

**Оригинальная статья**

УДК 621.771.65

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-596-603

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2372>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ НА КАЧЕСТВО СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК И МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗ ОТБРАКОВКИ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ

А. А. Уманский, А. Б. Юрьев, А. С. Симачев, Л. В. Думова

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

Аннотация. Проведенными исследованиями установлены закономерности влияния параметров прокатки сортовых заготовок и мелющих шаров при их производстве из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф на вероятность образования дефектов в процессе деформации. Моделирование процесса прокатки сортовых заготовок из отбраковки непрерывно литых слитков рельсовой стали указанной марки в программном комплексе DEFORM-2D позволило установить значимое влияние на вероятность образования дефектов, характеризующееся максимальным по сечению раскатов значением критерия Кокрофта–Лэтэма, следующих параметров: частные коэффициенты вытяжки по проходам, частота кантовок раската, температура прокатки. Увеличение коэффициентов вытяжки (обжатий) по проходам за счет интенсификации режима прокатки и повышение частоты кантовок позволяет уменьшить вероятность образования дефектов в процессе прокатки за счет снижения температурной неоднородности по сечению раскатов. Установленное влияние повышения температуры на снижение вероятности образования дефектов обусловлено повышением пластичности рассматриваемой рельсовой стали. На основании полученных данных сформулированы общие рекомендации по направлениям совершенствования режимов прокатки сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей и ограничения их применения на практике. На основании результатов моделирования прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали на стане поперечно-винтовой прокатки установлено значимое влияние повышения температуры деформации на снижение трещинообразования в осевой зоне шаров, обусловленное увеличением пластичности стали. С использованием результатов, полученных при моделировании, разработан новый режим прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф, обеспечивающий повышение ударной стойкости мелющих шаров при сохранении высокой поверхностной твердости. Эффективность нового режима прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали подтверждается результатами его опытно-промышленного опробования в условиях шаропркатного стана ОАО «Гурьевский металлургический завод».

Ключевые слова: мелющие шары, рельсовые стали, непрерывно литые заготовки, математическое моделирование, параметры прокатки, дефекты

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-29-20170.

Для цитирования: Уманский А.А., Юрьев А.Б., Симачев А.С., Думова Л.В. Исследование влияния параметров деформации на качество сортовых заготовок и мелющих шаров при их производстве из отбраковки рельсовых сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 596–603. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-596-603>

Original article

INFLUENCE OF DEFORMATION PARAMETERS ON QUALITY OF BILLETS AND GRINDING BALLS DURING THEIR PRODUCTION FROM REJECTS OF RAIL STEELS

A. A. Umanskii, A. B. Yur'ev, A. S. Simachev, L. V. Dumova

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

Abstract. The conducted studies have determined the regularities of influence of rolling parameters of billets and grinding balls in their production from the rejects of K76F rail steel on probability of defects formation during deformation. Modeling of the rolling process of high-grade billets from the rejects of continuously cast ingots of rail steel of the specified grade in DEFORM-2D software package allowed us to establish a significant effect of such parameters as: partial coefficients of drawing along the transfer bar, frequency of rolling edges, and rolling temperature, on the probability of defect formation, characterized by the maximum value of the Cockcroft–Latham criterion in cross section of the rolls. It is shown that an increase

in the coefficients of drawing (compression) along the transfer bar, due to intensification of the rolling mode and an increase in frequency of edging, reduces the likelihood of defects forming during rolling by reducing the temperature inhomogeneity along the rolls section. The established effect of temperature increase on reducing the probability of defects formation is due to an increase in plasticity of the considered rail steel. Based on the data obtained, general recommendations are formulated on the directions of improving the rolling modes of billets from the rejects of rail steels and restrictions on their application in practice. Based on the results of modeling the rolling of grinding balls from the rejects of rail steel on a helical rolling mill, a significant effect of an increase in the deformation temperature on reduction of cracking in the balls axial zone, due to an increase in the steel ductility, was established. Therefore, a new mode of rolling grinding balls from the rejects of K76F rail steel was developed, which provides an increase in impact resistance of grinding balls while maintaining high surface hardness. Effectiveness of this mode is confirmed by the results of its pilot testing in conditions of the ball rolling mill at JSC "Guryevskii Metallurgical Plant".

Keywords: grinding balls, rail steels, continuously cast billets, mathematical modeling, rolling parameters, defect

Funding: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation no. 22-29-20170.

For citation: Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Simachev A.S., Dumova L.V. Influence of deformation parameters on quality of billets and grinding balls during their production from rejects of rail steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 596–603. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-596-603>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мелющие шары повышенной твердости, ударо- и износостойкости являются одним из наиболее востребованных видов проката [1–3]. При этом обеспечение производства мелющих шаров с указанными характеристиками требует повышенного качества исходных заготовок [4–6], что закономерно увеличивает себестоимость данного вида продукции, снижая рентабельность производства и конкурентоспособность мелющих шаров на рынках их сбыта [7–10].

Одним из эффективных способов решения задачи по снижению себестоимости производства мелющих шаров является использование в качестве исходных заготовок для их прокатки отбраковки непрерывно литых заготовок рельсовых сталей [11–13]. В последние годы на отечественных металлургических предприятиях, являющихся основными производителями железнодорожных рельсов (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «Мечел»), имеет место значительная отбраковка непрерывно литых заготовок, не имеющих явно выраженных дефектов [14]. Основной причиной отбраковки таких заготовок являются более жесткие

требования внутренней нормативной документации по отношению к требованиям ГОСТ, в частности по химическому составу стали.

Рядом металлургических заводов, в частности ОАО «Гурьевский металлургический завод», на текущий момент освоено массовое производство мелющих шаров из отбракованных заготовок рельсовой стали. При этом, поскольку значительная площадь поперечного сечения непрерывно литых заготовок рельсовой стали не позволяет прокатывать из них шары, то технологическая схема производства шаров помимо самой прокатки шаров на станах поперечно-винтовой прокатки включает в себя также производство промежуточных заготовок. Для основного сортамента мелющих шаров (шары диаметром 60 мм и ниже) технологическая схема включает в себя прокатку промежуточных заготовок на рельсобалочном и сортовом станах (рис. 1, а), для шаров большего диаметра – прокатку промежуточных заготовок только на рельсобалочном стане (рис. 1, б).

Опыт производства шаров из отбраковки непрерывно литых рельсовых сталей свидетельствует о наличии целого ряда технических и технологических проблем, обусловленных специфическими особенностями

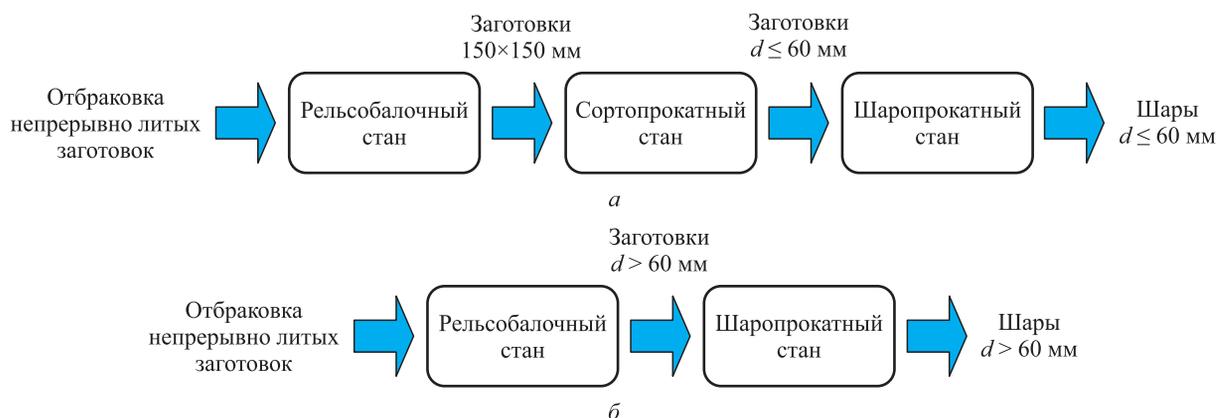


Рис. 1. Технологические схемы производства мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей при прокатке шаров диаметром 60 мм и ниже (а) и диаметром более 60 мм (б)

Fig. 1. Technological schemes for production of grinding balls from the rejects of rail steels when rolling balls with a diameter of 60 mm and below (a) and a diameter of more than 60 mm (b)

структуры и химического состава сталей [15]. При этом тематика, связанная с переработкой отбраковки заготовок рельсовых сталей в мелющие шары, в настоящее время отечественными исследователями практически не разрабатывается; фактически имеются единичные публикации в данном научном направлении [16].

Таким образом, исследования влияния параметров деформации на качество сортовых заготовок и мелющих шаров, производимых из отбраковки рельсовых сталей, являются на сегодняшний день актуальным и перспективным научным направлением.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования влияния параметров деформации на образование дефектов проката, производимого из отбраковки непрерывно литых заготовок рельсовой стали, проводили методом математического моделирования с использованием программного комплекса DEFORM-2D. Принцип работы указанного программного комплекса основан на использовании метода конечных элементов [17 – 19].

В качестве параметра, характеризующего вероятность образования дефектов при прокатке, использовали критерий Кокрофта-Лэтэма [20]:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

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

Критерий Кокрофта-Лэтэма по своей сути является аналогом известного показателя «степень использования запаса пластичности»:

$$\psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p} = \frac{\Lambda}{\int_0^{t_p} H d\tau}, \quad (2)$$

где Λ – накопленная степень деформации сдвига; Λ_p – предельная степень деформации сдвига до разрушения; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; t_p – время разрушения.

Поскольку распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската имеет неравномерный характер, то в качестве параметра, характеризующего вероятность образования дефектов при прокатке, приняли максимальное значение этого критерия. При построении конечно-элементной сетки количество элементов составило 180 845, узлов – 40 089.

В качестве объектов моделирования использовали режимы прокатки сортовых заготовок (табл. 1) и мелющих шаров диаметром 60 мм, принятые на ОАО «Гурьевский металлургический завод» (ОАО «ГМЗ») при

перекате отбраковки непрерывно литых заготовок рельсовой стали марки К76Ф.

При проведении моделирования использовали ранее полученные экспериментальные зависимости сопротивления пластической деформации рассматриваемой стали от термомеханических параметров прокатки (температура, скорость и степень деформации) [21] и закономерности изменения сопротивления пластической деформации по сечению исходных заготовок [22], что позволило повысить точность получаемых результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам моделирования установлено, что при прокатке сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската носит неравномерный характер. Наибольшие значения критерия Кокрофта-Лэтэма имеют место на участках приповерхностных зон раската, расположенных вблизи вертикальных осей калибров (рис. 2). При этом наблюдается нелинейное повышение средних и максимальных по сечению значений критерия Кокрофта-Лэтэма по мере прокатки.

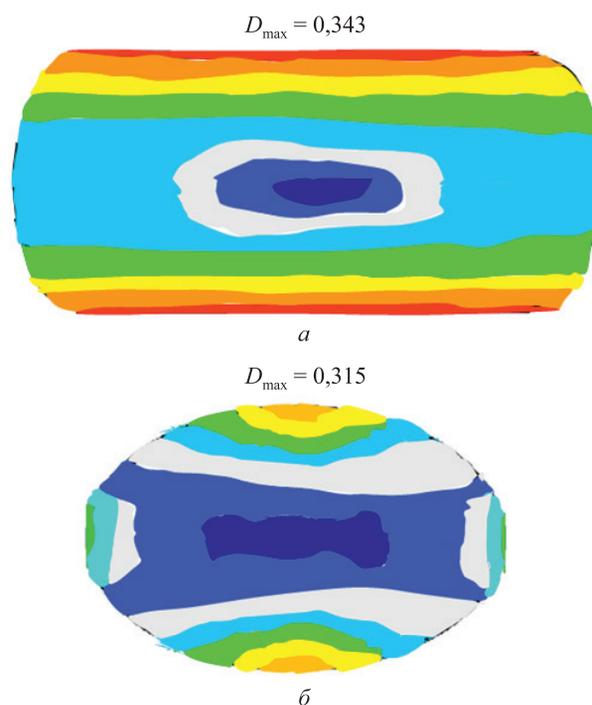


Рис. 2. Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската при производстве сортовых заготовок диаметром 60 мм из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф (табл. 1):
 а – второй проход в клету 1 (стан 500);
 б – проход в клету 3 (стан 500)

Fig. 2. Distribution of the Cockcroft-Leithem criterion by cross section of the rolls in production of billets with a diameter of 60 mm from the rejects of K76F rail steel (Table 1):
 a – second passage in the stand 1 (of the mill 500);
 b – passage in the stand 3 (of the mill 500)

Режим прокатки заготовок диаметром 60 мм на ОАО «ГМЗ» (базовый)

Table 1. Rolling mode of billets with a diameter of 60 mm at JSC “GMP” (basic)

Клеть	Номер прохода	Форма калибра	Сечение раската, мм		Обжатие, мм
			высота	ширина	
заготовка			150	150	
Обжимная клеть 700	1	ящичный	136	154	14
	2	ящичный	114	160	22
	кантовка на 90°				
	3	ящичный	117	134	43
	4	ящичный	95	138	22
	кантовка на 90°				
	5	ящичный	98	104	40
Клеть 1 (стан 500)	1	ящичный	70	116,6	34
	2	ящичный	54	124	16
	кантовка на 90°				
	3	ребровой овал	85	77	44
кантовка на 90°					
Клеть 2 (стан 500)	1	овал	61	98	16
	кантовка на 90°				
	2	ребровой овал	70	66	28
кантовка на 90°					
Клеть 3 (стан 500)	1	овал	54	84	12
кантовка на 90°					
Клеть 4 (стан 500)	1	круг	59,8	59,8	24,2

На основании обработки данных с использованием регрессионного и дисперсионного анализов установлено, что на максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската значимое влияние оказывают коэффициент вытяжки (обжатие), наличие кантовок и температура прокатки (в интервале 900 – 1150 °С). Повышение коэффициента вытяжки, дополнительные кантовки раската и увеличение температуры прокатки обуславливают снижение максимальных значений указанного критерия по сечению раската, что уменьшает вероятность образования дефектов в процессе прокатки.

Характер влияния коэффициента вытяжки на критерий Кокрофта-Лэтэма обусловлен тем, что увеличение интенсивности обжатий 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. Влияние

температуры прокатки на критерий Кокрофта-Лэтэма обусловлен повышением пластичности рельсовой стали при увеличении температуры ее деформации.

Полученные уравнения регрессии, характеризующие влияние параметров прокатки на максимальное по сечению раската значение критерия Кокрофта-Лэтэма, имеют вид:

– при отсутствии предварительной кантовки раската:

$$D_{\max} = 3,986 \cdot 1,012^n e^{-0,0015t} (-0,0523\lambda + 0,5183); \quad (3)$$

– с предварительной кантовкой раската:

$$D_{\max} = 7,521 \cdot 1,012^n e^{-0,0017t} (-0,0283\lambda + 0,2942), \quad (4)$$

где λ – коэффициент вытяжки; n – номер прохода от начала прокатки (с учетом всех проходов); t – температура прокатки, °С.

По полученным результатам эффективными направлениями повышения качества сортовых заготовок, прокатываемых из отбраковки непрерывно литых заготовок рельсовых сталей, являются:

– интенсификация режима прокатки (повышение частных коэффициентов вытяжек при общем снижении количества пропусков);

– повышение частоты кантовок раската в процессе прокатки;

– повышение температуры деформации.

Следует отметить, что техническая возможность и целесообразность реализации на практике перечисленных направлений совершенствования режимов прокатки определяется исходя из условий конкретного прокатного стана. В частности, проведенный для условий сортопрокатного стана ОАО «ГМЗ» анализ показал отсутствие резерва для интенсификации режимов прокатки заготовок из рельсовых сталей. Также показана нецелесообразность повышения температуры прокатки, так как в проходах с наибольшими обжатиями температура прокатки (табл. 1) практически соответствует температуре максимальной пластичности рассматриваемой рельсовой стали (1100 – 1150 °С).

Моделирование НДС металла при прокатке шаров диаметром 60 мм проводили в температурном интервале деформации 900 – 1250 °С. Выбор нижней границы рассматриваемого интервала обусловлен фактической температурой начала прокатки шаров (900 – 980 °С). По полученным результатам максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма имеет место в зоне под ребордой (рис. 3), что обусловлено особенностями процесса поперечно-винтовой прокатки. При разделении шаров в указанной зоне критерий Кокрофта-Лэтэма повышается до разрыва перемычки, достигая единицы. Таким образом, вероятность образования дефектов при прокатке шаров более правомерно определять с использованием максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма вне зоны воздействия реборд.

Согласно полученным данным (рис. 4) повышение температуры деформации в рассматриваемом температурном интервале обуславливает значимое снижение максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма в осевой зоне шаров, что согласуется с результатами других исследований [23, 24] влияния температуры деформации на образование дефектов в центральной зоне шаров при поперечно-винтовой прокатке.

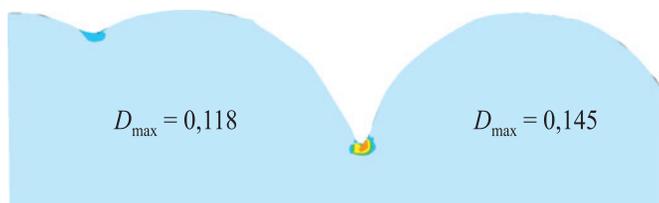


Рис. 3. Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению шаров при их прокатке из отбраковки рельсовой стали К76Ф

Fig. 3. Distribution of the Cockcroft-Latham criterion by cross-section of the balls during their rolling from the rejects of K76F rail steel

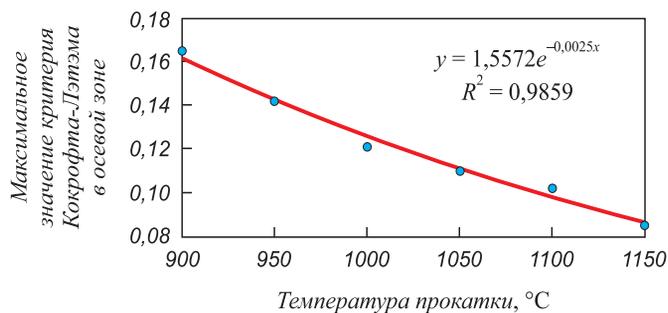


Рис. 4. Влияние температуры прокатки мелющих шаров из стали К76Ф на максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма в их осевой зоне

Fig. 4. Influence of rolling temperature of K76F steel grinding balls on the maximum value of the Cockcroft-Leithem criterion in their axial zone

С целью подтверждения полученных данных с использованием стандартной методики регрессионного анализа изучено влияние температуры прокатки мелющих шаров на их ударную стойкость в условиях шаропркатного стана ОАО «Гурьевский металлургический завод». Установлено, что повышение температуры прокатки мелющих шаров в фактическом интервале ее изменения (900 – 980 °С) обуславливает снижение отбраковки шаров по результатам копровых испытаний, то есть повышает их ударную стойкость:

$$B_{\text{копр}} = 17,9 - 0,015[t]; \quad (5)$$

здесь $B_{\text{копр}}$ – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний, %; t – температура начала прокатки шаров, °С.

Ранее полученные результаты свидетельствуют о максимальной пластичности рельсовой стали марки К76Ф при температурах деформации 1100 – 1150 °С [15]. Однако проведенный анализ показал, что увеличение температуры прокатки до 1100 – 1150 °С приведет к значительному снижению производительности прокатного стана, поскольку увеличится длительность остывания шаров на конвейере до достижения необходимой температуры закалки (780 – 860 °С). При этом, согласно полученным расчетным данным (рис. 5), зависимость производительности стана от температуры прокатки шаров является нелинейной, что обусловлено одновременным влиянием температуры прокатки на такты работы участков нагрева заготовок и термообработки шаров. Так, повышение температуры прокатки на каждые 10 °С в интервале 900 – 1030 °С обуславливает снижение производительности шаропркатного стана на величину порядка 1,0 – 1,2 %, а дальнейшее повышение температуры в интервале 900 – 1030 °С на каждые 10 °С приводит к уменьшению производительности стана на 2,2 – 2,5 %.

На основании вышеуказанных результатов исследования и расчетных данных разработан новый режим

Влияние температуры прокатки шаров из рельсовой стали К76Ф на их ударную стойкость

Table 2. Influence of rolling temperature of K76F rail steel balls on their impact resistance

Температурный режим прокатки	Доля шаров, выдержавших 75 ударов, %	Доля шаров, не выдержавших испытания, % (количество ударов до разрушения)	Доля шаров с внутренними трещинами после прокатки (до закалки), %
Базовый (температура прокатки 980 °С)	86	14 (12 – 29)	12
Новый (температура прокатки 1030 °С)	100	0	0

Влияние температуры прокатки шаров из рельсовой стали К76Ф на микроструктуру и твердость после термообработки

Table 3. Influence of rolling temperature of K76F rail steel balls on microstructure and hardness after heat treatment

Температурный режим прокатки	Балл зерна по ГОСТ 5639 – 82		Поверхностная твердость, HRC
	максимальный	средний	
Базовый (температура прокатки 980 °С)	6	6,3	56
Новый (температура прокатки 1030 °С)	5	5,2	56

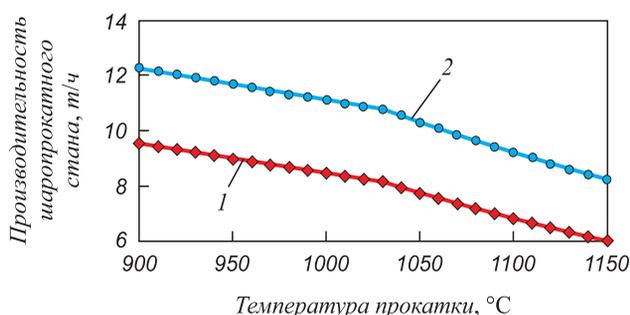


Рис. 5. Влияние температуры прокатки шаров из стали К76Ф на производительность шаропрокатного стана при температуре закалки 780 (1) и 860 °С (2)

Fig. 5. Influence of the rolling temperature of K76F steel balls on performance of a ball rolling mill at quenching temperature of 780 (1) and 860 °C (2)

прокатки мелющих шаров, отличающийся повышенной до 1030 °С температурой деформации. Опытнo-промышленное опробование нового температурного режима прокатки показало повышение ударной стойкости мелющих шаров при его использовании за счет снижения трещинообразования в процессе деформации (табл. 2).

При этом повышение температуры прокатки не привело к значимому увеличению размера зерна и снижению твердости шаров после термообработки (табл. 3).

Выводы

На основании математического моделирования процессов прокатки промежуточных сортовых заготовок и мелющих шаров из отбраковки непрерывно литых заготовок рельсовой стали в программном комплексе DEFORM-2D установлены закономерности влияния параметров деформации на вероятность образования дефектов при прокатке, определяемую максимальным значением критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската. Применительно к производству сортовых заготовок определено значимое влияние увеличения частных обжатий, повышения частоты кантовок и увеличения температуры прокатки на снижение вероятности образования дефектов при прокатке. Для условий прокатки мелющих шаров на стане поперечно-винтовой прокатки установлено влияние повышения температуры прокатки на уменьшение трещинообразования в процессе деформации.

С использованием полученных результатов моделирования разработан новый температурный режим прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф, опытнo-промышленное опробование которого в условиях ОАО «Гурьевский металлургический завод» показало увеличение ударной стойкости производимых шаров при их стабильно высокой поверхностной твердости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы // Литье и металлургия. 2009. № 4 (53). С. 26–33.

1. Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. Perspective. *Lit'e i metallurgiya*. 2009, no. 4 (53), pp. 26–33. (In Russ.).

2. Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // Уголь. 2017. № 12. С. 49–52.
<https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
3. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills – A review // Minerals Engineering. 2013. Vol. 49. P. 77–91.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
4. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 9-10. P. 363–367. <https://doi.org/10.1023/A:1017920006038>
5. Перетятко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. Т. 56. № 4. С. 27–30.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-4-27-30>
6. Найзабеков А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4 (46). С. 78–86.
7. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2000. № 9. С. 89–91.
8. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill // Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals. 2017. Vol. 42. No. 5. P. 193–196. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
9. Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ” // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 5. P. 325–329.
<https://doi.org/10.3103/S0967091217050072>
10. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters // Inzynieria Mineralna. 2015. Vol. 16. No. 1. P. 197–203.
11. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. No. 1-4. P. 893–901.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
12. 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>
13. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails // Procedia Manufacturing. 2017. No. 11. P. 466–473.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.137>
14. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорوفеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 32–38.
15. Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В. Разработка технологии производства мелющих тел с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки рельсовых сталей // Черные металлы. 2021. Т. 2021. № 5. С. 57–62.
<https://doi.org/10.17580/chm.2021.05.10>
16. 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.
17. Харламов А.А., Лагаев А.П., Галкин В.В., Уланов П.В. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса «DEFORM» // САПР и графика. 2005. № 5. С. 2–4.
18. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 2006. 464 с.
19. Kobayashi S., Oh S.-Ik, Altan T. Metal Forming and the Finite-Element Method. Oxford: Oxford University Press, 1989. 333 p.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780195044027.001.0001>
2. Rakhutin M.G., Boyko P.F. Ways to improve assessment methods of the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017, no. 12, pp. 49–52. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
3. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills – A review. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 49, pp. 77–91.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
4. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills. *Metallurgist*. 2001, vol. 45, no. 9-10, pp. 363–367. <https://doi.org/10.1023/A:1017920006038>
5. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibrating roll of the ball-rolling mills. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-4-27-30>
6. Naizabekov A.B., Mukhametkaliyev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reducing the consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016, no. 4 (46), pp. 78–86. (In Russ.).
7. Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000, no. 9, pp. 89–91. (In Russ.).
8. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*. 2017, vol. 42, no. 5, pp. 193–196. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
9. Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ”. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 5, pp. 325–329.
<https://doi.org/10.3103/S0967091217050072>
10. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015, vol. 16, no. 1, pp. 197–203.
11. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 893–901.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
12. 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>
13. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails. *Procedia Manufacturing*. 2017, no. 11, pp. 466–473.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.137>
14. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of a universal rail-rolling mill and mastering the technology of rail production on modern equipment in the rail-rolling workshop of JSC EVRAZ ZSMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014, no. 6 (1374), pp. 32–38. (In Russ.).
15. Umanskiy A.A., Simachev A.S., Dumova L.V. Development of technology for production of grinding bodies with improved performance properties from the rail steels rejection. *Chernye metally*. 2021, vol. 2021, no. 5, pp. 57–62. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2021.05.10>
16. 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.).
17. Kharlamov A.A., Lataev A.P., Galkin V.V., Ulanov P.V. Modeling of metal forming with “DEFORM” complex. *SAPR i grafika*. 2005, no. 5, pp. 2–4. (In Russ.).
18. Oden J.T. *Finite Elements of Nonlinear Continua*. Dover Publications, 2006, 464 p.
19. Kobayashi S., Oh S.-Ik, Altan T. *Metal Forming and the Finite-Element Method*. Oxford: Oxford University Press, 1989, 333 p.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780195044027.001.0001>

20. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and workability of metals // *Journal of the Institute of Metals*. 1968. Vol. 96. P. 33–39.
21. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянец М.В., Дорофеев В.В. Экспериментальные исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей // *Черные металлы*. 2019. Т. 2019. № 6. С. 24–28.
22. 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.
23. Губанова Н.В., Карелин Ф.Р., Чопоров В.Ф., Юсупов В.С. Исследование процесса прокатки в геликоидальных валках методом математического моделирования в программе DEFORM 3D // *Металлы*. 2011. № 2. С. 24–30.
24. Филиппова М.В., Перетятко В.Н., Сметанин С.В. Усилия и напряжения при прокатке шара // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 8. С. 587–588. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-587-588>
20. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and workability of metals. *Journal of the Institute of Metals*. 1968, vol. 96, pp. 33–39.
21. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V., Dorofeev V.V. Experimental studies of plasticity and deformation resistance of chromium rail steels. *Chernye metalli*. 2019, vol. 2019, no. 6, pp. 24–28. (In Russ.).
22. Umanskii A.A., Temlyantsev M.V., Simachev A.S., Dumova L.V. Effect of macrostructure of continuously cast K76F rail steel billets on resistance to plastic deformation. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2020, no. 2, pp. 32–37. (In Russ.).
23. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the DEFORM 3D software package. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 3, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1134/S0036029511030074>
24. Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Stresses and strains during rolling of the ball. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 8, pp. 587–588. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-587-588>

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
E-mail: rector@sibsiu.ru

Артем Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и материаловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-9712-3757
E-mail: simachev_as@mail.ru

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

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-9712-3757
E-mail: simachev_as@mail.ru

Lyubov' V. Dumova, Senior Lecturer of the Chair "Management and Branch Economy", Siberian State Industrial University
E-mail: doumova@bk.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. А. Уманский – формирование структуры статьи, анализ и обобщение результатов моделирования процессов прокатки мелющих шаров, формулирование общих выводов по статье.

А. Б. Юрьев – научное руководство исследованиями, формирование целей и задач исследования.

А. С. Симачев – анализ и обобщение результатов опытно-промышленного опробования нового режима прокатки шаров в условиях ОАО «Гурьевский металлургический завод».

Л. В. Думова – проведение аналитического обзора по материалам исследования во вводной части статьи.

A. A. Umanskii – formation of the article structure, analysis and generalization of the results of modeling the processes of rolling grinding balls, formulation of general conclusions on the article.

A. B. Yur'ev – scientific guidance of the research, formation of the research goals and objectives.

A. S. Simachev – analysis and generalization of the results of pilot testing of a new mode of rolling balls in the conditions of JSC "Guryevskii Metallurgical Plant".

L. V. Dumova – conducting an analytical review based on the research materials in the article introduction.

Поступила в редакцию 19.04.2022
 После доработки 29.04.2022
 Принята к публикации 12.06.2022

Received 19.04.2022
 Revised 29.04.2022
 Accepted 12.06.2022