

УДК 621.774.353

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ВАЛКОВ СТАНОВ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

*Будников А.С., аспирант, инженер кафедры «Обработка металлов давлением» (far128@yandex.ru)**Романцев Б.А., д.т.н. профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (boralr@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 пр., 4)

**Аннотация.** Проблема, связанная с определением максимального диаметра рабочих валков, характерна для станов винтовой прокатки, имеющих более двух рабочих валков. Точное определение диаметра рабочих валков особенно актуально для трехвалковых станков, широко используемых в промышленности в качестве раскатных, калибровочных и станков радиально-сдвиговой прокатки, работающих на больших углах подачи и раскатки. Как правило, диаметр рабочих валков определяется конструктивным способом или с использованием 3D моделирования. Эти способы достаточно сложные, требуют специальных навыков и не позволяют исследовать влияние основных настроечных факторов стана, таких, как углы подачи и раскатки. Существует расчетный способ определения диаметра бочки валка для трехвалкового стана, однако он применим для станков, работающих на углах подачи до  $10^\circ$  и углах раскатки  $4 - 7^\circ$ . В условиях радиально-сдвиговой прокатки этот способ не используется, поскольку не учитывает влияние углов подачи и раскатки, от которых зависят условия процесса деформации, технологичность и качество получаемой продукции. В работе рассмотрен более общий способ определения диаметра рабочих валков трех и более валкового стана с учетом их разворота на угол подачи и раскатки. Показана зависимость между диаметром валков, их количеством, минимальным диаметром калибра очага деформации, углом подачи и раскатки, которая позволяет оценить конструктивные возможности как трех, так и четырехвалковых станков винтовой прокатки. Результаты представленной работы позволяют расширить возможности дальнейших исследований технологии и оборудования трехвалковых станков винтовой прокатки для получения сплошных и полых изделий с использованием совершенно новых режимов деформации для процессов раскатки полых изделий, их редуцирования, а также радиально-сдвиговой прокатки. Немаловажным является возможность дополнения имеющихся знаний об изменении геометрии очага деформации, а также прогнозирования геометрических параметров рабочих валков проектируемых мнговалковых станков для заданных размеров проката.

**Ключевые слова:** рабочие валки, стан винтовой прокатки, стан радиально-сдвиговой прокатки, определение диаметра валков, трехвалковый стан, оборудование для раскатки труб.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-9-683-688

Основным рабочим инструментом станков винтовой прокатки являются валки. На практике используют двух- и трехвалковые станы винтовой прокатки [1]. Валки двухвалковых станков проектируются с большими значениями диаметров от 900 до 1500 мм в пережиге [2], которые определяются, как правило, из конструктивных соображений. Диаметры рабочих валков станков винтовой прокатки с количеством валков более, чем два, ограничиваются возможностью сведения их на минимальный калибр [3]. Чаще всего, максимальный диаметр валка в таких станах определяется с использованием 3D моделирования [4 – 5]. Рассмотрим конструкцию стана с количеством валков  $n$  больше двух. Диаметры валков уменьшаются с увеличением их количества, поскольку сокращается свободное пространство вокруг оси прокатки. На рис. 1 представлено расположение валков в трех- и четырехвалковом стане. Для примера рассмотрим стан, у которого валки сведены на минимальный калибр  $d_k^{\min} = 70$  мм [6 – 7], имеют

диаметры 350 мм в трехвалковом стане и 140 мм в четырехвалковом и при этом развернуты на угол подачи  $\beta = 15^\circ$  и угол раскатки  $\gamma = 7^\circ$ . Уменьшение диаметра валков четырехвалкового стана существенно сокращает габариты валкового узла, что приводит к снижению прочностных характеристик рабочих валков, подшипниковых опор и других механизмов валкового узла. Для этих станков необходимо определять максимально возможный диаметр рабочих валков  $D_B^{\max}$  при заданных параметрах, минимальный калибр очага деформации  $d_k^{\min}$ , зазор между соседними валками  $\Delta$ , количество рабочих валков  $n$  и их разворот на углы  $\beta$  и  $\gamma$  [8 – 9]. Связь между этими показателями можно представить в виде

$$D_B^{\max} \leq \frac{d_k^{\min} \frac{\Delta}{\cos \varphi}}{k}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, связывающий диаметр валка с диаметром калибра.

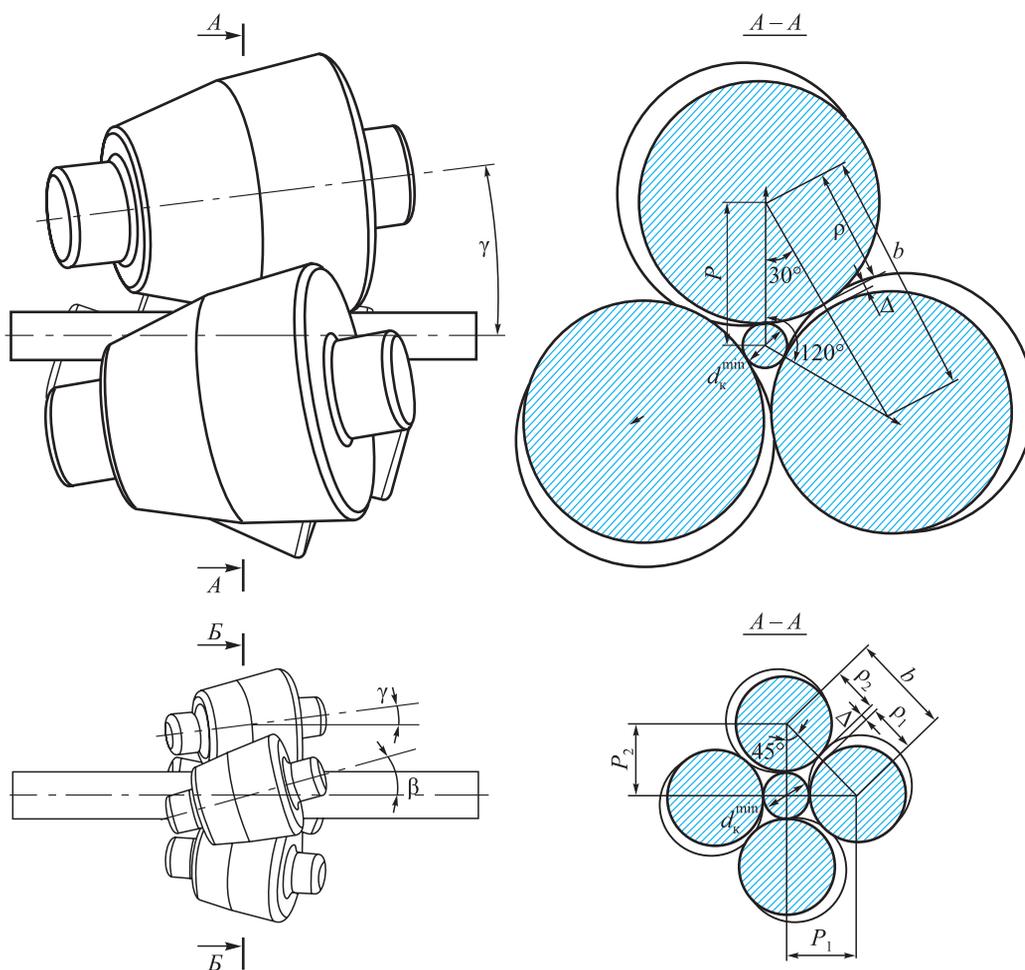


Рис. 1. Расположение валков

Fig. 1. Location of rolls

С учетом того, что диаметры валков равны, угол  $\varphi$  равен

$$\varphi = 90 - \frac{180}{n}. \quad (2)$$

Формула (1) показывает взаимосвязь между диаметром рабочего валка, минимальным диаметром калибра и величиной технологического зазора между соседними валками. Коэффициент связи  $k$  включает в себя такие неявные параметры, как угол подачи, раскатки и количество рабочих валков. Для стана с количеством валков  $n$ ,  $D_B^{\max}$  должно удовлетворять условию (1) с коэффициентом  $k$ , равным

$$k = \frac{\cos \gamma - \cos \varphi \sqrt{\cos(\varphi)^2 \cos(\gamma)^2 + \sin(\varphi)^2 \cos(\beta)^2}}{\cos \gamma \cos \varphi \sqrt{\cos(\varphi)^2 \cos(\gamma)^2 + \sin(\varphi)^2 \cos(\beta)^2}}. \quad (3)$$

Соседние валки не должны касаться друг друга в случае сведения их на минимальный калибр, т. е. должно выполняться условие

$$k < \frac{d_k^{\min}}{D_B^{\max}}. \quad (4)$$

При определении диаметра валка для трехвалкового стана без учета разворота валков на угол подачи и раскатки, коэффициент  $k$  зависит только от угла  $\varphi$ . Если  $\varphi = 30^\circ$  (рис. 1, сечение  $A - A$ ),  $k = 0,15$ , уравнение (1) преобразуется в ряд известных зависимостей, предлагаемых для определения диаметра валков [10 – 14].

Несмотря на это, коэффициент  $k$  зависит от разворота валков на угол подачи и раскатки. Проекция окружности валка на плоскость сечения  $A - A$  в трехвалковом стане и  $B - B$  в четырехвалковом имеет вид эллипса. Коэффициент  $k$  с учетом  $\beta$  и  $\gamma$  для трехвалкового стана при  $\varphi = 30^\circ$  определяется по формуле

$$k = \frac{\cos \gamma - 0,87 \sqrt{0,75 \cos(\gamma)^2 + 0,25 \cos(\beta)^2}}{\cos \gamma \sqrt{0,57 \cos(\gamma)^2 + 0,19 \cos(\beta)^2}}. \quad (5)$$

Для четырехвалкового стана при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $k$  определяется уравнением

$$k = \frac{1,98 \cos \gamma - \sqrt{\cos^2(\gamma) + \cos^2(\beta)}}{\cos \gamma \sqrt{\cos^2(\gamma) + \cos^2(\beta)}}. \quad (6)$$

Как видно из условия (1), в стане с  $n > 2$  максимальный диаметр валков зависит от минимального диаметра калибра очага деформации. На рис. 2 представлены гистограммы диаметров валков при диаметрах калибра очага деформации 10 – 210 мм, для трех-, четырех-, пятивалкового стана при  $\beta = 15^\circ$  и  $\gamma = 7^\circ$ .

Гистограммы рис. 2 показывают линейную зависимость между диаметрами валков и калибра очага деформации в многовалковом стане с коэффициентом пропорциональности  $k$ . Уменьшение количества валков приводит к увеличению коэффициента  $k$ . Для трехвалкового стана  $k$  равно 0,16, для четырехвалкового при тех же параметрах – 0,42, а для пятивалкового – 0,73. Интенсивность увеличения диаметра валков при увеличении диаметра калибра для станов с большим количеством валков снижается. К примеру, для калибра очага деформации диаметром 170 мм максимальный диаметр валков четырехвалкового стана при зазоре между валками 5 мм составляет 360 мм, а максималь-

ный диаметр валков трехвалкового стана при той же величине зазора – 1000 мм. Уменьшение диаметра валков трехвалкового стана для калибра 170 мм приводит к увеличению зазора между валками, что способствует тангенциальной раскатке. Применение четырехвалкового стана с диаметром валков 360 мм уменьшает зазор между валками, делая очаг деформации более замкнутым, это позволяет снизить величину тангенциальной раскатки. Четырехвалковую схему прокатки выгодно использовать в станах с диаметром калибра от 150 мм. Для станов с минимальным калибром 30 – 90 мм максимальные возможные значения диаметра валка по трехвалковой схеме меняются от 150 до 520 мм, четырехвалковой от 50 до 180 мм, а пятивалковой от 30 до 110 мм. В станах с небольшими диаметрами калибра, исходя из конструктивных соображений, возможно использовать только трехвалковую схему прокатки.

Количество рабочих валков, отвечающее технологическим параметрам процесса винтовой прокатки

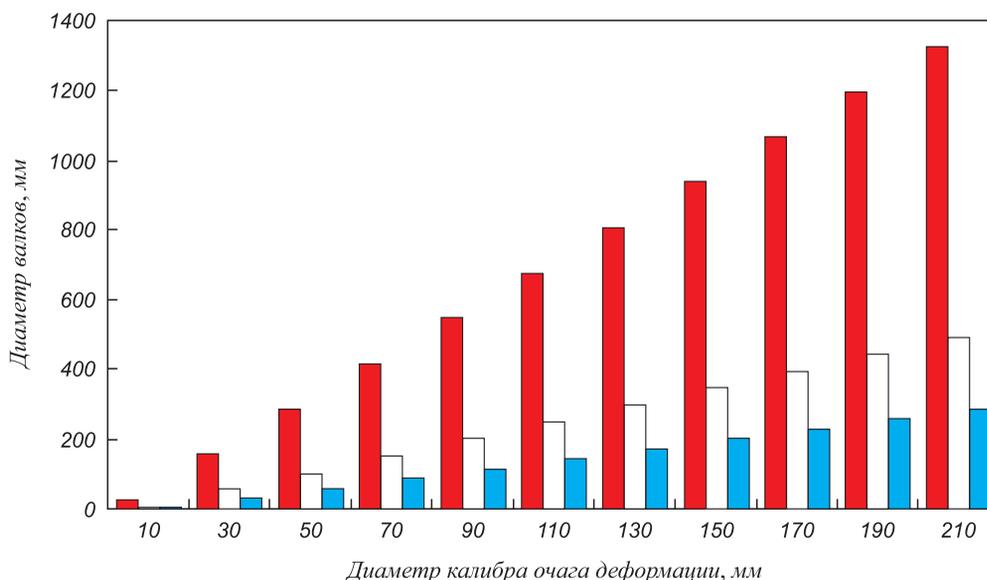


Рис. 2. Диаметр валка при различных значениях диаметра калибра:  
 ■ – трехвалковый стан; □ – четырехвалковый стан; ■ – пятивалковый стан

Fig. 2. Diameter of the roll for different values of caliber diameter:  
 ■ – three-roll mill; □ – four-roll mill; ■ – five-roll mill

**Максимальное значение диаметра валков трех- и четырехвалкового стана**

**Maximum value of the roll diameter of three-roll and four-roll mills**

Угол раскатки, град	Максимальный диаметр валков при диаметре калибра 70 мм и угле подачи, град						
	0	5	10	15	20	25	30
	В трехвалковом стане						
0	415	412	404	391	374	354	334
10	421	418	409	395	377	356	335
	В четырехвалковом стане						
0	157	156	153	148	142	135	127
10	159	158	155	150	143	136	127

и конструкционным особенностям станов, составляет 3 – 4 шт. В связи с этим, подробно рассмотрим влияние угла подачи и раскатки на максимальные возможные значения диаметров валков в трех- и четырехвалковом стане.

В таблице представлены значения диаметров валков для трех- и четырехвалкового стана при угле раскатки от 0 до 10° и угле подачи от 0 до 30°. Изменение  $D_B^{max}$  трех- и четырехвалкового стана в зависимости от  $\beta$  наглядно видно на рис. 3.

Верхняя кривая показывает изменение диаметров валков трехвалкового стана с минимальным значением диаметра калибра очага деформации 70 мм.

При изменении  $\beta$  от 0 до 10° диаметр валка уменьшается на 11 мм. Изменение  $\beta$  в данном диапазоне не оказывает существенного влияния на диаметр валков. Дальнейшее увеличение  $\beta$  до 30° показывает рост его влияния на диаметр. Так, при изменении  $\beta$  от 25 до 30°, диаметр валка уменьшается на 20 мм. Влияние  $\beta$  на диаметр увеличивается с ростом угла подачи, следовательно в станах с большими углами подачи, а именно радиально-сдвиговой прокатки, где  $\beta$  меняется от 18 до 25° [15 – 17], расчет максимально возможного диаметра валка следует осуществлять с учетом угла подачи.

Четырехвалковую схему можно использовать в прошивных станах, если вместо направляющего инструмента использовать валки, диаметр которых меньше диаметра основных (рабочих) валков. Такая схема позволяет перераспределить нагрузку на валки за счет различия в их диаметре и овальности очага деформации и получать прокат с меньшим диаметром (в отличие от схемы на рис. 1), а также сократить габариты рабочей клетки.

На рис. 4 представлена схема расположения валков четырехвалкового стана, имеющего два валка с диаметром  $D_1$  и  $D_2$ , причем  $D_1$  больше  $D_2$ .

Наличие зазора между соседними валками обеспечивается при соблюдении условия

$$\frac{P_2}{\cos \varphi} > R_2 + R_1. \quad (7)$$

В отличие от четырехвалкового стана (см. рис. 1), где диаметры валков равны, угол  $\varphi$  определяется диаметром рабочих валков и калибром.

В общем случае, с учетом углов  $\beta$  и  $\gamma$ , зависимость между  $D_1$  и  $d_k^{min}$  в пережиме очага деформации определяется соотношением

$$d_k^{min} = \frac{D_1(C_1 \cos \gamma \sin \varphi + \cos \gamma \cos \varphi - 1) + 2\Delta \cos \gamma \sin \varphi}{\cos \gamma (1 - \xi \operatorname{tg} \varphi)(1 - C_2 \cos \gamma \cos \varphi) + \xi \cos \gamma \operatorname{tg} \varphi}, \quad (8)$$

где

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \varphi \cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi \cos^2 \beta}};$$

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi \cos^2 \gamma + \sin^2 \varphi \cos^2 \beta}};$$

$\xi$  – коэффициент овализации очага деформации;  $\Delta$  – зазор между опорным и рабочим валком.

Угол  $\varphi$  определяется конструктивно. Расчеты угла  $\varphi$  с учетом условия (7) для диапазона диаметров валков от 200 до 1000 мм показали, что значение  $\varphi$  можно определить по эмпирической зависимости

$$\varphi = 0,28 \ln D_1. \quad (9)$$

Диаметр валка  $D_2$ , с учетом углов  $\beta$  и  $\gamma$ , равен

$$D_2 = \frac{D_1 + d_k^{min} \cos \gamma (1 - \xi \operatorname{tg} \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (10)$$

Представленная методика будет полезна для разработок новых технологий и оборудования винтовой прокатки [18 – 20]. Стоит отметить, что в четырехвалковом

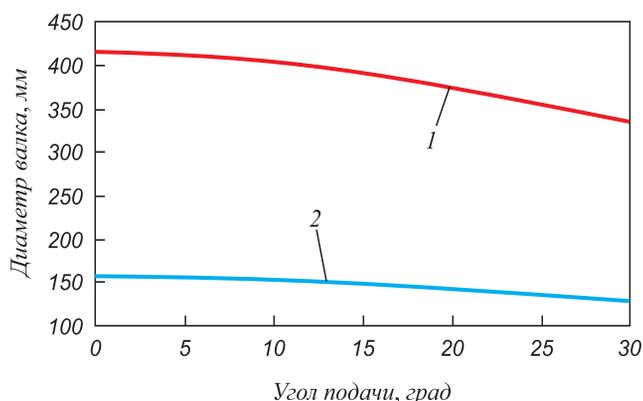


Рис. 3. Диаметр рабочих валков трехвалкового (1) и четырехвалкового (2) стана с углом раскатки 0°

Fig. 3. Diameter of working rolls of three-roll (1) and four-roll (2) mills with rolling angle of 0°

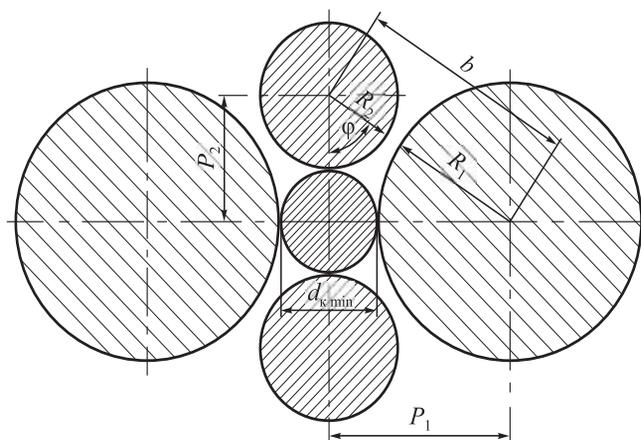


Рис. 4. Схема расположения валков четырехвалкового стана с различными диаметрами валков

Fig. 4. Scheme of location of rolls with different diameters in a four-roll mill

стане с различными значениями диаметров валков величина зазора  $\Delta$  между соседними валками зависит от их калибровки, поэтому необходимо проверять выполнение условия (7) на других участках очага деформации.

**Выводы.** Представлена методика определения максимального значения диаметров рабочих валков в многовалковых станах винтовой прокатки с учетом минимального диаметра калибра очага деформации, углов подачи и раскатки рабочих валков, а также их количества.

Используя предложенную методику, установлено, что наиболее интенсивно угол подачи влияет на максимальное значение диаметров рабочих валков в станах радиально-сдвиговой прокатки, имеющих повышенные значения углов подачи.

При использовании четырехвалковой схемы с различными диаметрами рабочих валков снижается ограничение в получении проката малого диаметра, характерное для схемы с одинаковыми диаметрами рабочих валков, а также появляется возможность перераспределения нагрузки на рабочие валки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015 – 451 с.
2. Шевакин Ю.Ф., Коликов А.П., Райков Ю.Н. Производство труб: Учебник для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 568 с.
3. Обработка металлов давлением: Учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавиликин, С.В. Самусев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008 – 960 с.
4. Кирпичников Н.Н., Сулина О.В. Оптимизация стратегии проектирования трехмерных моделей в САД-системах // Инновационная наука. 2016. № 8 – 2. С. 48 – 51.
5. Большаков В.П., Бочков А.Л., Лячек Б.Т. Проблемы обмена графическими данными между САД-системами // Компьютерные инструменты в образовании. 2013. № 2. С. 37 – 46.
6. Зимин В.Я., Пахомов В.П., Онуцин А.Б. и др. Опыт прокатки труб на калибровочном стане винтовой прокатки ТПА 70-270
- ОАО «Выксунский металлургический завод» и совершенствование калибровки рабочих валков // Производство проката. 2011. № 2. С. 11 – 14.
7. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Goncharuk A.V., Galkin S.P. Minutube-production unit 40-80 with three-highreeling mill // Metallurgist. Vol. 55. No. 11 – 12. С. 918 – 924.
8. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. – М.: Металлургиздат, 2015. – 380 с.
9. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
10. Машины и агрегаты для производства стальных труб: Учеб. пособие / Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 388 с.
11. Данченко В.Н. Технология трубного производства – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640.
12. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
13. Машины и агрегаты металлургического производства / Н.В. Пасечник, В.М. Синицкий, В.Г. Дрозд и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 912 с.
14. Jan Kazanecki. Wytwarzanie rur bez szwu. – Krakow: AGH, 2003. – 622 p.
15. 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.
16. Галкин С.П., Романцев Б.А., Харитонов Е.А. Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки // Черные металлы. 2015. № 1. С. 23 – 28.
17. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H. etc. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys // Metallurgija. 2016. No. 56. P. 199 – 202.
18. Галкин С.П. Показатель поперечной деформации при прошивке в стане винтовой прокатки // Производство проката. 2011. № 2. С. 18 – 23.
19. Wang F.-J., Shuang Y.-H., Hu J.-H., Wang Q.-H., Sun J.-C. 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.
20. Man-Soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho etc. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft // Procedia Engineering 81. 2014. December. P. 197 – 202.

Поступила 26 мая 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 9, pp. 683–688.

## DETERMINATION OF ROLLS DIAMETER FOR SCREW-ROLLING MILLS

*A.S. Budnikov, B.A. Romantsev, E.A. Kharitonov*

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

**Abstract.** The problem of determining the maximum diameter of working rolls is typical for screw rolling mills that have more than two working rolls. Precise determination of the working roll diameter is especially important for three-roll mills, which are widely used in such industries as rolling and calibration, and radial-shear rolling mills operating at large feeding and rolling angles. Typically, the diameter of working rolls is determined in a constructive way or using 3D modeling. These methods are quite complex, require special skills, and do not allow investigation of the influence of main tuning mill factors such as feeding and rolling angles. There is a calculated method for determining the diameter of the roll barrel for a three-roll mill, but it is applicable for mills working at feeding angles of up to 10 degrees and rolling angles of 4 – 7 degrees. In conditions of radial-shear rolling, this method is

not used, since it does not take into account the influence of feeding and rolling angles on which the conditions of the deformation process, manufacturability and quality of the products depend. The article considers a more general method for determining the diameter of working rolls of three or more rolling mills, taking into account their rotation at the feeding and rolling angles. The relationship between diameter of the rolls, their number, minimum diameter of the deformation center, the feeding and rolling angles are shown, which makes it possible to evaluate the structural capabilities of both three and four-roll rolling mills. The results of the presented work make it possible to expand the possibilities for further studies of the technology and equipment of three-roll screw rolling mills for the production of solid and hollow products using completely new deformation modes for the processes of rolling out hollow products of their reduction as well as radial shearing rolling. Importantly, it is possible to supplement existing knowledge about the change in geometry of deformation center, and also to predict geometric parameters of the working rolls of the projected multi-roll mills for given rolled products sizes.

**Keywords:** working roll, screw rolling mill, cross rolling mill, radial-displacement rolling mill, determination of roll diameter, three-roll mill, pipe rolling equipment.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-9-683-688

#### REFERENCES

1. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem: Uchebnik* [Theory of metal forming: Textbook]. Moscow: ID MISiS, 2015, 451 p. (In Russ.).
2. Shevakin Yu.F., Kolikov A.P., Raikov Yu.N. *Proizvodstvo trub: Uchebnik dlya vuzov* [Pipes production: Textbook for universities]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2005, 568 p. (In Russ.).
3. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. *Obrabotka metallov davleniem: Uchebnik* [Metal forming: Textbook]. Moscow: ID MISiS, 2008, 960 p. (In Russ.).
4. Kirpichnikov N.N., Sulina O.V. Optimization of the strategy of designing three-dimensional models in CAD-system. *Innovatsionnaya nauka*. 2016, no. 8-2, pp. 48–51. (In Russ.).
5. Bol'shakov V.P., Bochkov A.L., Lyachek B.T. Problems of exchange of graphical data between CAD – systems. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*. 2013, no. 2, pp. 37–46. (In Russ.).
6. Zimin V.Ya., Pakhomov V.P., Onuchin A.B. etc. Experience of pipe rolling on a screw rolling mill TPA 70-270 of JSC “Vyksunsky Metallurgical Plant” and improving the calibration of working rolls. *Proizvodstvo prokata*. 2011, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).
7. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Goncharuk A.V., Galkin S.P. Mini tube-production unit 40-80 with a three-high reeling mill. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11-12, pp. 918–924.
8. Nikulin A.N. *Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii* [Screw rolling. Stresses and strains]. Moscow: Metallurgizdat, 2015, 380 p. (In Russ.).
9. Potapov I.N., Polukhin P.I. *Tekhnologiya vintovoi prokatki* [Screw rolling technology]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 344 p. (In Russ.).
10. Shevakin Yu.F., Kolikov A.P., Romanenko V.P., Samusev S.V. *Mashiny i agregaty dlya proizvodstva stal'nykh trub: uchebnoe posobie* [Machines and installations for the manufacture of steel pipes]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2007, 388 p. (In Russ.).
11. Danchenko V.N. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva* [Technology of pipe production]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
12. Teterin P.K. *Teoriya poperechno-vintovoi prokatki* [Theory of cross rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 368 p. (In Russ.).
13. Pasechnik N.V., Sinitskii V.M., Drozd V.G. etc. *Mashiny i agregaty metallurgicheskogo proizvodstva* [Machines and equipment of metallurgical production]. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 912 p. (In Russ.).
14. Jan Kazanecki. *Wytwarzanie rur bez szwu*. Krakow: AGH, 2003, 622 p. (In Pol.).
15. Galkin S. P., Fadeev V.A., Gusak A.Yu. Comparative analysis of geometry of mini-mills of radial-shift (screw) rolling. *Proizvodstvo prokata*. 2015, no. 12, pp. 19–25. (In Russ.).
16. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Realization of innovative potential of universal radial-shift rolling method. *Chernye metally*. 2015, no. 1, pp. 23–28. (In Russ.).
17. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H.etc. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys. *Metallurgija*. 2016, no. 56, pp. 199–202.
18. Galkin S.P. Indicator of cross deformation at piercing in screw rolling mill. *Proizvodstvo prokata*. 2011, no. 2, pp. 18–23. (In Russ.).
19. Wang F.-J., Shuang Y.-H., Hu J.-H., Wang Q.-H., Sun J.-C. 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.
20. Man-Soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho etc. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft. *Procedia Engineering* 81. December 2014, pp. 197–202.

#### Information about the authors:

- A.S. Budnikov**, Postgraduate, Engineer of the Chair “Metal Forming” (nar128@yandex.ru)  
**B.A. Romantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (boralr@yandex.ru)  
**E.A. Kharitonov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming” (haritonov45@mail.ru)

Received May 26, 2017