

УДК: 621.771.014.2

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ МЕТАЛЛА НА ВАЛОК В ПРОЦЕССЕ РАСКАТКИ ТРУБ НА ТРЕХВАЛКОВОМ СТАНЕ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

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

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

Будников А.С., магистр, инженер кафедры

«Обработка металлов давлением» (far128@yandex.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

Аннотация. Особенностью силовых параметров процесса винтовой раскатки труб в трехвалковом стане является наличие двух зон: редуцирования и обжатия с различными удельными силами металла на валок. Зона редуцирования образуется в результате тангенциального истечения, а также пластического изгиба стенки гильзы в зазорах между валками и зависит от настроечных параметров стана, геометрических параметров получаемой трубы, а именно отношения диаметра к толщине стенки D/S . Компьютерное моделирование процесса раскатки показало, что распределенная сила или усилие металла на валок в зоне редуцирования составляет 75 % от усилия в зоне обжатия, где осуществляется основная деформация стенки гильзы. Усилие редуцирования зависит в основном от толщины стенки гильзы. С изменением толщины стенки гильзы по длине очага деформации удельная сила в зоне редуцирования уменьшается в среднем на 20 МПа. В зоне обжатия значение усилий металла на валок зависит от ширины контактной поверхности и воздействия дополнительных сжимающих и растягивающих напряжений со стороны оправки раскатного стана. Определение усилий в зоне обжатия дает возможность оценочного расчета силы, действующей на оправку, что особенно актуально при расчете режимов раскатки на контролируемо-перемещаемой оправке.

Ключевые слова: силовые параметры, раскатки гильз в стане винтовой прокатки, трехвалковый раскатной стан, ширина контактной поверхности, линии скольжения, очаг деформации, напряжения, валок, оправка, гильза, труба.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-628-633

Методика определения деформационных параметров, ширины и площади контактной поверхности металла с валком рассмотрены в работе [1], где отмечено, что в процессе раскатки осуществляется редуцирование диаметра раската и обжатие стенки трубы. Аналогично в процессе прошивки [2] выделяются два участка: прошивной, соответствующей участку обжатия при раскатке с усилием p_c и раскатной, соответствующий редуцированию с усилием p_p , составляющим 75 % от p_c .

Удельную силу металла на валок в различных точках очага деформации раскатного стана можно определить при помощи компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование процесса раскатки гильз в готовые трубы с соотношением диаметра к толщине стенки D/S , равным 7, 8, 10, 12 из стали ШХ15 было проведено с использованием программного комплекса DEFORM [3]. Исходные геометрические размеры гильз и полученных труб представлены в табл. 1. Сила, дейст-

Таблица 1

Параметры моделирования процесса раскатки и значения средних удельных сил

Table 1. Modeling parameters of rolling process and the values of average specific forces

Параметры трубы			Параметры гильзы, мм		Температура раскатки, T , °C	p_p , МПа	p_c , МПа	p_p/p_c
D/S	Диаметр, D_T , мм	Толщина стенки, S_T , мм	Диаметр, D_r	Толщина стенки, S_r				
7	86	12	122,0	28,0	1100	103	132	0,78
8	150	12,5	179,4	33,5		107	133	0,80
10			179,2	29,6		88	130	0,67
12			181,8	28,0		93	123	0,73

вующая со стороны металла на валок по компьютерной модели процесса раскатки гильзы $D_r \times S_r = 122 \times 28$ мм в трубу $D_t \times S_t = 83 \times 12$ мм при температуре исходной гильзы 1100°C равна 653 кН. Согласно тензометрическому исследованию, проведенному на промышленном ТПА [4], сила металла на валок в процессе раскатки трубы с аналогичными параметрами составляет 600 – 610 кН. Разница между усилиями компьютерной модели и данными, полученными в работе [4], не превышает 10 %. Следовательно, результаты компьютерного моделирования можно считать адекватными.

На рис. 1 показана эпюра средней удельной силы, распределенной по длине очага деформации в зоне обжатия для процесса раскатки трубы с $D/S = 12$.

На входном участке в зоне редуцирования гильзы среднее значение удельной силы металла на валок (сечение $I-I$) составляет 96 МПа. При обжатии стенки значение удельных сил увеличивается, среднее значение составляет 116 МПа (сечение $II-II$). Для раскатки толстостенной и тонкостенной труб изменение удельной силы в области обжатия перед гребнем составляет 6 – 10 %.

Наибольших значений удельная сила металла на валок достигает в зоне интенсивного обжатия стенки раската, т.е. на гребне вала. В сечении $III-III$ (середина гребня вала) удельная сила равна 139 МПа.

На калибрующем участке в зоне обжатия стенки раската, длина которой составляет $1/3$ шага подачи от гребня вала, среднее значение удельной силы составляет 115 МПа (сечение $IV-IV$).

Сечение $V-V$ располагается в середине калибрующего участка, где осуществляется редуцирование диаметра трубы [5], значение удельной силы соответствует зоне редуцирования и составляет 89 МПа. Удельная сила в зоне редуцирования на калибрующем участке в сечении $V-V$ меньше, чем на входном в сечении $I-I$, что объясняется уменьшением толщины стенки раската.

Распределение средней удельной силы по ширине контакта металла с валком в процессе раскатки трубы с $D/S = 12$ показано на рис. 2.

По ширине контактной поверхности, как и по ее длине в зоне редуцирования, удельная сила меньше, чем в зоне обжатия. В процессе раскатки отношение p_p/p_c изменяется следующим образом: $p_p/p_c = 0,83$ в сечении $II-II$; $p_p/p_c = 0,69$ в сечении $III-III$; $p_p/p_c = 0,78$ в сечении $IV-IV$. Поскольку в зоне редуцирования, которой соответствуют сечения $I-I$ и $V-V$, нет обжатия стенки раската, то по всей ширине контактной поверхности действует только усилие p_p . Отношение p_p/p_c на входном участке и гребне вала уменьшается, а на калибрующем участке в зоне обжатия стенки увеличивается. Среднее значение отношения p_p/p_c в зоне обжатия стенки гильзы составляет 0,76 от p_c . В табл. 1 представлены средние значения p_p/p_c для процессов раскатки труб с $D/S = 7, 8, 10, 12$.

Существуют несколько аналитических методов определения усилий металла на рабочий инструмент в процессе обработки металлов давлением. Метод характеристик или линий скольжения [6 – 7] широко применяется при определении усилия в процессах ков-

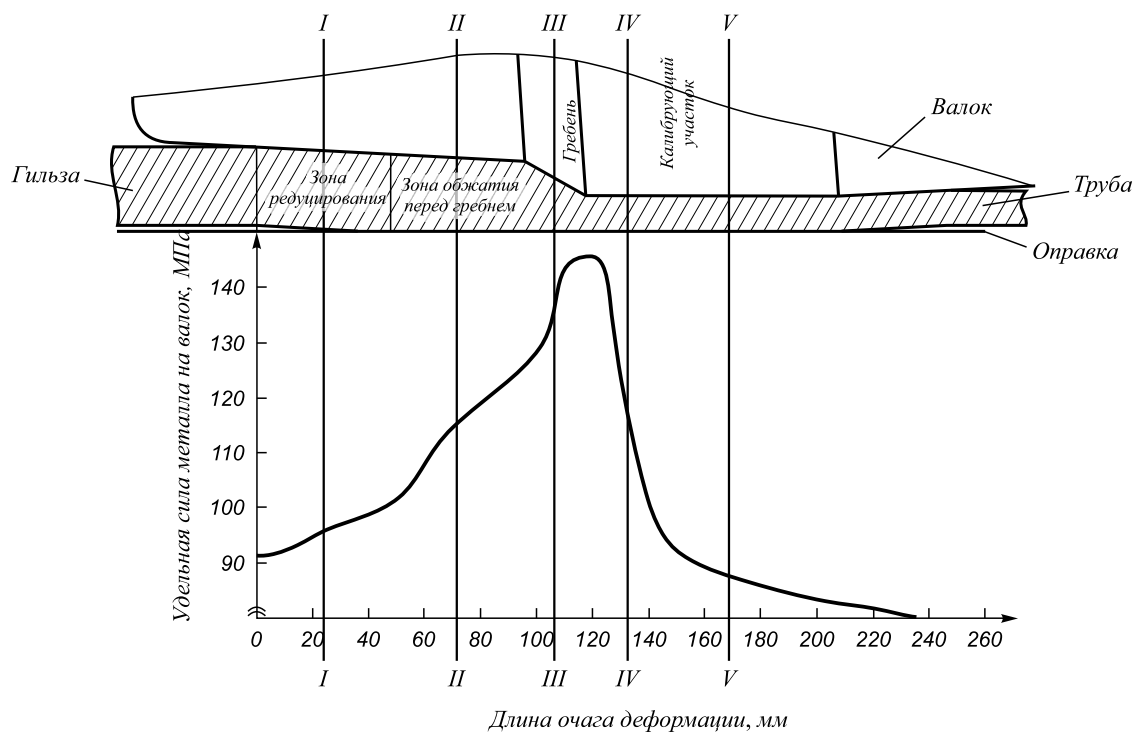


Рис. 1. Распределение средней удельной силы металла на валок в зоне обжатия стенки p_c

Fig. 1. Distribution of average specific metal force on the roll in the compression zone of wall

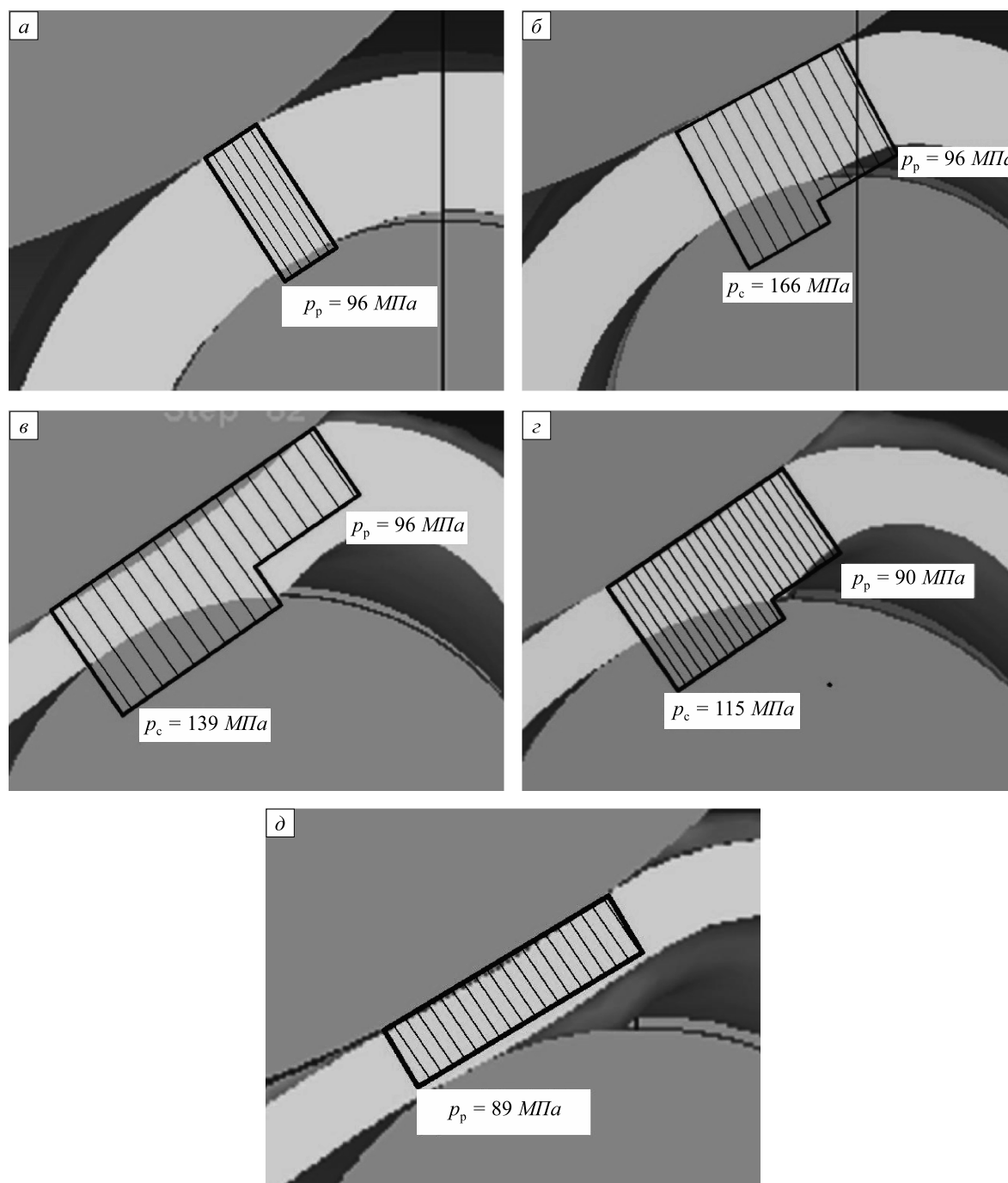


Рис. 2. Средние удельные силы металла на валок по ширине контактной поверхности в сечении:
a – I-I; *б* – II-II; *в* – III-III; *г* – IV-IV; *д* – V-V

Fig. 2. Average specific metal forces on the roll along the contact surface width:
a – I-I; *б* – II-II; *в* – III-III; *г* – IV-IV; *д* – V-V

ки и штамповки [8]. В работе [9] описывается анализ деформационно-кинематических и граничных условий процесса прошивки в двухвалковом стане при помощи методики линий скольжения, траектории которых описываются уравнением логарифмической спирали. В работе Л. Прандтля, а так же ряда других авторов [10 – 15], представлено решение задачи по определению удельных сил на валок в процессах винтовой и поперечной прокатки.

Для решения задачи по определению среднего значения p_p воспользуемся методом, представленным в работе Л. Прандтля, в котором не учитывается трение на контактной поверхности металла с валком. Рассмотрим случай сжатия полого цилиндрического образца с внешним и внутренним радиусами, равными соответственно R и r (рис. 3). Если пренебречь деформацией в направлении оси полого цилиндра, а так же силой трения, напряженное состояние можно представить полем

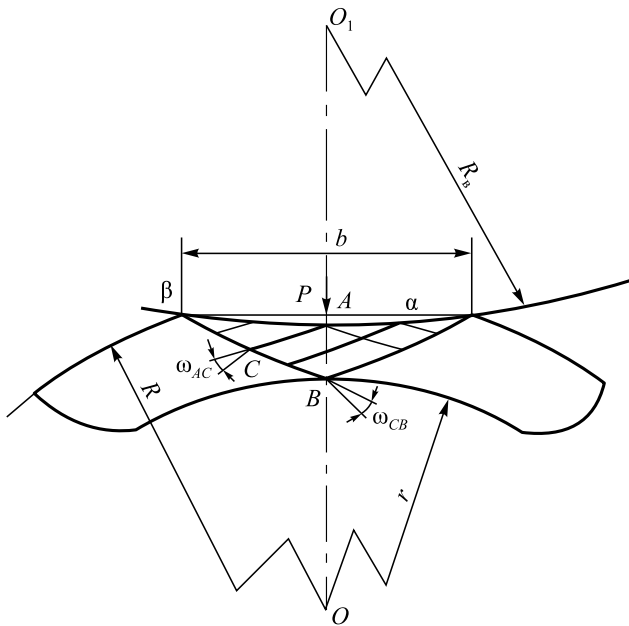


Рис. 3. Поле линий скольжения в зоне редуцирования:
 P – сила, действующая со стороны металла на валок; R_b – радиус валка; R и r – внешний и внутренний радиус полого цилиндра соответственно; b – ширина контактной поверхности металла с валком

Fig. 3. Field of slip lines in the reduction zone:
 P – force acting by the metal on the roll, R_b – roll radius,
 R and r – external and internal radius of the hollow cylinder,
 b – width of the contact surface of the metal and the roll

линий скольжения, состоящим из линий скольжения семейства α и β . В точке A действует сила P со стороны валка радиусом R_b , точка B расположена на внутренней поверхности цилиндра.

В результате решения задачи методом линий скольжения с принятыми допущениями, можно определить p_p

$$p_p = \sigma_T \left[\left(2 + \frac{D_b}{S} \right) \ln \left(\frac{2S}{D_b} + 1 \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где D_b – диаметр валка, мм; S – толщина стенки раската, мм; σ_T – предел текучести материала при заданной температуре, МПа.

Согласно соотношению (1) среднее значение удельной силы металла на валок в зоне редуцирования по длине очага деформации будет уменьшаться, так как уменьшается толщина стенки гильзы, что не противоречит результатам моделирования.

В табл. 2 представлены значения усилия в зоне редуцирования p_{pp} , полученные по формуле (1) для раскатки труб с $D/S = 7, 8, 10, 12$.

Разница между расчетными значениями p_{pp} , полученными по формуле (1), и результатами компьютерного моделирования составляет 23 – 36 %. Такое расхождение можно объяснить тем, что формула (1) не учитывает условия трения на контактной поверхности металла с валком в процессе раскатки, а так же соотношение D/S (см. табл. 1). Для определения коэффициента, учитывающего трение, в программном комплексе DEFORM смоделирован процесс сжатия полого цилиндрического образца согласно рассмотренной задачи с учетом и без учета касательных сил трения. При максимальном значении коэффициента трения [15] по Зибелю, равному 1, $p_p = 111$ МПа, без учета трения – 70 МПа. Усилие на валок при сжатии цилиндра с учетом трения на 37 % больше, чем без учета.

По полученным результатам видно, что коэффициент, учитывающий условия трения и D/S раскатываемой трубы $a = \frac{1}{p_p/p_{pp}}$, изменяется в диапазоне от 1,30 до 1,56

$$p_p = a \sigma_T \left[\left(2 + \frac{D_b}{S} \right) \ln \left(\frac{2S}{D_b} + 1 \right) - 1 \right], \quad (2)$$

где a – коэффициент, учитывающий трение и отношение D/S , равный 1,53 – 1,56 для толстостенных труб и 1,30 – 1,35 для тонкостенных.

В табл. 2 представлены значения усилия p_{pp} в зоне редуцирования, рассчитанные по формуле (2). Значения усилия p_{pp} не превышают 10 %.

Поскольку отношение $k = p_p/p_c$ (см. табл. 1) изменяется в пределах 0,67 – 0,8, то усилие в зоне редуцирования можно определить следующим образом:

Таблица 2

Усилия в зоне редуцирования

Table 2. Stress in reduction zone

D/S	p_p , полученное при моделировании в DEFORM, МПа	Расчетное значение p_{pp} без учета трения			Расчетное значение p_{pp} с учетом трения	
		p_{pp} , МПа	p_{pp}/p_p	разница в %	p_{pp} , МПа	разница в %
7	103	67	0,65	35	96	7
8	107	69	0,64	36	99	8
10	88	68	0,77	23	97	10
12	93	69	0,74	26	99	6

$$p_c = \frac{P_p}{k}, \quad (3)$$

где $k = 0,78 - 0,80$ для толстостенных труб и $0,67 - 0,73$ для тонкостенных.

Это значительно упрощает расчет усилий на валки и дает точность расчета 5 – 10 %.

Выводы. В процессе раскатки трубы в трехвалковом раскатном стане 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. Удельная сила в зоне редуцирования составляет 78 – 80 % от усилия в зоне обжатия для толстостенных труб с D/S до 8 и 67 – 73 % для тонкостенных с D/S больше 8.

В зоне редуцирования усилие металла на валок зависит от толщины стенки раската, диаметра вала, параметров трения на контактной поверхности, отношения D/S раскатываемой трубы и определяется по уравнению (2) с учетом коэффициента a , равного 1,30 – 1,35 для раскатки толстостенных и 1,53 – 1,56 для раскатки тонкостенных труб.

На гребне вала удельные усилия достигают максимальных значений. При раскатке толстостенных и тонкостенных труб изменение удельного усилия на входном и калибрующем участках составляет 6 – 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С. Разработка методики расчета деформационных параметров при раскатке гильз в трехвалковом стане винтовой прокатки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 3. С. 167 – 172.

2. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 451 с.
3. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM 3D: Учеб. пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
4. Минтаханов М. А. Исследование и совершенствование процесса раскатки труб и оборудования на установках с трехвалковым раскатным станом: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: Изд. Дом МИСиС 1979. – 164 с.
5. 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.
6. Белевич А.В. Моделирование показателей пластичности и сопротивления деформации сталей и сплавов: Практикум. – Владимир: ВлГУ, 2005. – 84 с.
7. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
8. Тюрин В.А., Мохов А.И. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – Волгоград: РПК «Политехник», 2000. – 416 с.
9. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. – М.: Металлургиздат, 2015. – 380 с.
10. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
11. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
12. Зайков М.А., Полухин В.П., Зайков А.М. Процесс прокатки. – М.: МИСиС, 2004. – 640 с.
13. Харитонов Е.А., Буров И.А., Романенко В.П., Вольшонков И.З. Совершенствование методики расчета геометрии очага деформации и калибровок валков станов радиально-сдвиговой прокатки при больших углах подачи // Изв. вуз. Черная металлургия. № 3. 2010. С. 29 – 31.
14. Основы теории обработки металлов давлением: Учебник для вузов / И.И. Иванов, А.В. Соколов и др. – М.: ИНФА, 2007. – 144 с.
15. Лакашин Н.Д., Кохан Л.С. Обработка металлов давлением: Учеб. пособие для вузов. – М.: МГВМИ, 2006. – 424 с.

Поступила 12 апреля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 9, pp. 628–633.

DISTRIBUTION OF SPECIFIC METAL FORCES ON THE ROLL AT PIPE ROLLING IN THREE-ROLL SCREW-ROLLING MILL

E.A. Kharitonov, A.S. Budnikov

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

Abstract. The peculiarity of power parameters of screw rolling process of pipes on a three-roll rolling mill is the presence of two areas: reduction and compression with different specific forces of metal acting on the roll. The reduction zone is formed by a tangential expiration, as well as plastic bending sleeve wall in the gaps between the rolls and depends on the mill chamber tuning parameters, geometric parameters of the derived pipe, namely, the ratio of the diameter to the wall thickness D/S . Computer modeling of rolling process has shown that a distributed force or stress of the metal on the roll in the reduction zone is 75% of the effort in the compression zone with either major deformation of the liner wall. Stress reduction in the deformation depends primarily on the wall thickness of the liner. With the change of the liner wall thickness along the length of the deformation zone specific force in the reduction zone is reduced by an average of 20 MPa. In the compression zone, the value of the metal efforts on the roll depends on the width

of the contact surface and the impact of additional compressive and tensile stresses from the reeling mandrel mill. Determination of compression forces in the drafting area makes it possible to calculate the estimated force acting on the mandrel, which is especially important in the calculation of rolling modes on the controlled movable mandrel.

Keywords: power parameters, rolling mill, liner, screw rolling, three-roll rolling mill, width of the contact surface, slip line, deformation zone, tension roller, mandrel, sleeve, pipe.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-628-633

REFERENCES

1. Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Development of calculating method of the deformation parameters during rolling out in a three-roll mill liners of screw rolling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 3, pp. 167–172. (In Russ.).
2. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: uchebnik* [Theory of metal forming: Textbook]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2015, 451 p. (In Russ.).

3. Parshin V.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.I., Fedulov A.A. *Prakticheskoe rukovodstvo k programnomu kompleksu DEFORM 3D: uchebnoe posobie* [How to use the program complex DEFORM 3D: Manual]. Ekaterinburg: UrFU, 2010, 266 p. (In Russ.).
4. Mintakhanov M.A. *Issledovanie i sovershenstvovanie protsessa raskatki trub i oborudovaniya na ustanovkakh s trekhvalkovym raskatnym stanom: Dis...kand. tekhn. nauk* [Research and improvement of the process of pipes rolling and equipment in facilities with a tree-roll rolling mill: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Moscow, 1979, 164 p. (In Russ.).
5. Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Pipe behavior in a three-roller screw-rolling mill. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 10, pp. 769–772.
6. Belevich A.V. *Modelirovanie pokazatelei plastichnosti i soprotivleniya deformatsii staley i splavov: praktikum* [Simulation of parameters of plasticity and strain resistance of steels and alloys: case study]. Vladimir: VIGU, 2005, 84 p. (In Russ.).
7. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: ucheb. Dlya vuzov* [Theory of metal forming: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya 1978, 360 p. (In Russ.).
8. Tyurin V.A., Mokhov A.I. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: ucheb. dlya vuzov* [Theory of metal forming: Textbook for universities]. Volgograd: RPK “Politekhnik”, 2000. 416 p. (In Russ.).
9. Nikulin A.N. *Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii. Monografiya* [Screw rolling. Stress and strain. Monograph]. Moscow: Metallurgizdat, 2015, 380 p. (In Russ.).
10. Teterin P.K. *Teoriya poperechno-vintovoi prokatki* [Theory of screw rolling process]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 368 p. (In Russ.).
11. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: ucheb. dlya vuzov* [Theory of metal forming: Textbook for universities]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 424 p. (In Russ.).
12. Zaikov M.A., Polukhin V.P., Zaikov A.M. *Protsess prokatki* [Rolling process]. Moscow: MISiS, 2004, 640 p. (In Russ.).
13. Kharitonov E.A., Burov I.A., Romanenko V.P., Vol'shonok I.Z. Improving the method for calculating the gap geometry and calibrations of rolls of radial-shear rolling mills at high angles of supply. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 3 pp. 29–31. (In Russ.).
14. Ivanov I.I., Sokolov A.V. etc. *Osnovy teorii obrabotki metallov davleniem: ucheb. dlya vuzov* [Elements theory of metal forming: Textbook for universities]. Moscow: INFA, 2007, 144 p. (In Russ.).
15. Lakashin N.D., Kokhan L.S. *Obrabotka metallov davleniem: ucheb posobie dlya vuzov* [Metal forming: Manual for universities]. Moscow: MGVMi, 2006, 424 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)

A.S. Budnikov, MA Student, Engineer of the Chair “Metal Forming” (fiar128@yandex.ru)

Received April 12, 2016