

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ ТРУБ ПРИ ПРОКАТКЕ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ

А.В. Выдрин, В.В. Широков

BASIC THEORY OF IMPROVEMENT OF PIPE DIMENSIONS PRECISION DURING ROLLING IN MANDREL MILL

A.V. Vydrin, V.V. Shirokov

На основе опытных данных рассмотрены особенности получения бесшовных труб с заданной толщиной стенки в линии с непрерывным раскатным станом. Проведен анализ влияния калибровки валков и скоростного режима непрерывного стана на формирование толщины стенки трубы. Даны рекомендации по расчету калибровки валков и определению скоростного режима непрерывного оправочного стана для уменьшения разнотолщинности готовой трубы.

Ключевые слова: бесшовные трубы, непрерывный трубопрокатный стан, калибровка валков, скоростной режим.

Production of seamless pipes with required wall thickness in mandrel mill is discussed based on experimental data. Mandrel mill grooving and rapid mode effect on wall thickness production is analyzed. Guidelines for design and rapid mode estimation are suggested, which reduce wall thickness variation in produced pipe.

Keywords: seamless pipes, mandrel mill, grooving, rapid mode.

Точность геометрических размеров труб является важнейшей характеристикой качества этого вида металлопродукции. Особое внимание при этом уделяется точности размеров стенки трубы. Колебания толщины стенки в сторону ее уменьшения может вызвать падение прочностных характеристик изделий из труб, колебание толщины стенки в сторону ее увеличения приводит к неоправданному увеличению металлоемкости трубной продукции. Кроме того, следует отметить, что техническая задача повышения точности стенки трубы гораздо сложнее, чем обеспечение точности других геометрических размеров труб, таких как длина и диаметр.

Толщина стенки трубы начинает формироваться в процессе прошивки заготовки, уменьшается при раскатке гильзы и несколько изменяется в процессе редуцирования трубы. Однако основное влияние на точность стенки трубы оказывают процессы прошивки и раскатки.

Для анализа процесса формирования толщины стенки при производстве бесшовных труб были обработаны результаты замеров толщины стенки гильзы после прошивного стана и толщины стенки трубы после непрерывного раскатного стана на заводе компании IPSCO Koppel Tubulars L.L.C. (США, г. Эмбридж). Толщина стенки при этом определялась с помощью 9-канального радиоизотопного толщиномера, производства компании IMS Messsysteme GmbH (Германия).

Статистический анализ показал, что гильза после прошивки имеет среднюю толщину стенки

18,57 мм, со среднеквадратичным отклонением 0,36 мм (рис. 1). Значение коэффициента Стьюдента для исследованной выборки при уровне вероятности 99 % составляет 2,576. Соответственно доверительный интервал изменения толщины стенки гильзы равен $\pm 0,91$ мм или $\pm 4,9$ %.

Средняя толщина стенки трубы, прокатанной из этой гильзы на непрерывном стане, составляет 8,148 мм со среднеквадратичным отклонением 0,224 мм (рис. 2). Доверительный интервал изменения толщины стенки трубы после непрерывного стана при уровне вероятности 99 % составит $\pm 0,577$ мм или $\pm 7,1$ %.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при непрерывной прокатке труб доверительный интервал изменения толщины стенки увеличивается с $\pm 4,9$ % до $\pm 7,1$ %. Это говорит о том, что для повышения точности по толщине стенки труб в первую очередь необходимо повышать точность прокатки на непрерывном стане.

Закономерности формирования размеров труб в непрерывном стане во многом определяются калибровкой валков. В настоящее время существует методика расчета калибровки валков непрерывного стана [1, 2]. Эта методика позволяет выполнять расчеты общего характера, но в явном виде не дает связь с точностью получаемых труб.

Поскольку непрерывный прокатный стан имеет дискретную структуру, при разработке методики построения схемы калибровки валков для прокатки высокоточных труб целесообразно использовать элементы системного подхода. В этом

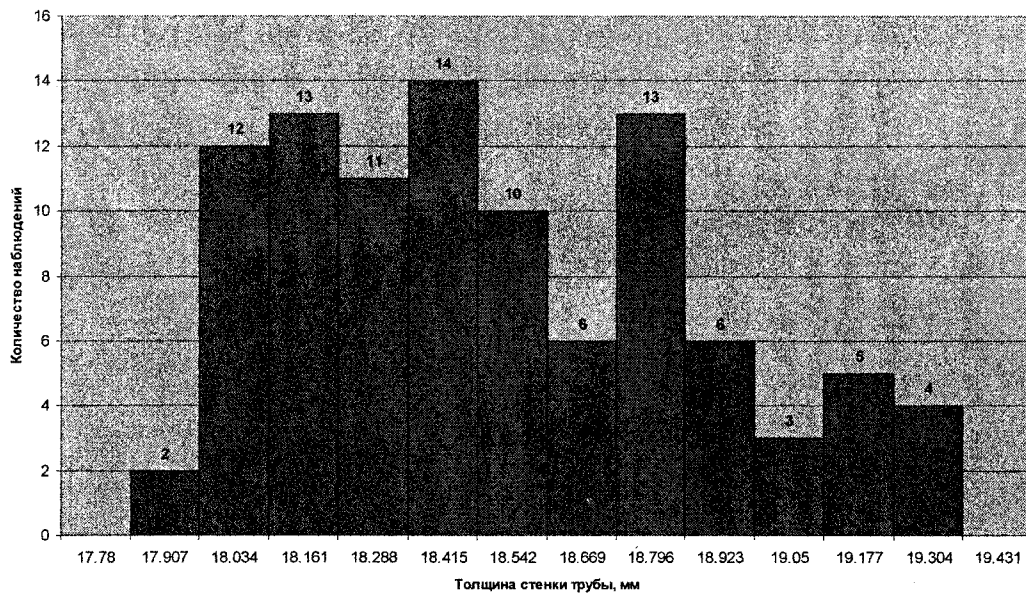


Рис. 1. Статистическое распределение толщины стенки гильзы

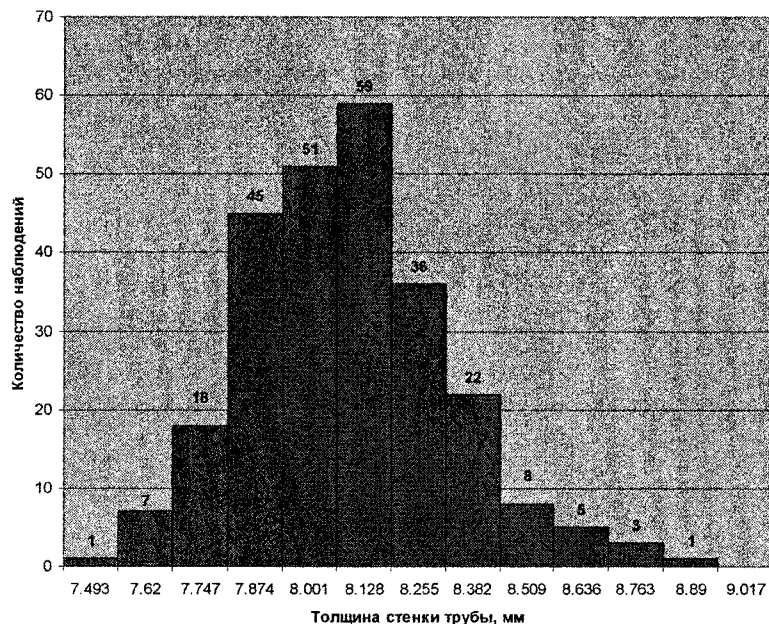


Рис. 2. Статистическое распределение толщины стенки трубы после непрерывного стана

случае N -клетевой непрерывный прокатный стан можно представить как совокупность следующих подсистем:

- первая подсистема представляет собой первую клетку непрерывного стана. Целью функционирования этой подсистемы является обеспечение стабильного захвата гильзы для ее дальнейшей раскатки в остальных клетках;
- вторая подсистема представляет собой совокупность клеток со второй по $(N-4)$ -ю. Целью функционирования этой подсистемы является основное обжатие стенки трубы;
- третья подсистема включает в себя $(N-3)$ -ю и $(N-2)$ -ю клетки. Целью функционирования этой

подсистемы является обеспечение точности размеров стенки по толщине;

- четвертая подсистема включает в себя две последних клетки непрерывного стана. Целью функционирования этой подсистемы является создание зазора между внутренней поверхностью трубы и оправкой для облегчения условий извлечения оправки.

Уже на стадии представления непрерывного стана в виде совокупности подсистем и выделения цели функционирования каждой из них видно, что для получения высокоточных труб и свободного извлечения оправки непрерывный стан должен содержать не менее 6 клеток.

Для успешного выполнения функций первой

подсистемы величина обжатия стенки трубы в первой клетке ΔS_1 должна определяться в соответствии с условиями первичного и вторичного захвата: $\Delta S_1 \leq [\Delta S]_{\text{зах}}$, где $[\Delta S]_{\text{зах}}$ – максимально возможное обжатие из условий захвата, определяемое, например по методике [3].

В первой клетке второй подсистемы происходит обжатие стенки той части трубы, которая находилась в зоне выпуска калибров первой клетки стана. Поэтому, чтобы на каждой стадии непрерывной прокатки обеспечивать максимальную равномерность толщины стенки по периметру поперечного сечения трубы, обжатие стенки во второй клетке стана ΔS_2 следует назначать равным ΔS_1 . Тогда суммарное обжатие стенки трубы во второй подсистеме

$$\Delta S_{\Sigma}^{\text{II}} = (S_r - \Delta S_1) - 1,05S_{\text{ном}},$$

где S_r – толщина стенки гильзы; $S_{\text{ном}}$ – номинальная толщина стенки трубы после непрерывного стана.

Соответственно обжатия стенки трубы в клетках второй подсистемы (кроме первой клетки) будут равны:

$$\Delta S_i^{\text{II}} = \frac{\Delta S_{\Sigma}^{\text{II}}}{0,5(N^{\text{II}} - 1)},$$

где N^{II} – количество клеток второй подсистемы.

Далее при заданном режиме обжатий в клетках первой и второй подсистем параметры калибров соответствующих валков определяются по методике [1, 2]. В итоге, на выходе из второй подсистемы труба будет иметь толщину стенки равную $1,05S_{\text{ном}}$.

Задачей двух клеток третьей подсистемы является выравнивание толщины стенки по всему объему трубы с получением ее номинального размера. Поэтому среднее обжатие стенки в третьей подсистеме выбирается равным примерно 5%.

Основная разнотолщинность стенки трубы при продольной прокатке формируется в зоне разбега калибра, поэтому калибр первой клетки третьей подсистемы целесообразно сделать круглым, более закрытым и принять угол выпуска в нем равным 30° . Параметры калибра второй клетки третьей подсистемы должны быть аналогичными параметрам первой клетки, но угол выпуска целесообразно сделать больше (например, 45°). Последнее необходимо для обеспечения достаточной оваллизации трубы перед клетками четвертой подсистемы.

При назначении параметров калибров третьей подсистемы следует иметь в виду, что в четвертой подсистеме практически не будет обжатия по толщине стенки, следовательно, периметр контура трубы как внутреннего, так и наружного должен быть равен периметру трубы после непрерывного стана, т. е. равен $\pi D_{\text{ном}}$, где $D_{\text{ном}}$ – номинальный

диаметр трубы на выходе из непрерывного стана. В соответствии с этим ширина овальной трубы, формируемая в третьей подсистеме должна определяться по формуле

$$B_{\text{III}} = \frac{1}{2,25} \left[-(3,5a - 3D_{\text{ном}}) + \sqrt{(3,5a - 3D_{\text{ном}})^2 - 9(2,25a^2 - 3aD_{\text{ном}} + D_{\text{ном}}^2)} \right],$$

где $a = 0,5\delta_0 + S_{\text{ном}}$; δ_0 – диаметр оправки.

Высота калибров в клетках третьей подсистемы должна быть равна

$$H_{\text{III}} = \delta_0 + 2S_{\text{ном}}.$$

После определения высоты и ширины калибра может быть определен коэффициент оваллизации клетей третьей подсистемы.

Выпуски в клетках целесообразно делать по радиусу, величина которого при известном коэффициенте оваллизации будет равна

$$\rho = \frac{1}{2} D_{\text{ном}} + \frac{D_{\text{ном}}^2 - k_0^2 H_{\text{III}}^2}{4[k_0 H_{\text{III}} - D_{\text{ном}}(\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha)] \cos \alpha},$$

где k_0 – коэффициент оваллизации; α – угол выпуска калибра.

Для упрощения извлечения оправки из трубы после непрерывного стана калибры клетей четвертой подсистемы выполняются овальными. При этом периметр калибра должен соответствовать периметру наружной поверхности трубы, так как в клетках этой подсистемы должно отсутствовать обжатие стенки трубы.

Для «тонкой» калибровки толщины стенки высота калибра первой клетки четвертой подсистемы H_1^{IV} должна обеспечить зазор между вершиной калибра и оправкой равный номинальной толщине стенки трубы $S_{\text{ном}}$, то есть

$$H_1^{\text{IV}} = \delta_0 + 2S_{\text{ном}}.$$

При заданных высоте калибра и периметре наружной поверхности трубы определяется коэффициент оваллизации калибра k_0 из решения нелинейного уравнения

$$H_7(k_0^2 + 1) \arcsin\left(\frac{2k_0}{k_0^2 + 1}\right) - \pi D_{\text{ном}} = 0,$$

где $D_{\text{ном}}$ – номинальный наружный диаметр трубы.

После этого вычисляется ширина калибра

$$B_1^{\text{IV}} = k_0 H_1^{\text{IV}},$$

радиус овала

$$R_1^{\text{IV}} = \frac{1}{4} H_1^{\text{IV}} (k_0^2 + 1)$$

и эксцентриситет калибра

$$e = R_1^{\text{IV}} - \frac{1}{2} H_1^{\text{IV}}.$$

При определении параметров калибра последней клетки стана задается величина коэффициента оваллизации, позволяющего снизить усилие

извлечения оправки. Данные по коэффициенту овализации калибра последней клетки, применяемого на существующих станах достаточно противоречивы. Например, на стане 30-102 Первоуральского новотрубного завода коэффициент овализации равен 1,09, на ТПА-80 Синарского трубного завода – 1,07, на стане 30-102 Южнотрубного завода – 1,018, на ТПА в Эмбридже (США) – 1,046.

С учетом имеющегося практического опыта предлагается задавать величину коэффициента овализации в последней клетке равным 1,055. При заданном коэффициенте овализации высота калибра определяется по формуле

$$H_2^{IV} = \frac{\pi D_{\text{ном}}}{(k_0^2 + 1) \arcsin\left(\frac{2k_0}{k_0^2 + 1}\right)}$$

Ширина калибра, радиус овала и эксцентриситет определяются по аналогии с первой клетью четвертой подсистемы.

Несмотря на то, что калибровка валков оказывает существенное влияние на точность геометрических размеров труб, она не всегда позволяет достичь требуемого результата. При прокатке труб разных типоразмеров на непрерывном стане с одной и той же калибровкой валков могут быть получены разные результаты (рис. 3).

На рис. 3 представлена запись изменения по длине трубы максимального, среднего и минимального значения толщины стенки.

Исследования также показали, что при одной и той же калибровке валков существенное влияние на точность толщины стенки трубы оказывает скоростной режим прокатного стана. В частности, на непрерывном стане завода компании IPSCO Koppel Tubulars L.L.C. в клетях с одной и той же калибровкой валков были прокатаны трубы с номинальной толщиной стенки 8,33 мм по двум разным скоростным режимам (см. таблицу). Полученные после прокатки толщины стенок представлены на рис. 4. Таким образом, корректность расчета скоростного режима прокатки является существенным фактором при производстве высокоточных труб.

Для научно обоснованного определения скоростного режима процесса непрерывной прокатки труб на основе принципов энергетической теории прокатки [4] разработана математическая модель и алгоритм ее реализации. Алгоритм заключается в следующем:

1. Задаются размеры гильзы и размеры трубы после непрерывного стана.
2. Из решения уравнения баланса мощности, записанного для всего непрерывного стана, определяется константа непрерывной прокатки, или секундный объем.
3. Задаются значения коэффициентов межклетевых натяжений.
4. Определяются скорости вращения валков последовательно, начиная с первой клетки, из ре-

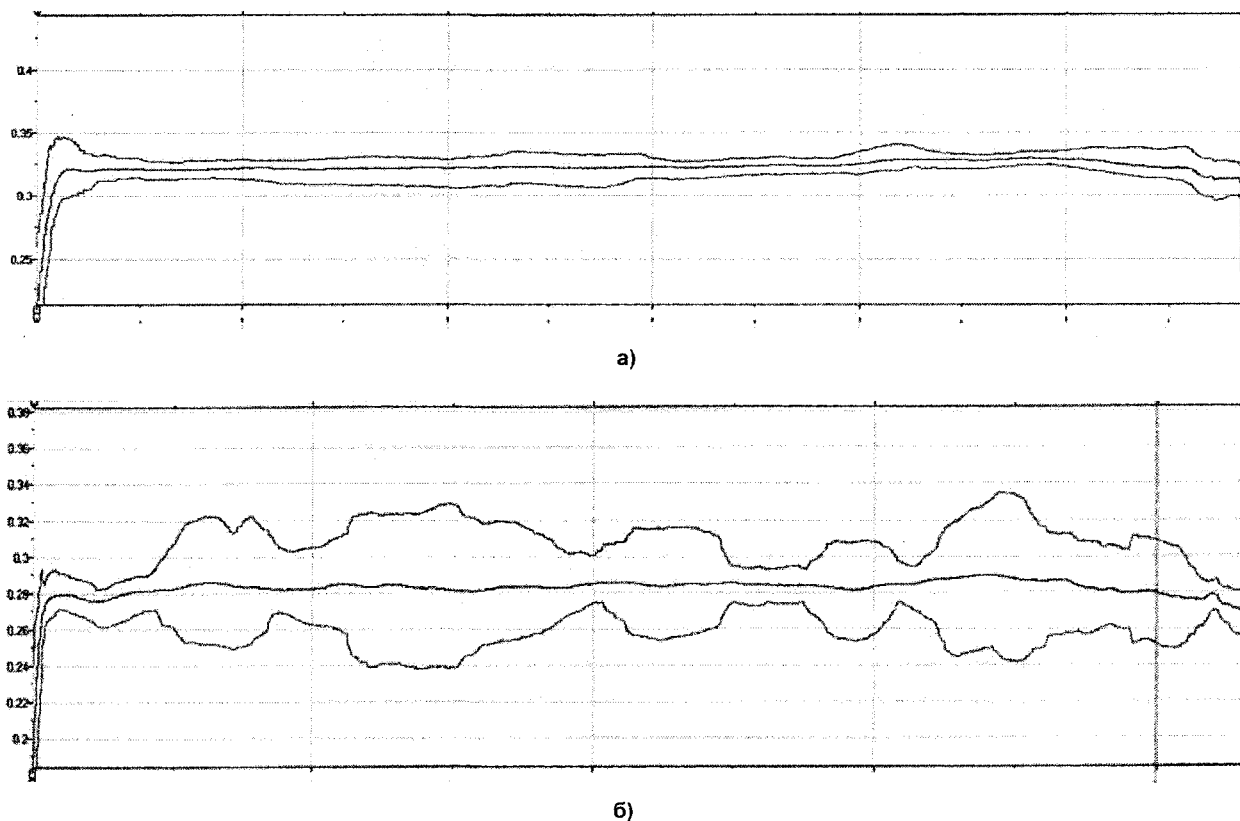


Рис. 3. Диаграммы записи толщины стенки толщиномером IMS при прокатке труб с номинальной толщиной стенки 8,33 мм (а) и с номинальной толщиной стенки 7,19 мм (б)

Частота вращения валков по клетям непрерывного стана, об/мин

Режим	Номера клетей							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	100,5	122,7	134,4	133,7	134,8	154,8	176,1	184,1
2	100,5	125,15	139,83	141,88	145,91	170,91	198,32	211,47

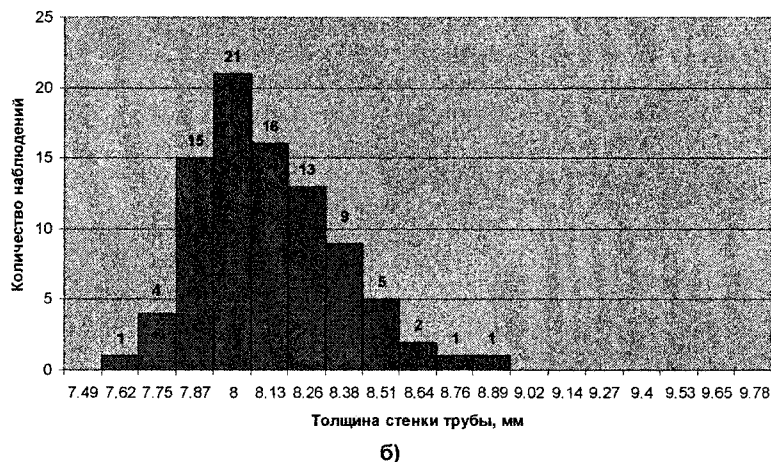
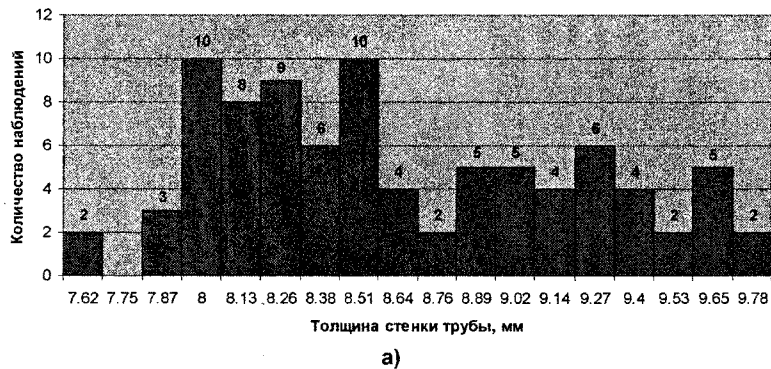


Рис. 4. Графики распределения толщины стенки труб, прокатанных на непрерывном стане со скоростным режимом 1(а) и 2(б)

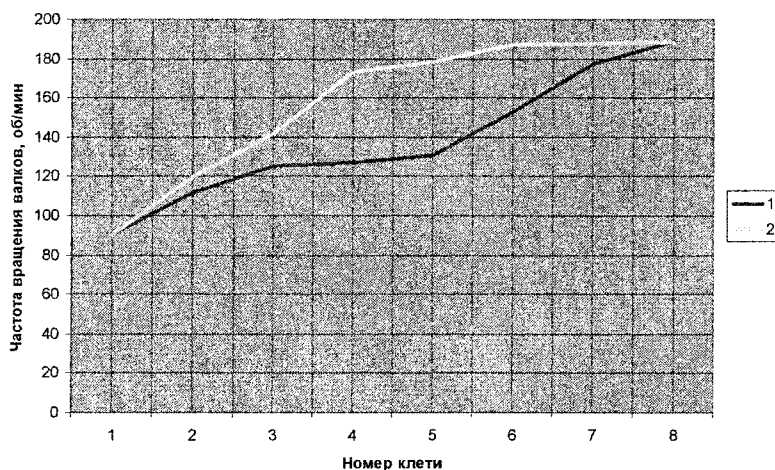


Рис. 5. Применяемый (1) и рассчитанный (2) скоростные режимы прокатки на непрерывном стане

шения уравнения баланса мощности, записанного для отдельно взятой, рассматриваемой клетки непрерывного стана.

В представленном алгоритме коэффициенты межклетевых натяжений играют роль параметров

адаптации, учитывающих особенности конкретных непрерывных станов.

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчета скоростного режима для непрерывной прокатки трубы диаметром 150 мм с

толщиной стенки 8,33 мм. Из приведенных графиков видно, что частота вращения валков в первой и последней клетях стана и по реальному, и по рассчитанному скоростным режимам практически совпадают. При этом, если равенство частот вращения валков первой клетки для обоих режимов было задано в исходных данных, то частота вращения валков последней клетки получена исключительно расчетом по модели. Следует отметить, что характер скоростного режима, полученный расчетом, позволяет получить более точную трубу, так как он в большей степени соответствует принятому режиму обжатий.

Выводы

1. Для повышения точности толщины стенки труб, прокатываемых на ТПА с непрерывным раскатным станом, необходимо, прежде всего, повышать точность прокатки на непрерывном стане.

2. При проектировании калибровки валков целесообразно использовать принципы системного подхода с разбивкой непрерывного стана на группы клеток (подсистемы), каждая из которых решает свои задачи.

3. Цели функционирования подсистем должны быть расположены в таком порядке, чтобы результат, достигнутый предыдущими подсистема-

ми, не ухудшался при работе последующих подсистем.

4. Окончательное формирование толщины стенки трубы должно осуществляться в подсистеме, включающей третью и четвертую клетки, считая с конца непрерывного стана.

5. Для определения скоростного режима, обеспечивающего высокую точность труб по толщине стенки, наиболее рациональным является использование энергетических принципов теории прокатки.

Литература

1. *Технология трубного производства* / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.

2. *Технология и оборудование трубного производства* / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 560 с.

3. *Потапов, И.Н. Теория трубного производства* / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян. – М.: Металлургия, 1991. – 424 с.

4. *Выдрин, В.Н. Процесс непрерывной прокатки* / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.

Поступила в редакцию 16 сентября 2010 г.