

На правах рукописи

Акопян Карен Эдуардович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБ
КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ**

**Специальность 05.16.05
«Обработка металлов давлением»**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, **Юсупов Владимир Сабитович**

Официальные оппоненты:

Самусев Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, НИТУ «МИСиС», профессор

Поклонов Геннадий Гаврилович, кандидат технических наук, ОАО «Московский трубный завод «Филит», технический директор

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»

Защита состоится 14 ноября 2012 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук.

Автореферат разослан « » _____ 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Шелест А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Объемы производства и потребления профильных труб квадратного и прямоугольного сечения постоянно растут, расширяется их сортамент. За 2011 год только в России было произведено около 1,4 миллиона тонн профильных труб. Однако, несмотря на это, публикаций по технологии и исследованию не достаточно, опыт производства профильных квадратных труб не обобщен, нет научно обоснованных методик расчета технологического инструмента. Это усугубляется тем, что, с одной стороны, в производстве используется несколько способов формовки и профилирования труб прямоугольного сечения, отличающихся характером течения металла, поэтому методики расчета инструмента для этих способов также отличаются. С другой стороны, масштабный фактор (размер сечения трубы) также влияет на формоизменение при профилировании, то есть результаты, полученные на трубах малого диаметра (10-120 мм), не могут быть без корректировки перенесены на условия формовки труб среднего диаметра. Анализ применяемых способов профилирования показал, что на сегодняшний день наиболее перспективным является производство труб прямоугольного и квадратного сечения в четырехвалковых калибрах в потоке трубоэлектросварочного агрегата (ТЭСА). Поэтому исследование процесса получения электросварных стальных труб квадратного сечения из цилиндрических заготовок является весьма актуальной задачей.

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является совершенствование технологии производства стальных труб квадратного сечения с заданными геометрическими параметрами прокаткой в четырехвалковых калибрах и разработка методики расчета калибровки валков.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель трехмерного упруго-пластического течения металла при профилировании электросварной стальной трубы в четырехвалковых калибрах.

2. Исследовать влияние технологических параметров на формоизменение заготовки и геометрические размеры профиля при профилировании трубы квадратного сечения в четырехвалковых калибрах.

3. Разработать методику расчета диаметра исходной заготовки по толщине стенки трубы, стороне и наружному радиусу закругления квадратного профиля.

4. Разработать методику расчета калибровки валков для получения квадратного профиля с заданным радиусом закругления из труб круглого сечения по заданному режиму обжатий в калибровочном стане.

5. Предложить обоснованный режим обжатий при профилировании.

6. Опробовать и внедрить в производство усовершенствованную технологию профилирования стальной трубы квадратного сечения в четырехвалковых калибрах.

Научная новизна.

1. С помощью математического моделирования течения металла исследовано напряженно-деформированное состояние трубы (поля напряжений и деформаций). Показано, что на внутренней плоской поверхности профильной трубы возникают растягивающие поперечные напряжения. В остальных местах, включая наружную поверхность закруглений профиля, реализуется схема всестороннего неравноосного сжатия. Максимальная интенсивность напряжений возникает на внутренней поверхности углов профиля.

2. Разработана методика расчета диаметра исходной заготовки, которая опирается на зависимости изменения наружного периметра

поперечного сечения трубы при профилировании (при разных толщинах стенки заготовки) и учитывает влияние заданного радиуса закругления углов профиля на диаметр исходной заготовки.

3. Разработана методика расчета калибровки валков профилировочного стана, основанная на результатах моделирования и подтвержденная экспериментальными данными, полученными при профилировании трубы. Методика позволяет рассчитать геометрические размеры и форму калибров по заданному режиму обжатий по клетям. Предложен обоснованный режим обжатий, обеспечивающий равномерное распределение интенсивности деформаций в углах профиля как в наиболее нагруженных элементах трубы.

4. Исследован процесс формоизменения стальных труб при профилировании трубной заготовки в четырехвалковых калибрах. Показано, что:

- физический очаг деформаций превышает геометрический очаг деформации (участок плавного перехода);

- радиус закругления углов конечного профиля формируется во внеконтактных участках калибра и монотонно уменьшается по мере прохождения трубы через калибровочные клетки;

- причиной возникновения прогиба стенок (потери устойчивости) является то, что изгибающий момент в продольном направлении (вдоль движения заготовки) со стороны валков профилирующего калибра начинает действовать до входа металла в калибр и заканчивает действовать за пределами выхода металла из калибра (геометрического очага деформации), тем самым уменьшая размеры сечения трубы за пределами калибра;

- диапазон изменения допустимого диаметра исходной заготовки очень мал и составляет 1-2 %.

Практическая значимость.

Результаты диссертационной работы внедрены в практическую деятельность ЗАО «Северсталь ТПЗ – Шексна» и состоят в следующем:

1. Рассчитаны диаметры исходной заготовки для всего сортамента квадратных профилей, производимых на ТЭСА 127-426. Рассчитанные диаметры, внесенные в технологический регламент, обеспечивают получение заданного радиуса закругления в соответствии со стандартами.

2. Рассчитаны геометрические размеры калибров для профилирования трубы квадратного сечения на ТЭСА 127-426 за четыре прохода в четырехвалковых клетях. Изготовлены валки для калибровочного стана ТЭСА 127-426 для получения квадратных труб 90x90 - 300x300 мм.

3. Внедрение результатов работы на ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна» позволило расширить сортамент ТЭСА 127-426, увеличить объем производства и снизить количество несоответствующей продукции, что обеспечило экономический эффект 2188,4 тыс. рублей.

4. Результаты работы вошли в курс лекций «Технология производства электросварных труб», прочитанных в цехе гнутых профилей ОАО «Северсталь» и ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна» в декабре–январе 2011г.

Методы исследований и достоверность результатов. Для разработки технологии профилирования стальных труб квадратного сечения в четырехвалковых калибрах была создана математическая модель упруго-пластического трехмерного течения металла и исследовано формоизменение трубы в процессе профилирования. В качестве среды моделирования был выбран программный продукт Deform3D.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, имеют теоретическое и практическое обоснование, они не противоречат имеющимся литературным данным. Достоверность результатов работы была подтверждена

экспериментально на промышленном оборудовании ТЭСА 127-426 в ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна».

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на: Международной научно-технической конференции «Машины, технологии, материалы» (г. София, 2007 г.); III, IV, VI, VII и VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, ИМЕТ РАН, 2006, 2007, 2009, 2010 и 2011 гг., соответственно); II международной научно-технической конференции «Павловские чтения» (г. Москва, ИМЕТ РАН, 2010 г.); Четвертой международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, ИМЕТ РАН, 2011 г.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 7 печатных работах, из которых 3 статьи опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 137 страницах, содержит 62 рисунка, 21 таблицу. Список литературы включает 69 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации.

1 Анализ способов получения профильных стальных труб квадратного сечения

В данной главе рассмотрены способы получения труб квадратного сечения различными методами обработки металлов давлением:

- формовка профиля из плоской заготовки в валковых калибрах с последующей сваркой;
- профилирование в двухвалковых калибрах;

- профилирование в неприводных четырехвалковых калибрах;
- профилирование в приводных четырехвалковых калибрах.

Анализ применяемых способов профилирования показал, что на сегодняшний день наиболее перспективным является производство труб прямоугольного и квадратного сечения в четырехвалковых калибрах за несколько проходов в потоке трубоэлектросварочного агрегата (ТЭСА).

На основе анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2 Материалы, оборудование и методика проведения исследования

Для достижения поставленной цели в диссертации были проведены эксперименты на трубоэлектросварочном агрегате ТЭСА 127-426 (производитель - SMS Meer, Германия) в ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна».

На рисунке 1 представлен калибровочный стан на ТЭСА 127-426.

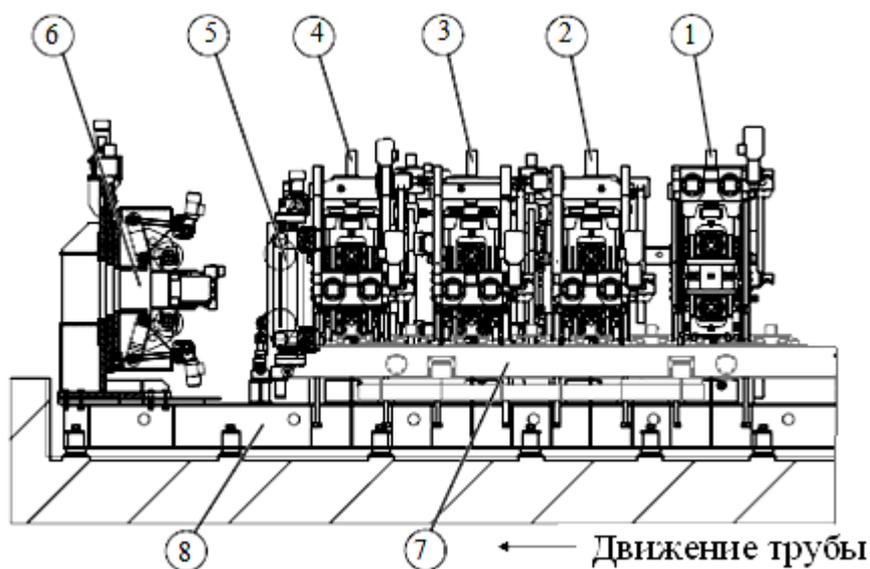


Рисунок 1 - Схема калибровочного стана на ТЭСА 127-426 в ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна»: 1 - калибровочная клетка №1; 2 - калибровочная клетка №2; 3 - калибровочная клетка №3; 4 - калибровочная клетка №4; 5 - клетка с бочкообразными валками; 6 - турголовка; 7 - сменная рама; 8 - станина

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

На рисунке 2 (а) показано, как труба круглого сечения задается в первую калибровочную клетку. В четырех последовательно расположенных клетках исходная круглая труба постепенно осаживается в двух взаимно перпендикулярных направлениях и ее сечение принимает форму квадрата. Формы этих калибров в поперечном сечении показаны на рисунке 2 (б).

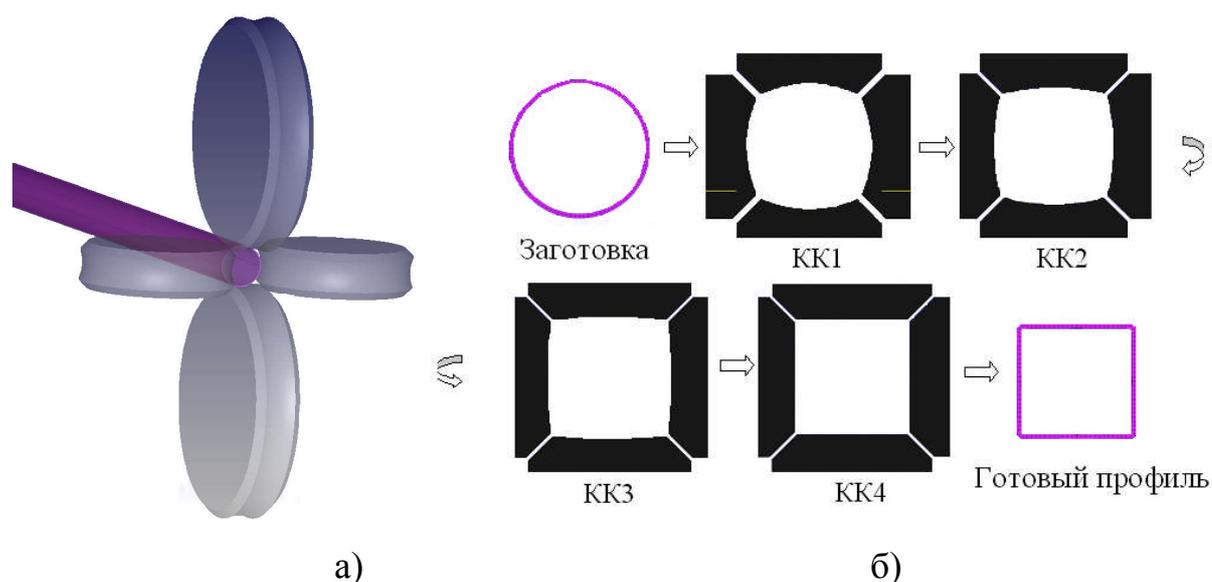


Рисунок 2 - Схема профилирования трубы квадратного сечения в калибровочных клетках: а) профилирование круглой трубы в первом четырехвалковом калибре; б) формы калибров в поперечном сечении, исходной заготовки и готового профиля

В системе управления и настройки калибровочных клетей определяется положение валков относительно центра симметрии калибра, т.е. расстояние от центра симметрии до дна валка. Положение валков может быть различным и поддается регулированию в клетях оператором или устанавливается автоматически.

В качестве материалов были использованы сталь марки 20 по ГОСТ 1050-88 и сталь марки 09Г2С по ГОСТ 19281-89.

Анализ сортамента ТЭСА 127-426 показывает, что диапазон изменения относительной толщины стенки труб весьма велик и составляет для квадратных труб 100x100-140x140 мм значение $S/H=0,02-0,1$. Это приводит к большому различию в условиях деформации тонкостенных и толстостенных труб и требует разработки таблиц предварительной настройки клетей калибратора, обеспечивающих получение заданных геометрических размеров для труб с различной толщиной стенки. Определяющими технологическими параметрами профилирования являются диаметр трубной заготовки $D_{исх. заг.}$, толщина ее стенки S и марка стали. Кроме того, на характер формоизменения трубы при профилировании и выбор диапазона режима обжатий влияют радиус проточки валка R_{np} и его распределение по клетям калибровочного стана.

Поскольку экспериментальное исследование профилирования ограничено невозможностью оперативно изменять размеры валков и калибров, образованных ими, то применяли математическое моделирование течения металла при профилировании в среде Deform 3D. В виртуальном пространстве был смоделирован процесс профилирования трубы в четырехвалковых калибрах в соответствии с реальным профилированием на ТЭСА 127-426.

3 Математическое моделирование

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели была разработана математическая модель упруго-пластического течения металла, основанная на МКЭ, в среде Deform 3D. Модель методом конечных элементов позволяет рассчитать геометрию формоизменения трубной заготовки диаметром от 118 до 388 мм из стали Ст.3 на всем протяжении профилирования, энергосиловые параметры профилирования, а также определить внутренние поля напряжений и деформаций. В отличие от ранних работ по моделированию процесса профилирования труб в четырехвалковых калибрах, в нашем случае для лучшей наглядности и достоверности получаемых результатов, а также для получения более точной геометрии по поперечному сечению готового профиля, моделировали непрерывное профилирование одновременно в четырех калибрах (рисунок 3).

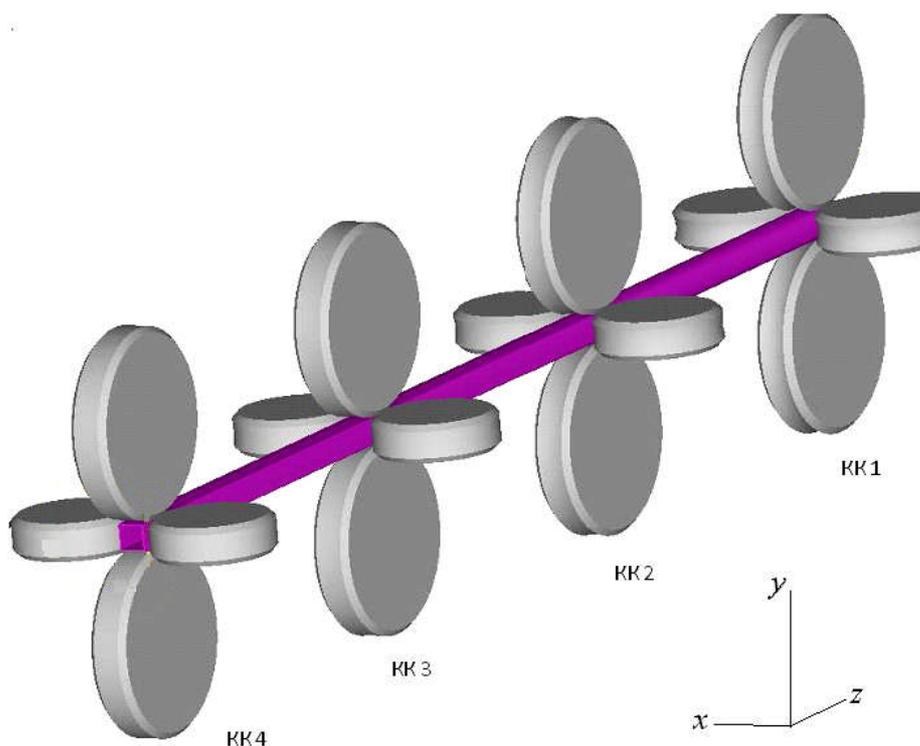


Рисунок 3 - Схема профилирования круглой трубы в квадратную в четырехвалковых клетях за четыре прохода в калибровочном стане ТЭСА

127-426

Исходные данные для расчета по модели включают в себя геометрию инструмента и заготовки, механические и теплофизические свойства материала и параметры процесса (начальную температуру, скорость прокатки, условия трения). Поскольку горизонтальные валки в калибре приводные, на них задавали постоянную угловую скорость, соответствующую выбранному значению по закону постоянства объема.

Адекватность модели оценивали методом сравнения геометрических размеров готового профиля, полученного расчетным и экспериментальным путем на примере труб 100x100x4 мм, 100x100x6 мм и 100x100x8 мм. Основным критерием адекватности была выбрана диагональ готового профиля. В исследуемом диапазоне относительная погрешность модели по геометрическим параметрам конечного профиля трубы составила не более 1 %.

В результате расчета по разработанной модели получили поля деформаций, накопленной деформации, а также поля напряжений, возникающих в процессе профилирования круглой трубы. Показано, что наиболее нагруженным участком с точки зрения напряженно-деформированного состояния является угловая зона.

4 Исследование деформации при формовке труб квадратного сечения

На основе разработанной математической модели упруго-пластического течения металла исследовано изменение геометрии исходной круглой трубы в процессе 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 $D_{исх. заг.}$ (рисунок 4).

Разработана методика расчета диаметра исходной заготовки, которая сводится к следующему:

а) в качестве критерия при определении диаметра заготовки выбирали наружный периметр конечного профиля;

б) диаметр заготовки должен быть такой величины, чтобы после деформации геометрические параметры конечного профиля находились в пределах, задаваемых соответствующим стандартом.

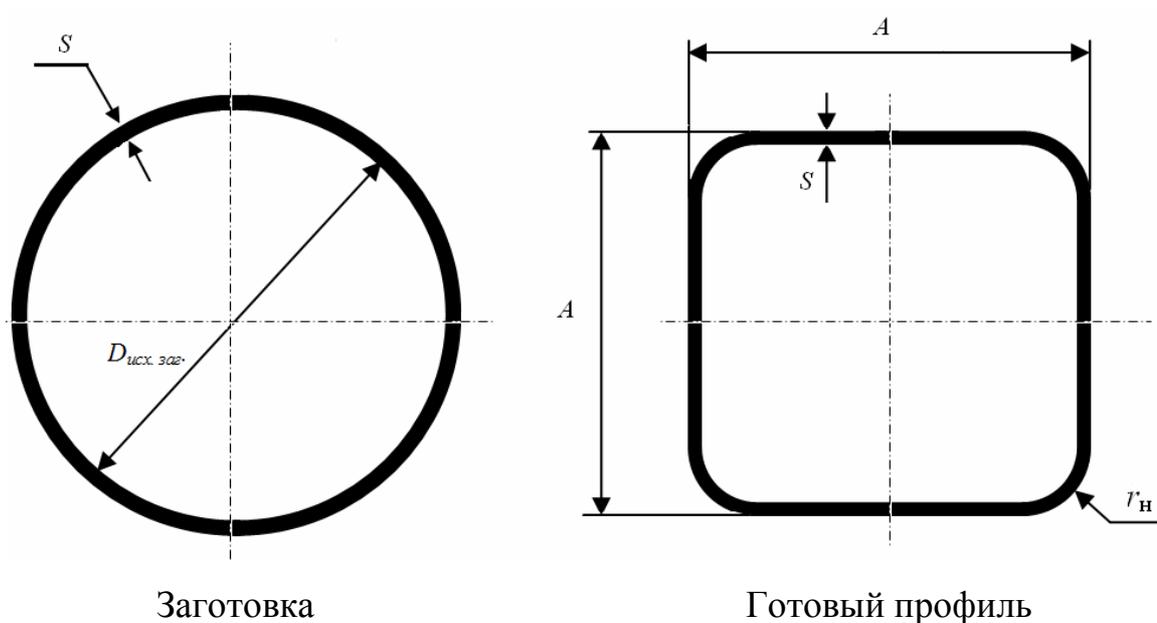


Рисунок 4 - Геометрические размеры исходной трубы и готового профиля: $D_{исх. заг.}$ – диаметр исходной заготовки, мм; S – толщина трубы, мм; A – сторона готового профиля, мм; r_H – наружный радиус закругления профиля, мм

Формула для расчета диаметра исходной заготовки имеет вид:

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

где k_n - коэффициент уменьшения наружного периметра трубы при профилировании:

$$\left. \begin{array}{l} k_n = 1,031 \text{ при } r_H = 2S \\ k_n = 1,035 \text{ при } r_H = 2,5S \\ k_n = 1,037 \text{ при } r_H = 3S \end{array} \right\}$$

Результаты расчета диаметра исходной заготовки показывают, что для обеспечения заданной геометрии профиля (радиусы закругления), по мере увеличения толщины стенки диаметр трубной заготовки необходимо уменьшать. Поскольку изменения калибровки (формы и размеров калибров) при этом не предусмотрено, то режим деформации изменяется не только по уровню деформации, но и по распределению обжатий между клетями стана. Для профиля 100x100 мм уже при толщине стенки 8 мм обжатие в первой клетке практически отсутствует, а вся работа деформации перераспределяется между второй, третьей и четвертой клетями. Наибольшая деформация наблюдается в углах профиля, причем она значительно зависит от радиуса закругления и толщины стенки.

Наряду с показателями деформации интенсивность деформаций в углах профиля, как в наиболее нагруженных изгибаемых частях трубы, может выступать в качестве критерия при анализе режима деформации. Результаты расчета интенсивности деформаций на наружной поверхности в углах закругления для различных условий приведены на рисунке 5.

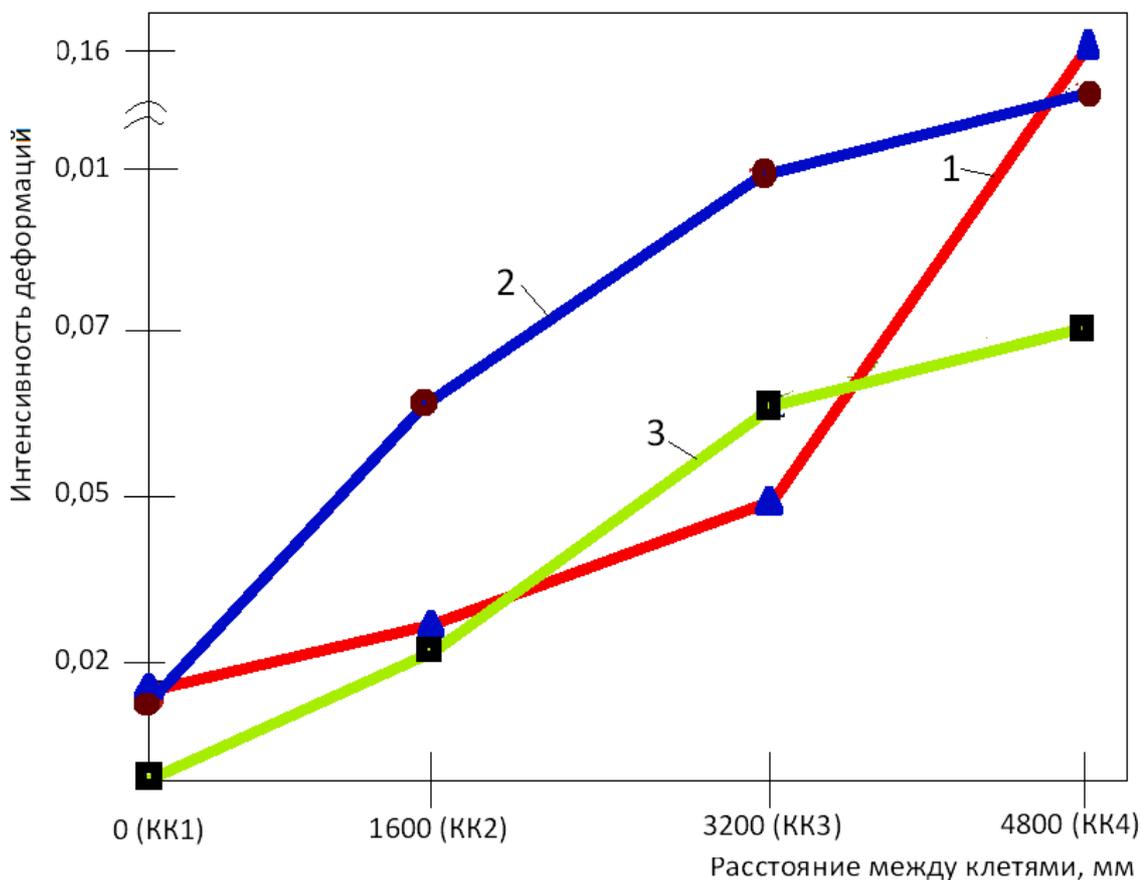


Рисунок 5 - Интенсивность деформаций по клетям калибровочного стана при профилировании трубы сечением 100x100 с различной толщиной стенки на наружной поверхности углов закругления: 1 - 100x100x4 мм ($D_{исх.заг.}=126,8$ мм); 2 - 100x100x6 мм ($D_{исх.заг.}=124,8$ мм); 3 - 100x100x8 мм ($D_{исх.заг.}=120,6$ мм)

Анализ этих данных также подтверждает, что с увеличением толщины стенки и, соответственно, уменьшением диаметра исходной заготовки в первом проходе фактически отсутствует деформация. Однако, также показано, что интенсивность деформаций в углах профиля по проходам распределена неравномерно и для профиля с толщиной стенки 4 мм, причем максимальная ее величина достигается именно в последнем проходе. То есть необходимо перераспределить обжатия по клетям стана для выравнивания уровня напряжений и деформаций в каждом проходе с целью обеспечения

точности по геометрии конечного профиля и снижения возможности прогиба стенок.

Далее были исследованы особенности формирования геометрии профильной трубы в зависимости от толщины стенки и диаметра заготовки. Толщина стенки существенно влияет на r_H . С увеличением толщины стенки r_H увеличивают. Если r_H не увеличивать, то с ростом S интенсивность деформации будет увеличиваться. Поэтому r_H определяется стандартами в зависимости от толщины стенки, причем между ними устанавливается прямо пропорциональная зависимость. Расчетные данные показывают, что диапазон изменения диаметра исходной заготовки весьма мал, например, для профильной трубы 100x100x4 мм составляет 126,1-128,3 мм.

5 Методика расчета калибровки

Исследование особенностей формоизменения трубной заготовки при профилировании в условиях ТЭСА 127-426 показало, что получение заданного профиля может быть достигнуто бесконечным множеством вариантов обжатий в клетях калибровочного стана.

На рисунке 6 представлена схема поперечного сечения калибра вместе с трубой в калибровочных клетях № 1-3 (КК1-КК3).

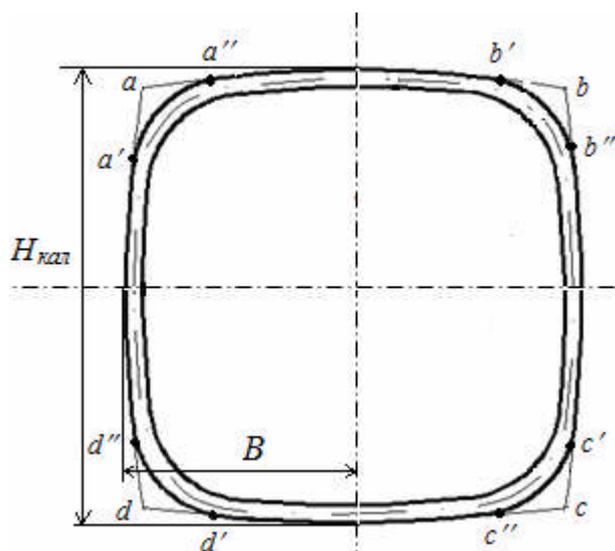


Рисунок 6 - Схема поперечного сечения трубы в калибрах КК1-КК3:

$H_{кал}$ - высота калибра; B - положение валка относительно оси прокатки

Из рисунка 6 принимаем следующие обозначения: L_1 - длина участка загиба трубы в процессе профилирования, длина дуг $a'a''$, $b'b''$, $c'c''$, $d'd''$; L_2 - длина участка разгиба трубы при профилировании, длина дуг $a''b'$, $b''c'$, $c''d'$, $d''a'$; r_H - наружный радиус закругления углов профиля, радиус дуг $a'a''$, $b'b''$, $c'c''$, $d'd''$; R_{np} - радиус проточки валков, образующих калибр, радиус 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 $a''b'$, $b''c'$, $c''d'$, $d''a'$.

В данной главе представлена методика расчета калибровки для профилирования в четырехвалковых калибрах, основанная на следующих допущениях:

1. Периметр заготовки по средней линии сечения не изменяется в процессе профилирования.

2. Длина участков разгиба и загиба (L_1 и L_2) во время профилирования не меняется.

3. Валки последней клетки КК4 должны быть плоскими (или иметь цилиндрическую бочку). Форму валков клеток КК1-КК3 принимали однорадиусными, с радиусом проточки R_{np} .

4. Принят следующий режим абсолютных обжатий: равные абсолютные обжатия в первых трех клетях калибровочного стана и уменьшенное обжатие в последней калибровочной клетки, равное половине обжатия в предыдущих клетях.

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

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

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

Отсюда можно определить $R_{при}$ по заданной $\bar{H}_{кали}$. Если выбран режим обжатий, то по формуле (2) можно найти все размеры калибров.

6 Внедрение технологии профилирования труб квадратного сечения

Рассчитываемый по методике, изложенной в главе 5 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. Режим обжатий представлен на рисунке 7.

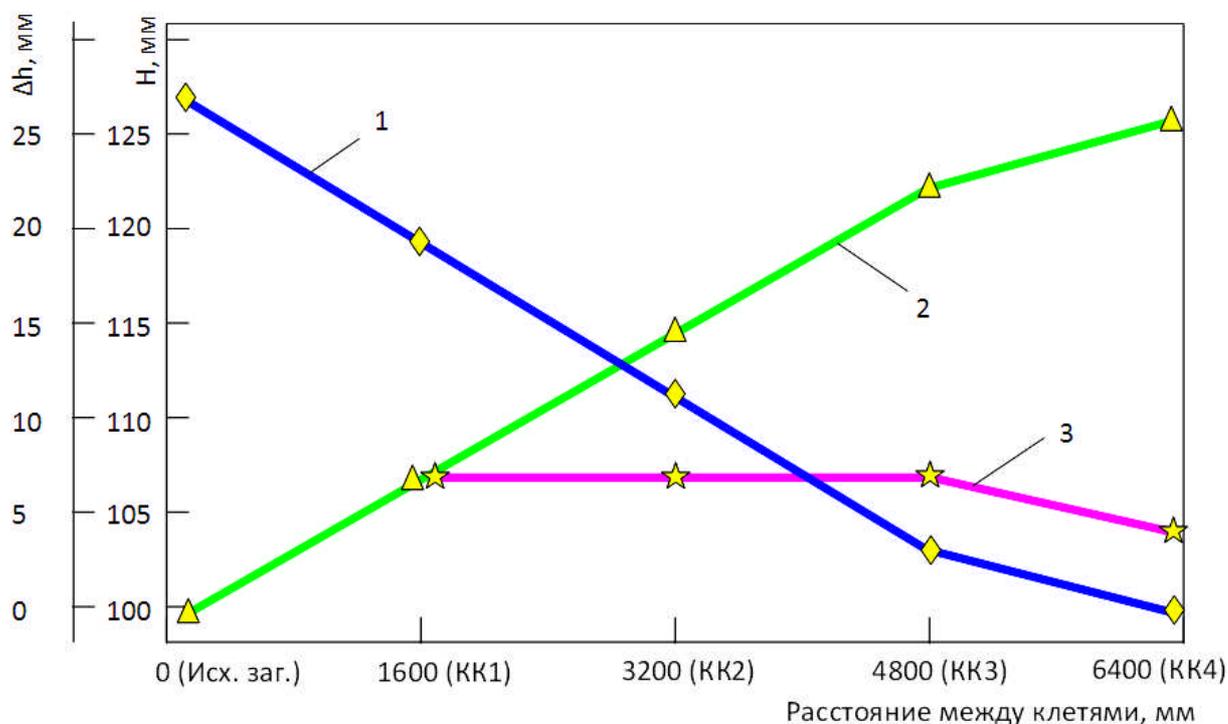


Рисунок 7 - Рекомендованный режим обжатий при профилировании квадратной трубы 100x100x4 мм из заготовки $\varnothing 127$ мм из стали Ст3: 1 – изменение высоты (и ширины) заготовки; 2 – суммарное абсолютное обжатие, Δh_{Σ} ; 3 - абсолютное обжатие за проход, Δh_i

С целью уточнения разработанных рекомендаций по выбору диаметра исходной заготовки проводили опытные прокатки. По результатам проведения опытных прокаток была скорректирована формула по

нахождению диаметра исходной трубной заготовки, а точнее, значение эмпирического коэффициента пропорциональности k_n и пересчитаны диаметры исходной заготовки для различных типоразмеров профилей по стандарту. Скорректированная формула имеет вид:

$$D_{исх.заг.} = (1 - k_n)S + k_n(1,274 A - 0,548 r_H), \quad (3)$$

$$\text{где: } \left. \begin{array}{l} k_n = 1,031 \text{ при } r_H = 2S \\ k_n = 1,035 \text{ при } r_H = 2,5S \\ k_n = 1,026 \text{ при } r_H = 3S \end{array} \right\}$$

С целью опробования предложенного режима обжати проводили опытную прокатку профиля 100x100x4 мм из стали Ст3. Исходные рекомендованные положения валков и положения валков после точной настройки на профиль приведены ниже в таблице.

Рекомендованные и реальные настройки калибровочных клеток при опытной прокатке профиля 100x100x4 мм из заготовки $\phi 127$ мм

Среда	B , мм (рисунок 6)				$H_{каль}$, мм (рисунок 6)			
	КК1	КК2	КК3	КК4	КК1	КК2	КК3	КК4
Модель	59,70	55,50	52,00	50,00	119,30	111,60	103,90	100,00
	59,70	55,50	52,00	50,00				
ТЭСА	59,61	55,22	51,88	49,50	119,07	111,44	103,81	99
	58,82	55,25	51,90	49,50				

Из таблицы видно, что после окончательной настройки положения валков изменились незначительно, а параметры деформации и геометрии практически сохранились. В результате анализа полей напряжений и деформаций установлено, что принятый режим обжати характеризуется

равномерностью нагружения опасных участков трубной заготовки. Моделирование и эксперименты показали, что предложенный режим обжатий характеризуется плавным нарастанием накопленной деформации и умеренными напряжениями при профилировании, особенно в опасных точках на внутреннем закруглении профиля.

Методика расчета диаметра исходной трубной заготовки и методика расчета калибровки внедрены в производство. По предложенной методике расчета калибровки изготовлены валки. Определены диаметры исходных заготовок для расширенного сортамента ТЭСА 127-426.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе математической модели упруго-пластического течения металла при профилировании стальной трубы квадратного сечения в четырехвалковых клетях исследована геометрия формоизменения трубной заготовки и выявлены зависимости геометрии конечного профиля от технологических параметров профилирования.

2. С помощью математического моделирования течения металла исследовано напряженно-деформированное состояние трубы (поля напряжений и деформаций). Показано, что на внутренней плоской поверхности профильной трубы возникают растягивающие поперечные напряжения. В остальных местах реализуется схема всестороннего неравноосного сжатия. Максимальные напряжения возникают на внутренней поверхности углов профиля. Получены количественные зависимости напряжений от наружного радиуса закругления и толщины стенки.

3. 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 учитывает влияние заданного радиуса закругления углов профиля на диаметр исходной заготовки.

4. Установлено, что толщина стенки существенно влияет на радиус закругления. С увеличением толщины стенки радиус необходимо увеличивать. Если радиус не увеличивать, то с ростом толщины интенсивность деформаций будет увеличиваться, что может привести к разрушению угловых участков профильной трубы.

5. Разработана методика расчета калибровки для калибровочного стана, основанная на экспериментальных данных при профилировании и подтвержденная результатами моделирования. Методика позволяет рассчитать все геометрические размеры калибров по заданному режиму обжатий в калибровочном стане. Предложен оптимальный режим обжатий, обеспечивающий равное распределение абсолютных обжатий в первых трех клетях калибровочного стана и уменьшенным обжатием в четвертой клетке, равным половине обжатия в остальных клетях.

6. Результаты работы внедрены в практическую деятельность ЗАО «Северсталь ТПЗ – Шексна» и состоят в следующем:

- Рассчитаны диаметры исходной заготовки для всего сортамента квадратных профилей, производимых на ТЭСА 127-426 и внесены в технологический регламент.

- По разработанным рекомендациям рассчитаны калибровки для калибровочного стана ТЭСА 127-426.

- Внедрение результатов диссертации позволило расширить сортамент ТЭСА 127-426 в ЗАО «Северсталь ТПЗ - Шексна», увеличить объем производства и снизить количество несоответствующей продукции, что обеспечило экономический эффект 2188,4 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. *Акопян, К.Э.* Математическое моделирование процесса профилирования труб в неприводных валках / К.Э. Акопян, В.С. Юсупов, А.В. Колобов, А.Г. Васенин, А.Н. Тюляпин // *Машины, технологии, материалы.* 2007г. № 2. С.119-120.

2. *Акопян, К.Э.* Математическое моделирование технологии получения квадратных труб из круглых / К.Э. Акопян // *Физико-химия и технология неорганических материалов : сб. материалов VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов.* – М. : Интерконтакт Наука, 2010. С. 106-107.

3. *Акопян, К.Э.* Разработка технологии получения профильных труб в неприводных валках / К.Э. Акопян, А.В. Колобов, В.С. Юсупов // *Павловские чтения : сб. тр. II международной научно-технической конференции.* – [Б.М. : б.н.], 2010. С. 267-270.

4. *Акопян, К.Э.* Математическое моделирование профилирования труб квадратного сечения в четырехвалковых калибрах / Акопян К.Э. // *Физико-химия и технология неорганических материалов : сб. материалов VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов.* - М. : Интерконтакт Наука, 2011. С. 648-649.

5. *Акопян, К.Э.* Методика расчета диаметра исходной трубной заготовки при производстве труб квадратного сечения / К.Э. Акопян, А.В. Колобов, Д.А. Родичев, М.С. Селезнев, В.С. Трусов, В.С. Юсупов // *Сталь.* 2012. № 6. С. 39-43.

6. *Акопян, К.Э.* Расчет калибров четырехвалковых клеток для профилирования круглой сварной стальной трубы / К.Э. Акопян, А.В. Колобов, Д.А. Родичев, М.С. Селезнев, В.С. Трусов, Е.С. Федотов, В.С. Юсупов // *Производство проката.* 2012. № 7. С. 30-33.

7. *Акопян, К.Э.* Математическое моделирование профилирования круглой сварной стальной трубы в квадратный профиль в четырехвалковых калибрах / К.Э. Акопян, А.В. Колобов, М.С. Селезнев, В.С. Трусков, Е.С. Федотов, В.С. Юсупов, Д.А. Родичев // *Металлы*. 2012. № 3. С. 25-30.