-дифрактометрами на более мощных реакторах по программе

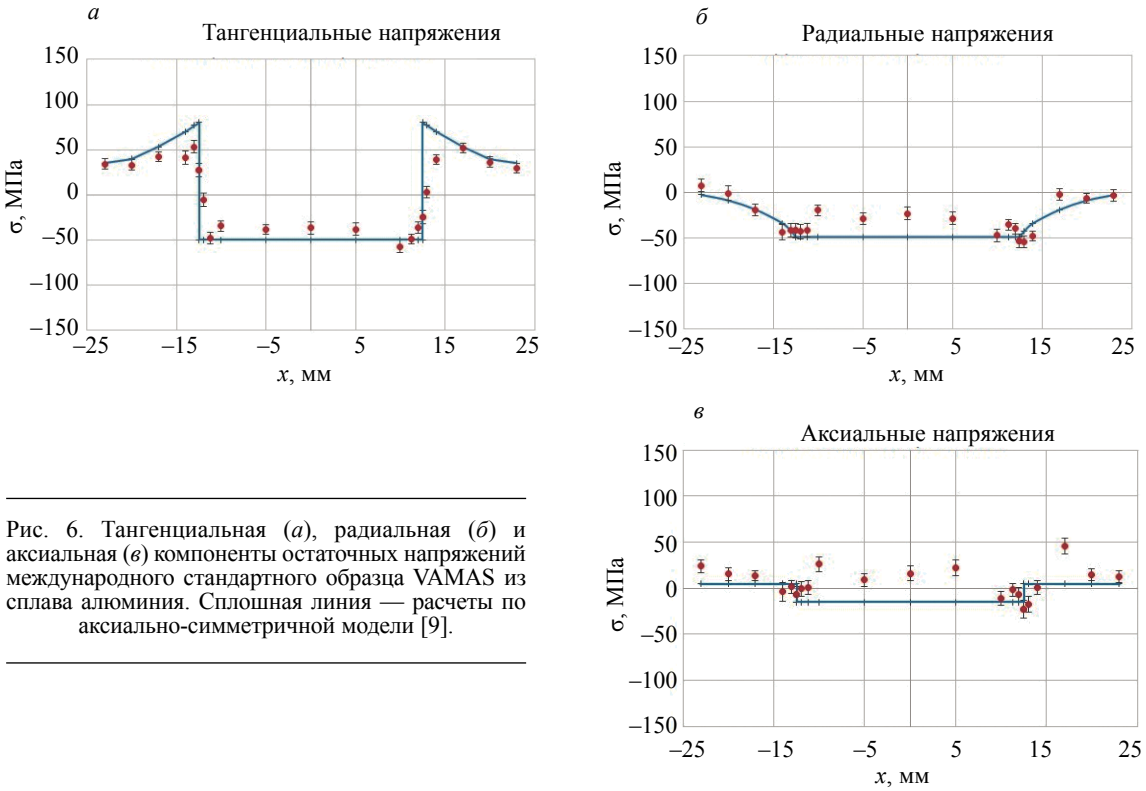

Рис. 6. Тангенциальная (*а*), радиальная (*б*) и аксиальная (*в*) компоненты остаточных напряжений международного стандартного образца VAMAS из сплава алюминия. Сплошная линия — расчеты по аксиально-симметричной модели [9].

VAMAS TWA 20 [9]. Отклонения от теоретических кривых обусловлены в первую очередь сильной текстурой образца, изготовленного из листового проката и не прошедшего термическую обработку [9].

ВЫВОДЫ

Таким образом, на реакторе ИР–8 НИЦ «Курчатовский институт» создан современный высокосветосильный нейтронный дифрактометр СТРЕСС для исследования напряженно-деформированного состояния в массивных материалах и изделиях.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1612 от 05.07.2018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Non-destructive testing — Standard test method for determining residual stress by neutron diffraction. Technical Specification, ISO/TS 21432. First edition 2005-07-15.

2. Non-destructive testing — Test method for Residual Stress by X-ray diffraction. European Standard Working Document, PrEN 15305. 2005.

3. *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. 401 p.

4. *Pirling T., Bruno G., Withers P.J.* SALSA — A new instrument for strain imaging in engineering materials and components // Mater. Sci. Eng. A. 2006. V. 437. P. 139—144.

5. *Hofman M., Schneider R., Seidl G. A., Rebelo-Kornmeier J., Wimproi R. C., Garbe U., Brokmeier H. G.* The new materials science diffractometer STRESS-SPEC at FRM-II // Physica B. 2006. V. 385—386. Part 2. P. 1035—1037

6. *Kirstein O., Garbe U., Luzin V.* Kowari — OPAL's New Stress Diffractometer for the Engineering Community: Capabilities and First Results // Mater. Sci. Forum. 2010. V. 652. P. 86—91.

7. *Эм В.Т., Балагуров А.М., Глазков В.П., Карпов И.Д., Микула П., Мирон Н.Ф., Соменков В.А., Сумин В.В., Шароун Я., Шушунов М.Н.* Двойной монохроматор для нейтронной стресс-дифрактометрии // ПТЭ. 2017. № 4. С. 75—81. [Em V.T., Balagurov A.M., Glazkov V.P., Karpov I.D., Mikula P., Miron N.F., Somenkov V.A., Sumin V.V., Šaroun J., Shushunov M.N. A double-crystal monochromato for neutron stress diffractometry, Instruments and Experimental Techniques. V. 60, issue 4, 2017, P. 526—532. doi: 10.1134/S0020441217040042.]

8. *Em V.T., Karpov I.D., Somenkov V.A., Glazkov V.P., Balagurov A.M., Sumin V.V., Mikula P., Šaroun J.* Residual stress instrument with double-crystal monochromator at research reactor IR-8 // Physica B: Condensed Matter. 2018. https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.02.042

9. Neutron diffraction measurements of residual stress in shrink-fit ring and plug. VAMAS Report #38, ISSN 1016-2186, January 2000.

10. *Woo W., Em V., Seong B.S., Shin E., Mikula P., Joo J., Kang M.H.* Effect of wavelength-dependent attenuation on neutron diffraction stress measurements at depth in steels // J. Appl. Cryst. 2011. V. 44. P. 747—754.

11. *Lee C.H., Moon M.K., Em V.T., Choi E.H., Cheon J.K., Nam U.V., Kong K.N.* The residual stress instrument with optimized Si (220) monochromator and position-sensitive detector at HANARO // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2005. V. 545. P. 480—489.

12. *Woo W., Em V., Mikula P., An G.B., Seong B.S.* Neutron diffraction measurements of residual stress in a 50 mm thick weld // Mater. Sci. Eng. A. 2011. V. 528. P. 4120—4124.