

# 1 Технологическая часть

## 1.1 Теоретический раздел

Существующая схема эксплуатации большинства нефтяных месторождений с поддержанием пластового давления за счет закачки в пласт сточной воды способствует повышению агрессивности среды, в которой «работают» трубы при добыче и транспортировке сырья. По данным ОАО «ВНИИТнефть», за последние пять лет из-за увеличения обводненности добываемой нефти скорость коррозии трубопроводов возросла с 0,04 до 1,2 г/м<sup>2</sup>/ч [1].

Коррозия стали в водной среде происходит вследствие протекания электрохимических реакций, т. е. реакций, сопровождающихся протеканием электрического тока. Электрохимическая коррозия возникает в результате работы множества макро- или микрогальванопар в металле, соприкасающемся с электролитом. Наличие сероводорода, углекислого газа и галогенов в пластовой воде месторождений значительно повышает скорость электрохимической коррозии.

Водородное растрескивание (англ. hydrogen induced cracking(HIC)) обнаруживает себя в форме микротрещин (блистеров) и/или внутренних трещин при отсутствии приложенного напряжения. Растворенный в стали водород собирается в местах дефектов матрицы, где переходит в молекулярную форму, что сопровождается колоссальным ростом давления и приводит к развитию внутренних трещин.

Общепризнано, что водородное растрескивание инициируется наличием неметаллических включений в стали. Причем крупные, вытянутые и строчечные включения являются более опасными, чем мелкие, шаровидные, дисперсные включения. От содержания серы в стали и степени модифицирования стали кальцием зависит морфология неметаллических включений: при пониженном соотношении [Ca]/[S] в стали присутствуют строчечные сульфиды Mn(Fe)S, а при повышенном образуются кластеры CaO/CaS. Оба вида включений служат концентраторами для атомарного водорода и приводят к развитию водородного растрескивания.

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.	Чайковский С.П.				Разработка технологического процесса редуцирования бесшовной горячекатаной трубы 114,3x8,5 мм из стали 20А на редуционно-растяжном стане в условиях ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК»	Лит.	Лист	Листов		
Консул.	Бобарикин Ю.Л.						7	34		
Рук. пр.	Бобарикин Ю.Л.					ГГТУ им. П.О.Сухого группа ЗМД-51с				
Н. Контр.	Урбанович А.М.									
Зав. каф.	Бобарикин Ю.Л.									
Технологическая часть										

Оптимальным для данного вида бесшовных труб является соотношение  $[Ca]/[S]$  в стали в диапазоне от 1 до 2. При данном соотношении, кроме повышения чистоты стали по неметаллическим включениям, достигается также снижение сегрегации и получение гомогенной микроструктуры, что положительно сказывается на ее коррозионной стойкости. Следует отметить, что для высокопрочных низколегированных трубных марок стали содержание серы должно быть менее 10 ppm, что достигается на металлургических комбинатах полного цикла путем предварительного удаления серы из чугуна и глубокой десульфурацией стали вдуванием порошкообразной извести и силикокальция [2].

В настоящее время одной из перспективных труб повышенной коррозионной стойкости и хладостойкости является бесшовная горячедеформированная труба 114,3x8,5 мм из стали 20А. Она применяется внутрипромысловых трубопроводов, транспортирующих продукцию нефтяных скважин (нефть, нефтяной газ и воду) при давлении до 10 МПа, а также пресную и подтоварную воду в системах заводнения пластов при давлении до 24 МПа. Трубы предназначены для эксплуатации на нефтяных месторождениях в агрессивных средах при температуре окружающей среды от минус 60 до плюс 40°C и температуре транспортируемых сред от плюс 5 до плюс 80°C. Редуцирование трубы 114,3x8,5 мм из стали 20А осуществляется из черновой трубы 175,0x7,91 мм.

#### 1.1.1 Технические требования к качеству горячекатаной трубы диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,5 мм из марки стали 20А

Трубы стальные бесшовные горячедеформированные повышенной коррозионной стойкости и хладостойкости диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,5 мм из марки стали 20А должны соответствовать требованиям ТУ 1317-006.1-593377520-2003. Предельные отклонения по наружному диаметру труб не должны превышать  $\pm 1,0$  % от номинального наружного диаметра, по толщине стенки  $\pm 12,5$  % от номинальной толщины стенки. Разностенность не должна выводить толщину стенки труб за предельные отклонения. Овальность труб не должна выводить наружный диаметр труб за допустимые отклонения. Овальность концов труб на длине не менее 200 мм от торца не должна превышать 1% номинального диаметра. Кривизна труб на любом участке длиной 1 м не должна превышать 1,0 мм.

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Общая кривизна не должна превышать 0,15% длины трубы. Требования к химическому составу стали марки 20А представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Химический состав стали марки 20А

		C	Si	Mn	Cr	AL	S	P	Cu	Ni	N
Требования ТУ 1317-006.1- 593377520-2003	min	0,17	0,17	0,35	-	0,02	-	-	-	-	-
	max	0,24	0,37	0,65	0,40	0,05	0,015	0,017	0,25	0,25	0,008

Массовая доля водорода в стали по ковшевой пробе не должна превышать 2,0 ppm. или 1,0 ppm. в металле трубы. Допускается введение ниобия и титана из расчета получения массовой доли до 0,03% и 0,01% соответственно.

С целью глобуляризации сульфидных неметаллических включений в раскисленную сталь вводится кальций, либо силикокальций из расчета получения массовой доли до 0,05% или производится обработка комплексными модификаторами.

Механические свойства металла труб обеспечиваются термической или термомеханической обработками и должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства трубы 114,3х8,5 мм

Механические свойства	Класс прочности				
	K48	K50	K52	K54	K56
Временное сопротивление, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее	470 (48,0)	491 (50,1)	510 (52,0)	530 (54,1)	549 (56,0)
Предел текучести $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ) не менее не более	338 (34,5) 451 (46,0)	343 (35,0) 470 (48,0)	372 (38,0) 491 (50,1)	383 (39,1) 510 (52,0)	392 (40,0) 539 (55,0)
Относительное удлинение $\delta$ , %, не менее	25,0	25,0	23,0	23,0	23,0
Отношение $\sigma_T/\sigma_B$ , не более	0,80	0,80	0,85	0,85	0,85
Твердость, HRB, не более	92	92	92	92	92
Ударная вязкость на продольных образцах KCV, Дж/см <sup>2</sup> (кгсм/см <sup>2</sup> ), при температуре испытания минус 50°С, не менее:	98 (10)	98 (10)	98 (10)	98(10)	98 (10)
Доля вязкой составляющей в изломе ударных образцов KCV, %, при температуре испытания минус 50°С, не менее:	50	50	50	50	50

Металл, по толщине стенки и длине труб, должен иметь микроструктуру, представленную мелкими зернами феррита и перлита с зернистой формой карбидов. Наличие мартенсито-бейнитной микроструктуры не допускается.

Размер зерна металла труб должен быть не крупнее размера зерна, соответствующего девятому номеру шкалы 1 ГОСТ 5639.

Загрязненность металла труб неметаллическими включениями не должна превышать по среднему баллу по шкале ГОСТ 1778:

- оксидами, силикатами и сульфидами (ОС, ОТ, СП, СХ, СН, С) – 2,5;
- нитридами (Н) – 1.

Полосчатость микроструктуры не должна превышать 2,0 балла по шкале ГОСТ 5640.

В макроструктуре металла труб не должно быть трещин, расслоений, флокенов, пор, пузырей, инородных металлических и неметаллических включений.

Трубы должны быть стойкими к водородному растрескиванию, сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением и к общей коррозии. Требования к коррозионной стойкости приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Требования к коррозионной стойкости труб из стали 20А

Группа кор- розионной стойкости	Коррозионные характеристики труб					Марка стали
	Скорость общей коррозии, мм/год, не более	Стойкость к во- дородному рас- трескиванию, не более		Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжени- ем $\sigma_{th}$ в % от $\sigma_{0,2}$ , не менее	Критический коэффициент интенсивности напряжений в вершине кор- розионной трещины ( $K_{I SSC}$ ), $МПа \cdot м^{1/2}$ , не менее	
		CLR, %	CTR, %			
1	0,5	3	6	75	35	20А

На поверхности образцов, после испытаний в H<sub>2</sub>S-содержащей среде, не допускается наличие блистерингов. На поверхности труб не должно быть плен, трещин, закатов, рванин и расслоений. Разрешается удалять поверхностные дефекты пологой зачисткой или сплошной шлифовкой, полировкой, при этом толщина стенки в местах удаления дефектов не должна выходить за минимальные допустимые значения. Удаление дефектов сваркой не допускается.

Допускаются следы зачистки дефектов, отдельные вмятины, отпечатки, риски, тонкий слой окалины, мелкие пленки и другие дефекты, обусловленные способом производства, если они не выводят толщину стенки за минимальные значения.

Каждая труба должна выдерживать без обнаружения течи пробное гидравлическое давление (Р) по ГОСТ 3845, при допускаемом напряжении (R) в стенке трубы, равном 0,8 от нормативного минимального значения предела текучести, но не превышающим 20 МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>), с выдержкой под давлением не менее 10-ти секунд. По требованию Потребителя трубы испытывают гидравлическим давлением свыше 20 МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>).

По согласованию с Потребителем допускается взамен гидравлического испытания проводить контроль сплошности каждой трубы неразрушающими методами по всей длине и поверхности.

Каждая труба по всей длине и поверхности должна подвергаться неразрушающему контролю сплошности металла – либо ультразвуковой (УЗД), либо электромагнитной (вихретоковой, магнитоиндукционной или др.) дефектоскопии для выявления продольных дефектов.

Неконтролируемые при этом концы труб должны быть проверены на наличие дефектов на наружной и внутренней поверхности магнитопорошковым или иным методом неразрушающего контроля, гарантирующим выявление дефектов или отрезаны.

Величина индукции остаточного магнитного поля металла труб не должна превышать 30 Гс (3,0 мТл).

### 1.1.2 Технология производства исходной заготовки

В качестве заготовки для производства трубы диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,5 мм из марки стали 20А используют непрерывнолитую заготовку круглого сечения диаметром 200 мм. Геометрические размеры заготовки и предельные отклонения должны соответствовать требованиям таблицы 1.4.

Таблица 1.4 – Размеры заготовок и предельные отклонения

Диаметр заготовки, мм	Длина, мм	Допускаемые предельные отклонения				
		по диаметру, мм	по длине, %	косина реза, мм	овальность, %	кривизна, мм/м
				не более		
200	4000-9600	±2,8	±1,0	5,0	2,0	2,5

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Макроструктура трубной заготовки при проверке на поперечных протравленных темплатах не должна иметь осевой рыхлости, трещин, подкорковых и раскатанных пузырей, раскатанных завернувшихся и утонувших корочек, неметаллических и металлических инородных макровключений, расслоений и флокенов. Все горячекатаные трубные заготовки должны подвергаться контролю наружных и внутренних дефектов в соответствии с требованиями нормативной документации. Допустимые дефекты макроструктуры горячекатаных заготовок не должны превышать значений, указанных в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Допустимые дефекты макроструктуры горячекатаных заготовок

Наименование дефекта	Максимальное допустимое значение
Центральная (осевая) пористость	3,0
Краевое точечное загрязнение	2,0
Светлая полоса (контур)	2,0
Осевая ликвация (осевая химическая неоднородность)	3,0
Ликвационные полосы и трещины	2,0

Химический состав стали трубной заготовки должен соответствовать требованиям стандартов и технических условий, указанных в контрактах (заказах). Независимо от требований стандартов для химического состава трубных заготовок должны соблюдаться следующие требования:

- содержание  $O_2$  не должно превышать 20 ppm;
- содержание  $N_2$  не должно превышать 100 ppm;
- содержание  $H_2$  не должно превышать 2 ppm.

Загрязнённость металла неметаллическими включениями не должна превышать (по максимальному баллу): по оксидам, силикатам и сульфидам (ОС, ОТ, СП, СХ, СН, С) – 2,5; по нитридам (Н) – 1.

На поверхности заготовок не должно быть плен, раковин, наплывов, газовых пузырей, поясов, рванин, закатов, шлаковых, включений, усадки в торце и трещин. Допускается наличие отпечатков, рябизны, царапин глубиной до 0,5 мм. Поверхностные дефекты с большей глубиной залегания должны удаляться абразивной зачисткой.

Глубина зачистки не должна превышать 1,4 % от фактического диаметра заготовки. Ширина зачистки должна быть не менее пятикратной глубины. В

одном поперечном сечении допускается не более трёх зачисток максимальной глубины. Диаметрально противоположные зачистки максимальной глубины не допускаются. Торцевая часть непрерывнолитой заготовки не должна иметь грубых волнообразных следов от газовой резки.

Схема технологического процесса производства заготовки диаметром 200 мм, представлена на рисунке 1.1.

Качественные углеродистые конструкционные марки стали, выплавляют в ДСП-3 (ЭСПЦ-2). Шихтовка стали должна соответствовать нормативной документации. Загрузка чугуна осуществляют поровну в завалку и подвалку сверху равномерно по всей площади корзины.



Рисунок 1.1 – Схема технологического процесса производства заготовок

Температура перед выпуском из ДСП-3 должна быть в пределах 1650-1710°C. Материалы для присадки в ковш набирается в промежуточный бункер-наполнитель. Ковш с металлом передают на аргонную установку, где металл продувают в течении 5 минут, отбирают пробу на полный химический анализ и производится измерение температуры. Продувка металла аргонem в сталеразливочном ковше производят через две донные фурмы без оголения зеркала металла. За 5-7 минут до передачи на вакууматор присаживают просушенный кварцевый песок.

Температура металла перед обработкой на вакууматоре РН должна быть 1590-1620°C. Общее время вакуумирования не менее 20 минут. По окончании вакуумирования отбирают пробу на полный химический состав и ковш с ме-

таллом передают на установку «печь-ковш». После вакуумирования допускается корректировка химического состава металла по содержанию углерода с помощью проволоки с углеродным наполнителем, производят корректировку температуры металла. При достижении заданной температуры передачи металла на машину непрерывного литья заготовок (МНЛЗ-3), металл в стальковше, а так же и в промежуточном ковше утепляют золой рисовой шелухи и накрывают крышкой. При разливке стали используют шлакообразующую смесь (ШОС).

Сразу после запуска ручьев в начале первой плавки в серии скорость разливки устанавливают в зависимости от температуры металла в промковше в пределах от 0,50 ÷ 0,60 м/мин. Далее производят охлаждение заготовок в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Режим работы катушек электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе – постоянный. Далее на машине газокислородной резке (МГКР) заготовки режут на длину 4000-9600 мм. Маркируют заготовки пневмо-клеймителем, с указанием номера плавки, номера ручья, порядкового номера заготовки ручья.

### 1.1.3 Анализ дефектов заготовки

Раздутие (выпуклость), вогнутость.

Причины: высокая скорость разливки, высокая температура металла, недостаточное охлаждение, износ гильзы кристаллизатора, неудовлетворительная настройка правильно-тянущей клетки по давлению. Неравномерное охлаждение.

Решение: разливку металла производить в строгом соответствии требований технологических карт. При невозможности произвести настройку ПТМ ручей закрыть. Заменить кристаллизатор. Проверить режимы вторичного охлаждения и распыление форсунок.

Кривизна по длине заготовки.

Причины: Неравномерное охлаждение двух противоположных сторон на участке вторичного охлаждения. Несовпадение оси струи металла и направления вытяжки заготовки.

Решение: устранить неравномерность охлаждения во вторичной зоне. В случае невозможности устранения ручей закрыть.

Поперечная трещина.

Причины: неравномерное затвердевание слитка, подвисяние слитка в кристаллизаторе, нарушение расхода рапсового масла и технологической оси МНЛЗ, неравномерное качание. Соблюдать температурный режим разливки.

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14



Решение: настроить зазоры поддерживающих роликов. Отрегулировать режим смазки. Проверить технологическую ось МНЛЗ. Проверить стол качения.

Загрязнения на поверхности заготовки.

Причины: затягивание шлака из промежуточного ковша, размыв огнеупоров ковша, всплывание в кристаллизаторе продуктов вторичного окисления металла.

Решение: поддерживать оптимальный уровень металла в промковше. Применение огнеупоров высокого качества. Соблюдать технологию внепечной обработки стали. Доводка металла на п/ковше или УДМ.

1.1.4 Технологический процесс для производства заданного профиля  
Технологическая схема производства трубы диаметром 114,3х8,5 мм из стали 20А представлена на рисунке 1.2.

Исходная заготовка диаметром 200 мм подаётся на участок порезки заготовок, где режется пилами холодной резки на мерные длины. После раскроя заготовки нагревают в нагревательной методической печи кольцевого типа до температуры 1250°C и выдают на входную сторону прошивного косовалкового стана СТР 1000 VD. Нагретую заготовку прошивают в гильзу диаметром 215 мм с толщиной стенки 15,5 мм на оправке диаметром 172 мм. Со стола выходной стороны прошивного стана гильза подаётся на устройство раскисления внутренней поверхности гильзы, где в неё вдувается азот с раскисляющим порошком на основе буры, который является не только хорошим антиоксидантом, но и выполняет функцию смазки внутренней поверхности.

Процесс прошивки является первым важным этапом обеспечения допуска по толщине стенки. Нагретая заготовка, находящаяся во входном желобе прошивного стана, гидравлическим толкателем подается к рабочим валкам, в то время как прошивные диски Дишера направляют прокатываемый материал. В процессе поперечно-винтовой прокатки сплошная круглая заготовка по прошивной оправке прошивается в полуую заготовку – гильзу. На выходной стороне полая заготовка направляется 3-роликовыми направляющими. Первая 3-роликовая направляющая, размещенная вблизи прокатной клетки, улучшает направление стержни оправки и центрирует полуую заготовку.

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

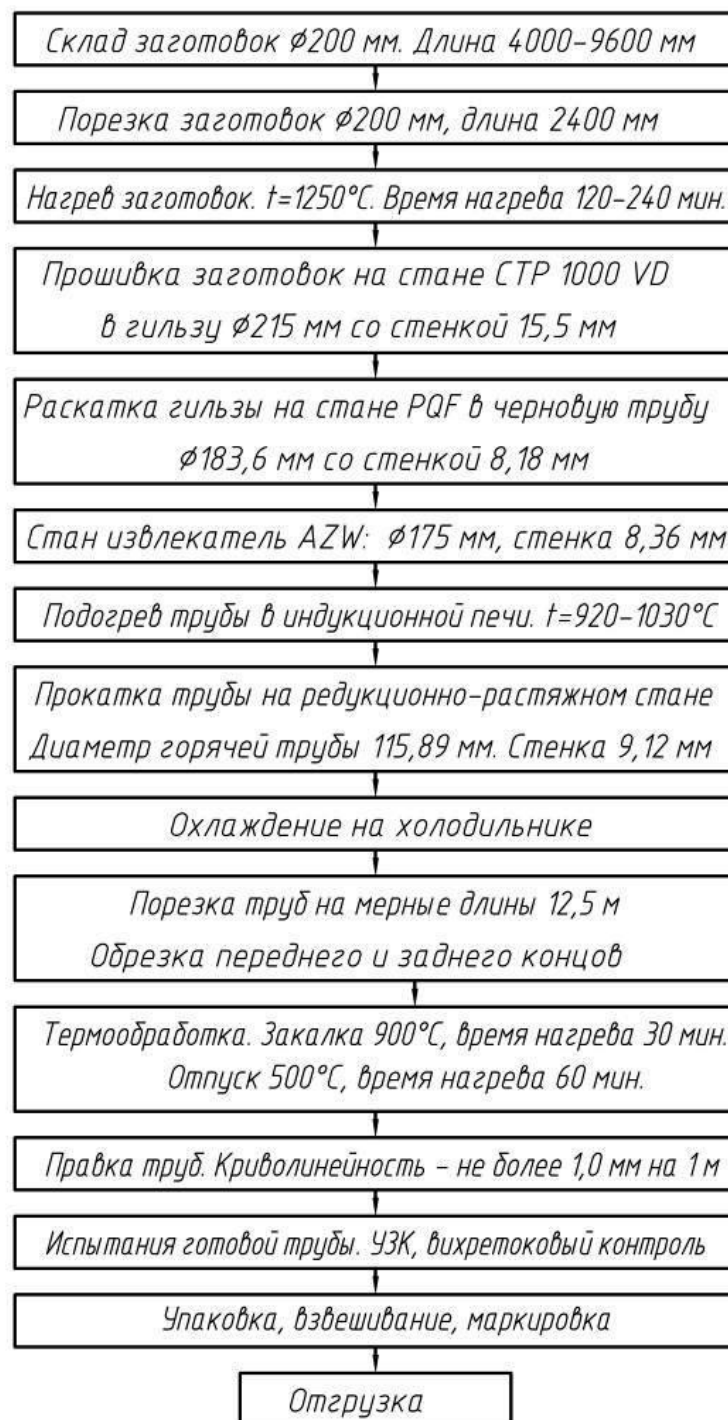


Рисунок 1.2 – Схема технологического процесса производства трубы диаметром 114,3x8,5 мм из стали 20А

Манипулятором гильза транспортируется на линию раскатного стана PQF, после чего в неё вводится оправка диаметром 167,04 мм с нанесённой на её поверхность смазкой на основе графита.

По технологии PQF, прокатка труб осуществляется с помощью трехвалковых регулируемых клеток и оправок. С точки зрения стоимости вложений,

эффективности технологий и качества продукции она имеет больше преимуществ по сравнению с общеизвестными двухвалковыми установками МРМ (RMM) с такими же характеристиками, особенно если учесть точность и однородность толщины стенки прокатываемых труб, которая намного лучше качества стенок тех труб, которые получают при прокатке на двухвалковых клетях МРМ (RMM).

Прокатка трубы происходит на 4-клетевом стане PQF с клетью обжатия полых заготовок, который основан на принципе непрерывной прокатки в серии 3-валковых клеток на перемещаемой оправке. Оправка движется с постоянной скоростью меньше скорости выхода раската из первой клетки. Раскат движется быстрее оправки, поэтому силы трения между ней и оправкой направлены против хода прокатки. Клеть обжатия полых заготовок, размещенная перед первой клетью PQF, предназначена для калибровки наружного диаметра полых заготовок и уменьшения зазора между полых заготовкой и оправкой.

После раскатки черновая труба диаметром 183,6 мм попадает в стан-извлекатель AZW, где она снимается с удерживаемой оправки и обжимается до наружного диаметра 175 мм с толщиной стенки 7,91 мм. После процесса прокатки на PQF оправка отводится в исходное положение, снимается посредством ротационных кронштейнов и подаётся в систему циркуляции оправок. При выходе черновой трубы из стана-извлекателя с помощью дисковой пилы у неё отрезается задний конец, который из-за технологических особенностей раскатного стана имеет неправильную геометрическую форму.

Для выравнивания температуры черновой трубы по длине её подают в проходную индукционную печь мощностью 4МВт и максимальным рабочим напряжением 1000 В. Проходная печь индукционного нагрева подогревает черновую трубу, остывшую до температуры 850°С до температуры проката – 920-1030°С.

Входным рольгангом подогретая черновая труба проходит гидросбив и попадает в редуционно-растяжной стан. Для прокатки данного профиля используется определенное количество рабочих клеток, находящиеся в первых посадочных местах стана. Остальные посадочные места занимают транспортные клетки. Все валки рабочих клеток и ролики транспортных клеток в процессе прокатки охлаждаются водой. После прокатки в редуционно-растяжном стане чистовая труба имеющая следующие размеры: диаметр 115,89 мм, толщина

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

стенки 8,62 мм, охлаждается на холодильнике с шагающими рейками до температуры 60°C. На дисковых пилах холодной резки обрезаются передний и задний концы труб и производится разделение на мерные длины и далее поступает на холодный участок для отделки и испытаний.

Отделка и термообработка полученного изделия представлена в таблице 1.6 постадийно.

Таблица 1.6 – Отделка трубы диаметром 114,3х8,5 мм из стали 20А

Термообработка	
Правка	
Снятие фаски	
Гидроиспытание	
Неразрушающий контроль	
Испытание вихревыми токами	
Промежуточное складирование труб	

Механические свойства металла труб обеспечиваются термической или термомеханической обработками и должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.2.

Для обеспечения требуемых физико-механических свойств труба 114,3x8,5 мм из стали 20А подвергается термообработке по следующим режимам:

Нагрев труб в закалочной печи:

- температура 900-920 °С;
- время нагрева не менее 30 мин.

Закалка:

- водяное охлаждение

Нагрев труб в печи отпуска:

- температура 630-650 °С;
- время нагрева 45 мин.

После закалки и отпуска трубы подвергаются правке на машине горячей правки и далее транспортируются к поперечному транспортеру. Термообработанные трубы поступают по поперечному транспортеру на линию торцовки концов труб, на которой происходит их торцовка, снятие фасок, гидроиспытание и неразрушающий контроль с помощью ультразвука. После ультразвукового контроля трубы маркируются и увязываются в пакеты, а затем складываются на складе готовой продукции.

### 1.1.5 Анализ дефектов готового профиля

В процессе производства бесшовных труб могут возникать различные дефекты по следующим причинам:

- не соответствие технологическим регламентам;
- износ технологического инструмента;
- низкое качество исходной заготовки.

Дефекты, возникающие при прокатке на редуционно-растяжном стане трубного профиля диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,5 мм приведены в таблице 1.7

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Таблица 1.7 – Дефекты, возникающие при прокатке на редуционно-растяжном стане

Нарушения в работе	Причины возникновения	Способы устранения
1	2	3
1. Отклонение от заданного диаметра трубы	1.1 Неправильная настройка чистовых клетей. 1.2 Большой износ калибров чистовых клетей.	1.1 Настроить чистовые клетки. 1.2 Заменить чистовые клетки.
2. Подрезы или ужимы.	2.1 Завышенный диаметр труб, поступивших с непрерывного стана. 2.2 Большой зазор между ребрами валков. 2.3 Осевой люфт валков. 2.4 Низкая температура трубы перед редуцированием.	2.1 Уменьшить наружный диаметр трубы после непрерывного стана. 2.2 Заменить клеть (клетки) 2.3 Заменить клеть (клетки) 2.4 Повысить температуру нагрева в индукционной печи.
3. Штамповка, сетка	3.1 Налипание металла на валок. 3.2 Образование сетки разгара на ручьях.	3.1 Заменить клеть (клетки) 3.2 см. п.3.1
4. Разрыв трубы в стане	4.1 Неправильно установлены обороты главного и вспомогательного двигателей (завышено натяжение). 4.2 Перегрев трубы	4.1 Установить обороты по таблице прокатки. 4.2 Снизить температуру подогрева.
5. Стенка трубы на "плюс" или "минус"	5.1 Неправильно установлены обороты главного и вспомогательного двигателей. 5.2 Неправильный подогрев трубы, неравномерная температура по длине трубы. 5.3 Отклонение от заданной толщины стенки черновой трубы или повышенная разностенность	5.1 Скорректировать обороты по таблице прокатки. 5.2 Повысить температуру подогрева, проверить работу автоматики. 5.3 Настроить непрерывный стан на заданную по таблице прокатки толщину стенки.
6. Риски	6.1 Дефекты на поверхности проводок.	6.1 Устранить дефекты, заменить проводки.
7. Убоины	7.1 Наличие на оборудовании и механизмах острых (выпуклых) участков. 7.2 Резкие перемещения труб.	7.1 Обнаружение и зачистка острых участков, замена изношенного сменного оборудования. 7.2 Корректировка работы механизмов
8. Плохой рез на трубе при порезке на летучих ножницах	8.1 Большой зазор между ножами 8.2 Выработка ножей 8.3 Выработка в шарнирах подвижных деталей	8.1 Установить необходимую величину зазора 8.2 Заменить ножи 8.3 Замена деталей с выработанными звеньями

## 1.2 Расчетный раздел

### 1.2.1 Расчет деформационного режима редуцирования трубы диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,5 мм из стали марки 20А

Калибровка валков и скоростной режим прокатки в редуционных станах в значительной мере определяет качество труб, стойкость технологического инструмента, распределение нагрузок в рабочих клетях и приводе, а, следовательно, и технико-экономические показатели работы оборудования.

При редуцировании труб круглого поперечного сечения наиболее рациональная форма калибра – овальная (рисунок 1.3).

Трубы, прокатываемые в овальных калибрах, имеют наименьшую поперечную разносторонность. Чистовые калибры двух последних клеток выполняются круглыми с радиусом, равным половине диаметра трубы.

Размеры трубы после стана извлекателя:

$$D_{\text{Г.Т.Н.}} = 175,0 \text{ мм}; S_{\text{ред.н}} = 7,91 \text{ мм}.$$

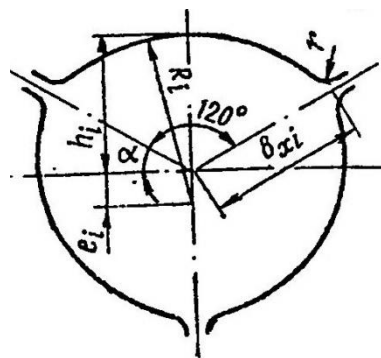


Рисунок 1.3 – Схема калибра

Диаметр трубы в горячем состоянии после редуцирования определяют по формуле:

$$D_{\text{ред.к}} = D_{3.X.} \cdot (1 + \alpha_T \cdot t), \quad (1.1)$$

где  $D_3 \times$  – диаметр готовой трубы в холодном состоянии;

$\alpha_T$  – температурный коэффициент линейного расширения металла трубы  
(для углеродистой стали в интервале температур от 0 до 1050°C),

$$\alpha_T = (13,5 \div 17,5) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1};$$

$t$  – температура трубы после редуцирования.

Конечный диаметр горячей трубы:

$$D_{\text{ред.к}} = 114,3 \cdot (1 + 15 \cdot 10^{-6} \cdot 925) = 115,89 \text{ мм.}$$

Определяем степень редуцирования:

$$\varepsilon = \frac{(D_{\text{Г.Т.н}} - D_{\text{Г.Т.к}})}{D_{\text{Г.Т.н}}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

$$\varepsilon = \frac{(175,0 - 115,89)}{175,0} \cdot 100\% = 33,78\%.$$

Толщина стенки трубы в горячем состоянии после редуцирования определяют по формуле:

$$S_{\text{ред.к}} = S_{\text{гот}} \cdot (1 + \alpha_{\text{T}} \cdot t), \quad (1.3)$$

где  $S_{\text{гот}}$  – толщина стенки готовой трубы.

$$S_{\text{ред.к}} = 8,5 \cdot (1 + 15 \cdot 10^{-6} \cdot 925) = 8,62 \text{ мм.}$$

При отношении  $\frac{S_{\text{ред.к}}}{D_{\text{ред.к}}} = \frac{8,62}{115,886} = 0,074 < 0,1$  толщина стенки увеличивается. Тогда утолщение стенки:

$$\Delta S = \frac{S_{\text{ред.к}} - S_{\text{ред.н}}}{S_{\text{ред.к}}} \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

$$\Delta S = \frac{8,62 - 7,91}{8,62} \cdot 100\% = 8,6 \text{ \%}.$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22



Абсолютное утолщение стенки составит:

$$\Delta S = S_{\text{ред.к}} - S_{\text{ред.н}}, \quad (1.5)$$

$$\Delta S = 8,62 - 7,91 = 0,71 \text{ мм.}$$

Для определения минимального числа клеток  $n$ , необходимых для редуцирования трубы указанных размеров, предварительно примем величину среднего относительного обжатия  $\varepsilon_{\text{ср}} = 5,0\%$ .

Определяем количество клеток:

$$n = \frac{\lg D_{\text{ред.к}} - \lg D_{\text{ред.н}}}{\lg(1 - \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{100})} + 2, \quad (1.6)$$

$$n = \frac{\lg 175 - \lg 115,89}{\lg(1 - \frac{5,0}{100})} + 2 = 10,04.$$

Принимаем  $n = 10$ . При известном количестве клеток величина среднего относительного обжатия трубы по диаметру определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \left( 1 - n^{-2} \sqrt{\frac{D_{\text{ред.к}}}{D_{\text{ред.н}}}} \right) \cdot 100, \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \left( 1 - n^{-2} \sqrt{\frac{115,89}{175}} \right) = 5,022.$$

Относительное обжатие в первой и двух последних клетях:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i = \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{2} + \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{2} + 0 = \varepsilon_{\text{ср}}. \quad (1.8)$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Определяем средние диаметры трубы по калибрам:

$$D_{\text{ср.}i} = D_{i-1} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{100}\right). \quad (1.9)$$

Так для первого калибра:

$$D_{\text{ср.}1} = 177,36 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \frac{5,022}{100}\right) = 170,606 \text{ мм.}$$

Для промежуточных калибров:

$$D_{\text{ср.}2} = 170,606 \cdot \left(1 - \frac{5,022}{100}\right) = 162,039 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем средние диаметры для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Для предчистового калибра

$$D_{\text{ср.}9} = 118,95 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \frac{5,022}{100}\right) = 115,96 \text{ мм.}$$

Для чистового калибра

$$D_{\text{ср.}10} = 115,886 \text{ мм.}$$

Так как в первой и предчистовой клетях обжатие уменьшено, а в отделочной равно нулю, утолщением стенки трубы в этих клетях можно пренебречь. Тогда для остальных клеток утолщение стенки будет равно:

$$\Delta S = \frac{\Delta S}{(n - 3)}, \quad (1.9)$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

$$\Delta S = \frac{0,71}{(10 - 3)} = 0,107.$$

Толщина стенки трубы по калибрам:

$$S_i = S_{\text{ред.н}} + \sum_1^i \Delta S_{\text{ред.i}}, \quad (1.10)$$

где  $\sum_1^i \Delta S_{\text{ред.i}}$  – суммарное утолщение стенки в клетях от 1-ой до i-ой.

$$S_1 = 7,91 \text{ мм},$$

$$S_2 = 7,91 + 0,107 = 8,017 \text{ мм},$$

$$S_9 = S_{10} = 8,62 \text{ мм}.$$

Коэффициент вытяжки в любой клетке стана:

$$\mu_i = \frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{(D_{i-1} - S_{i-1}) \cdot S_{i-1}}{(D_i - S_i) \cdot S_i}. \quad (1.11)$$

Произведем расчет на примере 1-го калибра

$$\mu_1 = \frac{(175,0 - 7,91) \cdot 7,91}{(170,6 - 7,91) \cdot 7,91} = 1,027.$$

Аналогично рассчитываем вытяжки для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Определяем площади сечения для каждого прохода:

$$F_i = \frac{F_{i-1}}{\mu_i}, \quad (1.12)$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

(1.13)

$$F_0 = 3,14 \left( \left( \frac{175,0^2}{2} \right) - \left( \frac{(175 - 2 \cdot 7,91)^2}{2} \right) \right) = 4377 \text{ мм}^2.$$

Произведем расчет на примере 1-го калибра

$$F_1 = \frac{4377}{1,027} = 4261 \text{ мм}^2.$$

Аналогично рассчитываем площади сечения для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Уширение в каждом калибре:

$$\Delta b_i = \frac{\varepsilon}{100} \cdot D_i. \quad (1.14)$$

Произведем расчет на примере 1-го калибра

$$\Delta b_1 = \frac{0,5 \cdot 5,022}{100} \cdot 170,606 = 4,284 \text{ мм}.$$

Аналогично рассчитываем уширения для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Определяем размеры калибров. Для круглых калибров (чистовой калибр) ширина и высота определяется:

$$b = h = \frac{D}{2}, \quad (1.15)$$

$$b_{10} = h_{10} = \frac{115,886}{2} = 57,94 \text{ мм}.$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Для овальных калибров ширина определяется:

$$b_i = \frac{D_{cp.i}}{E}, \quad (1.16)$$

где  $E$  – коэффициент, зависящий от овальности калибра.

Овальность калибра (для трёхвалковых станков):

$$\Theta_i = \frac{b_i}{h_i} = \left( \frac{100}{100 - \varepsilon_i} \right)^q, \quad (1.17)$$

где  $b_i$  – половина ширины калибра;

$h_i$  – высота ручья или половина высоты калибра;

$\varepsilon_i$  – частная деформация;

$q$  – показатель, учитывающий работу стана с уширением или утяжкой, равный для трёхвалковой рабочей рабочей клетки для углеродистых и легированных сталей 1,23.

Произведем расчет на примере 1-го калибра:

$$\Theta_1 = \left( \frac{100}{100 - 0,5 \cdot 5,022} \right)^{1,23} = 1,032.$$

Аналогично рассчитываем овальность для остальных калибров.

По таблице, согласно полученной овальности выбираем коэффициент  $E$ :

$$E_1 = E_9 = 1,95.$$

Для остальных калибров:

$$E_{2-8} = 1,92.$$

Определяем половину ширины калибра на примере 1-го калибра:

$$b_1 = \frac{170,61}{1,95} = 88,86 \text{ мм.}$$

Половина высоты калибра на примере 1-го калибра:

$$h_i = \frac{b_i}{\varnothing_i}, \quad (1.18)$$

$$h_1 = \frac{88,86}{1,05} = 86,12 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем половину ширины и высоты для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Радиус овальности калибра:

$$R_i = \frac{h_i^2 + b_i^2 - h_i \cdot b_i}{2h_i - b_i}, \quad (1.19)$$

Произведем расчет на примере 1-го калибра:

$$R_1 = \frac{86,12^2 + 88,86^2 - 86,12 \cdot 88,86}{2 \cdot 86,12 - 88,86} = 91,86 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем радиус овальности для остальных калибров.

Эксцентриситет калибра:

$$e_i = \rho_i - h_i, \quad (1.20)$$

Произведем расчет на примере 1-го калибра:

$$e_1 = 91,86 - 86,12 = 5,74 \text{ мм.}$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Аналогично рассчитываем эксцентриситет для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Катающие диаметры валков определяют по формуле:

$$D_{\text{кат}} = D_{\text{н.в}} - 2h_i \cdot \cos \Theta_k. \quad (1.21)$$

На практике  $\Theta_k = 40 - 45^\circ$ , поэтому с достаточной для инженерных расчётов точностью принимают:

$$D_{\text{кат}} = D_{i.б} - (0,7 \div 0,75) \cdot 2h_i. \quad (1.22)$$

Диаметр бочки валка для стана РРС  $D_{i.б} = 450$  мм. Определяем катающие диаметры валков на примере 1-го калибра:

$$D_{\text{кат}1} = 450 - 0,7 \cdot 2 \cdot 86,121 = 329,43 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем катающие диаметры для остальных калибров. Результаты расчетов заносим в таблицу 1.8.

Таблица 1.8 – Калибровка валков РРС

№ клетки	Размеры трубы, мм		$\mu_i$	$\Delta b_i$ , мм	Размеры калибров, мм				$D_{\text{кат}}, \text{ мм}$
	$D_{\text{ср}}$	$S_{\text{ред}}$			$h_i$	$b_i$	$\rho_i$	$e_i$	
1	170,606	7,91	1,027	4,284	86,121	88,857	91,863	5,742	329,431
2	162,039	8,017	1,043	8,137	79,213	84,395	90,666	11,453	339,102
3	153,901	8,094	1,043	7,729	75,235	80,157	86,113	10,878	344,671
4	146,173	8,201	1,044	7,34	71,457	76,132	81,788	10,332	349,961
5	138,832	8,277	1,044	6,972	67,868	72,308	77,681	9,813	354,984
6	131,86	8,389	1,045	6,622	64,46	68,677	73,78	9,32	359,756
7	125,239	8,418	1,045	6,289	61,223	65,229	70,075	8,852	364,288
8	118,95	8,513	1,046	5,973	58,149	61,953	66,556	8,408	368,592
9	115,963	8,62	1,028	2,912	58,537	60,397	62,44	3,903	368,048
10	115,886	8,62	1,001	-	57,943	57,943	-	-	368,88

### 1.2.2 Расчет скоростного режима редуцирования

Для определения скорости трубы с учетом натяжения воспользуемся формулой Колмогорова В.Л.:

$$\frac{S_i}{S_{i-1}} = \left( \frac{D_{i-1}}{D_i} \right)^a, \quad (1.23)$$

где  $a$  – коэффициент, который можно определить по формуле:

$$a = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{3 \cdot z}{\sqrt{4 - 3 \cdot z^2}} \right), \quad (1.24)$$

где  $z$  – коэффициент пластического натяжения.

При этом коэффициент  $z$  можно определить исходя из соотношения:

$$z_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_0}{1,15 \cdot \sigma_{si}} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_1}{1,15 \cdot \sigma_{si}}, \quad (1.25)$$

где  $\sigma_{si}$  – предел текучести трубы

$\sigma_0$  – напряжения натяжения трубы после рассматриваемой клетки (для последнего прохода отсутствует);

$\sigma_1$  – напряжения натяжения трубы перед рассматриваемой клетью (для первого прохода отсутствует).

Определим коэффициент  $a$  для последнего прохода по формуле 1.23:

$$a_{10} = \frac{\ln\left(\frac{8,62}{8,62}\right)}{\ln\left(\frac{115,963}{115,886}\right)} = 0.$$

Аналогично коэффициент  $a$  рассчитывается для остальных проходов.



Коэффициент пластического натяжения  $z$  определим по формуле 1.24.  
Для последнего прохода:

$$z_{10} = \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

Аналогично рассчитывается коэффициент пластического натяжения для остальных проходов. Исходя из соотношения 1.25, найдем напряжение натяжения трубы перед 10 клетью:

$$\sigma_{010} = 1,15 \cdot 31,99 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} = 24,06 \text{ МПа.}$$

При этом напряжение натяжения трубы можно определить:

$$\sigma_0 = E \cdot \frac{V_H - V}{V_H}, \quad (1.26)$$

где  $V_H$  – скорость трубы с натяжением, м/с;

где  $V$  – скорость трубы без натяжения, м/с;

$E$  – модуль Юнга.

Для последнего прохода скорость трубы с натяжением:

$$V_{H10} = 1,9 \text{ м/с.}$$

Тогда скорость трубы без натяжения будет равна:

$$V_{10} = \frac{1,9 \cdot (1400 - 1,9)}{1400} = 1,867 \text{ м/с.}$$

Из закона постоянства секундных объемов скорость без натяжения в любой клет:

$$g_{i-1} = \frac{F_i \cdot g_i}{F_{i-1}}, \quad (1.27)$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Для предпоследней клетки скорость трубы без натяжения:

$$g_9 = \frac{3059 \cdot 1,867}{3061} = 1,866 \text{ м/с.}$$

Аналогично рассчитывается скорость трубы без натяжения для остальных проходов.

Далее по формулам 1.23-1.26 производится расчет скорости трубы с натяжением. Расчет произведем на примере 9 и 1 проходов:

$$a_9 = \frac{\ln\left(\frac{8,62}{8,62}\right)}{\ln\left(\frac{118,95}{115,963}\right)} = 9,48 \cdot 10^{-16},$$

$$z_9 = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot (3 \cdot 9,48 \cdot 10^{-16} - 1)}{3 \cdot \sqrt{9 \cdot (9,48 \cdot 10^{-16})^2 - 6 \cdot 9,48 \cdot 10^{-16} + 4}} = 0,577,$$

$$\sigma_{09} = 1,725 \cdot 0,577 \cdot 80,223 - 0,5 \cdot 24,06 = 78,01 \text{ МПа,}$$

$$V_{н9} = -\frac{1400 \cdot 1,866}{78,01 - 1400} = 1,98 \text{ м/с,}$$

$$a_1 = \frac{\ln\left(\frac{7,91}{7,91}\right)}{\ln\left(\frac{175}{170,606}\right)} = 0,$$

$$z_1 = \frac{\sqrt{3}}{3},$$

$$\sigma_{01} = 0 \text{ МПа,}$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

$$V_{н1} = V_1 = 1,341 \text{ м/с},$$

Все значения скорости заносятся в таблицу 1.9.

Скорости вращения валков для каждой клетки определим по формуле:

$$n_i = \frac{g_i}{\frac{\pi}{6} \cdot 10^{-4} \cdot D_{ki}}, \quad (1.28)$$

Для последней клетки:

$$n_i = \frac{1,9}{\frac{\pi}{6} \cdot 10^{-4} \cdot 248,8} = 145,8 \text{ об/мин.}$$

Аналогично рассчитываем оборотов в минуту валков для остальных калибров. Все значения  $n_i$  заносятся в таблицу 1.9.

### 1.2.3 Расчет температурного режима редуцирования

Задачей расчета температурного режима прокатки является определение температуры начального нагрева заготовки перед прокаткой и определение температуры раската после каждого прохода прокатки.

Температура нагрева раската перед прокаткой зависит от химического состава стали и для стали 20А после подогрева в индукционной печи составляет  $t_0 = 975^\circ\text{C}$ .

Величину температуры прокатываемого металла  $t_i$  после прохода прокатки с учетом потерь тепла излучением и конвекцией можно определить из уравнения:

$$t_i = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{1000}{t_{i-1}} + 0,055 \frac{\tau_i}{D_{cp,i}}}}, \quad (1.29)$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

где  $t_{i-1}$  – температура раската на выходе из предыдущей прокатной клетки, для  $i = 1$  – температура заготовки на выходе из печи, °С;

$D_{ср.i}$  – средний диаметр трубы перед  $i$ -ым проходом;

$\tau_i$  – время прохода раската от предыдущей клетки до рассматриваемой прокатной клетки, для  $i = 1$  – от печи до первой прокатной клетки, °С.

Значение  $\tau_i$  определяется:

$$\tau_i = \frac{L_i}{g_{i-1}}, \quad (1.30)$$

где  $L_i$  – расстояние между предыдущей и рассматриваемой прокатными клетями, м;

$g_{i-1}$  – скорость движения раската на выходе из предыдущей клетки, м/с.

$$\tau_1 = \frac{3,5}{1,3} = 2,692 \text{ с.}$$

Также согласно формуле 1.26 рассчитываем время прохода раската для остальных проходов. Температуры прокатываемого металла после первого прохода:

$$t_1 = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{1000}{975} + 0,055 \frac{2,692}{170,61}}} = 991^\circ\text{С.}$$

Аналогично рассчитываем температуру редуцирования для остальных проходов. Все значения полученные  $t_i$  заносятся в таблицу 1.9.

Коэффициент трения при горячей прокатке металлов можно определить по формуле для каждого прохода прокатки:

$$f = k_M \cdot k_C \cdot k_g \cdot (0,55 - 0,00024 \cdot t) \quad (1.31)$$

где  $k_M$  – коэффициент, зависящий от материала прокатных валков; для чугунных валков  $k_M = 1$ , для стальных –  $k_M = 1,2$ ;

$k_C$  – коэффициент, зависящий от содержания углерода в прокатываемом металле;

$k_g$  – коэффициент, зависящий от скорости прокатки или от линейной скорости вращения валков.

Коэффициент трения в первом проходе:

$$f_1 = 1 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 0,90 - 0,00024 \cdot 991 \approx 0,337.$$

Аналогично рассчитываем коэффициент трения для остальных проходов. Все значения  $f$  заносим в таблицу 1.9

Таблица 1.9 – Деформационно-кинематические параметры редуцирования трубы 114,3x8,5 мм из стали 20А

Номер клетки	Скорость вращения валков	Скорость движения трубы	Скорость движения трубы с натяжением	Темп. прокатыв. мет.	Коэффициент трения
№	n, об/мин	$\vartheta$ , м/с	$\vartheta_H$ , м/с	t, °C	f
1	77,72	1,34	1,34	991	0,337
2	79,74	1,4	1,42	997	0,336
3	81,88	1,46	1,48	999	0,335
4	84,26	1,52	1,54	1000	0,335
5	90,6	1,59	1,68	1000	0,335
6	89,48	1,66	1,69	1000	0,335
7	137,9	1,74	1,76	1000	0,335
8	141,76	1,82	1,85	1000	0,335
9	152,15	1,87	1,98	1000	0,335
10	145,8	1,87	1,9	1000	0,335

#### 1.2.4 Расчет энергосиловых параметров редуцирования

Длина дуги контакта определяется по формуле:

$$l_{дi} = \sqrt{(D_{срi-1} - 2 \cdot h_i) \cdot R_{ki}}, \quad (1.32)$$

Для первого прохода:

$$l_{д1} = \sqrt{(175 - 2 \cdot 86,121) \cdot \frac{329,431}{2}} = 21,31 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем длину дуги контакта для остальных проходов.

Площадь контактной поверхности с достаточной для практических расчетов точностью можно определить по формуле:

$$F_k = (0,90 \div 0,95) \cdot l_{ди} \cdot D_{срi} \cdot \sin \frac{\pi}{a}, \quad (1.33)$$

где  $a$  – число валков в клет.

Для первого прохода:

$$F_k = 0,925 \cdot 21,31 \cdot 170,606 \cdot \sin \frac{\pi}{3} = 2913 \text{ мм}^2.$$

Аналогично рассчитываем площадь контакта для остальных проходов.

Сопротивление пластической деформации  $\sigma_S$  прокатываемого металла для каждого прохода прокатки определяется в следующей последовательности.

Вначале определяется абсолютное обжатие:

$$\Delta D_{ср.i} = D_{ср.i-1} - D_{ср.i}, \quad (1.34)$$

Для первого прохода

$$\Delta D_{ср.1} = 175 - 170,606 = 4,39 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем абсолютное обжатие для остальных проходов.

Затем определяется скорость деформации:

$$U = \frac{g_i \cdot \Delta D_{ср.i}}{l_{ди} \cdot D_{ср.i-1}} \cdot 1000, \quad (1.35)$$

					ДМ 2055.00.00.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

где  $\mathcal{G}$  – скорость прокатки в м/с.

Для первого прохода:

$$U_1 = \frac{1,341 \cdot 4,394}{21,31 \cdot 175} = 1,579 \text{ с}^{-1}.$$

Степень деформации:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta D_{\text{ср}i}}{D_{\text{ср}i-1}}, \quad (1.36)$$

Для первого прохода

$$\varepsilon_1 = \frac{4,394}{175} = 0,026.$$

Аналогично рассчитываем степень деформации для остальных проходов.  
Сопротивление пластической деформации определяется по формуле:

$$\sigma_S = \sigma_0 \cdot U_i^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_i)^b \cdot \left(\frac{t_i}{1000}\right)^c \cdot 10000, \quad (1.37)$$

где для стали 20А базисное сопротивление пластической деформации

$$\sigma_0 = 7,626 \text{ кг / мм}^2;$$

$$a = 0,129;$$

$$b = 0,178;$$

$$c = -2,95.$$

Для первого прохода:

$$\sigma_S = 7,626 \cdot 1,579^{0,129} \cdot (10 \cdot 0,026)^{0,178} \cdot \left(\frac{991}{1000}\right)^{-2,95} \cdot 10000 = 74,972 \text{ МПа}.$$

Аналогично рассчитываем сопротивление пластической деформации для остальных проходов. Все значения  $\sigma_S$  заносятся в таблицу 1.10.

Коэффициент, учитывающий влияние внеконтактных зон:

$$\eta_i = 1 + 0,55 \cdot \frac{D_{\text{ср.i-1}}}{l_{\text{дi}}} \cdot \sqrt{\frac{S_i}{D_{\text{ср.i-1}}}}, \quad (1.38)$$

Для первого прохода:

$$\eta_1 = 1 + 0,55 \cdot \frac{175}{21,31} \cdot \sqrt{\frac{7,91}{175}} = 1,987,$$

Аналогично рассчитываем коэффициент для остальных проходов.

Среднее давление прокатки для каждого прохода прокатки:

$$p_{\text{ср}} = \eta_i \cdot \sigma_{Si} \cdot \frac{2 \cdot S_i}{D_{\text{ср.i}}}, \quad (1.39)$$

Для первого прохода:

$$p_{\text{ср1}} = 1,987 \cdot 74,972 \cdot \frac{2 \cdot 7,91}{170,606} = 14,6 \text{ МПа.}$$

Аналогично рассчитываем среднее давление прокатки для остальных проходов. Все значения  $p_{\text{ср}}$  заносятся в таблицу 1.10.

Усилие прокатки для каждого прохода:

$$P = \frac{F_k \cdot p_{\text{ср}}}{1000}. \quad (1.40)$$



Для первого прохода:

$$P_1 = \frac{2913 \cdot 14,6}{1000} = 43 \text{ кН.}$$

Аналогично рассчитываем усилие прокатки для остальных проходов. Все значения  $P$  заносятся в таблицу 1.10.

Момент прокатки для трехвалкового калибра определяется по формуле В.П. Анисифирова:

$$M = P \cdot D \cdot f \cdot \sqrt{3} \left[ \frac{D_{\text{и}}}{D_{\text{кат}}} \cdot \left( \frac{\pi}{3} - 2\Theta_{\text{к}} \right) - \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - 2 \sin \Theta_{\text{к}} \right) \right], \quad (1.41)$$

Для первого прохода:

$$M_1 = 43 \cdot 450 \cdot 0,337 \cdot \sqrt{3} \left[ \frac{450}{329,43} \cdot \left( \frac{\pi}{3} - 2 \cdot 0,35 \right) - \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - 2 \sin 0,35 \right) \right] = 1,373 \text{ кН} \cdot \text{М.}$$

Аналогично рассчитываем момент прокатки для остальных проходов. Все значения  $M_i$  заносятся в таблицу 1.10.

Мощность прокатки определяется по формуле:

$$W_i = M_i \frac{\pi \cdot n_i}{30}, \quad (1.42)$$

Для первого прохода:

$$W_1 = \frac{1,373 \cdot 3,14 \cdot 77,72}{30} = 11,17 \text{ кВт.}$$

Аналогично рассчитываем мощность прокатки для остальных проходов. Все значения  $W_i$  заносятся в таблицу 1.10.

Таблица 1.10 – Таблица энергосиловых параметров редуцирования трубы 114,3х9,0 мм из стали 20А

Номер клетки	Номер прохода	Площадь контакта	Коэф. влияния внеконт. зон	Сопр. пласт. деформации	Ср. давл-е прокатки	Усилие прокатки	Момент прокатки	Мощность прокатки
№	№	$F_k, \text{мм}^2$	$\eta$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$p_{cp}, \text{МПа}$	$P, \text{кН}$	$M, \text{кН}\cdot\text{м}$	$W_i, \text{кВт}$
1	1	2913	1,987	74,972	14,6	43	1,4	11,2
2	2	5899	1,46	83,671	12,77	75	2,3	19
3	3	5505	1,459	83,847	13,64	75	2,2	18,8
4	4	5134	1,459	84,361	14,62	75	2,1	18,7
5	5	4787	1,458	85,462	15,79	76	2,1	19,6
6	6	4460	1,458	85,664	16,86	75	2	18,6
7	7	3402	1,559	88,635	19,89	68	3,7	54
8	8	3177	1,558	89,345	21,34	68	3,6	54
9	9	1416	2,188	80,223	27,61	39	2,1	33,6
10	10	287	6,781	31,99	34,14	10	0,5	8

#### 1.2.5 Расчёт часовой производительности стана

Часовая производительность прокатки определяется по формуле:

$$\Pi = \frac{3600 \cdot G \cdot K_{ст}}{T_p \cdot K_p}, \quad (1.40)$$

где  $G$  – масса заготовки, т;

$K_{ст}$  – коэффициент использования стана. Принимаем равным 0,95;

$K_p$  – расходный коэффициент.

$T_p$  – ритм прокатки, с.

$$\Pi = \frac{3600 \cdot 0,573 \cdot 0,92}{36,9 \cdot 1,14} = 45,1 \text{ т/ч.}$$