

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА\*

*Никулин С.А.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, зав. кафедрой металловедения и физики  
прочности (nikulin@misis.ru)*

*Шиткин С.Л.<sup>2</sup>, к.т.н., зам. заведующего отделением (shitkins@yandex.ru)*

*Рожнов А.Б.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности (rojnov@nm.ru)*

*Рогачев С.О.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности (csaap@mail.ru)*

*Нечайкина Т.А.<sup>1</sup>, к.т.н., младший научный сотрудник (nechaykinata@gmail.com)*

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

<sup>2</sup> АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»  
(129626, Россия, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10)

**Аннотация.** В настоящей работе на примере образцов сталей ответственных деталей железнодорожного транспорта рассмотрена методика определения поверхностных напряжений рентгеновским методом с учетом специальной подготовки поверхности в точке измерения. Рассмотрены особенности проведения измерений поверхностных напряжений рентгеновским методом, показана применимость для этого разработанного макета портативного рентгеновского дифрактометра. Работа дифрактометра основана на следующем принципе. Изменение угла дифракции при наличии механических напряжений приводит к смещению дифракционного пика на регистрируемом дифракционном спектре (рентгенограмме) относительно положения пика при отсутствии напряжений. Детектор фиксирует дифрагированное рентгеновское излучение и передает при помощи аналого-цифрового преобразователя в персональный компьютер дискретную информацию о распределении интенсивности излучения, улавливаемом детектором. Для компьютерной обработки регистрируемых дифракционных спектров разработана специальная программа STRESSCONTROLL, позволяющая графически отображать дифракционные спектры, регистрируемые детектором, управлять работой дифрактометра и рассчитывать напряжения с использованием баз данных по металлам и фазам. Компьютерная обработка дифракционных профилей заключается в определении положения центра тяжести. Алгоритм программы включает отделение фона, аппроксимацию массива данных в кривую и точное определение положения центра тяжести сглаженного профиля. Измерены поверхностные напряжения на фрагменте боковой рамы из стали 20ГЛ (после нормализации и объемно-поверхностной закалки), вырезанном из зоны буксового проема радиуса R55. Полученные результаты определений поверхностных напряжений для нормализованного фрагмента показали результаты, близкие к нулю, а для фрагмента с объемно-поверхностной закалкой получены значительные сжимающие напряжения. Таким образом, форма дифракционного пика, а также уровень поверхностных напряжений напрямую связаны с особенностями микроструктуры изучаемой стали. В этом случае рентгеновский метод определения поверхностных напряжений может являться индикатором состояния поверхности.

**Ключевые слова:** литые низкоуглеродистые стали, детали железнодорожного транспорта, боковые рамы, термическая обработка, нормализация, объемно-поверхностная закалка, рентгеновская дифракция, остаточные напряжения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-200-206

Одним из важнейших направлений применения современных методов определения механических напряжений является исследование способности деталей железнодорожного транспорта выдерживать механические нагрузки. Наибольшее влияние остаточные напряжения оказывают на детали, обеспечивающие непосредственное взаимодействие с рельсовым путем и устойчивость подвижного состава (железнодорожные колеса, боковые рамы и др.). При воздействии эксплуатационных нагрузок, величина которых может превышать в разы статические нагрузки, каждая деталь находится в суммарном напряженном состоянии,

обусловленном как воздействием эксплуатационных нагрузок, так и механических остаточных напряжений, формирующихся в процессе термической обработки. Особую опасность представляют растягивающие остаточные напряжения, которые способствуют развитию трещин в детали, что приводит к ее преждевременному разрушению [1].

Остаточные напряжения влияют на резерв конструктивной прочности ответственных деталей железнодорожного транспорта, поэтому их своевременное определение способно предотвратить эксплуатацию детали в опасном предотказном состоянии. Актуальность неразрушающего контроля напряженного состояния связана также с ужесточением условий работы железнодорожного транспорта (увеличением осевых нагруз-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России. Соглашение № 14.578.21.0020 от 05.06.2014, уникальный идентификатор № RFMEFI57814X0020.

зок до 25 – 30 тс, скоростей движения, жесткости пути, строительством железных дорог в районах с низкими температурами).

К неразрушающим методам определения механических напряжений относятся ультразвуковые [2, 3] и магнитные [4 – 7]. Несмотря на возможность внедрения этих методов для измерения напряжений в железнодорожном транспорте, все они имеют один общий недостаток – ни один из них не измеряет напряжения напрямую и каждый нуждается в эталонных образцах. Кроме того, точность методов недостаточна, что позволяет лишь качественно оценить значения напряжений [8].

Рентгеновский метод является единственным прямым неразрушающим методом определения остаточных напряжений, так как напрямую измеряет деформацию кристаллической решетки по смещению пиков дифракции [9 – 12]. К его достоинствам можно отнести точность и соответствие результатов тензометрическим измерениям, к недостаткам – требование специальной обработки поверхности (ввиду измерения тонкого поверхностного слоя глубиной до нескольких десятков микрон в зависимости от энергии рентгеновских квантов [13, 14]). По опыту измерения поверхностных напряжений цельнокатаных железнодорожных колес, рентгеновский метод показал точность определения значений напряжений с разбросом в пределах 10 % точности с коэффициентом корреляции 0,9 [15 – 17].

В настоящей работе анализируются методические аспекты проведения измерений поверхностных напряжений рентгеновским методом на разработанном макете портативного рентгеновского дифрактометра.

Для определения поверхностных напряжений применяют рентгеновское излучение с длиной волны, соизмеримой с параметрами кристаллической решетки материала объекта исследования. Рентгеновские лучи от атомных плоскостей отражаются селективно, а именно только в том случае, если длина волны рентгеновского излучения  $\lambda$ , межплоскостное расстояние  $d_{hkl}$  кристаллических плоскостей с кристаллографическими индексами  $hkl$  и угол дифракции  $\theta$  (угол между падающим лучом и атомной плоскостью с кристаллографическими индексами  $hkl$ ) связаны уравнением дифракции (уравнение Вульфа-Брегга), определяющим положение максимумов интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta, \quad (1)$$

где  $n$  – порядок дифракции (некоторое целое число).

Для поликристаллической структуры стальных деталей железнодорожного транспорта дифракционное отражение возможно при любом значении угла между падающим лучом и поверхностью исследуемой детали, так как всегда в плоскости образца найдутся соответ-

ствующим образом ориентированные кристаллиты, для атомных плоскостей которых будет удовлетворяться условие Вульфа-Брегга (1). В приближении относительная упругая деформация  $\varepsilon$  не превышает долей процента:

$$\Delta\theta = -\varepsilon \operatorname{tg}\theta_0; \quad \varepsilon = -\operatorname{ctg}\theta_0(\theta - \theta_0), \quad (2)$$

где  $\theta_0$  – координата центра тяжести максимума, соответствующая недеформированному состоянию материала;  $\Delta\theta$  – изменение угла дифракции  $\theta$  под действием упругих напряжений (за счет деформации).

Дифрагированные на кристаллографических плоскостях рентгеновские кванты фиксируются детектором, расположенным в направлении главного дифракционного максимума. Получаемый спектр представляет собой гистограмму распределения  $N(\theta)$  в диапазоне углов отражения, улавливаемом детектором. Дифракционный пик по своему угловому положению и форме зависит практически от всех конструктивных и металлургических параметров (химический состав, тип, размеры и компоновка структурных составляющих; анизотропия строения и свойств; физико-механические свойства поверхности; вид напряженного состояния и уровень концентрации напряжений).

Для определения поверхностных напряжений  $\sigma_\varphi$  в заданном направлении  $x$ , характеризующемся азимутальным углом  $\varphi$  на поверхности образца, применяют так называемый метод « $\sin^2\psi$ » путем регистрации дифракционных пиков для разных углов наклона  $\psi$  плоскости, в которой расположены рентгеновская трубка и детектор. Исследуемый объект снимают при нескольких (обычно от трех до шести) значениях угла наклона брэгговской плоскости  $\psi$  (рис. 1) к нормали к поверхности объекта (наклоны осуществляются в направлении  $x$ ). Затем методом наименьших квадратов строят прямую вида  $\varepsilon = b + k\sin^2\psi$  (рис. 2), тангенс угла наклона которой с точностью до коэффициента  $(1 + \mu)/E$  показывает значение  $\sigma_\varphi$  [18]:

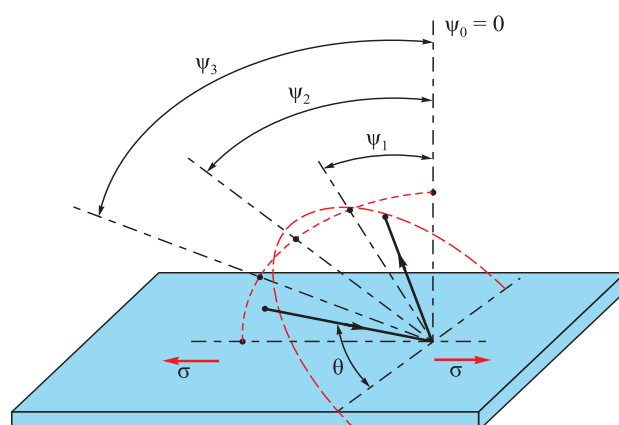


Рис. 1. Схема съемки по методу  $\sin^2\psi$

Fig. 1. Scheme of the shooting method by  $\sin^2\psi$

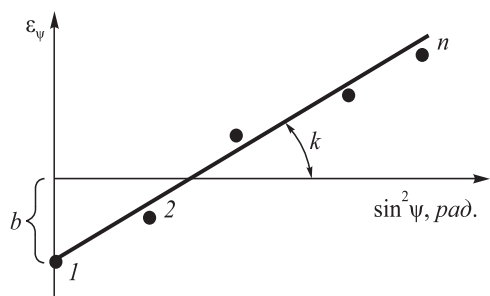


Рис. 2. Построение по экспериментальным точкам прямой методом наименьших квадратов

Fig. 2. Construction of a linear through the experimental points by least squares method

$$\sigma_{\varphi} = kE/(1 + \mu). \quad (3)$$

Выбор большого числа углов  $\psi$  позволит уменьшить корреляционную ошибку при построении зависимости относительной деформации  $\epsilon$  от  $\sin^2\psi$ . Для каждого  $i$ -го значения  $\psi$  определяют координату центра тяжести  $\theta_{ci}(\psi)$  максимума, соответствующего выбранной кристаллографической плоскости.

Для решения задач контроля остаточных напряжений деталей и узлов железнодорожного транспорта был разработан макет радиационно-безопасного отечественного портативного рентгеновского дифрактометра.

На рис. 3 показано расположение рентгеновских трубок портативного рентгеновского дифрактометра относительно точки измерения на поверхности фрагмента боковой рамы из стали 20ГЛ, вырезанного из зоны буксового проема радиуса R55.

Макет портативного рентгеновского дифрактометра состоит из блока электроники и высоковольтного источника питания рентгеновских трубок; гониометра с рентгеновскими трубками, детекторами и лазерными устройствами наведения; специального штатива для фиксирования положения гониометра над точкой измерения и управляющего персонального компьютера.

Принцип работы дифрактометра заключается в следующем. Изменение угла дифракции при наличии механических напряжений приводит к смещению дифракционного пика на регистрируемом дифракционном спектре (рентгенограмме) относительно положения пика при отсутствии напряжений. Детектор фиксирует дифрагированное рентгеновское излучение и передает при помощи аналого-цифрового преобразователя в персональный компьютер дискретную информацию о распределении интенсивности излучения, улавливаемом детектором.

Для компьютерной обработки регистрируемых дифракционных спектров разработана специальная программа STRESSCONTROLL, позволяющая графически отображать дифракционные спектры, регистрируемые детектором, управлять работой дифрактометра и рас-

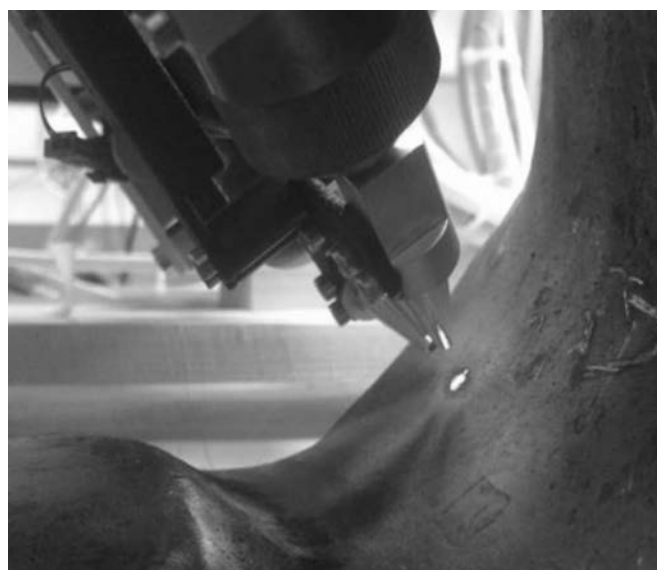


Рис. 3. Лазерное наведение рентгеновских трубок на точку измерения напряжений во фрагменте боковой рамы, вырезанном из зоны буксового проема радиуса R55

Fig. 3. Laser targeting of X-ray tubes to the stress measuring point in the side frame fragment, cutting from the bush aperture with R55 radius

считывать напряжения с использованием баз данных по металлам и фазам.

Компьютерная обработка дифракционных профилей заключается в определении положения центра тяжести. Алгоритм программы включает отделение фона, аппроксимацию массива данных в кривую и точное определение положения центра тяжести сглаженного профиля. Расчет поверхностных напряжений производится в соответствии с уравнением (3) в зависимости от угловых положений дифракционных максимумов с применением вспомогательных программ, обычно используемых на стационарных дифрактометрах.

На рис. 4, а представлены дифракционные пики, полученные при измерении поверхностных напряжений на фрагменте боковой рамы из стали 20ГЛ (термообработка – нормализация), вырезанном из зоны буксового проема радиуса R55. На рис. 4, б показана прямая зависимости положений центра тяжести дифракционных пиков от  $\sin^2\psi$ , по углу наклона которой вычисляется величина напряжений.

На рис. 4, в, г представлены аналогичные результаты для фрагмента из стали 20ГЛ после объемно-поверхностной закалки [19, 20]. Результаты расчета поверхностных напряжений приведены в таблице.

Полученные значения поверхностных напряжений для нормализованного фрагмента были близки к нулю, а фрагмент с объемно-поверхностной закалкой имел значительные сжимающие напряжения. Как известно, закалка приводит к созданию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений [21], в то время как в отожженном или нормализованном состоянии в стали величина напряжений должна быть близкой к нулю.

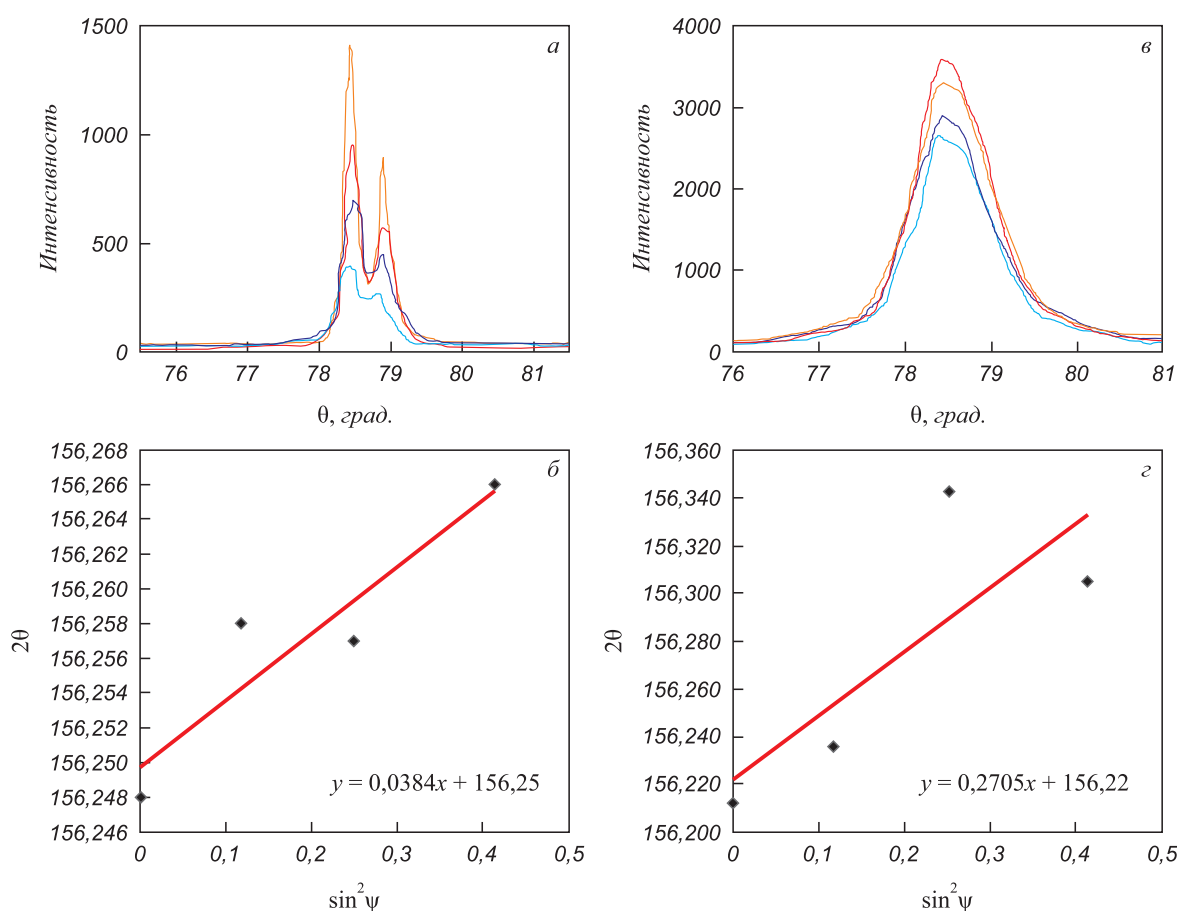


Рис. 4. Дифракционные пики (а, в) и зависимость центров тяжести дифракционных пиков от  $\sin^2\psi$  (б, г) фрагмента из стали 20ГЛ после нормализации (а, б) и после объемно-поверхностной закалки (в, г)

Fig. 4. Diffraction peaks (a, в) and dependence of the gravity centers of diffraction peaks on  $\sin^2\psi$  (б, г) for fragment of 20GL steel after normalization (a, б) and after volume-surface quenching (в, г)

Микроструктура фрагментов отличалась только в зависимости от их состояния с точки зрения термообработки (нормализованное состояние или закаленное). В нормализованном состоянии микроструктура стали

**Результаты определения макронапряжений на фрагментах боковой рамы из стали 20ГЛ после нормализации и объемно-поверхностной закалки**

**The measurements results of macro-stresses in the side frame fragments of 20GL steel after normalization and volume-surface hardening**

Образец	$\theta_{\text{ц.т.}}$ , град.	$\sin^2\psi$	$\sigma$ , МПа
Фрагмент после нормализации	$78,248 \pm 0,013$	0	$-29 \pm 15$
	$78,258 \pm 0,012$	0,117	
	$78,257 \pm 0,014$	0,250	
	$78,266 \pm 0,015$	0,413	
Фрагмент после объемно-поверхностной закалки	$78,212 \pm 0,013$	0	$-207 \pm 21$
	$78,236 \pm 0,012$	0,117	
	$78,343 \pm 0,014$	0,250	
	$78,305 \pm 0,011$	0,500	

20ГЛ представляла собой феррито-перлитную структуру со средним размером зерна  $25 \pm 5$  мкм (рис. 5, а). Микроструктура стали 20ГЛ после закалки несколько изменяется по сечению от охлаждаемой (внешней) при закалке поверхности к центру, но в целом представляет собой мартенситно-подобную пластинчатую структуру с выделениями избыточного феррита различной морфологии по границам и в теле зерен бывшего аустенитного зерна (рис. 5, б).

Следует отметить, что мартенситно-подобная пластинчатая структура (см. рис. 5, б) фрагментов создает дополнительные напряжения, которые приводят к размытию дифракционных пиков (в отличие от дифракционных пиков, полученных от нормализованных образцов).

Для искривленной формы поверхности необходимо соблюдать требование, что в точке измерения (площадь в несколько квадратных миллиметров) поверхность должна быть приближена к плоской форме (отклонения от плоской формы не должны превышать глубину проникновения рентгеновских лучей в зоне контакта с поверхностью). При нарушении этого может наблюдаться дефокусировка регистрируемого рентгеновского луча.



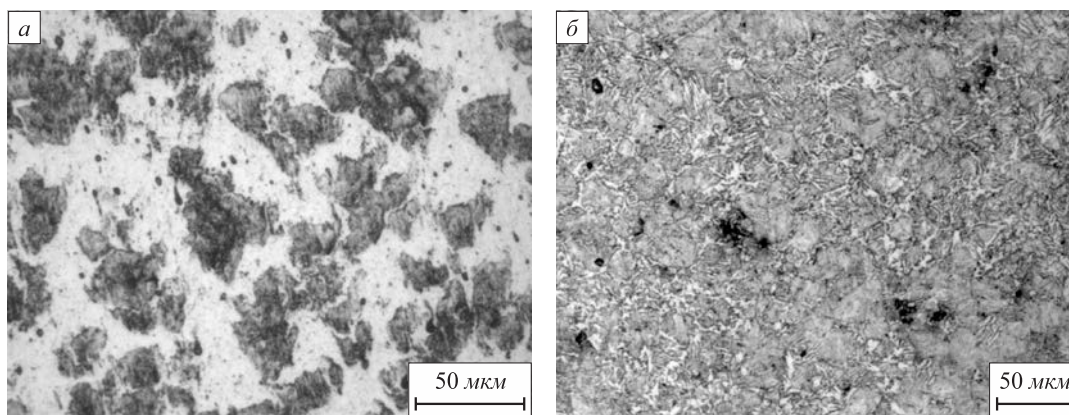


Рис. 5. Микроструктура фрагментов из стали 20 ГЛ после нормализации (а) и объемно-поверхностной закалки (б)

Fig. 5. The microstructure of 20GL steel fragments after normalization (a) and after volume-surface quenching (b)

При проведении измерений поверхностных напряжений следует иметь в виду, что с учетом незначительной глубины проникновения рентгеновских лучей для обеспечения применимости расчетных формул, шероховатость измеряемой поверхности должна быть много меньше глубины проникновения рентгеновских лучей вглубь металла колеса. С учетом этого, при измерении остаточных напряжений наклепанный поверхностный слой необходимо удалить электролитическим травлением. Также должна отсутствовать текстура на измеряемой поверхности в пределах размера зерна.

Перед началом работ оператору необходимо иметь схему зон (точек) контроля напряжений. Зоны контроля должны быть доступны для установки рентгенооптического коллимационного устройства дифрактометра (т. е. находиться в фокусе рентгеновских лучей).

Для получения более полной картины напряженного состояния в отдельных случаях целесообразно совместное применение рентгеновского и ультразвукового методов контроля остаточных механических напряжений. Проведение контроля должно начинаться с осмотра зон контроля и проверки пригодности поверхности для проведения измерений. Макет портативного дифрактометра последовательно устанавливают над каждой точкой измерения и ведут запись профиля дифракционных пиков согласно технической инструкции работы применяемого дифрактометра. При этом последовательно проводят измерения в каждом выбранном направлении действия механических напряжений (в тангенциальном и радиальном – по необходимости). Выбор направления проведения измерений делается, исходя из условий решаемой задачи (например, сходимости обода определяют окружные напряжения, а развал – распределение радиальных напряжений в приободной зоне диска).

Правильное угловое расположение рентгеновской трубки относительно измеряемой поверхности производится при помощи лазерной настройки.

Оценку полученных данных и анализ результатов исследования проводят путем сравнения значений напряжений и их распределения с допустимыми безопасными поверхностными напряжениями применительно к различным конструкциям и свойствам металла деталей железнодорожного транспорта.

Допустимые поверхностные остаточные напряжения определяются из условий эксплуатации измеряемых колес, исходя из требования о не превышении предела текучести колесной стали по абсолютной величине максимальных сжимающих или растягивающих напряжений в зонах их наивысшей концентрации, возникающих при максимальных возможных нагрузках. Безопасными принято считать такие остаточные напряжения, которые в сумме с максимальными напряжениями от эксплуатационных нагрузок не превышают пределы упругости металла исследуемой детали.

**Выводы.** Рассмотрены общие методические особенности применения рентгеновского метода для определения поверхностных напряжений в стальных деталях. Показана потенциальная применимость разработанного макета портативного дифрактометра для определения поверхностных напряжений на стальных деталях железнодорожного транспорта с разным уровнем поверхностных механических напряжений.

Показано, что форма дифракционного пика, а также уровень поверхностных напряжений напрямую связаны с особенностями микроструктуры стали исследуемых деталей. В этом случае рентгеновский метод определения поверхностных напряжений может являться индикатором состояния поверхности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 91 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4. Кн. 1. Акустическая тензометрия / В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.

3. Кошуля А.В., Малайчук В.П., Мозговой А.В. и др. Исследования остаточных напряжений в цельнокатаных железнодорожных колесах // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2013. № 1. С. 45 – 50.
4. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев, В.Ф. Мужикский, Э.С. Горкунов и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
5. Паньковский Ю.П. Аппаратная реализация некоторых магнитных методов неразрушающего контроля // Мир измерений. 2005. № 5. С. 9 – 12.
6. Kashiwaja K., Sakamoto H., Yoshida S. Nondestructive evaluation of hoop stress in rolling stock wheels // QR of RTRI. 1997. Vol. 38. No. 2. P. 66 – 69.
7. Безлюдько Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2003. № 2. С. 20 – 26.
8. Handbook of residual stress and deformation of steel / G.E. Totten, M.A.H. Howes, T. Inoue. ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 499 p.
9. Васильев Д.М. Дифракционные методы исследования структур. – СПб.: СПбГТУ, 1998. – 502 с.
10. Noyan I.C., Cohen J.B. Residual stress measurements by diffraction and interpretation. – NY: Springer-Verlag, 1987.
11. Kraus I., Ganey N. X-ray Analysis of the Inhomogeneous Stress State // Defect and microstructure analysis by diffraction. / R. Snyder, J. Fiala and H.-J. Bunge eds. – Oxford: University Press, 1999. P. 367 – 401.
12. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография. – М.: Наука, 2002. – 274 с.
13. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1. Кн. 2. Соснин Ф.Р. Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.
14. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.А. Расторгуев. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
15. Пашолок И.Л., Шиткин С.Л. Применение рентгеновской тензометрии для измерения поверхностных остаточных напряжений цельнокатаных колес с различным качеством обработки // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития. Тр. ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2005. С. 128 – 135.
16. Пашолок И.Л., Романов А.В., Сухов А.В., Шиткин С.Л. Применение рентгеновской тензометрии для неразрушающего контроля остаточных напряжений цельнокатаных колес // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 4. С. 23 – 28.
17. Сухов А.В., Шиткин С.Л. Перспективы применения рентгеновского метода контроля остаточных напряжений в цельнокатаных колесах // Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2010. С. 244 – 253.
18. Васильев Д.М., Трофимов В.В. Современное состояние рентгеновского способа измерения макронапряжений // Заводская лаборатория. 1984. Т. 50. С. 20 – 29.
19. Nikulin S.A., Fedin V.M., Rozhnov A.B. etc. Effect of volume-surface hardening on the cyclic strength of fragments of solebars of freight bogies // Metal Science and Heat Treatment. 2016. Vol. 57. No. 11 – 12. P. 678 – 683.
20. Nikulin S.A., Oguenko V.N., Rozhnov A.B. etc. Strength of freight bogie solebar fragments after volume-surface quenching // Russian Metallurgy (Metally). 2016. Vol. 2016. No. 10. P. 996 – 1001.
21. Райцес В.Б. Термическая обработка. В помощь рабочему-термисту. – М.: Машиностроение, 1980. – 192 с.

Поступила 8 августа 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 3, PP. 200–206.

## APPLICATION OF X-RAY METHOD TO DETERMINE THE STRESS STATE OF RAILWAY PARTS

S.A. Nikulin<sup>1</sup>, S.L. Shitkin<sup>2</sup>, A.B. Rozhnov<sup>1</sup>, S.O. Rogachev<sup>1</sup>, T.A. Nechaikina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Railway Research Institute, Moscow, Russia

**Abstract.** The method of determining the surface stress by X-ray method (by an example of steel samples of critical parts of railway transport) was examined taking into account the special surface preparation at the point of measurement. The features of the measurement surface stress by X-ray method were considered; the applicability of the designed layout of the portable X-ray diffractometer was shown. The diffractometer operates as follows. Changing the angle of diffraction in the presence of mechanical stresses leads to a shift of the diffraction peak on the recorded diffraction spectrum according to the peak position in the absence of stresses. The detector records the diffracted X-rays and passes the discrete information about the distribution of radiation intensity (which is captured by the detector) to the personal computer using an analog-digital converter. A special program “STRESSCONTROL” was developed for computer processing of the recorded diffraction spectra. The program allows to display graphically the diffraction spectra recorded by the detector, to control of diffractometer operation and to calculate the stresses using databases on metals and phases. Computer processing of the diffraction profiles is used to identify the position of the gravity center. The algorithm of the program involves the separation of the background, approximation of the data array to a curve and exact definition of the gravity center of the smoothed profile. The surface stresses on the fragment of the solebar of 20GL-type steel

(after normalization and volume-surface hardening), cut from the box opening area with R55-radius, were measured. The surface stresses definitions for normalized fragment showed the results close to zero and the results of surface stresses definitions for the fragment with a volume-surface hardening showed a significant compressive stresses. Thus, the shape of the diffraction peak and the level of surface stress are directly related to the investigated steel microstructure features. In this case, the X-ray method of determining the surface tension may be an indicator of the surface state.

**Keywords:** cast low carbon steel, railway parts, solebars, heat treatment, normalization, volume-surface hardening, X-ray diffraction, residual stresses.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-3-200-206

## REFERENCES

1. Sokolov I.A., Ural'skii V.I. *Ostatochnyye napryazheniya i kachestvo metalloproduksii* [Residual stresses and the quality of steel products]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 91 p. (In Russ.).
2. Anisimov V.A., Katargin B.I., Kutsenko A.N. etc. *Akusticheskaya tenzometriya* [Acoustic strain measurement]. In: *Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik v 8 t.* [Non-destructive testing: A Guide. 1-8 vols.]. Klyuev V.V. ed. Vol. 4, Book 1. Moscow: Mashinostroyeniye, 2006, 736 p. (In Russ.).
3. Koshulyan A.V., Malaichuk V.P., Mozgovoi A.V., Timoshchenko A.P., Chuprina L.V. Investigation of residual stresses in the rolled railway wheels. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol'*. 2013, no. 1, pp. 45–50. (In Russ.).

4. Klyuev V.V., Muzhitskii V.F., Gorkunov E.S. etc. *Magnitnye metody kontrolya* [Magnetic control methods]. In: *Nerazrushayushchii kontrol'. Spravochnik v 8 t.* [Non-destructive testing: Guide. 1-8 vols.]. Klyuev V.V. ed. Vol. 6, book 1. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 848 p. (In Russ.).
  5. Pan'kovskii Yu.P. Hardware implementation of some magnetic non-destructive testing methods. *Mir Izmerenii*. 2005, no. 5, pp. 9–12. (In Russ.).
  6. Kashiwaja K., Sakamoto H., Yoshida S. Nondestructive evaluation of hoop stress in rolling stock wheels. *QR of RTRI*. 1997, vol. 38, no. 2, pp. 66–69.
  7. Bezlyud'ko G.Ya. Operational control of the fatigue state and metal resource using non-destructive magnetic method (coercimetric). *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol'*. 2003, no. 2, pp. 20–26. (In Russ.).
  8. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Totten G.E., Howes M.A.H., Inoue T. eds. ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 499 p.
  9. Vasil'ev D.M. *Difraktsionnye metody issledovaniya struktur* [Diffraction methods of structural research]. St. Petersburg: SPbGTU, 1998, 502 p. (In Russ.).
  10. Noyan I.C., Cohen J.B. *Residual stress measurements by diffraction and interpretation*. NY: Springer-Verlag, 1987.
  11. Kraus I., Ganev N. X-ray analysis of the inhomogeneous stress state. In: *Defect and microstructure analysis by diffraction*. R. Snyder, J. Fiala and H.-J. Bunge eds. Oxford: University Press, 1999, pp. 367–401.
  12. Bowen D.K., Tanner Brian K. *High resolution X-ray diffractometry and topography*. London: Taylor & Francis, 1998, 252 p. (Russ.ed.: Bowen D.K., Tanner B.K. *Vysokorazreshayushchaya rentgenovskaya diffraktsionnaya i topografiya*. Moscow: Nauka, 2002, 274 p.).
  13. Sosnin F.R. *Radiatsionnyi kontrol'* [Radiation monitoring]. In: *Nerazrushayushchii kontrol'. Spravochnik v 8 t.* [Non-destructive testing: Guide. 1-8 vols.]. Klyuev V.V. ed. Vol. 1, book 2. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 560 p. (In Russ.).
  14. Umanskii Ya.S., Skakov Yu.A., Ivanov A.N., Rastorguev L.A. *Kristallografiya, rentgenografiya i elektronnaya mikroskopiya* [Crystallography, X-ray and electron microscopy]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 632 p. (In Russ.).
  15. Pasholok I.L., Shitkin S.L. Application of X-ray tensometry to surface residual stresses measurement in rolled wheels with different processing quality. In: *Zheleznodorozhnyi transport na sovremennoy etape razvitiya. Trudy VNIIZhT* [Rail transport at the present stage of development. Proceedings VNIIZhT]. Moscow: Intekst, 2005, pp. 128–135. (In Russ.).
  16. Pasholok I.L., Romanov A.V., Sukhov A.V., Shitkin S.L. The use of X-ray tensometry for non-destructive testing of residual stresses in rolled wheels. *Vestnik VNIIZhT*. 2005, no. 4, pp. 23–28. (In Russ.).
  17. Sukhov A.V., Shitkin S.L. Prospects for the use of X-ray method of residual stresses monitoring in rolled wheels. In: *Perspektivnye zadachi razvitiya zheleznodorozhnogo transporta* [Challenges to the development of railway transport]. Moscow: Intekst, 2010, pp. 244–253. (In Russ.).
  18. Vasil'ev D.M., Trofimov V.V. Current state of the X-ray method for macrostresses measurement. *Zavodskaya laboratoriya*. 1984, vol. 50, pp. 20–29. (In Russ.).
  19. Nikulin S.A., Fedin V.M., Rozhnov A.B., Rogachev S.O., Armi-zonov A.A. Effect of volume-surface hardening on the cyclic strength of fragments of solebars of freight bogies. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016, vol. 57, no. 11–12, pp. 678–683.
  20. Nikulin S.A., Oguenko V.N., Rozhnov A.B., Turilina V.Yu., Nechaikina T.A., Rogachev S.O. Strength of freight bogie solebar fragments after volume-surface quenching. *Russian Metallurgy (Metal-ly)*. 2016, vol. 2016, no. 10, pp. 996–1001.
  21. Raitsev V.B. *Termicheskaya obrabotka: v pomoshch' rabochemu-termistu* [Heat treatment: to help the heat-treater]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 192 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by Russian Ministry of Education and Science (Agreement no. 14.578.21.0020 from 05.06.2014, the unique identifier no. RFMEFI57814X0020).
- Information about the authors:**
- S.A. Nikulin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (nikulin@isis.ru)  
**S.L. Shitkin**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department (shitkins@yandex.ru)  
**A.B. Rozhnov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (rojnov@nm.ru)  
**S.O. Rogachev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (csaap@mail.ru)  
**T.A. Nechaikina**, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher (nechaykinata@gmail.com)

Received August 8, 2016