



Оригинальная статья

УДК 621.771.011

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-550-560



## ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

А. А. Уманский<sup>1</sup>, А. Б. Юрьев<sup>1</sup>, В. В. Дорофеев<sup>2</sup>, Л. В. Думова<sup>1</sup><sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)<sup>2</sup> АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

**Аннотация.** На основании исследований процессов формирования напряженно-деформированного металла при прокатке железнодорожных рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана, проведенных с использованием программного комплекса DEFORM-3D, определены особенности распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската для калибров различной формы. Установлен крайне неравномерный характер распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската. По полученным данным в осевой зоне значения указанного критерия минимальны, а в приповерхностных слоях наибольшее значение критерия Кокрофта-Лэтэма и, соответственно, наибольшая вероятность образования дефектов имеют место вблизи вертикальной оси калибров. В калибрах сложной формы («трапеция», «лежачая трапеция», рельсовые калибры) выявлено наличие локальных зон с максимальным значением критерия Кокрофта-Лэтэма, расположенных в местах формирования подошвы рельсового профиля, а для прокатки в калибре типа «трапеция» характерно наличие такой области также в приповерхностной зоне вблизи вертикальной оси калибра. В рамках определения закономерностей формирования схемы напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки рельсов установлена прямая взаимосвязь между неравномерностью распределения температуры по сечению раската и значениями (максимальными и средними по сечению) критерия Кокрофта-Лэтэма. При этом показано, что неравномерность распределения температуры по сечению раската имеет тенденцию к снижению при увеличении коэффициентов вытяжек по проходам и повышении частоты кантовок независимо от формы используемых калибров. Для калибров сложной формы установлено, что в дополнение к перечисленным параметрам значимое влияние на снижение температурной неоднородности также оказывает повышение подобия формы подката и используемого калибра. На основании результатов проведенных теоретических исследований разработан новый режим прокатки железнодорожных рельсов, опытно-промышленное опробование которого в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показало снижение отбраковки рельсов на 0,78 % по сравнению с ранее использовавшимся режимом прокатки.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние металла, железнодорожные рельсы, универсальный рельсобалочный стан, черновые клетки, математическое моделирование

**Финансирование:** Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011.

**Для цитирования:** Уманский А.А., Юрьев А.Б., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Исследования напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 550–560. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-550-560>

Original article

## STRESS-STRAIN STATE OF METAL AT THE INITIAL STAGE OF RAILWAY RAILS ROLLING

A. A. Umanskii<sup>1</sup>, A. B. Yur'ev<sup>1</sup>, V. V. Dorofeev<sup>2</sup>, L. V. Dumova<sup>1</sup><sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)<sup>2</sup> JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

**Abstract.** Based on the studies of stress-strain metal formation during railway rails rolling in roughing stands of a universal rail-and-beam mill, carried out using the DEFORM-3D software package, the authors have determined the features of distribution of the Cockcroft-Latham criterion over the cross-section of the rolled stock of various shapes. An extremely uneven distribution of the Cockcroft-Latham criterion over the roll section has been established. According to the data obtained, values of the specified criterion are minimal in the axial zone, and in the near-surface layers the greatest value of the Cockcroft-Latham criterion and, accordingly, the highest probability of defects formation occur near the gauge vertical axis. In gauges of complex shape (“trapezium”, “recumbent trapezium”, rail gauges), the authors have revealed the presence of local zones with maximum Cockcroft-Latham criterion, located in the places where the foot of the rail profile is formed. And rolling in gauge of the “trapezium” type is marked

by the presence of such a zone in the near-surface area near the gauge vertical axis. Within the framework of determining formation regularities of the diagram of metal stress-strain state at the initial stage of rail rolling, direct relationship was established between the uneven temperature distribution over the section of rolling and the values (maximum and average over the section) of the Cockcroft-Latham criterion. At the same time, it was shown that uneven temperature distribution over the cross-section of the roll tends to decrease with an increase in the coefficients of extracts along the passes and increase in tilting frequency, regardless of the shape of the used gauges. For gauges of complex shape, in addition to the listed parameters, an increase in similarity of shape of the roll and gauge used also has a significant effect on reducing temperature inhomogeneity. Based on the results of theoretical studies, a new mode of railway rails rolling has been developed. Its pilot testing in the conditions of a universal rail-and-beam mill of JSC “EVRAZ ZSMK” has shown a decrease in rail rejection by 0.78 % compared to the previously used rolling mode.

**Keywords:** stress-strain state of metal, railway rails, universal rail-and-beam mill, roughing stand, mathematical modeling

**Funding:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Kemerovo Region within the framework of the scientific project No. 20-48-420011.

**For citation:** Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Stress-strain state of metal at the initial stage of railway rails rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 550–560. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-550-560>

## ВВЕДЕНИЕ

Качество готового проката в значительной степени определяется схемой напряженно-деформированного состояния (НДС) металла на различных стадиях его прокатки [1 – 3]. Использование режимов прокатки, позволяющих сформировать благоприятную схему НДС раската, обуславливает не только снижение вероятности образования поверхностных и внутренних дефектов в процессе деформации, но и создает условия для выкатываемости дефектов, уже имеющихся в исходных заготовках [4, 5]. При проектировании режимов прокатки следует учитывать, что на формирование НДС в объеме раската оказывает влияние значительное количество одновременно действующих параметров, в том числе геометрические и температурно-скоростные условия деформации (форма и размеры калибров и исходного подката, температура, скорость и степень деформации), особенности структуры и свойств деформируемого металла [6 – 10]. Поэтому проведение исследований процессов формирования НДС металла в процессе прокатки с учетом их взаимосвязи с параметрами деформации является актуальной задачей, в особенности применительно к прокатной продукции специального назначения с повышенными требованиями к характеристикам качества, в частности к железнодорожным рельсам.

На сегодняшний день более 80 % рельсов в РФ производится на универсальных рельсобалочных станах (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «Мечел»), имеющих в своем составе черновые реверсивные клетки и непрерывную группу универсальных клеток («тандем»). Схема прокатки в черновых реверсивных клетях таких станом включает в себя последовательную деформацию в ящичных калибрах (первые проходы), калибрах типа «трапеция», близких по форме к ящичным калибрам, и рельсовых калибрах (последние проходы) [11 – 14]. Полученный после черновых клеток подкат, по форме поперечного сечения близкий к готовым рельсам, поступает в клетки группы «тандем» для непрерывной чистовой прокатки. Применение такой схемы прокатки обуславливает тот факт, что наибольшие обжатия

характерны для черновых клеток [15 – 18], а в универсальных клетях, основной задачей прокатки в которых является формирование требуемого профиля рельсов с необходимой точностью размеров [19 – 23], имеет место только незначительная по величине деформация металла. В соответствии с вышесказанным применительно к производству рельсов в условиях универсальных рельсобалочных станом наибольший научно-практический интерес представляет исследование закономерностей формирования НДС металла при прокатке в черновых клетях.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – режим прокатки, принятый на момент проведения работы на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для производства рельсов Р65 (рис. 1, табл. 1).

Исследования проводили методом математического моделирования в программном комплексе DEFORM-3D. В основу работы рассматриваемого программного комплекса заложен метод конечных элементов (МКЭ) [24]. Сущность МКЭ заключается в представлении исследуемого объекта или области в виде совокупности дискретных (конечных) элементов (подобластей), для каждого из которых выбирается вид аппроксимирующей функции, преимущественно в виде полинома первой степени [25, 26]. При использовании МКЭ решается задача поиска значений функций на границах конечных элементов (в узлах), исходя из положения, что вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Следует отметить, что МКЭ является на сегодняшний день наиболее распространенным методом математического моделирования процессов пластической деформации. Этот факт объясняется его универсальностью, то есть наличием минимальных ограничений по области применения. В частности, при использовании МКЭ существует возможность получения точных данных не только для плоских, но и для объемных задач, в том числе для профилей со сложной формой поперечного сечения, решения задач могут быть получены не только применительно к однородной

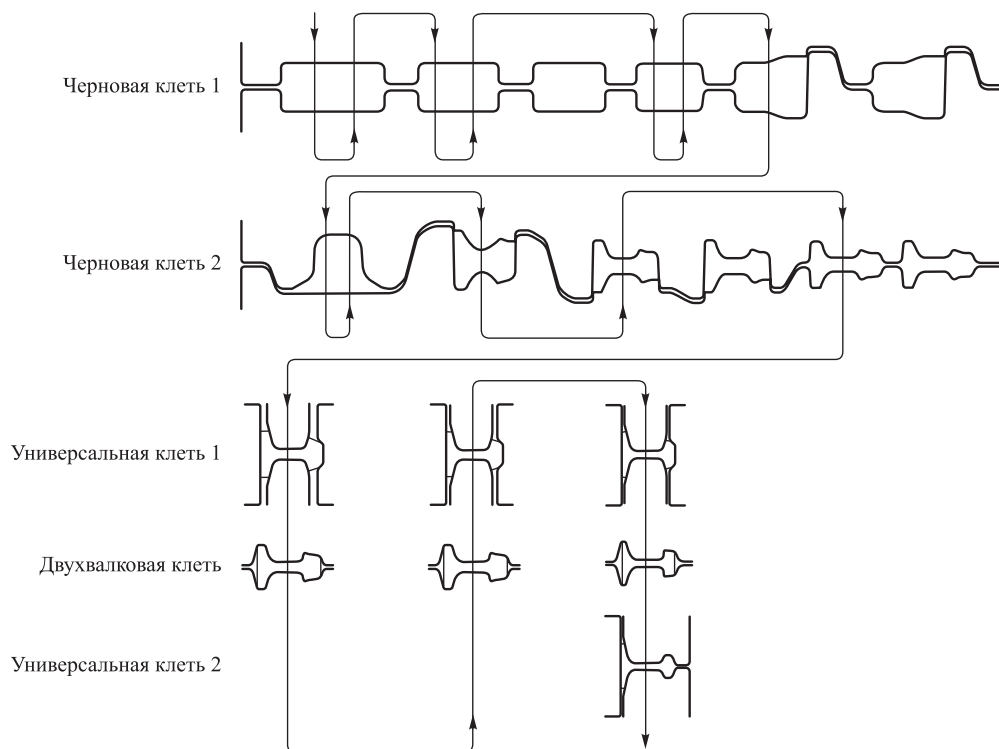


Рис. 1. Режим прокатки железнодорожных рельсов, использованный при проведении математического моделирования НДС металла

Fig. 1. Rolling mode of railway rails used in mathematical modeling of the metal stress-strain state

Таблица 1

**Режим прокатки заготовок 300×360 мм железнодорожных рельсов в черновых клетях, использованный при проведении моделирования**

Table 1. Mode of railway rails billets (300×360 mm) rolling in roughing stands, used in modeling

Черновая клеть	Номер прохода	Форма калибра	Сечение раската, мм		Обжатие, мм	Скорость прокатки, м/с
			высота	ширина		
1	кантовка на 90°					
	1	ящичный	305,0	310,0	55,0	3,0
	2	ящичный	257,0	320,0	48,0	3,5
	кантовка на 90°					
	3	ящичный	260,0	267,0	60,0	4,0
	4	ящичный	215,0	277,0	45,0	3,8
	кантовка на 90°					
5	ящичный	257,0	220,0	20,0	4,0	
6	ящичный	232,0	225,0	25,0	4,0	
кантовка на 90°						
7	«лежачая трапеция»	210,0	246,0	15,0	5,0	
2	кантовка на 90°					
	1	«трапеция»	200,5	250,0	45,5	4,7
	2	«трапеция»	194,5	250,0	6,0	4,0
	кантовка на 90°					
	3	рельсовый	80,0	215,3	90,0	3,5
4	рельсовый	55,0	222,9	25,0	4,0	
5	рельсовый	43,0	234,0	12,0	5,0	

среде, но и в среде с нелинейными эффектами в отдельных элементах. Основной недостаток МКЭ, заключающийся в сложности применяемого математического аппарата и трудоемкости вычислений, в настоящее время является несущественным в связи с развитием ЭВМ. Возможности современных компьютерных технологий, реализованные в вышеуказанном программном комплексе, позволяют проводить моделирование процессов пластической деформации при разбиении деформируемого тела на  $10^3$ ,  $10^4$  (и более) конечных элементов. При этом анализ динамики параметров, характеризующих процесс деформации, возможно проводить с временными интервалами, не превышающими долей секунд.

Моделирование проводили для стали марки Э76ХФ, при этом использовали зависимости сопротивления пластической деформации рассматриваемой стали от термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации), полученные в ходе экспериментальных исследований [27, 28]. Также при проведении моделирования процессов деформации металла в калибрах использовали закономерности изменения сопротивления пластической деформации по сечению исходных непрерывнолитых заготовок [29]. В качестве допущений приняли, что материал валков является несжимаемым, а процесс прокатки – симметричным. Коэффициент трения приняли изменяющимся по формуле Гелей:

$$\mu = 1,05 - 0,0005t - 0,056V, \quad (1)$$

где  $t$  – температура прокатки, °С;  $V$  – скорость прокатки, м/с.

Температуру заготовок перед началом прокатки в первой клетки приняли 1200 °С. При построении конечно-элементной сетки количество элементов составило 180 845, узлов – 40 089.

В качестве параметра, характеризующего напряженно-деформированное состояние металла при прокатке, использовали критерий Кокрофта-Лэтэма, рассчитываемый по следующей формуле:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (2)$$

где  $\bar{\epsilon}$  – накопленная пластическая деформация;  $\sigma^*$  – максимальное главное растягивающее напряжение;  $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений;  $d\bar{\epsilon}$  – приращение накопленной деформации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты (рис. 2) свидетельствуют о крайне неравномерном характере распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската. В осевой зоне раскатов независимо от формы калиб-

ров значения указанного критерия минимальны, что объясняется неполным проникновением деформации в глубь раската. Максимальные значения критерия Кокрофта-Лэтэма для ящичных калибров имеют место в приповерхностных слоях вблизи вертикальной оси калибров (рис. 2, а, б), что согласуется с результатами ранее проведенных исследований [30] и обусловлено отсутствием горизонтальных перемещений металла в указанной зоне раската (имеют место только вертикальные деформации). При прокатке в калибрах сложной формы («трапеция», «лежачая трапеция», рельсовые калибры) имеют место локальные зоны с максимальным значением критерия Кокрофта-Лэтэма, расположенные в местах формирования подошвы профиля (рис. 2, г – е), при этом для прокатки в калибре типа «трапеция» характерно наличие такой зоны также в приповерхностной зоне вблизи вертикальной оси калибра (рис. 2, з).

Одним из основных параметров [3, 7, 9], оказывающих значимое влияние на формирование схемы НДС металла в процессе прокатки, является неравномерность распределения температуры по сечению раската. С целью подтверждения указанной взаимосвязи для условий прокатки в черновых клетях рельсобалочного стана проведены дополнительные исследования температурных полей с использованием моделирования в программном комплексе DEFORM-3D. Исходные условия для проведения моделирования приняли аналогичными вышеприведенным условиям моделирования НДС металла.

Для проверки адекватности полученных при моделировании результатов проводили расчет температуры раската аналитическим методом с использованием методики, представленной в работе [3] и позволяющей определить падение температуры по проходам:

$$\Delta t_i = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,025\Pi_i\tau_i}{S_i} + \left(\frac{1000}{t_{oi} + \Delta t_{di} + 273}\right)^3}}, \quad (3)$$

где  $\Pi_i$  – периметр поперечного сечения после прохода;  $\tau_i$  – время охлаждения раската при перемещении от рассматриваемого калибра к следующему калибру;  $t_{oi}$  – температура перед входом в рассматриваемый калибр;  $\Delta t_{di} = 0,183\sigma \ln \lambda$  – повышение температуры раската в рассматриваемом калибре;  $\sigma$  – сопротивление металла пластической деформации, МПа;  $\lambda$  – коэффициент вытяжки.

Также использовали данные прямых замеров температуры поверхности раската.

Сопоставление результатов моделирования средней температуры раската по проходам, полученных с использованием программного комплекса DEFORM-3D, с данными, полученными аналитическим методом по уравнению (3), свидетельствует о достаточно высокой

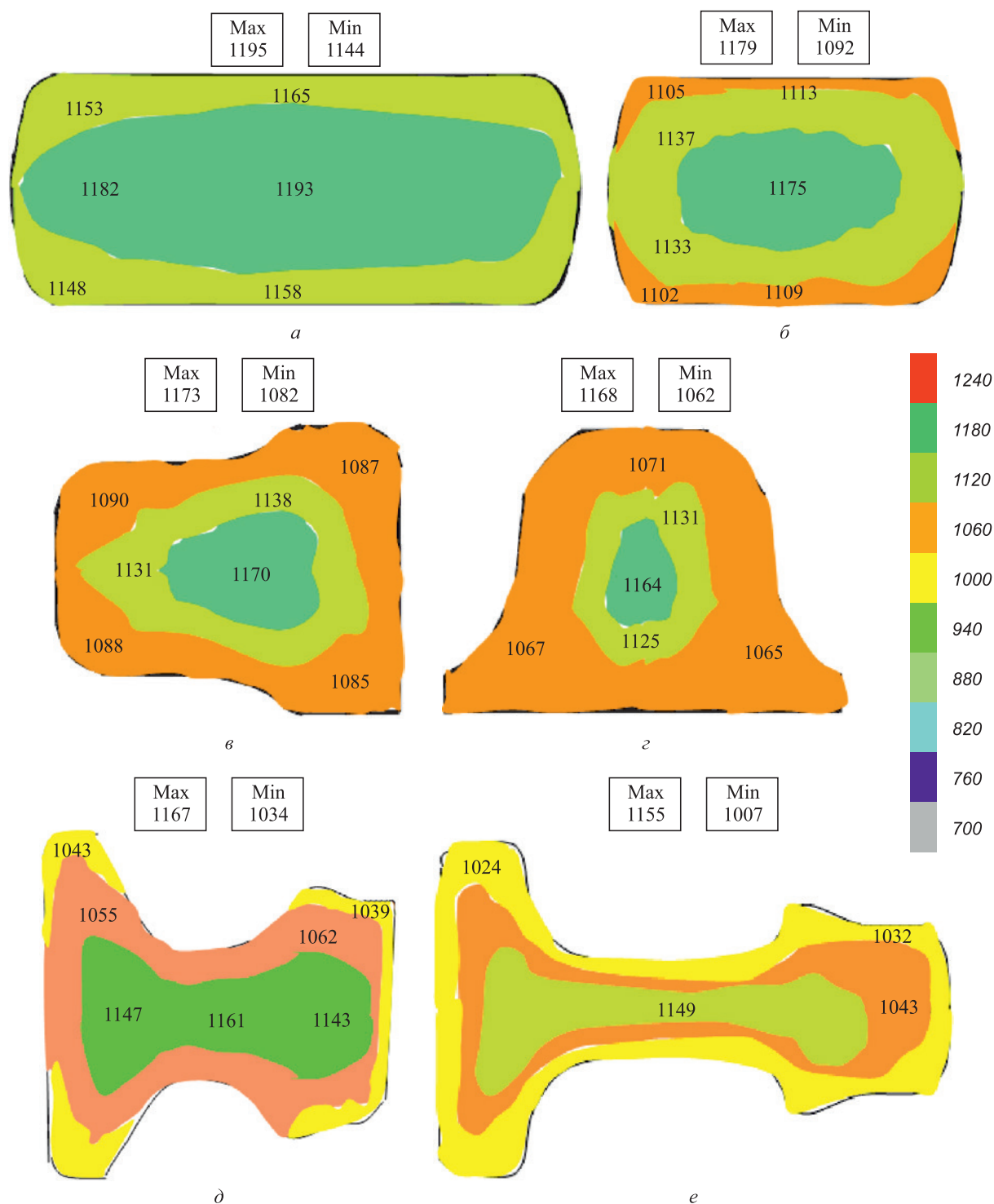


Рис. 2. Распределение температурных полей в поперечном сечении раската на начальной стадии прокатки рельсов: а, б и в – второй, шестой и седьмой проходы в черновой клети 1; г, д и е – первый, третий и пятый проходы в черновой клети 2

Fig. 2. Distribution of temperature fields in cross-section of the rolled stock at the initial stage of rail rolling: а, б and в – the second, sixth and seventh passes in the roughing stand 1; г, д and e – the first, third and fifth passes in the roughing stand 2

сходимости: отклонения не превышают 10 °С. Непосредственные замеры температуры поверхности раската также показали хорошую сходимость с результатами моделирования: отклонения не превышают 14 °С. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности методики моделирования температурных полей в про-

граммном комплексе DEFORM-3D и возможности ее применения для прогнозирования распределения температурных полей по сечению раската.

В связи с трудностью интерпретации полученных данных при их представлении в виде цветowych эпюр (рис. 3) рассчитаны средние значения по укрупнен-

ным областям и предложено использовать коэффициент неравномерности температурных полей, определяемый по формуле:

$$K_{нт} = \frac{t_{\max} S_{уд.\max}}{t_{\min} S_{уд.\min}}, \quad (4)$$

где  $S_{уд.\max}$  и  $S_{уд.\min}$  – удельные площади областей профиля раската с максимальной и минимальной температурами (определяются как отношение площадей рассматриваемых областей к общей площади поперечного сечения раската);  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  – максимальная и минимальная температуры по областям профиля раската.

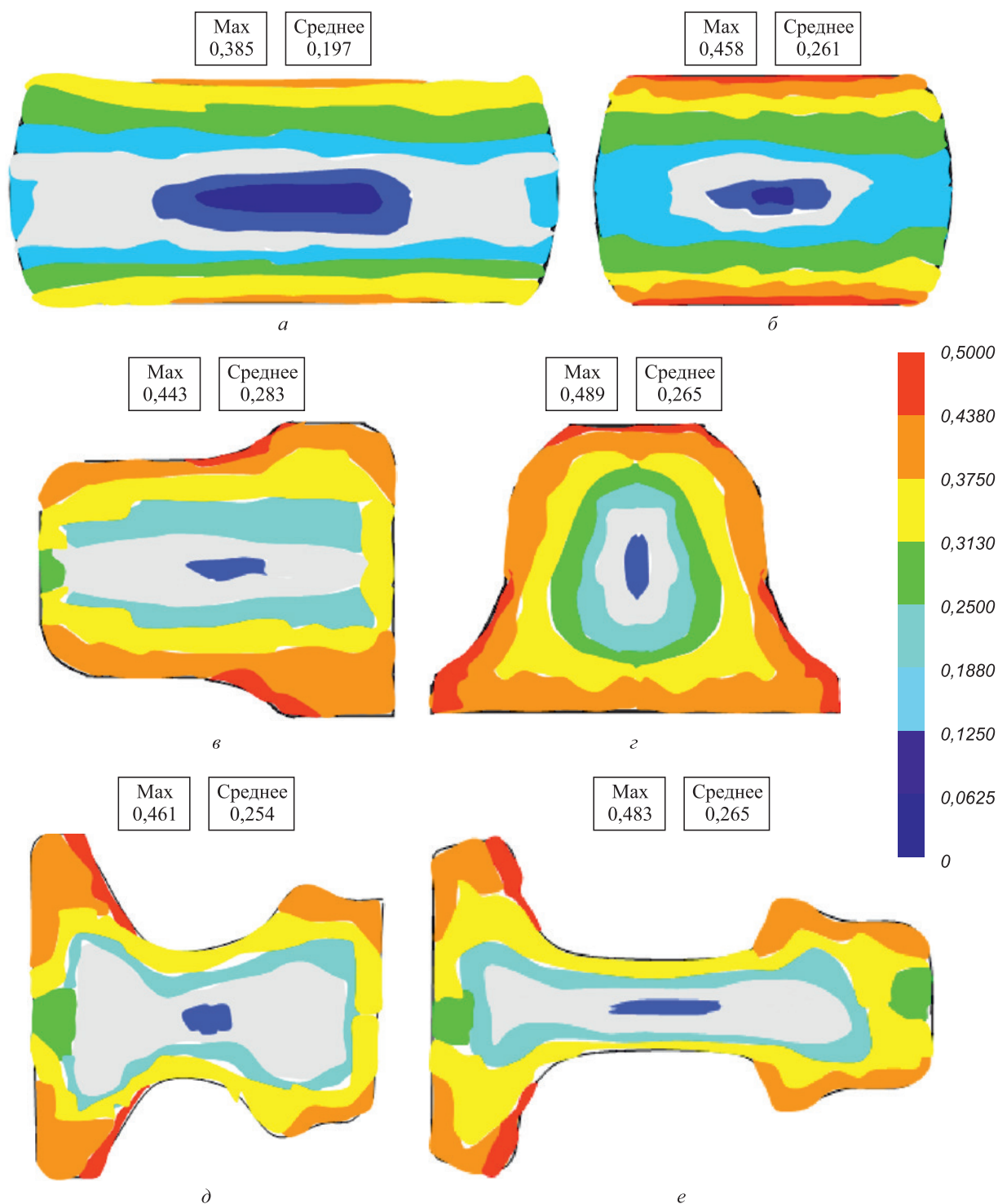


Рис. 3. Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма в поперечном сечении раската на начальной стадии прокатки рельсов: а, б и в – второй, шестой и седьмой проходы в черновой клети 1; г, д и е – первый, третий и пятый проходы в черновой клети 2

Fig. 3. Distribution of the Cockcroft-Latham criterion in cross-section of the rolled stock at the initial stage of rail rolling: а, б and в – the second, sixth and seventh passes in the roughing stand 1; г, д and е – the first, third and fifth passes in the roughing stand 2

Проведенный анализ показал, что изменение максимальных и средних значений критерия Кокрофта-Лэтэма при прокатке во всех проходах и калибрах черновых клетей прямо пропорционально изменению коэффициента неравномерности температурных полей (рис. 4), что свидетельствует о правомерности использования указанного коэффициента в качестве показателя, характеризующего схему НДС металла при прокатке. Повышение коэффициента неравномерности температурных полей обуславливает формирование менее благоприятной с точки зрения прогнозных показателей качества готового проката схемы НДС.

Определение коэффициента неравномерности температурных полей с использованием моделирования в программном комплексе DEFORM-3D требует значительных временных затрат. Поэтому с целью практического применения полученных закономерностей с использованием стандартных методик статистического анализа получены уравнения регрессии, устанавливающие взаимосвязь между измеряемыми параметрами деформации и указанным коэффициентом. Для ящичных калибров установлено значимое влияние кантовок раската и коэффициента вытяжки на неравномерность распределения температурных полей. Механизм указанного влияния состоит в следующем. Увеличение деформации приводит к разогреву металла при прокатке, в особенности поверхностных слоев, что способствует снижению неравномерности распределения температуры по сечению раската. Кантовка раската также способствует уменьшению неравномерности распределения температурных полей, поскольку происходит обновление слоев металла, непосредственно контактирующих с прокатными валками.

Для проходов, перед которыми кантовку раската не проводили, прогнозные значения коэффициента неравномерности распределения температуры определяются по выражению

$$K_{нт} = 1,01^n(-0,0597\lambda + 1,0778); R^2 = 0,892, \quad (5)$$

где  $n$  – номер прохода от начала прокатки (с учетом всех проходов).

Для проходов, перед которыми проводится кантовка раската, коэффициент неравномерности распределения температуры определяется как

$$K_{нт} = 1,01^n(-0,0351\lambda + 1,0332); R^2 = 0,808. \quad (6)$$

По полученным данным применительно к прокатке в калибрах сложной формы, используемых в черновых клетях рельсобалочного стана («трапеция», «лежащая трапеция», рельсовые калибры), корреляция между коэффициентом неравномерности температурных полей и указанными параметрами прокатки выражена в значительно меньшей степени по сравнению с прокаткой в ящичных калибрах. С учетом результатов

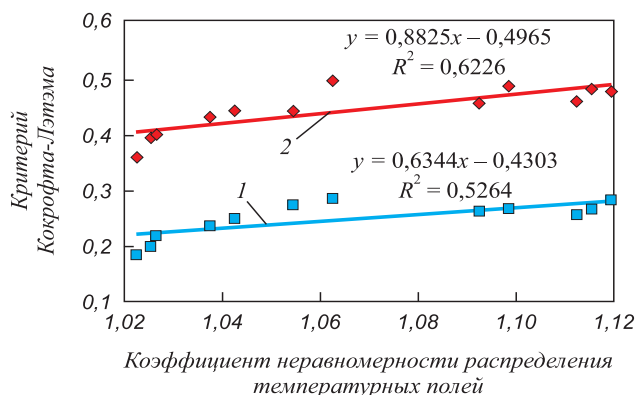


Рис. 4. Зависимость схемы НДС металла от неравномерности распределения температур по сечению раската при прокатке в черновых клетях универсального рельсобалочного стана: 1 и 2 – средние и максимальные по сечению значения критерия

Fig. 4. Dependence of the metal stress-strain state on uneven distribution of temperatures over the section of the rolled stock during rolling in roughing stands of a universal rail-and-beam mill:

1 and 2 – average and maximum values of the criterion over the section

исследований [30] этот факт можно объяснить низкой степенью подобия формы исходного подката и калибров. Для учета влияния подобия формы подката и калибра в настоящей работе предложено ввести соответствующий коэффициент:

$$K_{пф} = \frac{S_0 / \Pi_0}{S_1 / \Pi_1}, \quad (7)$$

где  $S_0$  и  $S_1$  – площадь поперечного сечения раската до и после прокатки в калибре;  $\Pi_0$  и  $\Pi_1$  – периметр поперечного сечения раската до и после прокатки в калибре.

Установлено, что с учетом влияния коэффициента подобия формы подката и калибра взаимосвязь между коэффициентом неравномерности распределения температурных полей по сечению раската и параметрами прокатки в калибрах сложной формы является значимой.

Полученные для калибров сложной формы уравнения регрессии имеют следующий вид:

– для проходов без кантовки:

$$K_{нт} = 1,01^n K_{пф}^{0,2}(-0,0473\lambda + 1,0145); R^2 = 0,886; \quad (8)$$

– для проходов, перед которыми проводится кантовка раската:

$$K_{нт} = 1,01^n K_{пф}^{0,2}(-0,0412\lambda + 1,0226); R^2 = 0,804. \quad (9)$$

На основании результатов вышеприведенных исследований можно констатировать, что общими направлениями для совершенствования режимов прокатки в черновых клетях универсальных рельсобалочных станов с целью формирования более благоприятной схемы НДС металла в процессе прокатки и соответствующего повышения качества готового проката явля-

Усовершенствованный режим прокатки заготовки 300×360 мм железнодорожных рельсов

Table 2. Improved mode of railway rails billets (300×360 mm) rolling

Черновая клеть	Номер прохода	Форма калибра	Сечение раската, мм		Обжатие, мм	Скорость прокатки, м/с
			высота	ширина		
1	кантовка на 90°					
	1	ящичный	260,0	375,0	40,0	4,0
	2	ящичный	317,0	270,0	58,0	4,5
	3	ящичный	266,0	280,0	51,0	5,0
	кантовка на 90°					
	4	ящичный	219,0	276,0	61,0	4,8
	кантовка на 90°					
	5	ящичный	222,0	229,0	54,0	5,0
	кантовка на 90°					
	6	«лежачая трапеция»	207,0	240,0	22,0	4,5
кантовка на 90°						
7	«трапеция»	195,5	230,0	44,5	5,0	
2	кантовка на 90°					
	1	рельсовый	80,0	220,5	110,0	4,5
	2	рельсовый	53,0	229,5	27,0	3,8
	3	рельсовый	42,0	238,5	11,0	5,0

ется увеличение коэффициента вытяжки по проходам, то есть снижение общего количества проходов за счет повышения частных обжатий (с учетом ограничения по допустимому усилию и моменту прокатки); увеличение количества кантовок; изменение формы калибров сложной формы в сторону увеличения подобия с формой поперечного сечения исходного подката.

С учетом этих рекомендаций разработан новый режим прокатки рельсов в условиях рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (табл. 2), основными отличительными особенностями которого является снижение общего количества проходов за счет увеличения частных обжатий и увеличение количества кантовок.

Опытно-промышленное опробование нового режима прокатки железнодорожных рельсов показало, что при его использовании отбраковка рельсов по дефектам поверхности снизилась на 0,78 % относительно ранее использовавшегося режима прокатки. Подтверждена адекватность и возможность применения на практике полученных закономерностей влияния параметров прокатки в черновых клетях рельсобалочных станов на качество готовых рельсов.

**Выводы**

На основании моделирования процессов прокатки в черновых клетях универсального рельсобалочного

стана, проведенного с использованием программного комплекса DEFORM-3D, определены закономерности формирования НДС металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов. Установлено, что на схему НДС металла при прокатке в черновых клетях рельсобалочного стана определяющее влияние оказывает неравномерность распределения температур по сечению раската, которая в свою очередь значительно зависит от коэффициентов вытяжки по проходам, частоты кантовок и подобия формы исходного подката и используемых калибров. Показано, что вне зависимости от формы используемых калибров повышение коэффициентов вытяжек (частных обжатий) и увеличение частоты кантовок обуславливает формирование более благоприятной схемы НДС, обеспечивающей повышение качества готовых рельсов. Применительно к калибрам сложной формы в дополнение к перечисленным параметрам установлено положительное влияние на формирование благоприятной схемы НДС повышения подобия формы подката и используемого калибра. Адекватность и возможность применения на практике полученных закономерностей подтверждена результатами опытно-промышленного опробования разработанного режима прокатки железнодорожных рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»: зафиксировано снижение отбраковки рельсов на 0,78 % по сравнению с ранее использовавшимся режимом прокатки.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Сметанин С.В., Перетятко В.Н., Волков К.В. Исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в универсальном четырехвалковом калибре // *Сталь*. 2014. № 7. С. 36–39.
- Перетятко В.Н., Сметанин С.В. Исследования напряженного состояния металла при прокатке в четырехвалковых разрезных калибрах // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 1. С. 28–33.
- Скосарь Е.О., Шилов В.А. Температурное и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке рельсов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2012. Т. 55. № 11. С. 63, 64.
- Кинзин Д.И., Рычков С.С. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2011. № 2. С. 45–48.
- Песин А.М., Салганик В.М., Пустовойтов Д.О., Курбан В.В., Молостов М.А., Васильев И.С., Лoshкарев М.А. Моделирование поведения поперечных трещин непрерывнолитых слэбов при черновой прокатке на широкополосных станах горячей прокатки // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2011. № 5 (1337). С. 48–52.
- Raab G.I., Raab A.G., Aleshin G.N., Kodirov I.S. Relationship between the stress-strain state and the imperfection of the structure of metals with SPD shear // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 672. No. 1. Article 012031. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/672/1/012031>
- Shishov I., Kolbasnikov N. Investigation of the metal stress-strain state peculiarities associated with the plate temperature field irregularity during rough rolling. In book: *METAL 2014 – 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014. P. 407–411.
- Kotrechko S.A., Popovich V.A. Effect of the characteristics of low-temperature plastic deformation of metals with bcc lattice on the stress-strain state at the tip of a macrocrack // *Strength of Materials*. 2002. Vol. 34Y. No. 5. P. 456–461. <https://doi.org/10.1023/A:1021046510298>
- Колбасников Н.Г., Шишов И.А., Корчагин А.М., Беляев А.А. Исследование влияния неравномерности температурного поля раската на характер напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при прокатке толстого листа // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2013. № 4-1 (183). С. 183–192.
- Кинзин Д.И., Рычков С.С. Оценка эффективности калибровки сортовых профилей на основе программного комплекса DEFORM 3D // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2011. № 1. С. 92–95.
- Полевой Е.В., Волков К.В., Головатенко А.В., Аtkонова О.П., Юнусов А.М. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 4. С. 26–28.
- Shaburov D.V., Popov A.E., Zagumennov O.V. Rail production on a universal mill // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. № 7. P. 503, 504. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070111>
- Toschi F., Lainati A., Mazzarano A. The production of railway rails in modern and efficient plants – The new ARBZ rail mill // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2017. № 3. P. 2543–2552.
- Lainati A. The rolling mill for rails and structural sections at Arbz // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2018. May. P. 2443–2454.
- Gołdasz A., Malinowski Z., Hadała B., Rywotycki M. Influence of the radiation shield on the temperature of rails rolled in the reversing
- Smetanin S.V., Peretyat'ko V.N., Volkov K.V. Research of the stress-strain state of metal during rolling of tram rails in a universal four-roll gauge. *Stal'*. 2014, no. 7, pp. 36–39. (In Russ.).
- Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Investigations of the stress state of metal during rolling in four-roll cut gauges. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015, no. 1, pp. 28–33. (In Russ.).
- Skosar' E.O., Shilov V.A. Temperature conditions and stress-strain state of metal during long rail rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 11, pp. 63, 64. (In Russ.).
- Kinzin D.I., Rychkov S.S. Use of DEFORM-3D software package in modeling of section rolling. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2011, no. 2, pp. 45–48. (In Russ.).
- Pesin A.M., Salganik V.M., Pustovoytov D.O., Kurban V.V., Molostov M.A., Vasil'ev I.S., Loshkarev M.A. Modeling the behavior of transverse cracks in continuously cast slabs during rough rolling on hot-strip mills. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2011, no. 5 (1337), pp. 48–52. (In Russ.).
- Raab G.I., Raab A.G., Aleshin G.N., Kodirov I.S. Relationship between the stress-strain state and the imperfection of the structure of metals with SPD shear. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 672, no. 1, article 012031. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/672/1/012031>
- Shishov I., Kolbasnikov N. Investigation of the metal stress-strain state peculiarities associated with the plate temperature field irregularity during rough rolling. In: *METAL 2014 – 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014, pp. 407–411.
- Kotrechko S.A., Popovich V.A. Effect of the characteristics of low-temperature plastic deformation of metals with bcc lattice on the stress-strain state at the tip of a macrocrack. *Strength of Materials*. 2002, vol. 34Y, no. 5, pp. 456–461. <https://doi.org/10.1023/A:1021046510298>
- Kolbasnikov N.G., Shishov I.A., Korchagin A.M., Belyaev A.A. Influence of unevenness of temperature field of rolled products on nature of stress-strain state of metal in deformation zone during a plate rolling. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 4-1 (183), pp. 183–192. (In Russ.).
- Kinzin D.I., Rychkov S.S. Evaluation of the efficiency of high-quality profiles design based on DEFORM 3D software package. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2011, no. 1, pp. 92–95. (In Russ.).
- Polevoi E.V., Volkov K.V., Golovatenko A.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M. Improvement of rails production technology at JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2013, no. 4, pp. 26–28. (In Russ.).
- Shaburov D.V., Popov A.E., Zagumennov O.V. Rail production on a universal mill. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 7, pp. 503, 504. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070111>
- Toschi F., Lainati A., Mazzarano A. The production of railway rails in modern and efficient plants – The new ARBZ rail mill. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2017, no. 3, pp. 2543–2552.
- Lainati A. The rolling mill for rails and structural sections at Arbz. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2018, May, pp. 2443–2454.
- Gołdasz A., Malinowski Z., Hadała B., Rywotycki M. Influence of the radiation shield on the temperature of rails rolled in the revers-

- mill // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. Vol. 60. No. 1. P. 275–279. <http://doi.org/10.1515/amm-2015-0044>
16. Kumar P., Singh A.P., Gupta I.N.P., Dubey P.K. Up-grading reheating furnaces at the rail & structural mill of Bhilai Steel Plant // *Steel Times International*. 2010. Vol. 34. No. 2. P. 38–42.
  17. Dong Y.-G., Zhang W.-Z., Song J.-F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 1. P. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
  18. Guo Y.-J., Xie Z.-J., Wang Y.-Z., Tao G.-M. Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill // *Chongqing Daxue Xuebao / Journal of Chongqing University*. 2010. Vol. 33. No. 1. P. 31–35.
  19. Guo Y., Xie Z., Wang Y., Tao G., Yang Q. Study on optimization model of rolling parameters of high speed rail by universal mill // *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 21. No. 10. P. 1200–1202.
  20. Song J.-F., Zhang J.-T., Dong Y.-G. Theoretical and experimental research on the law of longitudinal flow in rail universal rolling // *Suxing Gongcheng Xuebao / Journal of Plasticity Engineering*. 2013. Vol. 20. No. 3. P. 10–15.
  21. Liu Y., Wang Y., Zhu H., Chen L.E. Effects of continuous rolling speed change rates on geometric dimension between two racks when rolling rail by universal pass // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 538–541. P. 2941–2944. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.2941>
  22. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the elongation law of the rail in rail rolling by a universal mill // *Jixie Gongcheng Xuebao / Journal of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 46. No. 6. P. 87–92. <https://doi.org/10.3901/JME.2010.06.087>
  23. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the spread of the head of rail in rail rolling by a universal mill // *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 20. No. 8. P. 1004–1007.
  24. Харламов А.А., Латаев А.П., Галкин В.В., Уланов П.В. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса «DEFORM» // САПР и графика. 2005. № 5. С. 2–4.
  25. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 2006. 464 с.
  26. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and the Finite-Element Method*. Oxford: Oxford University Press, 1989. 333 p.
  27. Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 5. С. 318–326. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-318-326>
  28. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Дорофеев В.В., Осколкова Т.Н. Исследования пластичности и сопротивления деформации легированных рельсовых сталей в температурном интервале прокатки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 6. С. 452–460. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-452-460>
  29. Уманский А.А., Темлянец М.В., Симачев А.С., Думова Л.В. Исследование влияния микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф на сопротивление пластической деформации // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2020. № 2. С. 32–37.
  30. Уманский А.А., Кадыков В.Н., Мартыанов Ю.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в сортовых калибрах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 2. С. 10–14.
  - ing mill. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, vol. 60, no. 1, pp. 275–279. <http://doi.org/10.1515/amm-2015-0044>
  16. Kumar P., Singh A.P., Gupta I.N.P., Dubey P.K. Up-grading reheating furnaces at the rail & structural mill of Bhilai Steel Plant. *Steel Times International*. 2010, vol. 34, no. 2, pp. 38–42.
  17. Dong Y.-G., Zhang W.-Z., Song J.-F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
  18. Guo Y.-J., Xie Z.-J., Wang Y.-Z., Tao G.-M. Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill. *Chongqing Daxue Xuebao / Journal of Chongqing University*. 2010, vol. 33, no. 1, pp. 31–35.
  19. Guo Y., Xie Z., Wang Y., Tao G., Yang Q. Study on optimization model of rolling parameters of high speed rail by universal mill. *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2010, vol. 21, no. 10, pp. 1200–1202.
  20. Song J.-F., Zhang J.-T., Dong Y.-G. Theoretical and experimental research on the law of longitudinal flow in rail universal rolling. *Suxing Gongcheng Xuebao / Journal of Plasticity Engineering*. 2013, vol. 20, no. 3, pp. 10–15.
  21. Liu Y., Wang Y., Zhu H., Chen L.E. Effects of continuous rolling speed change rates on geometric dimension between two racks when rolling rail by universal pass. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 538–541, pp. 2941–2944. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.2941>
  22. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the elongation law of the rail in rail rolling by a universal mill. *Jixie Gongcheng Xuebao / Journal of Mechanical Engineering*. 2010, vol. 46, no. 6, pp. 87–92. <https://doi.org/10.3901/JME.2010.06.087>
  23. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the spread of the head of rail in rail rolling by a universal mill. *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2009, vol. 20, no. 8, pp. 1004–1007.
  24. Kharlamov A.A., Lataev A.P., Galkin V.V., Ulanov P.V. Simulation of metal forming with the help of DEFORM package. *SAPR i grafika*. 2005, no. 5, pp. 2–4. (In Russ.).
  25. Oden J.T. *Finite Elements of Nonlinear Continua*. Dover Publications, 2006, 464 p.
  26. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and the Finite-Element Method*. Oxford: Oxford University Press, 1989, 333 p.
  27. Umanskii A.A., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 318–326. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-318-326>
  28. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S., Dorofeev V.V., Oskolkova T.N. Plasticity and deformation resistance of the alloyed rail steels in rolling temperature interval. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 452–460. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-452-460>
  29. Umanskii A.A., Temlyantsev M.V., Simachev A.S., Dumova L.V. Influence of microstructure of continuously cast billets of K76F rail steel on resistance to plastic deformation. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2020, no. 2, pp. 32–37. (In Russ.).
  30. Umanskii A.A., Kadykov V.N., Mart'yanov Yu.A. Mathematical modeling of the stress-strain state of the metal rolling in bar calibers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 2, pp. 10–14. (In Russ.).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Александр Александрович Уманский**, к.т.н., доцент, доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**E-mail:** umanskii@bk.ru

**Алексей Борисович Юрьев**, д.т.н., ректор, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** rector@sibsiu.ru

**Владимир Викторович Дорофеев**, д.т.н., главный калибровщик, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

**E-mail:** vladimir.dorofeev@evraz.com

**Любовь Валерьевна Думова**, старший преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** doumova@bk.ru

**Aleksandr A. Umanskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**E-mail:** umanskii@bk.ru

**Aleksei B. Yur'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Siberian State Industrial University

**E-mail:** rector@sibsiu.ru

**Vladimir V. Dorofeev**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator of Rail and Beam Shop, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"

**E-mail:** vladimir.dorofeev@evraz.com

**Lyubov' V. Dumova**, Senior Lecturer of the Chair "Management and Branch Economy", Siberian State Industrial University

**E-mail:** doumova@bk.ru

Поступила в редакцию 09.02.2021

После доработки 12.03.2021

Принята к публикации 17.03.2021

Received 09.02.2021

Revised 12.03.2021

Accepted 17.03.2021