

УДК 621.771.262

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОКАТКИ ТРАМВАЙНЫХ ЖЕЛОБЧАТЫХ РЕЛЬСОВ

*Перетяцько В.Н.¹, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК*

Сметанин С.В.², к.т.н., начальник центральной лаборатории автоматизации и механизации

*Филиппова М.В.¹, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК (flippova_mv@mail.ru)*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ОАО «ЕВРАЗ – ЗСМК»
(654043, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Несмотря на большое разнообразие типов рельсов, применяемых в промышленности, методы их калибровки практически одинаковы. Однако калибровка желобчатых рельсов, применяемых в основном для трамвайных путей, в отличие от обычных рельсов имеет свои особенности в формировании желоба. Приведены результаты компьютерного моделирования и промышленных экспериментов, в результате которых исследовано распределение осевой пористости и произведена оценка деформированного состояния металла при прокатке в черновых и чистовых калибрах с целью разработки и внедрения новой технологии прокатки трамвайных желобчатых рельсов. По результатам компьютерного моделирования были проведены промышленные исследования распределения осевой пористости при прокатке в черновых ящичных калибрах клетки BD-1 и разрезных рельсовых калибрах в клетки BD-2. Изучения макроструктуры проводили на темплетях непрерывнолитой заготовки после второго, седьмого и девятого пропусков в клетях BD-1, BD-2. Результаты промышленного эксперимента и компьютерного моделирования показали хорошую их сходимость.

Ключевые слова: прокатка, рельс, черновые калибры, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, трамвайные рельсы, новая технология.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-328-334

В связи с реконструкцией рельсобалочного производства на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и запуском современного прокатного стана технология изготовления всех прокатываемых профилей потребовала углубленного изучения.

Калибровка желобчатых рельсов, используемых в основном для трамвайных путей, в отличие от калибровки обычных рельсов имеет свои особенности в формировании желоба [1 – 3]. С целью разработки оптимальной технологии прокатки трамвайных желобчатых рельсов было исследовано деформированное состояние металла при прокатке с использованием компьютерного комплекса Deform-3D.

Известно, что прокатка рельсовых профилей в черновых калибрах во многом предопределяет качество готового профиля, поэтому основной задачей здесь ставится максимальная проработка осевой ликвации в этих калибрах с перераспределением ее в область шейки рельсового профиля, при этом ширина ликвационной зоны в готовом профиле не должна превышать 0,5 толщины шейки [1].

После проведенной реконструкции машины непрерывного литья заготовок электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» высотный размер поперечного сечения заготовки был изменен в сторону увеличения, при этом габариты НЛЗ составляют $H \times B = 365 \times 300$ мм

взамен предыдущих 330×300 мм. Увеличение размера большей стороны НЛЗ примерно на 10 % потребовало проведение углубленных исследований по выбору оптимальной последовательности и конфигурации ящичных и разрезных калибров, обеспечивающих требуемое распределение осевой пористости при прокатке в черновой группе клеток нового рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». На рис. 1 показана схема прокатки трамвайных рельсов Т62 из НЛЗ в черновых клетях BD-1, BD-2 и чистовой группе клеток Tandem. Режимы деформации металла в черновых клетях BD-1 и BD-2 приведены в ниже [4, 5]:

Пропуск	H, мм	B, мм	Обжатие, мм	Кантовка
			BD-1	
0	365	300	–	–
1	330	310	35	1
2	295	320	35	0
3	259	310	61	1
4	204	320	55	0
5	293	212	27	1
6	268	219	25	0
7	185	280	34	1

BD-2				
8	170	200,00	110	1
9	90	210,68	80	0
10	60	220,02	30	0
11	40	226,55	20	0
12	28	233,66	12	0

В черновых калибрах абсолютное обжатие за пропуск изменяется в широких пределах: от 110 до 12 мм. Суммарное абсолютное обжатие вдоль оси шейки рельса составляет 150 мм и в перпендикулярном направлении 112 мм.

Модельная заготовка размерами 365×300 мм из рельсовой стали имела площадь поперечного сечения

109 500 мм². По оси заготовки (по всей ее длине) выполнено отверстие диам. 40 мм, которое имитирует опасную зону осевой пористости, площадь поперечного сечения этого отверстия составляла 1256,6 мм².

Условия моделирования следующие: температура заготовки 1150 °С; средняя скорость прокатки 3,5 м/с; коэффициент трения 0,3; температура окружающего воздуха 20 °С. Оборудование и условия моделирования соответствуют реальному технологическому процессу.

По результатам моделирования было изучено формоизменение металла, распределение интенсивности деформаций в поперечном сечении раската после каждого пропуска [6, 7].

Изучение формоизменения металла показало, что все калибры полностью заполняются металлом. По-

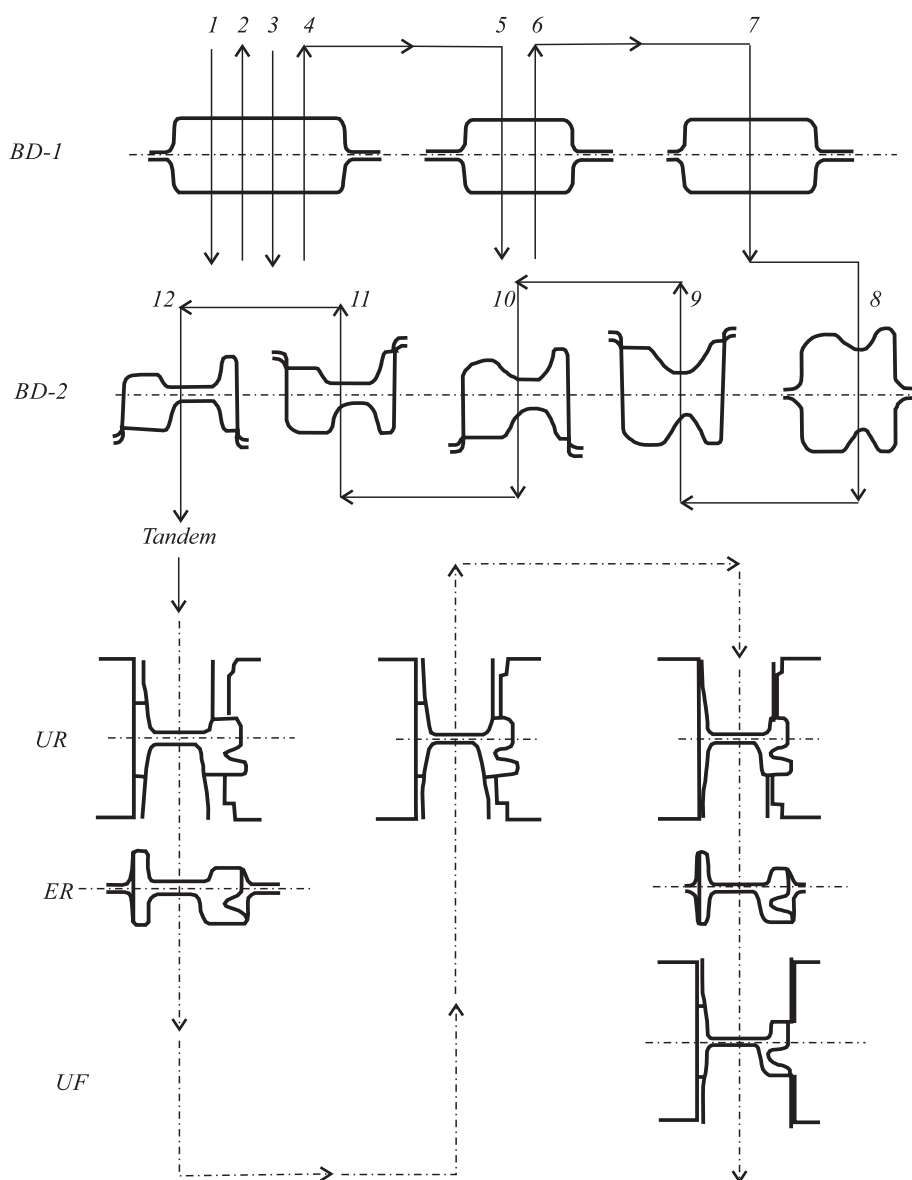


Рис. 1. Схема прокатки трамвайных рельсов Т62 в черновых клетях BD-1, BD-2 и чистовой группе клетей Tandem рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Fig. 1. Scheme of T62 tram rail rolling in the roughing stand BD-1, BD-2 and finishing group of stands Tandem of OJSC "EVRAZ ZSMK" rolling mill

верхностные дефекты на раскате отсутствуют. Зона осевой пористости по всем пропускam располагается в центральной части раската, при этом площадь S поперечного сечения осевой пористости уменьшается с увеличением коэффициента вытяжки. Ниже приведено изменение площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки:

Номер пропуска	Суммарная вытяжка	S , мм
0	0	1256,64
1	1,062	1121,55
2	1,160	998,24
3	1,320	841,16
4	1,630	479,01
5	1,744	442,02
6	1,960	412,33
7	2,200	364,50
8	2,540	237,50
9	3,240	40,13
10	4,130	0
11	5,110	0
12	6,020	0

Распределение полей интенсивности деформаций $\left(\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2} \right)$ в поперечном сечении раската показано на рис. 2, из которого видно, что распределение интенсивности деформаций по сечению раската неравномерно. Поверхностные слои раската, которые в первую очередь вступают в контакт с валками, имеют наибольшие значения интенсивности деформаций, которые убывают от поверхности к центральным слоям.

Наибольшие значения интенсивности деформаций после второго пропуска в ящичном калибре (рис. 2, а) соответствуют металлу, находящемуся по радиусам сопряжения горизонтальной бочки с выпусками калибра, и составляют $\varepsilon_e = 1,46$. При этом интенсивность деформаций равномерно убывает к центральным слоям до значений $\varepsilon_e = 0,364$.

На исследованных темплатах хорошо видно формoизменение центрального отверстия, которое моделирует формoизменение осевой пористости. Площадь поперечного сечения осевой пористости после второго пропуска составляет $S = 998,24 \text{ мм}^2$. Наибольшую интенсивность деформации после седьмого пропуска в ящичном калибре (рис. 2, б) также имеет металл, находящейся по радиусам сопряжения бочки вала с выпусками калибра. Максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 0,87$, при этом

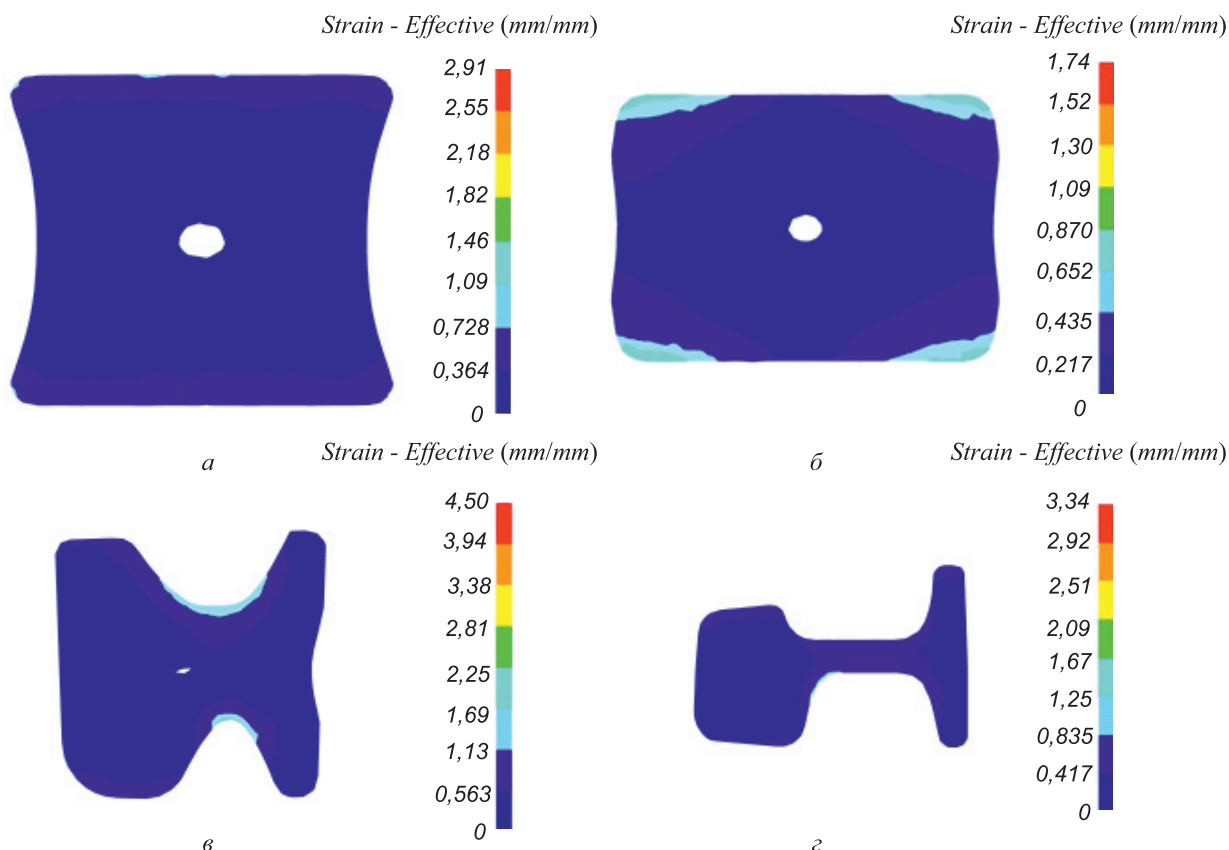


Рис. 2. Распределение полей интенсивности деформации после второго (а), седьмого (б), девятого (в) и двенадцатого (з) пропусков

Fig. 2. Distribution of intensity fields of deformation after the second (a), the seventh (б), the ninth (в) and the twelfth (з) passes

картина распределения полей интенсивности деформаций в этом пропуске отличается от таковой второго пропуска тем, что данные поля распределяются от угловых частей раската к центральным слоям и имеют ромбическую форму, вызванную защемлением раската, а площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшилась до $S = 364,5 \text{ мм}^2$.

После девятого пропуска в рельсовом разрезном калибре закрытой формы с односторонним расположением разъемов распределение интенсивности деформаций крайне неравномерно (рис. 2, в), что обусловлено геометрическими факторами калибра. Установлено, что наибольшие значения $\epsilon_e = 2,25$ в девятом пропуске соответствуют разрезному гребню по закрытому ручью при угле гребня 77° с радиусом притупления $R = 16 \text{ мм}$, причем поля интенсивности деформаций с максимальными значениями располагаются в верхней части гребня. Средние значения $\epsilon_e = 1,69$ соответствуют верхнему горизонтальному валку с углом разрезного гребня 100° и $R = 30 \text{ мм}$, при этом поля интенсивности деформаций располагаются до половины высоты разрезного гребня. При прокатке в девятом калибре наблюдается явление перемещения металла фланца подошвы из открытого ручья в закрытый из-за того, что фланец подошвы в открытом ручье получает чрезмерно большое боковое обжатие, и, как следствие, такое перемещение металла сопровождается большим расходом энергии на прокатку и вызывает значительный износ калибра. После десятого пропуска происходит заваривание и сжатие осевой пористости, которая становится сосредоточенной и располагается в шейке профиля, что является допустимым, и в последнем калибре клетки BD-2 ее раскрытия не происходит (рис. 2, г).

Наиболее наглядным показателем, определяющим объемное напряженное состояние металла, является распределение интенсивности напряжений в поперечном сечении раската [8]. Полученные значения интенсивности напряжений

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}$$

исследовали во втором, седьмом девятом и двенадцатом пропусках.

Распределение полей интенсивности напряжений после второго пропуска симметрично относительно вертикальной оси. Максимальные значения интенсивности напряжений составляют $\sigma_e = 167 \text{ МПа}$ и соответствуют поверхностным слоям, контактирующим с горизонтальными валками. Значения интенсивности напряжений убывают от поверхности к центральным слоям. В центральных слоях выделяются три шаровых зоны с минимальными значениями $\sigma_e = 104 \text{ МПа}$, располагающихся по обе стороны от осевой пористости, причем по периметру осевой пористости со стороны горизонтальных валков также выделяются аналогичные

зоны минимальных значений σ_e . Характер распределения полей интенсивности напряжений после седьмого пропуска аналогичен характеру распределения полей интенсивности деформаций. Полученное поле напряжений имеет также ромбическую форму, а максимальные значения соответствуют местам защемления полосы в радиусах сопряжения горизонтальной бочки валка с выпусками калибра и составляют $\sigma_e = 162 \text{ МПа}$. Максимальные значения σ_e после девятого пропуска в разрезном калибре клетки BD-2 составляют $125 - 167 \text{ МПа}$ и располагаются по периметру ручьев калибра.

Стоит отметить, что фланец подошвы при проникновении в закрытый ручей встречает значительные сопротивления со стороны наклонной стенки гребня и со стороны боковой стенки калибра, что вызывает значительные напряжения $\sigma_e = 167 \text{ МПа}$ по фланцу в закрытом ручье, в котором металл как бы протягивается через него. В открытом ручье фланец подошвы находится в пространстве между двумя коническими плоскостями, вращающимися с разными окружными скоростями, при этом фланец обжимается по толщине, что вызывает значительные напряжения $\sigma_e = 125 \text{ МПа}$ со стороны опорной части подошвы. В центральной части раската, в зоне нахождения осевой пористости, наблюдаются значительные напряжения ($\sigma_e = 83 \div 125 \text{ МПа}$), что способствует проработке осевой пористости в тонкую полосу, располагающуюся в шейке профиля. Девятый пропуск является последним, после которого можно наблюдать осевую пористость, а после десятого происходит ее полное заваривание. В двенадцатом пропуске характер распределения напряжений зависит от распределения интенсивности деформаций и также зоны с максимальными значениями соответствуют шейке и краевым участкам фланцев головки и подошвы. Отметим, что прокатка в разрезных рельсовых калибрах является различной по времени с точки зрения обработки валками элементов раската [9].

Дальнейшая прокатка рельсового профиля проводится в клетях Tandem группы. Образование желоба осуществляется за четыре прохода, которые распределены по клетям UR (UR1, UR3, UR4) и UF; калибры – четырехвалковые с двумя горизонтальными приводными валками диам. 1200 мм и двумя вертикальными не приводными роликами, диам. 800 мм; скорость прокатки 3,5 м/с.

В связи с тем, что более 55 % (порядка 45 мм на разрезку при ширине желоба 29 мм) при разрезке головки приходится на первый пропуск, рассмотрим результаты формоизменения металла в клетях UR1 [10].

Распределение полей интенсивности деформаций в поперечном сечении калибра UR1 показано на рис. 3. Установлено, что элемент раската, который в первую очередь вступают в контакт с валками, – это гребень разрезного ролика с головкой профиля, после чего начинается образование желоба. При разрезке желоба поверхностные слои металла испытывают наибольшую

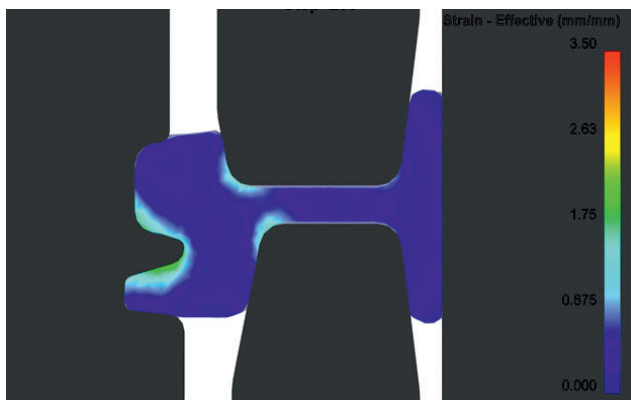


Рис. 3. Распределение полей интенсивности деформаций в первом калибре разрезки головки рельса – UR1

Fig. 3. Distribution of intensity fields of deformation in the first caliber of railhead cutting – UR1

деформацию [5]. Отчетливо просматривается зона усиленного роста полей интенсивности деформаций, которая располагается по оси разрезного гребня и боковым поверхностям желоба, что соответствует наибольшим перемещениям объемов металла. За счет значительной местной деформации металла при разрезке наблюдается вынужденное уширение металла по границам желоба. Значения интенсивности деформаций в поверхностных слоях металла по всему периметру желоба больше единицы, что указывает на значительные обжатия. Об-

жатие по подошве в проходе UR1 составляет порядка 3,5 мм, при этом значения интенсивности деформаций составляют менее 0,3. Также отмечаются две зоны с интенсивностью деформации $\epsilon_e = 0,7 - 1,4$ в местах сопряжения шейки с головкой профиля.

Компьютерное моделирование прокатки металла в калибрах UR3 и UR4 показало, что в них не происходит значительных деформаций металла при формировании желоба. Распределение полей интенсивности деформаций в чистовом пропуске близко к равномерному, при этом значения ϵ_e изменяются от нуля до 0,5. Значения интенсивности деформаций в поперечном сечении меньше единицы, что говорит о незначительных деформациях по периметру раската. Максимальные значения $\epsilon_e = 0,5$ располагаются в трех зонах: первая – радиусы сопряжений шейки и подошвы; вторая – радиусы сопряжения шейки и головки и третья – в вершине разрезаемого желоба, т.е. в тех местах, где металл находится в стесненных условиях по отношению ко всему своему объему.

По результатам компьютерного моделирования проведены промышленные исследования распределения осевой пористости при прокатке в черновых ящичных калибрах клетки BD-1 (рис. 4) и разрезных рельсовых калибрах в клетке BD-2.

Изучения макроструктуры НЛЗ проводили на теплотах, отобранных от трех плавок стали Э76, отлитых на МНЛЗ-1. Для проведения промышленных экспери-

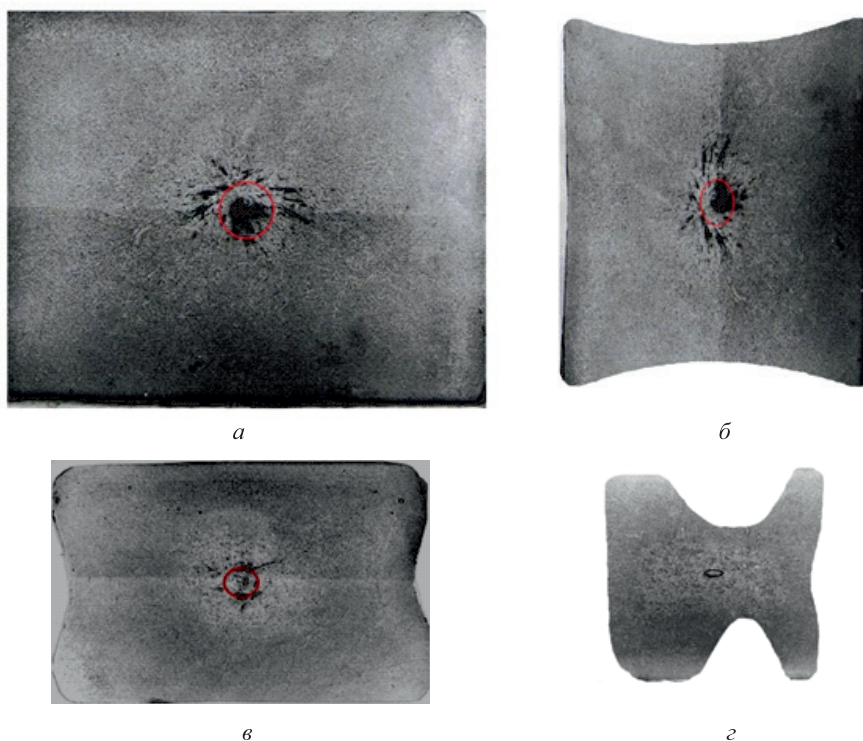


Рис. 4. Распределение осевой пористости по сечению раската:

a – исходная НЛЗ 365×300 мм; *б*, *в* и *г* – поперечное сечение раската после второго, седьмого и девятого пропусков соответственно

Fig. 4. Distribution of axial porosity over the cross section of the roll:

a – the original NLZ 365×300 mm; *б*, *в* and *г* – cross-section of the roll after the second, the seventh and the ninth passes

ментов выбрали НЛЗ с максимальной осевой пористостью (рис. 4, а). Макроструктуру поперечного сечения раската выявляли глубоким травлением в 50 %-ом водном растворе соляной кислоты поверхности отрезанных темплетов после второго (рис. 4, б), седьмого (рис. 4, в) и девятого (рис. 4, г) пропусков в клетях ВД-1, ВД-2, полученных из отобранных проб методами холодной механической обработки (строжки, шлифовки).

На фотографиях полученных темплетов оконтурена область с наиболее опасной зоной осевой пористости, соотнесенная с результатами компьютерного моделирования. Прокатка в разрезных рельсовых калибрах характеризуется неравномерной высотной деформацией, за счет чего происходят вынужденное уширение металла и интенсивная высотная деформация шейки рельсового профиля, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения осевой пористости по оси симметрии рельсового профиля. Причем в готовом рельсовом профиле осевая пористость имеет вид полосы толщиной до 5 мм и длиной не более 110 мм со смещением в сторону подошвы и не выходит за габариты шейки. Стоит отметить, что большие напряжения в процессе пластической деформации зоны осевой пористости способствуют интенсивной проработке несплошности раската.

По результатам компьютерного моделирования заваривание осевой несплошности происходит после девятого пропуска, что подтверждается результатами промышленного эксперимента – на заготовке с максимальной начальной осевой пористостью после десятого пропуска на темплете происходит ее полное заваривание.

Анализ макроструктуры и размеров поперечного сечения рельса после прокатки в чистовом калибре УГ показал, что металл профиля имеет хорошую структуру и требуемую геометрию, зона с осевой пористостью отсутствует. Прямолинейность, механические и прочностные характеристики полученных рельсов Т62 из стали марки Э76 соответствуют требованиям ТУ 14-2Р-320 – 96 на трамвайные желобчатые рельсы (рис. 5).

Выводы. Напряженно-деформированное состояние металла неравномерно по сечению раската и зависит от формы калибра. Распределения запаса пластичности напрямую зависят от распределения интенсивности напряжений по сечению металла. По данным компьютерного моделирования уменьшение площади осевой пористости пропорционально суммарному коэффициенту вытяжки. После десятого пропуска при общем коэффициенте вытяжки 4,13 в металле происходит полное заваривание внутреннего дефекта. На заваривание осевой несплошности в процессе прокатки влияет главным образом величина сжимающих напряжений на поверхности раската. Результаты промышленного эксперимента на заготовке с максимальной осевой пористостью показали хорошую сходимость с результатами компьютерных исследований.



Рис. 5. Опытная партия прокатанных трамвайных рельсов Т62

Fig. 5. A pilot batch of T62 rolled tram rails

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучко И.И., Серкин М.Г., Рапопорт И.Б. Производство трамвайных рельсов новых типов // *Сталь*. 1956. № 8. С. 708 – 716.
2. Критинин И.А., Кошкин В.А., Дарушин Р.И. Повышение качества трамвайных желобчатых рельсов // *Сталь*. 1969. № 1. С. 52, 53.
3. Сапрыгин Х.М., Шарапов И.А., Могилевский И.И. Промышленное производство облегченных трамвайных рельсов // *Сталь*. 1982. № 2. С. 56, 57.
4. Литовченко Н.В. Калибровка профилей и прокатных валков. – М.: *Металлургия*, 1990. – 432 с.
5. Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А. Калибровка прокатных валков. – М.: *Металлургия*, 1971. – 625 с.
6. Рыбин Ю.Н., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: *Наука*, 2004. – 664 с.
7. Володин И.М. Моделирование процессов горячей объемной штамповки. – М.: *Машиностроение*, 2006. – 253 с.
8. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Волков К.В. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в универсальном четырехвалковом калибре // *Сталь*. 2014. № 7. С. 36 – 39.
9. Полухин П.И., Грдина Ю.В. Прокатка и термическая обработка рельсов. – М.: *Металлургиздат*, 1963. – 510 с.
10. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В. Деформация металла в чистовом разрезном калибре при прокатке трамвайных желобчатых рельсов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. № 10. С. 68, 69.

Поступила 22 января 2015 г.

NEW TECHNOLOGY OF TRAM GROOVED RAIL ROLLING

Peretyat'ko V.N.¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"*

Smetanin S.V.², *Cand. Sci. (Eng.), Head of central laboratory of automation and mechanization*

Filippova M.V.¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"* (filippova_mv@mail.ru)

¹ **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² **OJSC "EVRAZ ZSMK" – Joint West Siberian Metallurgical Plant** (16, Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo region, 654043, Russia)

Abstract. Despite of the great variety of rails types used in the industry, methods of their calibration are almost identical. However, calibration of girder rails, mainly used for tramways, in contrast to conventional rails has its own peculiarities in the formation of the girder. The paper presents the results of the computer simulation and industrial experiments that include investigations of the distribution of axial porosity and evaluation of the strain state of metal during its rolling in roughing and finishing calibers for the development and introduction of a new rolling technology of tramway girder rails. According to the results of the conducted computer simulation the industrial study of axial distribution of porosity by rolling in the rough box-caliber stand BD-1 and split rail caliber stand BD-2 was carried out. Microstructure examination was made at the templates of continuous casting block, after the second, after the seventh and ninth passes in the stands BD-1, BD-2. The results of the industrial experiment showed a good agreement with the computer simulation results.

Keywords: rolling, rail, roughing gages, intensity of deformation, stress intensity, tram rails, new technology.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-328-334

REFERENCES

1. Kuchko I.I., Serkin M.G., Rapoport I.B. Production of tram rails of new types. *Stal'*. 1956, no. 8, pp. 708–716 (In Russ.).
2. Kritinin I.A., Koshkin V.A., Darushin R.I. Improving of tram grooved rails. *Stal'*. 1969, no. 1, pp. 52–53 (In Russ.).
3. Saprygin Kh.M., Sharapov I.A., Mogilevskii I.I. Industrial production of lighted tram rails. *Stal'*. 1982, no. 2, pp. 56–57 (In Russ.).
4. Litovchenko N.V. *Kalibrovka profilei i prokatnykh valkov* [Calibration of profiles and rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 432 p. (In Russ.).
5. Chekmarev A.P., Mut'ev M.S., Mashkovtsev R.A. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Calibration of rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 625 p. (In Russ.).
6. RybinYu.N., Rudskoi A.I., Zolotov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical modeling and designing of technological processes of fetal forming]. St. Petersburg: Nauka, 2004. 664 p. (In Russ.).
7. Volodin I.M. *Modelirovanie protsessov goryachei ob'emnoi shtampovki* [Modeling of forging processes]. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 253 p. (In Russ.).
8. Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V., Volkov K.V. Research of defected modes of metal at rolling of tram rails in a universal four-rolling groove. *Stal'*. 2014, no. 7, pp. 36–39. (In Russ.).
9. Polukhin P.I., Grdina Yu.V. *Prokatka i termicheskaya obrabotka rel'sov* [Rolling and thermal processing of rails]. Moscow: Metallurgizdat, 1963. 510 p. (In Russ.).
10. Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V., Filippova M.V. Metal deformation in finishing fuller groove. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 10, pp. 68–69. (In Russ.).

Received January 22, 2015