



Ю. Г. Гуляев /д. т. н./
Е. И. Шифрин /к. т. н./

«Интерпайп Нико Тьюб», г. Никополь, Украина
Научно-исследовательский трубный институт
(НИТИ), г. Днепро, Украина
e-mail: shifrinei@mail.ru

Влияние упругой деформации по диаметру трубы (упругой отдачи) на расчетные параметры калибров валков непрерывных станов безоправочной прокатки труб

Y. G. Gulyaev /Dr. Sci. (Tech.)/
Ye. I. Shifrin /Cand. Sci. (Tech.)/

“Interpipe Niko Tube”, Nikopol, Ukraine
Scientific Research Tube Institute (SRTI),
Dnipro, Ukraine
e-mail: shifrinei@mail.ru

The elastic distortion influence on design parameters of the calibers of continuous pipe plugless rolling mills

Цель. Усовершенствование технологии производства труб на непрерывных станах безоправочной прокатки.

Методика. Разработана новая методика определения деформационных и энергосиловых параметров процесса прокатки труб в станах продольной безоправочной прокатки.

Результаты. Выполнены расчеты калибровок валков и энергосиловых параметров процесса прокатки труб в стане продольной безоправочной прокатки при пониженных температурах в ООО «Интерпайп Нико Тьюб», что позволило повысить точность труб по диаметру.

Научная новизна. Получены данные теоретических исследований, свидетельствующие о том, что при снижении температуры деформации и росте скорости деформации существенно возрастает влияние упругих свойств материала трубы на расчетные параметры процесса прокатки труб в непрерывных безоправочных станах продольной прокатки.

Практическая значимость. Разработанная методика расчета параметров прокатки в калибровочных и редуцирующих станах с учетом влияния упругой деформации по диаметру трубы (упругой отдачи) позволяет более точно рассчитать деформационные и скоростные параметры процесса, а также предложить оптимальные калибровки валков, что позволяет существенно повысить точность труб по диаметру и снизить вероятность образования дефектов. (Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.)

Ключевые слова: трубы, упругая деформация, упругая отдача, продольная прокатка, редуцирование, калибрование, безоправочная прокатка, режимы деформации.

Введение. Практически в составе всех трубопрокатных агрегатов, изготавливающих горячекатаные бесшовные трубы, окончательную операцию – получение необходимого размера трубы по диаметру осуществляют на многоклетевых безоправочных станах продольной прокатки при температуре прокатки 900–1100 °С.

Кроме того, такие станы нашли достаточно широкое применение для получения окончательных размеров труб после операции термической обработки, где прокатка осуществляется при температурах 550–700 °С.

Все известные теоретические исследования процесса продольной безоправочной прокатки труб до настоящего времени ограничивались исключительно исследованием процесса пла-

стической деформации. Задача определения параметров непрерывной безоправочной продольной прокатки с учетом упругой деформации трубы при ее формоизменении не рассматривалась, хотя при понижении температуры упругие свойства материала трубы оказывают существенное влияние на деформационные и энергосиловые параметры процесса, что существенно снижает достоверность теоретических расчетов.

Постановка задачи. Исследование влияния упругости материала на основные параметры процесса продольной безоправочной прокатки труб.

При суммарной деформации твердого тела из упрочняющегося материала, равной ε , вели-

чину его упругой деформации ε_y можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_y = \frac{K_f}{E}, \quad (1)$$

где K_f – сопротивление пластической деформации материала при конкретных условиях формоизменения, характеризуемых температурой t^o , степенью ε и скоростью деформации u ; E – модуль упругости деформируемого материала, являющийся функцией его температуры t^o .

Сопротивление пластической деформации K_f материала трубы при формоизменении в горячем состоянии при конкретной температуре, скорости и степени деформации можно определить, используя аппроксимирующее уравнение [1]:

$$K_f = \left[n_1 (1 - \varepsilon^{n_2}) \right]^{(\varepsilon - \varepsilon_{\max})} \cdot n_3 \cdot u^{n_4 + n_5 t^o} \cdot \exp(n_6 t^o), \quad (2)$$

где $n_1, n_2, \varepsilon_{\max}, n_3, n_4, n_5, n_6$ – эмпирические коэффициенты, полученные по методике [1].

Значение модуля упругости материала трубы в зависимости от температуры деформации можно определить по уравнению, аппроксимирующему экспериментальные данные, приведенные в работе [2]:

$$E = (a_1 + a_2 t^o) t^o + a_3, \quad (3)$$

где a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты.

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем уравнение, связывающее величину упругой деформации ε_y с конкретными параметрами формоизменения и физическими свойствами деформируемого тела:

$$\varepsilon_y = \frac{\left[n_1 (1 - \varepsilon^{n_2}) \right]^{(\varepsilon - \varepsilon_{\max})} \cdot n_3 \cdot u^{n_4 + n_5 t^o} \cdot \exp(n_6 t^o)}{(a_1 + a_2 t^o) t^o + a_3}. \quad (4)$$

Анализ результатов. На рис. 1 показана рассчитанная по уравнению (4) зависимость упругой деформации ε_y (%) от температуры t^o (^oC) и скорости u (сек^{-1}) деформации для стали 30ХГСА при $\varepsilon = 0,03$ ($n_1 = 5,489$; $n_2 = 0,213$; $n_3 = 3446,714$; $n_4 = 9,777 \cdot 10^{-2}$; $n_5 = 5,56485 \cdot 10^{-5}$; $n_6 = -3,35011 \cdot 10^{-3}$; $\varepsilon_{\max} = 0,3$; $a_1 = 23,9$; $a_2 = -0,1$; $a_3 = 190790$).

Реальные скорости и температуры деформации при безоправочном калибровании труб на участках термоотдела составляют величины порядка $u = 0,1 \div 1,0 \text{ сек}^{-1}$ и $t^o = 550 \div 700 \text{ } ^o\text{C}$ и, как следует из приведенных на рис. 1 данных, упругие деформации труб ε_y соизмеримы с частными деформациями m_i труб по диаметру. Сказанное также относится к последним (чистовым) клетям калибровочных и редуционных станов, работающих в линиях трубопрокатных агрегатов (здесь $u = 0,5 \div 20 \text{ сек}^{-1}$, $t^o = 780 \div 950 \text{ } ^o\text{C}$, $m_i = 0,2 \div 0,5 \%$). Факт сопоставимости величин ε_y и m_i предопределяет необходимость учета упругой деформации труб по диаметру («упругой отдачи») при расчете калибровки валков и, соответственно, при определении скоростных и энергосиловых параметров прокатки.

Для расчета параметров безоправочной прокатки с учетом упругой отдачи трубы по диаметру в каждой из клеток непрерывного стана предлагается следующий алгоритм, основанный на итерационном принципе. Для первого цикла итерации задают распределение частных деформаций по клетям стана 1m_i и по известным методикам [2–4] рассчитывают параметры прокатки (в том числе температуры $^1t_i^o$ и скорости деформации 1u_i по клетям стана) без учета упругой отдачи труб. Используя полученные значения $^1t_i^o$ и 1u_i , во втором цикле итерации по уравнению (4) рассчитывают величины упругой

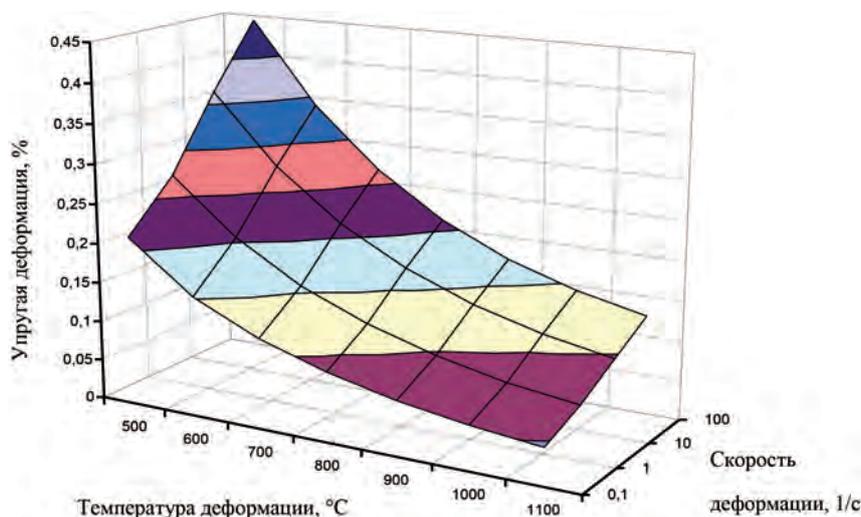


Рис. 1. Зависимость $\varepsilon_y = f(t^o, u)$ для стали 30ХГСА

деформации ${}^2\varepsilon_{yi}$ и уточняют средний диаметр 2D_N калибра чистовой клетки (чистовых клетей 2D_N и ${}^2D_{N-1}$):

$${}^2D_N = D_t \left(1 + \alpha_t \cdot {}^1t_{N-1}^0 - {}^2\varepsilon_{yN} \right),$$

$${}^2D_{N-1} = D_t \left(1 + \alpha_t \cdot {}^2t_{N-1}^0 - {}^2\varepsilon_{y(N-1)} \right), \quad (5)$$

где α_t – коэффициент температурного расширения материала трубы.

Также уточняют величины частных деформаций 2m_i в каждой i -й клетки стана (в первом цикле итерации ${}^1\varepsilon_{yi} = 0$):

$${}^2m_i = 1 - \frac{D_i}{D_{i-1} \left(1 + {}^2\varepsilon_{y(i-1)} \right)}, \quad (6)$$

где D_i, D_{i-1} – средние диаметры калибра в i -й и $i-1$ клетях.

Используя уточненные значения 2m_i , вновь рассчитывают параметры прокатки по той же схеме, что и в первом цикле итерации. При этом

$${}^2u_i = \frac{V_0 S_0 (D_0 - S_0)}{(1 - {}^2\varepsilon_i) S_i (D_i - S_i)} \cdot \sqrt{\frac{2 N_b \cdot {}^2\varepsilon_i}{\pi D_i (D_{ii} - D_i)}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_b}\right). \quad (7)$$

В третьем и последующих циклах итерации выполняют действия, аналогичные второму циклу итерации. Итерационный процесс прекращают при стабилизации значений расчетных величин на заданном уровне.

Физический смысл исходно заданного распределения частных деформаций 1m_i – это рас-

пределение частных *пластических* деформаций ε_{pi} , а рассчитанные во втором и далее циклах итерации значения ${}^k m_i$ (здесь k – порядковый номер цикла итерации) – это распределения частных *общих* деформаций ε_i по клетям непрерывного стана.

В качестве примера конкретной реализации предложенной методики в табл. 1 приведены данные о расчете параметров прокатки трубы 244,48×11,99 мм в 5-клетевом калибровочном стане с групповым приводом клетей в условиях ТПА 350 ООО «Интерпайп Нико Тьюб». Исходные данные для расчета: диаметр передельной трубы на входе в стан 260 мм; скорость трубы на входе в стан 1,5 м/с; температура трубы на входе в стан 770°C; идеальный диаметр валков 750 мм; материал трубы – сталь 45.

В табл. 1 приведены расчетные данные для первых трех циклов итерации.

Выводы

1. Учет упругой деформации трубы по диаметру существенно изменяет картину распределения частных деформаций по клетям. Так, например, значения частной деформации 3m_4 в четвертой клетке, полученные в третьем цикле итерации, превышают значения 1m_4 , рассчитанные без учета упругой отдачи, более чем в 1,5 раза.

2. Учет упругой деформации трубы по диаметру существенно повышает расчетные значения давлений металла на валки, моментов и

Таблица 1

Результаты поэтапного расчета параметров прокатки с учетом упругой деформации трубы

i	Частная деформация по диаметру m_i , %	Средний диаметр калибра D_i , мм	Средний диаметр трубы на входе в калибр D_{ii} , мм	Стенка трубы S_i , мм	Упругая деформация трубы ε_{yi} , %
0				11,70/11,70/11,70	
1	1,40/1,40/1,40	256,36/256,36/256,36	260,00/260,00/260,00	11,78/11,78/11,78	0/0,12/0,12
2	1,90/2,01/2,01	251,49/251,49/251,49	256,36/256,66/256,66	11,90/11,90/11,90	0/0,12/0,12
3	1,00/1,12/1,12	248,97/248,97/248,97	251,49/251,79/251,79	11,96/11,96/11,96	0/0,11/0,11
4	0,43/0,64/0,65	247,90/247,65/247,64	248,97/249,25/249,25	11,99/11,99/11,99	0/0,10/0,11
5	0,00/0,06/0,09	247,90/247,75/247,68	247,90/247,90/247,90	11,99/11,99/11,99	0/0,06/0,09
i	Усилие на валок P_i , КН	Момент на клеть $M_i \cdot 10^{-3}$, КН·м	Мощность на клеть W_i , кВт	Число оборотов валков n_{Bi} , рад/сек	Общая мощность на стан ΣW_i , кВт
0					
1	314/314/314	32,41/32,06/32,11	178,13/175,98/176,26	5,50/5,49/5,49	597,13/664,37/670,25
2	363/371/371	35,24/35,63/35,70	193,65/195,62/195,98		
3	275/286/286	24,14/24,75/24,81	132,64/135,87/136,22		
4	203/231/231	16,87/18,84/18,94	92,72/103,41/104,00		
5	0/79/98	0,00/6,34/7,87	0,0/53,49/57,78		

Примечание. Через косую черту – этапы расчета: *первый* (без учета упругой деформации)/*второй/третий* (окончательный)

мощности прокатки. Так, например, расчетное значение суммарной мощности прокатки ΣW_i при учете упругой деформации повышается на 12 %.

3. При учете упругой деформации трубы по диаметру (упругой отдачи) расчетные значения средних диаметров последних (чистовых) калибров уменьшаются на величину, составляющую 0,16–0,24 % от диаметра трубы, что является существенным для получения готовых труб с допуском по наружному диаметру в пределах $\pm 0,3...0,5$ %.

Библиографический список / References

1. Способ определения сопротивления деформации твердых материалов: Пат. 75304 Украина, МПК G01N 3/00 / А. И. Козловский, Ю. Г. Гуляев, Е. И. Шифрин и др. (Украина). – 2006. – Бюл. № 3. – 12 с.

Kozlovskiy A. I., Gulyaev Y. G., Shifrin Ye. I. *Sposob opredelenia soprotivlenia deformatsii tverdoch materialov*. Pat. 75304 Ukraine, МПК G01N 3/00. 2006, bul. no. 3, 12 p.

2. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др.; под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

Sorokin V. G., Volosnikova A. V., Viatkin S. A. *Marochnik staley i splavov*. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 640 p.

3. Марченко Л. Г. Математическая модель процесса безоправочной продольной прокатки труб / Л. Г. Марченко, Е. И. Шифрин, Ю. Г. Гуляев // Сталь. – 2007. – № 8. – С. 84–87.

Marchenko L. G., Shifrin Ye. I., Gulyaev Y. G. *Matematicheskaj model prosessa bezopravochnoy prodolnoy prokatki trub*. Stal. 2007, no. 8, pp. 84-87.

4. Гуляев Ю. Г. Методика расчета параметров безоправочной прокатки труб с учетом упру-

гой деформации / Ю. Г. Гуляев, Е. И. Шифрин, Н. А. Максимова-Гуляева, Н. Ю. Квитка // Металлург. – 2008. – № 3. – С. 62–65.

Gulyaev Y. G., Shifrin Ye. I., Maksimova-Gulyaeva N. A., Kvitka N. Y. *Metodika rascheta parametrov bezopravochnoy prokatki trub s uchetom uprugoj deformacij*. Metallurg. 2008, no. 3, pp. 62-65.

Purpose. Improving pipe production technology on continuous plugless rolling mills

Methodology. Development of new methods for determining deformation and power parameters of the pipe rolling process in the longitudinal plugless rolling mills.

Findings. Groove design calculation and pipe rolling process power parameters were completed in continuous plugless longitudinal rolling mills in low temperature at JSC Interpipe Niko Tube. This has made it possible to improve pipe accuracy by diameter.

Originality. Theoretical research data supplied testifies if the deformation temperature decreases and the rate of deformation increases then the influence of the elastic properties of the pipe material on the calculated parameters of the pipe rolling process in continuous plugless longitudinal rolling mills increases significantly.

Practical value. The developed procedure for calculating the rolling parameters in sizing and reducing mills, taking into account the effect of elastic deformation, allows to calculate the deformation and velocity parameters of the process more accurately, and also to offer optimal calibrations of rolls, which makes it possible to significantly increase the diameter accuracy of the pipes and reduce the probability of defects.

Key words: pipes, elastic deformation, lengthwise rolling, reducing, calibration, plugless rolling, deformation modes.

**Рекомендована к публикации
к. т. н. Р. Н. Королем**

Поступила 03.07.2017

