

УДК 621.771.014.2

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАСКАТКЕ ГИЛЬЗ В ТРЕХВАЛКОВОМ СТАНЕ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

Харитонов Е.А., к.т.н., доцент, старший научный сотрудник кафедры

«Обработка металлов давлением» (nx-omd@mail.ru)

Романенко В.П., к.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением»

Будников А.С., магистр, инженер кафедры «Обработка металлов давлением» (far128@yandex.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Рассмотрены основные особенности процесса винтовой раскатки стальных труб в трехвалковом стане винтовой прокатки. Учитывая различие в распределении удельных сил по очагу деформации, разработана методика расчета деформационных параметров процесса раскатки гильзы-трубы в очаге деформации на длинной оправке. Приведены методики расчета частных обжатий и площади контактной поверхности металла с валком в зонах обжатия по диаметру (редуцирования) и обжатия по стенке гильзы, которые учитывают тангенциальное истечение металла в зазоры между валками, характерное для процессов раскатки тонкостенных труб с соотношением диаметра к толщине стенки $D_T/S_T > 8$. Результаты исследования предназначены для промышленного использования при производстве труб с отношением $D_T/S_T = 8 - 15$ с допусками по толщине стенки $\pm 6\%$, по диаметру $\pm 0,5\%$. Результаты исследования позволяют расширить понимание особенностей процесса получения тонкостенных труб на трубопрокатных агрегатах с раскатными станами винтовой прокатки.

Ключевые слова: винтовая прокатка, ширина контактной поверхности, частное обжатие, зона редуцирования, зона обжатия, особенности контактной поверхности, удельная сила, входной участок, гребень вала, трехвалковый стан.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-167-172

Процесс винтовой раскатки труб используется для получения высокоточных труб, применяющихся при производстве подшипников, муфт, колец и других изделий из шарикоподшипниковых средне- и высоколегированных марок сталей, таких как ШХ-15, 20Х, 40Х, 32Г2С и др.

Процесс раскатки производится на длинной плавающей оправке. На рис. 1, а приведена схема очага деформации трехвалкового раскатного стана, валки которого повернуты на угол подачи β (в горизонтальной плоскости), обеспечивающий осевое перемещение заготовки и угол раскатки γ (в вертикальной плоскости). Очаг деформации состоит из четырех основных участков: входной конус, состоящий из участка редуцирования (посадки внутреннего диаметра гильзы на оправку) и участка обжатия перед гребнем, участка интенсивного обжатия гребнем, калибрующего участка и выходного участка.

В процессе раскатки, при входе в контакт металла с валком, в начале осуществляется редуцирование диаметра раската, затем обжатие стенки трубы. Удельная сила на этих участках различна. Можно привести пример процесса прошивки, где так же выделяются два участка очага деформации: участок прошивки и раскатки гильзы. Удельная сила металла на валок участка прошивки больше [1 – 7], что соответствует зоне обжатия стенки в раскатном стане. На участке раскатки удельная сила составляет 70 – 75 % удельной силы участка прошивки, что соответ-

ствует зоне редуцирования диаметра раската в раскатном стане. Поэтому необходимо рассматривать отдельно две зоны контактной поверхности металла с валком.

На рис. 1, б представлен разрез очага деформации раскатного стана. Радиус раската в зазоре между валками R проведен в точку A , которая является точкой начала контакта металла с валком. Радиус раската r проведен в точку B отрыва металла от валка. Точка C соответствует переходу из области редуцирования в область обжатия стенки. Касание металла с валком происходит по дуге ACB , а суммарная ширина контактной поверхности b равна хорде AB , которую можно определить по уравнению [5, 8]

$$b = \sqrt{\frac{2R_b r}{R + r} \Delta S}, \quad (1)$$

где b – ширина контактной поверхности металла с валком; R_b – радиус валка, мм; r – радиус раската, мм; ΔS – величина частного обжатия.

Величина частного обжатия равна суммарному частному обжатию, обозначенному на рис. 1, б как ΔS_{Σ} . Обжатие ΔS_{Σ} равно сумме величины частного обжатия раската по диаметру (редуцирования) ΔS_p и частного обжатия стенки ΔS_c .

Как видно из рис. 1, б, редуцирование происходит по дуге AC , а обжатие стенки по CB . Ширина редуциро-

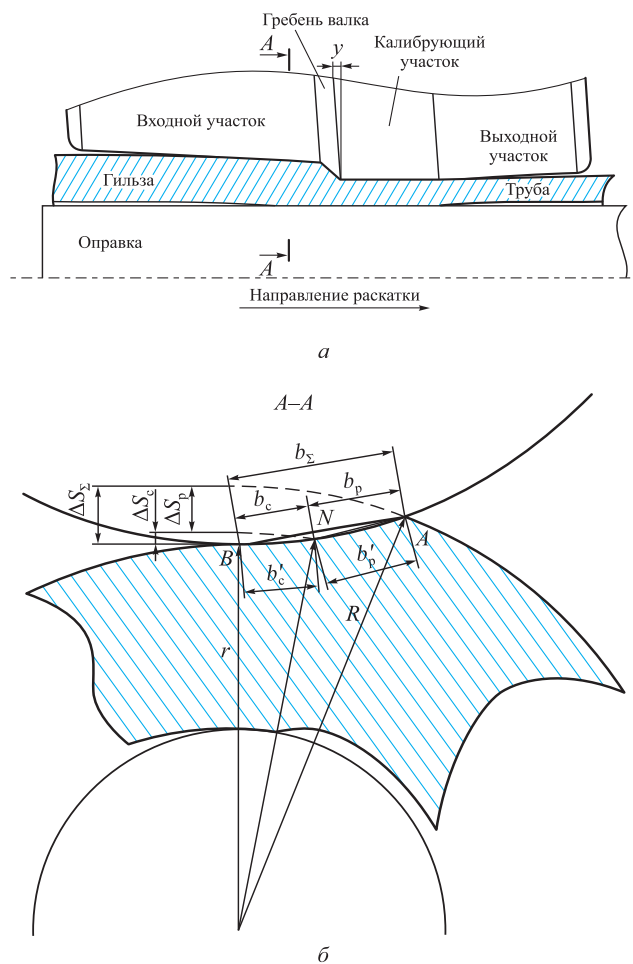


Рис. 1. Схема очага деформации раскатного стана: *a* – вид очага деформации раскатного стана; *б* – схема определения ширины контактной поверхности в поперечном сечении *A–A*

Fig. 1. Scheme of deformation of reeler: *a* – view of the deformation reeler; *б* – scheme of determination of width of the contact surface in the cross section *A–A*

вания определяется хордой b'_p , обжатия – b'_c . Необходимо определить соответствующие ширины на хорде AB . Опустив перпендикуляр на хорду AB из точки C в N , получим отрезки AN и NB , равные проекциям b'_p и b'_c соответственно. Обозначим AN и NB как b_p и b_c , тогда величина b_p является шириной при редуцировании диаметра, а b_c – шириной обжатия стенки.

Решая два треугольника ANC и BNC , получаем уравнения для определения ширины контактной поверхности b_p и b_c :

$$b_p = \left(\sqrt{\frac{2R_B r}{(R+r)\Delta S_\Sigma}} \right) \Delta S_p; \tag{2}$$

$$b_c = \left(\sqrt{\frac{2R_B r}{(R+r)\Delta S_\Sigma}} \right) \Delta S_c.$$

Соотношения (2) позволяют определить ширину контактной поверхности металла с валком в зоне редуцирования и обжатия.

На рис. 2 представлена схема обжатия стенки на участках очага деформации раскатного стана в районе гребня, где осуществляется основная деформация [9]. Для расчета ширины контактной поверхности необходимо выбрать несколько характерных сечений и точек очага деформации, определить частное обжатие стенки ΔS_c и частное редуцирование ΔS_p .

Рассмотрим четыре характерных сечения (см. рис. 2): сечение $I–I$ в основании гребня вала; сечение $II–II$ на его вершине; сечение $III–III$, находящееся от основания гребня на треть последующего шага подачи; сечение $IV–IV$, удаленное на треть последующего шага подачи от вершины гребня. Этим сечениям соответствуют точки A, B, A', B' соответственно. Точки A^0, B^0 отстоят от точек A и B на треть предыдущего шага подачи. Треть предыдущего шага подачи между точками A^0 и A можно определить по соотношению [6, 10 – 12]

$$L_{A^0} = \frac{1}{3} \pi D_T \operatorname{tg}(\beta) \frac{\mu_I \eta'_{\text{ор}}}{\mu_\Sigma \eta'_{\text{ор}}}, \tag{3}$$

где L_A – треть шага подачи между точкам A^0 и A ; D_T – диаметр готовой трубы; β – угол подачи валков раскатного стана; μ_I – коэффициент вытяжки в рассматриваемом сечении; μ_Σ – суммарный коэффициент вытяжки; $\eta'_{\text{ор}}, \eta'_{\text{т}}$ – коэффициенты осевой и тангенциальной скорости соответственно.

Величина частного обжатия стенки ΔS_{CA} определяется из уравнения [13]

$$\Delta S_{CA} = L_{A^0} \operatorname{tg}(\varphi), \tag{4}$$

где φ – угол наклона входного участка к оси прокатки.

Треть предыдущего шага подачи между точками B^0 и B , обозначенная на схеме как L_B , с учетом особенностей определения коэффициента вытяжки в сечении $II–II$ соответствует следующему соотношению:

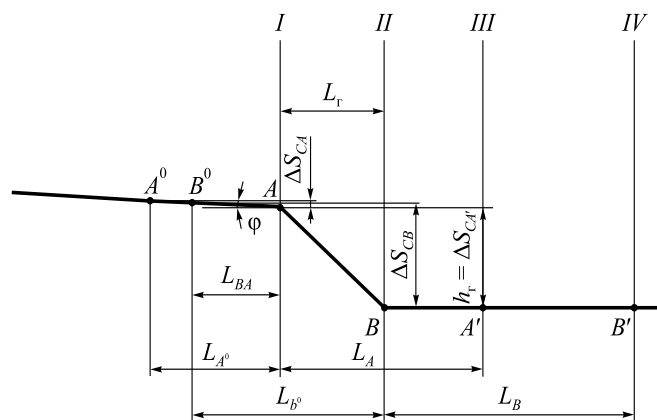


Рис. 2. Схема к расчету обжатия по стенке гильзы на участке гребня вала в продольном сечении очага деформации

Fig. 2. Scheme of the calculation of reduction at the wall of the compression sleeve on the portion of tongue in the longitudinal section of deformation zone

$$L_{B^0} = \frac{1}{3} \pi D_1 \operatorname{tg}(\beta) \sqrt[3]{\frac{\mu_I^2}{\mu_\Sigma^2} \frac{\eta'_{\text{ог}}}{\eta'_{\text{г}}}}. \quad (5)$$

Обжатие стенки ΔS_{CB} в общем случае равно сумме обжатия стенки гребнем h_r и обжатия ΔS_{CB^0A} , которое осуществляется на участке B^0A очага деформации:

$$\Delta S_{CB} = \Delta S_{CB^0A} + h_r. \quad (6)$$

Величину ΔS_{CB^0A} (см. рис. 2) можно определить как

$$\Delta S_{CB^0A} = L_{B^0A} \operatorname{tg}(\varphi). \quad (7)$$

Длина участка L_{B^0A} определяется как разница между L_B и L_r , тогда ΔS_{CB} равно

$$\Delta S_{CB} = (L_B - L_r) \operatorname{tg}(\varphi) + h_r. \quad (8)$$

Рассмотрим сечение III – III, которому соответствует точка A' . Данное сечение располагается на калибрующем участке очага деформации на расстоянии трети последующего шага подачи от точки $A - L_{A'}$, которая определяется как

$$L_{A'} = L_{A^0} \left(\frac{\mu_\Sigma}{\mu_I} \right)^{2/3}. \quad (9)$$

Из рис. 3 видно, что частное обжатие стенки в сечении III – III, $\Delta S_{CA'}$, равно высоте гребня вала h_r .

Сечение IV – IV проведено через точку B' и отстоит от сечения III – III на длину $L_{B'}$ – длина трети

последующего шага подачи от точки B . Обжатие стенки раската в данном сечении не осуществляется, а толщина его стенки по всему периметру равна толщине стенки трубы. В связи с этим, в данном сечении нет зоны обжатия стенки раската, однако в результате значительного истечения металла в зазоры между валками осуществляется частное редуцирование раската по диаметру.

Величина частного редуцирования раската по диаметру ΔS_p в полной мере зависит от затекания металла в зазоры между валками или овальности раската в очаге деформации. В работе [14] овальность раската определяется коэффициентом овальности ξ , который равен отношению радиуса раската в зазоре R к радиусу раската под валком r (см. рис 1).

Компьютерное моделирование процесса раскатки гильзы типоразмера $D_r \times S_r = 181 \times 28$ мм в готовую трубу типоразмера $D_T \times S_T = 150 \times 12,5$ мм проведено с использованием программного комплекса DEFORM [15]. Раскатка осуществлялась в очаге деформации, образованном валками, развернутыми на угол подачи 10° и угол раскатки 4° по грибовидной схеме. Входной участок имеет угол конусности к оси прокатки 3° , гребень вала – 42° , высота гребня $h_r = 12,5$ мм [9]. Калибрующий участок расположен параллельно оси прокатки, длина 90 мм. Выходной участок наклонен к оси прокатки на 3° . Процесс раскатки моделировался при исходной температуре 1160°C . Проверка адекватности компьютерного моделирования для процесса раскатки, представленная в работе [14], показала, что отклонение по геометрии раската, полученного путем моделирования и в процессе раскатки в стане МИСиС 130Т, не

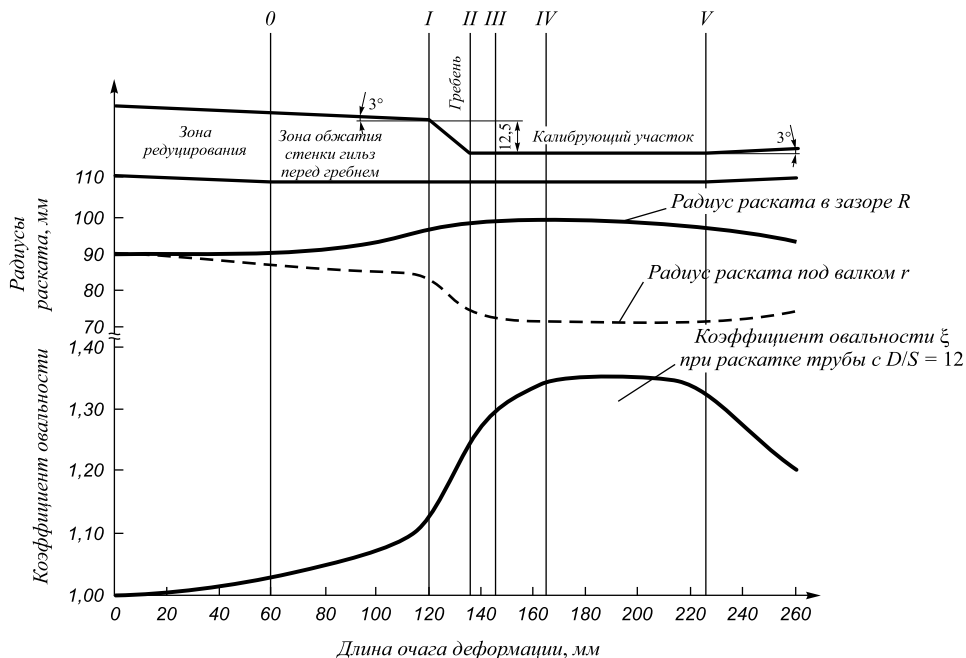


Рис. 3. Распределение радиусов раската и коэффициента овальности по длине очага деформации

Fig. 3. Distribution of roll radius and roundness factor at the length of deformation zone

превышает 10 %. При моделировании процесса раскатки измерялись радиусы раската под валком и в зазоре между валками (см. рис. 3), по которым определялся коэффициент овальности.

График распределения коэффициента овальности по длине очага деформации представлен на рис. 3. Координата 0 оси абсцисс соответствует встрече гильзы с валком (начало очага деформации). До сечения 0–0 осуществляется только редуцирование, а после сечения 0–0 осуществляется как редуцирование, так и обжатие стенки. Сечения I–I–IV–IV соответствуют сечениям, показанным на рис. 2. Выход трубы из калибрующего участка осуществляется в сечении V–V.

Зная величину ξ и ΔS_{Σ} , можно определить ΔS_p . Из рис. 1 видно, что суммарное частное обжатие ΔS_{Σ} равно разнице радиусов R в зазоре между валками и r под валком, тогда с учетом коэффициента овальности ΔS_{Σ} можно определить как

$$\Delta S_{\Sigma} = R - r = r(\xi - 1). \quad (10)$$

Исходя из уравнения (4), ΔS_p равно

$$\Delta S_p = r(\xi - 1) - \Delta S_c. \quad (11)$$

Пользуясь уравнением (11), можно определить величину ΔS_p для любого сечения очага деформации. Так в сечении 0–0 на входном участке очага деформации нет обжатия стенки гильзы (см. рис. 3), суммарная ширина контактной поверхности включает в себя только ширину зоны редуцирования b_p , которую можно определить, пользуясь уравнениями (2), (11). Согласно графику коэффициента овальности раската, $\xi_{0-0} = 1,03$, тогда $\Delta S_{p0-0} = 2,6$ мм, а $b_{p0-0} = 17,7$ мм. Зная распределение овальности ξ , с помощью урав-

нения (11) определим величину редуцирования в рассматриваемых сечениях. В табл. 1 сведены результаты расчета величин ΔS_p , ΔS_c , ΔS_{Σ} в основных сечениях очага деформации.

По уравнению (5) можно определить b_p и b_c для рассматриваемых сечений. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Зная ширину контактной поверхности металла с валком в зоне редуцирования и обжатия стенки, определим площадь контактной поверхности металла с валком. Для простоты определения площади контактной поверхности представим ее в виде простейших геометрических фигур, а именно прямоугольных треугольников и трапеций (рис. 4). До сечения 0–0 и после сечения IV–IV площадь контактной поверхности включает в себя только зону редуцирования и находится как площадь прямоугольного треугольника. В сечении 0–0 производится посадка гильзы на оправку (см. рис. 4) и начинается обжатие по стенке раската, в связи с чем площадь контактной поверхности разделяется на зону редуцирования F_p (площадь, на которой осуществляется редуцирование раската по диаметру) и зону обжатия F_c (площадь, на которой осуществляется обжатие стенки раската).

Площадь F_c на участке от сечения 0–0 до I–I определяется как площадь прямоугольного треугольника, а площадь редуцирования F_p можно определить как площадь трапеции, заключенной между рассматриваемыми сечениями. На участке между сечениями I–I и II–II площади F_c и F_p определяется как площади трапеций. Необходимо отметить, что площадь F_c определяется по ширине b_c , а F_p – по b_p .

Выводы. В процессе раскатки трубы в трехвалковом стане винтовой прокатки из-за значительной овальности раската площадь контактной поверхности металла с валком состоит из двух зон: в первой осуществляется редуцирование раската (уменьшение его диаметра), а во второй обжатие стенки. Уравнение (5)

Таблица 1

Частные обжатия по стенке раската и частные редуцирования по диаметру в сечениях

Table 1. Partial reductions at the wall of breakdown bar and partial reducing at diameter in sections

Сечение очага деформации	Частные обжатия стенки и величина редуцирования при раскатке гильзы типоразмера $D_r \times S_r = 181 \times 28$ мм в трубу типоразмера $D_t \times S_t = 150 \times 12,5$ мм		
	величина редуцирования, ΔS_p , мм	величина частного обжатия, ΔS_c , мм	суммарное обжатие в сечении ΔS_{Σ} , мм
0–0	2,6	0,0	2,6
I–I	9,7	0,9	10,6
II–II	5,1	12,9	18,0
III–III	12,0	12,5	24,5
IV–IV	23,1	0,0	23,1

Таблица 2

Ширина контакта металла с валком

Table 2. The width of the metal contact with the roll

Сечение очага деформации	Ширина контактной поверхности при раскатке гильзы типоразмера $D_r \times S_r = 181 \times 28$ мм в трубу типоразмера $D_t \times S_t = 150 \times 12,5$ мм		
	зоны редуцирования, b_p	зоны обжатия, b_c	общая зона b
0–0	17,7	0,0	17,7
I–I	32,6	3,0	35,6
II–II	12,8	32,2	45,0
III–III	25,1	26,3	51,4
IV–IV	50,0	0,0	50,0

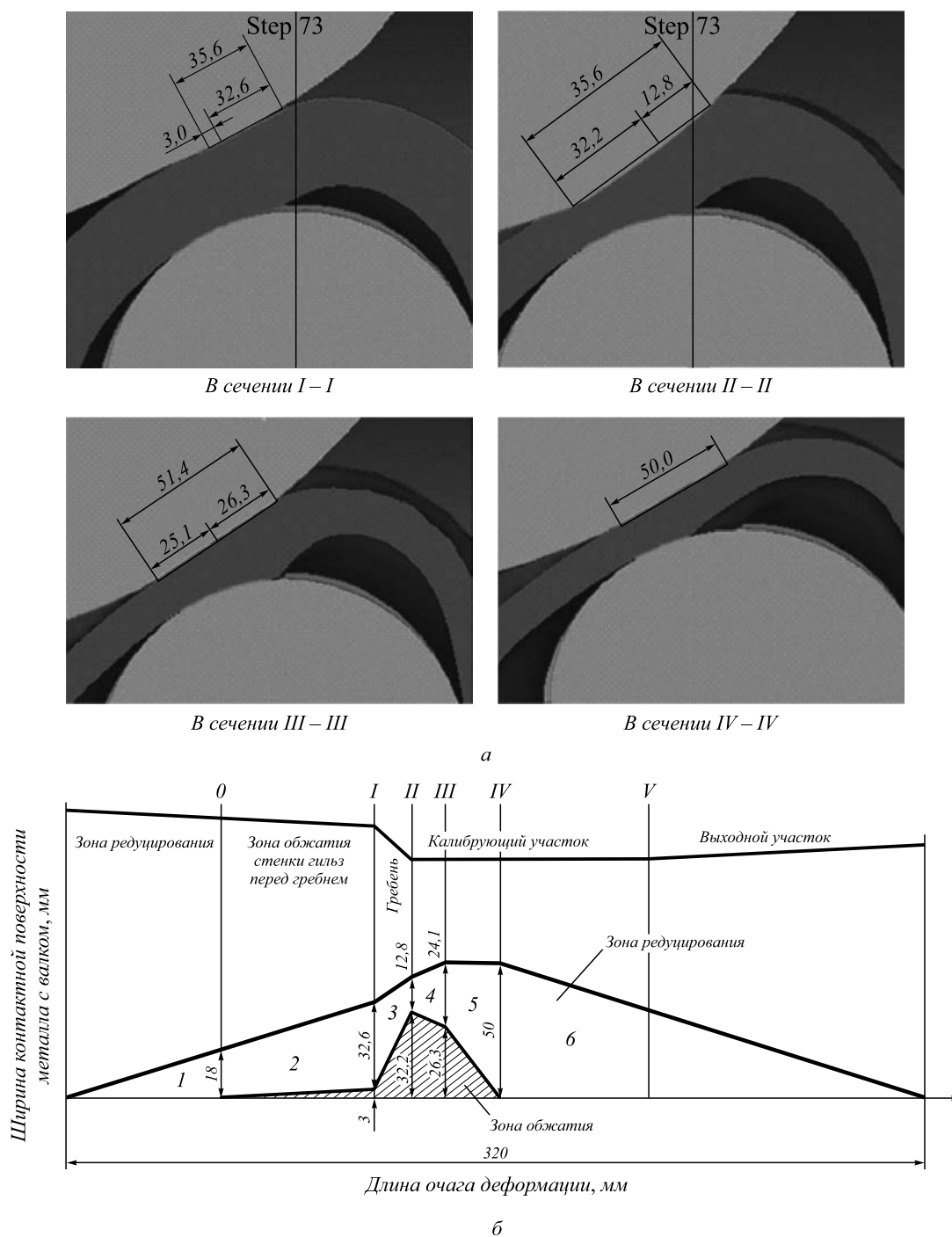


Рис. 4. Ширина контактной поверхности в рассматриваемых сечениях (а) и площадь контактной поверхности в зоне редуцирования и обжатия стенки (б)

Fig. 4. Width of the contact surface in given sections (a) and the contact surface area in the reduction zone and reducing of the wall (b)

позволяет определить ширину контактной поверхности в зонах редуцирования и обжатия стенки, что дает возможность более точного определения силы металла на валок. Детальное рассмотрение механизма деформации раската в зоне гребня валка позволило представить более точный способ расчета частного обжатия стенки, а также величины редуцирования, которые необходимы для определения ширины и площади контактной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 451 с.
2. Технология трубного производства: Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
3. Шевакин Ю.Ф., Коликов А.П., Райков Ю.Н. Производство труб: Учебник для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 568 с.
4. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.

5. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
6. Обработка металлов давлением: Учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Изд. дом МИСиС, 2008. – 960 с.
7. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
8. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. – М.: Металлургия, 2014. – 380 с.
9. Технология трубного производства: Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
10. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства. – М.: Металлургия, 1991. – 399 с.
11. Лакашин Н.Д., Кохан Л.С. Обработка металлов давлением: Учеб. пособие для вузов. – М.: МГВМИ, 2006. – 424 с.
12. Харитонов Е.А., Буров И.А., Вольшонок И.З., Харитонов Д.Е. Особенности геометрии очага деформации и калибровка валков станов радиально-сдвиговой прокатки при больших углах подачи // Цветные металлы. 1995. № 8. С. 64 – 66.
13. Харитонов Е.А., Буров И.А., Романенко В.П., Вольшонок И.З. Совершенствование методики расчета геометрии очага деформации и калибровок валков станов радиально-сдвиговой прокатки при больших углах подачи // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 3. С. 29 – 31.
14. Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С. Моделирование процесса раскатки труб на трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки // Сталь. 2014. № 10. С. 44 – 47.
15. Паршин В.С. и др. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM 3D: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

Поступила 19 ноября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 3, pp. 167–172.

DEVELOPMENT OF CALCULATING METHOD OF THE DEFORMATION PARAMETERS DURING ROLLING OUT IN A THREE-ROLL MILL LINERS OF SCREW ROLLING

E.A. Kharitonov, V.P. Romanenko, A.S. Budnikov

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The main features of the process of screw rolling of steel pipes by a three-roll mill of screw rolling are considered. Taking into account the variety in distribution of specific forces at the deformation zone, the calculation method for the deformation parameters of rolling process of pipe liner in the deformation at the mandrel length was developed. The design procedure of partial reductions and contact of the metal surface area with the roll in zones of compression in diameter (reduction) and compression of the liner wall, which takes into account the tangential outflow of the metal in the gaps between the rollers, are characteristic for rolling processes of thin-walled pipes with diameter ratio of the thickness D_r/S_m wall > 8 . The results of the study are intended for industrial use in the production of pipes with the ratio $D_r/S_m = 8 - 15$ with tolerances on wall thickness $\pm 6\%$; diameter $\pm 0,5\%$. These results would increase the understanding and especially the process of obtaining thin-walled pipes on pipe-rolling units with roll-off of screw rolling mills.

Keywords: screw rolling, width of the contact surface, partial reduction, reducing zone, compression zone, features of the contact surface, specific power, input portion, tongue, three-roll mill.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-167-172

REFERENCES

1. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: uchebnyy* [Theory of metal forming: textbook]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2015, 451 p. (In Russ.).
2. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A., Samusev S.V. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva: ucheb. dlya vuzov* [Pipe production technology: textbook for universities]. Moscow: Internetzhiniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
3. Shevakin Yu.F., Kolikov A.P., Raikov Yu.N. *Proizvodstvo trub: ucheb. dlya vuzov* [Pipe production: textbook for universities]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2005, 568 p. (In Russ.).
4. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: ucheb. dlya vuzov* [Theory of metal forming: : textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 360 p. (In Russ.).
5. Teterin P.K. *Teoriya poperechno-vintovoi prokatki* [Theory of cross-screw rolling]. Moscow: Metallurgiya 1971, 368 p. (In Russ.).
6. Romantsev B. A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. *Obrabotka metallov davleniem: uchebnyy* [Metal forming: textbook]. Moscow: Izd. dom MISiS, 2008, 960 p. (In Russ.).
7. Potapov I.N., Polukhin P.I. *Tekhnologiya vintovoi prokatki* [Technology of screw rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 344 p. (In Russ.).
8. Nikulin A.N. *Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii. Monografiya* [Screw rolling. Stress and strain. Monograph]. Moscow: Metallurgiya 2014, 380 p. (In Russ.).
9. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A., Samusev S.V. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva: uchebnyy dlya vuzov* [Technology of pipe production: textbook for universities]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
10. Potapov I.N., Kolikov A.P., Druyan V.M. *Teoriya trubnogo proizvodstva* [Theory of pipe production]. Moscow: Metallurgiya 1991, 399 p. (In Russ.).
11. Lakashin N.D., Kokhan L.S. *Obrabotka metallov davleniem: ucheb. posobie dlya vuzov* [Metal forming: manual]. Moscow: MGVMI, 2006, 424 p. (In Russ.).
12. Kharitonov E.A., Burov I.A., Vol'shonok I.Z., Kharitonov D.E. Features of the roll gap geometry and sizing of mill radial-shear rolls at high angles of supply. *Tsvetnye metally*, 1995, no. 8, pp. 64–66. (In Russ.).
13. Kharitonov E.A., Burov I.A., Romanenko V.P., Vol'shonok I.Z. Improvement of angle computation method for deformation and grooving of rolls at continuous billet multiroll mill with large roll feed direction. *Moscow: Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2010, no. 3, pp. 29–31. (In Russ.).
14. Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Pipe Behavior in a Three-Roller Screw-Rolling Mill. *Steel in Translation*, vol. 44, no. 10, pp. 769–772.
15. Parshin V.S., Karamyshev A.L., Nekrasov I.I., Pugin A.I., Fedulov A.A. *Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM 3D: uchebnoe posobie* [A practical guide to program complex DEFORM 3D: manual]. Ekaterinburg: UrFU, 2010, 266 p. (In Russ.).

Information about the authors:

E.A. Kharitonov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Senior Researcher of the Chair “Metal Forming” (nx-omd@mail.ru)
V.P. Romanenko, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming”
A.S. Budnikov, MA Student, Engineer of the Chair “Metal Forming” (fiar128@yandex.ru)

Received November 19, 2015