



Оригинальная статья

УДК 621.771.26

DOI 10.17073/0368-0797-2021-11-802-814



## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПАРАМЕТРА ОПТИМИЗАЦИИ

А. А. Уманский, А. Б. Юрьев

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Разработана методика совершенствования режимов прокатки рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации. В качестве объектов применения методики выбраны технология прокатки рельсовых профилей в черновых клетях рельсобалочных станов и технология прокатки шаровых заготовок и мелющих шаров из отбраковки непрерывно литых заготовок рельсовых сталей. Обобщенным параметром оптимизации выступает обобщенная функция желательности Харрингтона, которая зависит от частных показателей желательности по критериям энергоэффективности, качества проката, материалосбережения и производительности стана. Доля влияния перечисленных частных критериев оптимизации на обобщенную функцию желательности учитывается путем использования коэффициентов весомости. Обоснование значений коэффициентов проводится исходя из результатов сравнительного анализа резервов по снижению затрат или потерь в стоимостном выражении. Разработан алгоритм применения данной методики. В рамках первого блока проводятся анализ и обобщение имеющихся исходных данных и дополнительные исследования. Эти исследования направлены на получение обоснованных аналитических зависимостей частных критериев оптимизации и измеряемых параметров прокатки. Второй блок – обоснование конкретного направления совершенствования режимов прокатки, выбор которого проводится на основании проверки соблюдения граничных условий. Третий блок включает в себя разработку параметров нового режима прокатки и оценку его применимости и эффективности. Четвертый блок предполагает опытно-промышленное опробование нового режима прокатки в условиях действующего прокатного стана и, при необходимости, корректировку методики определения прогнозных значений измеряемых показателей. С использованием разработанной методики проведено совершенствование режимов прокатки железнодорожных и остряковых рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК», изменен режим прокатки мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсов на стане поперечно-винтовой прокатки ОАО «ГМЗ». Наблюдается значительное повышение качества и технико-экономических показателей, что свидетельствует об эффективности разработанной методики.

**Ключевые слова:** методика, параметр оптимизации, критерии оптимизации, режимы прокатки, рельсовые стали, универсальный рельсобалочный стан, железнодорожные рельсы, дефект, мелющие шары

**Для цитирования:** Уманский А.А., Юрьев А.Б. Разработка методики совершенствования технологии прокатки рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 802–814.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-802-814>

Original article

## IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ROLLING RAIL STEELS BY A COMPREHENSIVE OPTIMIZATION PARAMETER

A. A. Umanskii, A. B. Yur'ev

■ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** The authors have developed a technique for improving the rolling modes of rail steels based on a complex optimization parameter. The technology of rolling rail profiles in the roughing stands of rail-and-structural steel mills and the technology of rolling ball blanks and grinding balls from the rejection of continuously cast blanks of rail steels are selected as the methodology objects. The generalized optimization parameter is the generalized Harrington desirability function, which depends on the partial desirability indicators according to the criteria of energy efficiency, quality of rolled products, material conservation and mill productivity. The share of influence of the listed partial optimization criteria on the generalized desirability function is taken into account by using weighting coefficients. Justification of the coefficient values is based on the results of a comparative analysis of reserves for reducing costs or losses in value terms. An algorithm for applying the technique has been developed. The analysis and generalization of the available initial data and additional research were carried out as a part of the first block. These studies are aimed at obtaining justified analytical

dependencies of particular optimization criteria and measured rolling parameters. The second block is justification of the specific direction of rolling modes, the choice of which is carried out on the basis of checking the compliance of boundary conditions. The third block includes development of the parameters of the new rolling mode and assessment of its applicability and effectiveness. The fourth block involves pilot testing of a new rolling mode in the conditions of an existing rolling mill and if it is necessary, adjusting the methodology for determining the forecast values of the measured indicators. With the use of the developed methodology, the modes of rolling of railway and sharp rails in the roughing stands of universal rail-and-structural steel mill of JSC "EVRAZ ZSMK" were improved, and the mode of rolling grinding balls from the rejection of rail blanks at the cross-screw rolling mill of JSC "GMZ" was changed. There is a significant improvement in the quality, technical and economic indicators, which indicates the effectiveness of the developed methodology.

**Keywords:** methodology, optimization parameter, optimization criteria, rolling modes, rail steels, universal rail rolling mill, railway rails, defect, rolling balls

**For citation:** Umanskii A.A., Yur'ev A.B. Improving the technology of rolling rail steels by a comprehensive optimization parameter. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 11, pp. 802–814. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-802-814>

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в России существенно изменились условия эксплуатации железнодорожных рельсов. Значительное повышение грузонапряженности железнодорожных путей закономерно обусловило повышение требований к эксплуатационной стойкости рельсов, что, в свою очередь, привело к необходимости изменения технологических режимов их получения и проведения коренной реконструкции отечественных рельсовых производств. В рамках указанной реконструкции запущены в эксплуатацию современные универсальные рельсобалочные станы в АО «ЕВРАЗ Западно-сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») и ПАО «Мечел» [1, 2], проведена модернизация сталеплавильных производств предприятий [3, 4]. В результате освоено массовое производство дифференцированно термоупрочненных рельсов, которые обладают повышенными качественными и эксплуатационными характеристиками [5 – 7].

Несмотря на достигнутые успехи, в том числе значительное улучшение механических свойств и эксплуатационных характеристик железнодорожных рельсов, в настоящее время имеет место целый ряд технических и технологических проблем, связанных как с эксплуатацией, так и с производством рельсовой продукции. В частности, отмечаются высокий уровень преждевременного и аварийного выхода из строя рельсов в пути, повышенный уровень отбраковки рельсов на предприятиях-производителях из-за наличия недопустимых внутренних и поверхностных дефектов, высокий износ прокатных валков и большой расход электроэнергии на прокат, недостаточная производительность рельсобалочных станов и повышенный уровень отбраковки исходных непрерывно литых заготовок для производства рельсов.

Большое количество публикаций зарубежных авторов по тематике производства рельсов в условиях универсальных рельсобалочных станов посвящено, в том числе, изучению процессов течения металла [8 – 11], формирования геометрических параметров рельсов [12], усилий прокатки [13, 14], температурно-скоростных условий деформации [15, 16] и скольжения

металла [17]. Однако возможности применения результатов этих исследований для совершенствования режимов прокатки значительно ограничены: они не содержат описания закономерностей влияния измеряемых параметров прокатки на качество получаемых рельсов и технико-экономические показатели их производства. Также следует отметить, что значительная доля таких публикаций [18 – 20] носит выраженный обзорный характер.

Следует отметить, что проблема повышенной отбраковки рельсовых заготовок привела к необходимости поиска возможного снижения потерь металла путем их переработки в нерельсовые виды проката. Развитию этого направления также способствовал тот факт, что значительная доля отбракованных заготовок не имеет выраженных дефектов (причиной отбраковки является несоответствие требованиям внутризаводских нормативов, являющихся более жесткими по отношению к требованиям ГОСТ). В частности, в ОАО «Гурьевский металлургический завод» (ОАО «ГМЗ») освоено массовое производство мелющих катаных шаров из отбраковки заготовок стали К76Ф, поставляемых ПАО «Мечел». При этом из указанной отбраковки не производят шары групп повышенной твердости с регламентированными требованиями по ударной стойкости, что обусловлено специфическими особенностями химического состава и структуры рельсовых сталей [21 – 23]. Таким образом, фактическая область применения рельсовых сталей в настоящее время не ограничивается собственно рельсами, а включает в себя также производство катаных мелющих шаров.

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является повышение качества и технико-экономических показателей производства продукции из рельсовых сталей.

## ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Схема прокатки рельсов на современных рельсобалочных станах включает в себя прокатку в реверсивных черновых клетях, где происходят основные обжатия, и прокатку в группе универсальных клетей, основной задачей которых является формирование профиля рель-

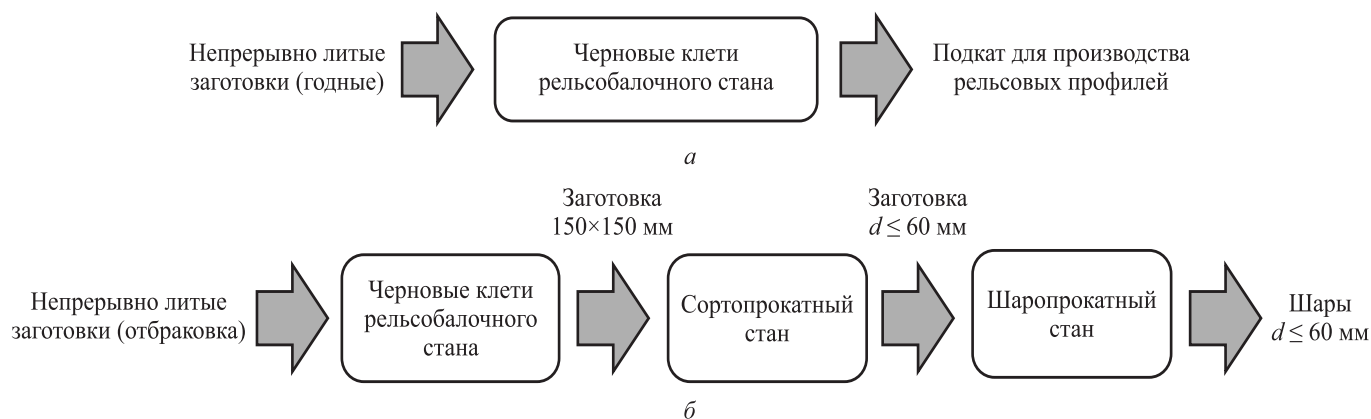


Рис. 1. Технологические схемы производства проката рельсовых профилей (а) и мелющих шаров (б) из рельсовых сталей

Fig. 1. Technological schemes for the production of rolled rail profiles (a) and grinding balls (b) from rail steels

сов. Наибольшее влияние на эффективность прокатки оказывают параметры деформации именно в черновых клетях, что и обусловило их выбор в качестве первого объекта применения методики (рис. 1, а).

В настоящее время на предприятиях-производителях рельсовой продукции имеет место значительная отбраковка непрерывно литых заготовок, из которых на ряде заводов (ОАО «ГМЗ») освоено производство мелющих шаров. Геометрические размеры непрерывно литых заготовок не позволяют изготавливать непосредственно из них шары на станах винтовой прокатки, поэтому технологическая схема включает в себя производство промежуточных заготовок. В качестве второго объекта применения рассматриваемой методики выбрана технологическая схема производства шаров из отбраковки рельсовых сталей (рис. 1, б).

## ОБОСНОВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО ПАРАМЕТРА ОПТИМИЗАЦИИ

Анализ существующих технических и технологических проблем при производстве рельсовой продукции позволил выделить следующие частные критерии оптимизации режимов прокатки рельсовых сталей: энергоэффективность; качество проката; материало-сбережение; производительность. В качестве обобщенного параметра оптимизации использована обобщенная функция желательности Харрингтона:

$$D = d_3^{m_3} d_k^{m_k} d_m^{m_m} d_n^{m_n},$$

где  $d_3$ ,  $d_k$ ,  $d_m$ ,  $d_n$  и  $m_3$ ,  $m_k$ ,  $m_m$ ,  $m_n$  – частные показатели желательности и коэффициенты весомости показателей по энергоэффективности, качеству, материало-сбережению и производительности;  $m_3 + m_k + m_m + m_n = 1$ .

В представленной методике выбор значений коэффициентов весомости частных показателей желательности проводится исходя из сравнительного анализа

резервов по снижению затрат или потерь в стоимостном выражении.

Частные показатели желательности экспоненциально зависят от безразмерных величин, которые, в свою очередь, связаны с натуральными показателями

$$d_i = \exp[-\exp(-y_i)] = \frac{1}{e^{1/e^{y_i}}},$$

где  $y_i = a_0 + a_1 x_i$  – безразмерная величина;  $a_0$ ,  $a_1$  – коэффициенты;  $x_i$  – натуральный показатель.

Необходимым условием использования обобщенной функции желательности на практике является закладываемое изначально соответствие стандартных оценок частных показателей желательности и натуральных значений анализируемых показателей (табл. 1).

Решение системы уравнений позволяет для значений  $x_i$ , соответствующих уровням желательности «хорошо» (верхняя граница интервала) и «удовлетворительно» (нижняя граница интервала), получить численные значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  и далее определить значения безразмерных функций  $y_i$  для конкретных значений  $x_i$ , характеризующих режимы прокатки:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_{i(«хорошо»)} = \ln\left(\frac{1}{\ln\left(\frac{1}{0,8}\right)}\right) = 1,5; \\ a_0 + a_1 x_{i(«удовлетворительно»)} = \ln\left(\frac{1}{\ln\left(\frac{1}{0,37}\right)}\right) = 0,01. \end{cases}$$

## ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ НАТУРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ЧАСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ

В качестве параметра, определяющего энергоэффективность режимов прокатки, использован удельный расход электроэнергии по клетям:

Общий вид шкалы желательности

Table 1. General view of the desirability scale

$d_i$	Оценка желательности	Натуральные значения анализируемых параметров			
		$x_3$	$x_k$	$x_m$	$x_n$
0,80 – 1,00	наивысший уровень («отлично»)	...	...	...	...
0,63 – 0,80	допустимый уровень, выше существующего («хорошо»)	...	...	...	...
0,37 – 0,63	допустимый уровень, соответствующий существующему («удовлетворительно»)	...	...	...	...
0,20 – 0,37	недопустимый уровень («неудовлетворительно»)	...	...	..	..
0 – 0,20	максимально нежелательный уровень («очень плохо»)	...	...	...	...

$$A_{эл} = \frac{A_{д\sigma}}{\eta_{ст} \eta_{дв} m},$$

где  $A_{д\sigma} = (p_{ср})_{ср} V n \left( \ln \frac{1}{\eta} \right)_{ср}$  – суммарная работа деформации, кДж;  $p_{ср}$  – контактное давление металла на валки, МПа;  $V$  – объем заготовки, м<sup>3</sup>;  $n$  – количество проходов;  $\frac{1}{\eta}$  – коэффициент обжатия;  $\eta_{ст}$ ,  $\eta_{дв}$  – к.п.д. стана и электродвигателя;  $m$  – масса заготовки, т.

Наибольшую сложность представляет определение среднего контактного давления, поскольку параметр пропорционален сопротивлению пластической деформации (величины, аналитические методики определения которой обладают рядом существенных недостатков, не позволяющих получать адекватные реальным условиям прокатки результаты).

Предлагается подход, согласно которому сопротивление деформации при конкретном сочетании термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации) определяется не конкретным числом, а диапазоном значений – интервалом равной вероятности (ИРВ). Этот интервал представляет собой разность между максимально и минимально возможными значениями данного показателя, получаемыми при наиболее условно «неблагоприятном» и «благоприятном» химическом составе стали. Указанный подход концептуально предложен в работе [24] и впервые практически реализован в рамках предлагаемой методики совершенствования режимов прокатки.

Определение максимального и минимального значений ИРВ сопротивления пластической деформации проводится по следующему алгоритму. На первом этапе на основании экспериментальных исследований получают уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь между параметрами деформации и сопротивлением деформации для стали рассматриваемого химического состава, соответствующему среднему со-

держанию основных химических элементов в фактическом интервале их варьирования:

$$\sigma_{s(ср)} = f(t; u; \varepsilon),$$

где  $t$ ,  $u$ ,  $\varepsilon$  – температура, скорость и степень деформации.

На следующем этапе для различных сочетаний термомеханических параметров деформации определяется относительное отклонение верхней и нижней границ ИРВ сопротивления деформации от значений, соответствующих «среднему» химическому составу стали:

$$\Delta_{в(i)} = \frac{\sigma_{s(в)_i} - \sigma_{s(ср)_i}}{\sigma_{s(ср)_i}};$$

$$\Delta_{н(i)} = \frac{\sigma_{s(ср)_i} - \sigma_{s(н)_i}}{\sigma_{s(ср)_i}},$$

где  $\sigma_{s(в)_i}$ ,  $\sigma_{s(н)_i}$  и  $\sigma_{s(ср)_i}$  – сопротивление деформации, соответствующее верхней, нижней границам ИРВ и «среднему» химическому составу стали.

На третьем этапе рассчитываются максимально и минимально возможные значения сопротивления деформации при заданном сочетании термомеханических параметров:

$$\sigma_{s(max)} = \sigma_{s(ср)} (1 + \Delta_{в(ср)});$$

$$\sigma_{s(min)} = \sigma_{s(ср)} (1 - \Delta_{н(ср)}),$$

где  $\Delta_{в(ср)}$  и  $\Delta_{н(ср)}$  – средние арифметические значения относительных отклонений верхней и нижней границ ИРВ для стали конкретной марки.

Следует отметить, что максимально возможное сопротивление деформации является лимитирующим с точки зрения допустимой нагрузки на основное и вспомогательное оборудование прокатного стана, а минимальное значение и отклонение от среднего значения интервала характеризуют степень загрузки двигателей приводов прокатных клетей.

Параметром, характеризующим качество готового проката, является отбраковка готовой продукции, которая представляет собой функцию вероятностей образования новых дефектов и выкатываемости уже имеющихся на исходных заготовках дефектов:

$$B_d = f(p_{\text{обр}}; p_{\text{вык}}).$$

При этом вероятность образования дефектов связана с влиянием параметров прокатного передела, а вероятность полной выкатываемости дефектов (до размеров, допустимых согласно требований нормативной документации) – с влиянием параметров сталеплавильного передела, поскольку она зависит от размеров дефектов на исходных заготовках.

Показателем, характеризующим вероятность образования дефектов при прокатке, является степень использования запаса пластичности (СИЗП):

$$\psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p} = \frac{\Lambda}{\int_0^{t_p} H d\tau},$$

где  $\Lambda$  – накопленная степень деформации сдвига;  $\Lambda_p$  – предельная степень деформации сдвига до разрушения;  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига;  $t_p$  – время разрушения.

Поскольку СИЗП распределяется неравномерно по сечению прокатываемого профиля в процессе деформации и с учетом того факта, что прокатка проводится за несколько проходов, для анализа используется среднее максимальное значение СИЗП по проходам:

$$\psi_{\text{max(пр)}} = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_{\text{max}(i)}}{n},$$

где  $\psi_{\text{max}(i)}$  – максимальные значения СИЗП по проходам;  $n$  – количество проходов.

В качестве параметра, характеризующего вероятность выкатываемости дефектов, переходящих на прокат с исходных заготовок, предложено использовать коэффициенты выкатываемости дефектов по глубине и ширине (для поверхностных дефектов) и по сечению (для внутренних дефектов):

$$K_h = \frac{h_0}{h_1}; K_b = \frac{b_0}{b_1}; K_S = \frac{S_0}{S_1},$$

где  $h_0$  и  $h_1$  – глубина поверхностного дефекта до и после деформации;  $b_0$  и  $b_1$  – ширина поверхностного дефекта до и после деформации;  $S_0$  и  $S_1$  – площадь поперечного сечения внутреннего дефекта до и после деформации.

С точки зрения влияния на отбраковку готового проката значимым является значение суммарного коэффициента выкатываемости:

$$K_{h(\Sigma)} = \prod_{i=1}^n K_{h(i)};$$

$$K_{b(\Sigma)} = \prod_{i=1}^n K_{b(i)};$$

$$K_{S(\Sigma)} = \prod_{i=1}^n K_{S(i)},$$

где  $K_{h(i)}$ ,  $K_{b(i)}$ ,  $K_{S(i)}$  – коэффициенты выкатываемости дефектов по проходам;  $n$  – количество проходов.

Прогнозные суммарные коэффициенты выкатываемости дефектов необходимо определять с учетом доли дефектов, отнесенных к определенной группе (объединение дефектов в группы проводится в зависимости от их пространственной ориентации и расположения):

$$K_{h(\Sigma)\text{общ}} = \prod_{i=1}^n K_{h(\Sigma)i} D_i;$$

$$K_{b(\Sigma)\text{общ}} = \prod_{i=1}^n K_{b(\Sigma)i} D_i;$$

$$K_{S(\Sigma)\text{общ}} = \prod_{i=1}^n K_{S(\Sigma)i} D_i,$$

где  $D_i$  – доля дефектов, отнесенных к конкретной группе, в их общем количестве.

Таким образом, уровень отбраковки готового металлопроката является функцией среднего максимального значения СИЗП и коэффициента суммарной выкатываемости дефектов по проходам:

$$B_{D_{\text{п}}} = f(\psi_{\text{max(пр)}}; K_{h(\Sigma)}; K_{b(\Sigma)});$$

$$B_{D_{\text{в}}} = f(\psi_{\text{max(пр)}}; K_{S(\Sigma)}),$$

где  $B_{D_{\text{п}}}$  и  $B_{D_{\text{в}}}$  – отбраковка готового проката по дефектам поверхности и внутренним дефектам.

При расчете прогнозных значений отбраковки проката для нового режима прокатки учитывается изменение параметров с учетом доли их влияния:

$$B_{D_{\text{п(изм)}}} = \frac{B_{D_{\text{п(баз)}}}}{\frac{\psi_{\text{max(пр)}}_{\text{баз}}}{\psi_{\text{max(пр)}}_{\text{изм}}} \cdot \frac{D_{\text{п(п)}}}{D_{\text{п(в)}}} + \frac{\frac{K_{h(\Sigma)_{\text{изм}}}}{K_{h(\Sigma)_{\text{баз}}}} + \frac{K_{b(\Sigma)_{\text{изм}}}}{K_{b(\Sigma)_{\text{баз}}}}}{2D_{\text{с(п)}}}};$$

$$B_{D_{\text{в(изм)}}} = \frac{B_{D_{\text{в(баз)}}}}{\frac{\psi_{\text{max(пр)}}_{\text{баз}}}{\psi_{\text{max(пр)}}_{\text{изм}}} \cdot \frac{D_{\text{п(в)}}}{D_{\text{с(в)}}} + \frac{K_{S(\Sigma)_{\text{изм}}}}{K_{S(\Sigma)_{\text{баз}}}}},$$

где  $B_{D_{\text{п(баз)}}}$  и  $B_{D_{\text{в(баз)}}}$  – уровень отбраковки готового проката по дефектам поверхности и внутренним дефектам при использовании базового режима прокатки;  $B_{D_{\text{п(изм)}}}$  и  $B_{D_{\text{в(изм)}}}$  – уровень отбраковки готового проката



по дефектам поверхности и внутренним дефектам при использовании измененного режима прокатки;  $D_{n(n)}$  и  $D_{c(n)}$  – доля поверхностных дефектов прокатного и сталеплавильного происхождения;  $D_{n(b)}$  и  $D_{c(b)}$  – доля внутренних дефектов прокатного и сталеплавильного происхождения.

Определение степени влияния технологических параметров прокатного передела на вероятность образования дефектов методами математической статистики является практически нереализуемым (в силу крайне незначительного интервала их изменения в рамках одного режима прокатки), поэтому целесообразным является определение доли влияния на отбраковку готового проката параметров сталеплавильного передела, а влияние параметров прокатного передела в этом случае составит оставшуюся долю:

$$D_{\Pi} = 1 - D_c = 1 - k_{\text{сов}(c)},$$

где  $k_{\text{сов}(c)}$  – совокупный коэффициент детерминации влияния параметров сталеплавильного передела на отбраковку готового проката.

Следует отметить, что необходимым условием получения адекватных данных о доле влияния параметров различных переделов на отбраковку проката являются дополнительные металлографические исследования характерных дефектов.

Для приведения показателя, характеризующего калибровку валков, к измеряемому виду предложено использовать коэффициент подобия формы подката и калибра:

$$K_{\text{пф}} = \frac{S_0/\Pi_0}{S_1/\Pi_1},$$

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

Наиболее благоприятная схема напряженного состояния металла формируется при  $K_{\text{пф}} = 1$ .

Таким образом, аналитические зависимости, используемые в дальнейшем для получения прогнозных значений СИЗП и выкатываемости дефектов при изменении режима прокатки, имеют вид:

$$\Psi_{\text{max}} = f(t, u, \lambda, K_{\text{пф}}),$$

$$K_{(h; b; S)} = f(\lambda, K_{\text{пф}}).$$

В качестве параметра, характеризующего материалосбережение, выбран удельный расход прокатных валков, который является функцией средних значений усилия прокатки по проходам; коэффициента подобия формы подката и калибра прокатных валков; машинного времени прокатки:

$$A_b = f(P_{\text{cp}}[\sigma_s; t; u; \varepsilon]; K_{\text{пф}(cp)}; T_{\text{пр}}),$$

где  $T_{\text{пр}}$  – машинное время прокатки;  $P_{\text{cp}}$  – среднее усилие прокатки по проходам.

Количественная взаимосвязь между характеристиками деформируемой стали, параметрами ее деформации и удельным расходом прокатных валков устанавливается на основании данных для различных клетей анализируемого стана, получаемых при использовании базового режима прокатки. Полученные аналитические зависимости удельного расхода валков от параметров прокатки экстраполируются на вновь разрабатываемые режимы прокатки.

Для оценки влияния режимов прокатки на производительность стана применяется «тактовый подход». В рамках этого подхода проводится расчет тактов работы отдельных, независимых участков, затем из полученных тактов выбирается максимальный, который выступает в роли такта работы всего прокатного стана:

$$T_{\text{ст}} T_{\text{max}} \{T_1; T_2; \dots; T_n\},$$

где  $T_{\text{ст}}$  – такт работы прокатного стана, с;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_n$  – такт работы участков прокатного стана, с.

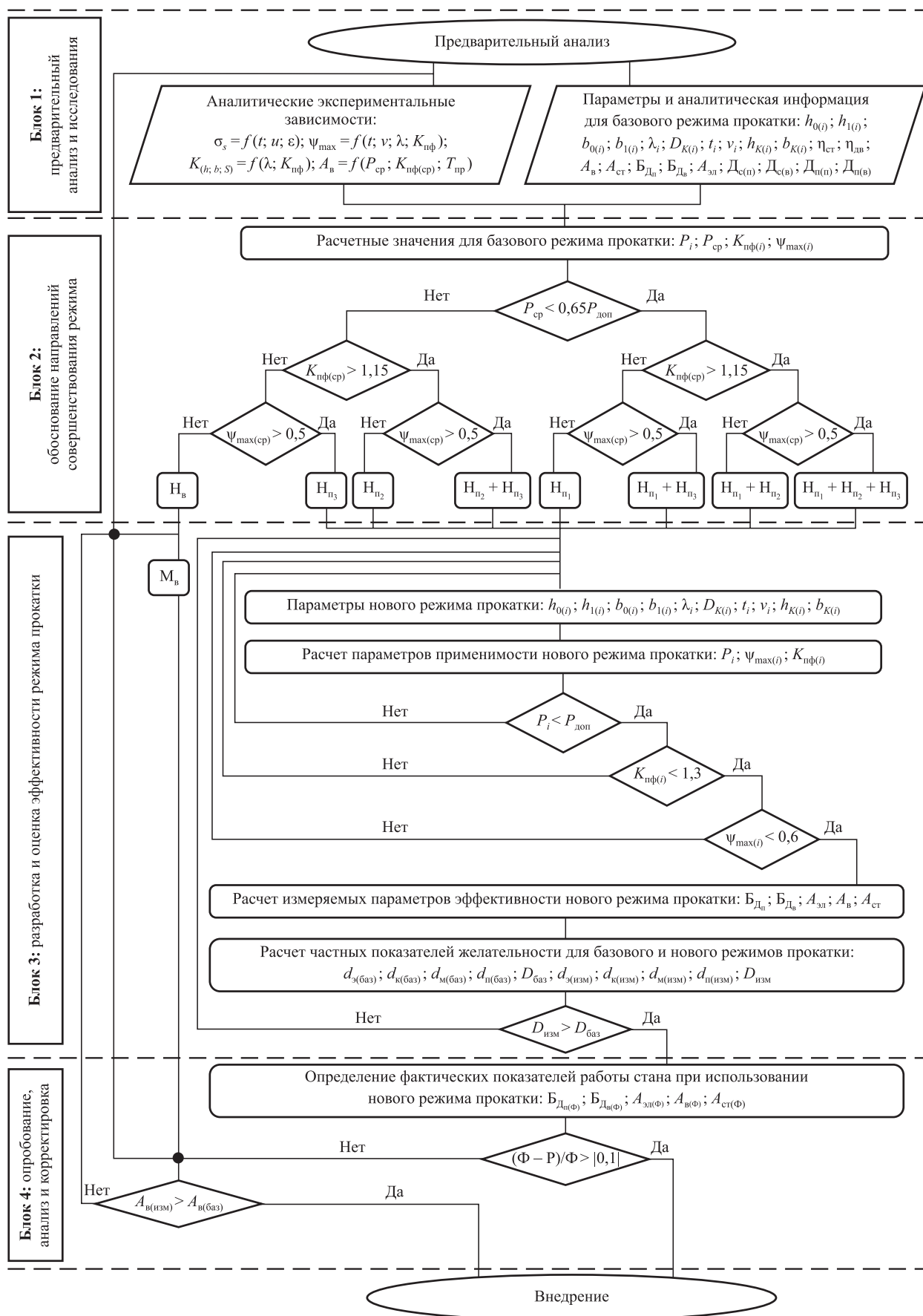
## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРИМЕНЕНИЯ

### МЕТОДИКИ

Алгоритм применения методики включает четыре блока (рис. 2) (где  $H_{n1}$ ,  $H_{n2}$ ,  $H_{n3}$  – направления по совершенствованию режима прокатки путем интенсификации режима обжатий, изменения калибровки и температурно-скоростных параметров;  $H_b$ ,  $M_b$  – направление и конкретные мероприятия по снижению расхода валков;  $\Phi$ ,  $P$  – значения фактических и расчетных показателей при использовании нового режима прокатки).

Первый блок – получение исходных данных, которые в зависимости от метода их получения можно разбить на две группы: не требующие проведения дополнительных исследований (информация о параметрах базового режима прокатки и фактических показателях работы прокатного стана при его использовании) и полученные на основании дополнительных исследований аналитические зависимости (уравнения регрессии), устанавливающие взаимосвязь между параметрами оптимизации и измеряемыми температурно-скоростными и геометрическими параметрами прокатки.

Второй блок – обоснование конкретного направления (направлений) совершенствования режимов прокатки. С использованием ранее полученных данных для базового режима прокатки проводятся расчеты показателей, характеризующих возможность интенсификации режима прокатки, целесообразность корректировки используемой калибровки валков и используемых температурно-скоростных параметров прокатки. Для выбора



конкретного направления совершенствования режима прокатки обоснованы граничные условия. Поскольку влияние режима прокатки на удельный расход прокатных валков учитывается с использованием среднего по проходам усилия прокатки, а также коэффициента подобия формы калибра и исходного подката, то изменение расхода прокатных валков в случае интенсификации режимов прокатки и (или) совершенствования калибровки валков, температурно-скоростных условий прокатки будет происходить автоматически. В случае несоблюдения всех перечисленных граничных условий проводится анализ и обоснование выбора дополнительного метода (методов) снижения расхода прокатных валков. При этом приоритет отдается методам, не требующим значительных изменений технологии и повышения затрат.

Третий блок включает в себя разработку параметров нового режима прокатки и оценку его применимости и эффективности по сравнению с базовым режимом. Применимость нового режима прокатки оценивается

исходя из допустимой нагрузки на основное оборудование стана, а эффективность – по результатам определения обобщенной функции желательности Харрингтона. Согласно принятому подходу обобщенная функция желательности определяется с учетом коэффициентов весоности частных критериев оптимизации, поэтому в рамках данного блока проводится выбор значений данных коэффициентов. В случае невыполнения условий применимости и эффективности нового режима прокатки проводится корректировка его параметров с повторной проверкой соответствия вышеприведенным условиям.

Четвертый блок включает в себя опытно-промышленное опробование нового режима прокатки в условиях действующего прокатного стана, сравнение фактических показателей работы стана при его использовании с расчетными данными и, при необходимости, корректировку методики определения прогнозных значений измеряемых показателей путем ввода дополнительных поправочных коэффициентов.

Таблица 2

**Режимы прокатки железнодорожных рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»**

*Table 2. Modes of railway rails rolling in roughing stands of the universal rail-and-structural steel mill of JSC “EVRAZ ZSMK”*

Номер черновой клетки	Базовый режим				Новый режим		
	номер прохода	$H$ , мм	$B$ , мм	$\Delta h$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$\Delta h$ , мм
1	0	300,0	360,0	—	300,0	360,0	—
	1	кантовка на 90°			260,0	375,0	40,0
		305,0	310,0	55,0			
	2	257,0	320,0	48,0	кантовка на 90°		
					317,0	270,0	58,0
	3	кантовка на 90°			266,0	280,0	51,0
		260,0	267,0	60,0			
	4	215,0	277,0	45,0	кантовка на 90°		
					291,0	276,0	61,0
	5	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		257,0	220,0	20,0	222,0	229,0	54,0
	6	232,0	225,0	25,0	кантовка на 90°		
					207,0	240,0	22,0
	7	кантовка на 90°			195,5	230,0	44,5
		210,0	246,0	15,0			
2	1	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		200,5	250,0	45,5	80,0	220,5	110,0
	2	194,5	250,0	6,0	53,0	229,5	27,0
	3	80,0	215,3	90,0	42,0	238,5	11,0
	4	55,0	222,9	25,0	—	—	—
	5	43,0	234,0	12,0	—	—	—



## ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ

### МЕТОДИКИ

С использованием разработанной методики проведено совершенствование режимов прокатки железнодорожных и остряковых рельсов в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также режимов прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей в условиях сортопрокатного стана ОАО «ГМЗ». В качестве теоретической базы применяемой методики использованы результаты исследований сопротивления пластической деформации и пластичности рельсовых сталей [25 – 28], процессов образования и выкатываемости дефектов на начальной стадии прокатки рельсов [29, 30].

Отличительные особенности новых режимов прокатки рельсовых профилей (табл. 2, 3, рис. 3, 4): снижение количества проходов во второй черновой клети

(с 5 до 3 и с 7 до 5 для железнодорожных и остряковых рельсов соответственно); изменение формы «рельсовых калибров», позволяющее повысить степень подобию формы исходного подката и указанных калибров.

Эффективность разработанных режимов прокатки рельсовых профилей подтверждена результатами опытно-промышленного опробования и внедрения (табл. 4).

Опытно-промышленное опробование усовершенствованного режима производства мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей, предполагающего увеличение максимально допустимой температуры начала прокатки с 980 до 1030 °С, показало улучшение основных показателей качества производимых шаров относительно существующего режима их прокатки (табл. 5).

Ожидаемая экономическая эффективность от внедрения нового режима прокатки шаров составляет 22,5 млн руб/год. Эффективность разработанной мето-

Т а б л и ц а 3

### Режимы прокатки остряковых рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Table 3. Modes of sharp rails rolling in roughing stands of the universal rail-and-structural steel mill of JSC “EVRAZ ZSMK”

Номер черновой клетки	Базовый режим				Новый режим		
	номер прохода	<i>H</i> , мм	<i>B</i> , мм	$\Delta h$ , мм	<i>H</i> , мм	<i>B</i> , мм	$\Delta h$ , мм
1	0	300,0	365,0	–	300,0	365,0	–
	1	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		300,0	308,0	65,0	300,0	308,0	65,0
	2	255,0	318,0	45,0	240,0	318,0	60,0
	3	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		260,0	265,0	58,0	260,0	250,0	58,0
	4	210,0	275,0	50,0	210,0	260,0	50,0
	5	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		225,0	216,0	50,0	195,0	220,0	65,0
	6	198,0	221,0	27,0	кантовка		
180,0					205,0	40,0	
7	кантовка на 90°			кантовка на 90°			
	180,0	206,0	41,0	192,0	194,0	13,0	
2	1	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		198,0	194,0	8,0	159,0	206,0	35,0
	2	кантовка на 90°			143,0	215,0	16,0
		165,0	210,0	29,0			
	3	148,0	215,0	17,0	кантовка на 90°		
					100,2	156,0	59,4
	4	кантовка на 90°			96,5	161,5	3,7
		103,0	158,0	51,0			
	5	103,0	158,0	0	94,5	163,5	2,0
	6	94,5	164,0	8,5	–	–	–
7	92,5	165,0	2,0	–	–	–	

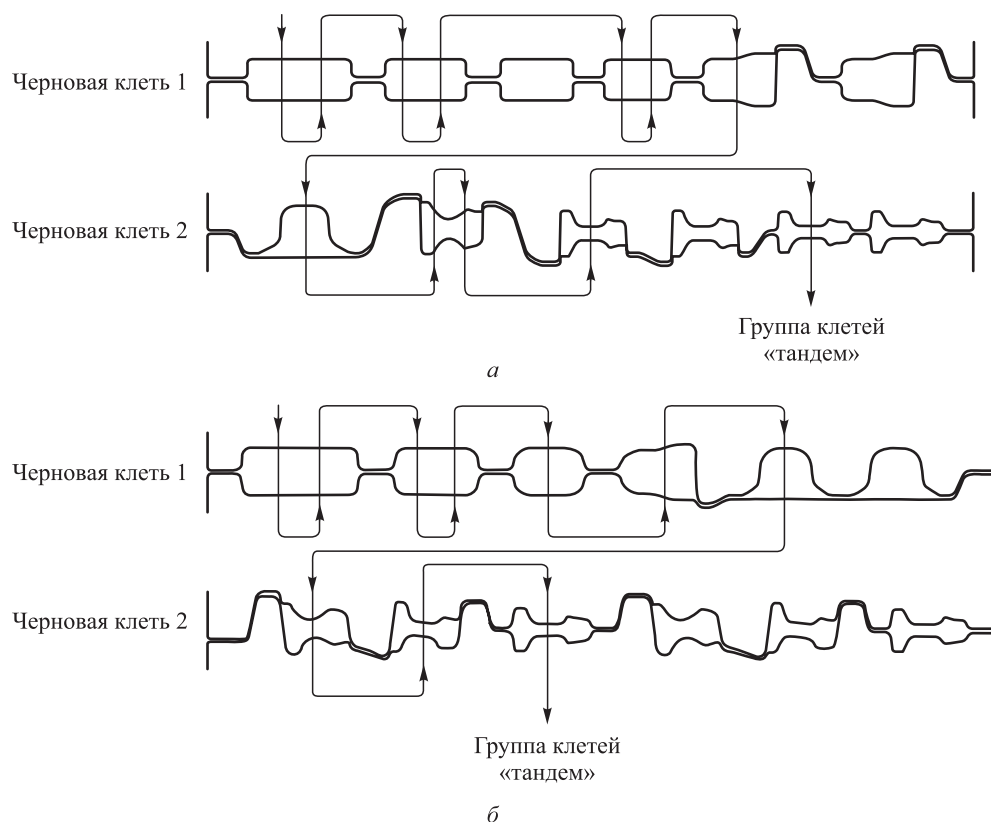


Рис. 3. Схема прокатки железнодорожных рельсов в черновых клетях по базовому (а) и разработанному (б) режимам

Fig. 3. Scheme of rolling railway rails in roughing stands according to the basic (a) and developed (b) modes

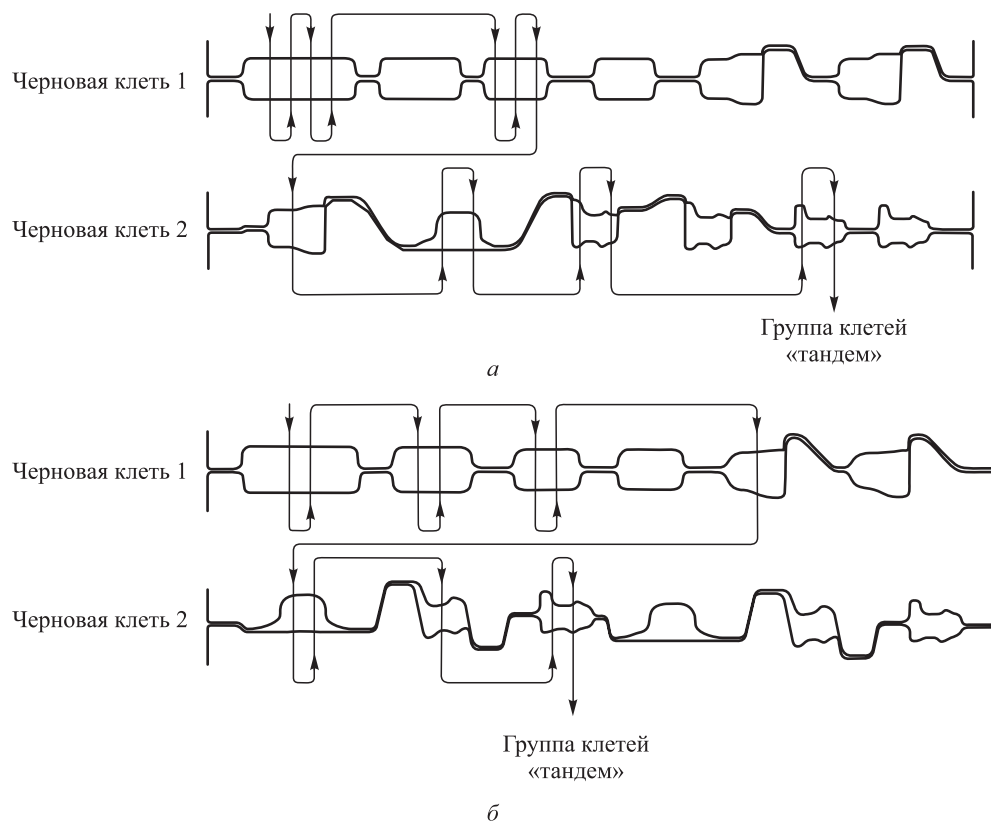


Рис. 4. Схема прокатки остроговых рельсов в черновых клетях по базовому (а) и разработанному (б) режимам

Fig. 4. Scheme of rolling of sharp rails in roughing stands according to the basic (a) and developed (b) modes

Т а б л и ц а 4

**Анализ эффективности режимов прокатки рельсов  
на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»**

*Table 4. Analysis of the effectiveness of rails rolling modes  
on the universal rail-and-structural steel mill of JSC “EVRAZ ZSMK”*

Показатель	Изменение показателя относительно базового режима прокатки	
	железнодорожные рельсы	остряковые рельсы
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	–0,51	–0,49
Отбраковка рельсов, %	–0,78	–0,50
Удельный расход прокатных валков, кг/т	–0,51	–0,49
Производительность стана, т/ч	+40,20	+39,80
Экономический эффект, млн руб/год	121,051	29,700*

\* Ожидаемый эффект по результатам опытно-промышленного опробования.

Т а б л и ц а 5

**Влияние температурного режима прокатки мелющих шаров  
из рельсовой стали в условиях ОАО «ГМЗ» на показатели их качества**

*Table 5. Influence of the temperature mode of rolling grinding balls  
made of rail steel in the conditions of JSC “GMZ” on their quality indicators*

Режим прокатки	Показатель			
	Доля шаров, выдержавших испытания на ударостойкость, %	Доля шаров с внутренними трещинами	Средний балл зерна после термообработки	Поверхностная твердость после термообработки, HRC
Базовый	86	12	5,8	56
Новый	100	0	5,2	56

дики совершенствования режимов прокатки рельсовых сталей подтверждена на практике.

## Выводы

Разработаны основы и алгоритм применения на практике методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации, включающего в себя частные критерии оптимизации по энергоэффективности, материалосбережению, качеству готового проката и производительности стана. С использованием указанной методики усовершенствованы режимы про-

катки железнодорожных и остряковых рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ Западно-сибирский металлургический комбинат» и режим прокатки мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовой стали на стане поперечно-винтовой прокатки ОАО «Гурьевский металлургический завод». Опытно-промышленное опробование и внедрение новых режимов прокатки перечисленных видов продукции из рельсовых сталей показало значительное повышение качества и технико-экономических показателей производства при их использовании, что свидетельствует об эффективности разработанной методики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Полевой Е.В., Волков К.В., Головатенко А.В., Атконова 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.
2. Шабуров Д.В., Попов А.Е., Загуменнов О.В. Освоение технологии производства рельсов на универсальном рельсобалочном стане // Сталь. 2016. № 7. С. 44–45.
3. Волков К.В., Кузнецов Е.П., Бойков Д.В., Сапаев Н.М., Захарова Т.П. Освоение производства рельсовой стали на модернизированной МНЛЗ № 1 ЭСПЦ ОАО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная

1. Polevoi E.V., Volkov K.V., Golovatenko A.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M. Improvement of rail production technology at JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Combine. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2013, no. 4, pp. 26–28. (In Russ.).
2. 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>
3. Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Boikov D.V., Sapaev N.M., Zakharova T.P. Mastering the production of rail steel at the modernized CCM No. 1 in the EAF shop of JSC EVRAZ ZSMK. *Chernaya*

- металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 25–30.
4. Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянцев М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 298–304.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-298-304>
5. Браунштейн Е.Р., Перетятко В.Н. Выработка поверхностных дефектов при прокатке рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 32–35.
6. Шарапов И.А., Дорофеев В.В., Бердышев В.А., Громов В.Е. Рациональная система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках // Сталь. 1997. № 6. С. 61–62.
7. Перетятко В.Н., Литвин С.Г., Пятайкин Е.М. Влияние разрезки на положение центральной пористости в рельсах Р65 // Известия вузов. Черная металлургия. 2003. № 4. С. 36–38.
8. 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.
9. 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.
10. Dong Y.-G., Zhang W.-Z., Song J.-F. Theoretical and experimental research on spread of base of rail in universal rolling // *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2011. Vol. 42. No. 9. P. 2676–2680.
11. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the elongation law of the rail in rail rolling by a universal mill // *Journal of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 46. No. 6. P. 87–92.
12. Chen L., Bi K. Study on simulation experiment with universal pass rolling deformation for heavy rail // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 430–432. P. 525–529.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.430-432.525>
13. Ma J.-H., Zhang W.-Z. Numerical simulation and experimental study on corrugated waist rail with universal rolling // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 83–86. P. 222–229.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.222>
14. 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)
15. Liu Y., Wang Y., Zhu H., Chen L. 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>
16. Dong Y., Zhang W., Song J. Novel analytical model of mean temperature and experimental research on the rail universal rolling // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 22. No. 3. P. 376–383. <http://dx.doi.org/10.3901/CJME.2009.03.376>
17. Dong Y.-g., Zhang W.-z., Song J.-f. The theoretical and experimental research on the forward slip coefficient in rail universal rolling // *ISIJ International*. 2009. Vol. 49. No. 3. P. 385–394.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.385>
18. Svejkovsky U., Nerzak T. Top quality rail production using compact universal stands and RailCool technology // *MPT Metallurgical Plant and Technology International*. 2006. Vol. 29. No. 2. P. 74–80.
19. Svejkovsky U., Ellis G., Perala R.E. State of the art of rail rolling // *ISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2004. Vol. 2. P. 161–168.
20. Pfeiler H., Köck N., Schröder J., Maestrutti L. The new rail mill of voestalpine Schienen at Donawitz // *MPT Metallurgical Plant and Technology International*. 2003. Vol. 26. No. 6. P. 40–44.
21. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 96–99.
- metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2014, no. 6 (1374), pp. 25–30. (In Russ.).
4. Protopopov E.V., Chislavlev V.V., Temlyantsev M.V., Golovatenko A.V. Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 298–304. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-298-304>
5. Braunshtein E.R., Peretyat'ko V.N. Development of surface defects during rail rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 8, pp. 32–35. (In Russ.)
6. Sharapov I.A., Dorofeev V.V., Berdyshev V.A., Gromov V.E. Rational gauge system for rolling rails in rough passes. *Stal'*. 1997, no. 6, pp. 61–62. (In Russ.).
7. Peretyat'ko V.N., Litvin S.G., Pyataikin E.M. Effect of cutting on the position of central porosity in rails R65. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 4, pp. 36–38. (In Russ.).
8. 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.
9. 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.
10. Dong Y.-G., Zhang W.-Z., Song J.-F. Theoretical and experimental research on spread of base of rail in universal rolling. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2011, vol. 42, no. 9, pp. 2676–2680.
11. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the elongation law of the rail in rail rolling by a universal mill. *Journal of Mechanical Engineering*. 2010, vol. 46, no. 6, pp. 87–92.
12. Chen L., Bi K. Study on simulation experiment with universal pass rolling deformation for heavy rail. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 430–432, pp. 525–529.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.430-432.525>
13. Ma J.-H., Zhang W.-Z. Numerical simulation and experimental study on corrugated waist rail with universal rolling. *Advanced Materials Research*. 2010, vol. 83–86, pp. 222–229.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.222>
14. 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)
15. Liu Y., Wang Y., Zhu H., Chen L. 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>
16. Dong Y., Zhang W., Song J. Novel analytical model of mean temperature and experimental research on the rail universal rolling. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2009, vol. 22, no. 3, pp. 376–383. <http://dx.doi.org/10.3901/CJME.2009.03.376>
17. Dong Y.-g., Zhang W.-z., Song J.-f. The theoretical and experimental research on the forward slip coefficient in rail universal rolling. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 3, pp. 385–394.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.385>
18. Svejkovsky U., Nerzak T. Top quality rail production using compact universal stands and RailCool technology. *MPT Metallurgical Plant and Technology International*. 2006, vol. 29, no. 2, pp. 74–80.
19. Svejkovsky U., Ellis G., Perala R.E. State of the art of rail rolling. *ISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2004, vol. 2, pp. 161–168.
20. Pfeiler H., Köck N., Schröder J., Maestrutti L. The new rail mill of voestalpine Schienen at Donawitz. *MPT Metallurgical Plant and Technology International*. 2003, vol. 26, no. 6, pp. 40–44.
21. Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls made of rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017, vol. 1, pp. 96–99. (In Russ.).

22. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbellet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. No. 1-4. P. 893–901. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
23. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 63. No. 1. P. 5–12. <https://doi.org/10.24425/118901>
24. Бровман М.Я. Определение сопротивления деформации при прокатке // *Сталь*. 2015. № 6. С. 40–44.
25. 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>
26. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянцева М.В., Дорофеев В.В. Экспериментальные исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей // *Черные металлы*. 2019. № 6. С. 24–28.
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., Темлянцева 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.
29. 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>
30. Уманский А.А., Юрьев А.Б., Думова Л.В. Исследования закономерностей течения металла и трансформации дефектов при прокатке в черновых клетях универсального рельсобалочного стана // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 10. С. 712–720. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-712-720>
22. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbellet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 893–901. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
23. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 5–12. <https://doi.org/10.24425/118901>
24. Broyman M.Ya. Determination of deformation resistance during rolling. *Stal'*. 2015, no. 6, pp. 40–44. (In Russ.).
25. 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>
26. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V., Dorofeev V.V. Experimental studies of plasticity and deformation resistance of chromium rail steels. *Chernye metally*. 2019, no. 6, pp. 24–28. (In Russ.).
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., 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.).
29. 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>
30. Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Dumova L.V. Regularities of metal flow and defects transformation during rolling in roughing stands of a universal rail and structural mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 10, pp. 712–720. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-712-720>

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Александрович Уманский**, к.т.н., 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

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: rector@sibsiu.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

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: rector@sibsiu.ru

Поступила в редакцию 16.02.2021

После доработки 16.03.2021

Принята к публикации 17.03.2021

Received 16.02.2021

Revised 16.03.2021

Accepted 17.03.2021