

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ РЕЛЬСОВ В УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Прокатка в универсальных четырехвалковых калибрах является наиболее прогрессивным способом производства высококачественных железнодорожных рельсов, широко используется в современной зарубежной металлургии и является основным направлением совершенствования технологии производства рельсов на отечественных рельсобалочных станах [1–3 и др.]. Главное достоинство такого способа заключается в возможности получения равномерной деформации металла по всем элементам рельсового профиля, что достигается при определенном режиме обжатий. В наших работах [4; 5] предложен метод расчета режима обжатий в универсальных калибрах, обеспечивающий равенство коэффициентов вытяжки по шейке $\lambda_{ш}$, подошве $\lambda_{п}$ и головке $\lambda_{г}$ рельсового профиля. Для получения требуемых эксплуатационных свойств рельсов необходимо знать распределение деформаций и напряжений по сечению рельсового раската. С этой целью провели компьютерное моделирование в системе DEFORM 3D [6; 7] формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла при прокатке рельса в универсальном калибре по расчетным режимам обжатий.

Анализировали процесс прокатки рельсового профиля в черновом универсальном калибре (рис. 1) с одинаковыми коэффициентами вытяжки по шейке, подошве и головке: $\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г} = 1,281$. Для обеспечения указанного равенства вытяжек коэффициенты обжатия фланцев согласно расчету [4; 5] составили: по подошве у основания $1/\eta_{пб} = b'_{п}/b_{п} = 1,235$ и у вершины $1/\eta_{па} = a'_{п}/a_{п} = 1,471$, а по головке у основания $1/\eta_{гб} = b'_{г}/b_{г} = 1,307$ и у вершины $1/\eta_{га} = a'_{г}/a_{г} = 1,363$.

С целью получения устойчивого, установившегося процесса прокатки длину исходного рельсового раската задавали 1800 мм. Для указанной геометрической модели сформировали конечно-элементную сетку с общим количеством узлов 10712 (81413 элементов).

Диаметр приводных горизонтальных валков $D_{г} = 1300$ мм и вертикальных холостых валков $D_{в} = 900$ мм. Полагали, что металл обладает свойствами жестко-пластической среды. Температуру раската принимали 1100 °С. Сопротивление деформации рассчитывали по данным В.К. Смир-

нова – А.Р. Бондина [8]. Условия трения на контакте металла с валками задавали по Кулону. Моделировали процесс прокатки со скоростью 2,8 м/с.

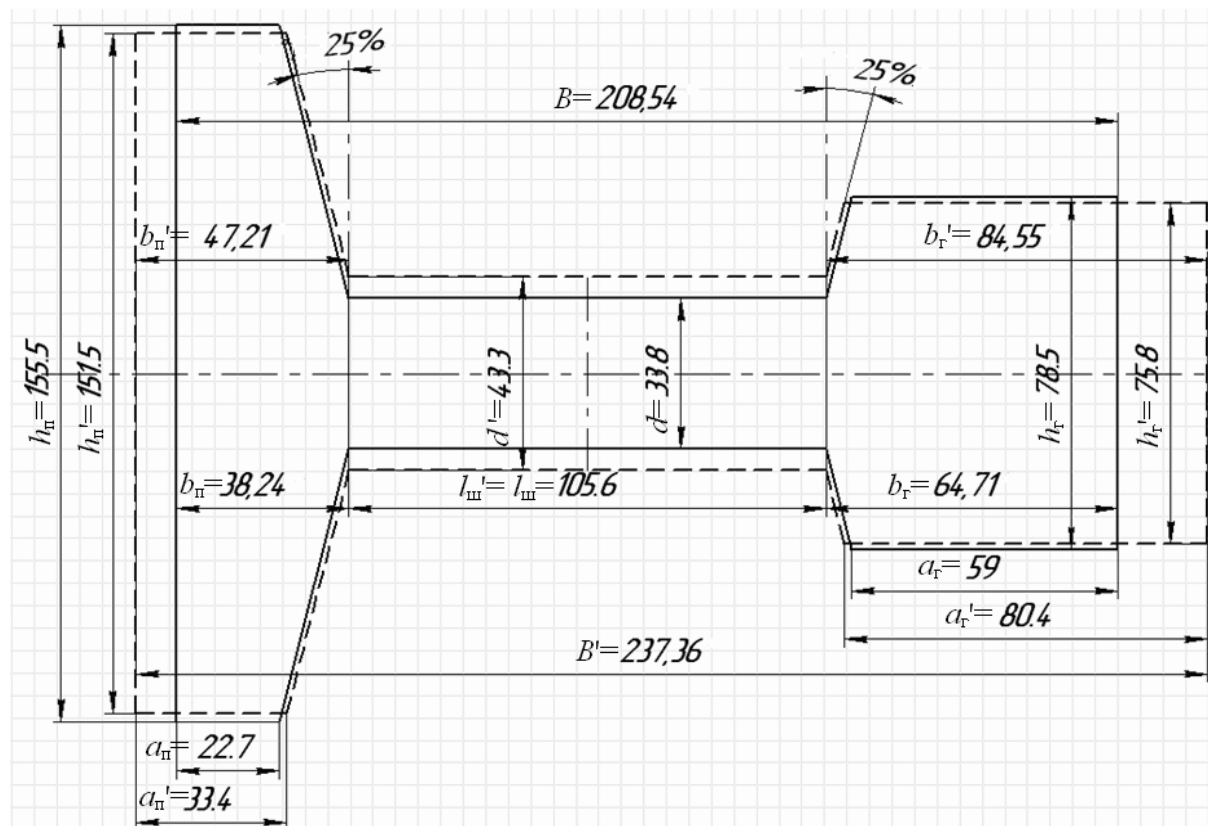


Рис. 1. Размеры универсального калибра и задаваемого в него раската (пунктирные линии)

С учетом указанной исходной информации в системе DEFORM последовательно решали задачи изменения формы раската, распределения интенсивности главных деформаций $\bar{\epsilon}$, напряжений $\bar{\sigma}$, скоростей деформации и определения интегральных значений сил на горизонтальные и вертикальные валки. Результаты решения отображали на цветовых полях (эпюрах) распределения расчетных параметров (деформаций, напряжений, сил и т.п.) в поперечных и продольных сечениях раската.

При моделировании процесса входа раската в калибр установили, что вследствие несимметричности рельсового профиля происходит изгиб заднего конца полосы в сторону подошвы (рис. 2а). При этом получается накатывание горизонтального вала на боковую внутреннюю поверхность головки и образование дефекта (заката) в месте соединения головки с шейкой. Такое искривление заднего конца раската наблюдали авторы работы [8] при проведении экспериментальных исследований на лабораторном стане. Для предотвращения его авторами было предложено сдвигать оси вертикальных валков по направлению или против направления прокатки относительно плоскости осей горизонтальных валков [9; 10]. Однако реа-

лизовать такой сдвиг вертикальных валков практически оказалось невозможным из-за усложнения конструкции универсальных рабочих клеток. Для устранения указанного изгиба заднего конца полосы достаточно применить вводные направляющие линейки, что и делают на зарубежных рельсопрокатных станах [2].

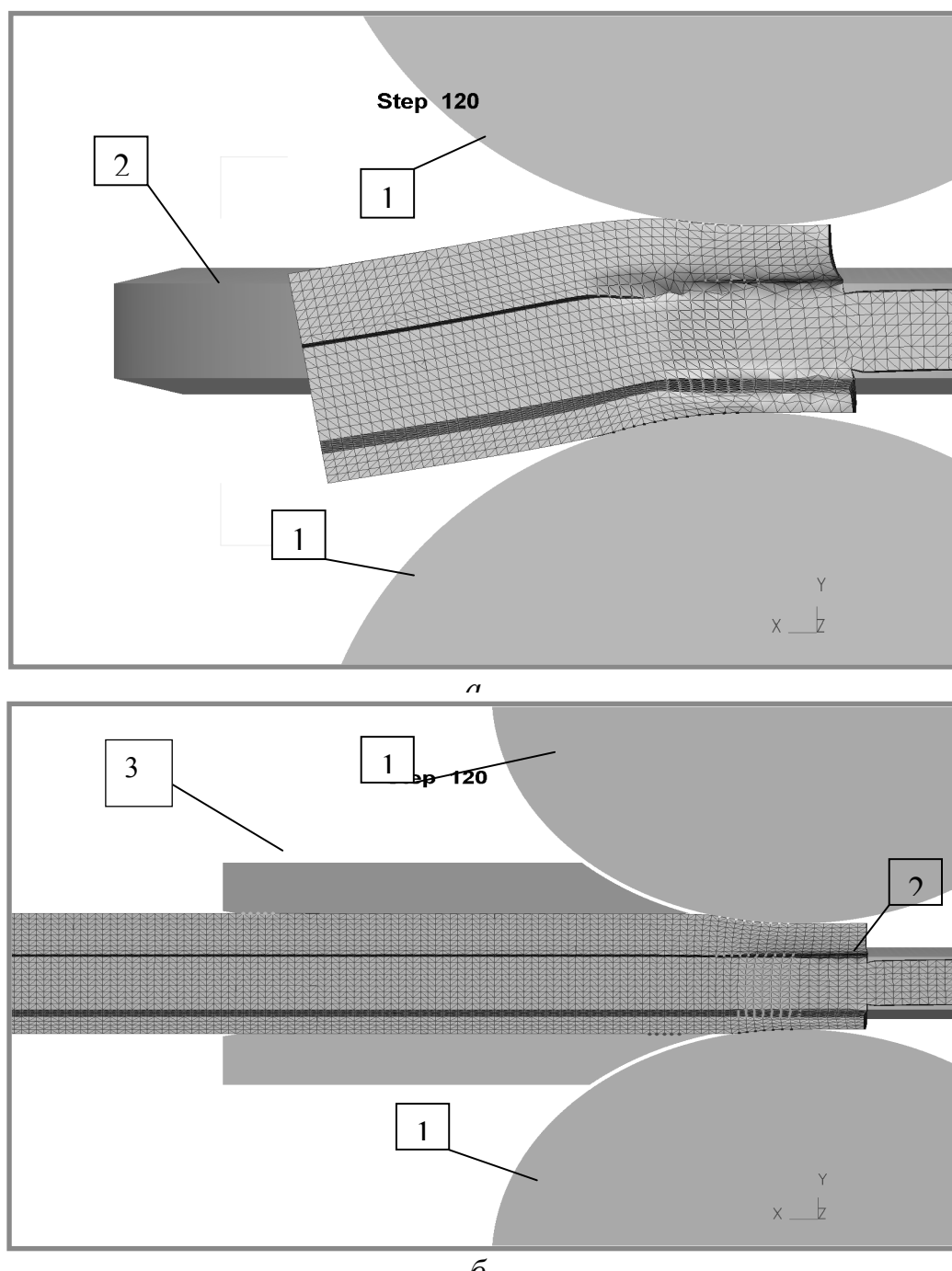


Рис. 2. Моделирование условий входа раската в калибр без применения вводных направляющих линеек (а) с применением вводных направляющих линеек (б): 1 – вертикальные валки; 2 – горизонтальный валок; 3 – вводные направляющие линейки

Моделирование процесса прокатки рельсов с такими линейками показало, что при условии применения их искривления заднего конца раската и образования дефектов не происходит (рис. 2б), так как со стороны направляющей линейки возникает усилие, выпрямляющее полосу. Установлено также, что при одинаковых коэффициентах вытяжки по подошве и головке искривления переднего конца раската, как правило, не наблюдается.

Исследование изменения формы прямоугольной координатной сетки, нанесенной на поверхность исходного раската (рис. 3а), позволило сделать вывод о том, что в очаге деформации по всей контактной поверхности шейки получается зона отставания (поперечные линии сетки имеют выпуклость в сторону входа раската в валки), а зона опережения получается только на внутренней боковой поверхности фланцев (поперечные линии сетки на фланцах сдвинуты в направлении прокатки). При этом на заднем конце полосы получается местное удлинение по шейке – так называемый «язык» (рис. 3б), который должен способствовать улучшению условий захвата раската в следующем, реверсивном проходе.

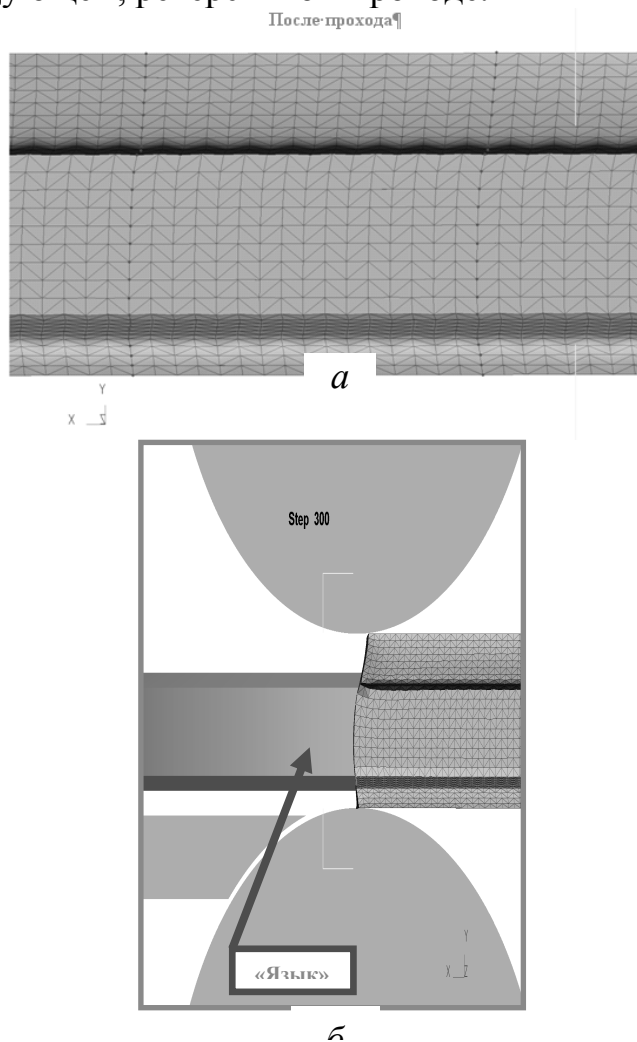


Рис. 3. Изменение координатной сетки на контактной поверхности полосы (а) и образование «языка» на заднем конце раската (б)

В результате исследования формоизменения металла в поперечном сечении раската (рис. 4) установили, что под действием обжатия шейки и фланцев профиля наблюдается неравномерное по ширине изменение высоты подошвы и головки: на контакте с вертикальными валками получается приращение фланцев, а в месте контакта их с боковой поверхностью горизонтального валка наблюдается утяжка. При этом контур свободной поверхности фланцев получается криволинейным и характеризуется переменным по толщине фланцев коэффициентом приращения подошвы $\beta_{\text{п}} = H_{\text{п}}/H'_{\text{п}} = 1,030 \div 0,975$ и головки $\beta_{\text{г}} = H_{\text{г}}/H'_{\text{г}} = 1,053 \div 0,938$. Изменение соотношения коэффициентов вытяжки по элементам рельсового профиля оказывает существенное влияние на величину приращения фланцев. Например, при увеличении коэффициента вытяжки (обжатия) шейки с 1,281 до 1,500 без изменения коэффициентов обжатия фланцев происходит уменьшение коэффициентов приращения подошвы до $\beta_{\text{п}} = 1,007 \div 0,958$ и головки до $\beta_{\text{п}} = 1,044 \div 0,927$, а уменьшение $\lambda_{\text{ш}}$ до 1,1 приводит к увеличению $\beta_{\text{п}}$ до $1,070 \div 1,005$ и $\beta_{\text{г}}$ до $1,082 \div 0,948$. Такой характер изменения высоты фланцев рельсового профиля качественно подтверждается экспериментальными данными В.К. Смирнова и А.Р. Бондина [8]. Указанные закономерности приращения (утяжки) фланцев необходимо учитывать при определении высотного обжатия подошвы и головки в горизонтальных вспомогательных калибрах для того, чтобы получить требуемую форму и размеры фланцев готового профиля.

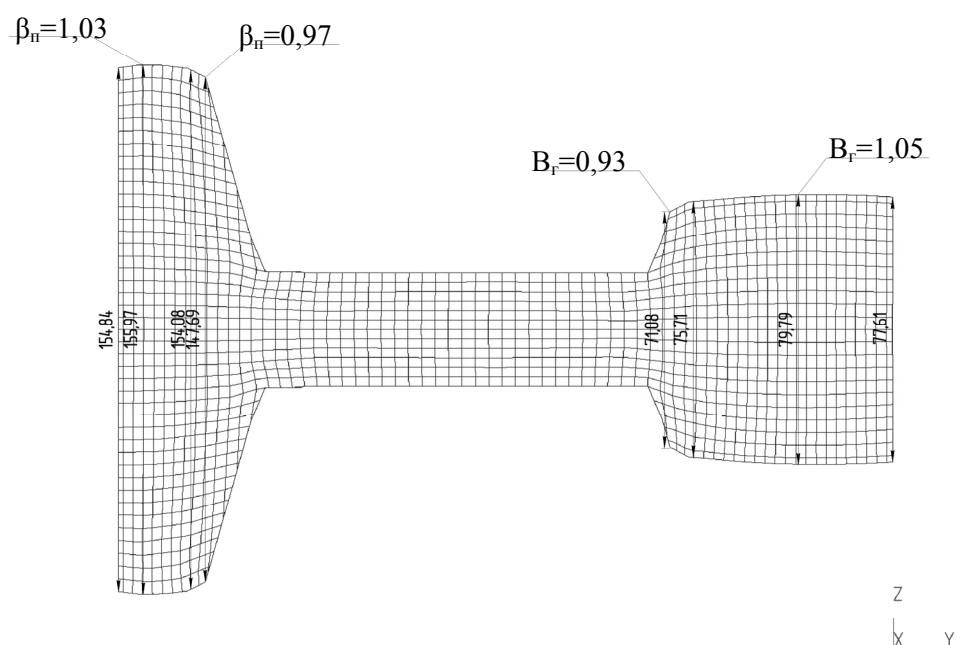


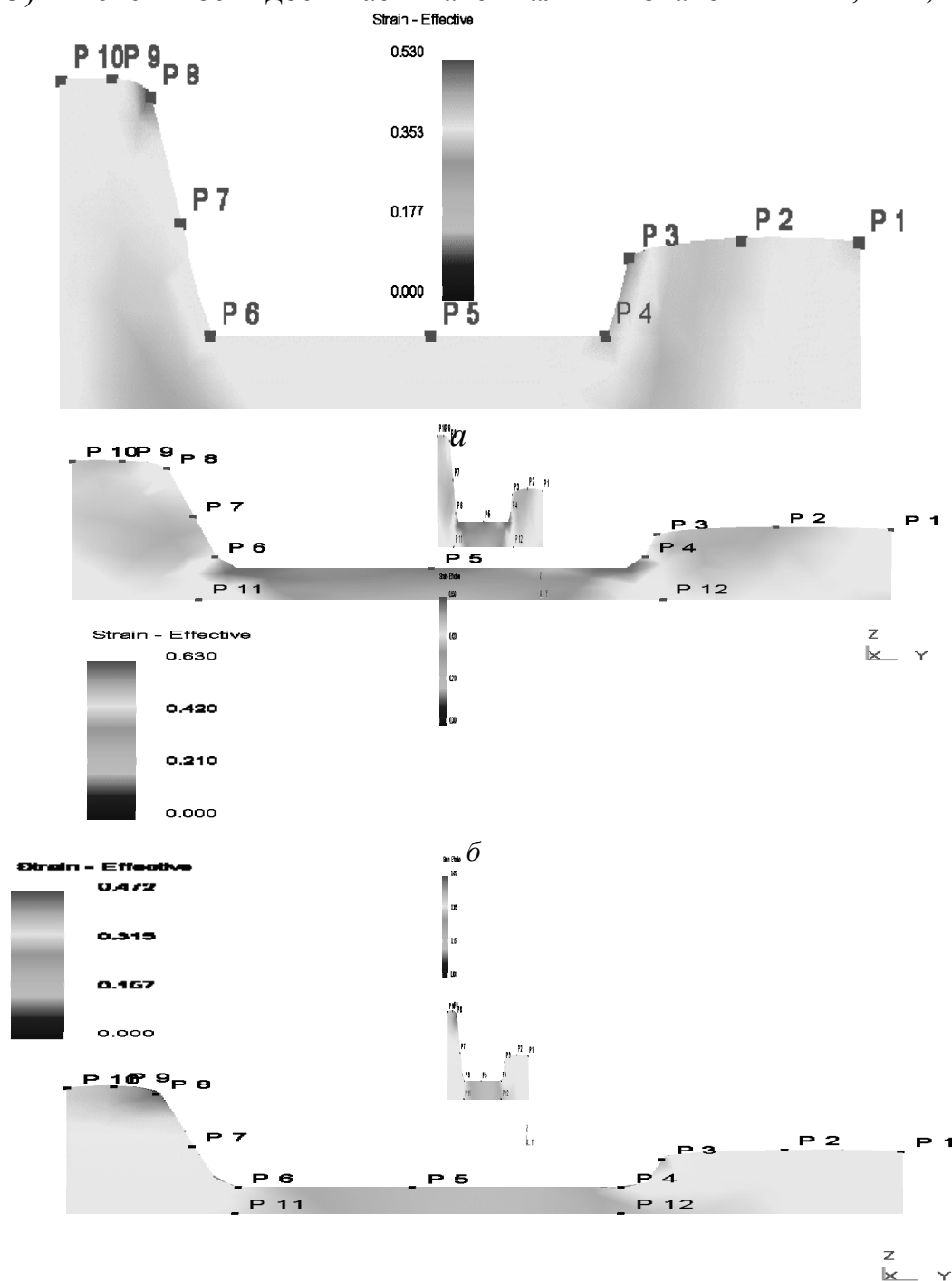
Рис. 4. Изменение координатной сетки в поперечном сечении раската при прокатке в универсальном калибре с одинаковым коэффициентом вытяжки по шейке и фланцам

На рис. 4 видно, что вертикальные линии координатной сетки по всему сечению продеформированного профиля практически не искривляются (незначительное отклонение их от вертикали наблюдается только в месте соединения шейки и фланцев). Это свидетельствует о том, что при одинаковых вытяжках $\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$ перетекание металла по элементам не происходит. При моделировании процесса прокатки с нарушением указанного равенства в случае, когда $\lambda_{ш} > \lambda_{п} = \lambda_{г}$, наблюдается перетекание металла из шейки в подошву и головку (вертикальные линии изгибаются выпуклостью в сторону фланцев), а при $\lambda_{ш} < \lambda_{п} = \lambda_{г}$, наоборот, металл перетекает из фланцев в шейку (вертикальные линии на фланцах изгибаются выпуклостью в сторону шейки).

При моделировании напряженно-деформированного состояния металла в программе DEFORM 3D рассчитывается средняя интенсивность главных деформаций $\bar{\varepsilon}$ и напряжений $\bar{\sigma}$ в узлах координатной сетки. На рис. 5 представлено распределение интенсивности деформации $\bar{\varepsilon}$ в поперечном сечении рельса, прокатываемого с одинаковыми и различными вытяжками по элементам профиля. Из анализа полученных данных следует, что наиболее благоприятное распределение интенсивности деформаций наблюдается при одинаковых коэффициентах вытяжки по шейке и фланцам (рис. 5а). В таком случае по всему поперечному сечению шейки и на значительной глубине приконтактного слоя головки и подошвы с вертикальными валками получается одинаковое значение $\bar{\varepsilon}$, составляющее 0,38. Это обеспечивает получение плотной и мелкозернистой структуры металла на большей части сечения рельсового профиля, что особенно важно для повышения прочности и износостойкости головки рельса. В средних слоях головки и подошвы интенсивность деформации получается ниже (до 0,3), а максимальное значение $\bar{\varepsilon} = 0,5$ наблюдается в местах утяжки фланцев (точки Р8 и Р3 на рис. 5а).

С увеличением коэффициента вытяжки шейки до 1,5 при прежних значениях $\lambda_{п} = \lambda_{г} = 1,281$ (рис. 5б) существенно возрастает интенсивность деформации по всему сечению шейки (до 0,621 в области точек Р4 – Р5 – Р6 – Р11 – Р12), а также на контакте с боковой поверхностью горизонтального вала (до 0,44 – 0,47 в точка Р3 – Р4). Однако снижается глубина проработки приконтактных слоев головки и подошвы с вертикальными валками. В целом распределение интенсивности деформации получается крайне неравномерным. При уменьшении $\lambda_{ш}$ до 1,1 без изменения коэффициентов вытяжки по фланцам (рис. 5в) интенсивность деформации по всему сечению шейки снижается до величины $\bar{\varepsilon} = 0,241 \div 0,289$, но существенно улучшается проработка металла практически по всему сечению головки и подошвы ($\bar{\varepsilon} = 0,36 \div 0,4$ на большей части сечения обоих фланцев). При

этом в отдельных точках, например, в местах утяжки фланцев (точки P8 и P3) интенсивность достигаем максимальных значений $\varepsilon = 0,7 \div 0,6$.



б

Рис. 5. Распределение интенсивности деформации в поперечном сечении рельсового профиля: а) при $\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$; б) при $\lambda_{ш} > \lambda_{п} = \lambda_{г}$; в) при $\lambda_{ш} < \lambda_{п} = \lambda_{г}$

Изменение напряженного состояния металла в очаге деформации имеет общий характер для всех трех рассмотренных выше вариантов рас-

пределения коэффициентов вытяжки по элементам профиля и наиболее ярко проявляется в случае, когда $\lambda_{ш} > \lambda_{п} = \lambda_{г}$ (рис. 6). При входе раската в очаг деформации и при выходе из него имеется узкая зона напряжений $\bar{\sigma} = 100 \div 130$ МПа (зеленый цвет на эпюре). На большей части шейки и фланцев напряжения составляют $\bar{\sigma} = 150 \div 170$ МПа (желтый цвет). Максимальные напряжения величиной до 210 МПа (красный цвет) наблюдаются в местах соединения шейки и фланцев (точки Р6 и Р4), а также в местах утяжки фланцев (точки Р3 и Р8). В средней части очага деформации по шейке (окрестности точки Р5) наблюдается увеличение $\bar{\sigma}$ до 180 – 190 МПа (розовый цвет). Однако в случаях, когда $\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$ и $\lambda_{ш} < \lambda_{п} = \lambda_{г}$, такого увеличения практически не происходит. Общей закономерностью для всех трех вариантов является распространение напряжений $\bar{\sigma} = 50 \div 70$ МПа в область переднего и заднего жестких концов на глубину, сопоставимую с длиной геометрического очага деформации (голубой и бирюзовый цвета на рис. 6).

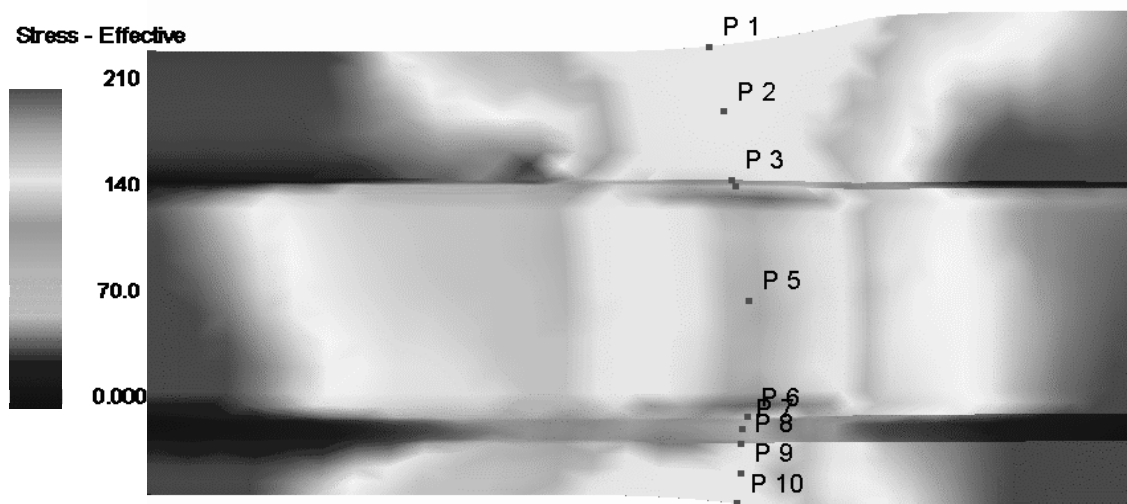


Рис. 6. Распределение напряжений в очаге деформации при $\lambda_{ш} > \lambda_{п} = \lambda_{г}$

Система DEFORM 3D позволила рассчитать абсолютные значения и характер изменения сил, действующих в процессе прокатки рельсов на горизонтальные и вертикальные валки, а также валковую арматуру. На рис. 7 показана характерная кривая изменения силы на горизонтальные валки за время прокатки рельсового раската длиной 1800 мм. На кривой четко видны три характерных периода: вход раската в очаг деформации (0,0439–0,161 с), установившийся процесс прокатки (0,161–0,511 с) и выход полосы из валков (0,511–0,600 с). Аналогичные кривые получены для сил, действующих на вертикальные валки и вводные линейки.

В таблице представлены расчетные значения сил при установившемся процессе прокатки рельсового профиля в рассчитанном универсальном калибре (см. рис. 1) по рассмотренным выше режимам с различным соче-

танием $\lambda_{ш}$, $\lambda_{п}$ и $\lambda_{г}$. Как видно из данных таблицы, при $\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$ получаются в какой-то мере оптимальные значения сил. Увеличение вытяжки (обжатия) по шейке при неизменных $\lambda_{п}$ и $\lambda_{г}$ приводит к закономерному увеличению силы на горизонтальные валки и к снижению сил на вертикальные валки. И наоборот, уменьшение $\lambda_{ш}$ вызывает снижение сил на горизонтальные и увеличение на вертикальные валки. Полученные расчетные значения сил прокатки по величине сопоставимы с теоретическими и экспериментальными данными авторов работы [8]. Для предотвращения изгиба заднего конца раската при входе в валки (см. рис. 2) требуются максимальные силы на линейку со стороны подошвы 155 кН и со стороны головки 76 кН, которые при изменении коэффициента вытяжки шейки уменьшаются.

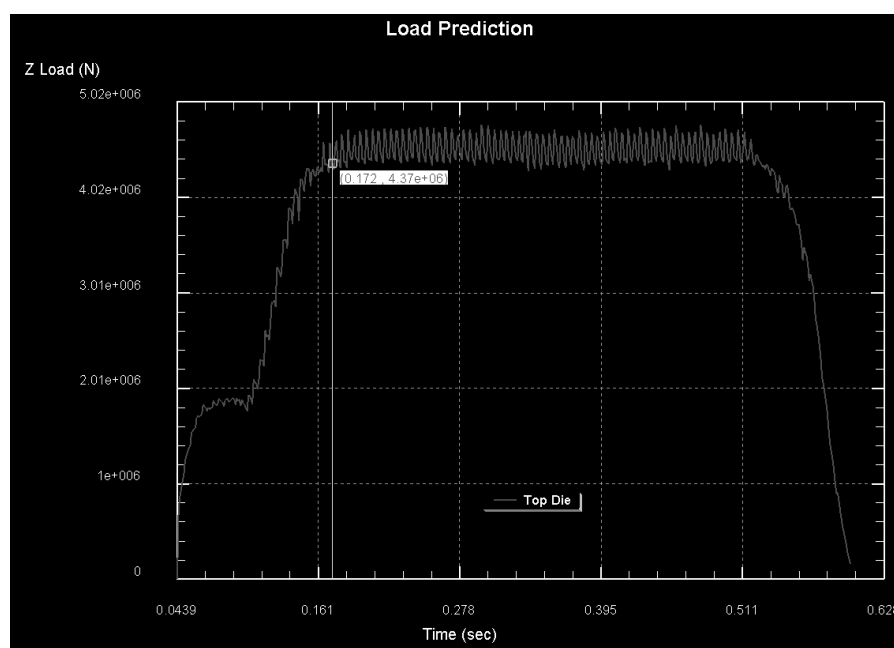


Рис. 7. Изменение в течение прохода силы прокатки на горизонтальные валки

Таблица

Расчетные значения сил, возникающих при прокатке рельсового
профиля в универсальной клетки, МН

Коэффициенты вытяжки		Силы на валки			Силы на вводные линейки	
$\lambda_{п} = \lambda_{г}$	$\lambda_{ш}$	Горизон- тальные	Вертикаль- ные со стороны по- дошвы	Вертикаль- ные со сто- роны голов- ки	Со сторо- ны подош- вы	Со сторо- ны голов- ки
1,281	1,281	3,45	1,17	0,623	0,155	0,076
1,281	1,500	4,37	1,09	0,577	0,109	0,049
1,281	1,100	1,96	1,49	0,680	0,089	0,037

Описанные выше закономерности, полученные при моделировании процесса прокатки в рассмотренном калибре (см. рис. 1), подтверждаются аналогичными расчетами в системе DEFORM 3D для любых других универсальных рельсовых калибров.

Выводы

1. Система DEFORM 3D позволяет получать достоверные результаты при компьютерном моделировании процесса прокатки рельсовых профилей в универсальных четырехвалковых калибрах и может быть эффективно применена при разработке рациональных технологических режимов производства рельсов на современных рельсобалочных станах.

2. Установлено, что расчетные режимы обжатий при прокатке рельсов в универсальных калибрах, основанные на равенстве коэффициентов вытяжки по элементам профиля, создают наиболее благоприятные условия для получения высококачественных рельсов.

Список использованных источников

1. Матвеев Б.Н. Современные рельсопрокатные станы // Бюллетень «Черная металлургия» М.: ОАО «Черметинформация». 2006. № 2. С. 40–43.
2. Свейковски У., Нерзак Т. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Cool // Металлургическое производство и технология (МРТ). Русское издание. 2006. № 2. С. 50–56.
3. Современные технологии производства транспортного металла (материалы 3-й Междунар. конф. «Трансмет-2007»). Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. С. 19–21, 33–37, 276–286.
4. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Литвинов Р.А. Развитие методов расчета калибровок валков для прокатки рельсов // Производство проката. 2008. № 1. С. 29–33.
5. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Литвинов Р.А. Расчет формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах // Известия вузов «Черная металлургия». 2008. № 3. С. 51–54.
6. Desing Environment for FORMing. Сайт компании Scientific Forming Technologies Corporation [Электронный ресурс]. URL: www.deform.com.
7. Бузлаев Д.В. Применение системы DEFORM для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением / Д. В. Бузлаев, В.А. Кропотов, А.А. Сахарчук, А.А. Харламов. М., 2001. С. 1–13.
8. Смирнов В.К., Бондин А.Р., Михайленко А.М. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях // Производство проката. 2002. № 12. С. 24–30.
9. А.с. СССР 1225622. Способ изготовления рельсов / В.К. Смирнов, В.А. Паршин, А.Р. Бондин [и др.] // Б.И. 1986. № 15.
10. А.с. СССР 1423197. Способ изготовления рельсов / В.К. Смирнов, В.А. Паршин, А.Р. Бондин [и др.] // Б.И. 1988. № 34.