

УДК 621.774.353

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ РЕДУЦИРОВАНИЯ ТРУБ НА ТРЕХВАЛКОВОМ СТАНЕ\*

*Алещенко А.С., к.т.н. доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов  
давлением» (judger85@mail.ru)*

*Будников А.С., аспирант, инженер кафедры «Обработка металлов  
давлением» (fiar128@yandex.ru)*

*Харитонов Е.А., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов  
давлением» (haritonov45@mail.ru)*

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4)**

**Аннотация.** Трубопрокатные агрегаты с трехвалковыми станами винтовой прокатки применяются для получения горячекатаных бесшовных труб. В России эксплуатируются два агрегата с раскатными станами ТПА-160 АО «Первоуральский новотрубный завод» и ТПА-200 АО «Волжский трубный завод». В настоящее время остро стоят вопросы повышения технологических возможностей этих ТПА. Появляется необходимость расширения размерного и марочного сортамента, нетрадиционного использования калибровочных и раскатных станов винтовой прокатки. Для решения этих вопросов экспериментально исследован процесс редуцирования или безоправочной прокатки труб на трехвалковых станах винтовой прокатки с повышением обжатия по диаметру до 25 %. Приведены результаты компьютерного конечно-элементного моделирования в программе QFORM. Цель работы – исследование влияния процесса прокатки с повышенными обжатиями по диаметру на формоизменение металла в очаге деформации и изменения геометрических размеров при редуцировании гильз с различной толщиной стенки на опытно-промышленном стане. В процессе формоизменения металла при винтовой прокатке важное значение имеет овальность гильзы. Овальность – отношение радиуса раската при входе в контакт металла с валком к радиусу под валком в поперечном сечении очага деформации. Овальность характеризует устойчивость гильзы к деформациям в межвалковом пространстве. Редуцирование тонкостенных гильз сопровождается большими значениями овальности, процесс деформирования осуществляется менее стабильно, поэтому возможно образование дефектов формы (гранение) и концевые дефекты как при раскатке на оправке. Овальность процесса раскатки на оправке увеличивается более интенсивно, чем при безоправочной прокатке. Наличие оправки ограничивает смещение металла в осевом направлении, способствует смещению металла в зазоры между валками. При раскатке на оправке необходимо применять валки с гребнем, которые позволяют осуществлять основное обжатие по стенке и тем самым локализовать зону обжатия на оправке, и, следовательно, уменьшить овальность гильз.

**Ключевые слова:** редуцирование, прокатка на оправке, трехвалковый стан, винтовая прокатка, овальность, контактная поверхность, формоизменение, очаг деформации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-756-762

### ВВЕДЕНИЕ

Трехвалковые станы винтовой прокатки, входящие в трубопрокатные агрегаты (ТПА), применяются на стадии раскатки и калибровки толстостенных труб с высокой точностью по наружному диаметру и толщине стенки [1, 2]. В России эксплуатируются два агрегата с трехвалковыми раскатными и калибровочными станами: ТПА-200 производства АО «Волжский трубный завод» и ТПА-160 производства АО «Первоуральский новотрубный завод» (АО ПНТЗ) [3 – 5]. В настоящее время остро стоят вопросы повышения технологических возможностей этих ТПА, расширения размерного и марочного сортамента, появляется необходимость нетрадиционного использования калибровочных и раскатных станов винтовой прокатки. Одним из вопросов

повышения технологических возможностей является применение калибровочного стана винтовой прокатки в качестве редуционного. Это способствует расширению сортамента получаемых труб и увеличения их точности по толщине стенки [6]. Главное отличие процесса редуцирования от традиционных процессов раскатки и калибровки в стане винтовой прокатки заключается в повышенном обжатии черновой трубы по диаметру. К примеру, для процесса калибровки обжатие по диаметру составляет 1 – 5 % [2 – 4], а при редуцировании – более 10 % [1 – 4], в связи с чем влияние формоизменения на качество и геометрические параметры готовой трубы возрастает.

В работе [5] исследовали процесс редуцирования или безоправочной прокатки с большими обжатиями в двухвалковых станах винтовой прокатки. Также известны способы редуцирования толстостенных труб на трехвалковых станах: в работах [6 – 8] рассмотрен про-

\* В работе принимали участие Р.В. Исхаков и А.Р. Шамилов (АО «Первоуральский новотрубный завод»).

цесс прокатки труб при различных углах подачи. Однако данных по формоизменению металла в представленных работах не приведено.

Целью настоящей работы является исследование влияния процесса прокатки с повышенными обжатиями по диаметру на формоизменение металла в очаге деформации и изучение изменения геометрических размеров при редуцировании гильз с различной толщиной стенки на опытно-промышленном стане.

### ПРОВОДИМЫЕ РАСЧЕТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на опытно-промышленном трехвалковом стане МИСиС 130 с углом наклона образующей обжимного участка валка к оси прокатки  $10^\circ$ . В качестве заготовок выбраны гильзы диам. 90 мм из стали 40Х: тонкостенные гильзы с толщиной стенки 9 мм, с отношением диаметра ( $D$ ) к толщине стенки ( $S$ ), равным 10; толстостенные с толщиной стенки 13 мм,  $D/S = 7$ . Перед редуцированием гильзы нагревали в камерной электрической печи до температуры  $950^\circ\text{C}$ . Редуцирование тонкостенной гильзы осуществляли на 16 %, а толстостенной – на 25 %. В процессе редуцирования были получены недокатанные (заторможенные) образцы (рис. 1). Диаметр прокатанной части образца, полученного из гильзы с  $D/S = 10$ , составляет 76 мм, средняя толщина стенки 11,5 мм. Диаметр прокатанной части образца, полученного из гильзы с  $D/S = 7$ , составляет 65,8 мм, средняя толщина стенки 16,4 мм.

Основной характеристикой формоизменения металла в трехвалковых станах винтовой прокатки является овальность раската в очаге деформации [9 – 11], которая равна отношению радиуса раската при входе в контакт металла с валком ( $R$ ) к радиусу раската под валком ( $r$ ) или кратчайшему расстоянию от оси прокатки до поверхности валка. Овальность раската характеризуется коэффициентом овальности  $\xi$  [9], определяется по формуле



Рис. 1. Заторможенные гильзы

Fig. 1. Damped cupped blanks

$$\xi = \frac{R}{r}.$$

Определение радиусов заторможенных образцов в зоне контакта металла с валком осуществляли согласно схеме (рис. 2) (где точка  $A$  – точка входа в контакт металла с валком в поперечном сечении;  $R$  – проведенный в точку  $A$  радиус при входе в контакт металла с валком; точка  $B$  соответствует кратчайшему расстоянию от оси прокатки (точка  $O$ ) до поверхности валка; радиус, проведенный в эту точку, является радиусом образца под валком).

Определение значения  $r$  осуществляли следующим образом: при выключении двигателей стана за счет проворачивания валков в обратном направлении, которое обусловлено снятием крутящего момента и упругих деформаций в шпинделе, участок  $BC$  обжимается, а в точке  $B$  образуется складка, позволяющая определить расположение этой точки на получившемся образце. Геометрическое местоположение точки  $B$  в каждом из рассмотренных сечений является границей между участками: входным ( $AB$ ) и выходным ( $BC$ ) на образце. Участок  $BC'$  является выходным участком в процессе прокатки и образуется в результате поперечной раскатки образца в тангенциальном направлении. Следует отметить, что положение точки  $C'$  на образце найти невозможно.

Радиус  $R$  определяется по ширине контактной поверхности входного участка  $AB$ . Поскольку обжатие образца осуществляется на участке  $AB$ , то в расчетах нужно исключить ширину контактной поверхности выходного участка  $BC$ , образующейся за счет проворачивания валков при выключении привода стана и поперечной деформации образца в тангенциальном направлении. С учетом ширины контактной поверхности значение  $R$  можно определить по формуле

$$R = \frac{b^2(0,5D_b + r)}{D_b r} + r,$$

где  $b$  – ширина контактной поверхности на входном участке;  $D_b$  – диаметр валка.

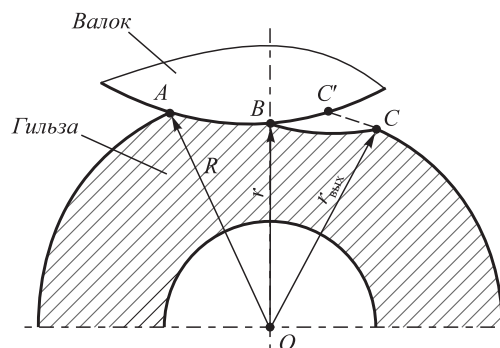


Рис. 2. Поперечное сечение контактной поверхности

Fig. 2. Cross-section of contact surface

Для получения более точных значений ширины пятна контакта переведены на лист и сканированы в масштабе 1:1. Замеры ширины контактной поверхности производили в программе Компас [12]. Пятно контактной поверхности с отмеченными значениями суммарной ширины и ширины контактной поверхности на входном участке, а также основные зоны очага деформации показаны на рис. 3.

Для определения радиуса  $R$  необходимо знать диаметр вала в каждом из рассмотренных сечений. Основываясь на методике расчета геометрии очага деформации [13, 14], диаметр вала определяется по формуле

$$D_b = D_0 + 2\Delta x \operatorname{tg}(\varphi),$$

где  $D_0$  – известный диаметр вала, определенный по калибровке;  $\Delta x$  – шаг по оси  $x$ , принимается равным расстоянию между рассматриваемыми сечениями;  $\varphi$  – угол наклона образующей вала к оси вала на рассматриваемом участке.

Измеренные и рассчитанные геометрические параметры заторможенных образцов при значении  $D/S$ , равным 7 и 10, представлены в табл. 1.

В зоне обжатия очага деформации радиусы  $r$  гильзы под валком уменьшаются. За счет деформации в поперечном направлении [14 – 17] происходит смещение

металла в зазоры между валками, при этом  $R > r$ . Овальность гильз увеличивается (табл. 1). Максимальная овальность для гильзы при  $D/S = 10$  составляет 1,10, а для гильзы при  $D/S = 7$  – 1,09. В результате увеличения овальности в зоне обжатия наблюдается увеличение ширины контактной поверхности (рис. 3). Так, при редуцировании тонкостенных гильз максимальная суммарная ширина контактной поверхности составляет 34 мм, а ширина участка обжатия  $AB$  – 19 мм (табл. 1). Наибольшего значения ширина достигает на расстоянии 20 мм от начала очага деформации. Редуцирование толстостенных гильз сопровождалось увеличением ширины контактной поверхности до 26 мм, а на обжимном участке  $AB$  – до 17 мм. Наибольшего значения ширина контактной поверхности достигает на расстоянии 25 мм от начала очага деформации. Следует отметить, что толщина стенки гильз при редуцировании увеличивается, поскольку процесс осуществляется в стане винтовой прокатки. Точность изготовления труб по толщине стенки становится выше, это отмечено в исследованиях [10, 11].

Детальное исследование формоизменения осуществляли путем компьютерного конечно-элементного моделирования процесса редуцирования в программе QFORM [18 – 20]. При моделировании использовали гильзы с аналогичными размерами. Па-

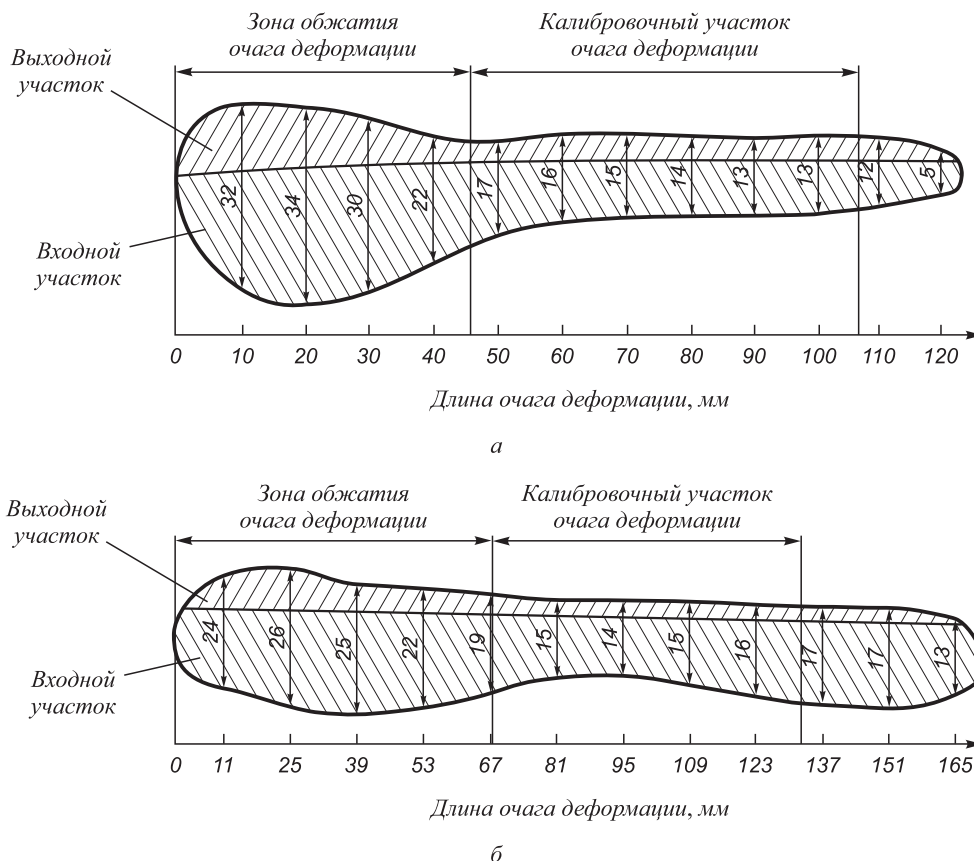


Рис. 3. Пятна контактных поверхностей образца с  $D/S = 10$  (а) и  $D/S = 7$  (б)

Fig. 3. Impressions of contact surface area of the sample with  $D/S = 10$  (a) and of the sample with  $D/S = 7$  (b)

параметры моделирования были выбраны в соответствии с условиями эксперимента, проводимого на стане МИСиС 130. В табл. 2 представлены значения  $R$  и  $r$ , полученные путем вычислений при моделировании. Наибольшая разница ( $\Delta R$ ,  $\Delta r$ ) между измеренными значениями  $R$  и  $r$  (табл. 1) и значениями, полученными

компьютерным моделированием (табл. 2), составляет 4,6 %.

Аналогично гильзам, полученным на стане МИСиС 130, разница между значениями  $R$  и  $r$  гильз в зоне редуцирования, полученная при компьютерном моделировании, увеличивается. Овальность гильз становится

Таблица 1

### Параметры заторможенных гильз

Table 1. Parameters of damped cupped blanks

Параметры гильзы с $D/S = 10$					Параметры гильзы с $D/S = 7$				
Длина очага деформации, мм	$r$ , мм	$b$ , мм	$R$ , мм	$\xi$	Длина очага деформации, мм	$r$ , мм	$b$ , мм	$R$ , мм	$\xi$
0	45,4	0	45,4	1,00	0	45,4	0	45,4	1,00
10	44,0	17	45,9	1,04	11	42,9	15	44,5	1,04
20	41,6	19	45,4	1,09	25	40,5	17	43,4	1,07
30	39,8	17	43,7	1,10	39	38,5	18	41,3	1,07
40	39,0	14	41,4	1,06	53	36,5	18	39,3	1,08
50	38,9	11	39,8	1,02	67	34,8	16	37,5	1,08
60	38,5	10	39,5	1,03	81	33,6	13	35,7	1,06
70	38,4	10	39,0	1,02	95	33,3	10	34,5	1,04
80	38,1	9	38,9	1,02	109	33,0	12	34,0	1,03
90	38,1	9	38,2	1,01	123	32,8	14	33,8	1,03
100	37,8	8	38,4	1,01	137	32,7	14	33,2	1,02
110	37,9	8	38,1	1,01	151	32,8	14	33,0	1,01
120	38,0	4	38,0	1,00	165	32,8	-	32,9	1,00

Таблица 2

### Результаты моделирования в QFORM

Table 2. Results of QFORM simulation

Параметры гильзы с $D/S = 10$						Параметры гильзы с $D/S = 7$					
Длина очага деформации, мм	$r$ , мм	$R$ , мм	$\xi$	$\Delta r$ , %	$\Delta R$ , %	Длина очага деформации, мм	$r$ , мм	$R$ , мм	$\xi$	$\Delta r$ , %	$\Delta R$ , %
0	45,4	45,4	1,00	0	0	0	45,0	45,0	1,00	0	0
10	44,0	45,0	1,02	0	2,0	11	43,2	44,5	1,03	0,7	0
20	43,5	44,9	1,03	4,6	1,1	25	41,5	43,4	1,05	2,5	0
30	41,6	44,3	1,06	4,5	1,4	39	38,8	41,3	1,06	0,8	0
40	39,7	43,1	1,09	1,8	4,1	53	37,2	39,4	1,06	1,9	0,3
50	38,5	41,1	1,07	1,0	3,3	67	35,9	37,8	1,05	3,2	0,8
60	38,2	39,7	1,04	0,8	0,5	81	34,8	36,2	1,04	3,6	1,4
70	38,2	39,2	1,03	0,5	0,5	95	33,9	34,8	1,03	1,8	0,9
80	38,6	39,0	1,01	1,3	0,3	109	33,1	33,9	1,02	0,3	0,3
90	38,5	38,8	1,01	1,3	1,6	123	33,0	33,9	1,03	0,6	0,3
100	38,5	38,6	1,00	1,3	0,5	137	32,8	33,8	1,03	0,3	1,8
110	38,5	38,5	1,00	1,6	1,0	151	32,9	33,4	1,02	0,3	1,2
120	38,3	38,3	1,00	0,8	0,8	165	32,7	33,2	1,02	0,3	0,9



больше. Максимальная овальность для гильз с  $D/S = 10$ , полученная моделированием, составляет 1,09, а гильз с  $D/S = 7 - 1,06$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов эксперимента и компьютерного моделирования показывает, что, несмотря на то, что суммарное обжатие тонкостенных гильз меньше, чем толстостенных, их овальность выше. При редуцировании тонкостенных гильз их устойчивость к деформациям в межвалковом пространстве меньше, об этом свидетельствует большее значение овальности. Увеличение овальности в процессе редуцирования тонкостенных гильз в промышленных условиях может привести к потере стабильности процесса деформирования, образованию гранения, концевых дефектов труб [2, 6]. Безоправочную прокатку тонкостенных гильз с  $D/S = 10$  на ТПА следует осуществлять с обжатиями по диаметру не более 15 %, что обеспечит стабильный процесс деформирования, позволит избежать образования гранения и других дефектов формы труб. Редуцирование толстостенных гильз с  $D/S = 7$  осуществляется стабильно при больших обжатиях по диаметру. В промышленных условиях можно осуществлять безоправочную прокатку толстостенных гильз с обжатием по диаметру до 25 %.

Овальность гильз при безоправочной прокатке меньше, чем при раскатке на оправке. На рис. 4 представлены зависимости овальности заторможенной гильзы, полученной при редуцировании толстостенной гильзы с  $D/S = 7$ , и гильзы, полученной при прокатке на цилиндрической плавающей оправке диаметром 35 мм. Заторможенная гильза получена в процессе раскатки гильзы диаметром 80 мм с толщиной стенки 20 мм, с  $D/S = 4$  в трубу диаметром 71 мм с толщиной стенки 18 мм [9]. Обжатие по диаметру при прокатке трубы на оправке составляет 11 %, а по толщине стенки – 2 мм. Процесс раскатки осуществляли на стане МИСиС 130 с валками с той же калибровкой.

Несмотря на то, что раскатку толстостенной гильзы осуществляли с меньшим суммарным обжатием по диаметру, в связи с наличием обжатия по стенке на оправке овальность увеличивается до 1,12. В зоне обжатия стенки на оправке овальность увеличивается более интенсивно (рис. 4). Наличие оправки ограничивает смещение металла в осевом направлении, что способствует его вытеснению в зазоры между валками, особенно в валках без гребня. Гребень позволяет локализовать зону обжатия гильзы по стенке, в результате уменьшается овальность гильзы. Это объясняется применением рабочих валков с гребнем для раскатки гильз на ТПА с трехвалковым станом [2, 9]. Для повышения стабильности процесса раскатки гильз на оправке необходимо применять минимальные обжатия стенки трубы на обжимном участке, а ее основную деформацию осуществлять на гребне.

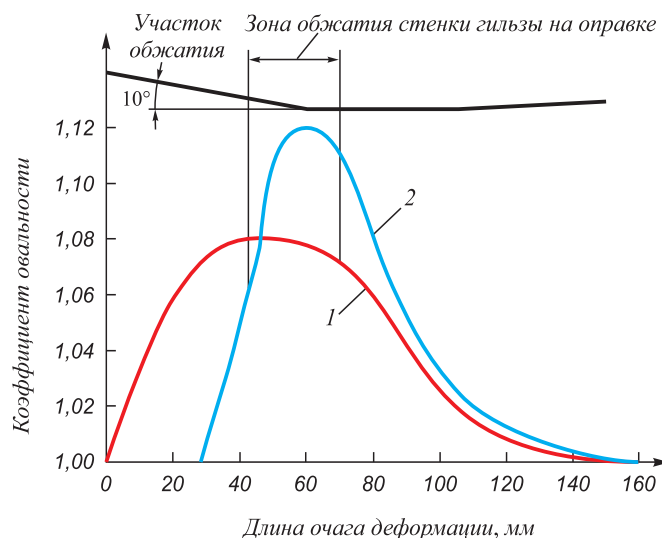


Рис. 4. Овальность по очагу деформации при редуцировании (1) и при прокатке на оправке (2)

Fig. 4. Ovality along the deformation zone at reduction (1) and at rolling on simple male punch (2)

## ВЫВОДЫ

В результате анализа данных, полученных при исследовании формоизменения металла в процессе редуцирования на трехвалковом стане, можно сделать следующие выводы:

- чем больше значение  $D/S$  гильзы, тем выше ее овальность при редуцировании, что может привести к потере устойчивости процесса деформирования и образованию дефектов формы (гранению);
- в условиях прокатки на ТПА редуцирование тонкостенных труб с  $D/S = 9 \div 10$  необходимо осуществлять с обжатием по диаметру не более 15 %, что позволит обеспечить устойчивость процесса деформирования; редуцирование толстостенных труб с  $D/S = 4 \div 7$  можно осуществлять с обжатием по диаметру до 25 %;
- для повышения стабильности процесса раскатки гильз на оправке необходимо применять минимальные обжатия стенки трубы на обжимном участке, а ее основную деформацию осуществлять на гребне.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трубное производство. Учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Изд. дом «МИСиС», 2011. – 970 с.
2. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник. – М.: Изд. дом МИСиС, 2015. – 451 с.
3. Романенко В.П., Степанов П.П., Гончарук А.В., Крискович С.М., Илларионов Г.П., Никулин А.Н., Филиппов Г.А. Перспективная технология производства полых вагонных осей из полых заготовки // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 2. С. 27 – 34.
4. Машины и агрегаты для производства стальных труб: учебное пособие для вузов / Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев; под ред. Ю.Ф. Шевакина. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 388 с.

5. Шаманаев В.И. Исследование процесса винтовой прокатки толстостенных гильз и труб: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.167.05. – М.: МИСиС, 1979. – 36 с.
6. Pat. 4409810 US. Process for manufacturing seamless metal tubes / T. Yamada; filed 09.07.1981, publ. 18.10.1983.
7. Pat. 3495429 US. Method of reducing tubes, especially thick-walled tubes and means for practicing the method / G. Muller; filed 16.06.1966, publ. 17.02.1970.
8. Jiang Y., Tang H. Method for improving transverse wall thickness precision of seamless steel tube based on tube rotation // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015. Vol. 22. No. 10. P. 924 – 930.
9. 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. Т. 59. № 3. С. 167 – 172.
10. Romancev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Gamin Yu.V. Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015. Vol. 56. No. 5. P. 522 – 526.
11. Романенко В.П., Манько А.И., Степанов П.П., Перминова О.Н., Крискович С.М. Перспективная технология получения полых вагонных осей на основе винтовой прошивки // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2017. Т. 4. № 2. С. 28 – 34.
12. Галкин С.П., Фадеев В.А., Гусак А.Ю. Сопоставительный анализ геометрии мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки // *Производство проката*. 2015. № 12. С. 19 – 25.
13. Галкин С.П. Показатель поперечной деформации при прошивке в стане винтовой прокатки // *Производство проката*. 2011. № 9. С. 18 – 23.
14. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. – М.: Металлургиздат, 2015. – 380 с.
15. Pan K., Wang X., Qing G. Finite element simulation of tube stretch-reducing wall thickness cross-section with round passes system // *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2000. Vol. 22. No. 1. P. 38 – 40.
16. Karpov B.V., Skripalenko M.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Samusev S.V., Huy T.B., Pavlov S.A. Studying the Nonstationary Stages of Screw Rolling of Billets with Profiled Ends // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 3-4. P. 257 – 264.
17. Man-soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho, Seung-won Jeong, Hokeun Moon. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft // *Procedia Engineering*. 2014. No. 81. P. 197 – 202.
18. Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jiab-hua Hu, Qing-hua Wang, Jing-chao Sun. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 8. P. 1597 – 1604.
19. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Bajor T., Tsay K., Arbuz A., Gusseyinov N., Nemkaeva R. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys // *Metallurgija*. 2017. Vol. 56. No. 1-2. P. 199 – 202.
20. Будников А.С., Харитонов Е.А., Сорокин Ф.В. Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трехвалковом стане винтовой прокатки // *Сталь*. 2017. № 10. С. 31 – 34.

Поступила в редакцию 2 февраля 2018 г.

После доработки 23 мая 2019 г.

Принята к публикации 20 июня 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 10, pp. 756–762.

## METAL FORMING DURING PIPES REDUCTION ON A THREE-HIGH ROLLING MILL

A.S. Aleshchenko, A.S. Budnikov, E.A. Kharitonov

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

**Abstract.** Pipe rolling plants (PRP) with three-high screw rolling mills are used to produce hot-rolled seamless pipes. In Russia, two such rolling units are used: PRP 160 at Pervouralsk Novotrubny Plant and PRP 200 at Volzhsky Pipe Plant. Recently, the most acute issue is increasing their technological capabilities. There is a need of expanding size and grade mix, as well as non-traditional use of gauge and rolling mill for screw rolling. The paper presents results of experimental study of the process of reduction or un-adjusting rolling of pipes on three-high screw rolling mills with an increase in reduction of diameter up to 25 %. The results of computer finite element modeling in QFORM program are provided. The aim of this work was to study effect of rolling process with increased reduction in diameter on change of metal form in deformation zone and changes in geometrical dimensions at reduction of cups with different wall thickness on the pilot mill. Important role in process of metal forming during screw rolling (especially when rolling hollow products and pipes) plays cupped blank ovality that is equal to the ratio of the roll radius when the metal comes in contact with the roller to the radius under the roller in the cross section of deformation zone. Ovality characterizes stability of change in geometric dimensions of pipes and their resistance to deformation in inter-roll space. The reduction of thin-wall cupped blank is accompanied by large values of ovality, deformation process is less stable, and as a result, form defects (facing) and end defects occur during plug rolling. Ovality at plug rolling increases more intensely in comparison with plugless rolling. Presence of plug limits displacement of metal in axial direction and contributes to displacement of metal in gaps between rollers. At plugged rolling, it is necessary to use rolls with collars allowing main reduction along the wall, thereby localizing reduction zone on the plug, and reducing ovality of cupped blanks.

**Keywords:** reduction, plugged rolling, three-high rolling mill, screw rolling, ovality, contact surface, deformation, deformation zone.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-10-756-762

## REFERENCES

1. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. *Trubnoe proizvodstvo. Uchebnik* [Pipe production. Textbook]. Moscow: ID MISiS, 2011, 970 p. (In Russ.).
2. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem. Uchebnik* [Theory of metal forming. Textbook]. Moscow: ID MISiS, 2015, 451 p. (In Russ.).
3. Romanenko V.P., Stepanov P.P., Goncharuk A.V., Kriskovich S.M., Illarionov G.P., Nikulin A.N., Filippov G.A. Advanced technology for production of hollow car axles from a hollow billet. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2016, no. 2, pp. 27–34. (In Russ.).
4. Shevakin Yu.F., Kolikov A.P., Romanenko V.P., Samusev S.V. *Mashiny i agregaty dlya proizvodstva stal'nykh trub: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Machines and units for production of steel pipes: University manual]. Shevakin Yu.F. ed. Moscow: Internet Inzhiniring, 2007, 388 p. (In Russ.).
5. Shamanaev V.I. *Issledovanie protsesssa vintovoi prokatki tolstostennykh gil'z i trub: avtoref. dis... kand. tekh. nauk* [Study of the process of helical rolling of thick-wall cupped blanks and pipes: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Moscow: MISiS, 1979, 251 p. (In Russ.).
6. Yamada T. *Process for manufacturing seamless metal tubes*. Patent no. 4409810 US, 1983.
7. Muller G. *Method of reducing tubes, especially thick-walled tubes and means for practicing the method*. Patent no. 3495429 US, 1966.

8. Jiang Y., Tang H. Method for improving transverse wall thickness precision of seamless steel tube based on tube rotation. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015, vol. 22, no. 10, pp. 924–930.
9. Kharitonov E.A., Romanenko V.P., Budnikov A.S. Sleeve deformation in a three-roller screw-rolling mill. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 3, pp. 180–185.
10. Romancev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Gamin Yu.V. Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015, vol. 56, no. 5, pp. 522–526.
11. Romanenko V.P., Man'ko A.I., Stepanov P.P., Perminova O.N., Kriskovich S.M. Advanced technology for producing hollow car axles based on screw conversion. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 28–34. (In Russ.).
12. Galkin S.P., Fadeev V.A., Gusak A.Yu. Comparative analysis of geometry of mini-mills of radial shear (screw) rolling. *Proizvodstvo prokata*. 2015, no. 12, pp. 19–25. (In Russ.).
13. Galkin S.P. Index of lateral deformation at conversion in screw rolling mill. *Proizvodstvo prokata*. 2011, no. 9, pp. 18–23. (In Russ.).
14. Nikulin A.N. *Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii* [Screw rolling. Stresses and deformations]. Moscow: Metallurgizdat, 2015, 380 p.
15. Pan K., Wang X., Qing G. Finite element simulation of tube stretch-reducing wall thickness cross-section with round passes system. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2000, vol. 22, no. 1, pp. 38–40.
16. Karpov B.V., Skripalenko M.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Samusev S.V., Huy T.B., Pavlov S.A. Studying the nonstationary stages of screw rolling of billets with profiled ends. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 3-4, pp. 257–264.
17. Man-soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho, Seung-won Jeong, Ho-keun Moon. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft. *Procedia Engineering*. 2014, no. 81, pp. 197–202.
18. Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jiab-hua Hu, Qing-hua Wang, Jing-chao Sun. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 8, pp. 1597–1604.
19. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Bajor T., Tsay K., Arbuz A., Gusseyinov N., Nemkaeva R. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys. *Metallurgija*. 2017, vol. 56, no. 1-2, pp. 199–202.
20. Budnikov A.S., Kharitonov E.A., Sorokin F.V. Study of pipe wall thickness variations in process of reduction on three-high screw rolling mill. *Stal'*. 2017, no. 10, pp. 31–34. (In Russ.).

**Acknowledgements.** R.V. Iskhakov and A.R. Shamilov (Pervouralsk Novotrubny Plant) took participation in the research.

**Information about the authors:**

**A.S. Aleshchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metal Forming” (judger85@mail.ru)

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

**E.A. Kharitonov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming” (haritonov45@mail.ru)

Received February 2, 2018

Revised May 23, 2019

Accepted June 20, 2019