**УДК 621.774.353**

**Определение диаметра валков станов винтовой прокатки**

**Determination of the rolls diameter for screw-rolling mills**

**Авторы:**

**Будников А.С.,** аспирант, инженер кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ МИСиС ([fiar128@yandex.ru](mailto:fiar128@yandex.ru))

**Романцев Б.А.,** д.т.н. профессор кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ МИСиС (boralr@yandex.ru)

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

**Аuthors:**

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

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

**Keywords:** work rolls, helical rolling mill, cross rolling mill, radial-displacement rolling mill, determination of roll diameter, three-roll mill, pipe rolling equipment.

**Реферат**

Проблема, связанная с определением максимального диаметра рабочих валков характерна для станов винтовой прокатки, имеющих количество рабочих валков более двух. Точное определение диаметра рабочих валков, особенно актуально для трехвалковых станов, широко использующихся в промышленности в качестве раскатных, калибровочных, и станов 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 влияния основных настроечных факторов стана такие как углы подачи и раскатки. Существует расчетный способ определения диаметра бочки валка для трехвалкового стана, однако он применим для станов, работающих на углах подачи до 10 градусов и углах раскатки 4 –7 градусов. 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 статье рассмотрен более общий способ определения диаметра рабочих валков трех и более валкового стана с учетом их разворота на угол подачи, раскатки. Показана зависимость между диаметром валка, их количеством, минимальным диаметром калибра очага деформации, углом подачи и раскатки, которая позволяет оценить конструктивные возможности как трех, так и четырехвалковых станов винтовой прокатки. Результаты представленной работы, позволяют расширить возможности дальнейших исследований технологии и оборудования трехвалковых станов 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 имеющиеся знания об изменении геометрии очага деформации, а также прогнозирования геометрических параметры рабочих валков проектируемых многовалковых станов для заданных размеров проката.

**Abstract**

The problem associated with determining the maximum diameter of work rolls is typical for helical 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 industry as rolling, calibration, and radial-shear rolling mills operating at large feeding and rolling angles. Typically, the diameter of work rolls is determined in a constructive way or using 3D modeling. These methods are quite complex, require special skills, and do not allow to investigate the influence of the main tuning factors of the mill such as the 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 feed 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 angle, rolling. The relationship between the diameter of the roll, their number, the minimum diameter of the deformation center, the feed angle and rolling is shown, which makes it possible to evaluate the structural capabilities of both three and four-roll rolling mill 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 helical rolling mills for the production of solid and hollow products using completely new deformation modes for the processes of rolling out hollow articles of their reduction as well as radial shearing rolling. Importantly, it is possible to supplement existing knowledge about the change in the geometry of the deformation center, and also to predict the geometric parameters of the work rolls of the projected multi-roll mills for given rolled sizes.

Основным рабочим инструментом станов винтовой прокатки являются валки. На практике используют двух и трехвалковые станы винтовой прокатки [1]. Валки двухвалковых станов проектируются с большими значениями диаметров от 900 до 1500 мм в пережиме [2], и определяется, как правило, из конструктивных соображений. Диаметры рабочих валков станов 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 рисунке 1 представлено расположение валков в трехвалковом и четырехвалковом стане. Для примера рассмотрим стан у которого валки сведены на минимальный калибр мм [6-7] и имеют диаметры 350 мм – в трехвалковом стане, и 140 мм – в четырехвалковом, при этом, развернуты на угол подачи β = 15 градусов и угол раскатки, γ = 7 градусов. 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 станов необходимо определять максимально возможный диаметр рабочих валков при заданных параметрах, а именно, минимального калибра очага деформации , зазора между соседними валками Δ, количеством рабочих валков *n* и их разворота на углы β и γ [8-9]. Эту связь можно представить в виде неравенства (1).

(1)

где – коэффициент связывающий диаметр валка с диаметром калибра (2);

С учетом того, что диаметры валков равны, угол равен (2)

(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*, должно удовлетворять условию (1) с коэффициентом *k* равным(3):

(3)

Соседние валки не должны касаться друг друга, в случае сведения их на минимальный калибр, т. е. должно выполняться условие (4):

(4)

При определении диаметра валка для трехвалкового стана без учета разворота валков на угол подачи и раскатки, коэффициент *k* зависит только от угла φ. Если φ=30 градусам (рисунок 1 сечение А–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 А-А в трехвалковом стане и Б-Б в четырехвалковом имеет вид эллипса. Коэффициент *k* с учетом β и γ для трехвалкового стана при φ = 30 градусам определяется по формуле (5):

(5)

Для четырехвалкового стана при φ равным 45 градусам, *k* определяется уравнением (6)

(6)

Как видно из условия (1), в стане с *n*>2, максимальный диаметр валков зависит от минимального диаметра калибра очага деформации. На рисунке 2 представлены гистограммы диаметров валков при диаметрах калибра очага деформации 10 – 210 мм, для трех-, четырех-, пятивалкового стана при β равным 15 градусов и γ равным 7 градусов.

Гистограммы рисунка 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 максимальный диаметр валков трехвалкового стана при той же величине зазора, составляет 1000 мм. Уменьшение диаметра валков трехвалкового стана для калибра 170 мм приводит к увеличению зазора между валками, что способствует тангенциальной раскатки. 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 мм 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 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 трехвалковом и четырехвалковом станах.

В таблице 1 представлены значения диаметров валков для трехвалкового и четырехвалкового станов при угле раскатки от 0 до 10 градусов и угле подачи от 0 до 30 градусов. Изменение трехвалкового и четырехвалкового стана в зависимости от β наглядно видно на графике рисунка 4.

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

При изменении β от 0 до 10 градусов диаметр валка уменьшается на 11 мм. Изменение β в данном диапазоне не оказывает существенного влияния на диаметр валков. Дальнейшее увеличение β до 30 градусов, показывает рост его влияния на диаметр. Так, при изменении β от 25 до 30 градусов, диаметр валка уменьшается на 20 мм. Влияние β на диаметр увеличивается с ростом угла подачи, следовательно, в станах с большими углами подачи, а именно радиально-сдвиговой прокатки где β меняется от 18 до 25 градусов [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, получать прокат с меньшим диаметров в отличие от схемы на рисунке 1, сократить габариты рабочей клети.

На рисунке 5 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 (7):

(7)

В отличие от четырехвалкового стана рисунок 1, где диаметры валков равны, угол φ, определяется диаметром рабочих валков и калибром.

В общем случае, с учетом углов β и γ, зависимость между и в пережиме очага деформации определяется соотношением (8)

(8)

где коэффициент

,

ξ – коэффициент овализации очага деформации

Δ – зазор между опорным и рабочим валками

Угол φ определяется конструктивно. Расчеты угла φ с учетом условия (7) для диапазона диаметров валков от 200 до 1000 мм, показали, что значение φ можно определить по эмпирической зависимости (9):

(9)

Диаметр валка , с учетом углов β и γ определяется следующим образом (10):

(10)

Представленная методика будет полезна для разработок новых технологий и оборудования винтовой прокатки, как например в работах [18-20]. Стоит отметить, что в четырехвалковом стане с различными значениями диаметров валков, величина зазора Δ между соседними валками зависит от их калибровки, поэтому необходимо проверять выполнение условия (7) на других участках очага деформации.

**Выводы:**

1. Представленная 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, их количества.
2. Используя предложенную методику, было установлено, что наиболее интенсивно угол подачи влияет на максимальное значение диаметров рабочих валков в станах РСП имеющих повышенные значения углов подачи.
3. При использовании четырехвалковой схемы с различными диаметрами рабочих валков, снижается ограничения в получении проката малого диаметра характерное для схемы с одинаковыми диаметрами рабочих валков, а так же, позволяется возможность перераспределения нагрузки на рабочие валки.



Fig 1 – location of rolls

Рисунок 1 – Расположение валков

Fig 2 – Diameter of the roll for different values of caliber diameter

Рисунок 2 – Диаметр валка при различных значениях диаметра калибра

Fig 3 - Diameter of working rolls of three-roll and four-roll mills

Рисунок 3 - Диаметр рабочих валков трехвалкового и четырехвалкового станов



Fig 5 – Scheme of location rolls with different diameters in a four-roller mill

Рисунок 5 - Схема расположение валков четырехвалкового стана с различными диаметрами валков

Таблица 1 – Максимальное значение диаметра валков трехвалкового и четырехвалкового станов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 |

Библиографический список

1. А.П. Коликов, Б.А. Романцев Теория обработки металлов давлением: Учебник. – М.: изд. дом МИСиС, 2015 – 451 с.
2. Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, Ю.Н. Райков Производство труб: Учебник для вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 568 с.
3. Романцев Б.А. Обработка металлов давлением. Учебник / А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев – М.: изд. д. МИСиС, 2008 – 960 с.
4. Кирпичников Н.Н., Сулина О.В. Оптимизация стратегии проектирования трехмерных моделей в CAD–системах. // Инновационная наука. 2016. № 8-2. С. 48–51.
5. Большаков В.П., Бочков А.Л., Лячек Б.Т. Проблемы обмена графическими данными между CAD-системами // 2013. №2. С.37–46
6. Зимин В.Я., Пахомов В.П., Онучин 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 №2. 2011. С. 11–14.
7. B.A. Romantsev, A.S. Aleshchenko, A.V. Goncharuk, S.P. Galkin Мini tube-production unit 40-80 with a three-high reeling mill // Metallurgist. 2012. С. 1-7.
8. А.Н. Никулин, 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. Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев, Машины и агрегаты для производства стальных труб: учебное пособие. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 388 с.
11. В.Н. Данченко и др. Технология трубного производства – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640.
12. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
13. Н.В. Пасечник, В.М. Синицкий, В.Г. Дрозд и др. Машины и агрегаты металлургического производства. – М.: издательство 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. Сопоставление анализа геометрии мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки // Производство проката №12. 2015. С. 19–25
16. Галкин С.П., Романцев Б.А., Харитонов Е.А. Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки // Черные металлы № 1. 2015. С.23–28.
17. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H.et. al. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys // Metallurgy. 2016. N 56. p.p 199-202.
18. С.П. Галкин. Показатель поперечной деформации при прошивке в стане винтовой прокатки. // производство проката, 2011, № 2, с. 18-23.
19. Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jiab-hua Hu at et al. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // Journal of Materials Technology, 2014 p. 7-14.
20. Man-soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho et al. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft // Procedia Engineering 81, 2014 pp 197-202.

References

1. A.P. Kolikov, B.A. Romantsev Teoriya obrabotki metallov davleniem: Uchebnik. – M.: izd. dom MISiS, 2015 – 451 s.

2. Yu.F. Shevakin, A.P. Kolikov, Yu.N. Raikov Proizvodstvo trub: Uchebnik dlya vuzov. M.: Intermet Inzhiniring, 2005. – 568 s.

3. Romantsev B.A. Obrabotka metallov davleniem. Uchebnik / A.V. Goncharuk, N.M. Vavilkin, S.V. Samusev – M.: izd. d. MISiS, 2008 – 960 s.

4. Kirpichnikov N.N., Sulina O.V. Optimizatsiya strategii proektirovaniya trekhmernykh modelei v CAD–sistemakh. // Innovatsionnaya nauka. 2016. № 8-2. S. 48–51.

5. Bol'shakov V.P., Bochkov A.L., Lyachek B.T. Problemy obmena graficheskimi dannymi mezhdu CAD-sistemami // 2013. №2. S.37–46

6. Zimin V.Ya., Pakhomov V.P., Onuchin A.B. i dr. Opyt prokatki trub na kalibrovochnom stane vintovoi prokatki TPA 70-270 OAO «Vyksunskii metallurgicheskii zavod» i sovershenstvovanie kalibrovki rabochikh valkov // Proizvodstvo prokata №2. 2011. S. 11–14.

7. B.A. Romantsev, A.S. Aleshchenko, A.V. Goncharuk, S.P. Galkin Mini tube-production unit 40-80 with a three-high reeling mill // Metallurgist. 2012. S. 1-7.

8. A.N. Nikulin, Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii. M.: Metallurgizdat, 2015. 380 s.

9. Potapov I.N., Polukhin P.I. Tekhnologiya vintovoi prokatki. – M.: Metallurgiya, 1990. – 344 s.

10. Yu.F. Shevakin, A.P. Kolikov, V.P. Romanenko, S.V. Samusev, Mashiny i agregaty dlya proizvodstva stal'nykh trub: uchebnoe posobie. – M.: Intermet Inzhiniring, 2007. – 388 s.

11. V.N. Danchenko i dr. Tekhnologiya trubnogo proizvodstva – M.: Intermet Inzhiniring, 2002. – 640.

12. Teterin P.K. Teoriya poperechno-vintovoi prokatki. – M.: Metallurgiya, 1971. – 368 s.

13. N.V. Pasechnik, V.M. Sinitskii, V.G. Drozd i dr. Mashiny i agregaty metallurgicheskogo proizvodstva. – M.: izdatel'stvo Mashinostroenie, 2000 – 912 s.

14. Jan Kazanecki Wytwarzanie rur bez szwu – Krakow AGH, 2003 – 622 P.

15. Galkin S. P., Fadeev V.A., Gusak A.Yu. Sopostavlenie analiza geometrii mini-stanov radial'no-sdvigovoi (vintovoi) prokatki // Proizvodstvo prokata №12. 2015. S. 19–25

16. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Realizatsiya innovatsionnogo potentsiala universal'nogo sposoba radial'no-sdvigovoi prokatki // Chernye metally № 1. 2015. S.23–28.

17. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H.et. al. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys // Metallurgy. 2016. N 56. p.p 199-202.

18. S.P. Galkin. Pokazatel' poperechnoi deformatsii pri proshivke v stane vintovoi prokatki. // proizvodstvo prokata, 2011, № 2, s. 18-23.

19. Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jiab-hua Hu at et al. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // Journal of Materials Technology, 2014 p. 7-14.

20. Man-soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho et al. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft // Procedia Engineering 81, 2014 pp 197-202.

**ХАРИТОНОВ Евгений Анатольевич** (Москва) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС», число опубликованных работ в РИНЦ–47. Область научных интересов: винтовая прокатка сплошных и полых изделий из сталей цветных металлов и сплавов, радиально-сдвиговая прокатка, оборудование прокатных станов. (119049, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр. 4, e–mail: haritonov45@mail.ru). SPIN: 3253-9111.

**РОМАНЦЕВ Борис Алексеевич** (Москва) – доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС», число опубликованных работ в РИНЦ–132, Область научных интересов: винтовая прокатка сплошных и полых изделий из сталей цветных металлов и сплавов, радиально-сдвиговая прокатка, оборудование прокатных станов, трубное производство. 119049, (Москва, Российская Федерация, Ленинский пр. 4, e–mail: boralr@yandex.ru.) SPIN: 4362-5686.

**БУДНИКОВ Алексей Сергеевич** (Москва) – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» РИНЦ – 4, Технология и оборудование станов винтовой прокатки и РСП, трубное производство. (119049, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр. 4, e–mail: fiar128@yandex.ru). SPIN: 1515-2272.