

УДК 621.771.26.014-424

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОКАТКИ РЕЛЬСОВОГО ПРОФИЛЯ В УНИВЕРСАЛЬНОМ КАЛИБРЕ. СООБЩЕНИЕ 2

Шварц Д.Л., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением» (omd@mtf.ustu.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Поставленная ранее вариационная задача о прокатке рельсов в универсальных калибрах реализована в системе MathCAD. Численная реализация позволила определить закономерности формоизменения металла при получении равномерной деформации (одинакового коэффициента вытяжки) по всем элементам рельсового профиля. Установлены зависимости коэффициентов бокового обжатия фланцев головки и подошвы рельсового раската, а также коэффициентов приращения-утяжки фланцев от геометрических параметров очага деформации и условий трения. Эти закономерности описаны инженерными формулами для расчета указанных коэффициентов и положены в основу научно-обоснованной методики расчета рациональных режимов обжатий и калибровок валков для прокатки высококачественных рельсов на современных рельсобалочных станах.

Ключевые слова: рельс, универсальный калибр, формоизменение металла, элементы рельсового профиля, головка, подошва, шейка, коэффициент вытяжки, коэффициент обжатия, приращение-утяжка фланца.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-526-530

С использованием разработанной математической модели [1] и способа ее численной компьютерной реализации проведен вычислительный эксперимент по определению основных закономерностей формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах. При этом использован следующий комплекс исходных безразмерных параметров, характеризующих реальные условия прокатки рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах: приведенный диаметр горизонтальных валков $A = D_r/d = 42 \div 67$; приведенная длина шейки рельсового профиля $\tilde{l} = l/d = 3,7 \div 5,8$; относительная высота фланцев подошвы $\tilde{h}_n = h_n/b_n = 1,6 \div 3,1$ и головки $\tilde{h}_r = h_r/b_r = 0,5 \div 1,1$; коэффициент обжатия шейки $1/\eta_{ш} = d'/d$, принимаемый, по условию задачи, равным коэффициенту вытяжки шейки $\lambda_{ш} = 1,10 \div 1,35$; уклон внутренних граней фланцев $\text{tg } \varphi = 0,25$; показатель трения $\psi = 0,6 \div 1,0$. Приведенный диапазон изменения исходных параметров соответствует деформации рельсового раската в универсальных калибрах от разрезной заготовки до чистового рельса.

Для указанных условий был составлен план проведения численных расчетов по решению с использованием разработанной в работе [1] математической модели вариационных задач при изменении каждого из исходных параметров на трех уровнях. В целом расчеты были проведены при 50-ти различных сочетаниях исходных параметров, в каждом из которых при заданном коэффициенте вытяжки $\lambda_{ш} = 1/\eta_{ш}$ были определены коэффициенты обжатия подошвы $1/\eta_n$ и головки $1/\eta_r$, коэффициенты приращения

(или утяжки) фланцев β_n и β_r , а также коэффициент опережения ν . Таким образом, в результате решения получили массив расчетных данных, выражающих зависимости

$$1/\eta_n, 1/\eta_r, \beta_n, \beta_r, \nu = f(1/\eta_{ш}, A_r, \tilde{h}_n, h_r) \quad (1)$$

при равномерной деформации всех элементов рельсового профиля согласно условию $\lambda_{ш} = \lambda_n = \lambda_r$.

Анализ полученных расчетных данных позволил определить закономерности формоизменения металла при равномерной деформации элементов рельсового профиля в универсальных калибрах.

В результате анализа установлено, что коэффициенты обжатия фланцев подошвы и головки существенно зависят от геометрических параметров очага деформации. Увеличение коэффициента обжатия шейки приводит к практически пропорциональному и вполне объяснимому увеличению коэффициентов обжатия фланцев (рис. 1): для сохранения постоянной по шейке и фланцам вытяжки требуется определенное количество металла, смещаемого по толщине подошвы и головки. Изменение приведенного диаметра горизонтальных валков A оказывает обратное влияние (см. рис. 1): с увеличением A коэффициенты обжатия подошвы и головки уменьшаются. Это объясняется тем, что с увеличением приведенного диаметра горизонтальных валков увеличивается длина контакта металла с их внутренней поверхностью и соответственно увеличивается сопротивление течению металла в длину фланцев. Поэтому постоянство заданного коэффициента вытяжки профи-

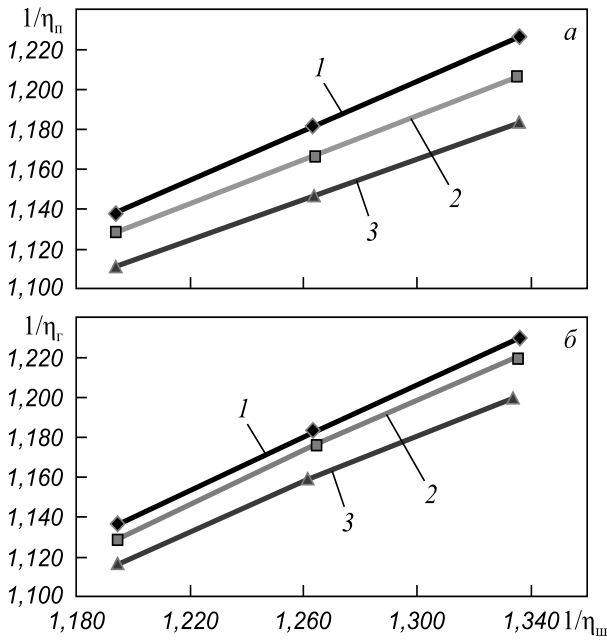


Рис. 1. Зависимость коэффициентов обжатия подошвы и головки от коэффициента обжатия шейки при различных значениях приведенного диаметра валков A :
1 – 42; 2 – 56; 3 – 67

Fig. 1. Dependence of the foot and head reduction ratio on the neck reduction ratio for different values of the reduced diameter of the rollers A :
1 – 42; 2 – 56; 3 – 67

ля достигается при уменьшении обжатия фланцев подошвы и головки.

Зависимость коэффициентов обжатия подошвы и головки от относительной высоты фланцев $\tilde{h}_п$ и $\tilde{h}_г$ представлена на рис. 2. С ростом $\tilde{h}_п$ и $\tilde{h}_г$ коэффициенты бокового обжатия фланцев уменьшаются при любых коэффициентах обжатия шейки $1/\eta_ш$: более высокие и тонкие фланцы для обеспечения постоянства вытяжки по элементам профиля требуют меньших обжатий по толщине. Именно поэтому коэффициенты обжатия фланцев подошвы $1/\eta_п = 1,10 \div 1,24$ (см. рис. 2, $a - \varepsilon$) всегда получаются меньше коэффициентов обжатия головки $1/\eta_г = 1,16 \div 1,34$ (см. рис. 2, $\varepsilon - e$). Характер влияния относительной высоты фланцев на коэффициент их обжатия сохраняется одинаковым при любом значении приведенного диаметра валков ($A = 42 \div 67$), что видно из сравнения кривых $1/\eta_п$ и $1/\eta_г = f(A)$ на рис. 2, $a - \varepsilon$ и $2, \varepsilon - e$ и объясняется условиями контактного взаимодействия металла с боковыми гранями горизонтальных валков.

Закономерности высотной деформации фланцев рельсового раската по результатам решения вариационных задач представлены на рис. 3. Установлено, что при прокатке с одинаковыми коэффициентами вытяжки по элементам рельсового профиля при любых сочетаниях геометрических параметров наблюдается утяжка фланцев подошвы по усредненному контуру

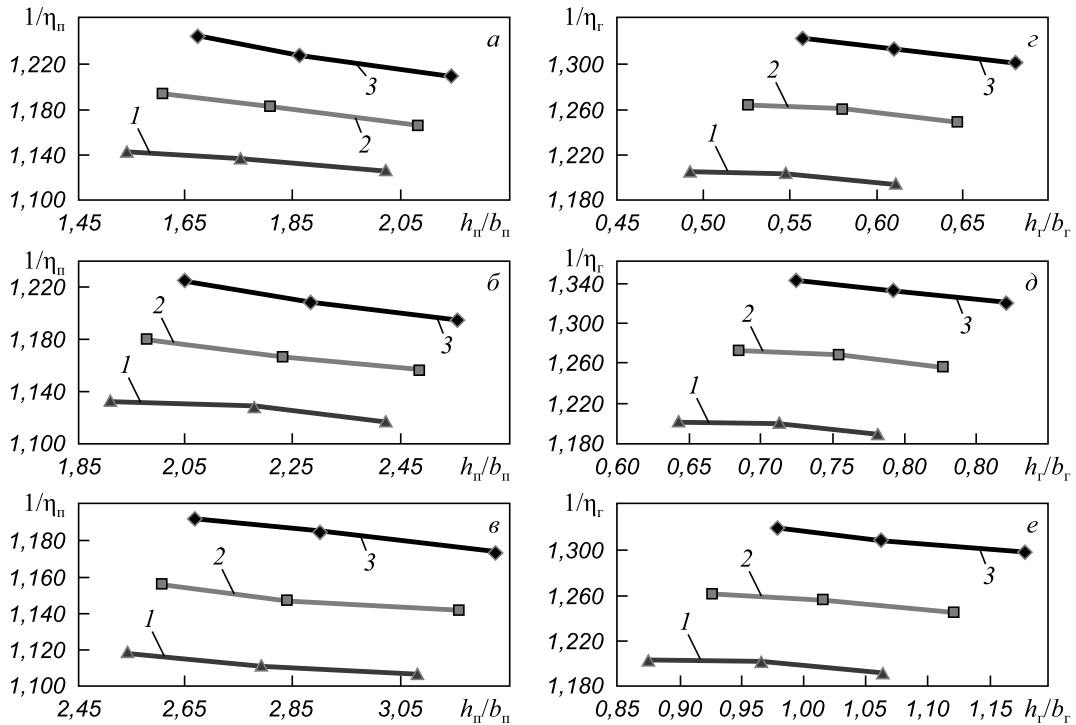


Рис. 2. Зависимость коэффициентов обжатия подошвы ($a - \varepsilon$) и головки ($\varepsilon - e$) от относительной высоты фланцев при различных значениях коэффициента обжатия шейки $1/\eta_ш$:
1 – 1,193; 2 – 1,263; 3 – 1,336 и приведенного диаметра валков A : $a, \varepsilon - 42$; $б, \delta - 56$; $в, c - 67$

Fig. 2. Dependence of the reduction ratio of the sole ($a - \varepsilon$) and head ($\varepsilon - e$) on the relative height of the flanges for different values of the neck reduction ratio $1/\eta_ш$:
1 – 1,193; 2 – 1,263; 3 – 1,336 and the relative rolls diameter A : $a, \varepsilon - 42$; $б, \delta - 56$; $в, c - 67$

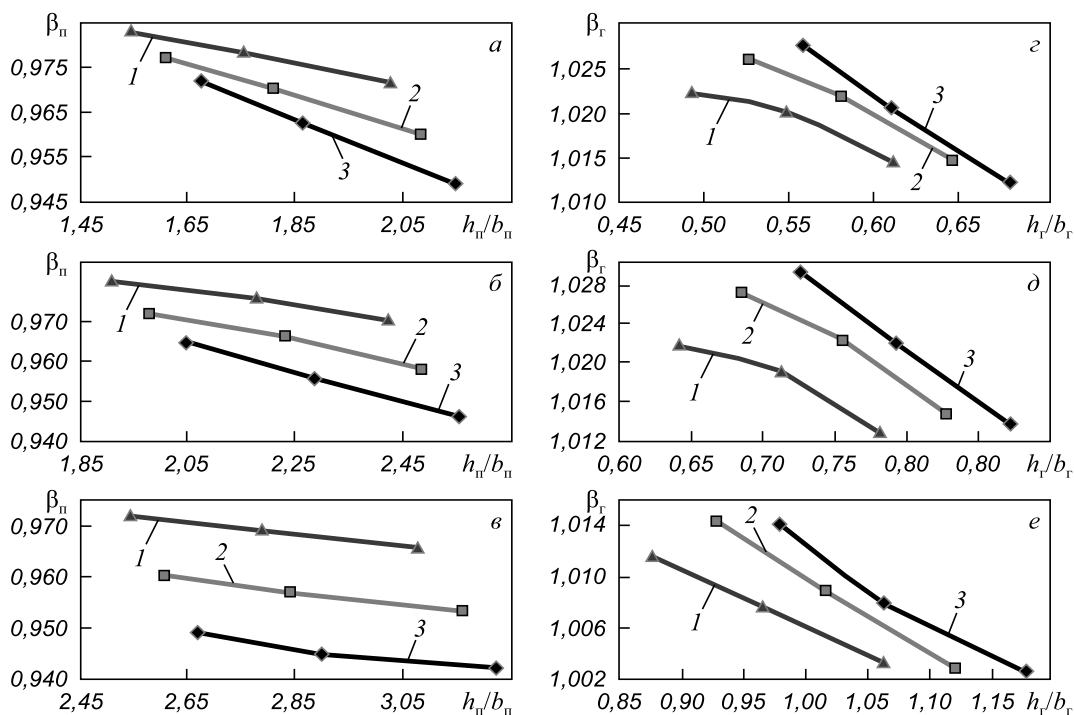


Рис. 3. Зависимость коэффициентов приращения (утяжки) подошвы (а – в) и головки (z – e) от относительной высоты фланцев при различных значениях коэффициента обжатия шейки $1/\eta_{ш}$:
 1 – 1,193; 2 – 1,263; 3 – 1,336 и приведенного диаметра валков A: а, z – 42; б, д – 56; в, с – 67

Fig. 3. Dependence of the coefficient of increment (shrinkage) of the sole (a – в) and the head (z – e) from the relative height of the flanges for different values of the coefficient of spindle reduction $1/\eta_{ш}$:
 1 – 1.193; 2 – 1.263; 3 – 1.336 and the reduced diameter of the rollers A: а, z – 42; б, д – 56; в, с – 67

(контур q на рис. 1 в работе [1]) и приращение фланцев головки, так что коэффициент утяжки подошвы $\beta_{ш} = 0,945 \div 0,980$ (см. рис. 3, а – в), а приращения головки $\beta_{г} = 1,002 \div 1,026$ (см. рис. 3, z – e).

С ростом коэффициента обжатия шейки утяжка подошвы и приращение головки увеличиваются, так как увеличиваются коэффициенты обжатия фланцев (см. рис. 1), а, следовательно, возрастает длина очага деформации по подошве и головке. Поскольку длина очага деформации больше его ширины и в том и в другом случае, то в соответствии с законом наименьшего сопротивления интенсивность течения металла в поперечном направлении увеличивается. Таким образом, с ростом $1/\eta_{ш}$ увеличивается утяжка подошвы (рис. 3, а – в) и приращение головки (рис. 3, z – e). Аналогичное влияние на течение металла при высотной деформации подошвы и головки оказывает изменение приведенного диаметра валков.

С ростом приведенной высоты фланцев $\tilde{h}_{ш}$ и $\tilde{h}_{г}$ коэффициенты приращения-утяжки уменьшаются (см. рис. 3), что объясняется увеличением высоты контактной поверхности фланцев раската с вертикальными валками и боковыми гранями горизонтальных валков. Соответственно этому увеличивается сопротивление течению металла по высоте фланцев.

На формоизменение фланцев существенное влияние оказывает показатель трения ψ . Увеличение его также

приводит к уменьшению коэффициентов приращения-утяжки фланцев (рис. 4). Это объясняется ростом сил трения на контактных поверхностях фланцев с горизонтальными и вертикальными валками.

Таким образом, полученные расчетные закономерности формоизменения металла в универсальных калибрах соответствуют общим физическим представлениям о процессах продольной прокатки и прокатки рельсов в частности [2 – 4]. Кроме того, они подтверждаются результатами компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D [5, 6].

С целью практического использования в инженерных расчетах, описанные выше результаты теоретического решения (см. рис. 1 – 4) аппроксимированы с помощью программного комплекса Excel в виде следующих формул для определения:

- коэффициентов обжатия фланцев подошвы и головки

$$1/\eta_{шb} = 1 + 0,583(1/\eta_{ш} - 1)^{0,96} A^{0,125} \tilde{h}_{ш}^{-0,588} \psi^{-0,085}; \quad (2)$$

$$1/\eta_{гb} = 1 + 0,493(1/\eta_{ш} - 1)^{1,022} A^{0,153} \tilde{h}_{г}^{-0,407} \psi^{-0,051}; \quad (3)$$

- коэффициентов приращения фланцев подошвы и головки

$$\beta_{ш} = 1 - 0,614(1/\eta_{ш} - 1)^{1,028} A^{-0,703} \tilde{h}_{ш}^{1,594} \psi^{1,129}; \quad (4)$$

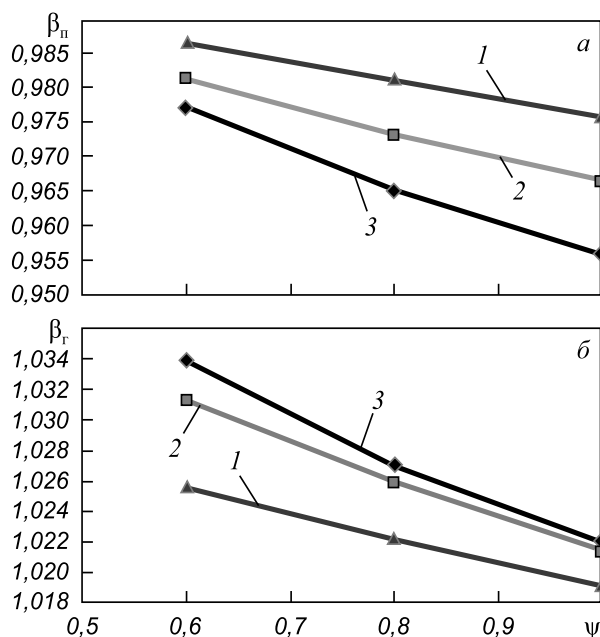


Fig. 4. Dependence of the coefficient of the sole and the head increment (shrinkage) of the friction factor ψ at different values of the coefficient of spindle reduction $1/\eta_{sh}$: 1 – 1,193; 2 – 1,263; 3 – 1,336

Fig. 4. Dependence of the coefficient of the sole and the head increment (shrinkage) of the friction factor ψ at different values of the coefficient of spindle reduction $1/\eta_{sh}$: 1 – 1,193; 2 – 1,263; 3 – 1,336

$$\beta_r = 1 + 0,229 (1/\eta_{sh} - 1)^{1,376} (A/100)^{3,69} \tilde{h}_n^{-5,018} \psi^{-1,197}. \quad (5)$$

Полученные расчетные зависимости и формулы создают теоретическую основу для методики расчета рациональных режимов обжатий и калибровок валков при прокатке рельсов. Общий алгоритм такого расчета включает: распределение коэффициентов вытяжки по проходам λ_{sh} ; определение по формулам (2) – (5) коэффициентов обжатия фланцев $1/\eta_{ni}$ и $1/\eta_{ri}$, а также коэффициентов приращения-утяжки β_{ni} и β_{ri} ; определение размеров раскатов и калибров по найденным коэффи-

циентам с использованием указанного выше комплекса исходных безразмерных параметров.

Выводы. Численная реализация в системе MathCAD поставленной ранее [1] вариационной задачи о прокатке рельсов в универсальных калибрах позволила определить закономерности формоизменения металла при получении равномерной деформации (одинакового коэффициента вытяжки) по всем элементам рельсового профиля.

Установленные закономерности описаны инженерными формулами для расчета коэффициентов обжатия фланцев, приращения-утяжки подошвы и головки и способствуют развитию научно обоснованной методики расчета рациональных режимов обжатий и калибровок валков для прокатки высококачественных рельсов на современных рельсобалочных станах [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шварц Д.Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 6. С. 448 – 454.
2. Смирнов В.К., Бондин А.Р., Михайленко А.М. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях // Производство проката. 2003. № 12. С. 24 – 30.
3. Головатенко А.В., Волков К.В., Дорофеев В.В., Степанов С.В. и др. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов // Производство проката. 2014. № 2. С. 25 – 39.
4. Свейковски У., Нерзак Т. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Coo I // Металлургическое производство и технология (МРТ). Русское издание. 2006. № 2. С. 50 – 56.
5. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Литвинов Р.А. Приращение и утяжка фланцев при прокатке рельсов в универсальных калибрах // Производство проката. 2010. № 7. С. 27 – 30.
6. Шилов В.А., Литвинов Р.А., Шварц Д.Л. Моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах // Производство проката. 2009. № 8. С. 20 – 25.
7. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Литвинов Р.А. Расчет формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 3. С. 51 – 54.

Поступила 21 октября 2014 г.

THEORETICAL INVESTIGATION OF ROLLING RAIL PROFILE IN THE UNIVERSAL CALIBER. REPORT 2

Shvarts D.L., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming" (omd@mtf.ustu.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. Set earlier variational problem of rolling rails in the universal passes was implemented and solved in the MathCAD. Numerical implementation allowed determining the principles of metal forming in the maintenance of uniform deformation (the same reduction ratio) on all elements of the rail profile. The dependences of the coefficients of side compression of head flanges and base of a rail were deter-

mined, and of the coefficients of the increment and pulling-down of flanges on the geometric parameters of the deformation zone and the friction conditions. These principles are described by engineering formulas to calculate indicated coefficients and they are the basis for scientifically based method of calculating rational scheme of reduction schedule and roll pass design for high-quality rails rolling on modern rolling mills.

Keywords: rail, universal caliber, forming of metal, elements of the rail profile: head, foot, neck, elongation ratio; reduction ratio; increment and shrinkage of flange.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-526-530

REFERENCES

1. Shvarts D.L. Theoretical investigation of rolling rail profile in the universal caliber. Report . *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 6, pp. ... (In Russ.).
2. Smirnov V.K., Bondin A.R., Mikhailenko A.M. The research of rails rolling in universal calibers. *Proizvodstvo prokata*. 2003, no. 1224-30. (In Russ.).
3. Golovatenko A.V, Volkov K.V, Dorofeev V.V., Stepanov S.V. etc. Development of rolling technology and the calibration process of rails. *Proizvodstvo prokata*. 2014, no. 2, pp. 25–39. (In Russ.).
4. Sveikovski U., Nerzak T. Manufacture of rails of high quality with a compact universal stands and technologies Rail Cool. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya (MRT)*. 2006, no. 2, pp. 50–56. (In Russ.).
5. Shilov V.A., Shvarts D.L., Litvinov R.A. Increment and shrinkage of flanges at rails rolling in universal calibers. *Proizvodstvo prokata*. 2010, no. 7, pp. 27–30. (In Russ.).
6. Shilov V.A., Litvinov R.A., Shvarts D.L. Modeling of rails rolling in universal calibers. *Proizvodstvo prokata*. 2009, no. 8, pp. 20–25. (In Russ.).
7. Shilov V.A., Shvarts D.L., Litvinov R.A. The calculation of metal forming at rails rolling in universal calibers. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 3, pp. 51–54. (In Russ.).

Received November 21, 2014
