

УДК 538.945, 620.192

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОВОДАХ ВТСП-2 С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННОЙ СТРЕСС-ДИФРАКТОМЕТРИИ

А.В. Иродова, И.Д. Карпов, В.С. Круглов, В.Е. Крылов, С.В. Шавкин, В.Т. Эм

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Основной задачей при создании высокопрочных кабелей на основе проводов ВТСП-2 для термоядерных установок является максимизация устойчивости кабеля к воздействию механических напряжений. Её решение напрямую связано с прочностью проводов ВТСП-2, которую определяет несущая стальная лента-подложка. Поэтому диагностика напряжений в несущей ленте имеет особое значение. Единственным прямым методом измерения внутренних деформаций и остаточных напряжений внутри материала является нейтронная стресс-дифрактометрия. Однако её применение к тонким стальным лентам ограничено интенсивностью нейтронного пучка. В настоящей работе на примере ленты из нержавеющей стали AISI 310S толщиной 100 мкм, используемой в качестве подложки при изготовлении провода ВТСП-2 в НИЦ «Курчатовский институт», показано, что это ограничение можно обойти, если измерения проводить на стопках лент, подобных ВТСП-стекам в высокопрочных кабелях. Применяв такой подход, мы с помощью нейтронной стресс-дифрактометрии провели диагностику ленты AISI 310S в состоянии поставки, после механической полировки и после нанесения буферного слоя YSZ. Отмечена высокая чувствительность метода, позволившего определить серповидную деформацию ленты и степень её растяжения после механической полировки, измерить остаточные напряжения, возникающие при нанесении слоя YSZ. Полученные результаты показывают, что нейтронная стресс-дифрактометрия имеет хорошие перспективы для диагностики внутренних деформаций и напряжений в ВТСП-стеках высокопрочных кабелей.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, провод ВТСП-2, несущая лента AISI 310S, нейтронная стресс-дифрактометрия.

## DETERMINATION OF INTERNAL DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS IN WIRES HTSC-2 USING NEUTRON STRESS DIFFRACTOMETRY

A.V. Irodova, I.D. Karpov, V.S. Kruglov, V.E. Krylov, S.V. Shavkin, V.T. Em

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The main task in creating high-current cables based on HTSC-2 wires for thermo-nuclear installations is to maximize resistance of the cable to mechanical stress. Its solution is directly related to the strength of the HTSC-2 wires, which is determined by the supporting steel tape-substrate. Therefore, the diagnosis of stresses in the carrier tape is of particular importance. The only direct method for measuring internal deformation and residual stress inside a material is neutron stress diffractometry. However, its application to thin steel tapes is limited by the intensity of the neutron beam. In this work, using the example of a tape made of AISI 310S stainless steel with a thickness of 100 microns, which is a substrate in the manufacture of HTSC-2 wires at NRC «Kurchatov Institute», we shown that this restriction can be circumvented if measurements are carried out on stacks of tapes similar to HTSC stacks in high-current cables. Taking this approach, we used neutron stress diffractometry to diagnose the AISI 310S tape in the delivery state, after mechanical polishing and after applying the YSZ buffer layer. The high sensitivity of the method was noted, which made it possible to determine the crescent-shaped deformation of the tape and the degree of its stretching after mechanical polishing, to measure the residual stresses caused by applying the YSZ layer. The results obtained show that neutron stress diffractometry has good prospects for diagnosing internal deformation and stress in HTSC stacks of high-current cables.

**Key words:** residual stress, HTSC-2 wire, AISI 310S carrier tape, neutron stress diffractometry.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-45-1-54-59

### ВВЕДЕНИЕ

Ленточные высокотемпературные сверхпроводящие провода второго поколения (ВТСП-2) на основе сверхпроводящей керамики  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (R — редкоземельный металл или/и иттрий), обычно обозначаемой как REBCO или YBCO (рис. 1, а) [1], предлагается использовать при создании электромагнитных



Рис. 1. Базовая архитектура провода ВТСП-2 [1]: 1 — несущая лента-подложка из нержавеющей стали толщиной 100 мкм (на рисунке толщина занижена почти в 50 раз); 2 — основной буферный слой YSZ, ~2 мкм; 3 — дополнительный буферный слой  $\text{CeO}_2$ ; 4 — сверхпроводник YBCO (REBCO), 1–2 мкм; 5 — защитный слой серебра, <1 мкм; 6 — медный стабилизирующий одно- или двусторонний слой, 25 мкм (а); конструкция высокопрочного кабеля для термоядерных установок [2] (б) с пятью витыми стеками (стопками) из тридцати проводов ВТСП каждый (в)

систем для термоядерных установок будущего. С этой целью разрабатываются и испытываются высоко-точные кабели с десятками проводов ВТСП-2, собранных в стопки (стеки) (см. рис. 1, б) [2]. Основная задача состоит в том, чтобы максимизировать не столько полный ток кабеля, сколько критические механические напряжения для ВТСП-стеков как наиболее важные в плане риска [3]. Решение этой задачи напрямую связано с прочностью проводов ВТСП-2, которую определяет несущая лента-подложка (см. рис. 1). Поэтому диагностика внутренних деформаций и напряжений в несущей ленте приобретает особое значение.

Единственным прямым методом определения деформаций и напряжений внутри материала, в том числе *in situ* является нейтронная стресс-дифрактометрия [4]. Однако её применение к тонким лентам ограничено интенсивностью нейтронного пучка из-за требования, чтобы исследуемый объём находился полностью внутри материала [5]. В работе [6] мы показали, что это ограничение можно обойти, если использовать стопки лент, подобные ВТСП-стекам в высоко-точных кабелях. Далее приводятся результаты определения с помощью нейтронной стресс-дифрактометрии внутренних деформаций и напряжений в ленте из нержавеющей стали AISI 310S толщиной 100 мкм и шириной 4 мм, которая используется при изготовлении провода ВТСП-2 в НИЦ «Курчатовский институт» [7].

### МЕТОДИКА

Работа выполнена на нейтронном дифрактометре СТРЕСС [8] в НИЦ «Курчатовский институт». Методика эксперимента, подготовки образцов и обработки экспериментальных данных подробно изложена в [6]. Упомянем кратко её основные моменты, необходимые для понимания представленных результатов.

Под остаточными напряжениями в ленте AISI 310S понимаются внутренние макронапряжения. Макронапряжения определяются по вызываемой ими деформации, которую измеряют экспериментально по положению дифракционных отражений.

Деформация измеряется на пробных объёмах, которые должны полностью находиться внутри образца. Поскольку толщина ленты 0,1 мм в 5 раз меньше минимально допустимой ширины пучка нейтронов 0,5 мм, с точки зрения его интенсивности и связанной с ней длительности эксперимента использование одинарной ленты в качестве образца невозможно. Поэтому лента складывается в стопку [6]. Единый кусок ленты разрезается как минимум на 10 сегментов, которые последовательно укладываются друг на друга (рис. 2). Из соображений максимально возможного пространственного разрешения (при минимально приемлемой интенсивности пучка нейтронов) измерения деформации проводятся в пяти точках по ширине пакета на пробных объёмах с сечением 0,5×0,5 мм. Деформация определяется как

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0},$$

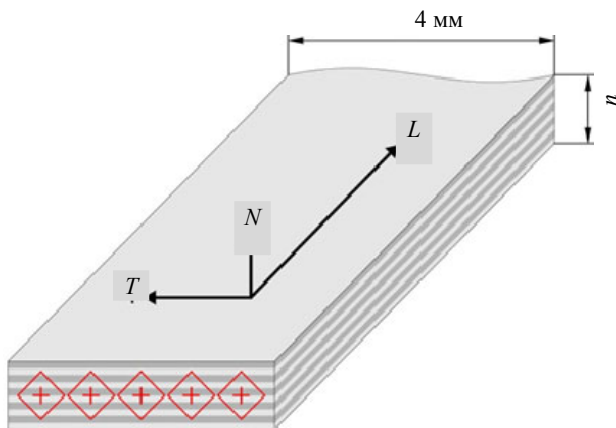


Рис. 2. Образец ленты AISI 310S, исследованный методом нейтронной стресс-дифрактометрии, — стопка из  $n$  сегментов ленты толщиной  $n \times 100$  мкм ( $n = 10$  для исходной [6] и полированной ленты,  $n = 12$  для ленты с YSZ-слоем); стрелками показаны направления вдоль ( $L$ ), поперёк ( $T$ ) прокатки и по нормали к плоскости ленты ( $N$ ); точки, в которых проведены измерения, обозначены крестиками (расстояния между точками 0,75 мм, от граничных точек до краёв ленты 0,5 мм); в плоскости ( $T, N$ ) показаны сечения пробных объёмов при измерении  $T$ - и  $N$ -компонентов деформации — ромбы с углом  $\sim 90^\circ$  и стороной 0,5 мм; такой же вид в плоскости ( $L, N$ ) имеет сечение пробных объёмов при измерении  $L$ -компонента деформации [6]

где  $d$  и  $d_0$  — межплоскостные расстояния для отражающих плоскостей в деформированном и недеформированном состоянии соответственно;  $d$  измеряется в эксперименте,  $d_0$  может быть определено экспериментально или/и в рамках общепринятой модели для тонкой пластины. Как показано в [6], оба способа определения  $d_0$  дают один и тот же результат, но модельный подход более прост в исполнении и в настоящей работе принят как основной.

В каждой точке образца измеряются три компонента деформации  $\varepsilon_L$ ,  $\varepsilon_T$  и  $\varepsilon_N$  в трёх взаимно перпендикулярных направлениях — вдоль ( $L$ ), поперёк ( $T$ ) прокатки и по нормали к плоскости ленты ( $N$ ) (см. рис. 2). По ним, используя обобщённый закон Гука, рассчитываются три основных компонента тензора остаточных напряжений:

$$\sigma_i = E \frac{(1 - 2\nu)\varepsilon_i + \nu(\varepsilon_T + \varepsilon_N + \varepsilon_L)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)},$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $i = L, T, N$ . Для стали AISI 310S  $E = 200$  ГПа,  $\nu = 0,27$  [9].

Были исследованы три образца: образец из исходной ленты в состоянии поставки [6], образец из ленты, прошедшей механическую полировку, и образец из полированной ленты с нанесённым буферным слоем YSZ (диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия), который невидим для нейтронов в силу малой толщины. Слой YSZ был нанесён по технологии ABAD [10], в процессе его нанесения температура ленты поддерживалась на уровне  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , толщина слоя составила  $2,1\text{ }\mu\text{м}$ .

В случае полированной ленты использовался образец из 10 сегментов ленты, идентичный образцу из ленты в состоянии поставки (см. рис. 2). Для ленты с YSZ-слоем толщина образца была увеличена на  $0,2\text{ мм}$  за счёт двух дополнительных сегментов ленты — по одному с каждой стороны образца. Такое увеличение толщины было вызвано тем обстоятельством, что лента с YSZ-слоем выгнута в сторону слоя YSZ, и существовал риск выхода пробного объёма за пределы образца, особенно при измерениях поперечной ( $T$ ) и нормальной ( $N$ ) деформации, когда используется увеличенный по высоте пробный объём (подробности см. в [6]).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты показаны на рис. 3. В исходной и полированной лентах различия в распределении внутренних деформаций  $\epsilon$  и остаточных напряжений  $\sigma$  находятся на уровне ошибок. При этом

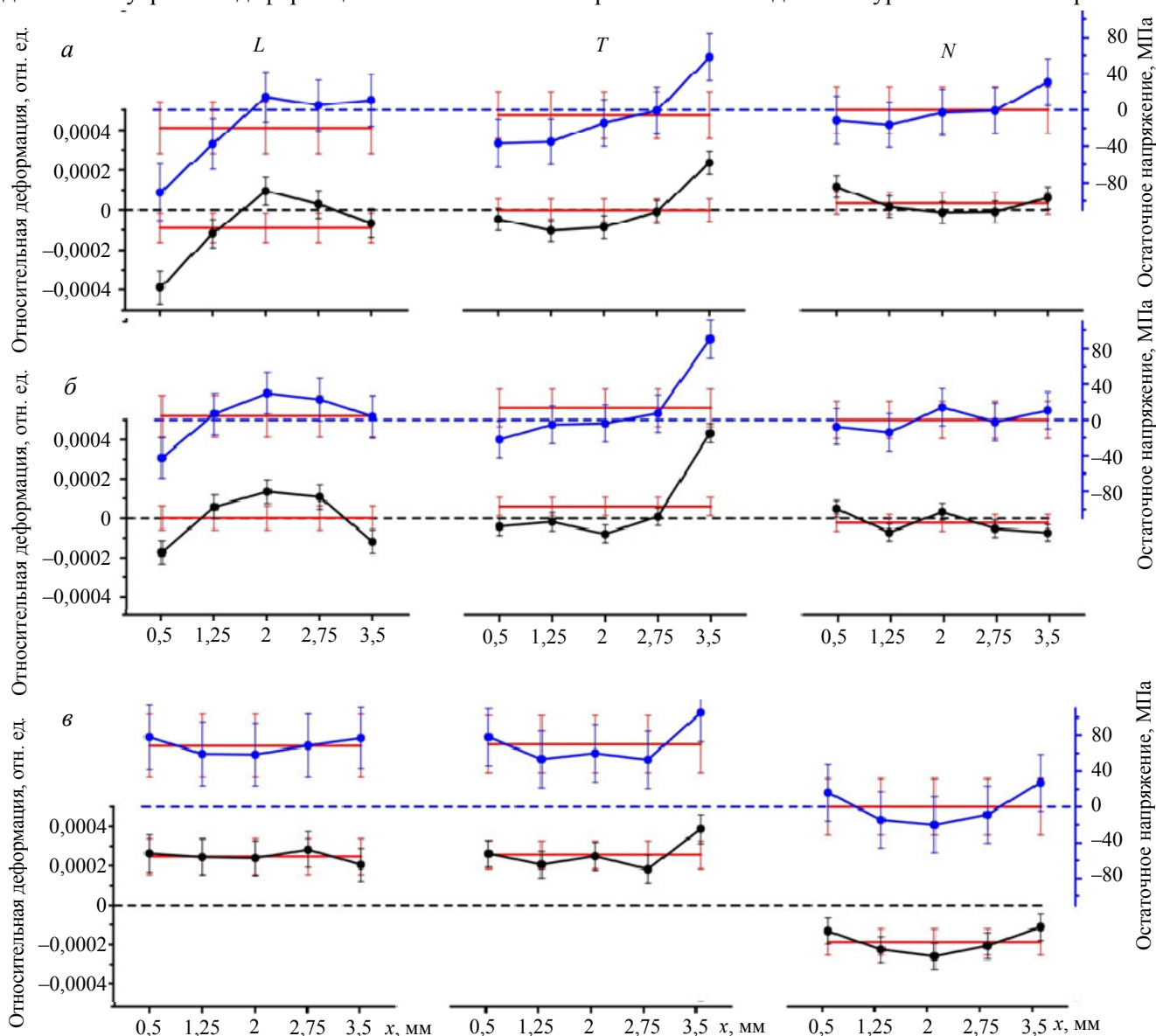


Рис. 3. Распределение внутренних деформаций  $\epsilon$  (шкала слева) и остаточных напряжений  $\sigma$  (шкала справа) по ширине  $x$  в исходной [6] (а), полированной ленте AISI 310S (б) и ленте с YSZ-слоем (в) в продольном ( $L$ ), поперечном ( $T$ ) и нормальном ( $N$ ) направлениях (см. рис. 2): символы, для наглядности соединённые линиями, соответствуют экспериментальным значениям  $\epsilon$  (●) и  $\sigma$  (●) с соответствующими ошибками; горизонтальными красными линиями с нанесёнными ошибками обозначены средние значения деформаций ( $\epsilon$ ) и остаточных напряжений ( $\sigma$ ) в каждом из направлений; пунктирные линии показывают нулевое значение

имеется несколько заслуживающих внимания деталей (ср. рис. 3, а, б). Полировка устранила повышенную нормальную деформацию  $\varepsilon_N$  на краях ленты, которая была связана с деформированием краёв в процессе резки ленты из стального листа [6]. В полированной ленте средние значения деформаций и остаточных напряжений в плоскости ( $L$ ,  $T$ ) немного подросли, а нормальная деформация уменьшилась (см. горизонтальные красные линии), что указывает на растяжение ленты в плоскости прокатки. Уменьшилась также разница остаточных напряжений на противоположных краях ленты в продольном направлении ( $L$ ), в результате чего серповидность ленты слегка скорректировалась (серповидность исходной ленты детально рассмотрена в [6]). Все эти изменения естественно объясняются особенностями процесса полировки — продольно-поперечным механическим воздействием полировальной головки на ленту, намотанную на барабан с небольшим напряжением. Такие малозаметные детали наглядно демонстрируют возможности нейтронной стресс-дифрактометрии при исследовании тонкой ленты, сложенной в стопку.

После нанесения слоя YSZ картина радикально меняется (см. рис. 3, в). Продольный ( $L$ ) и поперечный ( $T$ ) компоненты деформаций и остаточных напряжений выравниваются по ширине ленты и принимают одинаковые положительные средние значения,  $\langle \varepsilon_L \rangle = \langle \varepsilon_T \rangle = +0,00025 \pm 0,00008$  и  $\langle \sigma_L \rangle = \langle \sigma_T \rangle = +70 \pm 35$  МПа, при этом нормальная деформация  $\varepsilon_N$  становится отрицательной,  $\langle \varepsilon_N \rangle = -0,00019 \pm 0,00007$ . Такое распределение деформаций и остаточных напряжений свидетельствует об однородном изотропном растяжении ленты в плоскости прокатки. Поскольку лента в целом, с учётом слоя YSZ, свободна от внешних сил (и влиянием температуры в 50 °С на её внутреннее состояние можно пренебречь), естественно сделать вывод [11], что растяжение ленты вызвано релаксацией сжимающих напряжений на её поверхности, действующих со стороны слоя YSZ. Заметим, что эта релаксация вызывает также упомянутое ранее искривление ленты — её выгибание в сторону слоя YSZ. Детальное рассмотрение эффектов, связанных с деформацией ленты под действием нанесённого слоя, выходит за рамки настоящей работы. Подобные эффекты хорошо известны и изучены, их описание можно найти в монографии [11].

Растяжение, наведённое осаждённым слоем YSZ, сильно сглаживает изначальную серповидность ленты, но не устраняет её полностью, о чём свидетельствует сохранение повышенной поперечной деформации  $\varepsilon_T$  и напряжения  $\sigma_T$  на краю (в точке  $x = 3,5$  на рис. 3, в).

Как можно видеть на рис. 3, разница в остаточных напряжениях на краях ленты, обусловленная её серповидностью, составляет чуть более 100 МПа в исходной ленте (подробности см. в [6]) и около 50 МПа в полированной ленте и ленте с YSZ-слоем. Эти величины выглядят незначительными по сравнению с пондеромоторными механическими напряжениями в обмотках ВТСП-2 магнитных систем, которые, согласно оценкам, могут превышать 1000 МПа. Однако их роль возрастает по мере приближения к критической нагрузке, которую способен выдержать провод ВТСП-2. Разрушение провода может начаться при напряжении меньше ожидаемого на 50—100 МПа с той стороны несущей ленты, где из-за серповидности повышены остаточные напряжения.

Заслуживает внимания распределение по ширине ленты нормальных деформаций  $\varepsilon_N$  и остаточных напряжений  $\sigma_N$  (см. рис. 3, в): по сравнению с центральной частью на краях лента растянута сильнее. Похожая менее выраженная особенность наблюдается также в продольном ( $L$ ) и поперечном ( $T$ ) направлениях. Усиление растяжения к краям связано с так называемым «краевым эффектом» — повышенной концентрацией напряжений на краях поверхностного сжатого слоя ленты, что при определённых условиях может привести к деламинации провода [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и на практике реализована методика измерения внутренних деформаций и остаточных напряжений в тонких стальных лентах с помощью нейтронной стресс-дифрактометрии. Проведена диагностика напряжений в несущей стальной ленте AISI 310S толщиной 100 мкм и шириной 4 мм, исполь-



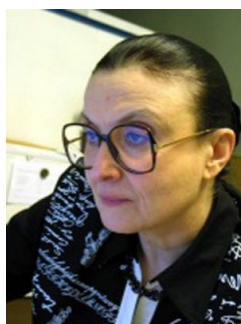
зуемой при изготовлении провода ВТСП-2 в НИЦ «Курчатовский институт», в состоянии поставки, после механической полировки и после нанесения буферного слоя YSZ.

Найдены распределения по ширине ленты продольных, поперечных и нормальных внутренних деформаций и остаточных напряжений. На основе этих распределений определены остаточные напряжения, вызванные серповидной деформацией в исходной и полированной ленте, и слабое растяжение ленты в плоскости прокатки после механической полировки. После нанесения слоя YSZ в ленте обнаружены однородные изотропные растягивающие напряжения 70 МПа.

Полученные результаты показывают, что нейтронная стресс-дифрактометрия является информативным методом для определения внутренних деформаций и напряжений в несущей ленте провода ВТСП-2 и может быть использована для диагностики ВТСП-стеков в сильноточных кабелях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Floegel-Delor U., Riedel T., Wippich D., Goebel B., Rothfeld R., Schirrmeister P., Werfel F.N., Usoskin A., Ruff A. Long-length coated conductor copper plating fabrication. — *Trans. Appl. Supercond.*, 2013, vol. 23, № 3, 6602204 (1—4); doi: 10.1109/TASC.2013.2244635.
2. Celentano G., De Marzi G., Fabbri F., Muzzi L., Tomassetti G., Anemona A., Chiarelli S., Seri M., Bragagni A., Corte A. Design of an industrially feasible twisted-stack HTS cable-in-conduit conductor for fusion application. — *Trans. Appl. Supercond.*, 2014, vol. 24, № 3, 4601805 (1—5); doi: 10.1109/TASC.2013.2287910.
3. Hartwig Z.S., Vieira R.F., Sorbom B.N., Badcock R.A., Bajko M., Beck W.K., Castaldo B., Craighill C.L., Davies M., Estrada J., Fry V., Goufopoulos T., Hubbard A.E., Irby J.H., Kuznetsov S., Lammi C.J., Michael P.C., Mouratidis T., Murray R.A., Pfeiffer A.T., Pierson S.Z., Radovinsky A., Rowell M.D., Salazar E.E., Segal M., Stahle P.W., Takayasu M., Tolland T.L., Zhou L. VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable. — *Supercond. Sci. Technol.*, 2020, vol. 33, 11LT01 (1—8); doi: 10.1088/1361-6668/abb8c0.
4. Non-destructive Testing Standard Test Method for Determining Residual Stress by Neutron Diffraction. Technical Specification. — 1st ed. ISO/TS 21432:2005. 2005. 40 p.
5. Hutchings M.T., Withers P.J., Holden T.M., Lorentzen T. Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction. — 1st ed. Boca Raton. London, New York, Singapore: CRC Press Taylor&Francis Group, 2005. 420 p.
6. Карпов И.Д., Иродова А.В., Круглов В.С., Шавкин С.В., Эм В.Т. Исследование внутренних напряжений в несущей ленте-подложке из нержавеющей стали AISI 310S для ВТСП-проводов второго поколения методом нейтронной стресс-дифрактометрии. — *Журнал технической физики*, 2020, т. 90, № 7, с. 1095—1102; doi: 10.21883/JTF.2020.07.49442.242-19.
7. Krasnoperov E.P., Guryev V.V., Shavkin S.V., Krylov V.E., Sychugov V.V., Korotkov V.S., Ovcharov A.V., Volkov P.V. Solenoid from experimental HTS tape for magnetic refrigeration. — *J. of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, № 1, p. 104—109; doi: 10.25103/jestr.121.12.
8. Em V.T., Karpov I.D., Somenkov V.A., Glazkov V.P., Balagurov A.M., Sumin V.V., Mikula P., Saroun J. Residual stress instrument with double-crystal monochromator at research reactor IR-8. — *Physica B: Condensed Matter.*, 2018, vol. 551, p. 413—416; doi: 10.1016/j.physb.2018.02.042.
9. AISI 310S (S31008) Stainless Steel [Электронный ресурс]. URL: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-310S-S31008-Stainless-Steel> (дата обращения 04.06.2021).
10. Usoskin A., Kirchhoff L. In-Plane Texturing of Buffer Layers by Alternating Beam Assisted Deposition: Large Area and Small Area Applications. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2009, v. 1150, 1150-RR05-02 (1-6); doi:10.1557/PROC-1150-RR05-02
11. Freund L.B., Suresh S. Thin Film Materials. Stress, Defect Formation and Surface Evolution. — New York: Cambridge University Press, 2004. 750 p.



Алла Вячеславовна Иродова,  
в.н.с., д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Irodova\_AV@nrcki.ru



Иван Дмитриевич Карпов,  
инженер-исследователь; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Karpov\_ID@nrcki.ru



Виталий Сергеевич Круглов,  
начальник отдела, к. техн. н.;  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
123182 Москва, пл. Академика  
Курчатова 1, Россия  
Kruglov\_VS@nrcki.ru



Владислав Евгеньевич Кры-  
лов, начальник группы; НИЦ  
«Курчатовский институт»,  
123182 Москва, пл. Академи-  
ка Курчатова 1, Россия  
Krylov\_VE@nrcki.ru



Сергей Викторович Шавкин,  
заместитель начальника от-  
дела; НИЦ «Курчатовский  
институт», 123182 Москва,  
пл. Академика Курчатова 1,  
Россия  
Shavkin\_SV@nrcki.ru



Вячеслав Терентьевич Эм,  
начальник отдела, д.ф.-м.н.;  
НИЦ «Курчатовский инсти-  
тут», 123182 Москва, пл. Ака-  
демика Курчатова 1, Россия  
Em\_VT@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2021 г.

После доработки 12 ноября 2021 г.

Принята к публикации 21 декабря 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 1, с. 54—59.