

05

## Исследование внутренних напряжений в несущей ленте-подложке из нержавеющей стали AISI 310S для ВТСП проводов второго поколения методом нейтронной стресс-дифрактометрии

© И.Д. Карпов, А.В. Иродова,<sup>¶</sup> В.С. Круглов, С.В. Шавкин, В.Т. Эм

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

<sup>¶</sup> e-mail: Irodova\_AV@nrcki.ru

Поступило в Редакцию 14 июня 2019 г.

В окончательной редакции 14 января 2020 г.

Принято к публикации 30 января 2020 г.

Методом нейтронной стресс-дифрактометрии изучено распределение внутренних (остаточных) напряжений в ленте из нержавеющей стали AISI 310S толщиной 100  $\mu\text{m}$  и шириной 4 mm в трех направлениях — вдоль, поперек и перпендикулярно плоскости прокатки. Определены усредненные по длине ленты на участке 40 cm величины остаточных макронапряжений. Обнаруженное распределение макронапряжений, сжимающих ленту на одном краю и растягивающих на другом, свойственно так называемой серповидной деформации ленты — ее изгибу в плоскости прокатки вдоль направления прокатки. Наблюдена корреляция между величиной макронапряжений и наличием внутренних микронапряжений — чем сильнее макронапряжения, тем выше концентрация микронапряжений.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, тонкая лента AISI 310S, нейтронная стресс-дифрактометрия.

DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49442.242-19

### Введение

Поликристаллическая лента из нержавеющей стали AISI 310S шириной 4 mm и толщиной 100  $\mu\text{m}$  в настоящее время используется в качестве несущей ленты-подложки при изготовлении ВТСП провода второго поколения на экспериментальной технологической линии в НИЦ „Курчатовский институт“ [1].

Архитектура производимого ВТСП провода подробно описана в [1]. Представить ее в общих чертах можно следующим образом. На несущую ленту-подложку из стали AISI 310S толщиной 100  $\mu\text{m}$  методом ABAF наносится базовый буферный текстурированный слой из стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) толщиной около 2  $\mu\text{m}$ . На него методом импульсного лазерного напыления (PLD) наносится дополнительный буферный текстурированный слой  $\text{CeO}_2$  толщиной 0.1–0.2  $\mu\text{m}$  и затем основной слой сверхпроводящей керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) толщиной 1.5–2  $\mu\text{m}$ . Керамика покрывается защитным слоем серебра (1–2  $\mu\text{m}$ ) и отжигается в атмосфере кислорода при температуре 750 °C. На заключительном этапе ВТСП провод покрывается стабилизирующим слоем меди 10–20  $\mu\text{m}$  со всех сторон, предохраняющим его от разрушения при переходе в нормальное состояние. В результате полная толщина полученного ВТСП провода составляет примерно 150  $\mu\text{m}$ , в том числе, около 104  $\mu\text{m}$  без защитного и стабилизирующего покрытий, из которых 100  $\mu\text{m}$  приходится на несущую ленту-подложку.

Очевидно, что единственным конструктивным элементом, обеспечивающим прочность ВТСП провода, явля-

ется стальная несущая лента-подложка, поэтому ее физическим характеристикам уделяется особое внимание. И если ее механические (прочностные) свойства определить достаточно просто, то для определения внутренних характеристик, из-за ее относительно большой толщины, необходимо использовать рассеяние нейтронов.

Целью настоящей работы является получение ответа на вопрос: можно ли с помощью дифракции тепловых нейтронов определить внутренние напряжения в ленте из нержавеющей стали AISI 310S толщиной 100  $\mu\text{m}$  в состоянии поставки металлургической компанией, и если да, то какова их величина и пространственное распределение. Подобные работы по изучению внутренних остаточных напряжений в тонких стальных лентах до сих пор не проводились.

В настоящей работе исследование выполнено в НИЦ „Курчатовский институт“ на нейтронном дифрактометре СТРЕСС [2] (рис. 1), установленном на исследовательском реакторе ИР-8.

### 1. Методическая часть

Согласно общепринятой классификации [3], внутренние напряжения в ленте AISI 310S можно разделить на три типа. Тип I — напряжения, уравнивающиеся в объеме всей ленты (возникают из-за ликвации в исходных слитках стали, при холодной прокатке ленты и механической обработке ее поверхности). Тип II — напряжения, уравнивающиеся в объеме отдельных кристаллитов или их частей (возникают при пластической деформации поликристаллического сплава из-

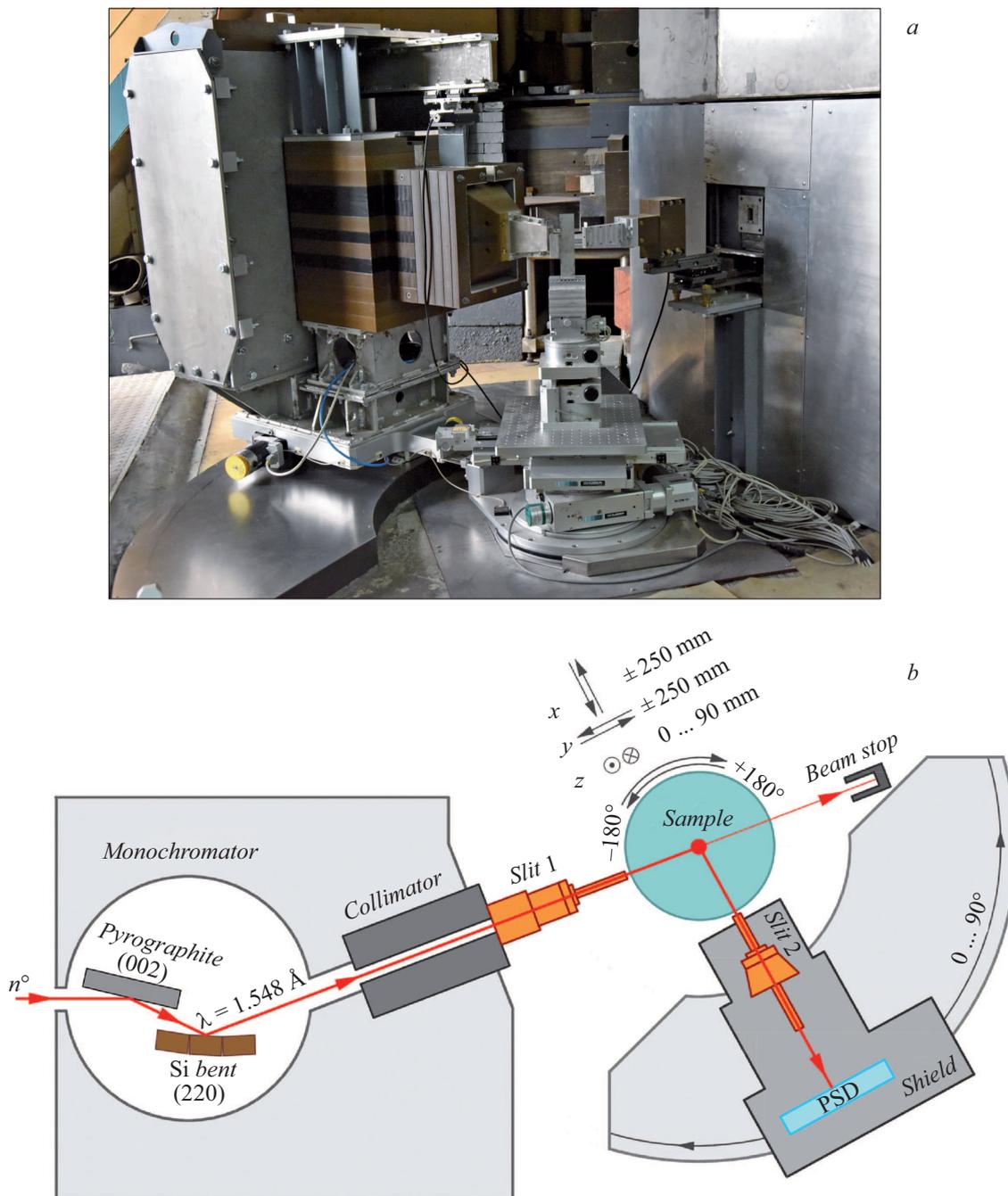
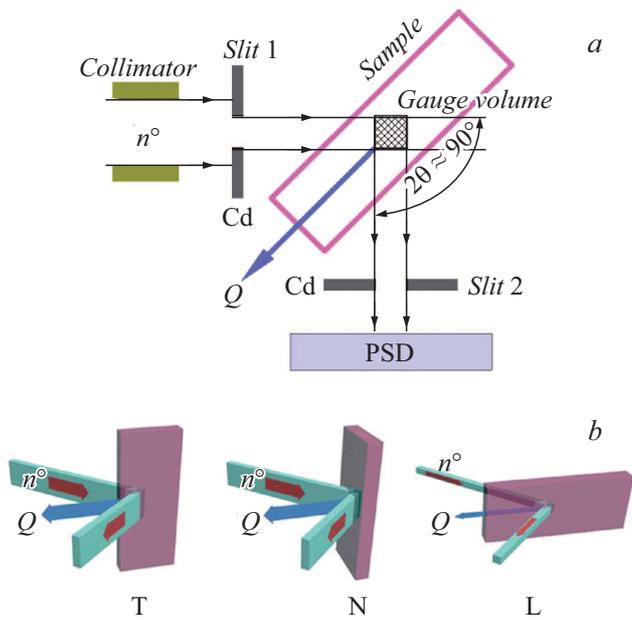


Рис. 1. *a* — общий вид нейтронного дифрактометра СТРЕСС; *b* — схема дифрактометра и его основные параметры.

за упругой и пластической анизотропии кристаллитов). Тип III — напряжения, уравнивающиеся в пределах небольших групп атомов на границах зерен, плоскостей скольжения и др. (связаны с дислокациями и статическими смещениями атомов из узлов кристаллической решетки, в том числе, из-за различия размеров атомов, образующих сплав). Напряжения I, действующие на макроскопических расстояниях, называются макронапряжениями. Напряжения II и III, действующие на микроскопических и субмикроскопических расстояниях, относятся к микронапряжениям [3]. На дифракционных картинах

макронапряжения влияют на положение дифракционных отражений, микронапряжения — на их ширину, форму (напряжения II) и интенсивность (напряжения III).

В стандартной методике стресс-дифрактометрии [4] для определения внутренних макронапряжений в образце используются данные о его деформации в напряженном состоянии в сравнении с ненапряженным состоянием. Деформация отслеживается по изменению положения дифракционных отражений, наименее подверженных влиянию микронапряжений. Для аустенитных сталей, к каковым относится сталь AISI 310S (структура ГЦК,



**Рис. 2.** *a* — схема эксперимента по измерению деформации в образце. *Slit 1* и *Slit 2* — кадмиевые щели, формирующие падающий и рассеянный пучки от пробного объема (заштрихован). Брэгговский угол  $2\theta$  обычно близок к  $90^\circ$ . PSD — позиционно-чувствительный детектор; *b* — измеряемые компоненты деформации (слева направо): поперечная (Т), нормальная (N) и продольная (L). Направление, в котором измеряется компонента деформации, должно совпадать с вектором рассеяния нейтронов  $Q$ .

$a \approx 3.60 \text{ \AA}$ ), такими отражениями являются отражения от плоскостей с индексами  $\{311\}$  [5]. Именно они использовались в настоящей работе. При длине волны нейтронов  $\lambda = 1.548 \text{ \AA}$  (рис. 1) брэгговский угол  $2\theta$  для этих плоскостей составляет около  $91^\circ$  (рис. 2).

Схема эксперимента по измерению деформации в образце [6] показана на рис. 2. Падающий пучок нейтронов формируется, и рассеянный пучок ограничивается щелями из кадмия, хорошо поглощающими тепловые нейтроны (рис. 2, *a*). Область, от которой наблюдается рассеяние нейтронов, является пробным объемом, по которому усредняется измеряемая деформация. Пробный объем должен полностью находиться внутри образца, иначе смещения дифракционных отражений, вызванные его неполным погружением в образец, внесут серьезные искажения в полученный результат [5].

В качестве относительной деформации принимается величина

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}, \quad (1)$$

где  $d$  и  $d_0$  — межплоскостные расстояния для отражающих плоскостей соответственно в деформированном и недеформированном состояниях образца (на дифракционной картине им отвечают брэгговские углы  $2\theta$  и  $2\theta_0$ ). В каждой точке образца измеряют три компонента деформации  $\varepsilon_T$ ,  $\varepsilon_N$  и  $\varepsilon_L$  в трех взаимно перпенди-

кулярных направлениях — поперечном (Т), нормальном (N) и продольном (L) (рис. 2, *b*). По ним, используя обобщенный закон Гука, рассчитываются три основных компонента тензора внутренних макронапряжений

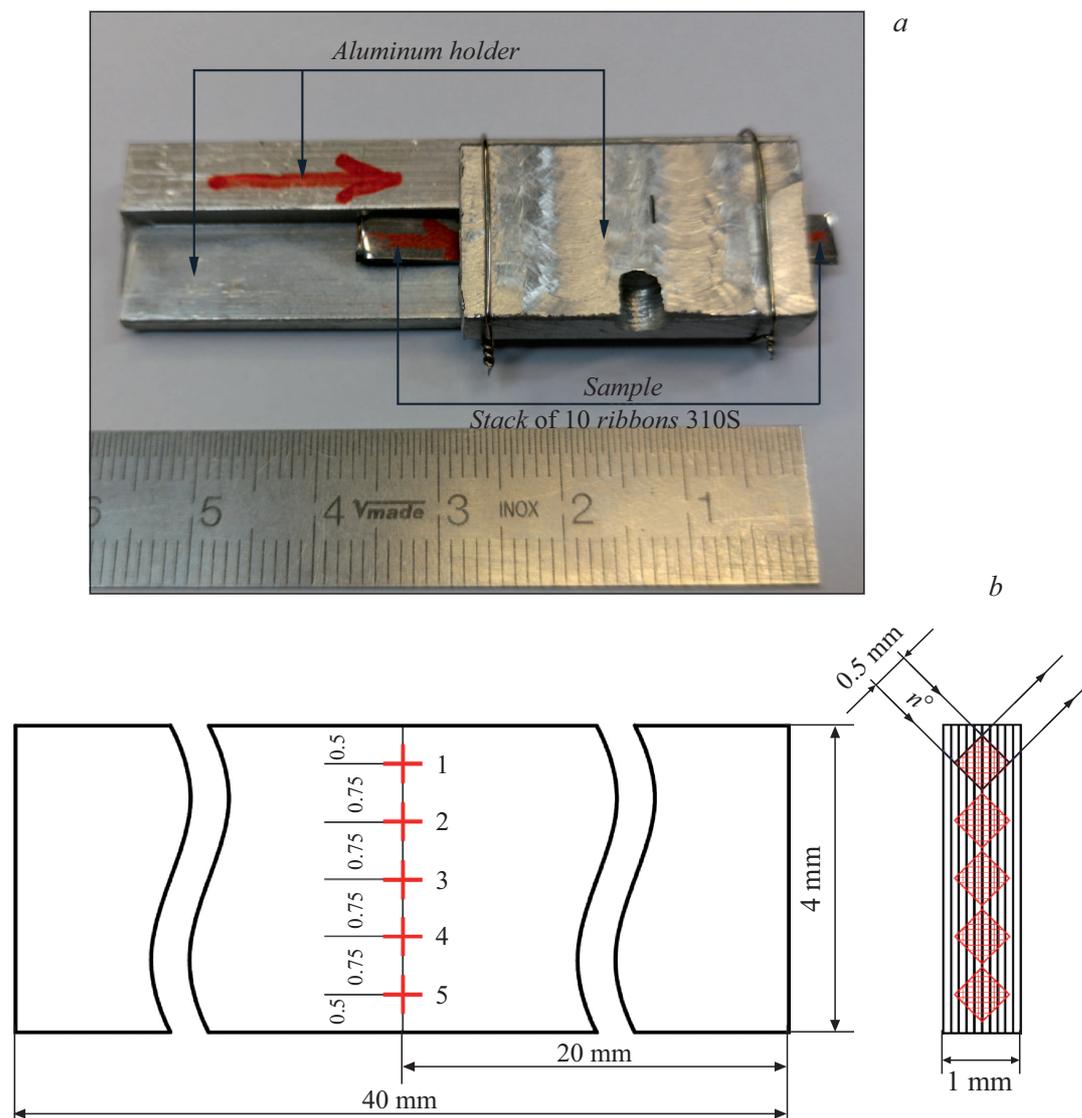
$$\sigma_i = E \frac{(1 - 2\nu)\varepsilon_i + \nu(\varepsilon_T + \varepsilon_N + \varepsilon_L)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $i = T, N, L$ .

Толщина ленты AISI 310S составляет 0.1 mm, что в 5 раз меньше минимально допустимой ширины пучка нейтронов, 0.5 mm, с точки зрения его интенсивности и связанной с ней длительности эксперимента. Таким образом, использование в качестве образца одинарной ленты невозможно ввиду того, что пробный объем неизбежно и большей своей частью будет выходить за пределы образца. Для увеличения эффективной толщины образца было решено сложить ленту в пакет. Отрезок ленты длиной 40 cm был разрезан на десять одинаковых сегментов по 4 cm, которые были последовательно уложены друг на друга с сохранением ориентации относительно направления прокатки ленты. Полученная сборка была зафиксирована в алюминиевом корпусе (рис. 3, *a*). Измерения проводили непосредственно через слой алюминия, поскольку дифракционные отражения от алюминия не попадают в рабочую область вблизи отражений  $\{311\}$  от стали AISI 310S, и тонкий слой алюминия практически не снижает интенсивность пучка нейтронов. Из соображений минимальной приемлемой интенсивности пучка нейтронов и максимально возможного пространственного разрешения на падающем и отраженном пучках были использованы кадмиевые щели шириной 0.5 mm. В результате пробный объем полностью поместился внутри пакета лент (рис. 3, *b* справа). По ширине ленты для измерений были выбраны 5 точек с шагом 0.75 mm и расстоянием от граничных точек до краев ленты 0.5 mm, которые располагались посередине длины и толщины образца (рис. 3, *b*).

Как оказалось впоследствии, сложение ленты в пакет имеет важное преимущество перед использованием образца из одинарной ленты, даже если бы такое было возможно. В случае пакета измерение в одной точке дает усредненную информацию сразу по десяти точкам, равномерно распределенным на протяженном участке ленты, т.е. фактически характеризует ленту в целом на этом участке, тогда как при использовании одинарной ленты доступна информация только о ее локальных свойствах. Разумеется, такой способ аттестации ленты имеет смысл, только если ее характеристики более или менее однородны по длине. Однородность ленты по длине была подтверждена (см. ниже) измерениями поперечной деформации в пяти точках, смещенных вдоль длины ленты относительно точек, показанных на рис. 3.

Поскольку деформация ленты по длине оказалась однородной, при измерениях Т- и N-компонент деформации пробный объем был увеличен по высоте с целью



**Рис. 3.** *a* — исследованный образец — пакет из десяти 4-х сантиметровых сегментов ленты AISI 310S в алюминиевом корпусе. Сегменты нарезаны из единого 40-ка сантиметрового отрезка ленты и сложены последовательно, с сохранением ориентации относительно направления прокатки (показано стрелкой). *b* слева — расположение точек на образце (обозначены пронумерованными крестиками), в которых проводились измерения, расстояния между точками указаны в миллиметрах; справа — вид на торец образца толщиной 1 мм (10 сегментов ленты). Пробные объемы во всех точках (заштрихованы) находятся полностью внутри образца.

увеличения интенсивности пучка нейтронов, и имел размеры  $0.5 \times 2$  мм. При измерениях компоненты  $L$  размеры пробного объема были  $0.5 \times 0.5$  мм (рис. 2, *b*). Время измерений поперечной и нормальной компонент составило 1.5 h на точке, продольной компоненты — 3 h на точке.

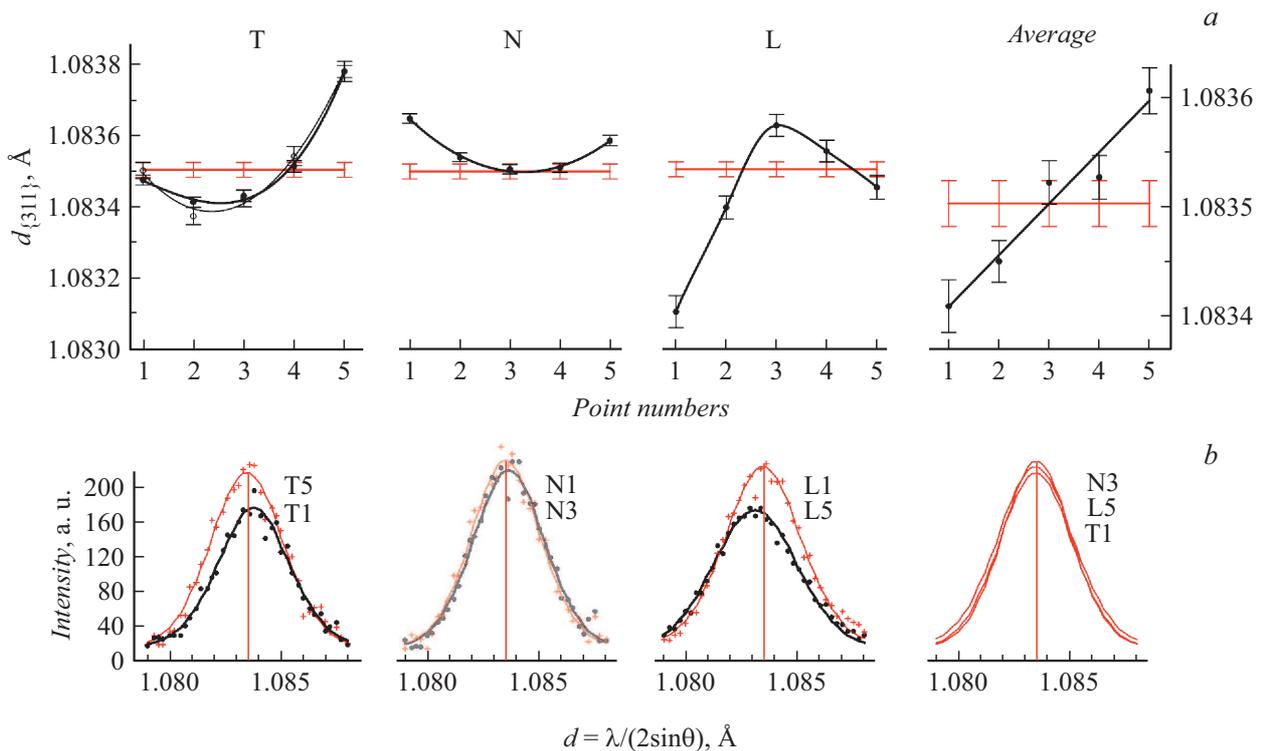
## 2. Результаты и обсуждение

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием пакета программ FullProf Suite [7], предназначенного для полнопрофильного анализа дифракционных кривых. Полученные в эксперименте для от-

ражений  $\{311\}$  стандартные зависимости интенсивности от угла рассеяния  $I(2\theta)$  представлялись в соответствии с условием Вульфа-Брэгга в виде  $I(d)$  с  $d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$ , и уже потом анализировались. Для подгонки профилей  $I(d)$  дифракционных максимумов  $\{311\}$  использовалась функция псевдо-Войта (pseudo-Voigt):

$$pV(d) = \eta L(d) + (1 - \eta)G(d), \quad (3)$$

где  $L(d)$  и  $G(d)$  — функции Лоренца и Гаусса соответственно,  $0 \leq \eta \leq 1$ . В результате в каждой измеренной точке (рис. 3) в каждом из направлений (рис. 2) для дифракционного максимума получили его положение — межплоскостное расстояние  $d_{\{311\}}$  для отражающих

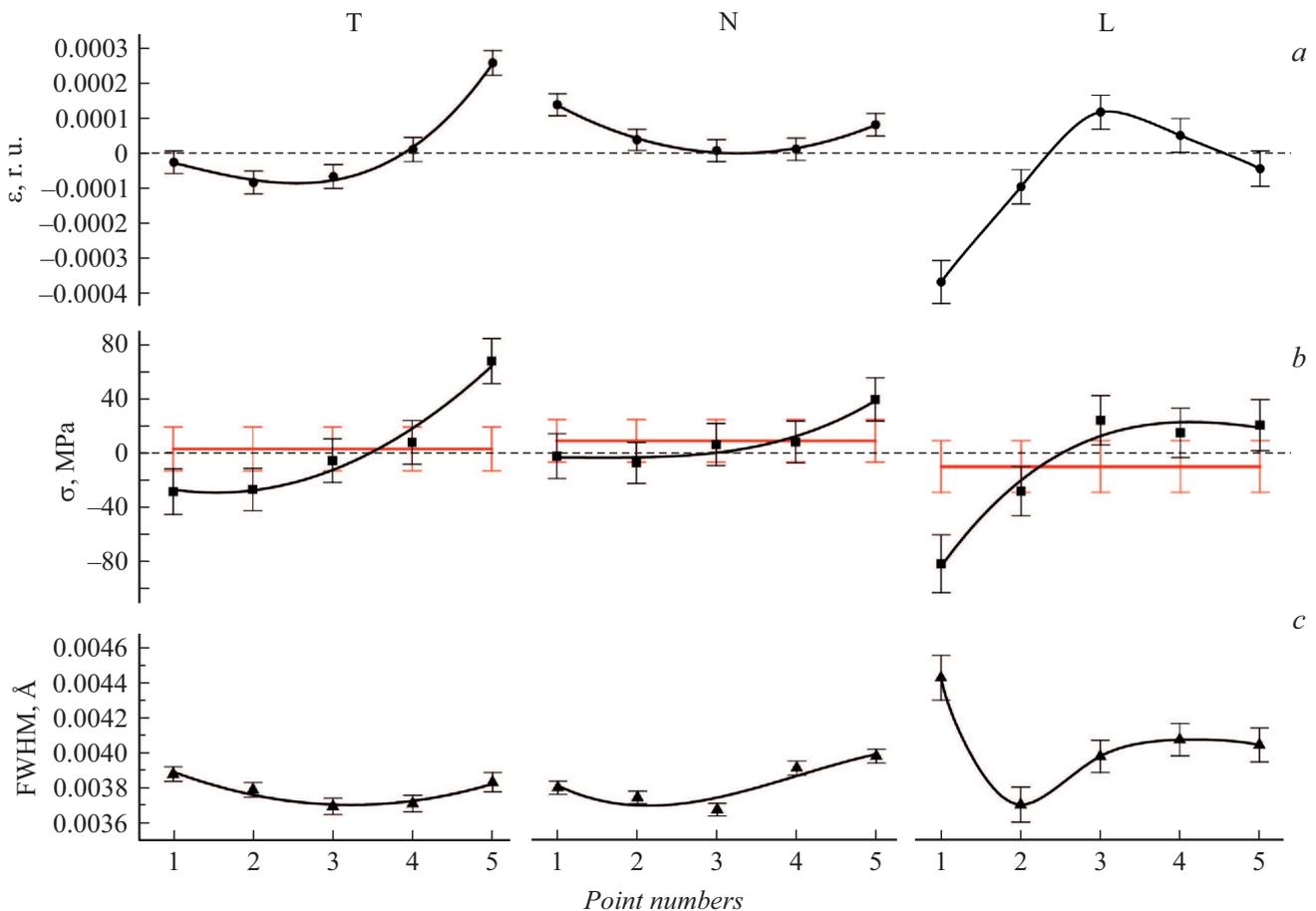


**Рис. 4.** *a* — межплоскостные расстояния  $d_{\{311\}}$  для отражений от плоскостей  $\{311\}$ , измеренные в пяти точках по ширине ленты AISI 310S (см. рис. 3) в T-, N- и L-направлениях (шкала слева), и значения, усредненные по этим направлениям для каждой точки (Average, шкала справа). Дополнительно для направления T показаны (открытыми кружками и тонкой линией) величины межплоскостных расстояний в пяти точках, смещенных вдоль длины ленты на 5 mm. Символы соответствуют экспериментальным значениям, ошибки — стандартным отклонениям, линии — полиномиальной аппроксимации. Горизонтальной линией (с нанесенной ошибкой) показано среднее по образцу значение межплоскостного расстояния  $\langle d_{\{311\}} \rangle = 1.083502 \pm 0.000021$  Å, принятое за  $d_0$  (см. текст). *b* — профили дифракционных максимумов  $\{311\}$  для трех направлений (T, N и L) в точках с межплоскостными расстояниями  $d_{\{311\}}$ , максимально отличающимися от значения  $d_0$  (сплошные кружки, толстые линии), в сравнении с профилями максимумов в точках, где отклонения от  $d_0$  минимальны (крестики, тонкие линии). Символы соответствуют экспериментальным значениям, линии — подогнанным кривым (см. текст). Вертикальными линиями отмечено положение  $d_0$ . Интенсивности максимумов для разных направлений приведены к одной величине пробного объема и одному времени съемки. Справа, для сравнения, показаны подогнанные профили для точек с близкими к  $d_0$  межплоскостными расстояниями в разных направлениях. Цифры рядом с обозначениями направлений соответствуют номерам точек.

плоскостей  $\{311\}$  (рис. 4, *a*), ширину на полувысоте FWHM (рис. 5, *c*), форму  $\eta$ , интегральную и пиковую интенсивности и ряд других параметров, а также их стандартные отклонения. Общее представление о качестве подгонки профилей дифракционных максимумов  $\{311\}$  можно получить из рис. 4, *b*. Во всех случаях значение  $\chi^2$  укладывалось в интервал 1.4–2.2 в зависимости от величины разброса точек на экспериментальном профиле, при ожидаемом  $R_{\text{exp}}$ -факторе 17.3–18.5% и фактическом профильном  $R_p$ -факторе 12.9–14.1%.

Для оценки однородности распределения деформаций по длине ленты были проведены дополнительные эксперименты по определению межплоскостных расстояний  $d_{\{311\}}$  в поперечном направлении в пяти точках, смещенных на 5 mm вдоль длины ленты относительно точек, показанных на рис. 3. Полученные значения совпали со значениями в основных точках в пределах стандартных отклонений (см. компоненту T на рис. 4).

Вопрос о величине  $d_0$  в формуле (1) был решен следующим образом. Поскольку суммарный пробный объем во всех измеренных точках составляет почти половину от объема образца (рис. 3, *b* слева), среднее по нему значение  $\langle d_{\{311\}} \rangle = 1.083502 \pm 0.000021$  Å было принято в качестве  $d_0$ . Правомочность такого действия была подтверждена после расчета с этим значением  $d_0$  относительных деформаций (1) и внутренних макронапряжений (2) во всех точках по всем направлениям (рис. 5). Величина суммарного (среднего) по объему образца (точнее, полному пробному объему) внутреннего напряжения в каждом из измеренных направлений совпала нулевым значением в пределах ошибки (рис. 5). Другими словами, как и следовало ожидать, образец в целом находится в ненапряженном состоянии. Дополнительная верификация величины  $d_0 = \langle d_{\{311\}} \rangle$  была проведена с использованием допущения, которое обычно принимается в случае тонких пластин,



**Рис. 5.** *a* — относительные деформации  $\varepsilon$ ; *b* — макронапряжения  $\sigma$  в пяти точках по ширине ленты AISI 310S (см. рис. 3) в T-, N- и L-направлениях. Символы соответствуют рассчитанным значениям, линии — полиномиальной аппроксимации. Сплошными горизонтальными линиями (с нанесенными ошибками) показаны средние по объему образца (полному пробному объему) значения макронапряжений  $\sigma$  в каждом из направлений, совпадающие в пределах ошибки с нулевым значением (пунктирные линии); *c* — ширины (FWHM) дифракционных максимумов  $\{311\}$  (см. рис. 4, *b*) в тех же точках и направлениях. Символы соответствуют экспериментальным значениям, ошибки — стандартным отклонениям, сплошные линии — полиномиальной аппроксимации.

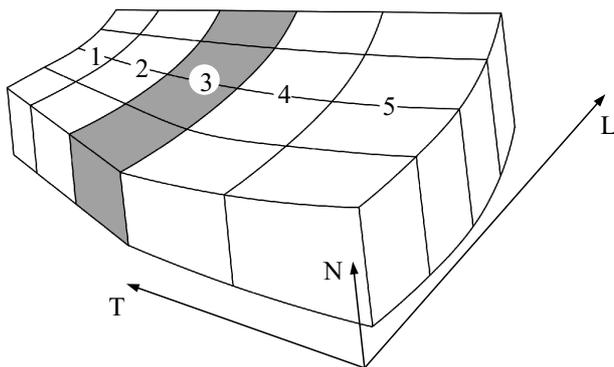
а именно нормальная компонента напряжения равна нулю. Рассчитанное в этом предположении значение  $d_0 = 1.083522 \pm 0.000030$  совпало с  $\langle d_{\{311\}} \rangle$  в пределах ошибки. При расчете внутренних макронапряжений использовали модуль Юнга  $E = 200$  GPa и коэффициент Пуассона  $\nu = 0.27$  [8].

Величина внутренних макронапряжений коррелирует с шириной и интегральной интенсивностью дифракционного максимума  $\{311\}$ . В областях с более сильными макронапряжениями максимум шире (рис. 5) и слабее по интенсивности (см. профили максимумов на рис. 4). Поскольку ширина и интенсивность дифракционного максимума определяется внутренними микронапряжениями, можно сделать вывод о том, что в более напряженных областях концентрация микронапряжений выше. Заметим, что, кроме ширины и интенсивности, в сильнонапряженных областях меняется форма максимума — параметр  $\eta$  формуле (3), что также связано с микронапряжениями. Более детальный анализ эффектов,

связанных с микронапряжениями, выходит за рамки настоящей работы.

Любопытный результат, с точки зрения процесса изготовления ленты, дает анализ компонент деформации  $\varepsilon$  (рис. 5). Если компоненты, лежащие в плоскости ленты,  $\varepsilon_T$  и  $\varepsilon_L$ , связаны с деформированием стального листа при его прокатке, то нормальная компонента  $\varepsilon_N$  — с резкой листа на ленты. В частности, наблюдаемая положительная деформация  $\varepsilon_N$  на краях ленты (рис. 5, *a*), очевидно, связана с заусенцами, образующимися в процессе резки, которые иногда видны в обычный микроскоп (как в нашем случае). Этот пример наглядно демонстрирует возможности нейтронной стресс-дифрактометрии для анализа тонких однородных по длине стальных лент.

В целом распределение внутренних макронапряжений по ширине ленты выглядит следующим образом (кривые  $\sigma$  на рис. 5; макронапряжения отсчитываются от среднего значения в соответствующем направлении). Поперечные напряжения  $\sigma_T$  от умеренно сжимающих на одном краю ленты,  $-31 \pm 16$  MPa, через нейтральные в



**Рис. 6.** Деформация ленты AISI 310S, вызываемая остаточными макронапряжениями, в T-, N- и L-направлениях (см. кривые  $\sigma$  на рис. 5), пропорции не соблюдены. Серым цветом обозначена наименее деформированная (ненапряженная) область. Цифры соответствуют номерам точек на рис. 3.

середине плавно переходят в сильно растягивающие на другом краю,  $+64 \pm 16$  МПа. Продольные напряжения  $\sigma_L$  от сильно сжимающих на уже поджатом поперечными напряжениями краю ленты,  $-71 \pm 21$  МПа, через нейтральные в середине, переходят в умеренно растягивающие на другом краю, сильно растянутом поперечными напряжениями,  $+30 \pm 19$  МПа. Нормальные напряжения  $\sigma_N$  от края, сжатого поперечными и продольными напряжениями, до середины ленты остаются слабо сжимающими,  $-11 \pm 16$  МПа (практически нейтральными в пределах ошибки), и затем плавно переходят в умеренно растягивающие на краю, растянутом поперечными и продольными напряжениями,  $+30 \pm 16$  МПа.

Такое распределение макронапряжений в ленте AISI 310S, главным образом, продольных  $\sigma_L$  и поперечных  $\sigma_T$ , создает изгиб ленты в плоскости прокатки в направлении прокатки (рис. 6). Этот эффект является следствием деформации стальной полосы, из которой нарезается лента, известной как серповидность [9]. Допустимая величина такой деформации регулируется государственными и международными стандартами, действующими на металлургических предприятиях (см., например, [10]). Остаточные макронапряжения в тонкой стальной ленте ( $100 \mu\text{m}$ ), вызванные серповидностью стального проката, определены впервые.

## Заключение

1. Показана возможность применения нейтронной стресс-дифрактометрии для определения внутренних напряжений в тонких, не более  $100 \mu\text{m}$ , однородных стальных лентах.

2. Для ленты из нержавеющей стали AISI 310S толщиной  $100 \mu\text{m}$  в состоянии поставки определена величина и распределение остаточных макронапряжений, указывающие на серповидную деформацию стального листа, из которого нарезалась лента. Наблюдена корреляция

между величиной макронапряжений и наличием микронапряжений.

3. Представленная в работе методика измерений внутренних напряжений в тонких стальных лентах открывает хорошие перспективы для исследований макронапряжений в несущей ленте-подложке AISI 310S на критически важных этапах изготовления ВТСП провода — после нанесения на нее базового буферного слоя YSZ и после нанесения основного сверхпроводящего слоя YBCO и последующего отжига. Такие исследования возможны по причине пренебрежимо малой толщины наносимых слоев по сравнению с толщиной несущей ленты-подложки, и, как следствие, их „невидимости“ для тепловых нейтронов. Также подобные исследования можно проводить на несущих лентах-подложках из других материалов — хастеллоя, никелевых сплавов, различных нержавеющей сталей и др., в настоящее время используемых при изготовлении ВТСП проводов.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 14.604.21.0197 о предоставлении субсидии (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60417X0197). В работе использовалось оборудование уникальной научной установки „Нейтронный исследовательский комплекс на базе реактора ИР-8“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Krasnoperov E.P., Guryev V.V., Shavkin S.V., Krylov V.E., Sychugov V.V., Korotkov V.S., Ovcharov A.V., Volkov P.V. // J. Eng. Sci. Technol. Rev. 2019. Vol. 12. N 1. P. 104–109. DOI: 10.25103/jestr.121.12
- [2] Em V.T., Karpov I.D., Somenkov V.A., Glazkov V.P., Balagurov A.M., Sumin V.V., Mikula P., Saroun J. // Physica B: Condense. Matter. 2018. Vol. 551. P. 413–416. DOI: 10.1016/j.physb.2018.02.042
- [3] Withers P.J., Bhadeshia H.K.D.H. // Mater. Sci. Technol. 2001. Vol. 17. P. 355–375.
- [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, NY: Singapore: CRC Press Taylor&Francis Group, 2005. 420 p.
- [6] Эм В.Т., Балагуров А.М., Глазков В.П., Карпов И.Д., Микюла П., Мирон Н.Ф., Соменков В.А., Сумин В.В., Сарун Ж., Шушуннов М.Н. // 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., Saroun J., Shushunov M.N. // Instrum. Experiment. Techniq. 2017. Vol. 60. N 4. P. 526–532. DOI: 10.1134/S0020441217040042]

- [7] FullProf Suite. Crystallographic tools for Rietveld, profile matching & integrated intensity refinements of X-Ray and/or neutron data. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ill.eu/sites/fullprof/index.html> (дата обращения: 31.05.2019).
- [8] AISI 310S (S31008) Stainless Steel. [Электронный ресурс] URL: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-310S-S31008-Stainless-Steel> (дата обращения: 31.05.2019).
- [9] Металлопродукция. Методы измерений отклонений формы. ГОСТ 26877-2008. М.: Стандартиформ, 2013. 24 с.
- [10] Классы серповидности стальных полос. [Электронный ресурс] URL: [http://tk-msi.bussola.ru/cms/Klassy\\_serpovidnosti\\_stalnyh\\_polos](http://tk-msi.bussola.ru/cms/Klassy_serpovidnosti_stalnyh_polos) (дата обращения: 15.01.2020).