

Силы и контактные площади при горячей прокатке сложных профилей

Исследован очаг деформации при прокатке сложных профилей с применением программного комплекса Deform-3D и графического пакета Компас-3D. Приведены результаты последовательного заполнения очага деформации и образующиеся при этом контактные площади. Экспериментальные данные показали, что имеются осевые силы на горизонтальных валках в связи с тем, что силы прокатки со стороны вертикального валка с разрезным гребнем в 1,43 раза больше, чем силы прокатки со стороны гладкого вертикального валка подошвы.

Ключевые слова: прокатка; трамвайные рельсы; сила прокатки; контактная площадь; разрезной калибр; рельсовый калибр; графический пакет.

The centre of deformation at rolling of complex profiles with application of the program complex Deform-3D and graphic package the Compass-3D is studied. Results of consecutive filling of the centre of deformation and the contact areas formed thus are resulted. Experimental data is shown that there are axial forces on horizontal rolls because rolling force from outside of vertical roll with cutting crest in 1.43 times more than rolling force from outside of smooth vertical roll of soles.

Keywords: rolling; tram rails; rolling force; contact area; web-cutting pass; edging pass; graphic package.

Для прочностных расчетов оборудования главной линии прокатного стана необходимо знать силу, действующую на валки рабочей клетки при прокатке металла. При практических расчетах силу прокатки определяют по формуле

$$P = p_{cp} F, \quad (1)$$

где p_{cp} — средняя удельная сила; F — проекция площади соприкосновения металла с валком, называемая также контактной площадью, на плоскость, нормальную к направлению силы P .

Таким образом, определение силы прокатки сводится к решению задачи вычисления параметров F и p_{cp} .

В статье рассмотрен вопрос определения контактной площади металла с валками и ее влияние на силу прокатки.

При прокатке профилей прямоугольного сечения контактную площадь можно вычислить по уравнению

$$F = l_d B_{cp}, \quad (2)$$

где l_d — длина дуги захвата, мм; B_{cp} — средняя ширина прокатываемого металла, мм.

В большинстве случаев можно принять, что

$$B_{cp} = \frac{B_0 + B_1}{2} \quad (3)$$

или

$$B_{cp} = \frac{2}{3} (B_0 + B_1), \quad (4)$$

где B_0 , B_1 — ширина полосы до и после прокатки соответственно, мм.

При прокатке металла в калибрах контактную площадь определяют графически, аналитически или графоаналитически.

При графическом способе вычерчивают калибр с прокатываемым металлом в трех проекциях, и определяют площадь соприкосновения. Аналитически, по методу "приведенной полосы", абсолютное обжатие принимают равным линейному обжатию по ширине профиля:

$$\Delta h = S_0 B_0 - S_1 B_1, \quad (5)$$

где S_0 , S_1 — площадь сечения профиля до и после прокатки соответственно, мм².

Катающий радиус и длину дуги захвата вычисляем по выражениям:

$$R = 0,5 \left(D - \frac{S_1}{B_1} \right); \quad (6)$$

$$l_d = \sqrt{R \Delta h}.$$

Известны данные для определения контактной площади при прокатке металла в калибрах простой формы (круг, овал, квадрат и др.) [1, 2]. Однако определение контактной площади в калибрах сложной формы вызывает затруднение.

В качестве объекта исследования был выбран один из самых сложных рельсовых профилей — трамвайный желобчатый рельс РТ62, имеющий асимметрию не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскостях.

Исследовали калибровку, разработанную для нового рельсобалочного стана "ЕВРАЗ ЗСМК" (рис. 1). Как видно из рис. 1, непрерывнолитую заготовку сечением $H \times B = 365 \times 300$ мм прокатывают на трамвайный рельс в двух черновых клетях дуо ($BD-1$ и $BD-2$) и чистовой группе клеток *Tandem*, состоящей из трех клеток (UR , *Edger*, UF), две из которых универсальные, а одна дуо. Всего прокатка рельсового профиля проводится за 18 проходов.

Качество готового профиля во многом определяется системой черновых рельсовых калибров, от конфигурации которых зависит рациональность деформаций по элементам профиля в чистовых пропусках. Особенностью калибровки рельсовых профилей является взаимосвязь первого разрезного калибра и предчистового рельсового калибра, которые являются определяющими в получении требуемой геометрии готового профиля. Конструкция первого разрезного калибра определяет последующую схему деформаций для формирования фланцев профиля.

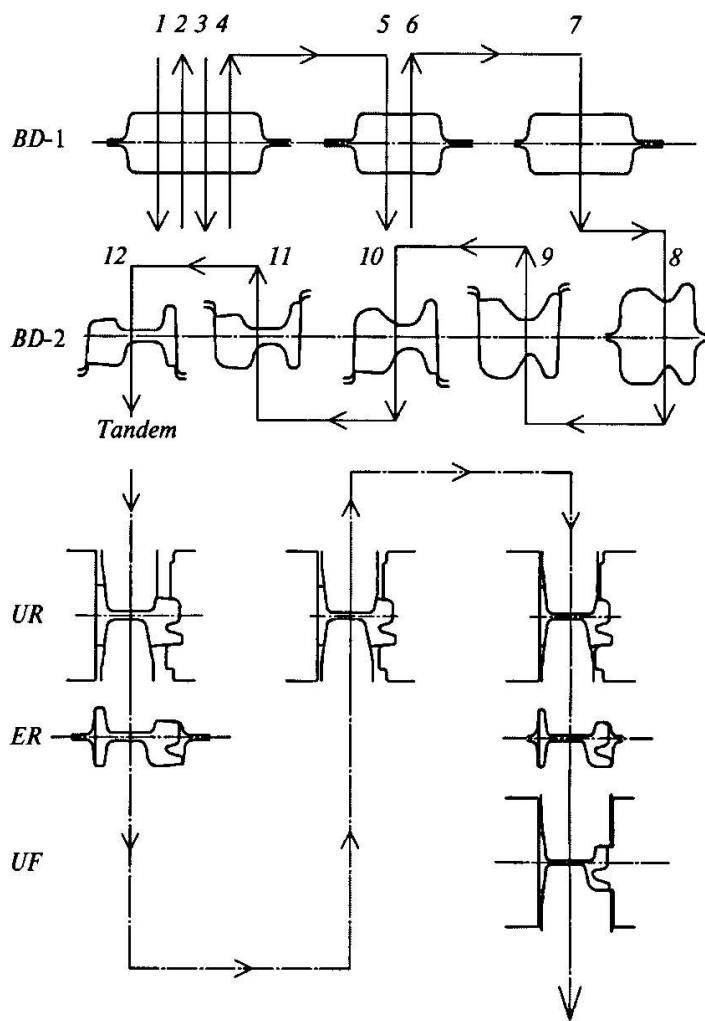


Рис. 1. Схема прокатки трамвайных рельсов РТ62 в черновых клетях ($BD-1$, $BD-2$) и чистовой группе клеток *Tandem* рельсобалочного стана "ЕВРАЗ ЗСМК"

Исследование проводили на калибрах, оказывающих определяющее значение на формоизменение раската, обеспечивающих получение геометрии готового профиля — это первый разрезной калибр (8-й пропуск), последний рельсовый калибр в черновой клетке (12-й пропуск) и первый разрезной калибр $UR-1$ головки рельса чистовой группы клеток (13-й пропуск).

Силу прокатки рассчитывали по уравнению (1). Контактную площадь определяли по методу "приведенной полосы". Результаты расчета приведены в табл. 1 (верхняя строка). Анализ приведенных в табл. 1 данных показал, что максимальная сила при прокатке в горизонтальных валках наблюдается при разрезке раската в 8-м калибре и составляет 10,2 МН. При прокатке металла в четырехвалковом калибре $UR-1$ (13-й пропуск) силы прокатки со стороны вертикальных роликов различны. Сила прокатки от обжатия гладким роликом

1. Результаты теоретических и промышленных исследований силы прокатки и площади контактной поверхности

Вариант расчета	Первый разрезной калибр (8-й пропуск)	Последний рельсовый калибр (12-й пропуск)	Первый калибр клетей <i>Tandem</i> (<i>UR</i> -1, 13-й пропуск)		
			Горизонтальные валки	Разрезной ролик	Гладкий ролик
Сила прокатки, МН					
По общепринятым теоретическим формулам	10,2	5,26	3,16	3,7	1,5
Расчет в программном комплексе Deform-3D	6	4,3	2,5	1,5	1,1
По результатам промышленных экспериментов	—	—	2,3	1,65	1,15
Площадь контактной поверхности, м ²					
По общепринятым теоретическим формулам	0,0574	0,0249	0,0129	0,0219	0,0039
По результатам геометрических построений в программе Компас-3D	0,0202; 0,0265	0,0215; 0,0216	0,0097; 0,0103	0,0099	0,0052

со стороны подошвы рельса равна 1,5 МН, а от обжатия разрезным роликом со стороны головки профиля — 3,7 МН.

Для проверки точности полученных результатов было проведено математическое моделирование существующей технологии в программном комплексе Deform-3D [3–6] с определением силы прокатки. Компьютерное моделирование в программном комплексе Deform-3D позволяет количественно определить напряженно-деформированное состояние металла, силу прокатки и заполнение калибра металлом (рис. 2), а также некоторые другие характеристики.

Компьютерное моделирование проводили в соответствии с основами механики сплошных сред в двухвалковых и четырехвалковых калибрах. Калибры клетки BD-2 двухвалковые приводные, калибры клетки UR-1 четырехвалковые с двумя горизонтальными приводными валками и двумя вертикальными не приводными валками. Материал раската — сталь Э76 по ГОСТ Р 55941—2014.

При моделировании приняты следующие допущения: рассматриваемый процесс — изотермический, температура 1000 °С; валки несжимаемые; материал раската — однородный, изотропный; деформируемая среда — вязкопластическая; трение по закону Зибеля, коэффициент трения постоянный и равен 0,5.

Результаты компьютерного моделирования по определению силы прокатки приведены

в табл. 1 (вторая строка). Из табл. 1 видно, что силы прокатки, вычисленные по общепринятым формулам (по методу "приведенной полосы"), превышают силы прокатки, полученные при моделировании в программном комплексе Deform-3D, от 1,2 до 2,5 раз. Значительные расхождения между теоретическими расчетами и моделированием в программном комплексе Deform-3D можно объяснить неточностью расчета площади контакта металла

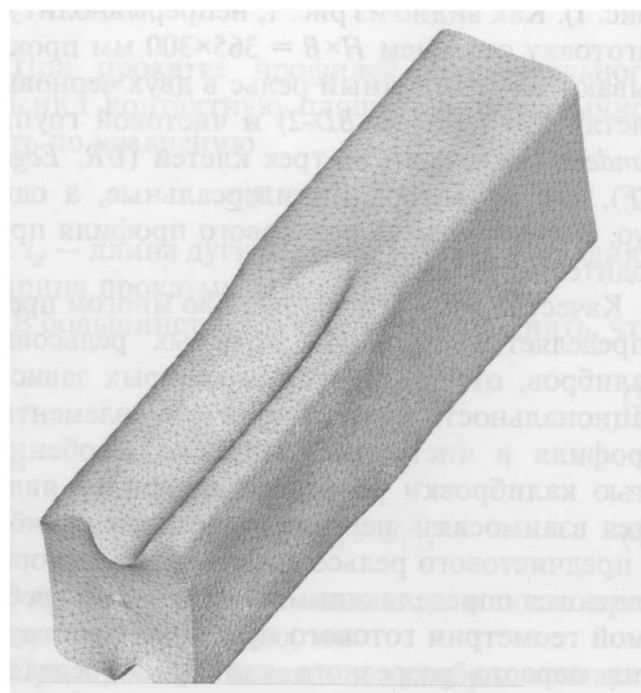


Рис. 2. Твёрдотельная 3D-модель раската в очаге деформации (прокатные валки условно не показаны)

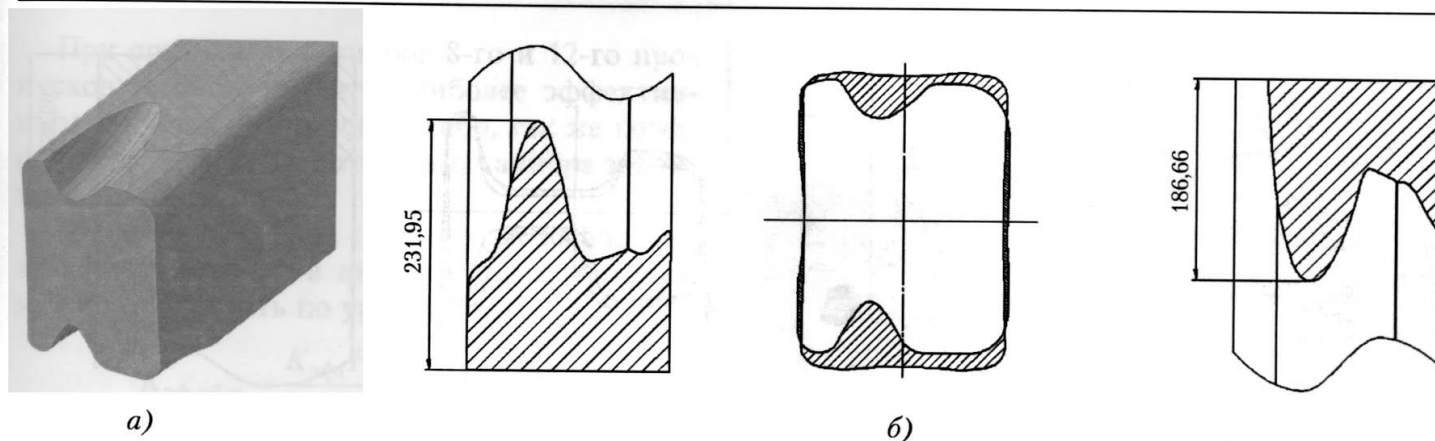


Рис. 3. Поперечное сечение раската по оси валков (8-й пропуск):

a — 3D-модель с очагом деформации; *б* — проекции очага деформации (штриховкой показаны деформируемые объемы металла)

с валками. Однако с использованием программного комплекса Deform-3D невозможно точно рассчитать величину и конфигурацию площади соприкосновения металла с валками, смещенную площадь и смещенный объем, а также длину дуги захвата, которая в разрезном калибре является переменной величиной.

Современные системы твердотельного моделирования позволяют с высокой точностью определить геометрические контактные поверхности раската с элементами калибра прокатного валка, смещенные площади и смещенные объемы. Точное понимание геометрии очага деформации и физических объемов смещаемого металла в очаге деформации позволяет разрабатывать энергоэффективные калибровки, учитывающие оптимальные деформации элементов рельсовых и фланцевых профилей. Поэтому дальнейшие исследования очага деформации при прокатке сложных профилей проводили с использованием графического пакета Компас-3D.

Проведена оценка критерия эффективности деформации металла, предложенного И.М. Павловым и М.Л. Зайцевым, который представляет собой отношение смещенных объемов металла в длину $V_{\text{выт}}$ и по высоте $V_{\text{см}}$:

$$K_{\text{эф}} = \frac{V_{\text{выт}}}{V_{\text{см}}} = 1 - \mu \frac{F_{\text{ш}}}{F_{\text{см}}}, \quad (7)$$

где μ — коэффициент вытяжки; $F_{\text{ш}}$ — часть площади поперечного сечения, смещенной в ширину; $F_{\text{см}}$ — смещенная площадь по высоте.

Термин "смещенный объем металла" использован из работы [4]. Часть калибра, которая находится выше и ниже нейтральной линии калибра называем соответственно верхней и нижней. На основании этого далее по

тексту статьи приведен термин верхняя/нижняя часть очага деформации.

На рис. 3, *a* приведена 3D-модель поперечного сечения раската по оси валков с очагом деформации. Из рис. 3, *a* видно, что захват металла валками осуществляется разрезным гребнем валков. Небольшую высотную деформацию получают головка профиля и подошва рельсового профиля.

На рис. 3, *б* приведено сечение калибра по оси валков с проекциями очага деформации. Как видно из рис. 3, *б*, разрезные гребни верхнего и нижнего валков имеют разную высоту и разный угол наклона гребней, поэтому контактная площадь со стороны нижнего валка (верхняя часть рисунка) и верхнего валка (нижняя часть рисунка) различны и составляют 26 503,5 и 20 195,9 мм² соответственно.

В первом разрезном калибре объем верхней части очага деформации равен $V_{\text{в}} = 326\,756,34$ мм³, объем нижней части очага деформации — $V_{\text{н}} = 542\,759,26$ мм³, различие верхней и нижней частей очага деформации составляет 1,66 раза. Проекция длины верхней части очага деформации 186,66 мм, в нижней — 231,95 мм, при этом различие в длинах составляет 45,29 мм. Коэффициент вытяжки в этом калибре $\lambda = 1,19$, коэффициент эффективности калибра 0,799. Остальные результаты исследования представлены в табл. 2.

На рис. 4 приведено поперечное сечение раската по оси валков с очагом деформации 12-го пропуска. Из рис. 4, *a* видно, что захват металла валками осуществляется боковыми поверхностями разрезных гребней валков. Максимальную высотную деформацию получает металл со стороны нижнего валка.

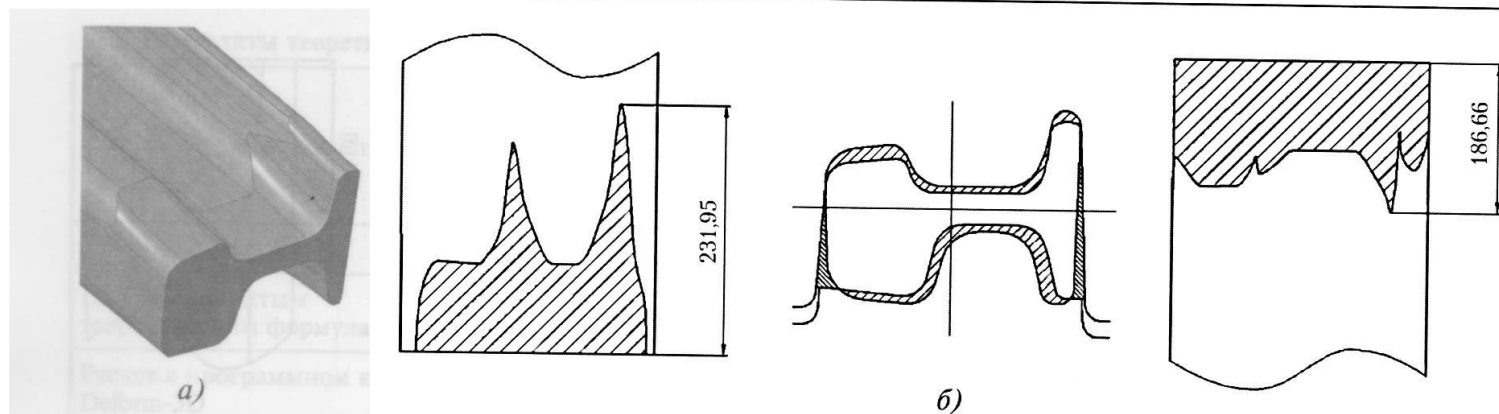


Рис. 4. Поперечное сечение раската по оси валков (12-й пропуск):

а — 3D-модель с очагом деформации; б — проекции очага деформации (штриховкой показаны деформируемые объемы металла)

На рис. 4, б приведено сечение калибра по оси валков с проекциями очага деформации. Как видно из рис. 4, б, боковые поверхности разрезного гребня нижнего валка раньше всего вступают в контакт с металлом раската, поэтому на проекции контактной площади (верхняя часть рисунка) имеют характерные пики. Верхний валок более равномерно деформирует металл по высоте. Контактные площади со стороны нижнего валка (верхняя часть рисунка) и верхнего валка (нижняя часть рисунка) примерно равны и составляют 21 516 и 21 630,7 мм² соответственно.

Установлено, что объем верхней части очага деформации равен $V_{\text{в}} = 135\,058,85 \text{ мм}^3$, объем нижней части очага деформации — $V_{\text{н}} = 237\,947,79 \text{ мм}^3$, разность объемов составляет 1,76 раза. Также имеется значительное различие по геометрическим длинам верхней и нижней частей очага деформации, которые соответственно равны 133,65 и 223,96 мм. Соприкосновение нижнего валка с раскатом происходит на 90,31 мм раньше, чем с верхним. Коэффициент вытяжки калибра $\lambda = 1,17$, коэффициент эффективности калибра 0,654. Полученные результаты представлены в табл. 2.

2. Результаты определенных очагов деформации при прокатке трамвайного рельса РТ62 в клетѣ ВД-2

Параметр	Первый разрезной калибр (8-й пропуск)		Последний рельсовый калибр (12-й пропуск)	
	Верхняя часть калибра	Нижняя часть калибра	Верхняя часть калибра	Нижняя часть калибра
Объем очага деформации, мм ³	326 756,34	542 759,26	135 058,85	237 947,79
Суммарный объем очагов деформации, мм ³	869 515,6		373 006,64	
Геометрическая длина очага деформации, мм	186,66	231,95	133,65	223,96
Разность длин очагов деформации, мм	45,29		90,31	
Смещенная площадь по высоте, мм ²	3442,69	4748,45	2052,41	2569,87
Суммарная смещенная площадь по высоте, мм ²	8191,14		4622,28	
Площадь проекции очага деформации, мм ²	20 195,91	26 503,51	21 630,66	21 516,04
Коэффициент вытяжки	1,19		1,17	
Площадь поперечного сечения, смещенная в ширину, мм ²	1382,57		1366,27	
Коэффициент эффективности калибра	0,799		0,654	
Общий коэффициент эффективности	0,747			

При сравнении калибров 8-го и 12-го пропусков установлено, что наиболее эффективным является разрезной калибр, так же коэффициент эффективности этого калибра значительно выше.

Проведена оценка общего коэффициента эффективности в двух проходах, которую можно определить по уравнению

$$K_{\text{эф.общ}} = \frac{K_{\text{эф1}} F_{\text{см1}} + K_{\text{эф2}} F_{\text{см2}}}{F_{\text{см1}} + F_{\text{см2}}}. \quad (8)$$

В статье И.И. Кучко, М.Г. Серкина, И.Б. Рапопорта (см. Производство трамвайных рельсов новых типов // Сталь. 1956. № 8. С. 708—716) отмечены следующие особенности деформации металла при разрезке головки трамвайного рельса. Интенсивная деформация головки в предчистовом и чистовом калибрах сказывается на утяжке фланцев подошвы рельса; на практике установлено, что утяжка фланцев подошвы в предчистовом и чистовом калибрах составляет 14...18 мм в закрытых ручьях и 3...6 мм в открытых.

Далее приведены результаты по исследованию первого калибра клетки UR-1, где происходит разрезка головки рельса (13-й пропуск). Как видно из рис. 5, в первом четырехвалковом разрезном калибре клеток *Tandem*, где происходит предварительная разрезка головки профиля, по всем обрабатываемым поверхностям существует значительная неравномерность деформации. Раньше всех в контакт с металлом вступает вертикальный валок с разрезным гребнем, который осуществляет деформацию головки рельса (см. рис. 5, а), при этом длина очага деформации составляет 189,8 мм. Вертикальный валок со стоны подошвы последним осуществляет деформацию, а длина очага деформации равна всего 34,8 мм.

На рис. 5, б видно, что со стороны верхнего валка (нижняя часть рисунка) и со стороны нижнего валка (верхняя часть рисунка) на эпюрах контактной площади наблюдаются два пика. Наличие пиков означает, что захват металла валками происходит боковыми поверхностями выступа валка, и максимальная деформация наблюдается на радиусах перехода шейки и головки, а также шейки и подошвы соответственно.

Максимальная длина очага деформации от нижнего валка составляет 156,2 мм, от верхнего — 149,5 мм. Полученная форма очага де-

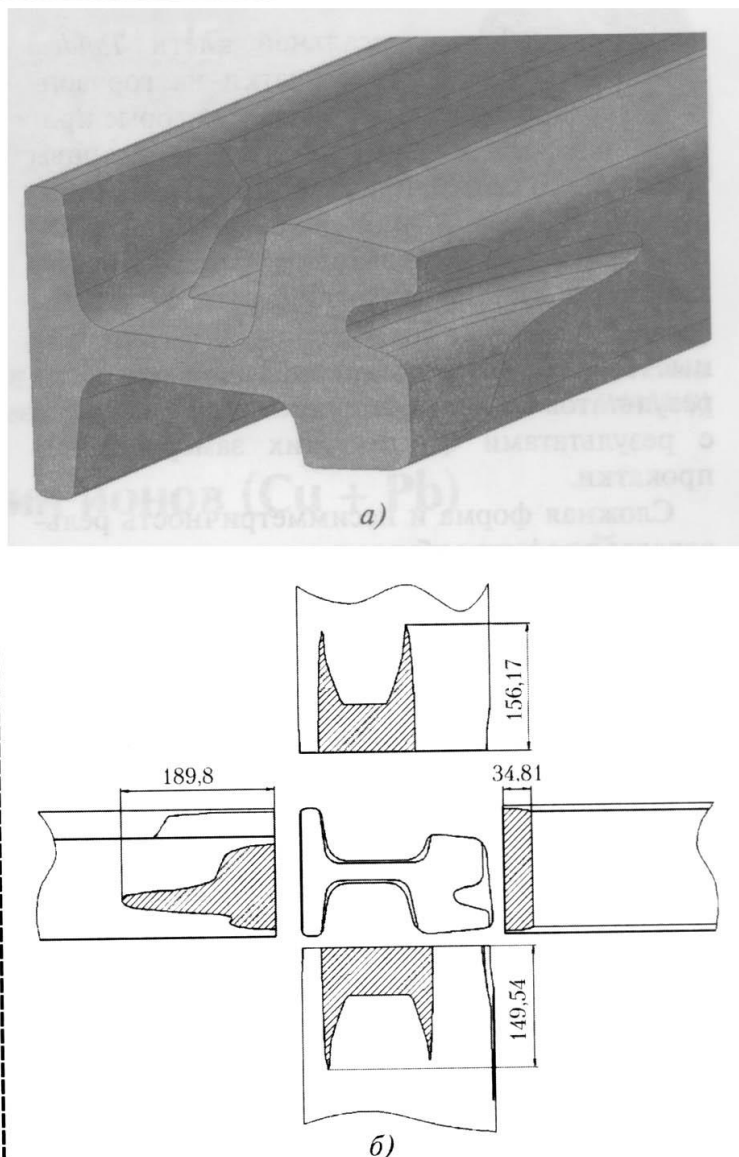


Рис. 5. Поперечное сечение раската по оси валков (13-й пропуск):

а — 3D-модель с очагом деформации; б — проекции очага деформации (штриховкой показаны деформируемые объемы металла)

формации от горизонтальных валков является наиболее приемлемой с точки зрения позиционирования раската в калибре за счет того, что раскат удерживается в четырех точках, обеспечивая его устойчивость в калибре, после чего происходит обжатие по всему периметру профиля. Объемы очага деформации: от нижнего валка $V_{\text{н}} = 47\,377,16 \text{ мм}^3$, от верхнего валка $V_{\text{в}} = 56\,310,44 \text{ мм}^3$, со стороны разрезного ролика $V_{\text{р}} = 52\,135,67 \text{ мм}^3$, со стороны гладкого ролика $V_{\text{г}} = 5153,77 \text{ мм}^3$. Коэффициент вытяжки $\lambda = 1,21$, коэффициент эффективности деформации в данном калибре равен 1.

Экспериментальные замеры силы прокатки проводили при разрезке головки рельса в первом

калибре UR-1 универсальной клетки *Tandem* группы. Замеры силы прокатки на горизонтальных и вертикальных валках, которые производят разрезку головки и обжатие подошвы трамвайного рельса, приведены в табл. 1 (третья строка). Из табл. 1 видно, что силы прокатки, полученные моделированием в программном комплексе Deform-3D, отличаются от фактических замеров не более чем на 10 %. Эти данные свидетельствуют о хорошей сходимости результатов компьютерного моделирования с результатами фактических замеров силы прокатки.

Сложная форма и несимметричность рельсового профиля обуславливают его прокатку с неравномерными обжатиями. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы неравномерная деформация по возможности осуществлялась в первых проходах, когда металл обладает максимальной пластичностью и минимальным сопротивлением деформации. В последних проходах неравномерность деформации должна быть минимальной.

Анализируя приведенные выше результаты, отметим, что прокатка сложных фланцевых профилей характеризуется неравномерностью деформации, при этом отдельные элементы профиля обрабатываются неодновременно.

Экспериментально замеренные силы прокатки на вертикальных валках калибра UR-1 имеют различные значения. Так, со стороны вертикального валка с разрезным гребнем сила прокатки составляет 1,65 МН, а со стороны гладкого валка подошвы — 1,15 МН, что говорит о наличии горизонтальных сил на валки прокатного стана при разрезке головки [7].

Заключение. Проведено исследование очага деформации при горячей прокатке сложных рельсовых профилей с применением графического пакета и программного комплекса с конечно-элементным анализом. Получены 3D-модели очага деформации и контактные площади в двухвалковых и четырехвалковых калибрах при прокатке сложных рельсовых профилей.

Сила прокатки, полученная в программном комплексе Deform-3D, хорошо совпадает с результатами промышленного эксперимента и в 1,4 раза меньше, чем при использовании метода "приведенной полосы".

Установлено, что в процессе прокатки трамвайного желобчатого рельса в четырехвалковых калибрах сила прокатки со стороны разрезного ролика, формирующего головку рельса, превышает силы прокатки со стороны гладкого ролика, формирующего подошву рельса, в 1,43 раза, что является причиной действия осевых сил на приводных горизонтальных валках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инарович Ю.В. Калибровка прокатных валков. М.: Теплотехник, 2010. 490 с.
2. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. СПб.: Наука, 2008. 527 с.
3. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В. Деформация металла в чистовом разрезном калибре при прокатке трамвайных желобчатых рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 10. С. 68—69.
4. Процесс прокатки / М.А. Зайков, В.П. Полушин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов. М.: МИСИС, 2004. 640 с.
5. 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.
6. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. Екатеринбург: УрФУ, 2010.
7. Новая технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов / В.Н. Перетяtko, С.В. Сметанин, К.В. Волков, М.В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. № 5. С. 328—334.

Владимир Николаевич Перетяtko, д-р техн. наук;
Сергей Васильевич Сметанин, канд. техн. наук,
Sergey.Smetanin@evraz.com;
Марина Владимировна Филиппова, канд. техн. наук