



Рахманов С.Р. /к.т.н./, Крышин С.М. /к.т.н./, Орещенко В.Ф. /к.т.н./,  
Вышинский В.Т. /к.т.н./, Журавлев А.В.

Национальная металлургическая академия Украины

## Расчет конструкции рабочей клетки стана холодной прокатки труб

*Предложена математическая модель оптимизации параметров станины рабочей клетки стана ХПТ. Полученные результаты использованы в расчетах при разработке конструкций станины. Разработана и внедрена рациональная конструкция станины рабочей клетки стана ХПТ. Разработано новое нажимное устройство рабочих валков оптимальной структуры, реализация которого позволяет более эффективно вести технологический процесс, в силу того, что элементы устройства могут адаптироваться ко всем возможным неточностям изготовления и монтажа, а также к деформациям станины. На основе исследований промышленных образцов рациональной рабочей клетки стана ХПТ-32 установлено, что величины и характер изменения деформаций в различных сечениях станины согласуются с величинами и характером изменения перемещений, найденных теоретическим методом. Реализация в промышленных условиях рациональной конструкции рабочей клетки стана ХПТ-32 с новым нажимным устройством обеспечила повышение качества готовой продукции в результате снижения продольных отклонений геометрических размеров прокатываемых труб по стенке и по наружному диаметру. Достигнуто увеличения производительности стана, снижение массы рабочей клетки, повышение срока службы рабочей клетки и экономия энергозатрат при прокатке труб из труднодеформируемых сталей и сплавов. Ил.3. Библиогр.: 5 назв.*

**Ключевые слова:** холодный прокат, труба, динамика, станина, рабочая клетка, главный привод, валок, нажимное устройство, клин, ползун, стан, математическая модель, оптимизация, рациональная форма, разностенность, качество, жесткость, прочность

*The mathematical model of optimization of parameters of a bed of a working cage of a camp of HPT is offered. The received results are used in calculations when developing designs of a bed. The rational design of a bed of a working cage of a camp of HPT is developed and introduced. The new press device of working rolls of the optimum structure which realization allows conducting more effectively technological process, that elements of the device can adapt for all possible inaccuracies of production and installation, and also for bed deformations is developed. On the basis of researches of industrial samples of a rational working cage of a camp of HPT 32 it is established that sizes and nature of change of deformations in various sections of a bed will be coordinated with sizes and nature of change of the movements found a theoretical method. Realization in industrial conditions of a rational design of a working cage of a camp of HPT 32 with the new press device provided improvement of quality of finished goods as a result of decrease in longitudinal deviations of the geometrical sizes of rolled pipes on a wall and on outer diameter. Decrease in weight of a working cage, increase of service life of a working cage and economy of energy consumption is reached increase in productivity of a camp, when rolling pipes from hardy deformed stale and alloys.*

**Keywords:** cold hire, pipe, dynamics, bed, cage, drive, roll, wedge, ram, camp, mathematical model, optimization, rational form, quality, rigidity, durability

Несмотря на большие достижения в области разработки технологии производства труб способом холодной прокатки и создания соответствующего оборудования, необходимого для осуществления этого процесса, резервы повышения эффективности последнего еще далеко не исчерпаны. Дальнейшее развитие процессов холодной прокатки труб во многом связано с освоением и внедрением в производство высокоэффективного технологического оборудования повышенной производительности с улучшенными эксплуатационными качествами.

Увеличение производительности станов ХПТ может быть достигнуто путем уменьшения массы возвратно-поступательно перемещающейся рабочей клетки, а повышение качества холоднокатаных труб – увеличением ее жесткости и нагрузочной способ-

ности, и в первую очередь, станины и нажимного устройства рабочих валков [1].

Поэтому, разработка основных концепций оптимизации конструкции рабочих клеток, обеспечивающих повышение их эксплуатационной прочности, при одновременном снижении металлоемкости, является актуальной задачей, от решения которой во многом зависит повышение производительности и расширение технологических возможностей станов ХПТ.

Отметим, что в условиях интенсификации режимов холодной пильгерной прокатки труб, включающей увеличение в сортаменте станов ХПТ удельного веса труб из металлов с повышенной точностью, наблюдается резкое снижение долговечности рабочих клеток. Это обусловлено действием значительных по-

величине и часто изменяющихся во времени динамических нагрузок. В результате этого выходят из строя из-за усталостного разрушения ответственные элементы рабочей клетки, в частности станины, несмотря на значительные запасы статической прочности.

При модернизации действующих рабочих клеток станков ХПТ необходимо принимать во внимание как количественную сторону интенсификации технологических режимов прокатки труб, так и качественные показатели получаемых результатов. При этом возникает задача прокатки труб из трудно деформируемых сталей и сплавов с учетом необходимости повышения производительности стана и качества прокатываемых труб. Важную роль также играет улучшение условий эксплуатации оборудования станков ХПТ, увеличение сроков службы элементов главного привода.

В этой связи требуется изыскание конструкций рабочей клетки стана ХПТ, функционирование которой могло бы обеспечить решение указанных выше задач. При создании конструкции рабочей клетки стана ХПТ необходимо обратить внимание на установление рациональной формы станины клетки, на возможность уменьшения ее массы, при одновременном повышении несущей способности и жесткости конструкции, на возможность выбора оптимальной схемы и структуры нажимного устройства и другие вопросы.

Динамические особенности функционирования станков ХПТ изложены в работах А.И. Целикова, М.И. Гриншпуна, Ф.С. Сейдалиева, С.Н. Кожевникова, В.И. Соколовского, Ю.Ф. Шевакина, А.С. Ткаченко, М.В. Попова, В.К. Цапко и др. Эти исследования в основном определили базовые теоретические предпосылки, на основе которых были выработаны главные направления по созданию и усовершенствованию оборудования – в частности станины рабочей клетки современных станков ХПТ [1].

Решение задач по определению рациональных параметров рабочей клетки стана ХПТ предусматривает, прежде всего, установление величины и характера формирования нагрузки при взаимодействии станины с обрабатываемой трубной заготовкой.

Отметим, что при определенных условиях эксплуатации станков ХПТ, элементы станины не будут подвержены действию изгибающих моментов, то есть будут находиться в условиях одноосного напряженного состояния. Однако на практике конфигурация станины под действием технологической нагрузки деформируется, в результате этого ее элементы в той или иной мере подвергаются изгибу. Для того чтобы свести к минимуму это явление, необходимо определенным образом выбрать образующую стоек станины стана ХПТ.

Задача сводится к нахождению условия экстремума интеграла, изгибающего момента согласно [2] (рис. 1).

$$\Phi = \int_0^{\ell_1} \bar{y} d\ell_1, \quad (1)$$

где  $\ell_1$  – длина стойки станины;  $\bar{y}$  – координата точки в рассматриваемом сечении стойки станины.

Среди всех кривых, схематично изображающих

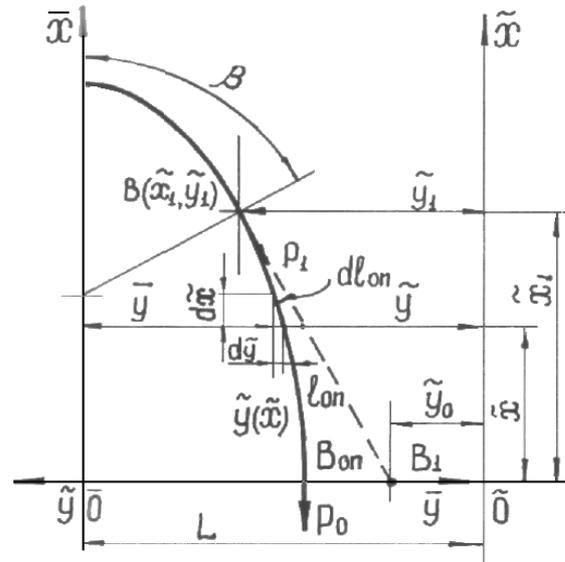


Рис. 1. К выбору рациональной конфигурации стойки станины

стойкую станину рабочей клетки, требуется найти ту, использование которой приводит к минимальному значению по сравнению с другими, в предположении, что граничная точка сопряжения  $B$  (поперечины и стойки станины) фиксирована, а вторая  $B_0$  (рис. 1), выбирается исходя из условий минимизации рассматриваемого функционала  $\Phi$ .

Для представленной функциональной зависимости (1) с учетом формы образующей возможна запись в таком виде

$$\Phi = \int_{\tilde{x}_0}^{\tilde{x}_1} (L - \bar{y}) \sqrt{1 + (\bar{y}')^2}, \quad (2)$$

на которой определяются значения координат образующей станины согласно задаче об условном экстремуме в выбранной системе координат  $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ , где  $L$  – координаты расположения вертикальной оси симметрии станины в новой системе отсчета;  $\tilde{x}_1$  – предел, определяемый из условия нахождения искомой кривой  $\tilde{y} = \tilde{y}(\tilde{x})$ , на которой функционал достигает слабый минимум, если

$$\ell_o = \int_{\tilde{x}_0}^{\tilde{x}_1} \sqrt{1 + (\bar{y}')^2}.$$

При заданных условиях задачи подынтегральная функция (2) не содержит  $\tilde{x}$ . Тогда удобной формой необходимого условия экстремума функционала (1) согласно [4] является соотношение

$$F - \bar{y}' F_{\bar{y}'} = C, \quad (3)$$

$$F = (L - \bar{y}) \sqrt{1 + (\bar{y}')^2}.$$

Функция  $\tilde{y} = \tilde{y}(\tilde{x})$ , представляющая собой решение уравнения Эйлера – это экстремали соответствующего функционала. Из множества кривых требуется выбрать одну кривую, проходящую через заданную точку с координатами  $(x_1, y_1)$  и удовлетворяющую условиям гладкого сопряжения конца поперечины и начала стойки станины. Достигается это определением частных значений произвольных постоянных в составе общего решения уравнения Эйлера.

В этом случае уравнение (3) запишется в виде

$$(L - \bar{y})\sqrt{1 + (\bar{y}')^2} - \bar{y}' \frac{(L - \bar{y})2\bar{y}'}{2\sqrt{1 + (\bar{y}')^2}} = C. \quad (4)$$

После необходимых преобразований выражение (4) представляем

$$\frac{C d\bar{y}}{\sqrt{(L - \bar{y})^2 + C^2}} = d\tilde{x}. \quad (5)$$

Интегрируя (5), найдем

$$\tilde{x} + C_1 = C \ln \left[ (L - \bar{y}) + \sqrt{(L - \bar{y})^2 + C^2} \right] + C \ln(C), \quad (6)$$

где постоянные в таком виде введены для удобства решения.

Дальнейшее вычисление упрощается, если перейти к уравнению

$$\left[ C \exp\left(-\frac{\tilde{x} + C_1}{C}\right) - (L - \bar{y}) \right]^2 = (L - \bar{y})^2 - C^2. \quad (7)$$

Согласно (7) получим уравнение искомой кривой образующей станины в виде

$$L - \bar{y} = \frac{1}{2} C \left[ \exp\left(\frac{\tilde{x} + C_1}{C}\right) + \exp\left(-\frac{\tilde{x} + C_1}{C}\right) \right]. \quad (8)$$

Произвольные постоянные интегрирования  $C$  и  $C_1$  определяются из граничных условий задачи.

При исследовании зависимости (8) совершим параллельный перенос координаты осей. Поместив начало координат в точку  $(-C_1, \tilde{y}_0 = 0)$ , можно считать, что в уравнении (8)  $C_1 = 0$ . Тогда уравнение (8) заменится более простым

$$(L - \bar{y}) = C \operatorname{ch}\left(\frac{\tilde{x}}{C}\right), \quad (9)$$

откуда видно, что форма нейтральной линии образующей стойки станины есть цепная линия [3], ось симметрии которой будет вертикальная ось симметрии станины стана.

Постоянную интегрирования  $C$  в решении уравнения Эйлера определим из условий трансверсальности согласно [1, 3]

$$\left[ F - F_{\tilde{y}'}(\tilde{y}' - \phi') \right]_{\tilde{x}=\tilde{x}_1} = 0, \quad (10)$$

устанавливающих связь между угловым коэффициентом  $\tilde{y}'(\tilde{x})$  – уравнение стойки станины (9) и  $\phi'(\tilde{x})$  – уравнение касательной к образующей поперечине станины при  $\psi = \beta$ , то есть в точке их сопряжения.

Для функционала вида (3) соответствующее условие кривой образующей станины

$$\phi(\tilde{x}) = \tilde{y}_0 + k \tilde{x}, \quad (11)$$

действительно

$$F_{\tilde{y}'} = \frac{(L - \bar{y})\tilde{y}'}{\sqrt{1 + (\tilde{y}')^2}}. \quad (12)$$

Поэтому необходимое и достаточное условие трансверсальности в точке  $B(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)$ , запишем в виде

$$(L - \bar{y}) - \bar{y}' \frac{(L - \bar{y})\bar{y}'}{\sqrt{1 + (\bar{y}')^2}} (\tilde{y}' - \phi') = C, \quad (13)$$

откуда имеем

$$\tilde{y}' = -\frac{1}{\phi'(x)} = -\frac{1}{k}. \quad (14)$$

Вычислим постоянную интегрирования задачи  $C$ , для чего внесем в последнее равенство значение производной из (9), учитывая при этом, что граничная точка  $B(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)$  лежит на искомой кривой и касательной к поперечине станины, то есть имеет место гладкое сопряжение.

Из данных рассуждений следует

$$C = \frac{\tilde{x}_1}{\operatorname{Arsh}\left(\frac{1}{k}\right)} = C_0. \quad (15)$$

Таким образом, образующая стойки станины рабочей клетки стана окончательно принимает форму

$$\bar{y} = L - C_0 \operatorname{ch}\left(\frac{\tilde{x}}{C_0}\right), \quad (16)$$

обеспечивающую рациональное расположение ее в конструкции рабочей клетки [1].

Описанная методика определения расположения стойки станины, ее уравнение, как правило, не является самой простой, но в данном случае весьма эффективна.

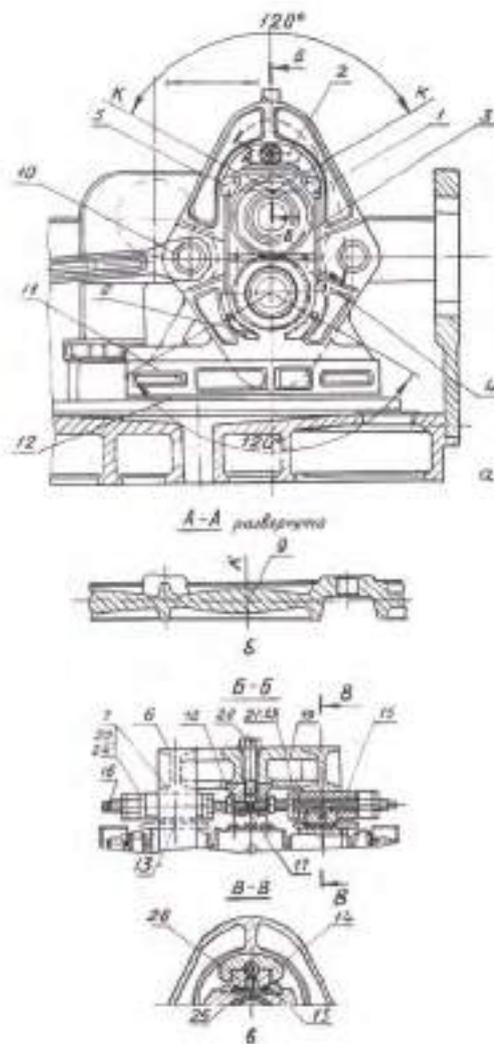


Рис. 2. Рациональная рабочая клетка стана ХПТ

Основные результаты теоретического и экспериментального исследований рациональной станины, в которой сочетаются высокая прочность и минимальная масса, были положены за основу при проектиро-

вании новой рабочей клетки стана ХПТ [2].

Рабочая клетка стана ХПТ (рис. 2) состоит из овалобразной станины 1, в окне которой смонтированы нажимное устройство 2, рабочие валки, установленные на подшипниках в подушках 3 и 4. Подушки верхнего и нижнего валков фиксируются в окне станины верхними 5 и нижними 6 планками.

Станина 1 представляет собой пространственную конструкцию, содержащую две соединенные связями овалобразные рамы рациональной формы, каждая из которых образована 7 и наружной 8 оболочками, сопряженными вертикальной продольной перемычкой 9 переменной толщины, включая на секторных углах в 120° верхнюю и нижнюю поперечины, сочлененные между собой стойками по линии «К». На уровне оси прокатки стойки станины имеют выборки в виде клинового паза с отверстиями 10 для присоединения шатунов приводного механизма и штоков уравнивающего устройства. В нижней части станины расположена опора 11 для установки рабочей клетки, выполненная в виде опорных и боковых направляющих по всей длине, вследствие чего повышается ремонтпригодность, устойчивость и плавность движения клетки, уменьшается износ опорных направляющих, к которым крепятся текстолитовые наделки 12.

Направляющие опоры рабочей клетки объединены с нижней связью станины в пространственную решетчатую систему - опоры и ребра связи соединены поперечными элементами жесткости. Благодаря такому выполнению конструкция рабочей клетки стана ХПТ имеет пониженную массу и способна выдержать большие статические и динамические нагрузки. Верхняя связь боковых рам выполнена с учетом возможности ее использования при монтаже нажимного устройства в установку рабочей клетки стана ХПТ.

Нажимное устройство валков [1, 5] содержит клиновой и винтовой механизмы. Клиновой механизм снабжен клиньями 13, перемещающимися по наклонным контактным поверхностям подушек 3, двумя парами компенсирующих вкладышей с цилиндрическими поверхностями, оси одних из которых 14, установленных на клиньях, параллельны продольной оси станины, а оси других 15, контактирующих со станиной, параллельны оси валка.

Самоустановка опор верхнего валка, кроме всего, обеспечивает равномерное нагружение подшипников верхних подушек и по мере износа их последние смещаются вдоль оси валка навстречу друг-другу под действием горизонтальных составляющих реакций со стороны клиньев, обеспечивая выбор появляющихся зазоров. При этом также уменьшается осевое смещение валков относительно друг друга и искажение профиля калибра.

При формировании схемы нагружения были приняты допущения о том, что линия действия равнодействующей сил контактного взаимодействия обрабатываемого изделия и калибра валка проходит через ось прокатки, так как обрабатываемое изделие представляет собой тело вращения.

Из результатов исследований [2-4] следует, что

при холодной пыльгерной прокатке контактное взаимодействие системы «валки-обрабатываемое изделие» формируется таким образом, что кроме вертикальных перемещений, определяемых податливостью системы «валки-подушки валков-узлы предохранительных устройств-рама клетки», валки осуществляют и горизонтальные (вдоль собственной оси) перемещения, определяемые податливостью системы крепления подушек валков в окнах рамных конструкций клеток. Совершая перемещения, валки искажают мгновенное сечение очага деформации. Особенно существенны эти искажения при перемещениях подвижного очага деформации в предчистовой и калибровочных зонах, где окончательно формируются геометрические характеристики изделия. Представленный проект рациональной рабочей клетки реализован на 6-и станах ХПТ 32 -3-8 (рис. 2) ряда отечественных заводов.

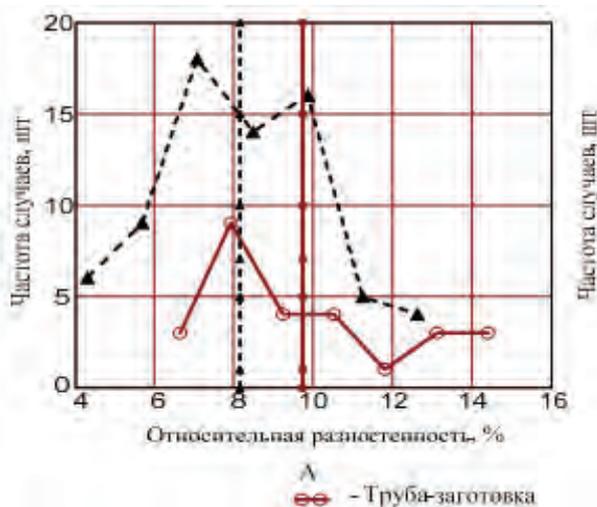
Внедрение промышленного образца рабочей клетки стана ХПТ сопровождалось исследованиями его напряженного состояния и эффективности работы в целом. При этом проверялись основные теоретические положения, изложенные в работе.

На особенности функционирования рабочей клетки в производственных условиях влияют факторы, которые трудно учесть при аналитическом исследовании из-за ряда допущений, неизбежных при рассмотрении сложных схем конструкции и вида нагружения стана, поэтому были выполнены экспериментальные исследования рабочей клетки стана ХПТ-32 и оценена эффективность применения рациональной рабочей клетки, ее достижения.

Отметим, что важной технологической характеристикой станов ХПТ является их способность исправлять исходную разностенность трубы – заготовки.

Для исследования влияния клетки рациональной конструкции и повышенной жесткости на эту характеристику прокатан пакет труб из сплава Gr – 2 по маршруту 25x2,8–18x1,5 на стане ХПТ 32. Замеры поперечной разностенности производили вдоль каждой трубы до и после прокатки на стане.

Результаты анализа параметров поперечной разностенности в ходе прокатки труб из титана и сплавов на



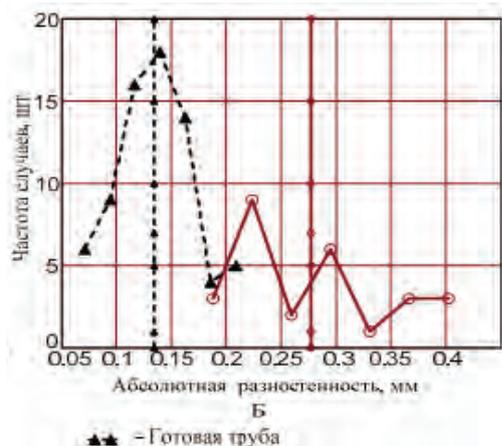


Рис. 3. Полигоны изменения частот поперечной разностенности в ходе прокатки труб из сплава Gr – 2 по маршруту 25x2,8–18x1,5 на стане ХПТ 32: А – относительная разностенность; Б – абсолютная разностенность

стане ХПТ 32, оснащенный клетью повышенной жесткости, сведены в полигоны изменения частот (рис. 3)

Как видно из полигонов изменения частот поперечной разностенности в ходе прокатки труб из сплава Gr – 2 значение абсолютной разностенности уменьшилось примерно на 58 % (с 0,312 до 0,131 мм). Уменьшился и разброс значений абсолютной разностенности труб, о чем свидетельствует уменьшение величины среднеквадратичного отклонения с 0,211 до 0,025 мм. На 2,8 % уменьшилась относительная разностенность с одновременным уменьшением среднеквадратичного отклонения с 6,3 до 2,1 %.

Как показывают многолетние наблюдения и результаты исследований, снижение абсолютной поперечной разностенности при прокатке труб из сплава Gr – 2 на стане ХПТ лежит ниже 50 % (в лучшем случае, а в большинстве 40–45 %).

В процессе экспериментальных исследований стана ХПТ-32 усилие прокатки, характер нагружения элементов станины рациональной формы, достигало примерно 510 кН при прямом ходе клетки, и 374 кН при обратном (прокатка труб из стали 12Х18Н10Т по калибровке 38×4,3–20×1,6 при скорости прокатки 85 дв.х/мин). При движении клетки вперед и назад в шатунах главного привода возникают усилия, величины которых равны 40,6 и 29,0 кН или 7,99–5,70 % от усилия прокатки, что хорошо согласуется с соответствующими теоретическими положениями.

Эксплуатация рациональной рабочей клетки на станах ХПТ-32 при прокатке труб из нержавеющей стали и их сплавов показывает высокую надежность и эффективность её работы. Так, достигнуты следующие показатели: увеличение производительности стана на 6,7 %; снижение массы рабочей клетки на 14%; экономия электроэнергии на 9,23 %; повышение срока службы рабочей клетки при прокатке труднодеформируемых сталей и сплавов фактически в 3,6 раза; повышение качества готовой продукции за счет увеличения жесткости рабочей клетки в 3,82 раза (отклонение геометрических размеров прокатываемых труб по стенке (max) 5 %, по наружному диаметру (max) ±0,10 мм). Достигнуто уменьшение брака по наружной поверхности на 5 %, применением оптимального нажимного устройства и расширение со-

ртамента за счет введения особотонкостенных труб, а также изменения существующих маршрутов прокатки с целью уменьшения цикличности обработки. Все показатели представлены на основании осмотра прокатываемой продукции марок сталей 12Х18Н10Т размеров 20×1,6 и Х18Н10Т – 14×2,0, в соответствии с нижними показателями ГОСТ 9941-81, где предельные отклонения геометрических размеров труб равны: по стенке ± 5-7 %, по наружному диаметру ± 0,10 мм.

### Выводы

1. Предложена методика выбора геометрических параметров станины рациональной формы. Полученные зависимости использованы в расчетах при разработке конструкций станины.

2. Разработана рациональная конструкция рабочей клетки стана ХПТ, позволившая: увеличить производительность стана на 6,7 %, обеспечить экономию энергозатрат на 9,3 %, снижение массы рабочей клетки на 14 %, повышение срока службы рабочей клетки при прокатке труднодеформируемых сталей и сплавов примерно в 4 раза. Эта конструкция внедрена на станах ХПТ-32.

3. Создано новое нажимное устройство с оптимальной структурой, реализация которого позволяет более эффективно вести технологический процесс, так как элементы устройства могут адаптироваться ко всем возможным неточностям изготовления и монтажа, а также к деформациям станины.

4. На основе исследований промышленных образцов рациональной рабочей клетки стана ХПТ-32 установлено, что величины и характер изменения напряжений в различных сечениях станины согласуются с величинами и характером изменения напряжений, найденных теоретическим методом. Реализация в промышленных условиях рациональной конструкции рабочей клетки стана ХПТ-32 обеспечила повышение качества готовой продукции в результате снижения продольных отклонений геометрических размеров прокатываемых труб по стенке в 1,3 раза, по наружному диаметру в 2 раза по сравнению с ГОСТом 9941-81. При этом достигнуто уменьшение брака «накат» до 5 %, расширение технологических возможностей стана (прокатка специального сортамента – особотонкостенных труб) и оптимизация существующих маршрутов прокатки.

5. Промышленная эксплуатация усовершенствованного варианта рациональной конструкции рабочей клетки на заводе в течение 25 месяцев в режиме, характеризуемом, в основном, условиями прокатки труднодеформируемых сталей и сплавов, подтверждает ее высокую эффективность в работе.

### Библиографический список

1. Машины и агрегаты трубного производства. Учебное пособие для вузов /А.П. Коликов, В.П. Романенко и др. – М.: МИСИС, 1998. – 536 с.
2. Станы холодной прокатки труб конструкции ВНИИМЕТМАШ / Н.А. Целиков, А.В. Чекулаев // Черные металлы. – 2010. – № 5. – С. 28-31.
3. Станы холодной прокатки труб /М.И. Гриншпун, В.И. Соколовский. – М.: Машиностроение, 1967. – 238 с.

4. А.с. № 1148660 СССР, МКИ В 21 В 21/00. Рабочая клетка стана холодной прокатки труб/ А.С.Ткаченко, С.М. Крышин, В.Ф. Орещенко, Л.А. Сафонов, Ю.Л. Лукашук, В.Т. Вышинский и А.В. Цупкин (СССР) - №3674757/22-02. Заявл. 20.12.83, опубл. 07.04.85, Бюл. № 13.

5. Разработка новой конструкции нажимного

устройства рабочей клетки стана ХПТ с целью повышения качества катаных труб / Ю.Л. Калашников, С.М. Крышин, В.Ф. Орещенко и др. // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 1995. - № 1. - С. 61–63.

Поступила 29.07.2013

УДК 621. 774.36

Кузнецов Д.Е.

ГП «НИТИ»

Наука

## Анализ методов расчета ширины калибров станов ХПТ

*Рассмотрены основные подходы к выбору калибровок станов холодной прокатки труб. На основании выполненного анализа и экспериментов, проведенных на промышленных станах, даны рекомендации по выбору ширины калибров станов ХПТ при производстве холоднокатаных труб из специальных сталей и сплавов, предназначенных для эксплуатации на ответственных энергетических объектах. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** трубы, холодная прокатка, качество, точность размеров, калибровка валков

*The basic approaches to the selection of calibrations of cold-rolling tube. On the basis of the analysis and experiments conducted on industrial mills, advice on selecting the width of the gauge HPT mills in the production of cold-rolled tubes of special steels and alloys for use in responsible energy facilities.*

**Keywords:** pipe, cold rolled, quality, dimensional accuracy, calibration rolls

Расчет ширины калибров станов холодной прокатки труб (ХПТ) представляет собой сложную задачу, несмотря на то, что известно большое количество формул, предназначенных для этой цели. Проблема состоит в том, что ширина (развал) калибров влияет на многие параметры процесса прокатки, например на равномерность обжатия по периметру трубы и сопутствующие этому явления, точность по диаметру и разностенность. При производстве холоднокатаных труб из специальных сталей и сплавов, отличающихся сравнительно низкой пластичностью, и повышенными требованиями к качеству, чрезмерный развал калибров может приводить к трещинообразованию и ухудшению микрорельефа внутренней поверхности труб [1].

Анализ известных формул для расчета ширины калибров станов ХПТ, выполненный в работе [2], показал, что известные решения не в полной мере отвечают современным требованиям. Во-первых, большинство из известных формул включают в себя эмпирические коэффициенты, которые применимы для исключительно конкретных условий. Во-вторых, технология холодной прокатки труб шагнула далеко вперед по сравнению с тем состоянием, когда известные [3] решения были предложены. В-третьих, непрерывно разрабатываются новые стали и сплавы специального назначения, производство холоднокатаных труб из которых отличается существенной спецификой.

В расчетах ширины калибров станов ХПТ обычно исходят из выдвинутого П.Т. Емельяненко положения, согласно которому ширина ручья в каком-либо сечении профиля калибра равна диаметру ручья в сечении, отстоящем от первого от расстояния, соответ-

ствующему объему подачи металла, произведенной перед рабочим ходом клетки. При этом наибольшее распространение на практике получила построенная на этом принципе формула Я.Е. Осады [2-5]

$$B_x = D_x + 2 \frac{\sqrt{t_x + 2V_y (tg\gamma_x - tg\alpha_x)} - t_x}{tg\gamma_x - tg\alpha_x} \cdot tg\gamma_x, \quad (1)$$

где  $B_x$ ,  $D_x$ ,  $t_x$  - ширина калибра, диаметр и толщина стенки трубы в контрольном сечении;  $V_y$  - объем подачи;  $\gamma_x$  и  $\alpha_x$  - углы конусности ручья калибра и оправки. Индекс «x» обозначает координату рассматриваемого сечения рабочего конуса.

Выполненные экспериментальные исследования показали [1], что с позиций обеспечения высокого качества внутренней поверхности труб, наибольшего внимания заслуживает участок рабочего конуса, где заканчивается обжатие стенки трубы и калибрующий участок. Именно на этих участках зарождаются микротрещины в прокатываемом металле, а также нередко ухудшается микрорельеф внутренней поверхности труб. Именно поэтому ширина калибра на этих участках должна быть, с одной стороны, минимальной. Но, с другой стороны, исключить опасность «закусывания» металла калибрами [5, с. 207].

Практика показала, что при прокатке труб из специальных сталей и сплавов нередко эффективным оказывается применение оправок с криволинейной образующей. В этих случаях на предкалибровочном и калибровочном участках угол наклона образующей оправки по отношению к оси прокатки близок к нулю. Т.е.,  $tg\alpha \rightarrow 0$ . При таком условии выражение (1) принимает вид