

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии  
и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН**

**80 лет**

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

**УДК 669.1; 546.1; 546.3**

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.  
Сборник научных трудов.  
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

*Редакционная коллегия*

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

## **Валковая формовка, сварка, редуцирование и профилирование стальных труб малого и среднего диаметра**

***В.С. Юсупов, А.В. Колобов, А.Е. Шелест, М.С. Селезнев,  
К.Э. Акоюн, М.А. Соминин***

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-510-546

В работе приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории пластической деформации металлических материалов ИМЕТ РАН по совершенствованию технологии производства стальных сварных прямошовных труб малого и среднего диаметра на трубоэлектросварочных агрегатах (ТЭСА). Выполнено исследование формоизменения и деформации при валковой формовке, разработаны алгоритм и методика расчета калибровки при валковой формовке. Изучены особенности настройки опорно-сварочного узла и сварки токами высокой частоты (ТВЧ) с целью повышения эффективного нагрева кромок трубной заготовки и получения качественного сварного соединения. Разработана методика расчета ширины исходной заготовки при получении трубы валковой и линейной роликовой формовкой. Рассмотрены вопросы редуцирования тонкостенных сварных труб, а также профилирования труб прямоугольного сечения из сварных труб круглого сечения в потоке ТЭСА. Приведены новые технические решения, позволившие усовершенствовать технологию получения труб.

### **Введение**

Электросварные трубы составляют значительную часть продукции черной металлургии и отличаются относительно высокой рентабельностью. В последние годы практически все металлургические комбинаты России включили в свой цикл производство электросварных труб. Эффективность производства труб на ТЭСА определяется в числе прочих причин тем, что эти агрегаты работают в режиме бесконечной формовки и сварки, что говорит о высоком уровне развития технологии современных ТЭСА [1]. Например, на ОАО «Северсталь» было организовано промышленное производство сварных труб на базе цеха гнутых профилей. Были установлены ТЭСА 19-50, 50-76, 25-60, 10-25, 10-38, 12-63 (в наименовании агрегата первая цифра означает минимальный наружный диаметр выпускаемой трубы, вторая – максимальный диаметр) для получения стальных труб малого диаметра (10-76 мм), в том числе мебельного сортамента.

К 2000 году был проведен комплекс мероприятий для расширения сортамента профилегибочного агрегата (ПГА) 2-8x100-600 за счет производства конструкционных и водогазопроводных труб диаметром 76-159 мм [2, 3]. Реконструкция ПГА решила задачу освоения новой продукции при сохранении освоенного сортамента и объема производства гнутых профилей. Профилегибочный агрегат (ПГА) 2-8x100-600 конструкции СКМЗ, входящий в состав цеха гнутых профилей (ЦГП) ОАО «Северсталь», был введен в эксплуатацию в августе 1972 года. Проектная производительность агрегата составляет 200 тысяч тонн в год. Первоначально в сортament стана входили незамкнутые гнутые профили из стальной заготовки толщиной 2-8 мм и шириной 100-600 мм. В 1976 году для производства сварных замкнутых профилей на ПГА установлено сварочное оборудование и впервые в мире освоено производство стальных гнутых замкнутых профилей квадратного и прямоугольного сечения.

В 2001 году на ПГА 2-8x100-600 был освоен сортament конструкционных труб, а в 2002 – водогазопроводных труб. Проведенная реконструкция ПГА 2-8x100-600 позволила увеличить объем заказов в 2001 году на 30 тыс. тонн и 2002 году на 60 тыс. тонн.

В 2005 был пущен новый ТЭСА 21-89 фирмы «Oto Mills» (Marchigalia) для производства круглых и профильных труб [4]. На ТЭСА 21-89 используется укороченная схема формовки в клетях с открытыми калибрами. Производительность стана 60 тыс. тонн в год.

Основной сортament вышеуказанных станов составляют электросварные трубы по следующим стандартам «Сварные прецизионные трубы» (DIN 2394), «Трубы стальные электросварные» (ТУ 14-105-566-93), «Трубы стальные электросварные прямошовные для производства металлических конструкций» (ТУ 14-105-611-98), «Стальные водогазопроводные трубы» (ГОСТ 3262-75) размерами  $\varnothing 17-159 \times 1.0-6.0$  мм, а также «Сварные прецизионные прямоугольные и квадратные трубы» (DIN 2395), «Электросварные квадратные трубы» (ГОСТ 8639-82), «Электросварные прямоугольные трубы» (ГОСТ 8645-68).

В 2009 году было начато строительство ТЭСА 127-426 на предприятии ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна» для производства профильных труб сечением от 100x100x3 до 300x300x16 мм [5]. Технические требования к профильным электросварным стальным трубам установлены: EN 10219 «Профили полые сварные конструкционные, отформованные в холодном состоянии, из нелегированных и мелкозернистых сталей», ГОСТ 30245 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и

прямоугольные», ГОСТ 25577 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные», ГОСТ 8645 «Трубы стальные прямоугольные», ГОСТ 13663-86 «Трубы стальные профильные», ГОСТ 8639-82 «Трубы стальные квадратные» и DIN 2395 «Трубы квадратного сечения».

Эти широкомасштабные работы потребовали привлечения и воспитания специалистов в области технологии производства сварных труб, а также систематического проведения технологических исследований, краткий обзор которых дан в представленной работе.

### **Валковая формовка на ТЭСА**

Современная технология производства электросварных стальных труб малого и среднего диаметра осуществляется на ТЭСА и включает в себя несколько операций, главными из которых являются формовка (сворачивание) плоской заготовки (штрипса) в цилиндрическую полу трубную заготовку и последующую сварку кромок друг с другом с формированием неразъемного соединения в виде сварного шва. Трубоэлектросварочные агрегаты (ТЭСА) включают в себя последовательно расположенные приводные рабочие клетки с валками, оснащенными, соответственно, формовочными, сварочными и калибровочными калибрами, а также неприводные вертикальные (эджерные) валки, устанавливаемые после каждой горизонтальной клетки. Формовочные клетки разделяются на две группы: открытой и закрытой формовки (рис.1). При открытой формовке полоса подвергается свободному изгибу в калибре, образованном поверхностями верхнего и нижнего валков. При этом боковые кромки не подвергаются поперечному воздействию, а все пространство открытого калибра заполнено полосой. При закрытой формовке внутренняя сторона трубной заготовки не контактирует с инструментом. Изгиб осуществляется в стесненных условиях в «закрытом» калибре, образованном охватывающими заготовку поверхностями валков и разрезной шайбы.

Последовательность технологических операций получения электросварной трубы определяется особенностями формовки, т.е. выбранными условиями изгиба полосы, включающими углы подгибки отдельных зон заготовки в каждом последующем калибре и радиусы кривизны для этих зон. Исходя из оценки технологичности основных видов калибровок валкового инструмента, применяемого на современных ТЭСА, наиболее технологичным видом калибровки валков, с точки зрения

поддержания стабильности всего процесса формовки, является двухрадиусная калибровка (рис.1).

Эффективность работы ТЭСА в значительной мере зависит от калибровки и конструкции технологического инструмента. Они должны обеспечивать технологичность процесса, минимальные напряжения растяжения в продольных кромках деформируемого материала, устойчивость полосы при ее движении в последовательном ряде калибров, получение трубы с заданными геометрическими размерами и прочностью сварного продольного соединения.

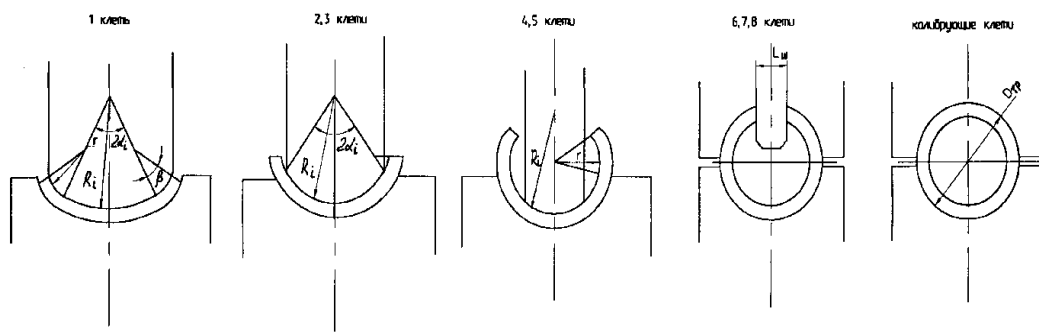


Рис.1. Схема формоизменения поперечного сечения трубной заготовки в процессе валковой формовки на примере калибровок, применяемых на ТЭСА ОАО «Северсталь».

### Распределение продольных деформаций заготовки по клетям ТЭСА

Основными дефектами трубной заготовки, проявляющимися в ходе процесса непрерывной валковой формовки, являются гофры (волнистость), смещение и плохая выформовка кромок («крыша»), которые в дальнейшем не позволяют получить стабильный качественный шов при сварке. Гофрообразование происходит в результате потери кромками продольной устойчивости из-за остаточных продольных деформаций. «Крыша» кромок обусловлена недостаточной выформовкой трубной заготовки в области кромок полосы. Смещение полок в горизонтальной плоскости приводит к наличию непроваров, а гофры – к периодическому смещению кромок друг относительно друга по вертикали, вследствие чего в зоне шва образуется утонение и ослабление сварного соединения.

Исследованию проблемы формоизменения полосы и расчету калибровок валков для процесса непрерывной валковой формовки на

трубоэлектросварочном агрегате посвящено большое количество работ, из которых следует ее актуальность и сложность. Актуальность обусловлена очевидной экономической заинтересованностью предприятий в отыскании оптимальных схем калибровок валков, а сложность – отсутствием в настоящее время методики расчета калибровки формовки труб, обеспечивающей снижение гофрообразования, и получение стабильного сварного соединения высокого качества по всей длине трубы.

Анализ деформированного состояния полосы при формовке показывает, что основное влияние на качество готовых прямошовных электросварных труб, т.е. на предотвращение дефектов формовки (гофрообразование и др.), оказывает величина продольной деформации кромок трубной заготовки в очаге формовки. Эффективное управление величиной и характером продольных деформаций достигается за счет реализации процесса холодного редуцирования трубной заготовки в закрытых калибрах с разрезной шайбой.

В литературе отсутствуют четкие положения и рекомендации по расчету калибровки валков с учетом распределения величины деформации трубной заготовки при ее редуцировании в процессе непрерывной валковой формовки труб малого и среднего диаметров. Было проведено исследование влияния режимов деформации трубной заготовки в закрытых формовочных и сварочном калибрах на качество сварного соединения и разработана методика расчета калибровки валков на основе учета требуемого режима распределения деформаций трубной заготовки по клетям трубоэлектросварочного агрегата.

Экспериментальные исследования режимов деформации трубной заготовки в процессе непрерывной формовки электросварных прямошовных труб проводились на сортаменте труб, производимом на ТЭСА «19-50», «50-76» и профилегибочном агрегате (ПГА) «2-8x100-600» цеха гнутых профилей ОАО «Северсталь».

Результаты измерения продольной деформации трубной заготовки по клетям стана показали следующее:

- общая вытяжка по группе клетей с открытыми калибрами не превышает 0.13%;

- вытяжки, применяемые в сварочной клетке и формовочных клетях с закрытыми калибрами на трубоэлектросварочном агрегате, носят случайный характер в зависимости от диаметра готовой трубы, номера клетки, т.е. заранее не установлены на этапе расчета калибровки и целенаправленно не

устанавливаются вальцовщиком на стане. В целом ряде профилаэразмеров вытяжка в отдельных закрытых калибрах и сварочной клетки отсутствует.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с оценкой качества труб на основе анализа претензий потребителей. Наиболее «проблемным» по качеству является сортамент, где вытяжки минимальны или отсутствуют, либо там, где вытяжки полосы достигают своих максимальных значений  $\mu > 1,035$ . Это полностью соответствует представлениям о механизме устранения вышеописанных дефектов формовки.

Формовка полосы в первом открытом калибре для большинства используемых схем калибровок валков имеет большое значение. Его функции несколько отличаются от остальных открытых калибров, так как он предназначен для формирования радиуса закругления кромок. Как правило, радиус закругления верхнего и нижнего валков рассчитывается исходя из средней толщины трубной заготовки данного размера. Поэтому в рамках проведения данных исследований была предложена новая конструкция валков первого калибра, исключающая раскатку кромок при обеспечении их выформовки для различных толщин стенок трубы [6].

Результаты исследования влияния на качество труб вытяжки в сварочной клетки, полученные после оптимальной настройки положения индуктора при неизменных токовых и скоростных параметрах сварки, приведенные на рис. 2, показали, что зависимость величины раздачи от вытяжки имеет экстремум [7]. Эксперименты проводили на трубах  $\varnothing 21,3 \times 1,5$ ;  $\varnothing 63,5 \times 2,5$ ;  $\varnothing 45 \times 2,0$ ;  $\varnothing 102 \times 4$  на ТЭСА «19-50», «50-76» и ПГА «2-8x100-600». Установлено, что наибольший выход годного достигается для указанного сортамента труб с отношением  $D/S = 10-40$  ( $D$  – диаметр трубы;  $S$  – ширина исходной полосы) в диапазоне вытяжки  $\mu = 1,008-1,012$ . Деформация трубной заготовки с величиной вытяжки в указанном диапазоне обеспечивает необходимые сжимающие напряжения и не приводит при этом к потере устойчивости и смещению кромок. При вытяжке менее 1,008 кромки трубной заготовки недостаточно обжимаются, вследствие чего в отдельных случаях наблюдается образование непроваров, прочность шва недостаточна. При вытяжке в сварочной клетки более 1,012 наблюдается повышенный пилообразный грат, потеря устойчивости кромок, их смещение друг относительно друга, что приводит к смещению кромок и ослаблению прочности шва [8].



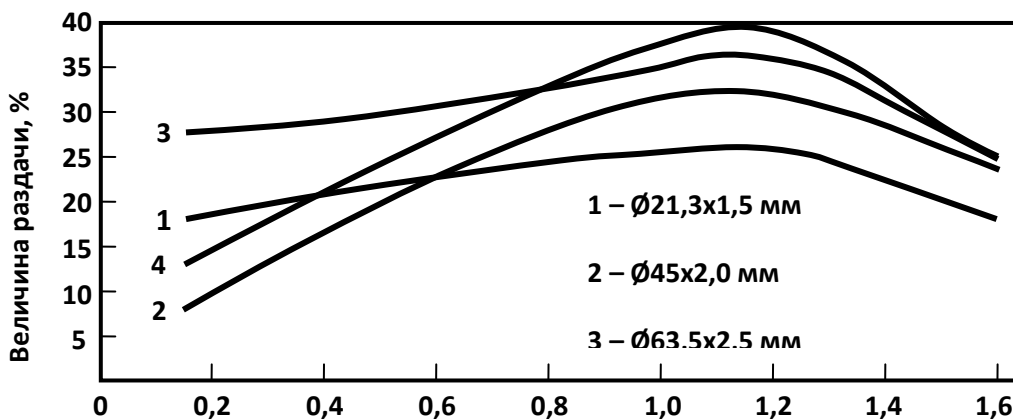


Рис.2. Влияние деформации трубной заготовки в сварочной клети на прочность сварного шва.

### Деформация трубной заготовки в закрытых формовочных клетях

Деформацию трубной заготовки в закрытом калибре определяли по формуле

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{1}{\mu}\right)100\%, \quad (1)$$

где  $\mu$  - коэффициент вытяжки. По экспериментальным данным построена зависимость рациональной деформации трубной заготовки от среднего периметра трубы при формовке в закрытых калибрах [9-11]. Для обработки данных эксперимента и отыскания математической зависимости величины деформации полосы в закрытых калибрах  $\varepsilon$ , соответствующей наилучшим показателям качества сварного шва, от размеров готовой трубы (среднего периметра)  $\varepsilon = f(P)$  по имеющимся парам наблюдений  $(\varepsilon_1, P_1), (\varepsilon_2, P_2), \dots, (\varepsilon_n, P_n)$  применялся метод регрессионного анализа. Характер распределения точек в координатах  $\varepsilon - P$  близок к экспоненциальному виду. С помощью метода наименьших квадратов получена следующая функциональная зависимость, представленная на рис. 3, рациональной деформации трубной заготовки от размера готовой трубы

$$\varepsilon = 0.938 \cdot e^{-0.0017P}, \quad (2)$$

где  $P$  – средний периметр готовой трубы.

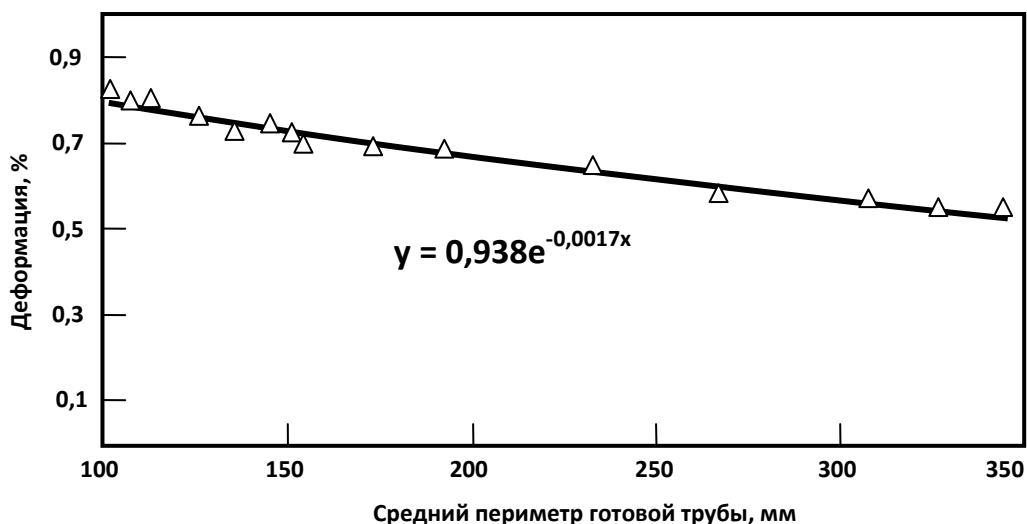


Рис.3. Зависимость деформаций трубной заготовки при формовке в закрытых калибрах от размеров готовой трубы.

**Механизм гофрообразования.** Изменение продольных деформаций в очагегиба носит знакопеременный характер (рис.4). На участке внеконтактной деформации перед калибром происходит резкое изменение углагиба и кромка сначала продольно растягивается ( $\varepsilon_{xx}$ ), а затем на участке контактной деформации (в калибре) продольно сжимается ( $-\varepsilon_{xx}$ ). Причем оба этих процесса вызывают продольную пластическую деформацию, то есть максимальное значение деформации растяжения или сжатия в продольном направлении может превышать в несколько раз величину упругой деформации  $\varepsilon_{xx} > 0,2\%$ .

Очевидно, что на участке возрастания продольной деформации растяжения (во внеконтактной зоне) потери устойчивости кромкой не произойдет (даже если  $\varepsilon_{xx} > 0,2\%$ ). Гофрообразование возможно на участке упругой разгрузки, в случае если полоса, выйдя из калибра (в котором она продольно сжимается), подойдет к этому участку, имея продольные деформации (растягивающие или сжимающие), превышающие упругие.

Поперечные деформации при растяжении или сжатии пропорциональны продольной деформации  $-\varepsilon_{yy} = \beta\varepsilon_{xx}$  (сужение в поперечном направлении вызывает удлинение в продольном). Поэтому возникающие в калибре продольные сжимающие деформации ( $-\varepsilon_{xx}$ ) компенсируются (перераспределяются) в нем за счет продольных растягивающих деформаций ( $\varepsilon_{xx}$ ), которые в свою очередь возникают

благодаря сжатию трубной заготовки в поперечном направлении ( $-\varepsilon_{yy}$ ). Осуществляя процесс редуцирования (поперечного сжатия), мы обеспечиваем частичное выравнивание продольных деформаций сжатия в очагегиба за счет продольных деформаций удлинения, возникающих вследствие поперечного сжатия трубной заготовки.

Представленное выше уравнение (2) позволяет оценить величину продольных деформаций трубной заготовки  $\varepsilon$  в группе клеток с закрытыми калибрами, которые обеспечивают отсутствие процесса гофрообразования. При осуществлении процесса редуцирования с величиной относительной продольной деформации равной  $\varepsilon_1$  (рис. 4) максимальная величина продольной деформации в клетке  $|\varepsilon_1^{\max}|$  не превышает упругой за счет выравнивания продольных деформаций сжатия деформациями растяжения, получаемыми в результате поперечного сжатия.

В случае возникновения в трубной заготовке завышенных поперечных деформаций сжатия (регистрируются значительные продольные деформации  $\varepsilon_2$ ) имеем в результате продольные деформации растяжения, максимальная величина которых значительно превышает упругие деформации  $|\varepsilon_2^{\max}| > 0,2\%$ .

В случае реализации процесса редуцирования с относительной продольной деформацией  $\varepsilon_3$ , т.е. приложения к полосе недостаточных поперечных деформаций сжатия, в результате получаем значительные продольные деформации, максимальная величина которых по модулю также превышает упругие  $|\varepsilon_3^{\max}| > 0,2\%$ .

Для последних двух случаев процесс формовки сопровождается гофрообразованием на кромках трубной заготовки; чрезмерное поперечное сжатие её приводит к искривлению (смещению) кромок и подрезанию их торцов боковыми плоскостями разрезной шайбы.

Негативные факторы формовки, возникающие по причине неправильно выбранного режима редуцирования трубной заготовки в закрытых калибрах, отрицательно сказываются на последующем процессе высокочастотной сварки, обуславливают неравномерное обжатие кромок по толщине и, как следствие, ослабление сечения шва и непровары.

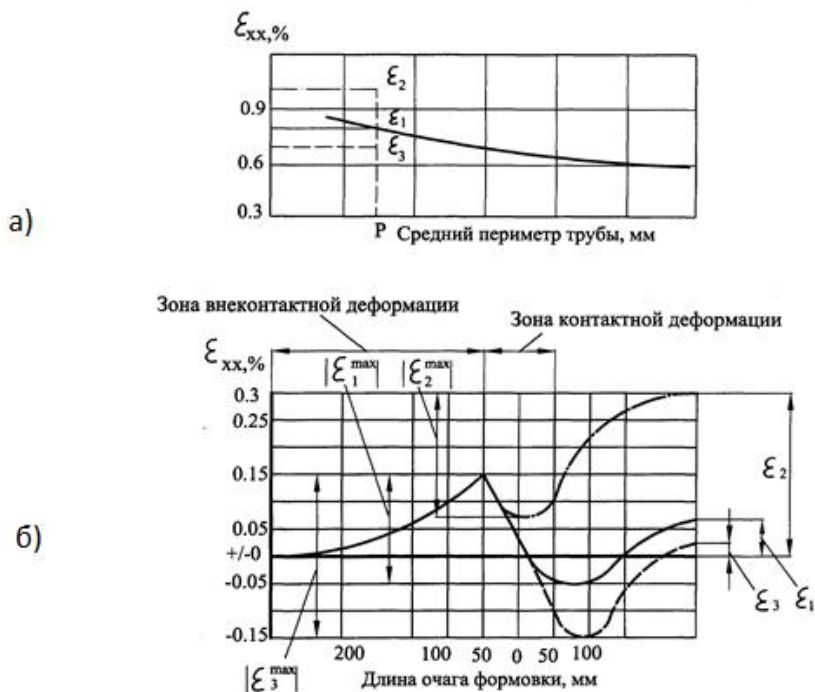


Рис.4. Изменение величины продольной деформации при различных режимах редуцирования: а – в зависимости от размеров трубы; б – по длине очага деформации.

Соотношение (2) использовано в методике расчета калибровки валков для формовки труб и позволяет осуществлять выбор параметров редуцирования по величине относительной продольной деформации для различных размеров труб. Учитывая, что деформация и вытяжка связаны между собой соотношением (1), зная требуемую величину деформации, имеется возможность при расчете валков задавать необходимую величину обжатия (поперечного сжатия) в закрытом калибре за счет изменения средних периметров калибров. Величина обжатия трубной заготовки по периметру в закрытом калибре в этом случае выражается как

$$\varepsilon = \frac{P_0 - P_1}{P_0} = 1 - \frac{P_1}{P_0} = 1 - \frac{1}{\mu}, \quad (3)$$

где  $\mu = P_0/P_1$  - вытяжка трубной заготовки при ее холодном редуцировании в закрытом калибре по средней линии толщины стенки;  $P_0$  и  $P_1$  - средний периметр трубной заготовки до и после редуцирования соответственно.

### Алгоритм и методика расчета калибровки при валковой формовке

На основе проведенных исследований и экспериментальных данных была разработана новая методика расчета калибровки валков для формовки труб [4, 7, 9-14].

В основу расчета калибровки формирующих валков положена двухрадиусная схема формовки. Расчет калибровки производится против хода формовки по следующей схеме: калибровочная группа → сварочная группа → 2-я формовочная группа → 1-я формовочная группа и эджерная группа валков.

Предварительно все приводные и неприводные клетки (вертикальные и горизонтальные) трубоэлектросварочного агрегата условно разделим на группы по видам калибров и их функциональному назначению:

1. Первая формовочная группа валков – приводные горизонтальные формовочные клетки с открытым калибром. В данной группе выделяются валки трех типов калибров:

- а) 1 тип – двухрадиусный калибр;
- б) 2 тип – однорадиусный калибр с выпуском;
- в) 3 тип – однорадиусный калибр без выпуска.

2. Вторая формовочная группа валков – приводные горизонтальные формовочные клетки с закрытыми калибрами.

3. Сварочная группа валков – последняя формовочная клетка с закрытым овальным калибром, неприводные шовонаправляющая и сварочная клетки.

4. Калибровочная группа валков – приводные горизонтальные клетки с однорадиусными калибрами (на большинстве ТЭСА используется 4 калибровочных клетки).

5. Группа вертикальных неприводных валков – неприводные вертикальные клетки с калибрами трех типов:

- а) 1 тип- двухрадиусный калибр;
- б) 2 тип – однорадиусный овальный калибр;
- в) 3 тип – однорадиусный круглый калибр.

Расчет ширины исходной полосы будем производить с учетом заданного режима распределения деформации трубной заготовки в соответствующих группах клеток по формуле

$$B_{заг} = \pi \cdot (d_0 - S_T) \cdot k \prod_{i=1}^n \left( \frac{\varepsilon_i + 100}{100} \right), \quad (4)$$

где  $d_0$  - диаметр готовой трубы, мм;

$S_T$  - толщина стенки готовой трубы, мм;

$\varepsilon_i$  - величина деформации при редуцировании трубной заготовки в соответствующей ( $i$ -ой) группе клеток, %;

$k$  - коэффициент, учитывающий деформацию трубной заготовки в открытых калибрах, вертикальных валках и потерю металла на образование грата ( $k = 1,08$ );

$n$  - количество групп клеток, обеспечивающих редуцирование трубной заготовки ( $n = 3$  - 2-я формовочная, сварочная и калибровочная группы клеток);

$i$  - индекс соответствующей группы клеток.

Величина деформации трубной заготовки в формовочных калибрах с разрезной шайбой (вторая формовочная группа) определяется по установленной зависимости (2). Численное значение обжатия трубной заготовки по периметру в сварочной клетке принимается в соответствии с установленным ранее диапазоном значений:  $\varepsilon = 0,5 - 1,2\%$ . В калибровочных клетках трубоэлектросварочных станов величина обжатия по диаметру принимается 1,1-2,3 % [4, 14].

Расчет геометрических параметров, исходя из изложенных принципов, подробно описан в работах [2, 3], а схема алгоритма приведена на рис. 5. На основе представленной методики расчета калибровки валков была создана автоматизированная система расчета, архивирования данных и графического построения калибровок рабочих валков для формовки электросварных труб различного диаметра и толщины стенки [15].

Данная система создана на базе системы автоматизированного проектирования (САПР) AutoCAD 14 и состоит из нескольких интегрированных в единый комплекс частей. Расчетная часть программы, написанная на языке Pascal 7.0, включает в себя две основные части: расчет ширины исходной заготовки и расчет формовочных валков (их элементов). Программа позволяет задавать параметры трубоэлектросварочного стана: количество формовочных клеток с открытыми и закрытыми калибрами, катающие диаметры, передаточные отношения и размеры посадочных отверстий валков.

Расчет ширины исходной заготовки для конкретного типоразмера трубы (наружный диаметр и толщина стенки) производится на основе данных о процентном соотношении величин деформаций (вытяжек) трубной

заготовки в формовочной, сварочной и калибровочных клетях ТЭСА. Результаты расчета записываются в текстовый файл.

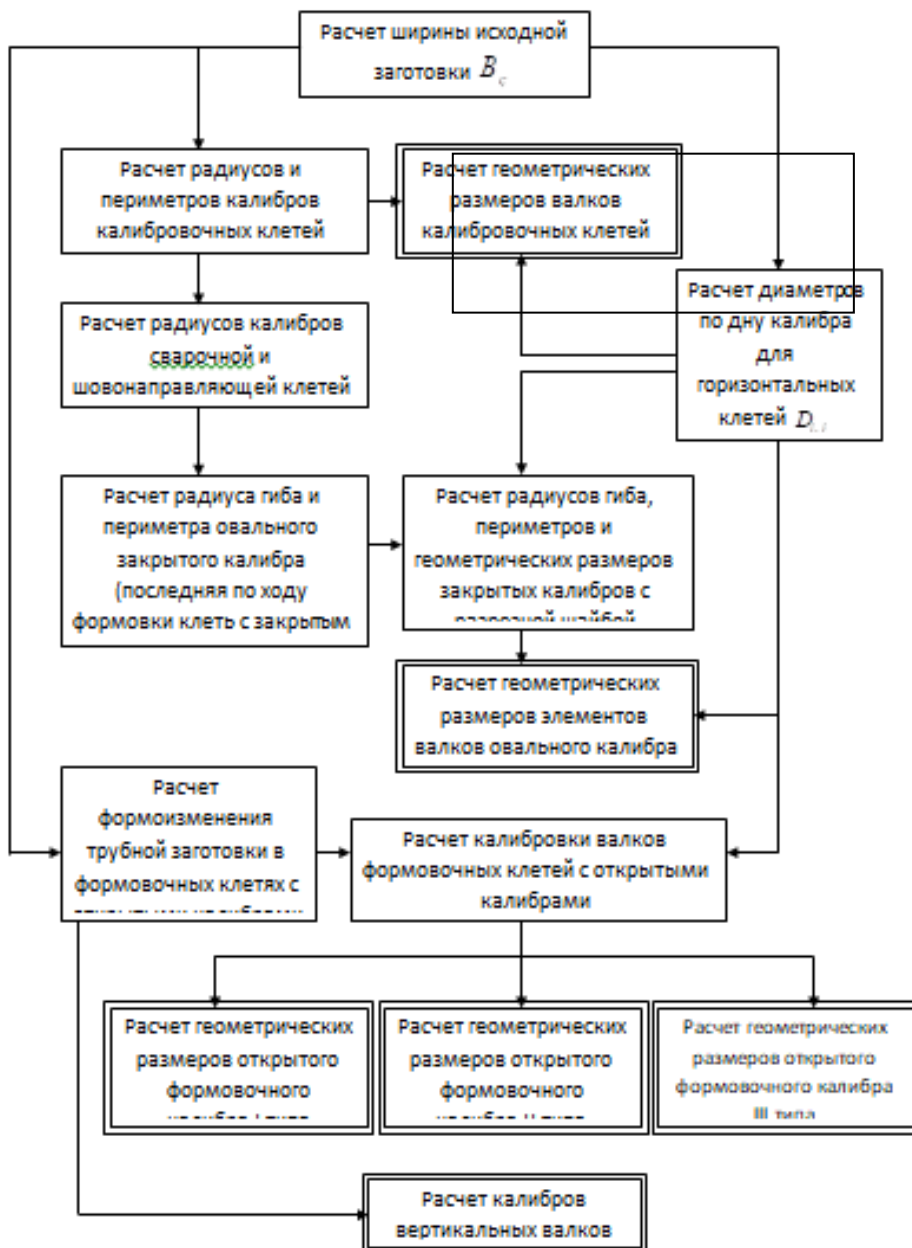


Рис.5. Алгоритм расчета калибровки валков трубо-электросварочного агрегата.

Расчет элементов валков рабочего калибра ведется в соответствии с приведенной методикой. На данном этапе на основе формоизменения полосы в калибре производится вычисление всех основных геометрических размеров элементов валков, необходимых для их последующего изготовления на станках с числовым программным управлением. По ходу расчета программа позволяет осуществлять выбор типа валка (открытый/закрытый, верхний/нижний, с выпуском калибра/без выпуска). Результаты расчета выдаются компьютером в виде таблицы, содержащей координаты узловых точек, а также радиусы и углы подгибки формируемой полосы по клетям формовочного стана.

Вторая часть автоматизированной системы включает в себя графическое представление информации в среде AutoCAD 14 и архивацию данных. Данный программный блок реализован на базе процедур адаптации AutoCAD с помощью языков программирования Autolisp и Delphi.

Для проектирования был организован интерфейс расчетной методики, который позволил в автоматическом режиме переходить от таблицы калибровок к параметрам формирующего инструмента и обеспечивать его графическое представление в виде компьютерного чертежа. Из меню выбирается нужный файл для проектирования и для него в автоматическом режиме вычерчивается эскиз благодаря реализации процесса параметризации чертежей, т.е. построения чертежа с новыми размерами на основе один раз нарисованного чертежа (модели). Далее производится масштабирование шаблонов и создается чертеж данного валка. Автоматизированная система позволяет осуществлять ведение информационной базы данных чертежей калибровок валков по станам, по клетям и типам валков.

Работоспособность калибровок валков, рассчитанных с помощью предложенной методики, подтверждена многолетним опытом эффективного производства сварных труб на ТЭСА ОАО «Северсталь».

### **Роликовая формовка**

Современное трубное производство характеризуется тенденцией к сокращению затрат на изготовление валковой оснастки и времени замены инструмента при смене сортамента, а также увеличением технологической гибкости оборудования. В условиях ЗАО «Северсталь ТПЗ-Шексна» на стане ТЭСА 127-426 применена уникальная раздельная двухбалочная система линейной роликовой формовки, в полной мере отвечающая современным тенденциям в области трубного производства [16-18].



Суть линейной роликовой формовки состоит в том, что группа клеток открытой формовки со значительными габаритными размерами валковых элементов частично заменяется на неприводные ролики маленького размера формы почти цилиндрической формы, расположенные в линейках (рис.6).

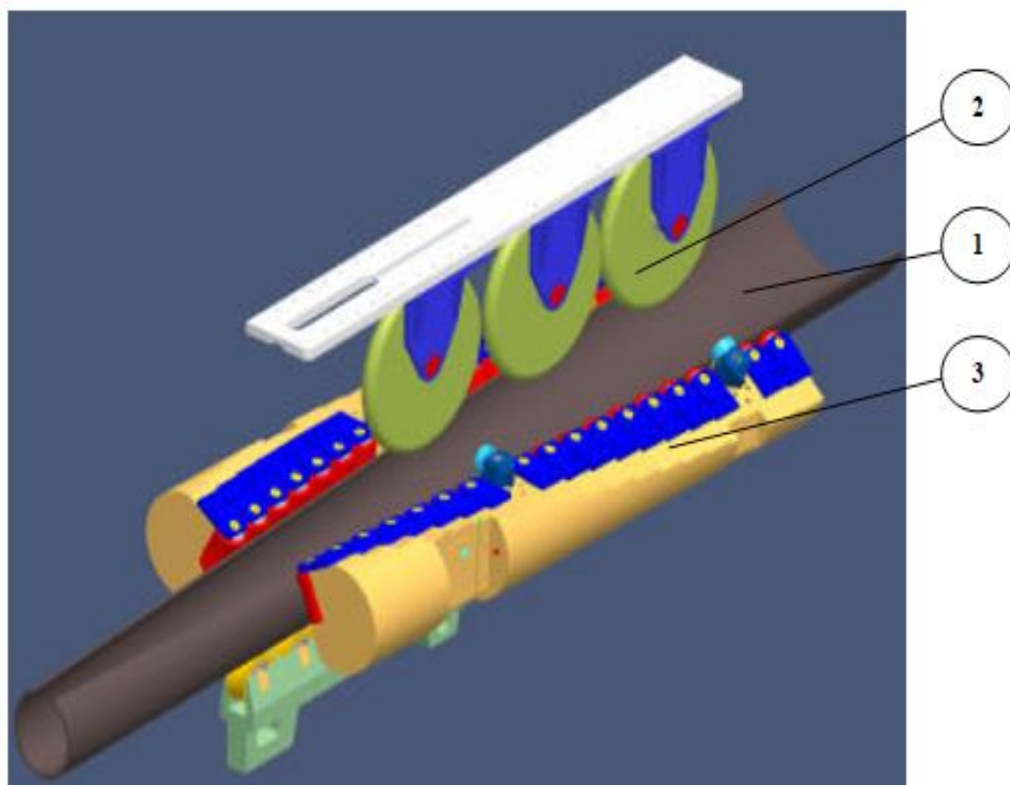


Рис.6. Способ линейной СТА-F (Central Tool Adjustment Forming) формовки [16, 19]:

Впервые данный способ с однобалочной машиной линейной формовки был реализован австрийской фирмой «Фест Альпине» [20]. Применение такой схемы формообразования трубной заготовки позволяет значительно уменьшить продольную деформацию кромок за счет отсутствия участка распружинения в межклетьевом пространстве, а также сократить количество формующих валков для всего сортамента стана и время на его перевалку.

Форма поперечного сечения заготовки на входе и выходе из линейной формовки и последовательность формовки поперечного сечения исходной плоской заготовки на всем участке линейной формовки приведена на рис.7, схема положения рабочих роликов – на рис.8.

Возникающие на участке клеток открытой формовки отдельные значительные деформационные скачки из-за распружинения при валковой формовке в линейной формовке сглаживаются с помощью большого числа неприводных валков малого диаметра (рис.9). Все валки на участке линейной формовки не приводные. Это означает, что полоса практически протягивается через участок формовки и, следовательно, скорость валков, расположенных на этом участке, всегда соответствует скорости движения полосы.

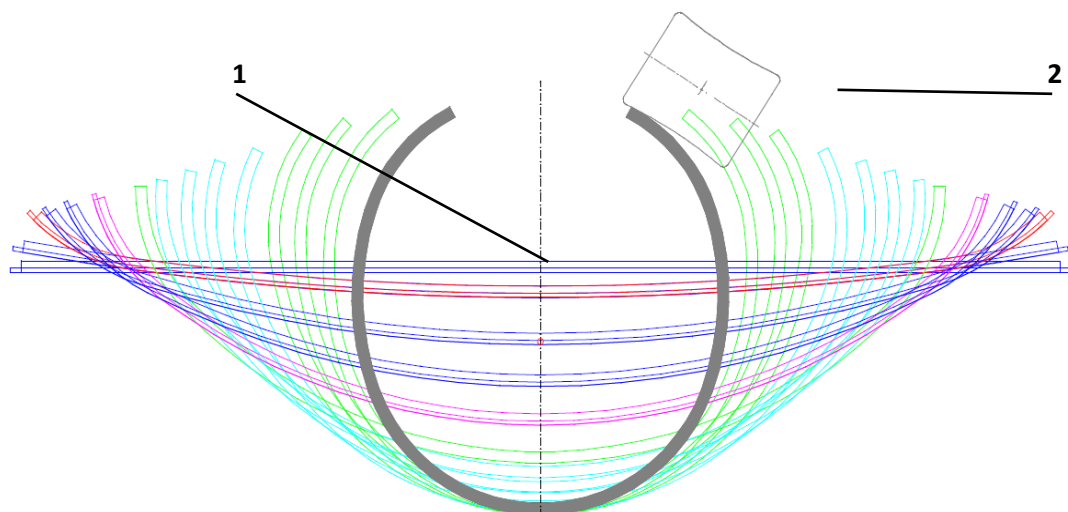


Рис.7. Поперечные сечения заготовки на участке линейной формовки: 1 – исходная плоская полоса; 2 – рабочий ролик линейной формовки.

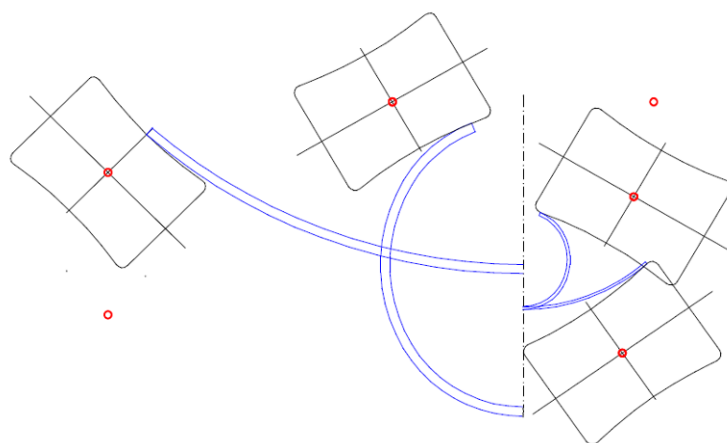


Рис.8. Схема положения боковых роликов на входе и выходе линейной формовки

Применение на стане метода раздельной двухбалочной линейной формовки трубной заготовки позволяет реализовывать процесс непрерывного формообразования полосы и достичь монотонного очага деформации на участке стана длиной 5 метров. Реализация монотонного очага деформации и сокращение всего участка открытой формовки позволяет решить характерную для станов традиционной конструкции проблему распухания и удлинения кромок заготовки, приводящую к гофрообразованию на кромках полосы, а также значительно сократить парк валкового инструмента в среднем на 30 процентов.

Участок линейной формовки разделяется на два участка. Каждый участок состоит из двух наружных боковых роликовых балок 1, по две с каждой стороны заготовки, оснащённых рядом роликов (по 10 роликов на каждой балке). Всего на участке линейной формовки применяется 40 боковых роликов. Зоны внеконтактной деформации между роликами предельно сокращены за счет применения большого количества роликов малого диаметра. Боковые роликовые балки имеют следующие степени свободы, позволяющие оптимизировать параметры очага деформации полосы в процессе формообразования:

- раздельная настройка по горизонтали стороны входа и выхода каждой роликовой балки;
- раздельная настройка по вертикали стороны входа и выхода каждой роликовой балки;
- раздельная настройка угла поворота каждой роликовой балки на поворотной опоре при помощи электродвигателя.

При этом роликовые балки со стороны привода и оператора настраиваются синхронно, что позволяет избежать асимметрии настройки участка линейной формовки и связанных с асимметрией заготовки остаточных напряжений. Подробное описание состава оборудования ТЭСА и отдельно участка линейной формовки представлено в работах [5, 16, 21].

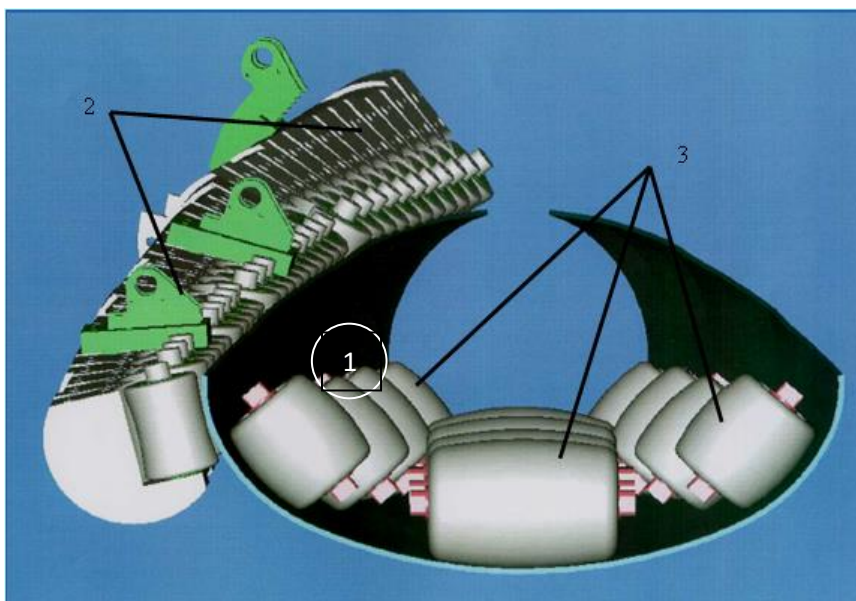


Рис.9. Схема расположение роликового инструмента на участке линейной формовки: 1 – трубная заготовка; 2 – боковые роликовые балки; 3 – верхние валковые сборки.

Участок линейной формовки ТЭСА 127-426 расположен после укороченного участка открытой формовки (2 приводные клетки с открытыми калибрами) перед группой клеток закрытой формовки (рис.10).

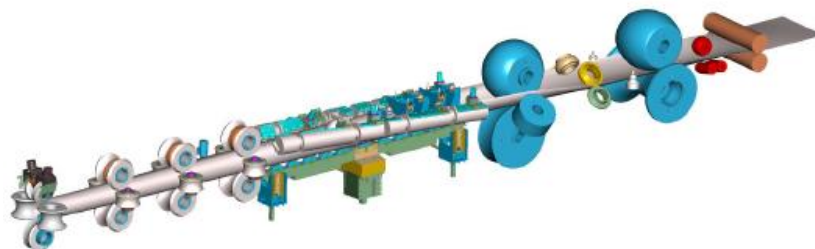


Рис.10. Схема формовки на ТЭСА 127-426.

Преимущества линейной роликовой формовки можно сформулировать следующим образом:

- значительное снижение парка валкового инструмента для всего сортамента ТЭСА за счет технологической гибкости настроек участка линейной формовки;

- сокращение времени на перевалку валков при смене профилеразмера;

- точное позиционирование валков и подстройка к траектории движения кромки полосы, обеспечивающая минимальные растягивающие напряжения на кромках формируемой заготовки и исключение гофрообразования.

Трубоэлектросварочный агрегат нового поколения ТЭСА 127-426, входящий в состав основного технологического оборудования ЗАО «Северсталь ТПЗ-Шексна», выполнен с применением отдельной (двухбалочной) линейной формовки и предназначен для производства электросварных прямошовных труб диаметром от 127 мм до 426 мм, с толщиной стенки от 3,0 до 16,0 мм и максимальной длиной труб до 16 м. В качестве исходной заготовки используется горячекатаная полоса в рулонах. При освоении сортамента продукции на основе анализа существующих методик расчета ширины заготовок для производства электросварных прямошовных труб получены уточненные значения ширины трубной заготовки для всего сортамента ТЭСА 127-426 с учетом применения роликовой формовки [17]. Производительность ТЭСА составляет с учетом сортамента около 250 тысяч тонн в год. Обеспечение объема производства и качества продукции достигается в том числе за счет внедрения автоматизированной системы управления производством ЗАО «Северсталь ТПЗ-Шексна» [18].

### **Сварка ТВЧ**

Весьма важной операцией является сварка, которая также определяется двумя важными операциями: нагревом кромок и их сближением и осадкой. При производстве стальных прямошовных труб малого и среднего диаметра сварка осуществляется в опорно-сварочном узле, включающем шовнаправляющую клетку, шовообжимную клетку и установку для нагрева кромок токами высокой частоты (ТВЧ). Привлекательность ТВЧ сварки состоит в повышенных скоростях сварки при одновременном улучшении качества сварного шва, возможность сварки самых разнообразных материалов, низкий удельный расход электроэнергии, возможность сварки нетравленных поверхностей различных металлов, в том числе углеродистых и легированных сталей. Схема высокочастотной сварки с индукционным подводом тока к кромкам трубной заготовки приведена на рис.11. Однако реализация преимуществ ТВЧ сварки требует тщательной настройки опорно-сварочного узла и постоянного контроля качества сварного соединения.

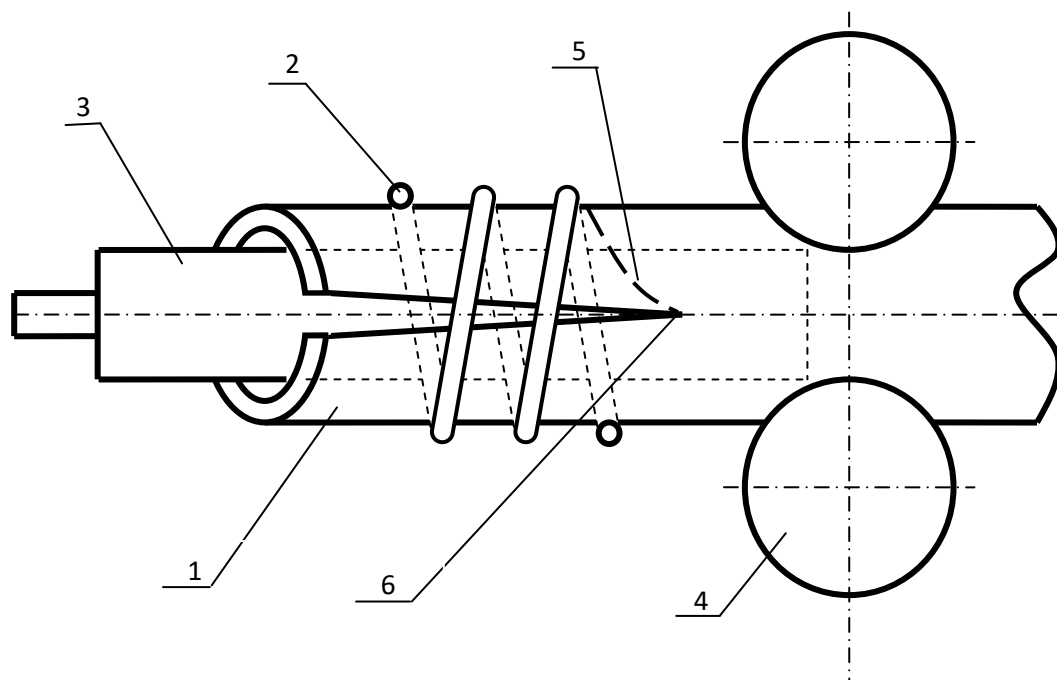


Рис.11. Схема высокочастотной сварки с индукционным подводом тока к кромкам трубной заготовки: 1 – трубная заготовка, 2 – кольцевой двухвитковый индуктор; 3 – ферритный стержень; 4 – валки сварочной клетки; 5 – путь тока; 6 – точка схождения кромок.

При нагреве кромок кольцевым индуктором в трубной заготовке индуцируется электродвижущая сила. Ток, проходя по периметру трубной заготовки и встречая на своем пути открытую щель, отклоняется к точке схождения кромок, достигая максимальной концентрации в ней. Вблизи точки схождения кромок зазор между свариваемыми кромками стремится к нулю, а электромагнитные силы к бесконечности. При этом за счет электромагнитных сил отталкивания при расплавлении металла возможен выплеск жидкого металла из зоны сжатия кромок. При выплеске части металла вверх и вниз из зоны сжатия кромок резко уменьшаются напряжения сжатия кромок из-за недостатка металла. Точка схождения кромок при этом также удаляется от индуктора. Нагрев и величина выплеска перед точкой схождения кромок уменьшаются, ширина полосы увеличивается и точка схождения кромок «возвращается» в исходное положение. Процесс периодически повторяется. Выплески приводят к ослаблению шва,

образованию пилообразного грата и периодическим непроварам. При значительных выплесках возможны свищи и другие дефекты.

На рис.12 приведены фотографии образцов труб, нагретых при стационарном положении индуктора, на которых видны выплески, образованные с наружной и внутренней стороны трубы. Образование таких выплесков полностью подтвердило правильность механизма формирования строчечного грата. Описанный процесс происходит в случае обхода сварочного тока вокруг точки схождения кромок.

При малых углах схождения кромок и значительном удалении индуктора от точки схождения кромок оплавленный металл собирается в капли. В месте капель деформация кромок в сварочной клетке больше (полоса шире). В промежутках между каплями – наоборот. Понимание механизма формирования строчечных дефектов позволило разработать методику их устранения за счет регулирования положения индуктора по отношению к точке схождения кромок [22].

Сущность нового способа настройки стана состоит в следующем. При нагреве кромок кольцевым индуктором в трубной заготовке индуцируется электродвижущая сила, под действием которой, как описано выше, образуются выплески металла в зоне сварки. Пошагово увеличивая расстояние от кольцевого индуктора до точки схождения кромок, находят такое положение кольцевого индуктора, при котором выплески гарантированно не образуются (рис.13). При этом сварной шов формируется равномерным по длине, без непроваров, строчечных дефектов и пилообразного грата, что позволяет улучшить качество шва и увеличить выход годного [22].

Оптимальное положение индуктора относительно точки схождения кромок зависит от геометрических размеров трубы, конструктивных особенностей индуктора, подводимой к индуктору электрической мощности, скорости движения трубной заготовки, угла схождения кромок, химического состава стали и других параметров, поэтому определить его заранее невозможно (рис.11). Пошаговое удаление индуктора от точки схождения до исчезновения визуально наблюдаемых выплесков металла обеспечивает точное нахождение положения индуктора на переднем конце бесконечной трубной заготовки, и все последующие сваренные трубы имеют шов высокого качества.



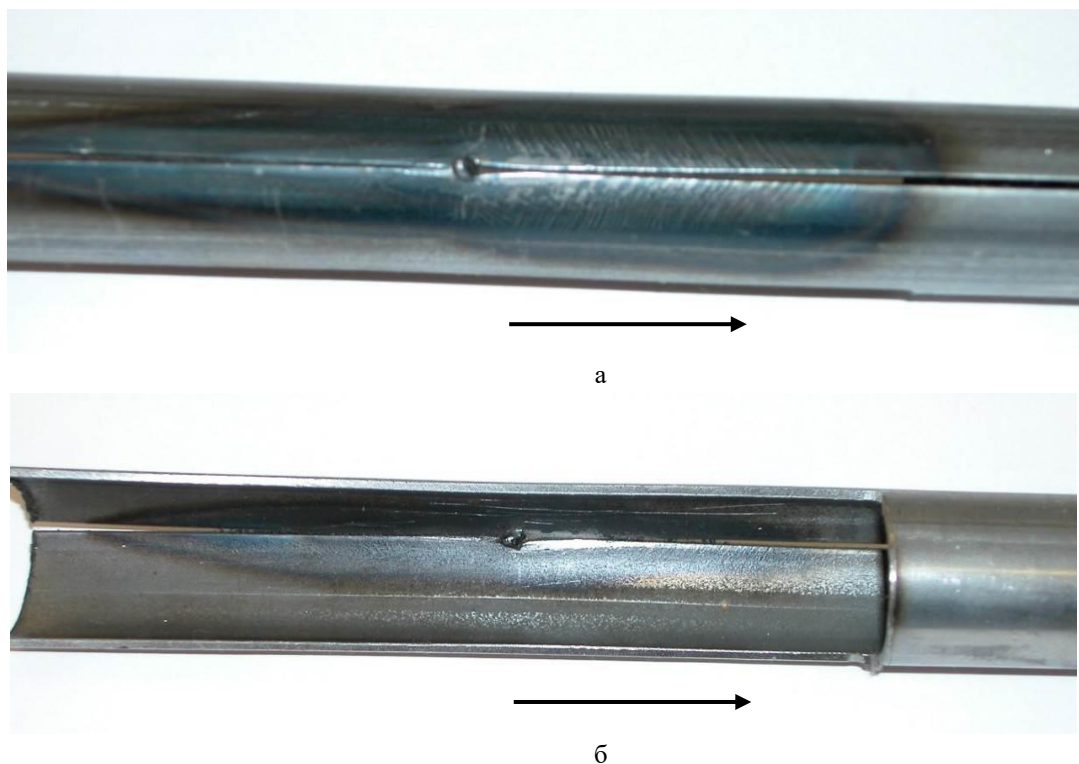


Рис.12. Выплеск в зоне сварки шва на внешней (а) и внутренней (б) стороне трубной заготовки при стационарном положении индуктора.

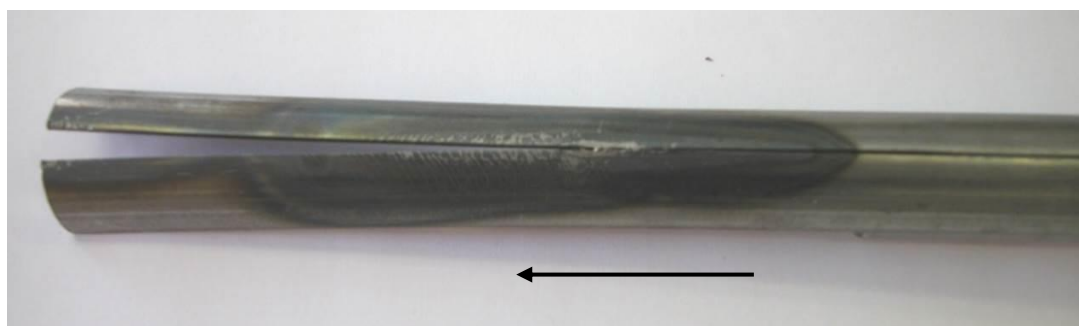


Рис.13. Нагрев и сварка трубной заготовки при оптимальном положении индуктора без образования выплеска. Диаметр трубной заготовки 25 мм.

Также регламентирована вытяжка в сварочной клети, которая необходима для того, чтобы обеспечить достаточные сжимающие напряжения в кромках при сварке трубы.

Вторым важнейшим фактором, определяющим качество и прочность шва, является усилие сжатия кромок. Совокупность температуры нагрева и



усилия сжатия кромок в целом являются фундаментальными факторами, определяющими прочность сварного соединения при сварке труб ТВЧ.

С целью увеличения прочности сварного шва путем увеличения усилия сжатия кромок предложен способ получения электросварных прямошовных труб, согласно которому заготовку формуют до получения симметричных частей с радиусами, равными радиусу сварочного калибра, центры которых находятся на большой оси овального цилиндра, а отношение большой оси к малой составляет  $B/H = 1,02-1,05$  [23].

Сущность нового способа поясняется схемой формовки на рис.14 и состоит в следующем. Чтобы исключить доформовку радиусов трубной заготовки в сварочном калибре и максимально увеличить усилие сжатия кромок при сохранении их устойчивости, трубная заготовка перед сварочной клетью формуются в виде овального цилиндра, со щелью, малая ось сечения которого равна диаметру сварочной клетки, а боковые части трубной заготовки, сопряженные между собой, сформованы радиусом, равным радиусу сварочного калибра. При этом задано соотношение большой и малой осей овальной цилиндрической заготовки, обеспечивающее устойчивость кромок в процессе сварки и правильную форму сваренной трубы.

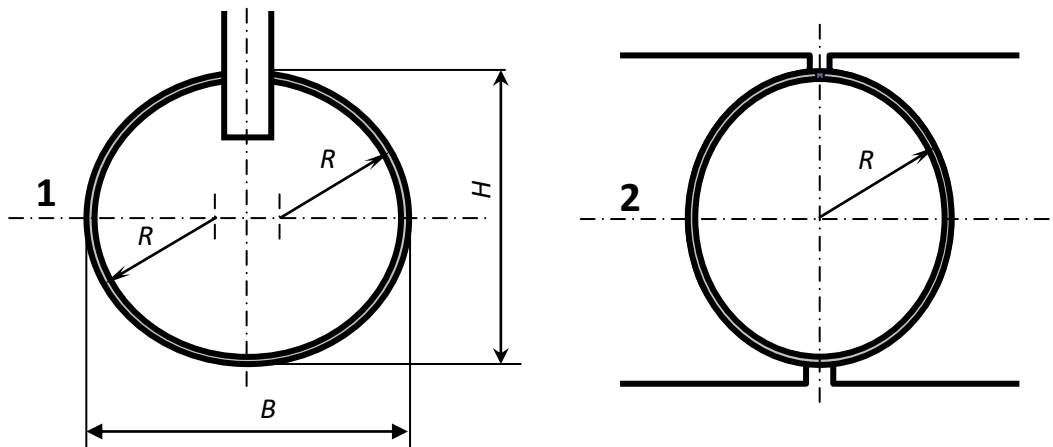


Рис.14. Схема формовки трубной заготовки в шовонаправляющей и шовообжимной клетях [23].

Точное расположение ферритовых сердечников в трубе – один из важных факторов, определяющих эффективность всего процесса высокочастотной сварки. Кроме этого необходимо правильно выбрать размер и конструкцию ферритового сердечника и обеспечить его максимальное охлаждение, так как поглощательная магнитная индукция уменьшается с

повышением температуры. Несмотря на то, что к настоящему моменту не созданы точные методы расчета электротехнических и технологических параметров настройки ферритового сердечника внутри полости не сваренной трубы, на основе богатого экспериментального опыта установлены достаточно широкие эмпирические диапазоны выбора этих параметров в зависимости от диаметра выпускаемой трубы.

На стане 2-8x100-600 ОАО «Северсталь» провели экспериментальное исследование влияния используемых режимов настройки ферритов на эффективность нагрева и скоростные режимы сварки труб с точки зрения согласованности скорости движения трубной заготовки с подводимой мощностью на всем профильном сортаменте агрегата в диапазоне диаметров труб от 89 мм до 159 мм. Помимо фиксирования настройки ферритовых сердечников снимали токовые и скоростные параметры процесса сварки. При этом измеряли положение феррита внутри не сваренной трубной заготовки (рис.15):

зазор между телом ферритового сердечника и свариваемыми кромками полосы «*b*»;

положение переднего конца феррита относительно ширины V-образного зазора между кромками не сваренного профиля трубы «*h*».

Оценку энергетической эффективности процесса сварки проводили по интегральному показателю – приведенной активной мощности [24, 25].

Результаты экспериментальных исследований позволили сформулировать конкретные технологические рекомендации по настройке ферритовых сердечников в процессе производства электросварных прямошовных труб на ПГА 2-8x100-600 ОАО «Северсталь»:

Передний конец феррита должен находиться в точке замера зазора между кромками трубной заготовки, равного толщине стенки трубы  $h_{\text{онм}} = S$ ;

Настройка ферритового сердечника по высоте в полости несваренной трубы должна осуществляться с учетом максимально допустимого зазора  $b \leq 4,1S$ , т.е. для каждой толщины установлена конкретная предельная величина зазора между кромками и телом ферритового сердечника.

Предложенная настройка ферритовых сердечников позволила существенно повысить эффективность нагрева кромок свариваемой трубы, снизить энергозатраты и повысить скорость сварки и производительность агрегата без дополнительных финансовых затрат [25, 26].

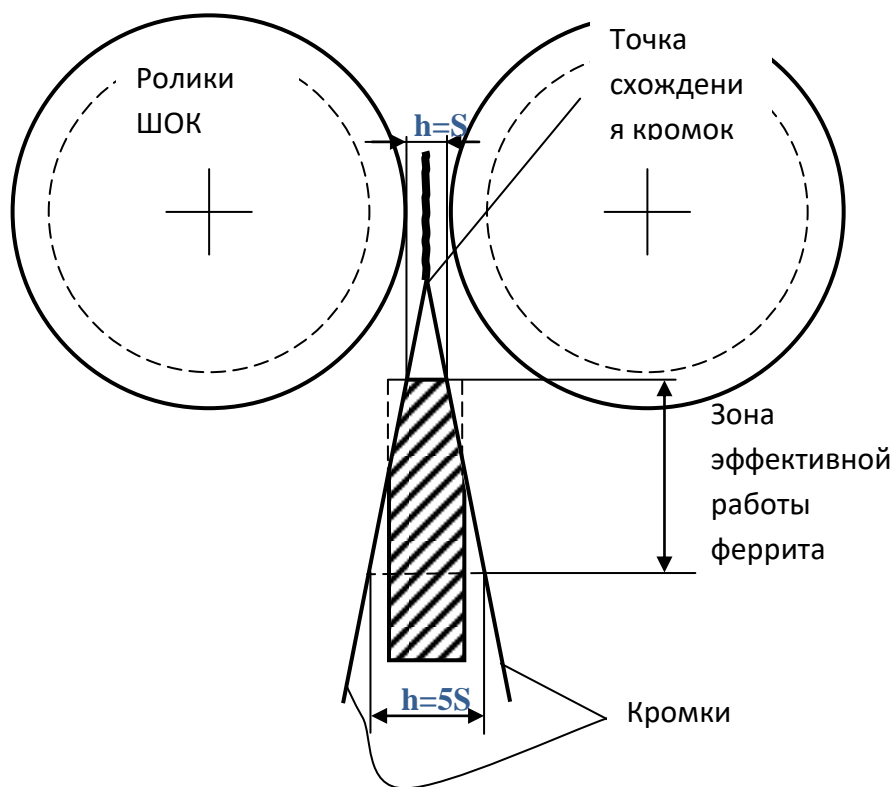


Рис.15. Схема положения ферритового сердечника относительно точки схождения кромок свариваемой трубы.

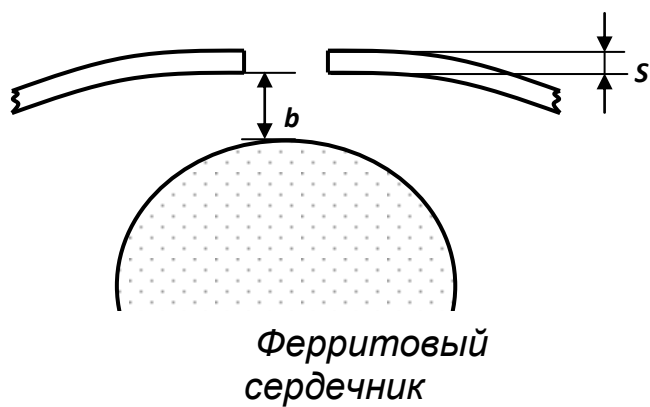


Рис.16. Схема положения ферритового сердечника внутри полости свариваемой трубы.

### Профилирование труб квадратного сечения

После сварки труба поступает на калибровочный стан, как правило, состоящий из нескольких клеток с приводными валками. При производстве прямоугольных труб профилирование осуществляется в четырехвалковых калибрах с неприводными валками, установленными за калибратором или в самом калибровочном стане, оснащем специальной профилирующей калибровкой.

На ТЭСА ЦГП ОАО «Северсталь» профилирование осуществляется в неприводных турголовках, расположенных после калибратора. На ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна» на ТЭСА 127-426 профилирование осуществляется в калибраторе [29]. Экспериментальные исследования процесса профилирования проводили на ТЭСА 19-60, 21-89, 127-426, а также на ПГА 2-8x100-600 [14, 27, 28].

Процесс профилирования круглой трубы в квадратную на ТЭСА 127-426 сводится к следующему. Сформованная и сваренная труба круглого сечения проходит через четыре калибровочные клетки, состоящие из четырех валков - двух вертикальных неприводных и двух горизонтальных приводных (рис.17). Причем горизонтальные приводные валки по диаметру превосходят вертикальные, что обеспечивает гарантированный захват трубы во всем диапазоне сортамента. Ширина всех четырех валков одного калибра одинаковая.

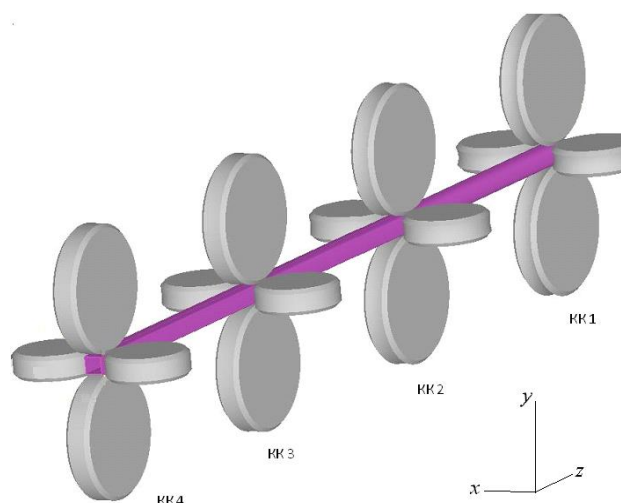


Рис.17. Схема профилирования круглой трубы в квадратную в четырехвалковых клетях за четыре прохода в калибровочном стане ТЭСА 127-426

На рис. 17 показано, как труба круглого сечения задается в первую калибровочную клеть. В четырех последовательно расположенных клетях исходная круглая труба постепенно осаживается в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и ее сечение принимает форму квадрата. Формы калибров в поперечном сечении показаны на рис. 18. В качестве материалов были использованы сталь марки 20 и сталь марки 09Г2С.

Определяющими технологическими параметрами профилирования являются диаметр трубной заготовки  $D_{\text{исх. заг.}}$ , толщина ее стенки  $S$ , марка стали, форма калибра и распределение обжатий по проходам.

Поскольку экспериментальное исследование профилирования ограничено невозможностью оперативно изменять размеры валков и калибров, образованных ими, то применяли математическое моделирование течения металла при профилировании [27, 30].

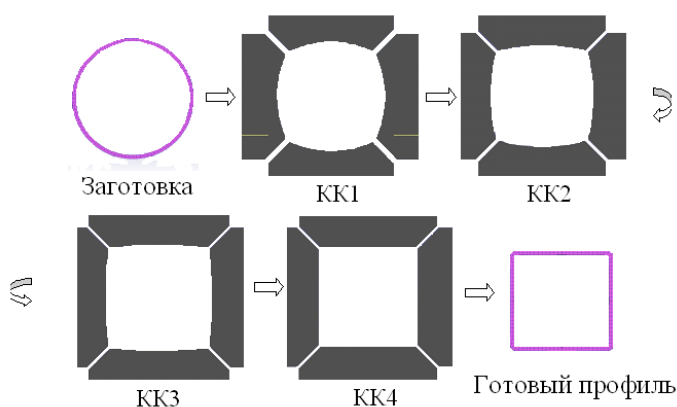


Рис.18. Схема профилирования трубы квадратного сечения в калибровочных клетях

#### 4.1. Расчет диаметра заготовки

На основе разработанной математической модели упруго-пластического течения металла исследовано изменение геометрии круглой трубы в результате профилирования и выявлена зависимость геометрических параметров конечного профиля, таких, как сторона  $A$ , наружный радиус закругления  $r_n$  и толщина стенки  $S$ , от диаметра исходной трубной заготовки  $D_{\text{исх. заг.}}$ . Полученные зависимости проверены экспериментально и на их основе разработана методика расчета диаметра исходной заготовки [31, 44, 45].

Формула для расчета диаметра исходной заготовки имеет вид:

$$D_{исх.заг.} = (1 - k_n)S + k_n(1,274A - 0,548r_H), \tag{5}$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{ll} k_n = 1,031 & \text{при } r_H = 2S \\ k_n = 1,035 & \text{при } r_H = 2.5S \\ k_n = 1,026 & \text{при } r_H = 3S \end{array} \right.$$

Коэффициент  $k_n$  установлен для требований стандартов по величине наружного радиуса закругления профиля в зависимости от толщины стенки трубы. Результаты расчета диаметра исходной заготовки по формуле (5) обеспечивают получение профильных квадратных труб с заданной геометрией профиля по высоте, ширине и радиусу закругления во всем диапазоне сортамента ТЭСА 127-426.

### Методика расчета калибровки

По результатам расчетных и экспериментальных данных разработана методика расчета калибровки для получения профильных труб квадратного сечения с регулируемым радиусом закругления [32, 33, 46, 48]. Учитывая уже имеющиеся клетки калибровочного стана ТЭСА 127-426, расчеты велись для четырех проходов, хотя количество клеток не влияет на методику расчета калибровки. Она может быть применена как для одного, так и для двух, трех и более проходов.

На рис.19 представлена схема поперечного сечения калибра вместе с трубой в калибровочных клетях № 1-3 (КК1-КК3).

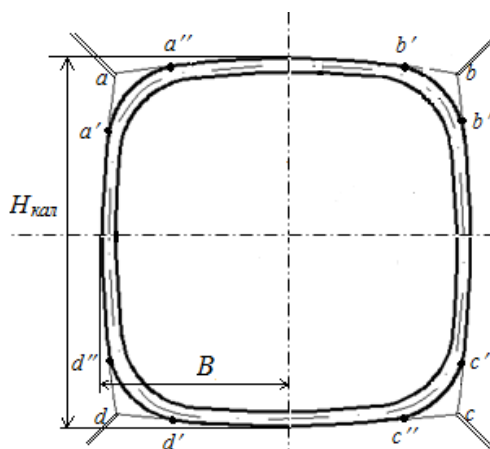


Рис.19. Схема поперечного сечения заготовки в калибрах КК1-КК3:  $H_{кал}$  - высота калибра;  $B$  - положение вала относительно оси прокатки

В соответствии с рис. 19 принимаем следующие обозначения:  $L_1$  - длина участка загиба трубы в процессе профилирования, обозначенного дугами  $a'a''$ ,  $b'b''$ ,  $c'c''$ ,  $d'd''$ ;  $L_2$  - длина участка разгиба трубы при профилировании, обозначенного дугами  $a''b'$ ,  $b''c'$ ,  $c''d'$ ,  $d''a'$ ;  $r_H$  - наружный радиус закругления углов профиля, равный радиусу дуг  $a'a''$ ,  $b'b''$ ,  $c'c''$ ,  $d'd''$ ;  $R_{пр}$  - радиус проточки валков, образующих калибр, равный радиусу дуг  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$ ,  $da$ ;  $H_1$  - хорда дуг  $a'a''$ ,  $b'b''$ ,  $c'c''$ ,  $d'd''$ ;  $H_2$  - хорда дуг  $a''b'$ ,  $b''c'$ ,  $c''d'$ ,  $d''a'$ ;  $H_3$  - высота дуг  $a''b'$ ,  $b''c'$ ,  $c''d'$ ,  $d''a'$ .

Методика расчета калибровки для профилирования в четырехвалковых калибрах, основана на следующих допущениях:

- периметр заготовки по средней линии сечения не изменяется в процессе профилирования;

- длина участков разгиба и загиба во время профилирования не меняется (рис.19).

- валки последней клетки КК4 должны быть плоскими. Калибры клеток КК1-КК3 образованы однорадиусными дугами, с радиусом проточки  $R_{пр}$  (рис. 19).

Зависимость  $\bar{H}_{кали}$  - высоты  $i$ -ого калибра (расстояния по дну калибра) по средней линии от радиуса проточки валка имеет следующий вид:

$$\bar{H}_{кали} = H_2 + 2 \frac{H_1}{\sqrt{2}} + 2H_3 = 2R_{пр} \times \sin \frac{L_2}{2R_{пр}} + \frac{2}{\sqrt{2}} \times \frac{2L_1}{\frac{\pi}{2} - \frac{L_2}{R_{пр}}} \times \sin \left[ \frac{\left( \frac{\pi}{2} - \frac{L_2}{R_{пр}} \right)}{2} \right] +$$

$$+ 2R_{пр} \left( 1 - \cos \frac{L_2}{R_{пр}} \right)$$

(6)

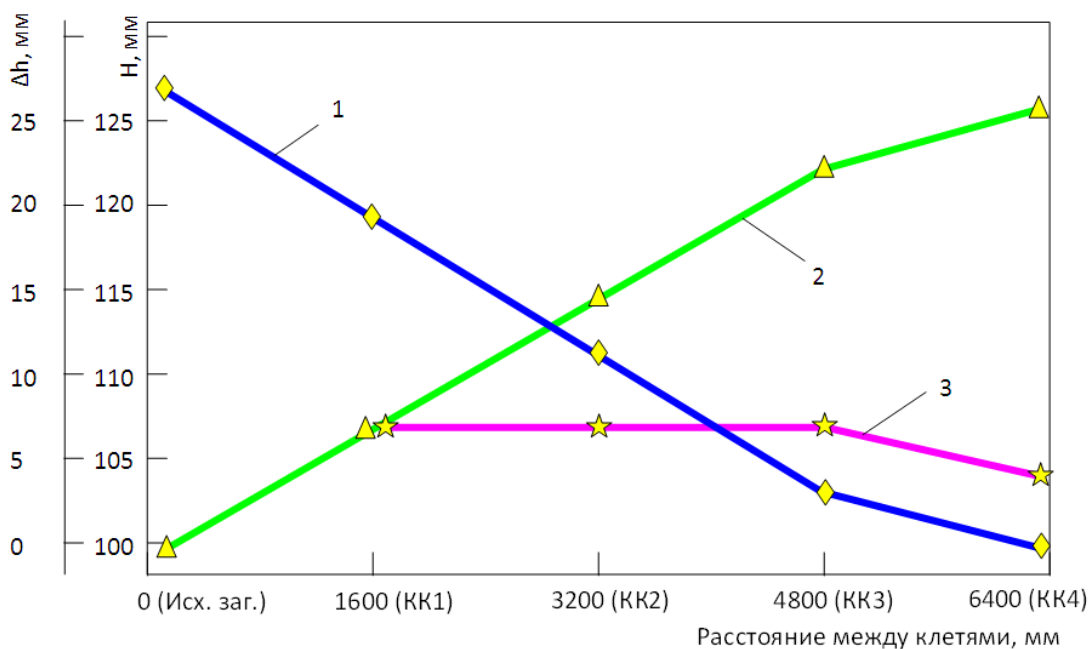


Рис.20. Рекомендованный режим обжатий при профилировании квадратной трубы 100x100x4 мм из заготовки  $\varnothing 127$  мм из стали Ст3: 1 – изменение высоты (и ширины) заготовки; 2 – суммарное абсолютное обжатие,  $\Delta h_{\Sigma}$ ; 3 – абсолютное обжатие за проход,  $\Delta h_i$ .

Отсюда можно определить  $R_{пр}$  по заданной  $\bar{H}_{кали}$ . Если выбран режим обжатий, то по формуле (6) можно найти все размеры калибров. Для ТЭСА 127-426 был принят следующий режим абсолютных обжатий: равные абсолютные обжатия в первых трех клетях калибровочного стана и уменьшенное обжатие в последней калибровочной клетке, равное половине обжатия в предыдущих клетях.

Выбранный режим обжатий по клетям обеспечивает точность геометрических размеров и снижение возможности прогиба стенок при отсутствии аномальных напряжений и деформаций в наиболее нагруженных областях профиля (углах профиля) по клетям стана [30]. Режим обжатий представлен на рис. 20.

Методика расчета диаметра исходной трубной заготовки и методика расчета калибровки внедрены в производство.

## 5. Редуцирование

Операция редуцирования позволяет существенно расширить сортамент сварных труб из полосы фиксированной ширины без переналадки линии формовки и опорно-сварочного узла. Были выполнены работы [39-41,



47] по моделированию геометрических и силовых условий редуцирования применительно к редуцированию сварных труб из стали 10 на 15-ти клетевом непрерывном стане ОАО «Московский трубный завод ФИЛИТ» с диаметра 83 мм до 76 мм, получены регрессионные уравнения кривой течения, учитывающие наклеп материала трубной заготовки в каждом проходе и влияние упрочнения на энергосиловые параметры редуцирования.

Качество труб определяется точностью и стабильностью настройки и функционирования технологического процесса на протяжении производства заданной партии продукции и от партии к партии. Было выполнено исследование точности и стабильности технологического процесса производства электросварных труб в условиях ОАО «Московский трубный завод ФИЛИТ». Анализ точности технологических процессов заключался в определении поля рассеяния показателя качества и сопоставлении его с полем допуска по величине и взаимному расположению. Анализ стабильности технологических процессов заключался в определении статистических характеристик показателя качества и оценке их изменения во времени [42, 43]. Показано, что использованные в работе статистические методы предоставляют возможность оперативного управления технологическим процессом путем ввода корректирующих воздействий, что обеспечивает получение продукции заданного качества. Указанный подход может быть эффективно реализован при анализе условий производства длинномерной металлургической продукции.

### **Сопутствующие технические решения**

В процессе освоения технологии производства труб были разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности производства и снижение издержек.

Для уменьшения износа валков на основе проведенных исследований была предложена конструкция валков профилегибочных и трубных станов и способ их эксплуатации, учитывающие реальный износ валков по клетям [34]. Показано, что такой подход выравнивает износ валков по клетям и снижает издержки в рамках комплектов валков для каждого профилеразмера. Предложена конструкция валков первых открытых калибров, позволяющая использовать эти калибры для нескольких профилеразмеров без перевалки [35]. Предложена конструкция первого открытого калибра, обеспечивающего повышение устойчивости полосы от бокового смещения при формовке [36]. Проведено исследование и предложено несколько технических решений по изготовлению элементов валков трубных станов из новой марки стали,

представляющей собой модификацию стали X12VM. В том числе разработан способ водовоздушного упрочнения элементов валков из этой стали [6, 35]. Предложена и реализована конструкция линии сортировки и пакетирования сварных труб [37]. Оптимизированы режимы продольной резки рулонной стали для улучшения качества трубной заготовки [38]. Подано около 50 рационализаторских предложений по совершенствованию технологии, оборудования и его настройки при производстве сварных труб.

## **Выводы**

На основе проведенных исследований валковой формовки в производственных условиях на широком спектре ТЭСА показано существенное влияние продольных деформаций на качество сварных труб. Установлены особенности распределения продольной деформации в открытых клетях, при редуцировании в закрытых клетях, опорно-сварочном узле и при калибровке труб. Разработана методика расчета калибров для формовки сварных труб на ТЭСА с учетом управления продольными деформациями. На ее основе создана автоматизированная система расчета, архивирования данных и графического построения калибровок рабочих валков, которая внедрена в цехе гнутых профилей ОАО «Северсталь» и успешно применяется при разработке калибровок валков для производства электросварных прямошовных труб среднего и малого диаметров.

Для производства труб среднего диаметра на ЗАО «Северсталь-ТПЗ Шексна» впервые выбран агрегат с использованием линейной роликовой формовки. Рассмотрены некоторые принципы и особенности роликовой формовки на примере ТЭСА 127-426. Показаны преимущества роликовой формовки, состоящие в уменьшении времени настройки, снижении расходов на валки и улучшении условий формовки, делающие этот способ перспективным. Произведен расчет ширины исходной заготовки для всего сортамента с учетом применения нового способа роликовой формовки.

Рассмотрены особенности сварки ТВЧ при производстве стальных сварных труб. Разработан способ настройки опорно-сварочного узла за счет регулирования положения индуктора, позволяющий избежать выплески металла при сварке и получить шов без непроваров, строчечности и других дефектов. Предложены формы калибров шовонаправляющей и шовообжимной клетей для увеличения прочности шва за счет регулирования величины осадки кромок при сварке. Проведенные исследования эффективности нагрева ТВЧ позволили сформулировать конкретные технологические рекомендации по настройке положения ферритовых

сердечников в процессе производства электросварных прямошовных труб и снизить расход энергии на нагрев при сварке.

Изучены напряженное состояние в очаге деформации и процесс пластического течения металла при профилировании стальной трубы квадратного сечения из трубы круглого сечения в четырехвалковых клетях. Исследовано изменение геометрии круглой трубы по проходам в результате профилирования и выявлена зависимость геометрических параметров конечного профиля, таких, как полка, наружный радиус закругления, толщина и прогиб стенки, от диаметра исходной трубной заготовки. Разработана методика расчета диаметра исходной заготовки, которая опирается на зависимости изменения наружного периметра поперечного сечения трубы в процессе профилирования (при разных толщинах стенки заготовки) и обеспечивает выбор заданного радиуса закругления углов конечного профиля. Разработана методика расчета калибровки для калибровочного стана, основанная на экспериментальных данных при профилировании и подтвержденная результатами моделирования. Методика позволяет рассчитать геометрические размеры калибров по заданному режиму обжатий в калибровочном стане. Разработанные методики внедрены в производство на ТЭСА 127-426.

### **Благодарность**

Авторы выражают благодарность своим соавторам по приведенному ниже библиографическому списку, коллегам, принявшим участие в экспериментальных исследованиях и создании технологической документации описанной работы, а также Управлению качества ОАО «Северсталь» и руководству ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна», обеспечившим постановку задач и внедрение результатов исследований.

### **Литература**

1. Ефименко С.П., Юсупов В.С. Некоторые проблемы прогнозирования развития металлургической технологии // Сталь. - №10. - 1995. - С.69-73.
2. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Григорьев М.И., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Расчет калибровки валков стана 2-8x100-600 для формовки труб. Сообщение 1 // Производство проката. - 2001. - № 6. - С.24-33.
3. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Григорьев М.И., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Расчет калибровки валков стана 2-8x100-600 для формовки труб. Сообщение 2 // Производство проката. - 2001. - № 8. - С.23-27.
4. Васенин А., Немтинов А., Тюляпин А., Колобов А., Юсупов В. Исследование и совершенствование технологии производства электросварных прямошовных труб // Машины, технологии, материалы. - 2007. - № 2-3. - С.155-157.

5. Шестаков В.В., Колобов А.В., Селезнев М.С., Трусов В.С., Юсупов В.С. Новый трубоэлектросварочный агрегат 127-426 ЗАО «Северсталь - ТПЗ Шексна» // Сборник трудов Второй международной научно-технической конференции «Павловские чтения» (Москва, 26-27.10.2010) Москва: ИМЕТ РАН. – 2010. - С. 328-342.
6. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Валок трубоформовочного стана // Патент РФ № 2228813. Бюл. – 2004. - № 14. – 5 с.
7. Колобов А.В., Тюляпин А.Н., Барабанцев М.Г., Гарбер Э.А., Трайно А.И., Юсупов В.С. Методика расчета формовки электросварных прямошовных труб // Труды пятого конгресса прокатчиков, Череповец, 21-24 октября 2003 г., Москва, 2004, С. 342-345.
8. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Виноградов А.И., Юсупов В.С., Кузнецов В.В. Способ изготовления прямошовных сварных труб // Патент РФ № 2304477. Бюл. - № 23. – 2007. – 5 с.
9. Барабанцев М.Г., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Методика расчета калибровки валков для формовки электросварных прямошовных труб // Производство проката. – 2005. - № 8. - С.26-29.
10. Колобов А.В., Тюляпин А.Н., Барабанцев М.Г., Гарбер Э.А., Трайно А.И., Юсупов В.С. Методика расчета формовки электросварных труб // Черная металлургия: Бюллетень АО Черметинформация. – 2004. - № 5. - С.30-33.
11. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В. Совершенствование технологии производства электросварных прямошовных труб // Производство проката, 2005 г., № 12. - С.21-23.
12. Барабанцев М.Г., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Расчет ширины исходной заготовки для производства электросварных прямошовных труб // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. – 2005. - вып. 7. - С. 49-52.
13. Барабанцев Г.Е., Немтинов А.А., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Способ производства сварных прямошовных труб // Патент РФ № 2296023. Бюл. - № 9. - 4 с.
14. Васенин А.Г., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Технологические особенности производства электросварных труб круглого и профильного сортамента в условиях ЦПП ОАО «Северсталь» // Труды VII Конгресса прокатчиков (Москва, 15-18 октября 2007). – Москва. - 2007. - том 1. - С. 263-267.
15. Колобов А.В., Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Манышев П.В. Разработка системы автоматизированного проектирования инструмента формовочных трубных станов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Теория и технология процессов пластической деформации – 2004», посвященной 85-летию научной школы МИСиС по обработке металлов давлением (Москва, 26-27.10.2004). – М.: МИСиС. – 2004. - С.119-120.
16. Шестаков В. В., Колобов А.В., Селезнев М.С., Жуков А.И., Юсупов В.С. Новая технология производства сварных профильных труб // Сталь. – 2010. - № 3. - С.75-78.
17. Колобов А.В., Селезнев М. С., Федотов Е.С., Трусов В.С., Юсупов В.С. Расчет ширины заготовки для производства сварных прямошовных труб // Сталь. – 2011. - № 8 - С.42-45.
18. Шестаков В.В., Колобов А.В., Родичев Д.А., Смирнов И.В., Юсупов В.С., Хамицкий В.А. Автоматизированная система управления производством ЗАО «Северсталь ТПЗ-Шексна» // Сталь. – 2011. - № 6. - С.77-81.

19. <http://www.datam.de> -официальный сайт компании data M Software + Engineering.
20. <http://www.industry.siemens.com> - официальный сайт компании Siemens VAI.
21. Шестаков В.В., Колобов А.В., Селезнев М.С., Федотов Е.С., Юсупов В.С. Применение системы линейной формовки на ТЭСА 127-426 ЗАО «Северсталь - ТПЗ Шексна» // Сб. тр. II-й Международной научно-технической конф. «Павловские чтения» (Москва, 26-27.10.2010) Москва: ИМЕТ РАН. – 2010. - С. 322-327.
22. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Дозорцев Ю.К., Колобов А.В., Трайно А.И., Юсупов В.С. Способ изготовления электросварных прямошовных труб // Патент РФ № 2240882. Бюл. - № 33. – 4 с.
23. Ламухин, А.М. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Дозорцев Ю.К., Трайно А.И., Юсупов В.С., Кузнецов В.В., Черноусов В.Л. Способ изготовления электросварных прямошовных труб // Патент РФ № 2232655. Бюл. - № 19. – 5 с.
24. Барабанцев М.Г., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Совершенствование характеристик нагрева трубной заготовки токами высокой частоты // Труды VI Конгресса прокатчиков (Липецк, 18-21 октября 2005). - Москва. – 2005. - С.450-458
25. Васенин А.Г., Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Юсупов В.С. Совершенствование систем подвода токов высокой частоты при производстве прямошовных электросварных труб малого диаметра // Производство проката. - 2007. - № 3. - С.21-24.
26. Varabantsev G., Tyulyapin A., Kolobov A., Yusupov V., Varabantsev M., Traino A. Examination and further improving of the manufacture of longitudinal electric-welded pipes, // Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals. – 2005. - Vol. 15. - No. 2-3. - P. 518-520.
27. Акопян К.Э., Юсупов В.С., Колобов А.В., Васенин А.Г., Тюляпин А.Н. Математическое моделирование процесса профилирования труб в неприводных валках // Машины, технологии, материалы. - 2007. - № 2. - С.119-120.
28. Акопян К.Э., Колобов А.В., Юсупов В.С. Разработка технологии получения профильных труб в неприводных валках // Сборник трудов Второй международной научно-технической конференции «Павловские чтения» (Москва, 26-27.10.2010) Москва: ИМЕТ РАН. – 2010. - С. 267-270.
29. Ламухин А.М., Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Черноусов В.Л., Колобов А.В., Рябинкова В.К., Кузнецов В.В., Юсупов В.С., Трайно А.И. Способ производства прямоугольных прямошовных сварных труб // Патент РФ № 2208491. Бюл. - № 20. – 4 с.
30. Акопян К.Э., Колобов А.В., Селезнев М.С., Трусов В.С., Федотов Е.С., Юсупов В.С., Родичев Д.А. Математическое моделирование профилирования круглой сварной стальной трубы в квадратный профиль в четырехвалковых калибрах // Металлы. - 2012. - № 3. - С. 25-30.
31. Акопян К.Э., Колобов А.В., Родичев Д.А., Селезнев М.С., Трусов В.С., Юсупов В.С. Методика расчета диаметра исходной трубной заготовки при производстве труб квадратного сечения // Сталь. - 2012. - № 6. - С. 39-43.
32. Акопян К.Э., Колобов А.В., Родичев Д.А., Селезнев М.С., Трусов В.С., Федотов Е.С., Юсупов В.С. Расчет калибров четырехвалковых клетей для профилирования круглой сварной стальной трубы // Производство проката. - 2012. - № 7. - С. 30-33.
33. Акопян К.Э., Колобов А.В., Селезнев М.С., Трусов В.С., Юсупов В.С. Расчет калибров четырехвалковых клетей для профилирования круглой сварной стальной

- трубы // Сб. мат. IV Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 25-28.10.2011). М: ИМЕТ РАН. – 2011. - С.234-235.
34. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Григорьев М.И., Трайно А.И., Юсупов В.С. Способ эксплуатации валков // Патент РФ № 2196015. Бюл. – 2003. - № 1 (II ч). – 4 с.
  35. Барабанцев Г.Е., Тюляпин А.Н., Колобов А.В., Кузнецов В.В., Черноусов В.Л., Трайно А.И., Юсупов В.С. Способ изготовления вала профилирующего агрегата // Патент РФ № 2203333. Бюл. - № 12 (II ч). – 6 с.
  36. Васенин А.Г., Колобов А.В., Тюляпин А.Н., Немтинов А.А., Трайно А.И., Юсупов В.С. Способ производства круглых прямошовных труб // Патент РФ № 2350421. Бюл. - № 9. – 8 с.
  37. Ламухин А.М., Барабанцев Г.Е., Корнев А.А., Зауграев В.А., Трайно А.И., Юсупов В.С., Черноусов В.Л. Линия сортировки и пакетирования труб // Патент РФ № 2225764. – Бюл. - № 8. – 4 с.
  38. Федотов Е.С., Колобов А.В., Виноградов А.И., Радюк А.Г., Лисуец Н.Л. Разработка обобщенной модели процесса продольной резки рулонной стали//Вестник Череповецкого государственного университета. - 2011. - № 4 (33). - Т.1. - С.21-25.
  39. Пименов А.Ф., Трайно А.И., Шелест А.Е. и др. Обработка давлением металлических материалов // М.: Наука. - 1990. - 239 с.
  40. Шелест А.Е., Бобылев Ю.Н., Кричевский Е.М., Пименов А.Ф. Моделирование геометрических условий редуцирования труб в калибрах // Металлы. – 1993. - № 2. - С. 91-95.
  41. Шелест А.Е., Бобылев Ю.Н., Ефименко С.П., Кричевский Е.М., Бушневская С.В. Моделирование силовых условий непрерывного холодного редуцирования труб в калибрах // Металлы. – 1993. - № 5. - С. 107-112.
  42. Шелест А.Е., Бобылев Ю.Н., Кричевский Е.М., Ефименко С.П. Оценка прочности холоднодеформированных электросварных профильных труб // Металлы. – 1997. - № 2. – С.60-64.
  43. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Поклонов Г.Г., Дозорцев Ю.К. Оценка статистическими методами точности и стабильности технологического процесса производства электросварных прямошовных труб // Металлы. -2004. - № 6. - С. 65-72.
  44. Акопян К.Э., Юсупов В.С., Колобов А.В., Селезнёв М.С., Федотов Е.С., Шелест А.Е. Разработка методик расчета диаметра исходной заготовки и калибровки валков для профилирования стальной трубы в квадрат // Труды IX Конгресса прокатчиков. Том I. Череповец, 16-18 апреля 2013 г. - С.221-225.
  45. Акопян К.Э., Юсупов В.С., Шелест А.Е. Технология профилирования стальной трубы в квадрат Сборник материалов V международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 26-29 ноября 2013 г., Москва, ИМЕТ РАН. – 2013. - С.225-226.
  46. Акопян К.Э., Бурханов Г.С., Колобов А.В., Юсупов В.С., Шелест А.Е. Технология профилирования сварной трубы квадратного сечения. Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч.2. Москва, НИТУ МИСиС, 14-16 апреля 2014 г. // М.: ООО «Белый Ветер». - 2014. – С. 124-130.

47. Шелест А.Е., Акопян К.Э., Юсупов В.С., Перкас М.М. Моделирование процесса непрерывного холодного безоправочного редуцирования электросварных труб в калибрах // Производство проката. – 2014. - № 9. - С. 21-27.
48. Юсупов, В. С. К. Э. Акопян, М. С. Селезнев, М. А. Соминин, А. В. Колобов, А. Е. Шелест Процесс формовки полосы в трубную заготовку // Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Международной научно-технической конференции (Череповец, ЧГУ, 7-9 октября 2015 г.) – 2015. - С.153-156.