



Оригинальная статья

УДК 621.771.011

DOI 10.17073/0368-0797-2021-10-712-720



# ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В ЧЕРНОВЫХ КЛЕТЯХ УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА

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

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

**Аннотация.** Проведенными в условиях лабораторного прокатного стана экспериментальными исследованиями определены закономерности процессов течения металла и выкатываемости дефектов заготовок при деформации в черновых клетях универсального рельсобалочного стана. Применительно к ящичным калибрам, а также к калибрам типов «лежачая трапеция» и «трапеция» установлены значительная неравномерность коэффициентов вытяжки поверхностных слоев раската по длине и ширине, неравномерность вытяжки по сечению раската при прокатке. Показано, что в процессе деформации наибольшей вытяжке подвергаются поверхностные зоны, прилегающие к торцам раската, а зависимость неравномерности коэффициентов вытяжек по сечению раската от формы очага деформации имеет выраженный степенной характер. Установлено значимое влияние на выкатываемость поверхностных дефектов коэффициента вытяжки, а также расположения и пространственной ориентации дефектов заготовок, при этом показано, что геометрические размеры дефектов не оказывают значимого влияния на коэффициенты их выкатываемости. Согласно полученных данных наиболее интенсивно как по глубине, так и по ширине выкатываются продольные относительно направления прокатки дефекты, расположенные на ребрах раската, а наименее интенсивно – поперечные дефекты; при этом выкатываемость любых дефектов увеличивается при повышении коэффициента вытяжки. Определено, что вблизи боковых кромок раската происходит увеличение ширины (раскрытие) поперечных и наклонных относительно оси прокатки дефектов, также раскрытие дефектов имеет место на концевых участках раската применительно к продольным дефектам. Для внутренних дефектов установлено, что аналогично поверхностным дефектам увеличение коэффициента вытяжки при прокатке способствует повышению их выкатываемости, при этом коэффициент выкатываемости внутренних дефектов по абсолютной величине значительно ниже данного показателя для поверхностных дефектов. Определено, что минимальный коэффициент выкатываемости внутренних дефектов имеет место при их расположении в сердцевине образца, при этом коэффициент выкатываемости таких дефектов линейно увеличивается при движении к поверхности раската. Влияние расположения, пространственной ориентации и коэффициента вытяжки на выкатываемость поверхностных и внутренних дефектов обобщены в виде уравнений регрессии, что дает возможность их практического применения для прогнозирования качества готового металлопроката при изменении режимов прокатки.

**Ключевые слова:** трансформация дефектов заготовок, калибры прокатных валков, универсальный рельсобалочный стан, черновые клетки, течение металла при деформации

**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., 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>

Original article

## REGULARITIES OF METAL FLOW AND DEFECTS TRANSFORMATION DURING ROLLING IN ROUGHING STANDS OF A UNIVERSAL RAIL AND STRUCTURAL MILL

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

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

**Abstract.** Experimental studies carried out in the conditions of a laboratory rolling mill have determined the regularities of the processes of metal flow and roll-out defects of billets during deformation in roughing stands of a universal rail and structural mill. In relation to the box size and gauges types "lying trapeze" and "trapeze", we have determined a significant irregularity of drawing coefficients of the surface layers by roll length and width, as

well as the irregularity of drawing in the cross-section of the roll during rolling. It is shown that during deformation the surface zones adjacent to the ends of the roll are subjected to the greatest drawing, and dependence of irregularity of the drawing coefficients over the cross-section of the roll on the shape of the deformation zone has a distinct power-law character. We have established a significant effect of the drawing coefficient, as well as the location and spatial orientation of the billet defects, while the geometric dimensions of the defects don't have such influence on their roll-out coefficients. According to the obtained data, the defects located on the rolling edges are rolled out most intensively both in depth and width, and the transverse defects are rolled out the least intensively. At the same time, the rollability of any defects increases with the growth of drawing coefficient. It is determined that near the side edges of the roll there is an increase in the width (disclosure) of transverse and inclined defects relative to the rolling axis, as well as the disclosure of defects occurs at the end sections of the roll in relation to longitudinal defects. For internal defects, it was found that, similar to surface defects, an increase in the drawing coefficient during rolling contributes to an increase in their roll-out, while the roll-out coefficient of internal defects in absolute value is significantly lower than this indicator for surface defects. It was determined that the minimum roll-out coefficient of internal defects occurs when they are located in the core of the sample, while the roll-out coefficient of such defects increases linearly when moving towards the roll surface. The influence of the location, spatial orientation, and drawing coefficient on the rollability of surface and internal defects is generalized in the form of regression equations. It makes it possible to use them in practice to predict the quality of finished rolled metal when changing rolling modes.

**Keywords:** transformation of billet defects, rolling roll gauges, universal rail and structural mill, roughing stands, metal flow during deformation

**Funding:** The work 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., 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>

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований к режимам прокатки является обеспечение качества готовой продукции, соответствующей требованиям стандартов, в том числе по наличию поверхностных и внутренних дефектов. Во многих исследованиях показано, что применение оптимальных режимов прокатки позволяет не только свести к минимуму риск появления дефектов в процессе деформации, но и значительно повысить выкатываемость дефектов, имеющих на поверхности исходных заготовок [1 – 5] и улучшить завариваемость внутренних пор и пустот [6 – 16].

Анализ результатов этих исследований свидетельствует о значимом влиянии на выкатываемость дефектов заготовок широкого перечня параметров, а именно: суммарного коэффициента вытяжки (суммарного обжатия); типоразмеров систем калибров, используемых для прокатки; количества кантовок раската в процессе прокатки; расположения, пространственной ориентации, формы и размеров исходных дефектов. При этом полученные данные о характере и степени влияния перечисленных факторов на образование и выкатываемость дефектов зачастую носят противоречивый характер. Так, в работе [2] авторами делается вывод о повышении выкатываемости дефектов при использовании систем калибров, предполагающих чередование кантовок на 45 и 90°; в то же время авторами работы [3] рекомендуется для увеличения выкатываемости дефектов использовать систему калибров ромб – квадрат, в которой кантовка раската осуществляется на 90° после каждого прохода.

Следует отметить, что применительно к условиям прокатки рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах исследования в направлении повышения выкатываемости дефектов практически от-

сутствуют; имеется лишь незначительное количество исследований, проведенных в условиях рельсобалочных станов линейного типа [17 – 19].

Специфической особенностью режимов прокатки рельсов на рельсобалочных станах является тот факт, что, несмотря на сложную форму поперечного сечения готового профиля, значительное количество проходов на начальной стадии деформации проводится в калибрах простой формы (ящичных калибрах). Данный факт обусловлен значительными размерами поперечного сечения исходных заготовок, что, в свою очередь, связано с необходимостью глубокой проработки металла для улучшения внутренней структуры (рекомендованная суммарная вытяжка заготовки составляет не менее 9,5) [20]. Согласно типовой калибровке валков для производства железнодорожных рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах (рис. 1) в ящичных калибрах проводится шесть проходов из 15 [21 – 23]. При этом обжатия в таких калибрах имеют значительную величину. После окончания прокатки в ящичных калибрах дальнейшая деформация осуществляется в калибрах типа «трапеция» и «лежачая трапеция», являющихся, по сути, переходными к рельсовым калибрам [24]. В таких калибрах проводится порядка трех проходов и для них также характерны значительные обжатия. Далее прокатку проводят в рельсовых калибрах черновых клетей (три прохода) и раскат передается в непрерывную группу универсальных клетей (стан «тандем»), в которой за три прохода происходит окончательное формирование готового профиля [25, 26]. При этом в рельсовых калибрах черновых клетей и универсальных калибрах стана «тандем» обжатия значительно ниже по сравнению с прокаткой в калибрах простой формы. Указанная особенность режимов прокатки рельсовых профилей обуславливает целесообразность оптимизации режи-

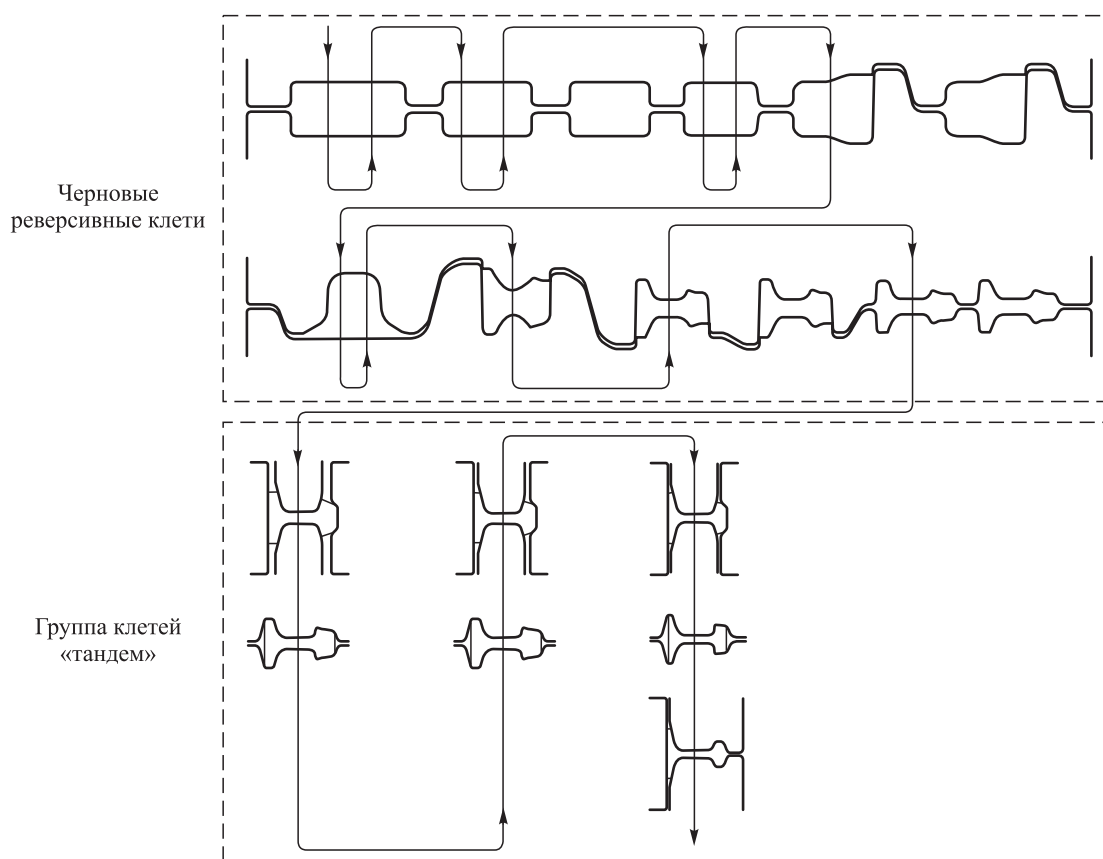


Рис. 1. Стандартная калибровка валков для прокатки железнодорожных рельсов на современном универсальном рельсобалочном стане

Fig. 1. Standard calibration of rolls for rolling railway rails on a modern universal rail and structural mill

мов обжатий в первых по ходу прокатки калибрах, что, в частности, подтверждено в работах [17 – 19].

Исследования процессов трансформации поверхностных и внутренних дефектов заготовок на начальной стадии прокатки рельсов являются актуальными.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования процессов течения металла и трансформации дефектов при прокатке в ящичных калибрах и калибрах типа «трапеция», «лежачая трапеция» проводили на лабораторном прокатном стане «Дуо-80» со специально подготовленным комплектом валков. В качестве объекта исследований использовали свинцовые образцы сечением 30×36 мм, размеры поперечного сечения которых в масштабе 1:10 соответствуют сечению непрерывнолитых заготовок, используемых для производства рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Использование свинца в качестве материала образцов обусловлено тем фактом, что его пластические свойства при комнатной температуре близки к пластическим свойствам стали при температурах горячей деформации. Следует отметить, что, хотя свинец (в отличие от стали) не является многокомпонентным сплавом, его использование для определения общих законо-

мерностей течения металла при прокатке, в том числе закономерностей трансформации дефектов, позволяет получить результаты, адекватные реальным условиям производства стальных прокатных профилей на действующих станах, что подтверждается данными многочисленных исследований [2, 4].

Для исследования закономерностей течения металла использовали образцы, которые разрезали вдоль продольной оси на равные части, наносили на грани координатную сетку с шагом 5 и 2 мм и затем скрепляли полученные части с использованием сплава Вуда.

С целью определения закономерностей трансформации поверхностных дефектов в процессе прокатки использовали образцы с предварительно нанесенными дефектами в виде трещин глубиной 1,0 и 1,5 мм и шириной 0,5 и 1,0 мм, ориентированных в разном направлении относительно оси прокатки (продольном, поперечном, с углом наклона 15, 30 и 45° относительно оси прокатки) и расположенных на различном расстоянии от ребер и торцов раската. Исследование закономерностей формоизменения внутренних дефектов проводили на образцах с предварительно высверленными отверстиями диам. 1,0 и 1,5 мм, ориентированными вдоль оси прокатки и расположенными на различном расстоянии от поверхности и боковых граней образца.

Опытную прокатку образцов проводили в трех ящичных калибрах, калибрах типа «трапеция» и «лежащая трапеция», размеры которых в масштабе 1:10 моделировали размеры калибров черновых клетей универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При этом обжатия варьировали, исходя из получения степени относительной деформации в интервале 0,05 – 0,25. Указанный интервал охватывает с незначительным запасом фактическое изменение относительной деформации при прокатке в данных калибрах (0,07 – 0,21) на промышленных универсальных рельсобалочных станах.

Выбранная схема эксперимента позволила определить закономерности влияния на трансформацию дефектов в процессе прокатки следующих параметров: место расположения дефектов (расстояние от ребер и концевых участков заготовки для поверхностных дефектов, расстояние от поверхности, боковых граней для внутренних дефектов), размеры дефектов, ориентация дефектов относительно оси прокатки (для поверхностных дефектов), коэффициент вытяжки.

Для оценки выкатываемости поверхностных дефектов ввели соответствующие коэффициенты, определяемые отношением размеров дефектов до и после деформации:

$$K_H = \frac{H_0}{H_1}; \quad (1)$$

$$K_B = \frac{B_0}{B_1}, \quad (2)$$

где  $H_0$ ,  $H_1$  и  $B_0$ ,  $B_1$  – глубина и ширина дефектов до и после прокатки.

Выкатываемость внутренних дефектов оценивали по изменению их площади в процессе деформации:

$$K_{\text{вн}} = \frac{S_{\text{д}(0)}}{S_{\text{д}(1)}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{д}(0)}$  и  $S_{\text{д}(1)}$  – площадь дефектов до и после прокатки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований закономерностей течения металла в ящичных калибрах, проведенных методом нанесения координатной сетки, установлено, что коэффициент вытяжки поверхностных слоев раската, контактирующих с валками при прокатке, по длине и ширине образцов имеет выраженный неравномерный характер (рис. 2, а). Наибольшей вытяжке подвергаются зоны, прилегающие к торцам раската. При этом заметно большая вытяжка характерна для участка, прилегающего к заднему относительно направления прокатки торцу раската.

Полученные данные о неравномерности коэффициента вытяжки по длине поверхностных слоев раската

объясняются следующим образом. Концевые участки поверхности, прилегающие к торцам раската, подвергаются большей вытяжке в процессе прокатки по причине отсутствия внешних зон. При этом коэффициент

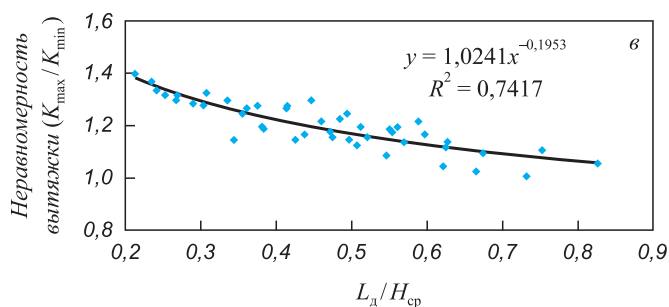
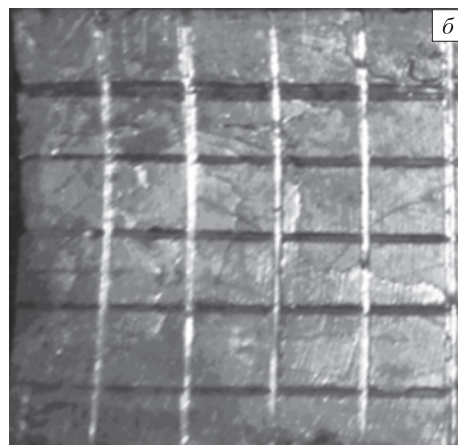
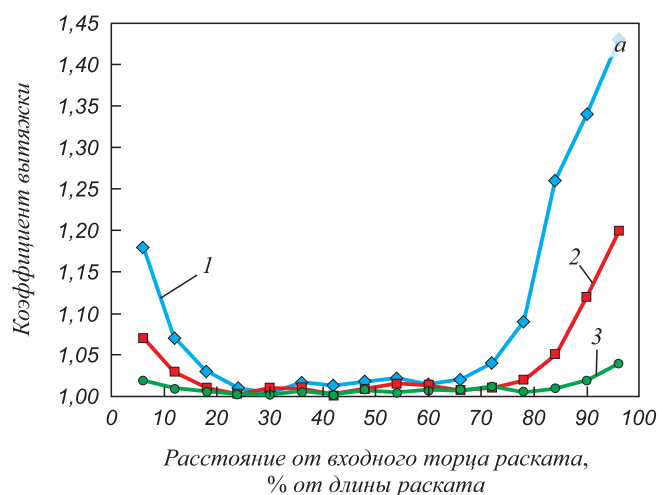


Рис. 2. Закономерности течения металла при прокатке в ящичных калибрах черновых клетей универсального рельсобалочного стана: а – распределение коэффициента вытяжки в объеме раската; б – форма торца раската после деформации; в – зависимость неравномерности коэффициента вытяжки по сечению раската от формы очага деформации; 1 и 2 – поверхностный слой, центр и боковые кромки; 3 – осевой слой

Fig. 2. Regularities of metal flow during rolling in the box gauges of roughing stands of universal rail and structural mill: а – distribution of drawing coefficient in the roll volume of the; б – shape of the roll end after deformation; в – dependence of drawing coefficient irregularity along the roll cross-section on shape of deformation focus; 1 and 2 – surface layer of the center and edges; 3 – axial layer



вытяжки участка, прилегающего к заднему концу раската, выше коэффициента вытяжки участка вблизи переднего торца раската из-за различия скоростей течения металла в зонах отставания и опережения.

Следует отметить, что длина участков, на которых имеет место наиболее высокая продольная вытяжка поверхностных слоев раската, составляет порядка 15 % от длины образца после прокатки. При этом на данных участках раската больший коэффициент вытяжки характерен для центральной части образцов по сравнению с боковыми кромками и вытяжки распределены симметрично относительно вертикальной оси калибра. Выявленная неравномерность распределения продольной вытяжки по ширине поверхностного слоя раската объясняется тем, что вблизи боковых кромок часть металла идет на уширение, так как металлу с энергетической точки зрения предпочтительнее течь в поперечном, чем в продольном направлении.

Установлено, что коэффициент вытяжки поверхностных слоев раската значительно превышает коэффициент вытяжки осевых слоев, в результате чего торец раската после деформации приобретает форму, заметно отличную от плоской (рис. 2, б). При этом распределение коэффициента вытяжки по сечению раската в значительной степени определяется формой очага деформации (отношением  $L_d/h_{cp}$  длины  $L_d$  дуги захвата к средней высоте  $h_{cp}$  полосы до и после прокатки) (рис. 2, в). Зависимость неравномерности коэффициента вытяжки от формы очага деформации имеет выраженный степенной характер.

Полученные результаты объясняются изменением степени деформации различных слоев раската в зависимости от соотношения продольно-вертикальных размеров очага деформации (формы очага деформации). Глубина проникновения деформации и ее относительные значения в осевой зоне возрастают с увеличением соотношения  $L_d/h_{cp}$ . При  $L_d/h_{cp} < 0,3$  осевая зона не

подвергается пластической деформации (имеет место только упругая деформация), в результате чего вытяжка в продольном направлении в осевой зоне после прокатки практически отсутствует. В случае, когда значение  $L_d/h_{cp}$  находится в пределах 0,3 – 0,5, осевые слои металла подвергаются принудительному пластическому растяжению (вытяжке), хотя деформация в этом случае не является сквозной; в результате осевые слои получают значительно меньшую вытяжку по сравнению с поверхностными слоями раската. При  $L_d/h_{cp} = 0,5 \div 1,5$  деформация проникает на всю глубину раската, но при этом вытяжка поверхностных слоев по-прежнему происходит интенсивнее относительно осевой зоны раската. Равенство вытяжки осевого и поверхностного слоев раската наблюдается при  $L_d/h_{cp} = 1,5$ ; при дальнейшем увеличении значения данного параметра осевые слои начинают деформироваться интенсивнее поверхностных.

При проведении экспериментальных исследований значения  $L_d/h_{cp}$  находились в пределах 0,21 – 0,83, что обуславливает превышение вытяжки поверхностного слоя раската относительно осевого слоя во всем рассматриваемом диапазоне изменения соотношения продольно-вертикальных размеров очага деформации.

Закономерности течения металла при прокатке в калибре типа «лежачая трапеция» в целом аналогичны вышеприведенным данным для ящичных калибров за исключением распределения коэффициента вытяжки по поверхностям граней, приконтактных с вальками. Указанный факт обусловлен несимметричной формой данного калибра относительно вертикальной оси, в отличие от предыдущего по ходу прокатки ящичного калибра, и соответствующей неравномерностью деформаций (обжатий) по ширине раската. По полученным данным (рис. 3, а) при прокатке в калибре типа «лежачая трапеция» коэффициент вытяжки поверхностных слоев в зоне калибра, соответствующей будущей подошве профиля (правая часть калибра, рис. 1), значи-

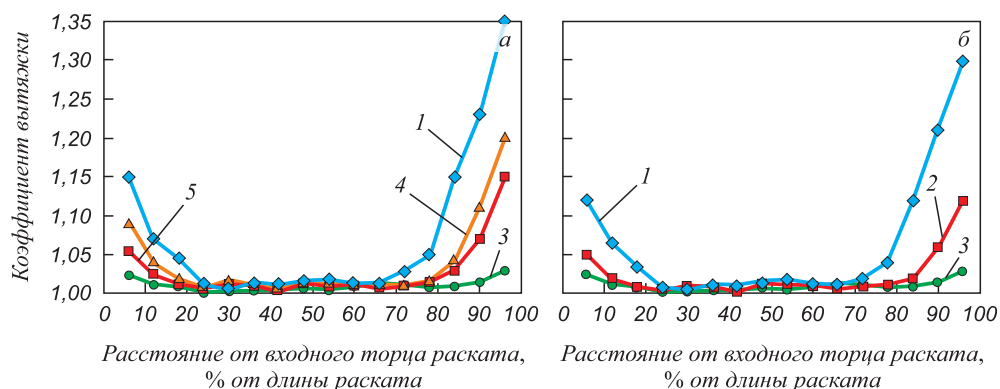


Рис. 3. Распределение коэффициента вытяжки в объеме раската при прокатке в калибрах «лежачая трапеция» (а) и «трапеция» (б) черновых клетей универсального рельсобалочного стана:

1 – поверхностный слой, центр; 2, 4 и 5 – поверхностный слой, боковые кромки, подошва и головка; 3 – осевой слой

Fig. 3. Distribution of drawing coefficient in roll volume during rolling in the “lying trapeze” (a) “trapeze” (b) gauges of roughing stands of universal rail and structural mill:

1 – surface layer, center; 2, 4 and 5 – surface layer, side edges, sole and head; 3 – axial layer

тельно ниже по сравнению с коэффициентом вытяжки в месте формирования будущей головки профиля (левая часть калибра, рис. 1).

При прокатке в калибре типа «трапеция» неравномерность коэффициента вытяжки поверхностных слоев раската по ширине контактных граней не наблюдается (рис. 3, б), что объясняется симметричной формой калибра относительно вертикальной оси и симметричной формой задаваемого в калибр исходного подката.

Исследованиями выкатываемости поверхностных дефектов установлено, что применительно к условиям прокатки во всех типах исследуемых калибров интенсивность уменьшения размеров дефектов значимо определяется их расположением и пространственной ориентацией.

По полученным данным во всех исследуемых калибрах наиболее интенсивно выкатываются продольные дефекты, а наименьшая интенсивность характерна для поперечных относительно оси прокатки дефектов (рис. 4, а, б), что особенно сильно проявляется в отношении изменения их ширины (рис. 4, б). Данный факт объясняется тем, что при прокатке в калибрах в условиях стесненного уширения вытяжка в продольном направлении по абсолютной величине значительно превышает увеличение размеров раската в поперечном направлении. Подтверждением приведенному тезису является раскрытие поперечных и наклонных дефектов вблизи боковых

кромки раската (рис. 4, в). Дефекты, расположенные под углом относительно оси прокатки, по интенсивности выкатываемости занимают промежуточное положение между продольными и поперечными дефектами. При этом различие их коэффициентов выкатываемости незначительно в количественном выражении.

Также установлено, что коэффициент выкатываемости по глубине продольных дефектов, расположенных на ребрах раската, выше в 1,04 – 1,09 раза, чем у дефектов, расположенных по центру грани, контактирующей с валками при прокатке (рис. 4, а), что согласуется с результатами исследований авторов, ранее проведенных в лабораторных условиях [27] и в условиях действующего прокатного стана [28, 29], и объясняется формированием наименее благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в приповерхностной зоне раскатов, расположенной вблизи вертикальной оси калибра [30]. При этом зависимость выкатываемости дефектов от их расстояния до вертикальной оси не установлена, что обусловлено значительной шириной указанной зоны с неблагоприятной схемой НДС. Фактически указанная зона охватывает порядка 70 % от ширины дна ящичных калибров [30], в результате чего более благоприятные условия для выкатываемости дефектов создаются только в непосредственной близости от боковых граней калибра. Касательно коэффициента выкатываемости де-

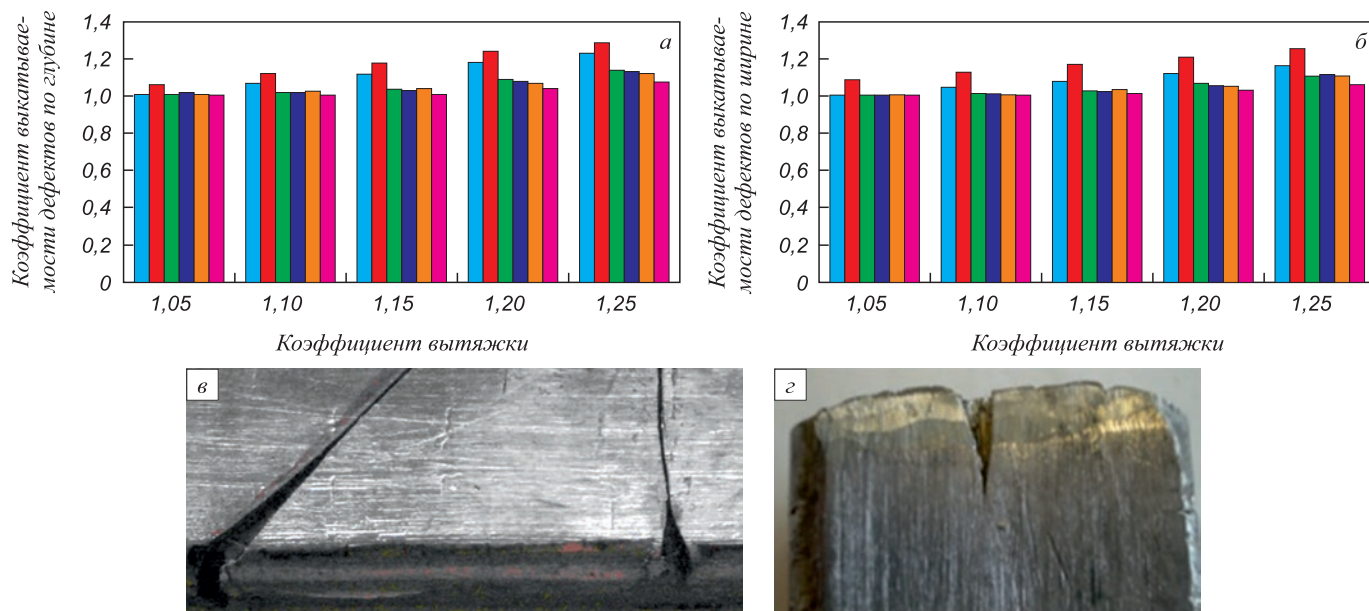


Рис. 4. Закономерности выкатываемости поверхностных дефектов заготовок в ящичных калибрах и калибрах типов «трапеция», «лежачая трапеция» черновых клетей универсального рельсобалочного стана:

а, б – коэффициенты выкатываемости дефектов по глубине и ширине; в – раскрытие наклонных и поперечных дефектов вблизи боковой кромки раската после прокатки; з – раскрытие продольного дефекта вблизи торца раската после прокатки;

продольные дефекты центр (■) и боковые кромки (■); наклонные дефекты 15 (■), 30 (■) и 45° (■); ■ – поперечные дефекты

Fig. 4. Regularities of rolling out of billets surface defects in box gauges and gauges of “trapeze”, “lying trapeze” types of roughing stands of universal rail and structural mill:

а, б – coefficients of rolling out defects in depth and width; в – disclosure of inclined and transverse defects near the roll lateral edge after rolling; з – disclosure of a longitudinal defect near the roll end after rolling; longitudinal defects (center (■) and side edges (■)); inclined defects 15 (■), 30 (■) and 45° (■); ■ – transverse defects

фектов по ширине установлено, что данный показатель для продольных дефектов, расположенных по центру контактной грани раската и на его ребрах, значимо не отличается (рис. 4, б). Следует отметить, что на концевых участках раската происходит раскрытие дефектов (увеличение их ширины). Очевидно, это обусловлено отсутствием внешних зон при прокатке (рис. 4, г).

Установлено, что увеличение коэффициента вытяжки при прокатке повышает выкатываемость поверхностных дефектов независимо от их расположения и пространственной ориентации за исключением дефектов, выходящих на торцы раската или боковые кромки (когда наблюдается раскрытие дефектов). При этом влияние степени деформации на выкатываемость имеет линейный характер.

Анализ полученных данных свидетельствует, что исходная глубина и ширина поверхностных дефектов в рассматриваемом диапазоне изменения (глубина 1,0–1,5 мм, ширина 0,5–1,0 мм) не оказывают значимого влияния на их коэффициент выкатываемости. Данный факт обусловлен тем, что глубина проникновения деформации даже при минимальных значениях параметра  $L_d/h_{cp}$  значительно превышает глубину дефектов: результаты моделирования, представленные выше, свидетельствуют, что глубина проникновения деформации составляет порядка 30 % от высоты образца до прокатки.

На основании обработки экспериментальных результатов получены уравнения множественной регрессии, устанавливающие взаимосвязь между коэффициентом вытяжки при прокатке в ящичных калибрах (при коэффициенте вытяжки не менее 1,05) и коэффициентом выкатываемости поверхностных дефектов различного расположения и пространственной ориентации:

– продольные дефекты в центральной части грани раската:

$$K_H = 1,102\lambda - 0,143; K_B = 0,781\lambda + 0,189; \quad (3)$$

– продольные дефекты вблизи боковых кромок раската:

$$K_H = 1,161\lambda - 0,156; K_B = 0,839\lambda + 0,206; \quad (4)$$

– дефекты, расположенные под углом 15–45° к направлению прокатки:

$$K_H = 0,589\lambda + 0,388; K_B = 0,516\lambda + 0,461; \quad (5)$$

– дефекты, перпендикулярные направлению прокатки (поперечные дефекты):

$$K_H = 0,371\lambda + 0,613; K_B = 0,302\lambda + 0,685, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки.

Закономерности влияния коэффициента вытяжки при прокатке и исходных размеров внутренних дефек-

тов на их выкатываемость аналогичны вышеприведенным закономерностям для поверхностных дефектов: повышение коэффициента вытяжки способствует увеличению выкатываемости дефектов, а размер дефектов не оказывает значимого влияния. При изучении влияния места расположения внутренних дефектов на их выкатываемость установлено, что коэффициент выкатываемости линейно снижается при движении от поверхности к сердцевине образца (рис. 4), что обусловлено, как показано выше, неравномерной деформацией по сечению раската (приповерхностные слои деформируются интенсивнее по отношению к центральным слоям раската). Кроме этого следует отметить, что абсолютные величины выкатываемости внутренних дефектов заметно ниже по сравнению с показателями выкатываемости поверхностных дефектов, что также обусловлено неравномерной деформацией по сечению раската. Уравнение регрессии, отражающее взаимосвязь выкатываемости внутренних дефектов с их расположением и коэффициентом вытяжки (для коэффициента вытяжки не менее 1,05), имеет следующий вид:

$$K_{вн} = 0,329 + 0,703\lambda - 0,13 \frac{h_d}{h_0},$$

здесь  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;  $h_d$  – расстояние от поверхности до продольной оси дефекта, мм;  $h_0$  – высота полосы до деформации, мм.

## Выводы

Проведен комплекс экспериментальных лабораторных исследований процессов деформации на начальной стадии прокатки рельсов.

Имеет место значительная неравномерность коэффициента вытяжки поверхностных слоев раската по длине и ширине, а также неравномерность вытяжки по сечению раската: наибольшей вытяжке подвергаются поверхностные зоны, прилегающие к торцам раската, а зависимость неравномерности коэффициента вытяжки по сечению раската от формы очага деформации имеет выраженный степенной характер.

Коэффициент вытяжки по проходам, расположение и пространственная ориентация поверхностных дефектов оказывают значимое влияние на их выкатываемость: наиболее интенсивно как по глубине, так и по ширине выкатываются продольные дефекты, а наименее интенсивно – поперечные дефекты, при этом выкатываемость дефектов увеличивается при повышении коэффициента вытяжки вне зависимости от их пространственной ориентации и месторасположения.

Выкатываемость внутренних дефектов зависит от их расположения и снижается по мере удаления от поверхности, при этом повышение коэффициента вытяжки увеличивает выкатываемость дефектов вне зависимости от их расположения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Перетят'ко В.Н., Рогов Ю.Е., Журавлев Б.К., Нефедов В.М. Выработка поверхностных дефектов в ящичных калибрах // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 26–29.
2. Зильберг Ю.В., Миленин А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование формоизменения поверхностных впадин при прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 2. С. 27–29.
3. Зильберг Ю.В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке // Сталь. 1997. № 10. С. 44–46.
4. Егоров В.Д., Тимофеев В.В., Зудов Е.Г., Смирнов В.К., Павлов Б.Р. Выкатываемость дефектов при прокатке крупносортовой стали // Сталь. 1995. № 1. С. 32–34.
5. Щербakov В.И., Филиппов В.В., Тищенко В.А., Титов М.И. Выкатываемость дефектов при прокатке заготовок на стане 850 РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. 2001. № 4. С. 122–126.
6. Sobczak K., Dyja H., Kawalek A. The influence of the shape of grooves on the intensity of closing axial material discontinuities during rolling // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60. No. 1. P. 461–468. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0075>
7. Dyja H., Sobczak K., Kawalek A. The influence of the shape of grooves on the behavior of internal material discontinuities in continuous S355J2G3 steel strands during rolling // Metalurgija. 2014. Vol. 53. No. 4. P. 501–504.
8. Dyja H., Sobczak K., Kawalek A., Knapiński M. The analysis of the influence of varying types of shape grooves on the behaviour of internal material discontinuities during rolling // Metalurgija. 2013. Vol. 52. No. 1. P. 35–38.
9. Tripathy P.K., Das S., Jha M.K., Singh J.B., Kumar A.M., Das A.K. Migration of slab defects during hot rolling // Ironmaking and Steelmaking. 2006. Vol. 33. No. 6. P. 477–483. <https://doi.org/10.1179/174328106X118134>
10. Keife H., Ståhlberg U. Influence of pressure on the closure of voids during plastic deformation // Journal of Mechanical Working Technology. 1980. Vol. 4. No. 2. P. 133–143. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(80\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0378-3804(80)90031-5)
11. Sukumar N., Chopp D.L., Moës N., Belytschko T. Modeling holes and inclusions by level sets in the extended finite-element method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2001. Vol. 190. No. 46–47. P. 6183–6200. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00215-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00215-8)
12. Riedel U.T., Bleck W., Morgan J.E., Guild F.J., McMahon C.A. Finite element modelling of the effect of non-metallic inclusions in metal forming processes // Computational Materials Science. 1999. Vol. 16. No. 1–4. P. 32–38. [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(99)00043-9)
13. Banaszek G., Berski S., Dyja H., Kawalek A. Theoretical modelling of metallurgical defect closing-up processes during forming a forging // Journal of Iron and Steel Research International. 2013. Vol. 20. No. 9. P. 111–116. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60165-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60165-X)
14. Ståhlberg U., Keife H., Lundberg M., Melander A. A study of void closure during plastic deformation // Journal of Mechanical Working Technology. 1980. Vol. 4. No. 1. P. 51–63. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(80\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0378-3804(80)90005-4)
15. Banaszek G., Stefanik A., Berski S. Computer and laboratory modelling of the analysis of closing up of metallurgical defects ingots during free hot forging // Metalurgija. 2005. Vol. 44. No. 1. P. 25–29.
16. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Прокатка заготовки с одиночно расположенной в объеме порой // Заготовительное производство в машиностроении. 2009. № 11. С. 33–37.
17. Перетят'ко 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.
18. Юр'ев А.Б., Годик Л.А., Нугуманов Р.Ф., Козырев Н.А., Корнева Л.В. Изучение трансформации дефектов непрерывнолитой
1. Peretyat'ko V.N., Rogov Yu.E., Zhuravlev B.K., Nefedov V.M. The development of surface defects in box passes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 2, pp. 26–29. (In Russ.).
2. Zil'berg Yu.V., Milenin A.A. Theoretical and experimental study of the shape change of surface depressions during rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, no. 2, pp. 27–29. (In Russ.).
3. Zil'berg Yu.V. Study of the regularities of surface defects forming in the rolled stock. *Stal'*. 1997, no. 10, pp. 44–46. (In Russ.).
4. Egorov V.D., Timofeev V.V., Zudov E.G., Smirnov V.K., Pavlov B.R. Power of defect correction by rolling in heavy section production. *Stal'*. 1995, no. 1, pp. 32–34. (In Russ.).
5. Shcherbakov V.I., Filippov V.V., Tishchenko V.A., Titov M.I. Rolling out defects during rolling of castings at the mill 850 of Belorussian Metallurgical Plant. *Lit'e i metallurgiya*. 2001, no. 4, pp. 122–126. (In Russ.).
6. Sobczak K., Dyja H., Kawalek A. The influence of the shape of grooves on the intensity of closing axial material discontinuities during rolling. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, vol. 60, no. 1, pp. 461–468. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0075>
7. Dyja H., Sobczak K., Kawalek A. The influence of the shape of grooves on the behavior of internal material discontinuities in continuous S355J2G3 steel strands during rolling. *Metalurgija*. 2014, vol. 53, no. 4, pp. 501–504.
8. Dyja H., Sobczak K., Kawalek A., Knapiński M. The analysis of the influence of varying types of shape grooves on the behaviour of internal material discontinuities during rolling. *Metalurgija*. 2013, vol. 52, no. 1, pp. 35–38.
9. Tripathy P.K., Das S., Jha M.K., Singh J.B., Kumar A.M., Das A.K. Migration of slab defects during hot rolling. *Ironmaking and Steelmaking*. 2006, vol. 33, no. 6, pp. 477–483. <https://doi.org/10.1179/174328106X118134>
10. Keife H., Ståhlberg U. Influence of pressure on the closure of voids during plastic deformation. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1980, vol. 4, no. 2, pp. 133–143. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(80\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0378-3804(80)90031-5)
11. Sukumar N., Chopp D.L., Moës N., Belytschko T. Modeling holes and inclusions by level sets in the extended finite-element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2001, vol. 190, no. 46–47, pp. 6183–6200. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00215-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00215-8)
12. Riedel U.T., Bleck W., Morgan J.E., Guild F.J., McMahon C.A. Finite element modelling of the effect of non-metallic inclusions in metal forming processes. *Computational Materials Science*. 1999, vol. 16, no. 1–4, pp. 32–38. [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(99)00043-9)
13. Banaszek G., Berski S., Dyja H., Kawalek A. Theoretical modelling of metallurgical defect closing-up processes during forming a forging. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013, vol. 20, no. 9, pp. 111–116. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60165-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60165-X)
14. Ståhlberg U., Keife H., Lundberg M., Melander A. A study of void closure during plastic deformation. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1980, vol. 4, no. 1, pp. 51–63. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(80\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0378-3804(80)90005-4)
15. Banaszek G., Stefanik A., Berski S. Computer and laboratory modelling of the analysis of closing up of metallurgical defects ingots during free hot forging. *Metalurgija*. 2005, vol. 44, no. 1, pp. 25–29.
16. Loginov Yu.N., Eremeeva K.V. Rolling of a billet with a single pore located in the volume. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii*. 2009, no. 11, pp. 33–37. (In Russ.).
17. Peretyat'ko V.N., Litvin S.G., Pyataikin E.M. Effect of cutting on position of central porosity in R65 rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 4, pp. 36–38. (In Russ.).
18. Yur'ev A.B., Godik L.A., Nugumanov R.F., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Transformation of defects of a continuously cast bil-



- заготовки при производстве рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 2. С. 42–44.
19. Браунштейн Е.Р., Перетятко В.Н. Выработка поверхностных дефектов при прокатке рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 32–35.
  20. Поляков В.В., Великанов А.В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов. М.: Металлургия, 1990. 416 с.
  21. Toschi F., Lainati A., Mazzarano A. The production of railway rails in modern and efficient plants – The new ARBZ rail mill // AIS-Tech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2017. No. 3. P. 2543–2552.
  22. Lainati A., Giacomini L.E. The rolling mill for rails and structural sections at ARBZ // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2018. May. P. 2443–2454.  
<https://doi.org/10.5151/1983-4764-31401>
  23. 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.
  24. 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.
  25. 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.
  26. 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.
  27. Кадыков В.Н., Уманский А.А., Мартыанов Ю.А. Исследование формоизменения поверхностных дефектов при прокатке в сортовых калибрах // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 8–12.
  28. Уманский А.А., Мартыанов Ю.А. Оптимизация режимов прокатки на мелкосортном стане 250-2 // Металлург. 2014. № 6. С. 108–113.
  29. Перетятко В.Н., Мартыанов Ю.А., Уманский А.А., Федоров А.А. Исследование формоизменения продольных дефектов при прокатке на непрерывном мелкосортном стане // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 12–16.
  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.
  - let in rails production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 2, pp. 42–44. (In Russ.).
  19. 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.).
  20. Polyakov V.V., Velikanov A.V. *Fundamentals of Technology of Rails Production*. Moscow: Metallurgiya, 1990, 416 p. (In Russ.).
  21. 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.
  22. Lainati A., Giacomini L.E. The rolling mill for rails and structural sections at ARBZ. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2018, May, pp. 2443–2454.  
<https://doi.org/10.5151/1983-4764-31401>
  23. 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.
  24. 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.
  25. 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.
  26. 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.
  27. Kadykov V.N., Umanskii A.A., Mart'yanov Yu.A. Study of surface deformation during rolling of the bar calibers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 6, pp. 8–12. (In Russ.).
  28. Umanskii A.A., Mart'yanov Yu.A. Optimizing the rolling conditions on a 250-2 light-section mill. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5–6, pp. 516–523. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9944-9>
  29. Peretyat'ko V.N., Mart'yanov Yu.A., Umanskii A.A., Fedorov A.A. Shape change of longitudinal defects during rolling on a continuous small-grade mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 8, pp. 12–16. (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 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

**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  
**ORCID:** 0000-0003-4403-9006  
**E-mail:** rector@sibsiu.ru

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