



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.172.21:539.4.014.13

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-88-99

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ХОЛОДНОКАТАНОЙ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЕ

Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Технологические процессы холодной листовой прокатки сопровождаются неравномерностью деформации стальной заготовки, что является основной причиной возникновения остаточных напряжений и может существенно повлиять на механические свойства листового или полосового проката. Остаточные напряжения могут привести к браку на финальных операциях обработки такой продукции или преждевременному выходу из строя готовых изделий. Для правильной организации технологического процесса прокатки необходимо прогнозировать распределение остаточных напряжений при различных параметрах технологии непосредственно в момент выпуска холоднокатаного листового проката, поэтому задача определения остаточных напряжений и их влияния на качество стального листа представляется актуальной. Целью работы является оценка остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления холоднокатаной листовой заготовки, предназначенной для холодной штамповки, с использованием метода термоэлектродвижущей силы (ТЭДС). Для экспериментального определения значений ТЭДС образцов холоднокатаной ленты из стали марки 08Ю на комплексе Gleeble 3500 использована авторская методика, положительно зарекомендовавшая себя при исследовании этим методом твердости. Доказано, что между значениями ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными поперек направления прокатки, возникающими при производстве холоднокатаной стальной ленты, наблюдается сильная положительная корреляция, свидетельствующая, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки. Предложена методика, состоящая в построении аппроксимирующих прямых для экспериментальных зависимостей значений ТЭДС от градиента температур, тангенс угла наклона которых представляет собой коэффициент Зеебека, что может быть использовано для оценки остаточных напряжений с построением карт их распределения по поверхности ленты. Таким образом, доказана перспективность использования метода ТЭДС для контроля остаточных напряжений холоднокатаной стальной ленты.

Ключевые слова: холоднокатаная лента, распределение остаточных напряжений по длине и ширине ленты, термоэлектрический метод исследования, термоэлектродвижущая сила, коэффициент Зеебека

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0003).

© Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н., 2026

Для цитирования

Термоэлектрическая неразрушающая оценка остаточных напряжений в холоднокатаной стальной ленте / Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Шеметов А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 88-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-88-99>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

THERMOELECTRIC NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN COLD-ROLLED STEEL STRIP

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Shemetov A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Technological processes of cold sheet rolling are accompanied by uneven deformation of the steel billet, which is the main cause of residual stresses and can significantly affect the mechanical properties of sheet or strip rolled products. Unaccounted for residual stresses can lead to defects in the final processing operations of such products or premature failure of finished products. For the proper organization of the rolling process, it is necessary to predict the distribution of residual stresses at various technology parameters immediately at the time of cold-rolled products manufacture, therefore, the task of determining residual stresses and their impact on the quality of the steel sheet is relevant. The work is aimed at evaluating the residual stresses that occur during the manufacturing process of cold-rolled sheet billet intended for cold stamping using the thermoelectromotive force (TEMF) method. For the experimental determination of the TEMF values of cold-rolled strip samples made of 08Yu steel, an original method was used on the Gleeble 3500 system, which has previously proven effective in hardness studies using this method. It has been demonstrated that a strong positive correlation exists between the thermoelectromotive force (TEMF) values and residual stresses measured transverse to the rolling direction, which arise during the production of cold-rolled steel strip. This correlation indicates that as the residual stresses in the strip increase, the TEMF values also increase. The inverse relationship is also valid: higher TEMF values correspond to higher residual stresses in the transverse direction. A methodology has been proposed that involves constructing approximating lines for the experimental dependence of TEMF values on the temperature gradient. The slope of these lines represents the Seebeck coefficient, which can be used to evaluate residual stresses and to generate maps of their distribution over the strip surface. Thus, the applicability of the TEMF method for monitoring residual stresses in cold-rolled steel strip has been substantiated.

Keywords: cold-rolled strip, distribution of residual stresses along the length and width of the strip, thermoelectric research method, thermoelectromotive force, Seebeck coefficient

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (project FZRU-2025-0003).

For citation

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Shemetov A.N. Thermoelectric Non-Destructive Evaluation of Residual Stresses in Cold-Rolled Steel Strip. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 88-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-88-99>

Введение

Одним из наиболее универсальных, высокопроизводительных и экономичных видов металлопродукции принято считать холоднокатаный листовой и полосовой прокат, который широко используется в качестве исходной заготовки для штамповки разнообразных изделий в автомобильной, судостроительной, авиационной, строительной, консервной и других отраслях промышленности [1]. При этом технологические процессы обработки металлов давлением при изготовлении холоднокатаной стали сопровождаются неравномерностью деформации (непостоянством деформации по ширине, высоте и длине деформируемых изделий), которая может существенно повлиять на механические свойства материалов [2, 3]. Неравномерность пластической деформации различных участков материала является основной причиной возникновения остаточных напряжений [4]. В результате в слоях, получивших большие обжатия, возникают сжимающие напряжения, а в слоях, получивших обжатие меньше среднего, появляются растягиваю-

щие напряжения. Наличие остаточных напряжений к тому же может вызывать формирование остаточных деформаций, что в конечном итоге приводит к геометрическим искажениям.

Фактические значения остаточных напряжений могут варьироваться в зависимости от конкретных условий обработки, марки материала, режимов технологического процесса и применяемого оборудования. Поэтому для технологов машиностроительных предприятий понимание природы остаточных напряжений и методов их контроля является критически важным для обеспечения качества и надежности выпускаемой продукции. Остаточные напряжения могут привести к браку на финальных операциях обработки или преждевременному выходу из строя готовых изделий. Следует отметить, что результаты исследований остаточных напряжений, возникающих в изделиях, изготовленных методами холодной пластической деформации, отражены во многих научных публикациях. Так, проведена оценка влияния поверхностных остаточных напряжений на техническое состояние деталей машин после их ремонта и восстановления

[5, 6]. Проанализированы экспериментальные данные об остаточных напряжениях в различных стальных профилях холодной штамповки, тонкостенных изделиях, тарельчатых пружинах и других деталях и конструкциях [7-9]. Выполнен анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках и готовых трубах [10, 11]. Определены уровни остаточных напряжений при волочении низкоуглеродистой проволоки [12, 13].

При этом необходимо учитывать, что при изготовлении изделий из листовых заготовок обработкой давлением после снятия нагрузки в их объемах появляются дополнительные остаточные напряжения, которые суммируются с уже имеющимися [14, 15]. А при обработке полуфабриката, связанной со снятием поверхностных слоев металла или вырезкой детали, может произойти деформация, вызванная нарушением баланса остаточных напряжений в заготовке. После такой обработки заготовка может не соответствовать требованиям или допускам на геометрические размеры. В ряде научных работ отмечается, что если последующая обработка листового материала связана со снятием или дополнительной обработкой поверхностного слоя металла, то можно получить потерю плоскостности листа [4, 16, 17]. Более того, финишная обработка холоднокатаных листов часто осуществляется с использованием либо растяжных машин, либо роликоправильных машин, либо дрессировки в валках большого диаметра, при этом могут быть наведены дополнительные остаточные напряжения [18], хотя целью правки часто является как раз снятие внутренних напряжений.

Однако остаточным напряжениям, формирующимся в холоднокатаном листовом материале, уделяется значительно меньше внимания, в то время как их возникновение существенным образом определяет качество листа, вызывая деформацию, коробление, растрескивание и хрупкое разрушение [19, 20]. Так, сжимающие напряжения могут вызвать местную потерю устойчивости и коробление листа, а растягивающие напряжения могут привести к разрушению листового проката из хрупких малопластичных материалов. В зонах концентрации растягивающих напряжений, особенно при циклических нагрузках, возможно образование трещин, а также может происходить ускорение коррозионных процессов. Особо существенно влияют на изменение геометрии полос остаточные напряжения, возникающие в достаточно тонких и широких металлических полосах. Неблагоприятное их распределение приводит к нарушению планшетности и, следовательно, к негодности готовой продукции.

Для того чтобы правильно организовать технологический процесс прокатки, необходимо знание распределения остаточных напряжений при различных параметрах технологии. В связи с этим возникает необходимость прогнозирования наличия остаточных напряжений непосредственно в момент выпуска холоднокатаного листового проката, поэтому задача

определения остаточных напряжений и их влияния на качество стального листа представляется актуальной.

Для определения величины и характера остаточных напряжений распространены различные разрушающие и неразрушающие методы [21, 22]. В частности, используется метод инструментального индентирования, который, однако, позволяет оценивать остаточные напряжения только в поверхностных слоях. Широко применяется ультразвуковой метод, недостаток которого связан с тем, что на скорость распространения волны влияет не только напряженно-деформированное состояние, но и другие микроструктурные характеристики, такие как размер зерен, кристаллографическая текстура и, кроме того, его точность сильно подвержена влиянию собственной температуры образца и температуры окружающей среды, влияющих на скорость ультразвуковых волн. Метод, основанный на дифракции рентгеновских лучей, позволяет получить абсолютные значения остаточных напряжений, но также имеет определенные ограничения: глубина проникновения рентгеновских лучей ограничена несколькими десятками микрон, что делает метод преимущественно поверхностным; требуется строгое соблюдение методики и наличия высококачественного оборудования; при неоднородности напряженного состояния по глубине слоя проникновения рентгеновских лучей и наличии ярко выраженной кристаллографической текстуры происходит снижение точности. Магнитные методы определения остаточных напряжений являются косвенными, поэтому практически нельзя учесть все факторы, которые влияют на исходную величину параметра контроля, особенно на образцах со структурной неоднородностью.

Несмотря на то, что остаточные напряжения относятся к числу факторов, существенно влияющих на множество характеристик, определяющих качество готовых изделий, к сожалению, в показателях качества остаточные напряжения, как правило, не отражены. Причины кроются в отсутствии оперативных методов точного замера остаточных напряжений, количественной оценке их влияния на эксплуатационные свойства. Поэтому возникает необходимость в создании новых методов и средств неразрушающего контроля, что является актуальной проблемой.

Обзор имеющихся литературных источников показал, что эффективным методом контроля влияния структурного состояния и различного рода дефектов на свойства холоднокатаной листовой стали может явиться применение термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), которая является одним из физических свойств, в высокой степени чувствительных к упругой и пластической деформации [23-25]. Этот метод использовали, например, для исследования области максимальной деформации пластически деформированных сталей [26], оценки уровня деформации в титановых сплавах [27], зон предполагаемой локализации пластических деформаций стали [28], а также для определения преобладающих остаточных напряже-

ний в образцах с дробеструйной обработкой [29]. В ранее осуществленных исследованиях авторов данной работы [30] была выполнена оценка неоднородности распределения твердости холоднокатаной ленты с использованием метода ТЭДС. В связи с вышесказанным, целью проводимых исследований, результаты которых представлены в данной статье, является оценка остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления холоднокатаной листовой заготовки, предназначенной для холодной штамповки, с использованием метода ТЭДС.

Материалы и методы исследования¹

Исследование проводилось на образцах размером 30×50 мм, вырезанных из рулона холоднокатаной ленты толщиной 0,5 мм и шириной 273 мм, химический состав которой соответствовал стали марки 08Ю с содержанием 0,04% С, 0,01% Si, 0,21% Mn, 0,008% S, 0,007% P и 0,07% Al. Схема отбора образцов и их маркировка представлены на рис. 1, а².

Эксперименты по измерению ТЭДС проводились

с применением модуля PocketJaw исследовательского комплекса Gleeble 3500. В работе использовался косвенный нагрев с помощью специально сконструированных сборочных элементов (рис. 1, б), исходя из необходимости предотвращения возможного влияния на значения ТЭДС электромагнитных полей, возникающих при нагреве образцов прямым пропусканием электрического тока, реализуемого в комплексе Gleeble 3500. При этом передача тепла от нагревательного элемента к исследуемым образцам происходила по механизмам, имитирующим нагрев в печи. По центру нагревательного элемента закреплялась термопара ТС1, управляющая нагревом и охлаждением. В непосредственной близости от нагревательного элемента температуру «горячего» конца образца фиксировала термопара ТС2, а температуру вблизи «холодного» конца образца записывала термопара ТС3, расположенная на расстоянии 38 ± 1 мм от термопары ТС2 (рис. 1, в). Значения температур и ТЭДС снимались с помощью хромель-алюмелевых термопар (тип К) с частотой 10 Гц.

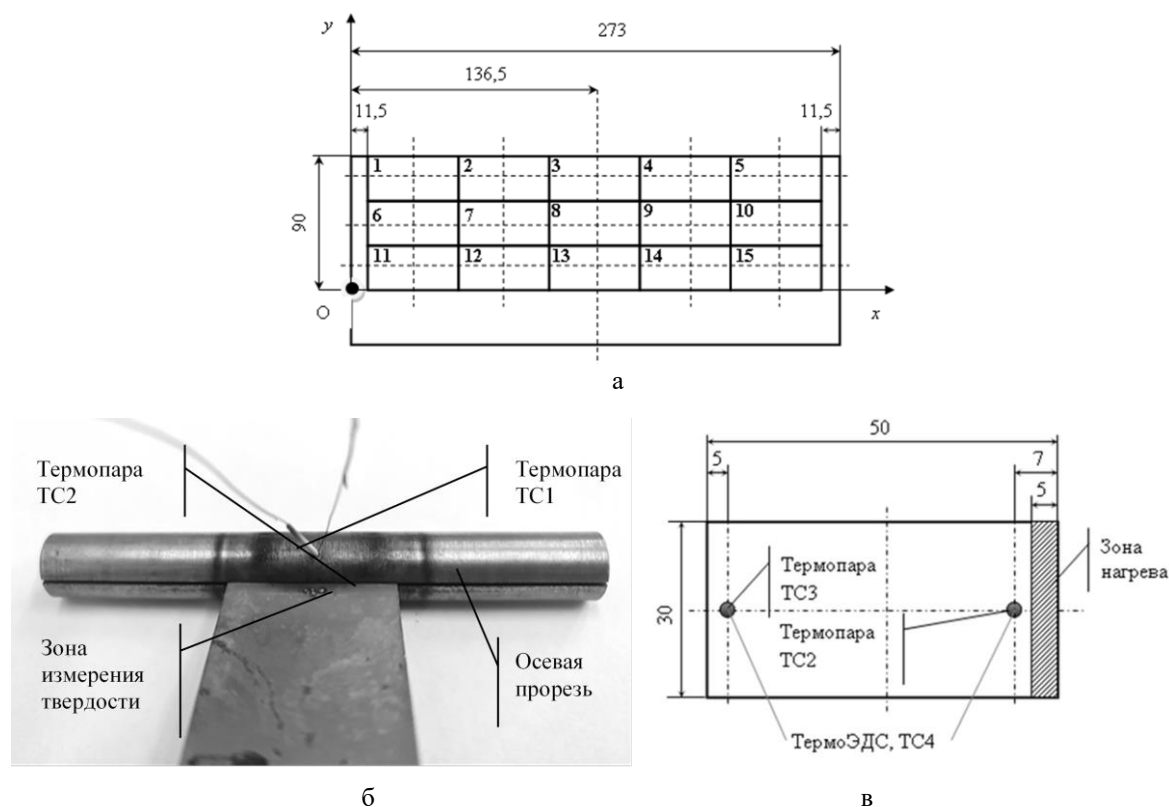


Рис. 1. Схема отбора и маркировка образцов (а), сборочного элемента для косвенного нагрева образца (б) и схема крепления термопар на образцах холоднокатаной ленты при измерении ТЭДС (в)
 Fig. 1. Sampling scheme and labeling of samples (a), an assembly element for indirect heating of the sample (б) and a scheme for attaching thermocouples to samples of cold-rolled strip when measuring TEMF (в)

¹ Исследования проводились в НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

² Образцы с 1 по 5 подвергались отжигу при температуре 720°C в течение 1 ч для снятия остаточных напряжений с целью выявления величины ТЭДС стали в ненапряженном состоянии. Результаты этих исследований лежат вне рамок данной работы и приведены в предыдущих публикациях авторов.

Условия нагрева и охлаждения для всех исследуемых образцов принимались одинаковыми. Нагревательный элемент разогревался со скоростью 10 °С/с до температуры 750 °С, затем осуществлялась изотермическая выдержка в течение 10 с и охлаждение со скоростью 10 °С/с до достижения температуры 100 °С. Охлаждение нагревательного элемента осуществлялось за счет теплообмена с окружающей средой и медными охлаждаемыми зажимами. Программа проведения эксперимента задавалась при помощи программного обеспечения QuikSim2®, а обработка результатов эксперимента осуществлялась при помощи стандартного программного пакета Origin® комплекса Gleeble 3500.

Схема отбора и маркировки образцов, а также методика определения ТЭДС с использованием комплекса Gleeble 3500 более подробно описаны в работе [30].

Измерение твердости осуществлялось в центре образцов на универсальном твердомере EmcoTest M4C075G3 вдавливанием алмазной пирамиды с углом при вершине 136° при нагрузке 98,07 Н (10 кгс) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

Определение остаточных напряжений проводилось в центре образцов в направлении поперек прокатки (то есть вдоль оси x) с использованием метода рентгеновской дифрактометрии. Известно, что растяжение или сжатие кристалла при возникновении в кристаллической решетке напряжений приводит к изменению межплоскостного расстояния d , которое может отклоняться как в сторону больших, так и меньших значений от расстояния в ненапряженном состоянии d_0 , что находит отражение в изменении брэгговского угла 2θ при дифракции рентгеновских лучей. Если измерить смещение дифракционного максимума, полученного от набора кристаллографических плоскостей с одинаковыми индексами $\{hkl\}$, то становится возможным рассчитать изменение межплоскостного расстояния по сравнению с ненапряженным состоянием, а также величину остаточных напряжений.

Для определения поверхностных напряжений σ_φ в заданном направлении, характеризующимся азимутальным углом φ на поверхности образца, применялась традиционная методика, известная как метод « $\sin^2\psi$ » [31], принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Метод « $\sin^2\psi$ » заключается в регистрации дифракционных пиков для разных углов наклона ψ плоскости, в которой расположены рентгеновская трубка и детектор, и основан на экспериментальном измерении относительного изменения $\Delta d/d$ межплоскостных расстояний.

В рентгеновской дифракции для кубических решеток существует линейная связь между углом Брэгга θ и $\sin^2\psi$ [38]. По результатам эксперимента строится зависимость $\theta = f(\sin^2\psi)$, которая описывается уравнением прямой. Отсекаемый на оси ординат отрезок позволяет найти сумму главных напряжений $(\sigma_1 + \sigma_2)$, а угол наклона – значение σ_φ :

$$\sigma_\varphi = -E \operatorname{ctg} \theta_0 \operatorname{tg} \alpha / (1 + \mu), \quad (1)$$

где α – угол наклона прямой зависимости $\theta = f(\sin^2\psi)$ к оси $\sin^2\psi$. Определяемое напряжение σ_φ лежит в плоскости образца и направлено перпендикулярно оси наклона.

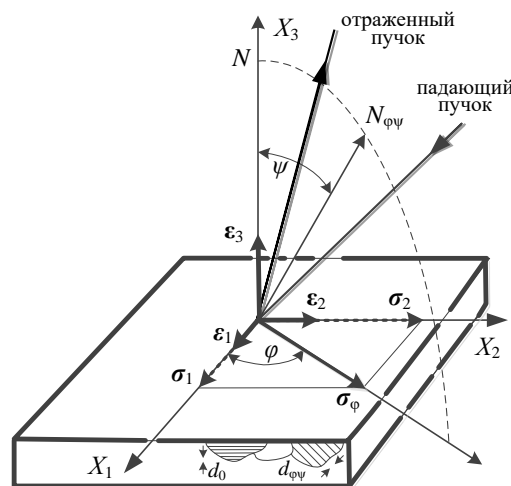
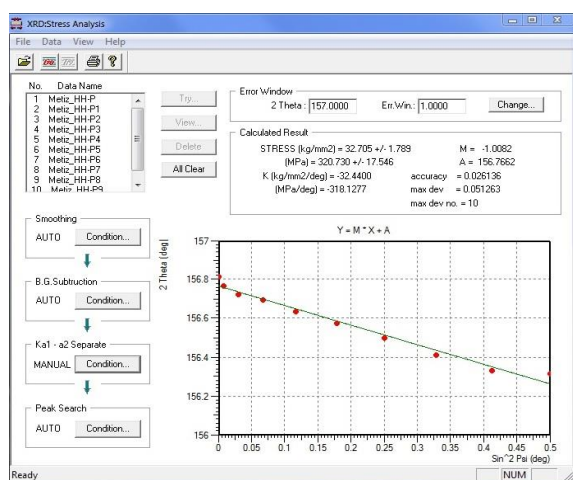


Рис. 2. Схема отражения рентгеновских лучей при съемке методом « $\sin^2\psi$ »: σ_1, σ_2 – главные напряжения ($\sigma_3 = 0$); $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – главные деформации; ψ – угол наклона образца относительно пучка рентгеновского излучения; φ – азимутальный угол на поверхности; N и $N_{\varphi\psi}$ – нормали к отражающим плоскостям, параллельным исследуемой поверхности образца (d_0) и под углами φ и ψ к ней ($d_{\varphi\psi}$)

Fig. 2. X-ray reflection scheme during "sin²psi" imaging: σ_1, σ_2 are the main stresses ($\sigma_3 = 0$); $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ are the main deformations; ψ is the angle of inclination of the sample relative to the X-ray beam; φ is the azimuthal angle on the surface; N and $N_{\varphi\psi}$ are the normal lines to the reflecting planes parallel to the sample surface under study (d_0) and at angles φ and ψ to it ($d_{\varphi\psi}$)

В работе рентгеноструктурный анализ осуществляли с применением рентгеновского дифрактометра SHIMADZU XRD-7000 с использованием K_α -излучения хромового анода (длина волны характеристического K_α -излучения $\lambda = 2,28962 \cdot 10^{-10}$ м). Анализ напряжений осуществлялся по линии (211) α -фазы, имеющей большой угол дифракции (двойной угол дифракции $2\theta \approx 156^\circ$). Напряжение трубки составляло 30 кВ, сила тока (катод) – 40 мА, диапазон углов 2θ – от 152 до 160°. Режим съемки – непрерывный со скоростью 2°/мин. Угол ψ изменялся с помощью приставки, позволяющей менять угол в диапазоне от 0 до 50° с точностью 0,01° и составлял 0, 15, 30 и 45°.

Остаточные напряжения рассчитывались в программном пакете XRD Stress Analysis, входящем в состав программного обеспечения рентгеновского дифрактометра (рис. 3, а), где прописаны коэффициенты пропорциональности (K) между изменениями углов дифракции 2θ и значениями $\sin^2\psi$, используемые для расчета остаточных напряжений (рис. 3, б).



а

Sample	Tube	Plane	Angle (kg/mm ² /deg)	K (MPa/deg)
a-Fe	CrKa	(211)	156.1	-32.44
r-Fe	CrKb	(311)	149.6	-37.35
Al	CrKa	(222)	156.7	-9.40
Al	CoKa	(420)	162.1	-7.18
Al	CoKa	(331)	148.7	-12.78
Al	CuKa	(333)	164.0	-6.41
Cu	CoKa	(400)	163.5	-12.04
Cu	CuKa	(420)	144.7	-26.42
WC	CoKa	(211)	165.8	-47.61
WC	CuKa	(301)	146.8	-114.10

б

Рис. 3. Интерфейс программы (а) и таблица коэффициентов (б) для определения остаточных напряжений
 Fig. 3. Program interface (a) and coefficient table (б) for determining residual stresses

Полученные результаты и их обсуждение

При исследовании были определены координаты центров образцов, вырезанных из холоднокатаной ленты. При расчете координат ось *x* была ориентирована по ширине, а ось *y* – по длине отрезка ленты шириной 273 мм и длиной 90 мм (см. рис. 1, а).

По кривым зависимости ТЭДС от степени температурной неоднородности ΔТ/ТС2 (пример приведен для образцов 11-15 на рис. 4) для каждого из образцов определялась величина ТЭДС при степени температурной неоднородности ΔТ/ТС2=0,63, выбор которой подробно рассмотрен в работе [30].

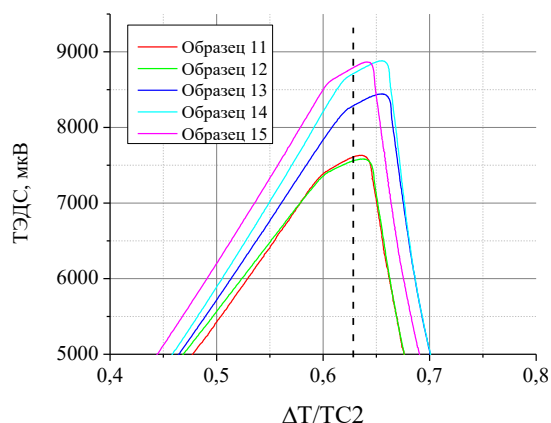


Рис. 4. Изменение ТЭДС в зависимости от степени температурной неоднородности на примере образцов 11–15

Fig. 4. Variation of TEMF values depending on the degree of temperature heterogeneity on the example of samples 11-15

Полученные результаты определения твердости, остаточных напряжений и величины ТЭДС приведены в таблице.

Таблица. Результаты экспериментов
 Table. Experiments results

Номер образца	Координата <i>x</i> , мм	Координата <i>y</i> , мм	Твердость, НВ	ТЭДС, мкВ	Остаточные напряжения поперек прокатки, МПа	Коэффициент Зеебека, мкВ/°С
6	36,5	45	85	8172	-32,4	24,11
7	86,5	45	91	8438	17,0	24,48
8	136,6	45	91,9	8725	33,8	24,48
9	186,5	45	94	8219	-39,4	23,21
10	236,5	45	91,6	7808	-77,1	23,32
11	36,5	15	89,3	7621	-112,7	21,87
12	86,5	15	90,4	7566	-68,4	21,20
13	136,5	15	92,4	8302	-36,7	24,17
14	186,5	15	92,9	8726	-98,0	22,36
15	236,5	15	91,4	8806	-39,5	22,99

При исследовании были построены кривые изменений значений ТЭДС в зависимости от градиента температур, что иллюстрирует рис. 5. Их анализ показал, что для разных исследуемых образцов фиксируются различные максимальные абсолютные значения ТЭДС. Учитывая, что значения ТЭДС линейно пропорциональны градиентам температур согласно эффекту Зеебека, для каждой приведенной кривой строилась аппроксимирующая прямая с оценкой ее достоверности по критерию Пирсона и коэффициенту R-квадрат, как это показано, например, для образца 8 на рис. 6, а. Оценка статистической значимости аппроксимирующих прямых по критерию Пирсона производилась в программном комплексе Origin® по традиционной методике с применением метода наименьших квадратов для поиска параметров прямой, наиболее точно описывающей набор точек.

Пример аппроксимирующих прямых для кривых зависимостей ТЭДС от градиента температур для образцов 6-10 приведен на рис. 6, б.

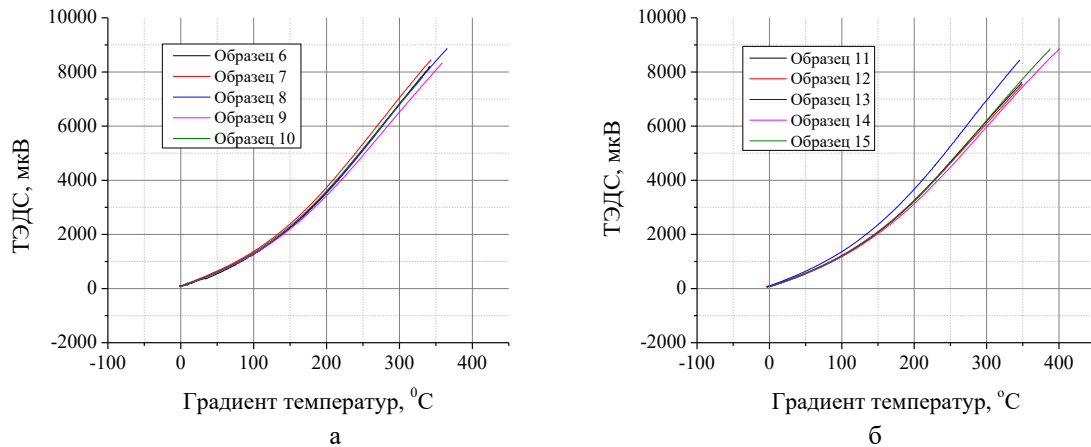


Рис. 5. Кривые изменения значений ТЭДС для образцов 6-10 (а) и 10-15 (б) в зависимости от градиента температур

Fig. 5. Variation curves in TEMF values for samples 6-10 (a) and 10-15 (б) depending on the temperature gradient

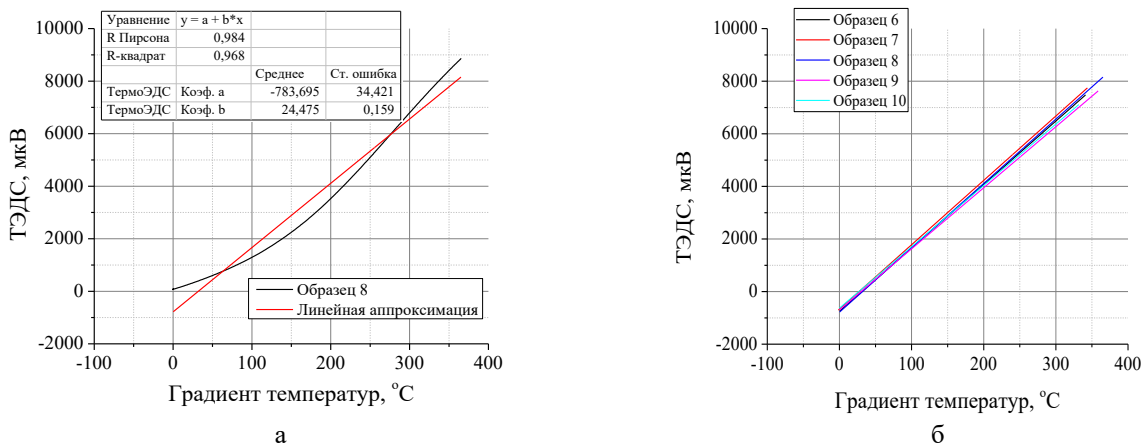


Рис. 6. Пример кривой изменения ТЭДС в зависимости от градиента температур для образца 8 с аппроксимирующей прямой (а) и группы аппроксимирующих прямых для зависимостей ТЭДС от градиента температур образцов 6-10 (б)

Fig. 6. Example of the TEMF variation curve as a function of the temperature gradient for sample 8 with a fitted straight line (a), and a group of fitted straight lines for the dependences of TEMF on the temperature gradient for samples 6-10 (б)

Угол наклона α аппроксимирующей прямой к положительному направлению оси x однозначно определяется коэффициентом b уравнения $y = a + bx$, то есть $\alpha = \arctg b$ или $b = \tg \alpha$. С другой стороны, из геометрических соображений и известного уравнения Зеебека $\tg \alpha$ определяется соотношением

$$\tg \alpha = \frac{E}{\Delta T} = K_z, \quad (2)$$

где E – величина ТЭДС, мкВ; ΔT – градиент температуры, °С; K_z – коэффициент Зеебека, мкВ/°С.

Тогда очевидным является равенство $b = K_z$. При известных значениях коэффициентов b линейных

аппроксимирующих уравнений, а также значений градиентов температур ΔT однозначно определяется величина ТЭДС, а значение коэффициента b является коэффициентом Зеебека и характеристическим параметром исследуемого материала. Полученные экспериментально-расчетным путем значения коэффициентов Зеебека приведены в **таблице**.

Для сравнения двух параметров X (коэффициент Зеебека) и Y (величина остаточных напряжений), находящихся в разных числовых пространствах, получаемых в ходе проведения экспериментов для каждого из образцов, использовалась традиционная методика парной корреляции по Пирсону. Данная методика является статистическим методом измерения степени линейной взаимосвязи между двумя переменными, а в основе метода лежит вычисление коэф-

коэффициента корреляции ($R_{X,Y}$), который варьируется от -1 до $+1$. Значение коэффициента $R_{X,Y} = +1$ свидетельствует об идеальной положительной корреляции (когда значение одной переменной растет, значение другой также растет), $R_{X,Y} = 0$ – отсутствие линейной корреляции, $R_{X,Y} = -1$ характеризует идеальную отрицательную корреляцию (когда значение одной переменной увеличивается, значение другой уменьшается). Значение коэффициента корреляции Пирсона интерпретируется исходя из его абсолютных значений. Принято считать, что абсолютные значения $R_{X,Y} < 0,3$ свидетельствуют о слабой связи, значения $R_{X,Y}$ от $0,3$ до $0,7$ – о связи средней тесноты, а значения $R_{X,Y} > 0,7$ – о сильной связи. Расчет коэффициентов парной корреляции производился также в программном комплексе Origin®.

Величины коэффициента парной корреляции Пирсона между значениями угла наклона аппроксимиру-

ющей прямой ТЭДС и величиной остаточных напряжений, измеренных поперек направления прокатки ленты, для образцов 6-10 составили $0,87$, а для образцов 11-15 – $0,64$. Это свидетельствует о наличии сильной положительной корреляционной связи между ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными в направлении поперек прокатки и подтверждается характером изменения значений этих измеренных величин при переходе от одного образца к другому (рис. 7), расположенных в соседних участках по длине исследуемого отрезка ленты, а также картами распределения значений остаточных напряжений (рис. 8, а) и коэффициентов Зеебека (рис. 8, б) по координатам центров образцов на поверхности ленты. Это свидетельствует о том, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки.

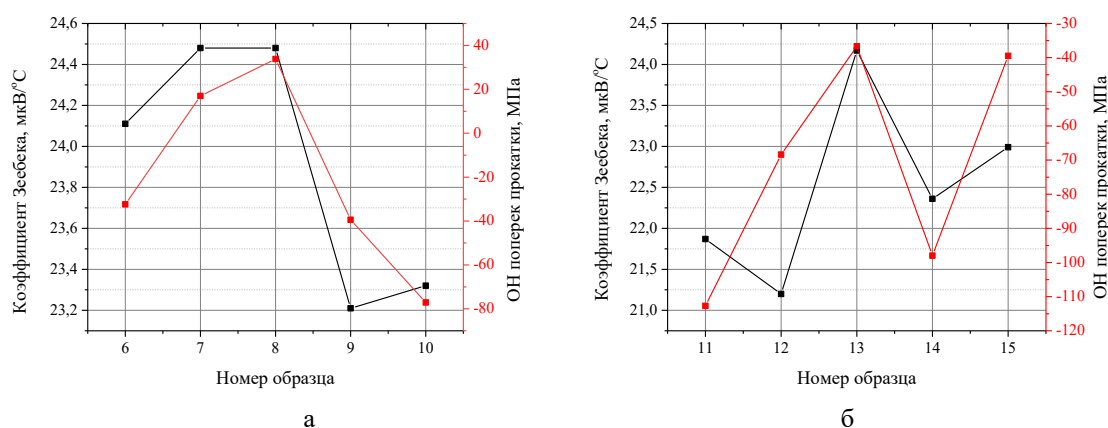


Рис. 7. Изменения величины ТЭДС и значений остаточных напряжений, измеренных в направлении поперек прокатки, при переходе от одного образца к другому в группах образцов 6-10 (а) и 11-15 (б)

Fig. 7. Changes in the TEMF values and residual stress values measured in the transverse direction to rolling, when transitioning from one sample to another in the groups of samples 6-10 (a) and 11-15 (b)

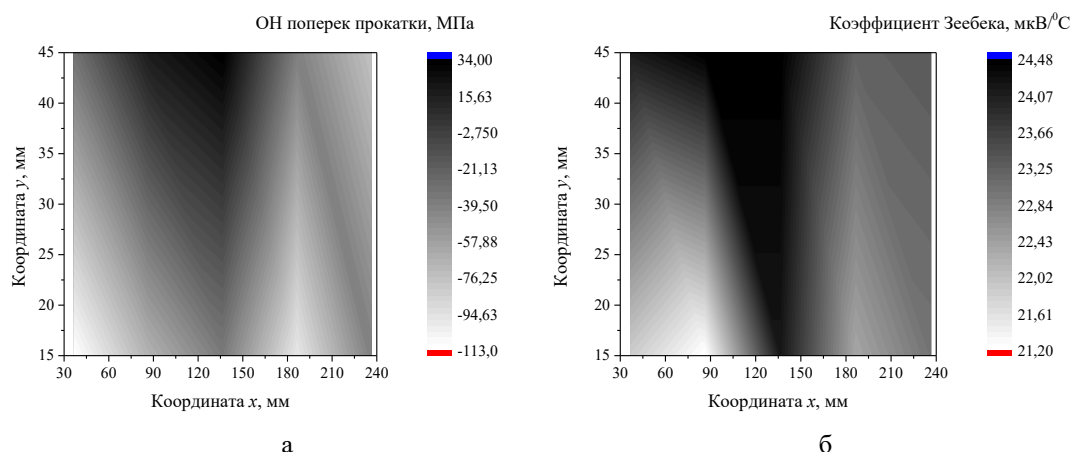


Рис. 8. Карта распределения значений остаточных напряжений, снятых поперек прокатки (а), и коэффициентов Зеебека (б) по координатам центров образцов на поверхности ленты

Fig. 8. Map of the distribution of residual stress values measured transverse to the rolling direction (a), and Seebeck coefficients (b), according to the coordinates of the sample centers on the strip surface

Заключение

Для определения ТЭДС образцов холоднокатаной ленты из стали марки 08Ю на комплексе Gleeble 3500 использована авторская методика, положительно зарекомендовавшая себя при исследовании твердости холоднокатаной ленты и отличающаяся от известных тем, что для предотвращения возможного влияния электромагнитных полей на значения ТЭДС при нагреве прямым пропусканием электрического тока применялся нагревательный элемент с осевой прорезью по всей его длине с управляющей нагревом и охлаждением термопарой, прикрепленной по центру нагревательного элемента. Передача тепла от нагревательного элемента к исследуемым образцам происходила по механизмам, моделирующим нагрев в печи.

Доказано, что между значениями ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными поперек направления прокатки, возникающими при производстве холоднокатаной стальной ленты, наблюдается сильная положительная корреляция, подтверждающая, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки.

Предложена методика, состоящая в построении аппроксимирующей прямой для экспериментальной зависимости значения ТЭДС от градиента температур, тангенс угла наклона которой представляет собой коэффициент Зеебека, что может быть использовано для оценки остаточных напряжений с построением карт их распределения по поверхности ленты.

Таким образом, доказана перспективность использования метода ТЭДС для контроля остаточных напряжений холоднокатаной стальной ленты.

Список источников

1. Павлов И.М. Теория прокатки. М.: Наука, 1950. 610 с.
2. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: монография. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 226 с.
3. Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 26-31.
4. Through-thickness resolution, stress oscillations and residual stress in cold rolling / F. Flanagan, A. N. O'Connor, M. Erfanian et al. // European Journal of Mechanics, A/Solids. 2025, vol. 114, 105761. DOI:10.1016/j.euromechsol.2025.105761.
5. Богданов Н.В., Будюкин А.М. Влияние остаточных напряжений в металле кузова автомобиля после ДТП на его надежность // Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей: сб. тр. V Национальной межвузовской научно-

технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург: Изд-во Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. 2022. С. 101-105.

6. Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Повышение долговечности восстановленных деталей машин на основе управления остаточными напряжениями // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2018. Т. 18. №1. С. 58-67. DOI: 10.14529/engin180107.
7. Adrian D., & Crisan A. Cold Rolling Effects on Material Properties in Pallet Rack Uprights. The Open Civil Engineering Journal. 2017, no. 11, pp. 319–331. doi.org/10.2174/1874149501711010319.
8. Investigation into the distribution of residual stresses in pressed-braked thin-walled steel lipped channel sections using the 3D-FEM technique / A. Mutafia, N. Yidris, J. Loughlan et al. // Thin-Walled Structures. 2019, vol. 135, February, pp. 437-445. DOI:10.1016/j.tws.2018.11.003
9. Influence of process parameters on the residual stress state and properties in disc springs made by incremental sheet forming (ISF)/ Afzal, M.J., Hajavifard, R., Buhl, J. et al. //Forsch Ingenieurwes. 2021, vol. 85, pp. 783–793. https://doi.org/10.1007/s10010-021-00491-w
10. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д. Релаксация остаточных напряжений и точность трубных металлоизделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. № 3 (16). С. 103-108.
11. Погуляев С.И., Максютин И.В., Попков А.С. Влияние неравномерности распределения остаточных и эксплуатационных напряжений в трубах на возникновение в них дефектов коррозионного растрескивания под напряжением // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2022. № 1 (50). С. 120-132.
12. Логинов Ю. Н., Грехов С. К. Формирование остаточных напряжений при волочении низкоуглеродистой проволоки // Сталь. 2021. № 5. С. 25-28.
13. Громов Д.В., Радионова Л.В., Глебов Л.А. Анализ остаточных напряжений в проволоке после волочения в монолитной волоке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2025. Т. 25. №3. С. 48-59. DOI: 10.14529/met250305.
14. Файрушин А.М., Маркелов Д.А., Марченко И.А. Исследование закономерностей возникновения остаточных напряжений в листовом металле после операций гибки в холодном состоянии // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2020. № 4. С. 74-84.
15. Влияние остаточных напряжений на качество изделий при холодной обработке давлением листовых заготовок / А.П. Коликов, А.В. Лютцау, Н.Л. Лисунец и др. // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 2(12). С. 139-144.
16. Careful finite element simulations of cold rolling with accurate through-thickness resolution and prediction of residual stress. / F. Flanagan, A. N. O'Connor, M. Erfanian et al. // ArXiv preprint arXiv:2408.03242. 2024, pp. 1-33. https://arxiv.org/pdf/2408.03242
17. Nakhoul R., Montmitonnet P., Potier-Ferry M. Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stresses in the context of strip rolling // International Journal of Solids and Structures. 2015, vol. 66, pp. 62-76. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.028.

18. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Шаламов В.Г. Разработка методики расчета остаточных напряжений и параметров пружинения листа на роликовой правильной машине // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 14-20. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-1-14-20.
19. Research on Distribution of Residual Stresses of Cold Rolled Sheet Distorted Area Based on ANSYS / Sun W., Shao J., He A. et al. // Manufacturing technology – abstracts. 2015, April, vol. 15, no. 2, pp. 220-226. DOI: 10.21062/ijep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/2/220.
20. Третьяков Е.М. Остаточные напряжения в холоднодеформированных тонких изделиях и в тонколистовом дроссированном металле // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 49-61.
21. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) / А.Д. Монахов, Н.О. Яковлев, В.В. Автаев и др. // Труды ВИАМ. 2021. №9 (103). С. 95-104. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
22. Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Разрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. 2024. №1 (131). С.101-112. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
23. Орлов Д. В. Термоэлектрические эффекты в металлах. Екатеринбург: УрФУ, 2005. 150 с.
24. Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А. Современные тренды применения термоэлектрического метода в неразрушающем контроле (обзор) // Дефектоскопия. 2024. № 2. С. 64-83.
25. Нестерович Ю.И. Разработка метода и средства термоэлектрического контроля металлов и сплавов: дис. ...канд. техн. наук. Орел, 2000. 281 с.
26. Анализ возможностей термоэлектрического метода неразрушающего контроля / М.В. Тимофеев, А.Ю. Тараринов, Р.Н. Фомевко и др. // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 8 (137). С. 25-30
27. Carreon H., Medina A. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples // Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation. 2007, vol. 22, no. 4, pp. 299-311. DOI: 10.1080/10589750701546960.
28. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements / A.A. Soldatov, A.I. Seleznev, I.I. Fiks et al. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012, vol. 48, is. 3, pp. 184-186. DOI: 10.1134/S1061830912030060.
29. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals / H. Carreon, P.B. Nagy, M.P. Blodgett // Research in Nondestructive Evaluation. 2002, vol. 14, is. 2, pp. 59. DOI: 10.1080/09349840209409705
30. Чукин М.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 1. Разработка методики исследования // Черные металлы. 2026. Февраль. С. 60-66.
31. Применение рентгеновского метода для определения напряженного состояния деталей железнодорожного транспорта / С.А. Никулин, С.Л. Шиткин, А.Б. Рожнов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 3. С. 200-206. DOI:10.17073/0368-0797-2017-3-200-206

References

1. Pavlov I.M. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Nauka, 1950, 610 p. (In Russ.)
2. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i ikh vliyaniye na dolgovechnost i nadezhnost metalloizdeliy: monografiya* [Technological residual stresses and their impact on the durability and reliability of metal products: monograph]. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publishing house, 2012, 226 p. (In Russ.)
3. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boiko A.B. et al Methods for studying the mechanical characteristics of metals and alloys in pressure treatment processes, taking into account the heterogeneity of the structure. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014;(4(48)):26-31. (In Russ.)
4. Flanagan F., O'Connor A.N., Erfanian M. et al. Through-thickness resolution, stress oscillations and residual stress in cold rolling. *European Journal of Mechanics, A/Solids*. 2025;114:105761. doi:10.1016/j.euromechsol.2025.105761.
5. Bogdanov N.V., Budyukin A.M. The effect of residual stresses in the metal of the car body after an accident on its reliability. *Sovremennye tekhnologii, primenyaemye pri obsluzhivanii i remonte avtomobiley: sb. trudov V Natsionalnoy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Modern technologies used in car maintenance and repair. Collection of works of V National Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates, Postgraduates and Young Scientists]. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publishing House, 2022, pp. 101-105. (In Russ.)
6. Ignatiev A.G., Tretyakov A.A. Improving the durability of refurbished machine parts based on residual stress management. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering]. 2018;18(1):58-67. (In Russ.) doi: 10.14529/engin180107.
7. Adrian D., Crisan A. Cold Rolling Effects on Material Properties in Pallet Rack Uprights. *The Open Civil Engineering Journal*. 2017;11:319-331. doi.org/10.2174/1874149501711010319.
8. Mutafia A., Yidris N., Loughlan J. et al. Investigation into the distribution of residual stresses in pressed-braked thin-walled steel lipped channel sections using the 3D-FEM technique. *Thin-Walled Structures*. 2019;135:437-445. DOI:10.1016/j.tws.2018.11.003
9. Afzal M.J., Hajavifard R., Buhl J. et al. Influence of process parameters on the residual stress state and properties in disc springs made by incremental sheet forming (ISF). *Forsch Ingenieurwes*. 2021;85:783-793. https://doi.org/10.1007/s10010-021-00491-w
10. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Khabarova D. Relaxation of residual stresses and precision of pipe metal products. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;(3(16)):103-108. (In Russ.)

11. Pogulyaev S.I., Maksyutin I.V., Popkov A.S. The effect of uneven distribution of residual and operational stresses in pipes on the occurrence of stress corrosion cracking defects in them. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Vesti gazovoy nauki* [Scientific and technical collection "News of gas science"]. 2022;(1(50)):120-132. (In Russ.)
12. Loginov Yu.N., Grekhov S.K. The formation of residual stresses during low carbon wire drawing. *Stal* [Steel]. 2021;(5):25-28. (In Russ.)
13. Gromov D.V., Radionova L.V., Glebov L.A. Analysis of residual stresses in wire after drawing in monolithic fiber. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2025;25(3):48-59. (In Russ.) doi: 10.14529/met250305.
14. Fairushin A.M., Markelov D.A., Marchenko I.A. Investigation of patterns of residual stresses in sheet metal after cold bending operations. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftgazovoe delo* [Electronic scientific Journal "Oil and gas business"]. 2020;(4):74-84. (In Russ.)
15. Kolikov A.P., Lyutsau A.V., Lisunets N.L. et al. The effect of residual stresses on the quality of products during cold pressure treatment of sheet workpieces. *Izvestiya MGTU «MAMI»* [News of MSTU MAMI]. 2011;(2(12)):139-144. (In Russ.)
16. Flanagan F., O'Connor A.N., Erfanian M. et al. Careful finite element simulations of cold rolling with accurate through-thickness resolution and prediction of residual stress. ArXiv preprint arXiv: 2408.03242. 2024;1-33. <https://arxiv.org/pdf/2408.03242>
17. Nakhoul R., Montmitonnet P., Potier-Ferry M. Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stresses in the context of strip rolling. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;66:62-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.028>.
18. Maksimov E.A., Shatalov R.L., Shalamov V.G. Development of a methodology for calculating residual stresses and spring parameters of a sheet on a regular roller machine. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy]. 2021;64(1):14-20. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-1-14-20. (In Russ.)
19. Sun W., Shao J., He A. et al. Research on Distribution of Residual Stresses of Cold Rolled Sheet Distorted Area Based on ANSYS. *Manufacturing technology – abstracts*. 2015;15(2):220-226. DOI: 10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/2/220.
20. Tretyakov E.M. Residual stresses in cold-formed thin products and in thin-sheet trained metal. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2008;(1):49-61. (In Russ.)
21. Monakhov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V. et al. Destructive methods for determining residual stresses (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2021;(9 (103)):95-104. (In Russ.) DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
22. Pichugin S.S., Shitikov V.S., Golovkov A.N. Non-destructive methods of residual stress assessment. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2024;(1(131)):101-112. (In Russ.) DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
23. Orlov D.V. *Termoelektricheskie effekty v metallakh* [Thermoelectric effects in metals]. Yekaterinburg: UrFU, 2005, 150 p. (In Russ.)
24. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A. Modern trends in the application of the thermoelectric method in non-destructive testing (review). *Defektoskopiya* [Flaw detection]. 2024;(2):64-83. (In Russ.)
25. Nesterovich Yu.I. *Razrabotka metoda i sredstva termoelktricheskogo kontrolya metallov i splavov: dis. ...kand. tekhn. nauk.* [Development of a method and means of thermoelectric control of metals and alloys. Ph.D. dissertation]. Orel, 2000, 281 p. (In Russ.)
26. Timofeev M.V., Tatarinov A.Y., Fomevko R.N. et al. Analysis of the possibilities of the thermoelectric method of non-destructive testing. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Reference book. Engineering magazine]. 2008;(8(137)):25-30 (In Russ.)
27. Carreon H., Medina A. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples. *Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007;22(4):299-311. DOI: 10.1080/10589750701546960.
28. Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I. et al. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012;48(3):184-186. DOI: 10.1134/S1061830912030060.
29. Carreon H., Nagy P.B., Blodgett M.P. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2002;14(2):59. DOI: 10.1080/09349840209409705
30. Chukin M.V., Efimova Yu.Y., Koptseva N.V. Determination of the heterogeneity of the properties of a cold-rolled strip by TEMF. Message 1. Development of research methodology. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2026;60-66. (In Russ.)
31. Nikulin S.A., Shitkin S.L., Rozhnov A.B. et al. Application of the X-ray method for determining the stress state of railway transport parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy]. 2017;60(3):200-206. (In Russ.) DOI:10.17073/0368-0797-2017-3-200-206.

Поступила 27.02.2026; принята к публикации 12.03.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 27/02/2026; revised 12/03/2026; published 31/03/2026

Чукин Михаил Витальевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Копцева Наталья Васильевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Ефимова Юлия Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

Шеметов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.shemetov_magtu@mail.ru ORCID 0000-0001-7184-2190

Mikhail V. Chukin – DrSc (Eng.), Chief Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Natalia V. Koptseva – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Yuliya Yu. Efimova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

Andrey N. Shemetov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.shemetov_magtu@mail.ru ORCID 0000-0001-7184-2190