

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ (Михайлов Г.Г.)
_____ 2017 г.

«ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТАМПОСВАРНОГО ТРОЙНИКА
ИЗ СТАЛИ 09Г2С».

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
ЮУрГУ–22.03.02.2017.447.99.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы (д.т.н., проф.)
_____ (Рущиц С.В.)
_____ 2017 г.

Автор проекта
студент группы П-447
_____ (Курманова М.К.)
_____ 2017 г.

Нормоконтролер, (д.т.н., проф.)
_____ (Корягин Ю.Д.)
_____ 2017 г.

Челябинск 2017

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ	
1.1 Основные требования к трубным сталям. Классы прочности.....	9
1.2 Принципы легирования трубных сталей.....	11
2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ И ТРУБНОЙ ПРОДУКЦИИ	
2.1. Выплавка сталей.....	14
2.2 Разливка стали.....	17
2.3 Прокатка листовой стали.....	21
2.4 Производство сварных труб.....	23
2.5 Производство бесшовных труб.....	24
3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ОТВОДОВ.	
3.1. Назначение отводов и способы из производства.....	28
3.2 Физические принципы индукционного нагрева.....	31
3.3 Оптимизация технологических параметров горячего гнутья.....	33
3.4 Термическая обработка гнутых отводов.....	36
4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГНУТЫХ ОТВОДОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ	
4.1 Постановка задачи, материал и методика исследований.....	38
4.2 Результаты исследования.....	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	46
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ ИЗ СТАЛИ 13ХФА.....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ...	52

ВВЕДЕНИЕ

При прокладке трубопроводов различного назначения неизбежно возникает потребность в изменении направления потока транспортируемого продукта. Для этих целей служат отводы – криволинейные участки труб, требуемого радиуса кривизны. Для прокладки нефтепроводов, газопроводов и водопроводов используют трубы, изготовленные из малоуглеродистых низколегированных сталей (трубных сталей), структура и механические свойства которых формируются в процессе контролируемой прокатки стальных листов (сварные трубы) или за счет термической обработки (бесшовные трубы). Очевидно, что отводы, изготавливаемые из тех же сталей, не должны уступать по своим свойствам прямолинейным участкам трубопроводов.

Основным способом производства отводов с относительно большим радиусом кривизны является гибка труб на трубогибочных станах в горячем состоянии с использованием узкозонального нагрева токами высокой частоты. Такой нагрев и последующее охлаждение отводов может значительно изменить структуру и, соответственно, механические свойства трубных сталей. По этой причине технология производства гнутых отводов должна обеспечивать не только их требуемую геометрическую форму характеристики, но и требуемые структуру и свойства. Эта задача решается проведением термической обработки, совмещенной с индукционным нагревом, или осуществляемой в виде отдельной операции после гибки.

Целью выпускной квалификационной работы явилось рассмотрение всей технологической цепочки производства отводов, начиная с выплавки стали, а также проведение исследований качества отводов и выработка рекомендаций по его повышению в условиях реально действующего металлургического предприятия.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

1.1 Основные требования к трубным сталям. Классы прочности.

Требования к потребительским свойствам труб, предназначенных для изготовления строительных конструкций, для прокладки водопроводов, газопроводов и нефтепроводов из года в год повышаются. В связи с этим, основными задачами разработки новых трубных сталей являются [1–3]:

- повышение прочностных характеристик;
- улучшение деформационной способности и пластичности;
- повышение показателей ударной вязкости и хладостойкости;
- обеспечение свариваемости и требуемых свойств сварного соединения и околошовной зоны (ОШЗ);

повышение коррозионной стойкости.

Для решения поставленных задач повышения качества трубной продукции в отечественной и мировой практике применяются следующие металлургические и технологические подходы [4–8]:

- измельчение зеренной микроструктуры стали и повышение дисперсности продуктов распада аустенита путем контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения;

– оптимизация химического состава сталей в направлении снижения содержания углерода с использованием микролегирования карбидообразующими элементами;

- замена твердорастворного упрочнения на дисперсионное, зернограничное (субструктурное) и дислокационное упрочнение.

Современная технология производства трубных сталей и проката предусматривает:

- при выплавке стали – обеспечение повышенной чистоты стали по вредным примесям (S, P, N, H), неметаллическим включениям, глобуляризации сульфидных включений;

– при непрерывной разливке стали – снижение сегрегационной неоднородности макро и микроструктуры, устранение осевой ликвации;

– при прокатке высокопрочных трубных сталей – формирование в прокате мелкого зерна, мелкодисперсной преимущественно феррито-бейнитной, бейнитно-мартенситной или отпущенной мартенситной микроструктуры в зависимости от предъявляемых требований к прокату, а также формирование определенного типа и соотношения структурных составляющих, развитой субструктуры.

Трубные стали подразделяются на различные классы прочности (таблица 1). Классы прочности обозначаются следующим образом: К60 – буква «К» обозначает класс прочности, цифра «60» - минимальное гарантированное значение временного сопротивления в кгс/см² (кгс/см² = 10 МПа). За рубежом применяется иная система обозначения, Например, согласно Американским стандартам API обозначение классов прочности имеет следующий вид: Х70 – буква «Х» обозначает класс прочности, цифра «70» – минимальное гарантированное значение предела текучести в ksi (1ksi=6,894 МПа).

Таблица 1.1– Классы прочности и механические свойства трубных сталей

Класс прочности	σ_B Н/мм ²	σ_T Н/мм ²	δ , % не менее	KCV при –20°C, Дж/см ² , не менее
К50	490-590	375-475	22-23	100-120
К52	510-610	410-510	22-23	100-120
К54	530-630	420-520	22-23	100-120
К55	540-640	440-540	22-23	100-120
К56 (Х65)	550-650	450-550	22-23	100-120
К60 (Х70)	590-690	490-590	22-23	100-120
К65 (Х80)	640-750	570-670	20	100-120
Х100	760-860	720-820	-	100-120
Х120	860-960	≥915	-	100-120

22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ

10

Необходимая категория прочности выбирается при проектировании исходя из многих факторов, включая давление трубопровода и климатические условия эксплуатации.

1.2 Принципы легирования трубных сталей

Современные трубные стали – это малоуглеродистые, низколегированные стали с микродобавками карбидообразующих элементов (таблица 1.2)

Таблица 1.2 – Химический состав стали категории прочности К56, К60, К65

Класс прочности	C, %	Mn,%	Si,%	Cr,%	V,%	Ni, %	Cu,%	Mo,%	Nb,%	Ti,%	Al,%	N,%
К56	0,09	1,61	0,32	0,02	0,02	0,04	0,06	0,006	0,05	0,021	0,03	0,01
К60	0,10	1,62	0,35	0,02	0,01	0,05	0,03	0,09	0,04	0,035	0,05	0,01
К65	0,05	1,80	0,2	0,04	0,01	0,35	0,24	0,22	0,054	0,012	0,03	0,01

Низкое содержание углерода в современных трубных сталях обусловлено целым рядом причин.

Во-первых, с понижением концентрации углерода повышается сопротивление хрупкому разрушению и улучшается свариваемость.

Во-вторых, снижение содержания углерода уменьшает центральную сегрегационную неоднородность слябов. При снижении содержания углерода уменьшается сегрегация таких элементов как марганец, сера, фосфор, ниобий. Это оказывает положительное влияние на формирование конечной структуры сталей, полученных непрерывной разливкой, в которых степень сегрегации в центре непрерывно-литого сляба особенно велика.

Еще одним положительным эффектом снижения содержания углерода является повышение растворимости нитридов и карбонитридов ниобия в аустените при нагреве. Благодаря этому большая часть ниобия может быть переведена в твердый раствор при температуре нагрева под прокатку до ~1200 °С,

что приведет к более эффективному воздействию ниобия на микроструктуру стали в процессе контролируемой прокатки.

Низкое содержание углерода и, соответственно, его низкий вклад в упрочнение компенсируется в трубных сталях введением легирующих элементов.

Ниже рассмотрены основные цели легирования.

Кремний и Марганец. Основными легирующими элементами в трубных сталях являются кремний и марганец. Эти элементы обеспечивают твердорастворное упрочнение феррита.

При проведении контролируемой прокатки влияние содержания марганца на механические свойства и характеристики сопротивления разрушению стали выражается в следующем: линейное повышение предела текучести и временного сопротивления разрыву; снижение относительного удлинения; при увеличении содержания марганца первоначально наблюдается повышение ударной вязкости, далее ударная вязкость меняется слабо, а в области вязкого разрушения несколько снижается, критическая температура хрупкости снижается (измельчение зерна феррита, обусловленное снижением интервала фазовых превращений).

Легирование марганцем понижает температуру превращения, что приводит к измельчению зерна феррита. Благоприятно марганец так же влияет на прокаливаемость. Однако чрезмерное легирование марганцем имеет ряд недостатков, связанных в первую очередь, с его повышенной способностью к ликвации.

Никель. С целью повышения хладостойкости стали, используют добавки никеля. Никель эффективно способствует понижению температуры вязко-хрупкого перехода и повышению величины работы развития трещины, что существенно улучшает хладостойкость стали. Из всех легирующих элементов никель в наибольшей степени снижает порог хладноломкости. Никель достаточно интенсивно упрочняет феррит, и при этом не снижает ударную вязкость. При больших концентрациях никеля более 1% в стали наблюдается ухудшение хладостойкости металла.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Хром. До 0,7% хрома слабо влияет на стандартные свойства и не изменяет соотношения структурных составляющих (несколько укрупняет зерно). Используют для дополнительного твердорастворного упрочнения. При больших количествах хрома появляются продукты промежуточного превращения, что сопровождается резким увеличением прочности, снижением пластичности и вязкости. Работа развития трещины также снижается с увеличением содержания хрома.

Медь. Характер влияния меди на ударную вязкость и хладостойкость зависит от содержания и распределения меди: при небольших концентрациях она подобна никелю, а при больших (0,4%) снижает вязкость и хладостойкость низколегированных сталей.

Молибден. Применение молибдена в системе легирования сталей основывается на его способности тормозить перлитное превращение в стали при охлаждении (для формирования бейнитной составляющей микроструктуры), а также препятствовать росту карбонитридов ниобия и ванадия. Молибден задерживает процессы диффузионных превращений, сдвигая феррито-перлитную область на термокинетической диаграмме в сторону медленных скоростей охлаждения, что способствует получению бейнитных структур при более медленных скоростях охлаждения.

Ниобий. Оказывает наиболее заметное воздействие на процессы, протекающие во время горячей деформации. При температурах нагрева ниже 1150° достаточно эффективно тормозится рост зерен аустенита. При введении в сталь ниобия температура остановки рекристаллизации может быть повышена до 950 - 1000°С. В результате дисперсионного твердения повышаются прочностные характеристики. В общем, микролегирование ниобием благоприятно сказывается на комплекс механических свойств: повышение прочности (предел текучести на - 60 Н/мм², временное сопротивление ~30 Н/мм²) при одновременном повышении хладостойкости (T₅₀ снижается на 25-30°С), обусловленное дисперсионным твердением и измельчением зерна феррита.

Титан. Микролегирование стали титаном ведет к проявлению трех основных механизмов его влияния: образование дисперсных частиц TiN (торможение роста зерна аустенита при нагреве и сварке), присутствие титана в аустените в твердом растворе или в виде инициированных деформацией частиц TiC (замедляется рекристаллизации), выделение TiC в феррите (дисперсионное твердение стали). В целом легирование титаном менее эффективно, чем ниобием.

Ванадий. При микролегировании стали ванадием, наблюдается монотонное повышение прочностных свойств и снижение сопротивления вязкому и хрупкому разрушению и относительного удлинения.

В целом, оптимальное микролегирование стали позволяет в более полной степени использовать эффект ускоренного охлаждения. Если при данных параметрах деформации и охлаждения в стали без микродобавок может быть сформирована грубая структура преимущественно промежуточного типа, то в микролегированной стали при этом будет мелкозернистая структура с ферритной матрицей и небольшой долей бейнита, обладающая сочетанием высокой прочности и сопротивления разрушению.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ И ТРУБНОЙ ПРОДУКЦИИ

2.1 Выплавка сталей

Материалы, используемые для выплавки стали, принято делить на металлосодержащие (металлошихта, металлодобавки), добавочные (флюсы) и окислители. В качестве металлошихты используют: 1) чугуны (жидкий или твердый); 2) стальной (а в некоторых случаях и чугуновый) лом; 3) продукты прямого восстановления железа из железной руды; 4) ферросплавы.

Основную массу металлошихты составляют чугуны и стальной лом. Расход металлошихты определяется составом и характером шихты, а также технологией плавки. Для общих расчетов принимают требования ГОСТа: зашлакованность чугуна не должна превышать 0,5%, «замусоренность» металлолома 2%.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Соотношение между количеством чугуна и количеством лома, расходуемых на выплавку стали, зависит от многих факторов (типа процесса, места расположения завода, его отдаленности от сырьевой базы и других факторов).

Содержание кремния в чугуне оказывает существенное влияние на ход процесса. Повышение содержания кремния в чугуне до 0,5% способствует раннему шлакообразованию и нагреву ванны, что позволяет увеличить долю металлического лома в шихте. Дальнейшее повышение содержания кремния приводит к уменьшению выхода жидкой стали вследствие необходимости повышения расхода извести, увеличению количества шлака и потерь с ним железа. С повышением содержания кремния в чугуне 0,5 до 1,0% выход жидкой стали уменьшается примерно на 0,5% от массы металла.

Большое влияние на ход кислородно-конвертерного процесса оказывает марганец. Повышение его содержания в чугуне вызывает повышение угара металла вследствие увеличения количества шлака и увеличения потерь с ним. Однако образующийся при окислении марганца оксид MnO способствует шлакообразованию. Оптимальное содержание марганца в чугуне 0,7-1,0%.

Второй главной составной частью металлошихты является лом. Металлический лом должен иметь определенные габариты, насыпную массу, и быть достаточно чистым по вредным примесям и засорениям. Применение легковесного лома не желательно, так как это вызывает увеличение продолжительности загрузки его в конвертер и понижение температуры ванны в начале процесса. Применение чрезмерно крупных кусков лома занимает длительное время для растворения в жидком металле. Приведения лома в состояние, удобное для использования при выплавке стали, используют специальное оборудование и технологию. Крупногабаритный лом подвергают копровой разбивке, резке на ножницах, ломке на гидравлических прессах: стальную стружку – дроблению, брикетированию, пакетированию; легковесный лом – пакетированию.

Основной составляющей шихты электроплавки является стальной лом. Он не должен содержать цветных металлов. Лом не должен быть сильно окисленным (ржавым), поскольку с ржавчиной – гидратом окиси железа – вносит в металл много водорода. Лом должен быть тяжеловесным, чтобы обеспечивалась загрузка шихты в один прием. При использовании легковесного лома после частичного расплавления первой порции шихты приходится вновь открывать печь и подсаживать шихту, что удлиняет плавку.

Переплавление легированных отходов позволяет экономить дорогие ферросплавы. Поэтому отходы легированных сталей собирают и хранят рассортированными по химическому составу. Их используют при выплавке сталей, содержащих те же легирующие элементы, что и отходы.

В качестве железорудных материалов, вводимых в сталеплавильную ванну как источника кислорода для интенсификации окислительных процессов, а также для ускорения формирования шлака, применяют железную руду, агломерат и окалину. Необходимым требованием к этим материалам является содержание $\text{SiO}_2 \leq 8\%$.

Основным шлакообразующим элементом сталеплавильных процессов является известь, получаемая обжигом известняка. Ее качество оказывает существенное влияние на условия шлакообразования, стойкость футеровки, степени удаления из металла серы и фосфора. Для повышения жидкотекучести шлака и ускорения шлакообразования применяют плавиковый шпат CaF_2 .

В настоящее время для выплавки низколегированной стали применяют кислородно-конвертерные печи. Сущность конвертерных процессов на воздушном дутье заключается в том, что залитый в плавильный агрегат (конвертер) чугун продувают снизу воздухом; кислород воздуха окисляет примеси чугуна, в результате чего он превращается в сталь; при томасовском процессе, кроме того, в основной шлак удаляются фосфор и сера. Тепло, выделяющееся при окислении, обеспечивает нагрев стали до температуры выпуска ($\sim 1600^\circ\text{C}$).

Кислородный конвертер (рисунок 1) представляет собой поворачивающийся на цапфах сосуд грушевидной формы, футерованный изнутри и снабженный леткой для выпуска стали и отверстием сверху для ввода в полость конвертера кислородной фурмы, отвода газов, заливки чугуна, загрузки лома и шлакообразующих и слива шлака. Вместимость существующих конвертеров составляет 50- 400 т.

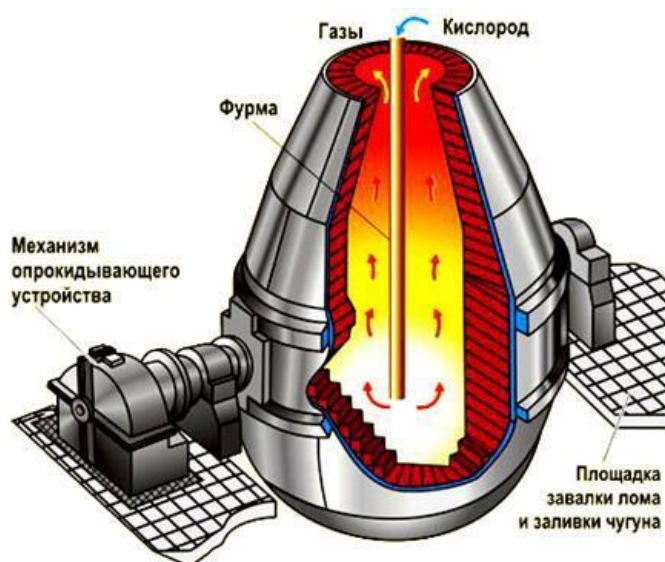


Рисунок 2.1 – Кислородный конвертер

Сужение нижней части конвертера и сферическая форма днища предотвращают образование застойных зон при циркуляции металла в конвертерах с верхней продувкой.

2.2 Разливка стали

Выплавленную в сталеплавильном агрегате сталь выпускают в разливочный ковш и затем разливают в металлические формы – изложницы или направляют на машины непрерывного литья. В результате затвердевания получают стальные слитки, в дальнейшем подвергаемые обработке давлением.

Разливка – важный этап сталеплавильного производства. Достаточно сказать, что от 6 до 8 %, а иногда и до 25% всей выплавляемой стали возвращается в

переплав из-за дефектов, возникающих в процессе разлива и кристаллизации слитка.

Применяют три основных способа разлива стали: разлива в изложницы сверху, разлива в изложницы сифоном и непрерывную разлива.

Разлива сверху и разлива сифоном обладают рядом преимуществ и недостатков. Оба способа разлива широко применяют. Вопрос о том, какая из них лучшим, до сих пор не решен.

Вследствие простоты и отсутствия потерь металла с литниками часто предпочитают разлива сверху. Несмотря на необходимость дополнительной зачистки поверхности проката, разлива сверху стали рядовых марок экономичнее сифонной. В то же время высококачественные и легированные стали, когда для уменьшения потерь дорогостоящего металла на зачистку важно получить чистую поверхность слитка, разливают главным образом сифоном.

Наиболее распространен способ непрерывной разлива, заключающийся в том, что жидкую сталь непрерывно заливают в водоохлаждаемую изложницу без дна - кристаллизатор, из нижней части которого вытягивают затвердевший по периферии слиток с жидкой сердцевиной. Далее слиток движется через зону вторичного охлаждения, где полностью затвердевает, после чего его разрезают на куски определенной длины. Основа этого способа – вытягивание формирующегося слитка из кристаллизатора, т. е. скольжение слитка по его стенкам с возникновением при этом значительных сил трения, что является определенным недостатком способа; из-за трения возникают разрывы затвердевающей оболочки движущегося слитка, что ограничивает скорость разлива.

Основные преимущества непрерывной разлива по сравнению с разливкой в изложницы:

- существенно повышается выход годного металла. Так, для спокойной стали получение слябов или блюмов путем непрерывной разлива вместо разлива в изложницы с последующей прокаткой обеспечивает повышение выхода годного

на 10-15% от массы разлитой стали. Объясняется это тем, что верхняя часть каждого слитка (13-20%) идет при прокатке в обрез из-за наличия усадочной раковины, а при непрерывной разливке образуется одна усадочная раковина в конце разливки плавки;

- упрощается и удешевляется производство в целом, т.к. исключаются два энергоемких этапа технологического процесса- прокатка слитков на обжимных станах (блюмингах и слябингах) и нагрев слитков до ~1100 °С в нагревательных колодцах перед прокаткой; при этом отпадает необходимость в блюмингах и слябингах, уменьшаются энергетические затраты, потребность в рабочей силе и площадь завода;

- повышается качество металла, в первую очередь вследствие снижения химической неоднородности из-за более быстрого затвердевания малых по толщине слитков;

- уменьшаются затраты ручного труда и улучшаются условия труда при разливке;

- создаются условия для автоматизации процесса разливки.

Существует несколько типов установок непрерывной разливки, основанных на вытягивании слитка из кристаллизатора с их взаимным скольжением. Широко применяемое устройство непрерывного разливки стали (УНРС) этого типа служат в основном для отливки слябов и слитков квадратного и прямоугольного сечения. Наибольшее распространение получили установки вертикального, криволинейного и радиального типов, реже применяются вертикально-радиальные УНРС, установки с изгибом слитка, горизонтальные УНРС.

Вертикальные УНРС. Из сталеразливочного ковша сталь поступает в промежуточный ковш, а из него – в кристаллизатор с вертикальными стенками, совершающий возвратно- поступательное движение вверх-вниз. После выхода из кристаллизатора слиток с жидкой сердцевиной движется вниз через зону вторичного охлаждения, включающую систему форсунок и опорные устройства,

которые могут быть выполнены в виде роликов или брусьев и предотвращает выпучивание корки слитка.

Криволинейные и радиальные УНРС. В установках этого типа в радиальном кристаллизаторе формируется изогнутый по определенному радиусу слиток. Чтобы при последующем разгибании в слитке не образовались трещины, радиус изгиба должен быть не менее 25-кратной толщины слитка. Обычно радиус изгиба выбирают в соответствии с соотношением $R = (30-40)a$, где a - толщина слитка, м. В радиальных УНРС по выходе из кристаллизатора слиток движется по дуге с постоянным радиусом. После прохождения нижней точки дуги полностью затвердевший слиток разгибают, переводя его в горизонтальное положение. В криволинейных УНРС слиток вначале движется по дуге, определяемой радиусом кривизны кристаллизатора, а затем еще в зоне вторичного охлаждения радиус кривизны дуги увеличивается, т.е. происходит постепенное разгибание слитка с жидкой сердцевиной с последующим переводом в горизонтальное положение. Схема подобной машины для отливки слябов представлена на рисунке 2.2.

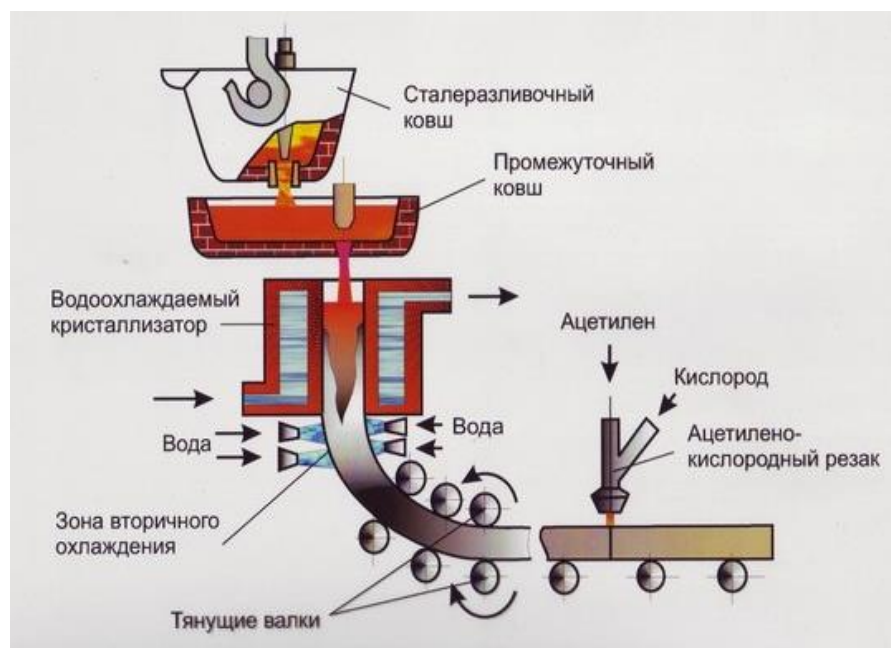


Рисунок 2.2- Криволинейная УНРС:

2.3 Прокатка листовой стали

В настоящее время наиболее распространенным способом производства труб остается формовка труб из листового проката. Листовой прокат получают из слитков сталей по технологии контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением, обеспечивающим формирование заданной (феррито-перлитной, феррито-бейнитной или бейнитной) структуры без последующей термообработки. Указанный контролируемый термомеханический процесс обеспечивает следующие преимущества:

- экономия на оборудовании и расходе энергии;
- возможность получения более мелкой зеренной структуры, обеспечивающей значительное зернограничное и субструктурное упрочнение и высокую вязкость стали;
- возможность использования низколегированных сталей для получения требуемых прочностных свойств.

Схема контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением представлена на рисунке 2.3.

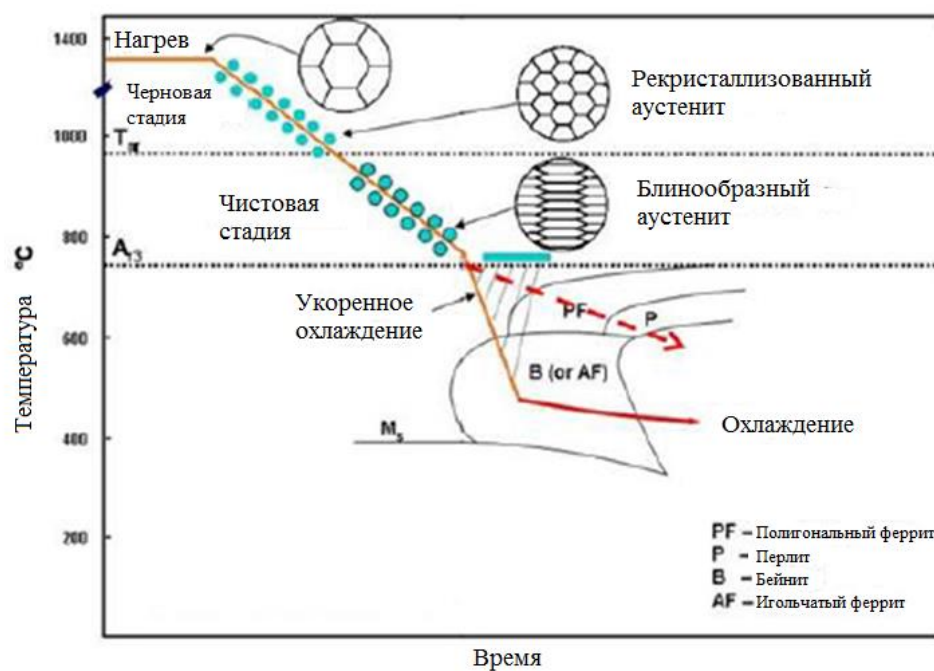


Рисунок 2.3– Общая схема контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением

Суть рассматриваемого контролируемого термомеханического процесса заключается в следующем.

Перед началом прокатки слиток нагревают до высоких температур (порядка 1150-1250 °С). При таком высоком нагреве неизбежен рост аустенитного зерна. Конечный размер зерна после нагрева можно уменьшить путём введения в сплав добавок титана и ниобия, образующих трудно растворимые карбонитриды, сдерживающие рост аустенитных зерен. Тем не менее, аустенитное зерно при таком высоком нагреве вырастает до размеров порядка 200 -500 мкм.

Черновая прокатка осуществляется в области высоких температур (выше 1000 °С), где в ходе деформации может развиваться динамическая рекристаллизация, а в междеформационных паузах успевает пройти статическая рекристаллизация деформированного аустенита. В результате многократных процессов рекристаллизации исходное зерно аустенита после черновой прокатки измельчается до размеров порядка 20 – 50 мкм.

Чистовую прокатку проводят ниже температуры T_{nr} , называемой температурой остановки рекристаллизации, т.е. в интервале температур, где рекристаллизация аустенита в междеформационных паузах не успевает пройти. Значение температуры T_{nr} повышают легированием. Особенно сильно повышают температуру T_{nr} микродобавки ниобия по следующим причинам. 1) Атомы ниобия, оставаясь в твердом растворе, резко уменьшают подвижность границ зерен и тормозят кинетику рекристаллизации. 2) Деформация инициирует выделение частиц Nb(C,N), которые дополнительно блокируют границы аустенитного зерна.

В результате, к концу чистовой прокатки формируется структура, состоящая из деформированных сплюснутых зерен аустенита с высокой плотностью дислокаций и развитой субзеренной структурой.

При последующем охлаждении ниже A_{r3} деформированная аустенитная структура способствует зародышеобразованию феррита на границах зерен и субзерен и формированию мелкого (до 5 мкм) ферритного зерна. С ростом

скорости охлаждения происходит дальнейшее диспергирование конечной структуры за счет: понижения температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения; перехода от феррито-перлитной к феррито-бейнитной, а затем к бейнитной структуре.

Внедрение метода контролируемой прокатки позволило снизить содержание углерода в трубных сталях (до 0,1%) и повысить их вязкость и свариваемость. Применение ускоренного охлаждения позволило существенно увеличить прочность и вязкость трубных сталей за счет перехода от феррито-перлитной к феррито-бейнитной структуре с развитой субструктурой (стали К60, К65, К70).

2.4 Производство сварных труб

Процесс производства сварных труб состоит из следующих этапов: подготовка листа металла, обработка его кромок, формовка заготовок, их сварка, окончательная отделка труб. Способ конкретной реализации этих процессов зависит от диаметра производимых труб.

Сварные трубы малого и среднего диаметра изготавливают непрерывной валковой формовкой листов на трубоформовочном стане с последующей электрической или индукционной сваркой кромок (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Непрерывная валковая формовка труб с последующей электросваркой или индукционной сваркой кромок

Для производства сварных труб большого диаметра широко используют *UOE* – процесс. На первом этапе UOE-процесса производится формовка листа, которому пуансоном придают U-образную форму. Затем края листа загибают для придания листу O-образной формы, а сами края сваривают электросваркой.

Окончательный этап – экспандирование (Е) – заключается в раздаче сваренной трубы для придания ей цилиндрической формы.

В последние годы на рынке производства сварных труб большого диаметра применяются трубы, изготовленные с использованием процесса шаговой формовки (JSOE-процесс). Процесс шаговой формовки осуществляется следующим образом. После формовки на кромкогибочном прессе лист с предварительно обработанными и загнутыми кромками устанавливается манипуляторами в положение гибки на трубоформовочном прессе и подвергается процессу поэтапной формовки по всей длине с помощью пуансона, размеры которого выбираются в соответствии с размерами готовой трубы. На первом этапе лист загибается только с одной стороны, в результате чего получается сечение J-образной формы. Затем лист перемещается на другую сторону, и второй манипулятор устанавливает его для изгиба с другой стороны. В результате, листовая заготовка получает С-образный профиль, а на последней стадии – О-образный профиль с открытым швом и плоскопараллельными кромками. После электросварки кромок труба подвергается экспандированию (Е). Процесс пошаговой формовки труб выделяется особенной гибкостью в отношении диаметра, толщины стенки и трубного проката



Рисунок 2.5 – Пошаговая формовка труб большого диаметра

2.5 Производство бесшовных труб

При необходимости обеспечения высокой надёжности и прочности трубопроводных систем активно используются бесшовные трубы.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Бесшовная труба - это цельный металлопрокат, который не имеет продольного либо спирального сварного шва или какого-либо другого типа соединения. В большинстве случаев при производстве таких элементов используются специализированные станки. За счёт применения особой технологии производства удаётся добиться достаточно высоких технических характеристик, которые позволяют использовать такие трубы в особенно сложных эксплуатационных условиях.

Бесшовные трубы производят с толщиной стенок до 100 мм и наружным диаметром до около 700 мм. Такие трубы, как правило, используются для морских трубопроводов и труб нефтяного сортамента, а также для промышленности и в автомобильном строительстве. От бесшовных труб во многих случаях требуется высокая вязкость в дополнение к высокой прочности. Различные процессы прокатки, применяемые в производстве, зависят от требуемой толщины стенки и диаметра трубы [15-17]. Непрерывный стан используется для производства малых калибров и диаметров; автоматический стан охватывает средние калибры и диаметры. Пилигримовый стан позволяет производить трубы больших диаметров. Деформация и график температуры во время прокатки бесшовных труб, естественно, зависят от типа процесса. Однако, для всех процессов, как правило, после прокатки приходится применять термическую обработку - закалку и высокий отпуск.

Рассмотрим основные стадии технологического процесса производства бесшовных труб методом горячей прокатки, который состоит из 3-х стадий.

Получение полой толстостенной гильзы и сплошной круглой заготовки называется прошивкой. Затем для уменьшения диаметра и толщины стенки гильзу подвергают деформации на оправке в раскатных станах. После раскатки для повышения качества поверхности и более точных размеров трубы ее подвергают горячей отделке: прокатке, калибровке или редуцированию.

Прошивка заготовки осуществляется в прошивном стане в интервале температур 1260–1200°C. Существуют несколько типов прошивных станов,

отличающихся конструкцией клетки и формой рабочих валков (дисковых, бочкообразных, грибовидных). Для прошивки заготовки в гильзу чаще всего используют клетки с косорасположенными бочкообразными валками, вращающимися в одном направлении (рисунок 1.2).

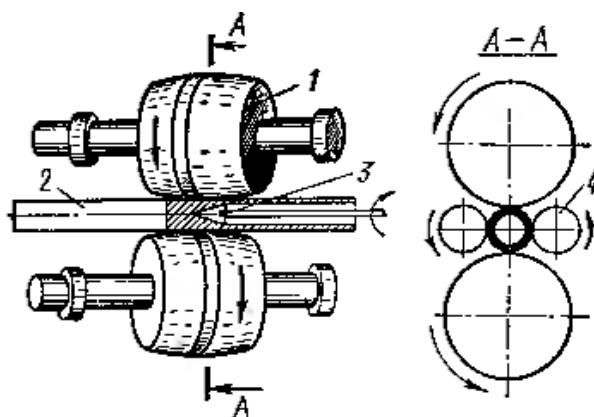


Рисунок 2.6 - Схема прошивного стана с бочкообразными валками

Полученная на прошивном стане гильза подвергается раскатке в трубу требуемого диаметра и толщины стенки различными способами

После прошивки гильза переносится в непрерывный или пилигримовый стан и подвергается раскату в трубную заготовку. В процессе раската температура заготовки падает от 1150°С до примерно 950°С. Различные процессы прокатки, применяемые в производстве, зависят от требуемой толщины стенки и диаметра трубы. Непрерывный стан используется для производства малых калибров и диаметров; автоматический стан охватывает средние калибры и диаметры; пилигримовый стан позволяет производить трубы больших диаметров. При производстве труб ответственного назначения применяют катаную заготовку.

На пилигримовых станах раскатка трубы осуществляется двумя валками с калибром переменного профиля (рисунок 1.3). Валок пилигримового стана, имеет ручей переменной ширины и высоты по окружности и делится на две части: холостую, где диаметр калибра больше диаметра гильзы, и рабочую, состоящую из рабочей и полирующей участков. Прокатные валки вращаются в направлении, обратном направлению прокатки.

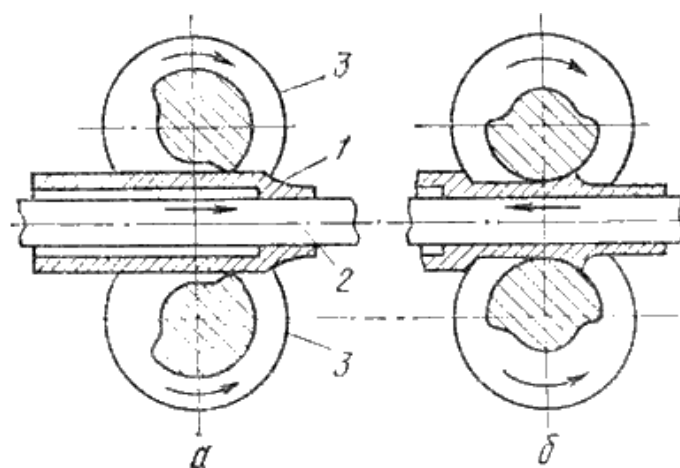


Рисунок 2.7 – Схема прокатки труб на пилигримовом стане:

1 – гильза, 2 – оправка, 3 – валки.

Процесс работы на пилигримовой клети заключается в периодической подаче гильзы вместе с дорном (на 20...30 мм) в зазор между валками в момент совпадения холостой части ручья обоих валков. При дальнейшем вращении валков осуществляется процесс прокатки, и гильза перемещается в направлении, которое совпадает с направлением вращения валков, т.е. обратном ходу трубы.

Калибровка. Придание окончательных размеров трубе по диаметру производится на калибровочном стане, состоящем из 5...7 клеток дуо, расположенных непрерывно. Клетки калибровочного состояния устанавливают на общей раме таким образом, что оси валков попеременно в разные стороны образуют с горизонтом угол 45° , а угол между осями валков соседних клеток составляет 90° . Таким образом, труба при прокатке деформируется в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При прокатке в калибровочном стане происходит некоторое уменьшение диаметра изделия и незначительное увеличение толщины стенки.

Завершающей технологической операцией для всех способов раскатки труб является операция охлаждения изделий на охлаждающих столах.

После горячей прокатки и охлаждения на воздухе в бесшовных трубах формируется крупнозернистая феррито-перлитная структура, не обеспечивающая

требуемый уровень свойств прочности и вязкости. По этой причине горячекатаные трубы подвергают закалке и высокому отпуску.

Для закалки готовая труба нагревается до аустенитного состояния. Температура нагрева должна быть не ниже, чем температура A_{c3} перехода, и не выше 1000°C . Предпочтительно она должна быть в интервале от 900 до 1000°C . Температура не ниже температуры A_{c3} требуется для превращения структуры продукта в аустенит для осуществления последующего процесса закалки. Кроме того, причиной, по которой задана температура 1000°C как верхний предел, является следующая: поскольку зерно в структуре изделия становится крупным, когда изделие нагревают выше 1000°C , это вызывает понижение ударной вязкости изделия после процесса закалки. Более того, поскольку в структуре изделия перед водяным охлаждением выделяется феррит, когда начальная температура закалки ниже температуры A_{c3} перехода, достаточное отверждение при закалке не достигается, и это вызывает ухудшение прочности и ударной вязкости изделия. Причиной, почему температура 900°C является предпочтительной в качестве нижнего предела температуры подогрева, является предотвращение вышеупомянутых вредных эффектов.

Время выдержки при температуре аустенитизации должно быть достаточным для того, чтобы образовать аустенитную структуру во всем изделии.

Закалку осуществляют, помещая трубу в закалочное устройство, способное одновременно охлаждать водой бесшовные трубы и изнутри, и снаружи, для равномерной закалки толстой бесшовной трубы.

Далее осуществляют высокий отпуск закаленной трубы. Для этого трубу нагревают до $630 - 730^{\circ}\text{C}$, выдерживают от 30 до 60 минут и затем охлаждают на воздухе.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ОТВОДОВ

3.1 Назначение отводов и способы их производства

Отвод – фасонная деталь трубопровода, предназначенная для изменения направления потока транспортируемого продукта (рисунок 3.1). Отводы находят широкое применение в коммунальном хозяйстве, нефтяной и газовой промышленности, а также как элементы строительных конструкций.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28



Рисунок 3.1 – Отводы гнутые

Главными геометрическими характеристиками отводов являются:

- угол изгиба φ , на который поворачивает поток;
- отношение радиуса кривизны R к внешнему диаметру трубы D_n ,

Наименьший радиус кривизны $R=(1.0\div 1.5)D_n$ имеют крутоизогнутые отводы, изготавливаемые из бесшовных труб способом горячей протяжки по рогаобразному сердечнику на специализированных гидравлических прессах или штамповкой. Крутоизогнутые отводы имеют одинаковую толщину стенки на выпуклой и вогнутой стороне и небольшие габариты. Их применение обеспечивает компактное расположение трубопроводов и оборудования и, как следствие, экономию производственной площади. Однако операции горячего прессования или штамповки энергоемки и во многих случаях неэффективны.

По этой причине основным способом производства отводов является гибка труб до заданного радиуса кривизны на трубогибочных станках в холодном и горячем состоянии. Холодная деформация труб может привести к уменьшению ресурса пластичности отводов, образованию гофр и изломов на внутренней части трубы. Поэтому отводы холодного гнутья изготавливают с малым углом изгиба (с большим радиусом кривизны), при котором величина деформации не превышает 1-3%. Гибка труб на большие углы изгиба (т.е. меньшие радиусы кривизны)

осуществляется в горячем состоянии с применением узкозонального нагрева токами высокой частоты (ТВЧ).

Принципиальная схема гибки труб с индукционным нагревом приведена на рисунке 3.2.

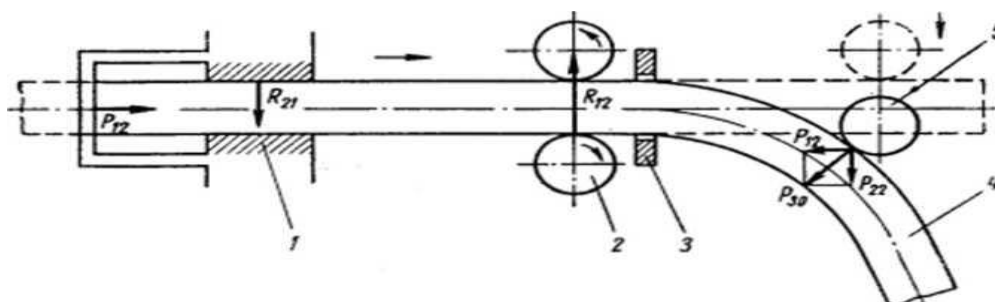


Рисунок 3.2 – Схема гибки труб с индукционным нагревом: 1 - каретка зажина; 2 - направляющие ролики; 3- индуктор; 4-изгибаемая труба; 5 - нажимной ролик

Труба подается через направляющие ролики в сторону индуктора, который нагревает локальный участок трубы. За счет перемещения нажимного ролика (в вертикальной плоскости рисунка) происходит изгиб трубы в нагретом участке под индуктором. Сразу после выхода из индуктора труба охлаждается струей воды для того, чтобы предотвратить нежелательную деформацию трубы вне зоны нагрева. Вода подается через отверстия в индукторе (рисунок 3.3) либо используется отдельный охлаждающий контур.



Рисунок 3.3 – Индуктор, выполняющий роль спрейера в системе водяного охлаждения отвода

Качество гибки определяется эллипсностью сечения после гибки, изменением толщины стенки изогнутой трубы по окружности и изменениями механических свойств и структуры стали. Практика показывает, что при выборе оптимальных режимов гибки с индукционным нагревом эллипсность не превышает 2—3%, изменение толщины стенки не превышает 5%.

3.2 Физические принципы индукционного нагрева

Сущность индукционного нагрева заключается в следующем (рисунок 3.3). Переменный ток, протекающий через индуктор, создает переменное магнитное поле. По закону электромагнитной индукции переменное магнитное поле индуцирует в токопроводящей заготовке (трубе) вихревые токи (токи Фуко). Прохождение токов сопровождается выделением тепла, которое нагревает заготовку. Количество выделившегося тепла определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 R \tau , \quad (3.1)$$

где I – сила тока, R – электрическое сопротивление материала заготовки; τ – время нахождения заготовки в переменном магнитном поле.

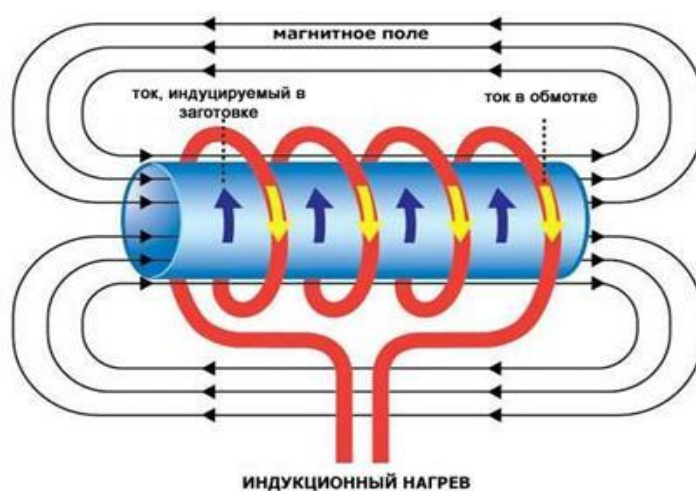


Рисунок 3.3– Принцип индукционного нагрева

Плотность токов Фуко максимальна у поверхности заготовки и убывает при удалении от поверхности по экспоненциальному закону (рисунок 3.4).

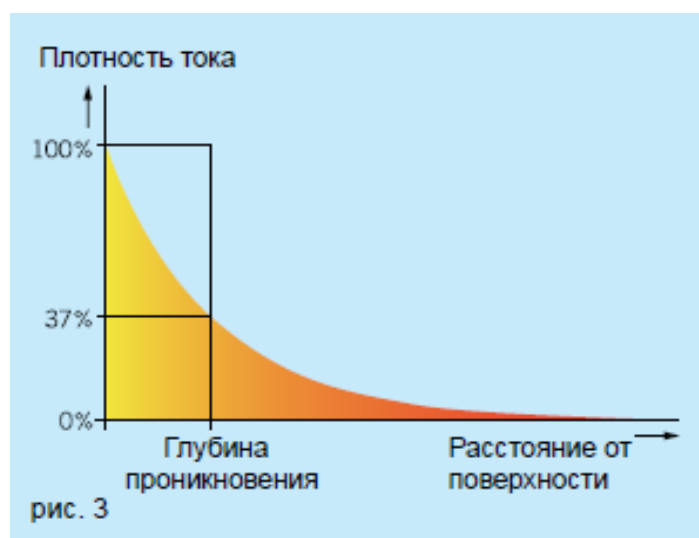


Рисунок 3.4 – Изменение плотности токов Фуко с увеличением расстояния от поверхности заготовки

Расстояние от поверхности нагреваемого предмета до глубины, где плотность тока снижается до 37% (в e раз, где e – основание натурального логарифма) называется глубиной проникновения. Значение этой глубины возрастает по мере уменьшения частоты тока.

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \text{ (мм)}. \quad (3.2)$$

Здесь ρ – удельное электрическое сопротивление заготовки (Ом·см); μ – магнитная проницаемость; f – частота тока (Гц), протекающего по индуктору. Если заготовка нагрета выше температуры Кюри стали, то в парамагнитном аустените $\mu = 1$.

Учитывая, что при температурах порядка 1000°С малоуглеродистые низколегированные стали имеют удельное электрическое сопротивление порядка 10^{-4} Ом·см, получаем из (5.2) следующее приближенное выражение для глубины проникновения:

$$\delta \cong \frac{500}{\sqrt{f}} \text{ (мм)} \quad (3.3)$$

Глубина проникновения тока δ может быть принята за глубину нагрева металла, так как именно в этом слое выделяется основная часть тепловой

энергии (86%).

Токи высокой частоты для индукционного нагрева металлов получают в специальных установках – высокочастотных генераторах. Используемая на практике частота тока варьируется в интервале от 500 до 80 000 Гц.

3.3 Оптимизация технологических параметров горячего гнущего

На качество гнутых отводов, производимых с использованием индукционного нагрева, влияет ряд технологических факторов, рассмотренных ниже.

1. Первой задачей в отработке технологического процесса производства гнутых отводов является обеспечение однородного индукционного нагрева сечения трубы до заданной температуры. Для обеспечения однородного распределения температуры по сечению стенки трубы глубина проникновения тока должна превышать толщину стенки трубы t (мм):

$$\delta \geq t \quad (3.4)$$

Условие (3.4) выполняется, если

$$f \leq \frac{2,5 \cdot 10^7 \rho}{t^2}. \quad (3.5)$$

Из выражения (3.5) следует сильная зависимость допустимой частоты тока от толщины стенки трубы (рисунок 3.5).

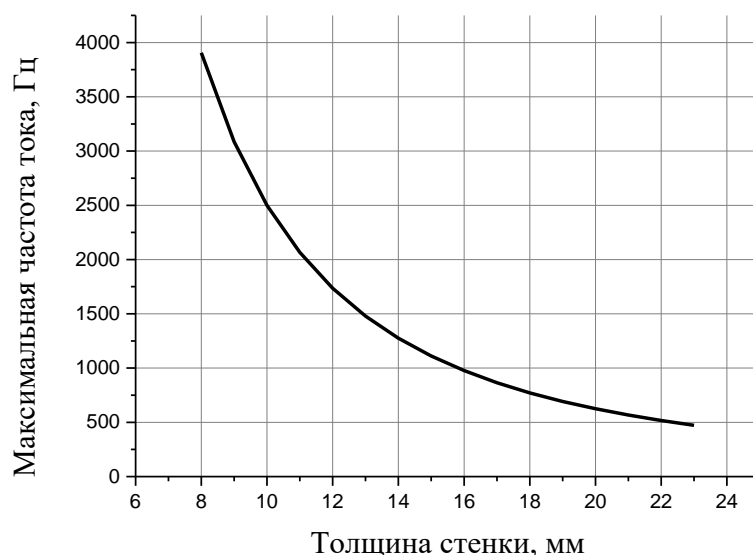


Рисунок 3.5 – Зависимость максимальной частоты тока от толщины стенки трубы.

Расчет выполнен по выражению (3.5) с использованием значения $\rho = 10^{-4}$ Ом·см

Согласно зависимости, представленной на рисунке 3.5, при толщине стенки 10 мм частота тока для сквозного прогрева трубы не должна превышать 2500 Гц, тогда как при толщине стенки 16 мм значение частоты тока должно быть ниже 1000 Гц

Выражение (3.5) носит приближенный характер. Поэтому убедиться в том, что выбранная частота тока обеспечивает сквозной прогрев стенки трубы и относительную равномерность температуры по ее сечению можно только экспериментально, например, производя закалку трубы после индукционного нагрева с последующим изучением распределения размера зерен аустенита по сечению стенки трубы.

2. Одна из главных задач обеспечения высокого качества геометрических параметров гибки – получение минимальной по ширине зоны нагрева. Индуктор в виде бесконечно тонкого провода, находящегося на расстоянии h от трубы, создает зону нагрева шириной, увеличивающейся с ростом величины зазора h :

$$l_h = \frac{\pi}{2} h, \quad (3.6)$$

Если индуктирующая шина индуктора имеет конечную толщину l_i , то ширина полосы нагрева будет зависеть от отношения толщины индуктора и величины зазора:

$$\begin{aligned} \text{если } \frac{l_i}{h} \geq \frac{\pi}{2}, \text{ то } l_h \approx l_i, \\ \text{если } \frac{l_i}{h} < \frac{\pi}{2}, \text{ то } l_h = \frac{\pi}{2}h. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Из (3.7) следует, что при использовании индуктора шириной более $\pi h / 2$ ширина полосы нагрева будет ограничена шириной индуктора.

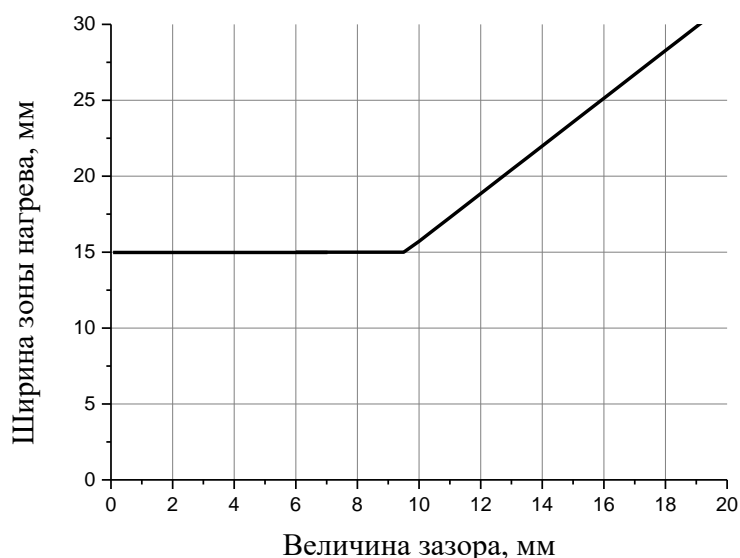


Рисунок 3.6 – Зависимость ширины зоны нагрева от величины зазора между индуктором и трубой. Ширина шины индуктора 15 мм

Если же индуктор узкий с шириной менее $\pi h / 2$, то он будет создавать такую же зону нагрева, что и бесконечно тонкий провод и, соответственно зона нагрева выйдет за пределы шины индуктора и будет расти с увеличением величины зазора (рисунок 3.6). По этим причинам считается, что оптимальная величина зазора между индуктором и трубой должна примерно в 1,5 раза меньше ширины индуктора. Например, если реальные зазоры при гибке составляют 5–8 мм, то оптимальная ширина индуктирующего провода лежит в пределах 10–16 мм.

3. При прочих заданных условиях процесса температура нагрева участка трубы определяется количеством выделившегося в нем тепла:

$$Q = I^2 R \tau = mc_p (T - T_0). \quad (3.7)$$

Здесь I – сила тока в трубе; R – сопротивление трубы; τ – время нагрева; m – масса нагреваемого участка; c_p – удельная теплоемкость; T и T_0 – конечная и начальная температура зоны нагрева. Таким образом, возникает еще одна практически важная задача: подобрать силу тока, обеспечивающую нагрев до заданной температуры T за время нахождения элемента поверхности трубы в зоне нагрева.

Существуют расчетные методы оценки силы тока индуктора, однако они не обладают требуемой точностью. По этой причине чаще всего требуемая для нагрева до заданной температуры сила тока подбирается экспериментально.

4. Спрейер для охлаждения нагретой зоны не обязательно конструктивно привязывать к индуктору. Отдельно установленный спрейер можно выполнить с достаточной шириной. Его грань, прилегающая к охлаждаемой поверхности должна иметь толщину не менее 5 мм для обеспечения определенного направления струи. Наиболее эффективное охлаждение с минимальным расходом воды достигается при направлении струи под углом порядка 60° к оси трубы. Внутренний диаметр спрейера должен быть на 10–15 мм больше диаметра индуктора для предотвращения расширения зоны нагрева трубы вследствие протекания по спрейеру тока. Во всех случаях спрейер выполняется электрически разомкнутым. Вода не должна заливать нагреваемый пояс.

3.4 Термическая обработка гнутых отводов

Исходные трубы, из которых изготавливают гнутые отводы, имеют структуру и механические свойства, отвечающие их классу прочности, указанному в сертификате поставщика труб. Структура и механические свойства сварных труб формируются еще на этапе контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения листовой стали. Структура и механические свойства бесшовных труб формируются в процессе объемной термической обработки

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

горячекатаных труб.

Индукционный нагрев при гибке труб осуществляется до температур, превышающих температуры A_{c1} и A_{c3} фазовых превращений в сталях и, поэтому, сопровождается структурными изменениями и, соответственно, изменениями механических свойств гнутых отводов.

Особенно сложная ситуация складывается при гнутье толстостенных труб с толщиной стенки более 40 мм. В этом случае обеспечить однородность температуры нагрева по всему сечению стенки трубы не удастся. Оказывается разной и скорость охлаждения. В результате, в толстостенных отводах формируется неоднородная по сечению структура с неоднородными механическими свойствами. По этой причине толстостенные отводы, как правило, после операции горячего гнутья подвергаются объемной термообработки: закалке с последующим отпуском или нормализации.

Для тонкостенных отводов допускается вместо отдельной операции объемной термообработки применять индукционную термообработку непосредственно в технологическом процессе изготовления отвода. В этом случае для обеспечения приемлемых механических свойств требуется:

- ограничить температуру индукционного нагрева, не допуская роста аустенитного зерна;
- обеспечить контролируемое охлаждение отвода со скоростями, приводящими к формированию феррито-перлитной или феррито-бейнитной структуры (без мартенситной составляющей в структуре).

Такая возможность реализована на многих специализированных предприятиях по производству отводов, в частности, на предприятии СОТ (г. Челябинск), где требуемая структура и свойства гнутых отводов обеспечиваются контролируемым нагревом и охлаждением зоны деформации в условиях индукционной гибки трубных заготовок (без последующей объемной термообработки).

4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГНУТЫХ ОТВОДОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

4.1 Постановка задачи, материал и методика исследований.

В настоящем разделе изложены результаты исследований, выполненных по заказу одного из крупных металлургических предприятий города Челябинска, которое имеет небольшой участок производства горячегнутых отводов из тонкостенных труб (10-16 мм). В рамках работы требовалось оценить качества выпускаемых отводов и выработать рекомендации по его повышению. Объемная термообработка гнутых отводов на предприятии не производится.

Материалом исследования явилась горячекатаная труба из стали 13ХФА внешним диаметром 156 мм с толщиной стенки 10 мм, а также гнутый отвод из этой трубы, произведенный по стандартной заводской технологии. Химический состав стали 13ХФА приведен в таблице 6.1.

Таблица 4.1– Марочный состав стали 13ХФА в весовых процентах

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Al	Cu
0,11- 0,17	0,17- 0,37	0,4- 0,65	<0,25	<0,015	,0,015	0,5-0,7	0.04- 0,09	0,008	0,02- 0,05	,0,25

Температуры критических точек стали 13ХФА: $A_{c1} = 760^{\circ}\text{C}$, $A_{c3} = 860^{\circ}\text{C}$. Индукционный нагрев трубы в заводских условиях осуществлялся при частоте тока 2400 Гц. Температура нагрева контролировалась по свечению трубы и составляла не менее 1100°C .

Образцы для исследования микроструктуры и твердости в форме полнотолщинных сегментов поперечного сечения трубы были вырезаны из четырех участков трубы в состоянии поставки, а также из участков выпуклой, вогнутой и боковых стенок гнутых отводов.

Травление микрошлифов производилось в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктурные исследования выполнены на оптическом микроскопе C.Zeiss Observer. Измерение твердости проводилось на твердомере Роквелла ТР 5014.

4.2 Результаты исследования

В состоянии поставки труба имеет однородную структуру, как по периметру, так и по толщине стенки трубы (рисунок 6.1). Структура состоит из зерен мелкозернистого феррита с размером зерен около 10 мкм и участков перлитной составляющей.

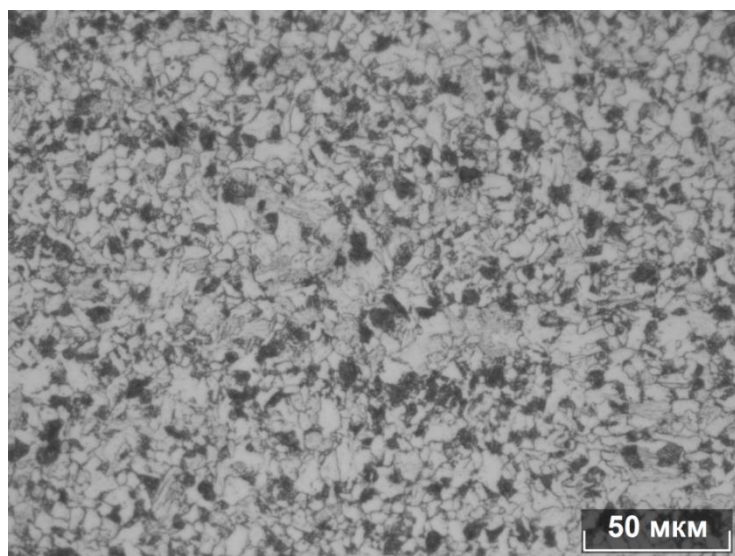
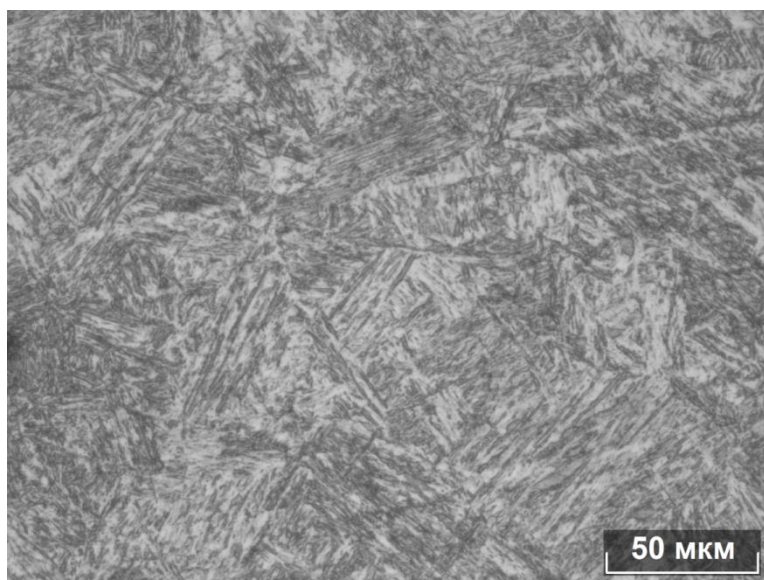


Рисунок 4.1– Микроструктура трубы из стали 13ХФА в состоянии поставки

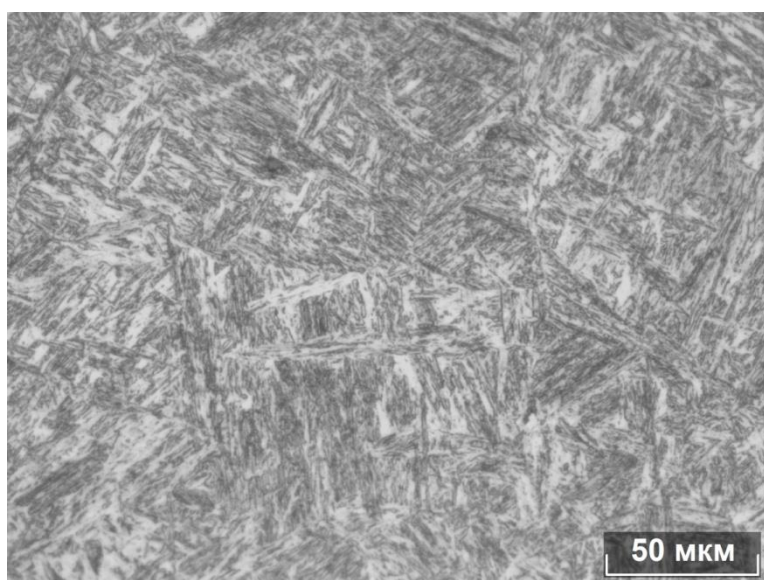
Твердость трубы в состоянии поставки составляет 172 НВ при максимально допустимом значении 192 НВ.

После гибки с использованием индукционного нагрева структура стали претерпела существенные изменения.

Выпуклая стенка трубы имеет по всему сечению мартенситную структуру (рисунок 4.2).



а)



б)

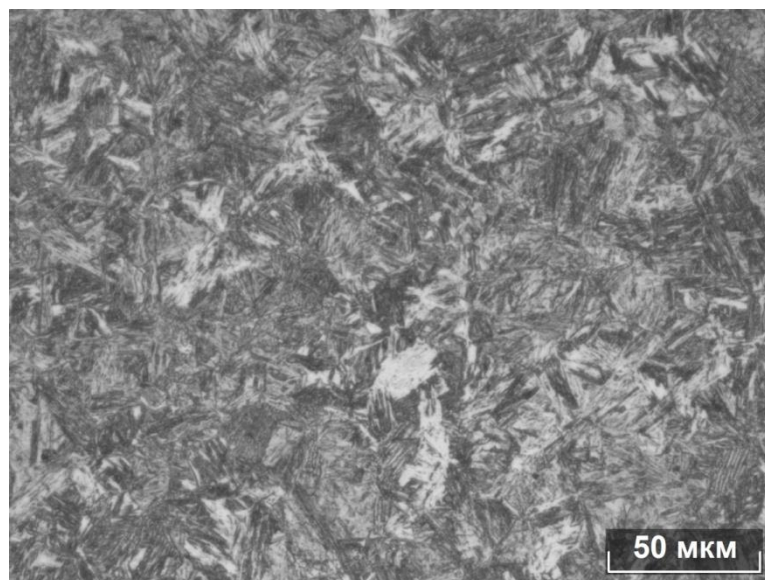
Рисунок 4.2 – Микроструктура выпуклого участка отвода: а) внешняя сторона; б) внутренняя сторона стенки

Мартенситная структура свидетельствует о высокой скорости охлаждения (закалке), подавляющей распад аустенита по диффузионному механизму. Длина мартенситных реек в наружных участках стенки отвода достигает 100 мкм (рисунок 4.2, а), что указывает на формирование при нагреве крупного аустенитного зерна в результате чрезмерно высокой (выше 1100°С) температуры нагрева. Во внутренних участках той же стенки отвода мартенситные кристаллы

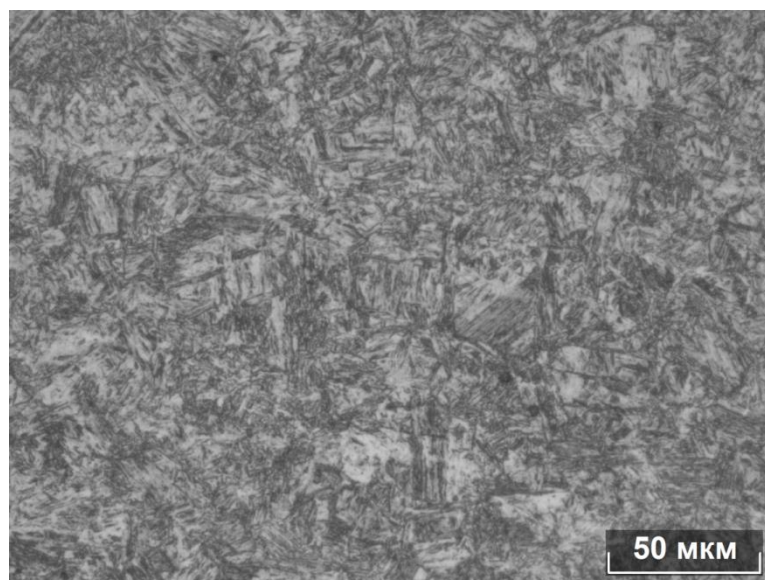
					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

несколько короче, а размер аустенитных зерен меньше, чем в наружных участках (рисунок 4.2, б). Очевидная причина этой структурной неоднородности – температурный градиент по толщине стенки отвода.

В боковых стенках отвода также формируется мартенситная структура (рисунок 4.3).



а)



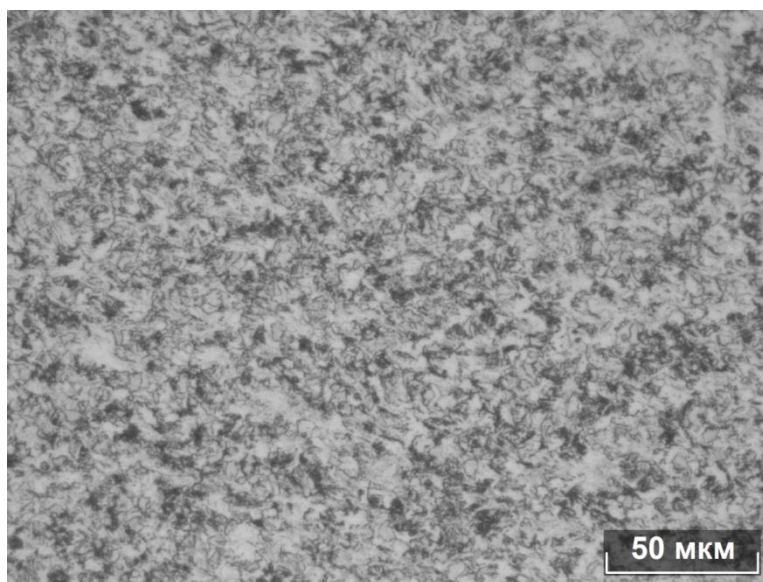
б)

Рисунок 4.3– Микроструктура боковых стенок отвода: а) верхняя стенка; б) нижняя стенка

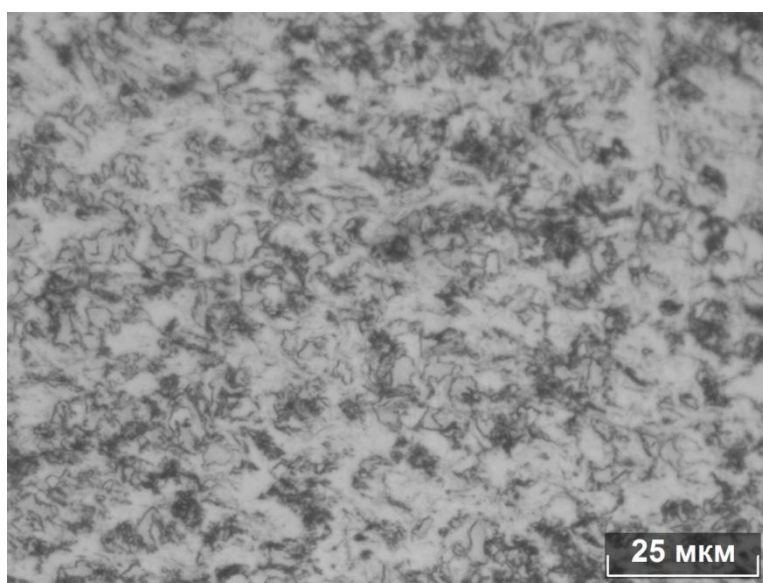
Более высокая дисперсность мартенситной структуры свидетельствует о том, что боковые стенки нагревались до более низкой температуры в сравнении с

выпуклыми стенками отвода. Скорость охлаждения боковых стенок также высока и превышает критическую скорость закали.

Структура в вогнутой стенке отвода отличается как от структуры трубы в исходном состоянии, так и от рассмотренных выше структур и представляет собой смесь мелкозернистого феррита и участков перлита и бейнита (рисунок 4.4).



а)



б)

Рисунок 4.4 – Микроструктура вогнутого участка отвода

Наблюдаемая структура означает, что температура нагрева вогнутой стенки превышала температуру A_{c3} , но была значительно ниже температуры нагрева

выпуклых и боковых стенок, а скорость охлаждения вогнутой стенки была ниже критической скорости закалки.

Результаты измерений твердости исследованных образцов, согласуются с результатами структурных исследований (таблица 4.2).

Таблица 4.2 –Твердость исследованных образцов

Образец	Твердость по Роквеллу,	Твердость по Бринеллю, НВ
Исходная труба	87 HRB	172
Выпуклый участок	40 HRC	370
Боковой верхний участок	39 HRC	360
Боковой нижний участок	39 HRC	360
Вогнутый участок	92 HRB	195

Твердость трубы в состоянии поставки (172 НВ) с феррито-перлитной структурой удовлетворяет техническим требованиям (<192 НВ). Все исследованные участки гнутого отвода имеют твердость, превышающую предельно допустимое значение.

Таким образом, установлено, что в процессе гибки с последующим водяным охлаждением в выпуклых и боковых стенках отвода с толщиной стенки 10 мм формируется крупнозернистая закалочная (мартенситная) структура с высокой твердостью, тогда как внутренние (вогнутые) стенки отвода имеют феррито-перлитную или феррито-бейнитную структуру с более низкой твердостью, но, тем не менее, превышающей твердость исходной трубной заготовки и максимально допустимое значение 192 НВ. Очевидно, что отводы с такой структурой в силу высокой твердости и низкой вязкости выпуклых и боковых стенок не могут вводиться в эксплуатацию.

В ходе визуального знакомства с технологическим процессом изготовления гнутых отводов на оборудовании предприятия были выявлены следующие особенности, способные повлиять на качество продукции.

1. Трубогибочный стан настраивается таким образом, что трубная заготовка подается в зону нагрева асимметрично относительно оси индуктора: зазор между индуктором и выпуклой стороной трубы при ее гибке оказывается значительно меньше, чем зазор между индуктором и вогнутой стороной трубы. В результате, выпуклая сторона трубы нагревается до более высокой температуры, чем ее противоположная сторона.

2. Для нагрева труб разного диаметра зачастую используется один и тот же индуктор, так что даже минимальный зазор между индуктором и трубой может достигать нескольких сантиметров, многократно превышая ширину индуктора. Как следствие, зона нагрева трубы оказывается недопустимо широкой.

3. Температура нагрева, как правило, не контролируется (определяется «на глаз» по цвету свечения).

4. Выпуклая сторона трубы, приближенная к индуктору, одновременно выполняющему функцию спрейера системы охлаждения, испытывает более интенсивное охлаждение по сравнению с вогнутой стороной.

5. Направление потока воды не регулируется, что не исключает падение водяного потока непосредственно на зону нагрева.

Таким образом, причинами неудовлетворительной структуры и механических свойств отводов являются:

1) значительные различия в температуре нагрева и скорости охлаждения разных участков отвода, обусловленные асимметричной подачей трубы в индуктор;

2) чрезмерно высокая температура нагрева выпуклых участков отвода, в результате чего в этих участках формируется крупное аустенитное зерно;

3) чрезмерно быстрое охлаждение выпуклых и боковых участков отвода, приводящее к формированию в них закалочных структур.

На основании выполненных исследований заказчику работы предложены следующие рекомендации.

1. Радикальным способом устранения обнаруженной структурной неоднородности и обеспечения требуемых механических характеристик является термическая обработка гнутых отводов в одном из двух вариантов: 1) нормализация (или ускоренное охлаждение) от температур порядка 900-930°C; 2) закалка от тех же температур с последующим отпуском. Оба варианта термической обработки предполагают приобретение печи с рабочей зоной длиной более 4-х метров и рабочей температурой до 1100°C. Тепловой расчет печи выполнен в квалификационной работе и приведен в Приложении. Однако термическая обработка не устраним повышенную овальность производимых отводов. Кроме того, вызывает сомнения экономическая целесообразность организации собственного термического участка в силу невысоких объемов производства отводов предприятия. Поэтому перед принятием решения о создании участка объемной термообработки целесообразно провести оценку его рентабельности.

2. Учитывая, что предприятие ориентировано на производство тонкостенных отводов, целесообразно провести корректировку технологического процесса и совместить гибку отводов с их индукционной термической обработкой, что без дополнительных капитальных затрат позволит предприятию повысить качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции. С этой целью рекомендовано:

- обеспечить симметричную подачу трубы в индуктор;
- обеспечить контроль температуры индукционного нагрева и понизить температуру нагрева трубы до уровня $A_{c3}+50^{\circ}C$;
- уменьшить интенсивность подачи воды и не допускать ее попадания на зону нагрева для предотвращения образования мартенситных структур.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

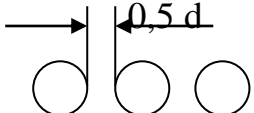
1. Технология и оборудования трубного производства/ В. Я. Осадчий, В. Г. Вавилин, А. П. Зимовец, А. П. Коликов А. П.; –М.: «Интермет Инжиниринг», 2007.-560 с.
2. Марочник сталей и сплавов: Машиностроение/ Под ред.В.Г. Сорокина – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Корягин Ю.Д. Индукционная закалка сталей: учебное пособие/Ю. Д. Корягин, В. И. Филатов.- Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.- 52 с.
4. Корягин, Ю.Д. Тепловые и электрические расчеты термических печей: учебное пособие/ Ю.Д. Корягин. – 2-е изд. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 178с.
5. Смирнов М.А., Счастливец В.М. Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали: Учебное пособие – Екатеринбург: УРО РАН, 1999 – 496.
6. Машины и агрегаты для производства стальных труб: учебное пособие/ Ю. Ф. Шевакин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007.-388 с.
7. Бровман М. Я. Непрерывная разливка металлов/ М. Я. Бровман. - М.: «ЭКОМЕТ», 2007- 484 с.
8. Бодажков В. А. Индукционный нагрев труб/ В. А. Бодажков.: Изд-во «Машиностроение» 1969.- 152 с.
9. Термическая обработка в машиностроении: Справочник Т35 ник/Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783с.
- 10.СТО Газпром 2-4.1-713-2013. Технические требования к трубам и соединительным деталям – М.: «Газпром экспо». 2014. – 146 с.

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ ИЗ СТАЛИ 13ХФА

Проводится расчет времени нагрева заготовок из стали 13ХФА в электрической камерной печи, исходные данные для расчета представлены в таблице П1.1.

Таблица П1.1 – Исходные данные для расчетов

Эскиз детали		
Характеристика детали	d, мм	160
	l, мм	3500×1500
	Марка стали	13ХФА
Температура нагрева, °С		970
Размеры рабочего пространства печи, мм	В	2000
	L	4000
	Н	2000
Толщина слоев кладки боковой стенки, мм	Шамот класса «А»	700
	Диатомитовый кирпич Д-500	800
Толщина слоев кладки торцевой стенки, мм	Шамот класса «А»	700
	Диатомитовый кирпич Д-500	800
Толщина слоев кладки свода, мм	Шамот класса «Б»	800
	Диатомитовый кирпич Д-500	1000
Толщина слоев кладки пода, мм	Шамот класса «А»	950
	Шамот-легковес ШЛ-1,3	850

Рассчитаем время нагрева изделий из стали 13ХФА в электрической печи постоянного действия. Три детали диаметром 160 мм, длиной 11,42 мм расположены на поддоне с расстоянием между ними $0,5d = 20$ мм. Температура нагрева изделий 970°С, температура печи 1000°С.

После загрузки холодного изделия в печь происходит интенсивный нагрев его поверхностных слоев. Нагрев центральных слоев протекает с меньшей скоростью из-за термического сопротивления изделия.

Величина перепада температур по толщине изделия зависит от отношения термического сопротивления изделия к термическому сопротивлению передачи тепла к его поверхности. Чем больше указанное отношение, тем больше перепад температуры по толщине изделия. В теории теплообмена отношение внутреннего термического сопротивления к внешнему термическому сопротивлению на его поверхности определяется числом Био:

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda} \quad (\text{П1.1.})$$

где S – характерный геометрический размер изделия: в нашем случае для цилиндра – его радиус;

λ - эффективная теплопроводность металла, Вт/(м·К);

α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К.

За условную границу между тонкими и массивными изделиями принимается такое сечение, для которого число Био равно 0,25. Таким образом, если Био меньше 0,25, то изделие теплотехнически тонкое, если же Био больше 0,25, то изделие теплотехнически массивное.

При расчетах продолжительности нагрева изделий необходимо также знать их теплофизические свойства, прежде всего плотность γ , удельную теплоёмкость c и коэффициент теплопроводности λ . Для металлов и сплавов указанные параметры изменяются с изменением температуры. Однако, при выполнении практических расчетов они принимаются постоянными.

Зная температуру нагрева металла $t_{\text{н}}=970^{\circ}\text{C}$ определим значения теплофизических констант:

$\lambda = 80$ Вт/(м·К);

$c = 0,461$ кДж/(кг·К);

$\gamma = 7850$ кг/м³.

Коэффициент теплоотдачи считают равным сумме коэффициентов лучеиспусканием $\alpha_{л}$ и конвекцией $\alpha_{к}$:

$$\alpha = \alpha_{л} + \alpha_{к} \quad (\text{П1.2})$$

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием в печи с постоянной температурой определяется по формуле:

$$\alpha_{л} = C_{np} \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_{п}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{Mcp}}{100}\right)^4\right]}{T_{п} - T_{M}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (\text{П1.3})$$

где $T_{п}$ – текущее значение температуры печи, К;

T_{Mcp} – средняя за время нагрева температура изделия, К;

$$T_{Mcp} = \frac{1}{3}(t_{mn} + 2t_{mk}) + 273, \text{ К} \quad (\text{П1.4})$$

где t_{mn} и t_{mk} – температуры изделия соответственно в начале и в конце температурного интервала, °С.

$$T_{п} = 1000 \text{ °С} = 1273 \text{ К};$$

$$T_{Mcp} = \frac{1}{3} \cdot (20 + 2 \cdot 970) + 273 = 926 \text{ К}$$

C_{np} – приведенный коэффициент излучения

$$C_{np} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{м}} + \frac{F_{м}}{F_{п}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{п}} - 1 \right)}, \quad (\text{П1.5})$$

где $C_{np} = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{м}$ – степень черноты нагреваемого металла;

$\varepsilon_{п}$ – степень черноты кладки печи;

$F_{м}$ – тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, м^2 ;

$F_{п}$ – поверхность, нагреваемой камеры печи, м^2 .

$$\varepsilon_{м} = 0,8; \quad \varepsilon_{п} = 0,85;$$

$$F_{м} = 2\pi \cdot R \cdot l = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,08 \cdot 11,42 = 5,74 \text{ м}^2$$

$$F_{п} = 2 \cdot B \cdot L + 2 \cdot H \cdot L + 2 \cdot B \cdot H = 2 \cdot 4 \cdot 2 + 2 \cdot 4 \cdot 2 + 2 \cdot 2 \cdot 2 = 38 \text{ м}^2$$

$$C_{np} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,8} + \frac{5,74}{38} \left(\frac{1}{0,85} - 1 \right)} = 4,4$$

Найдем коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием:

$$\alpha_{\text{л}} = 4,4 \cdot \frac{\left[\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \left(\frac{926}{100}\right)^4\right]}{1273 - 926} = 239, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией принимается от 10 до 15

Принимаем, $\alpha_{\text{к}} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Найдем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 239 + 12 = 251, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Геометрический размер изделия: $S = r = 0,08, \text{ м}$

Рассчитаем число Био:

$$Bi = \frac{251 \cdot 0,08}{80} = 0,251$$

Т.к. значение числа Био больше 0,25, но меньше 4 для расчета можно использовать формулу для нагрева теплотехнически «тонких» изделий для среднетемпературных печей с введением поправочного коэффициента m , который зависит от массивности тел и их формы. Коэффициент m для пластины:

$$m = 1 + \frac{Bi}{3} \quad (\text{П1.6})$$

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{G \cdot c}{\alpha \cdot F_{\text{м}}} \cdot \ln \frac{t_{\text{н}} - t_{\text{мн}}}{t_{\text{н}} - t_{\text{мк}}}, \text{ с}, \quad (\text{П1.7})$$

где G – масса нагреваемых изделий, кг;

$t_{\text{мн}}$ и $t_{\text{мк}}$ – температуры нагреваемых изделий соответственно в начале и в конце нагрева, °С;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

$F_{\text{м}}$ – тепловоспринимающая поверхность загрузки, м².

Рассчитаем массу нагреваемых изделий:

$$G = V \cdot \gamma \quad (\text{П1.8})$$

где V – объем детали, м³; γ – плотность изделий, кг/м³

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = 3,14 \cdot 0,08^2 \cdot 11,42 = 0,23$$

$$G = 0,23 \cdot 7850 = 1801, \text{ кг}$$

Для трех деталей $G = 1801 \cdot 3 = 5404$,кг

Найдем время нагрева:

$$\tau'_{нагр} = \frac{5404 \cdot 0,461 \cdot 10^3}{251 \cdot 5,74} \cdot \ln \frac{1000 - 20}{1000 - 970} = 6034 \text{ с} = 100 \text{ мин}$$

					22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ	51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Тепловой расчет печи сводится к составлению теплового баланса, который представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. При проектировании электрической печи тепловой баланс составляют с целью определения мощности.

Расходные статьи:

1. Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла, для печей периодического действия определяется по формуле:

$$Q_M = \frac{G}{\tau_n} \cdot c_M (t_{MK} - t_{MH}), \text{ Вт} \quad (\text{П2.1})$$

где G – масса всех изделий, кг;

c_M – средняя теплоемкость металла в интервале температур от t_{MH} до t_{MK} , Дж/(кг·К);

τ_n – время нагрева изделий в печи, с;

t_{MH} – начальная температура металла, °С;

t_{MK} – конечная температура нагрева металла, °С.

$$Q_M = \frac{1801 \cdot 3}{3754} \cdot 0,461 \cdot 10^3 \cdot (970 - 20) = 392\,151, \text{ Вт}$$

2. Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи:

$$Q_{кл} = 2 \cdot Q_{бок.ст.} + 2 \cdot Q_{торц.ст.} + Q_{свода} + Q_{нода}. \quad (\text{П2.2})$$

Потери тепла через под и стены печи определяются по уравнению (для плоской многослойной стенки).

$$Q_{ст} = \frac{t_I - t_0}{\frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} + \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n \cdot F_n} + \frac{1}{\alpha_B \cdot F_{i\Delta B}}}, \text{ Вт} \quad (\text{П2.3})$$

где t_n – температура рабочего пространства печи, °С;

t_0 – температура окружающего воздуха, °С;

S_1, S_2, \dots, S_n – толщина отдельных слоев кладки, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности слоев кладки, Вт/(м К);

F_1, F_2, \dots, F_n – средние расчетные поверхности слоев кладки, м²;

α_B – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки печи в окружающую среду, Вт/(м² К).

$F_{\text{НАР}}$ – наружная поверхность кладки.

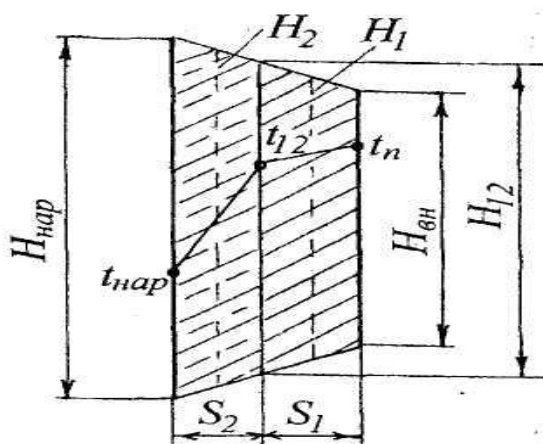


Рисунок П2.1 – Эскиз к расчету потерь тепла теплопроводностью через стенку печи

Таблица П2.1 – Коэффициенты теплопроводности данных материалов

Наименование и марка материала	λ , Вт/(м·К)
Шамот класса А	$0,980+0,278 \cdot 10^{-3} \cdot t$
Диатомитовый кирпич Д-500	$0,132+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ-1,3	$0,442+0,535 \cdot 10^{-3} \cdot t$
Шамот класса Б	$0,923+0,438 \cdot 10^{-3} \cdot t$

Средние температуры первого второго, и других слоев кладки:

$$t_1 = \frac{t_{\text{П}} + t_{1,2}}{2}; \quad t_2 = \frac{t_{1,2} + t_{2,3}}{2}; \quad \dots, \quad t_i = \frac{t_{i-1,i} + t_{i,i+1}}{2}. \quad (\text{П2.4})$$

где $t_{1,2}, t_{2,3}, \dots, t_{n-1,n}$ – температуры между отдельными слоями кладки, °С;

$t_{\text{П}}$ – температура внутренней поверхности футеровки равна температуре печи, °С

$t_{\text{НАР}}$ – температура наружной поверхности кладки печи, °С.

Для того чтобы определить температуры слоев кладки и, соответственно, коэффициенты теплопроводности этих слоев, задаемся температурой наружной стенки печи и температурами на границе слоев кладки.

Далее, пользуясь формулой, определяем теплопотери через кладку. После этого уточняем полученные значения.

Тепловые потери через кладку можно представить в виде:

$$Q_{КЛ} = \frac{t_{П} - t_0}{R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{НАР}}, \text{ Вт} \quad (\text{П2.5})$$

где R_1, R_2, \dots, R_n – тепловые сопротивления слоев кладки;

$R_{НАР}$ – сопротивление передаче тепла от поверхности кладки окружающей среде.

Так как тепловой поток, проходящий через кладку, постоянен, можно записать:

$$Q_{СТ} = \frac{t_i + t_{1,2}}{R_1}; \quad Q_{СТ} = \frac{t_{1,2} + t_{2,3}}{R_2}; \quad \dots, \quad Q_{СТ} = \frac{t_{i-1,i} + t_{i\delta}}{R_i} \quad (\text{П2.6})$$

Откуда:

$$t_{1,2} = t_{П} - Q_{СТ} \cdot R_1; \quad t_{2,3} = t_{П} - Q_{СТ} \cdot (R_1 + R_2); \quad \dots; \quad t_{НАР} = t_{П} - Q_{СТ} \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n).$$

Если полученные в результате проверки температуры будут отличаться от выбранных не более чем на 10 °С, то расчет произведен правильно. Если расхождение превышает эту величину, то задаемся значениями температур $t_{НАР}, t_{1,2}, \dots, t_{n-1,n}$, близкими к значениям, полученным при проверке, и снова производим расчет и проверку до тех пор, пока проверка не даст хорошего совпадения.

а) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки боковой стенки:

$$F_{ВН} = 4 \cdot 2 = 8 \text{ м}^2$$

$$F_{1,2} = (4 + 2 \cdot 0,7) \cdot (2 + 2 \cdot 0,7) = 18,36 \text{ м}^2$$

$$F_{НАР} = (4 + 2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,8) \cdot (2 + 2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,8) = 35 \text{ м}^2$$

$$F_1 = \sqrt{F_{BH} \cdot F_{1,2}} ; F_2 = \sqrt{F_{нар} \cdot F_{1,2}}$$

$$F_1 = 12,12 \text{ м}^2 ; F_2 = 25,34 \text{ м}^2$$

$$\alpha_B = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$S_1 = 0,7 \text{ м} \quad S_2 = 0,8 \text{ м}$$

$$t_n = 1000 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{1,2} = 720 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{нар} = 30 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_1 = \frac{t_n + t_{12}}{2} = \frac{1000 + 720}{2} = 860 \text{ }^\circ\text{C} = 1133 \text{ ,К}$$

$$\lambda_1 = 0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 1133 = 1,29 \text{ ,Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_2 = \frac{t_{нар} + t_{12}}{2} = \frac{30 + 720}{2} = 375 \text{ }^\circ\text{C} = 648 \text{ ,К}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 648 = 0,28 \text{ ,Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$Q_{\text{бок.ст.}} = \frac{1000 - 20}{\frac{0,7}{1,28 \cdot 12,12} + \frac{0,8}{0,28 \cdot 25,34} + \frac{1}{15 \cdot 35}} = 6286 \text{ ,Вт}$$

$$\text{Проверка: } t_{12} = 1000 - 6286 \cdot 0,044 = 723 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{нар} = 1000 - 6286 \cdot (0,044 + 0,113) = 31 \text{ }^\circ\text{C}$$

б) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки торцевой:

$$F_{BH} = 2 \cdot 2 = 4 \text{ м}^2$$

$$F_{1,2} = (2 + 2 \cdot 0,7) \cdot (2 + 2 \cdot 0,7) = 11,56 \text{ м}^2$$

$$F_{нар} = (2 + 2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,8) \cdot (2 + 2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,8) = 25 \text{ м}^2$$

$$F_1 = \sqrt{F_{BH} \cdot F_{1,2}} ; F_2 = \sqrt{F_{нар} \cdot F_{1,2}}$$

$$F_1 = 6,8 \text{ м}^2 \quad F_2 = 17 \text{ м}^2$$

$$\alpha_B = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$S_1 = 0,7 \text{ м} \quad S_2 = 0,8 \text{ м}$$

$$t_n = 1000 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{1,2} = 690 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{нар} = 30 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_1 = \frac{t_n + t_{12}}{2} = \frac{1000 + 690}{2} = 845 \text{ }^\circ\text{C} = 1118 \text{ ,К}$$

$$\lambda_1 = 0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 1118 = 1,29 \text{ ,Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_2 = \frac{t_{нар} + t_{12}}{2} = \frac{30 + 690}{2} = 360 \text{ }^\circ\text{C} = 633 \text{ ,К}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 633 = 0,284 \text{ ,Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$Q_{\text{морц.}} = \frac{1000 - 20}{\frac{0,7}{1,29 \cdot 6,8} + \frac{0,8}{0,28 \cdot 17} + \frac{1}{15 \cdot 0,7347}} = 3878, \text{ Вт}$$

Проверка: $t_{12} = 1000 - 3878 \cdot 0,08 = 683^\circ\text{C}$

$t_{\text{нар}} = 1000 - 3878 \cdot (0,08 + 0,17) = 30,5^\circ\text{C}$

в) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки свода:

$F_{\text{вн}} = 4 \cdot 2 = 8 \text{ м}^2$

$F_{1,2} = (4 + 2 \cdot 1) \cdot (2 + 2 \cdot 1) = 24 \text{ м}^2$

$F_{\text{нар}} = (4 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 0,8) \cdot (2 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 0,8) = 42,56 \text{ м}^2$

$F_1 = \sqrt{F_{\text{вн}} \cdot F_{1,2}} ; F_2 = \sqrt{F_{\text{нар}} \cdot F_{1,2}}$

$F_1 = 13,9 \text{ м}^2 ; F_2 = 32 \text{ м}^2$

$\alpha_{\text{в}} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$S_1 = 1 \text{ м} ; S_2 = 0,8 \text{ м}$

$t_{\text{п}} = 1000^\circ\text{C}; t_{1,2} = 660^\circ\text{C}; t_{\text{нар}} = 30^\circ\text{C}; t_0 = 20^\circ\text{C}$

$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{12}}{2} = \frac{1000 + 660}{2} = 830^\circ\text{C} = 1103 \text{ К}$

$\lambda_1 = 0,923 + 0,438 \cdot 10^{-3} \cdot 1103 = 1,404 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{12}}{2} = \frac{30 + 660}{2} = 345^\circ\text{C} = 618 \text{ К}$

$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 618 = 0,27 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

$$Q_{\text{свод}} = \frac{1000 - 20}{\frac{1}{1,404 \cdot 13,2} + \frac{0,8}{0,27 \cdot 32} + \frac{1}{15 \cdot 42,56}} = 6730, \text{ Вт}$$

Проверка: $t_{12} = 1000 - 6730 \cdot 0,051 = 656^\circ\text{C}$

$t_{\text{нар}} = 1000 - 6730 \cdot (0,051 + 0,086) = 32^\circ\text{C}$

г) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки пода:

$F_{\text{вн}} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ м}^2$

$F_{1,2} = (2 + 2 \cdot 0,95) \cdot (4 + 2 \cdot 0,85) = 23,01 \text{ м}^2$

$F_{\text{нар}} = (2 + 2 \cdot 0,95 + 4 \cdot 0,85) \cdot (4 + 2 \cdot 0,95 + 2 \cdot 0,85) = 42,56 \text{ м}^2$

$F_1 = \sqrt{F_{\text{вн}} \cdot F_{1,2}} ; F_2 = \sqrt{F_{\text{нар}} \cdot F_{1,2}}$

$F_1 = 13 \text{ м}^2 ; F_2 = 31,3 \text{ м}^2$

$\alpha_{\text{в}} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$S_1 = 0,95 \text{ м} \quad S_2 = 0,85 \text{ м}$$

$$t_n = 1000 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{1,2} = 420 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{\text{нар}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_1 = \frac{t_n + t_{12}}{2} = \frac{1000 + 420}{2} = 710 \text{ }^\circ\text{C} = 983 \text{ ,К}$$

$$\lambda_1 = 0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 983 = 1,25 \text{ ,Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{12}}{2} = \frac{30 + 420}{2} = 225 \text{ }^\circ\text{C} = 498 \text{ ,К}$$

$$\lambda_2 = 0,442 + 0,535 \cdot 10^{-3} \cdot 498 = 0,70 \text{ ,Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$Q_{\text{нод}} = \frac{1000 - 20}{\frac{0,95}{1,25 \cdot 13} + \frac{0,85}{0,70 \cdot 31,3} + \frac{1}{15 \cdot 42,56}} = 9959 \text{ ,Вт}$$

$$\text{Проверка: } t_{12} = 1000 - 9959 \cdot 0,058 = 422 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{нар}} = 1000 - 9959 \cdot (0,058 + 0,039) = 33 \text{ }^\circ\text{C}$$

Рассчитаем тепловые потери через кладку:

$$Q_{\text{кл}} = 2 \cdot 6286 + 2 \cdot 3878 + 6730 + 9959 = 37\,017 \text{ ,Вт}$$

3. Потери тепла излучением через открытое загрузочное окно определяется по формуле (П2.7):

$$Q_{\text{луч}} = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \psi \cdot F_{\text{отв}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \Delta \tau, \text{ Вт} \quad (\text{П2.7})$$

где ε – степень черноты излучающего тела

$F_{\text{отв}}$ – площадь поперечного сечения отверстия, м²;

$T_{\text{п}}, T_{\text{в}}$ – температура соответственно печи и окружающего воздуха, К;

$\Delta \tau$ – доля времени, в течение которого окно открыто, с/с;

ψ – коэффициент диафрагмирования, зависящий от соотношения ширины и высоты отверстия и от толщины стенки.

$$F_{\text{отв}} = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ м}^2$$

Примем степень черноты излучающего тела $\varepsilon = 0,8$.

Коэффициент диафрагмирования загрузочного окна: 0,45

Примем $\tau_{\text{откр}} = 5 \text{ мин} = 300 \text{ с}$ и $\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{выд}} = 6034 + (0,25 \cdot 6034) = 7542 \text{ с}$

Долю времени, в течение которого окно открыто определяем по формуле:

$$\Delta\tau = \tau_{\text{откр}} / \tau_{\text{общ}} \quad (\text{П2.8})$$

$$\Delta\tau = 300/7542 = 0,04\text{с}$$

Таким образом,

$$Q_{\text{луч}} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,45 \cdot 2,25 \cdot \left[\left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,04 = 4810 \text{ ,Вт}$$

4. Потери тепла вследствие коротких замыканий $Q_{\text{ткз}}$, вызванных нарушением сплошности изоляции в тех местах, где через кладку проходят перемычки из более теплопроводных материалов: термopарные трубки, выводы нагревателей, направляющие, оси роликов, выходящие из печи, закалочные желобы и т.п. В большинстве случаев эти потери не могут быть точно учтены и их принимают обычно равными 50...100% от потерь теплоты через стенки, то есть:

$$Q_{\text{ткз}} = (0,5 \dots 1,0) \cdot Q_{\text{кл}}, \text{ Вт} \quad (\text{П2.9})$$

Примем потери тепла вследствие коротких замыканий 0,7 от $Q_{\text{ст}}$, тогда

$$Q_{\text{ткз}} = 0,7 \cdot 37\,017 = 25911,9 \text{ Вт}$$

Таблица П2.2 – Данные статей прихода и расхода

Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
Теплота, выделившаяся в нагревательных элементах	11,38	100	Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла	392,151	85,27
			Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи	37,017	8,05
			Потери тепла через открытое загрузочное окно	4,810	1,05
			Потери тепла вследствие коротких замыканий	25,911	5,63
Итого	11,38	100	Итого	459,89	100

22.03.02.2017.099.00.000 ПЗ

3. Расчет КПД электрической печи

Обычно КПД электрических печей 50...80%.

Из составленного теплового баланса печи найдем ее коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{Q_M}{Q_{расч}} \cdot 100, \% \quad (27)$$

$$\eta = \frac{392,151}{459,89} \cdot 100\% = 75,16 \%$$

Установленная мощность электрической печи:

$$N_{уст} = k \cdot N_{расч}$$

$N_{расч}$ - общий расход теплоты, Вт (кВт)

Для печей с мощностью меньше 100 кВт принимают $k = 1,4 - 1,6$.

Примем $k = 1,5$

$$N_{уст} = 1,5 \cdot 459,89 = 689, \text{ кВт}$$