

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

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, начальник лаборатории НК

_____ (Т.Г. Лаптова)

_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ (Д.А. Винник)

_____ 2020г.

Исследование и классификация дефектов, возникающих при
протяжке отводов большого диаметра

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ ЮУрГУ–
22.04.02.2020.139.ПЗ ВКР

Руководитель работы, к.т.н., доцент

_____ (Н.А. Шабурова)

_____ 2020 г.

Автор проекта

студент группы ПЗ - 343

_____ (Е.С. Григорьева)

_____ 2020г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

_____ (Н.А. Шабурова)

_____ 2020 г.

РЕФЕРАТ

Григорьева Е.С. Исследование и классификация дефектов, возникающих при протяжке отводов большого диаметра – Челябинск ЮУрГУ, ПЗ-343, 2020, 67 с., 60 ил., 14 табл., библиогр. список 10 наим.

В работе приводится краткое описание технологического процесса изготовления цельнотянутых отводов большого диаметра. Показаны преимущества такого метода изготовления. Так же рассмотрены разновидности и проведена классификация дефектов и других видов брака, встречающихся на готовых отводах.

На основании представленных в исследовательской работе результатов, сделаны выводы по каждому известному случаю брака и предложены меры по предотвращению его повторного появления.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1	ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ...	
1.1	Сортамент труб и марки сталей.....	10
1.2	Описание технологического процесса.....	17
1.3	Описание оборудования... ..	20
1.4	Преимущества данной технологии.....	20
1.5	Постановка задач исследования... ..	21
2	МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ... ..	22
3	РАЗНОВИДНОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ... ..	25
3.1	Технологические разновидности брака и методы предотвращения... ..	25
3.1.1	«Гофра»	25
3.2	Брак обусловленный низким качеством полуфабриката... ..	28
3.2.1	«Разрушения»... ..	28
3.2.2	«Пятнистость при нагреве».....	43
3.2.3	«Расслоение»	53
3.2.4	«Повышенная твердость».....	61
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследовательской работы является выявление причин возникновения различных дефектов при протяжке крутоизогнутых цельнотянутых отводов большого диаметра. Как показала практика при производстве таких изделий возникает большое количество брака, что ведет к значительным экономическим потерям и сокращению прибыли. В данной работе все дефекты разбиты на две основные группы: технологические и обусловленные низким качеством полуфабриката. Технологические – это дефекты, связанные с нарушением технологии производства «гофра» (рис.1.3), геометрические отклонения от ГОСТа (овальность, диаметр, строительная длина, косина, угол фаски, отсутствие притупления) и т.д. К обусловленным низким качеством полуфабриката относятся такие виды брака, которые возникают из-за некачественной трубы. Трубы поставляются горячедеформированные по ГОСТ 8732-78 из стали 20 или 09Г2С. Протяжка отводов происходит при температуре 650-750 °С. Были выявлены такие случаи брака, как «разрушение», «пятнистость при нагреве», «расслоение», «повышенная твердость» и т.д. Если технологические причины дефектов в большинстве случаев устранимы и предупреждаются отладкой производства, то вторые полностью зависят от качества поставляемого сырья. Именно поэтому в данной исследовательской работе более подробно рассмотрены разновидности брака, обусловленные низким качеством полуфабриката.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Сортамент труб и марки сталей.

В рассматриваемом производстве изготавливаются отводы по ГОСТ 17375-2001 следующих типоразмеров: 377×10, 426×10, 426×12, 530×10, 530×12, 630×12, 720×10, 720×12. Полуфабрикатом является труба по ГОСТ 8732-74 профилем: 273×10, 273×12, 377×10, 377×12, 426×12, 426×14. К применяемым маркам стали относятся: сталь 20, 09Г2С и гораздо реже (по требованию заказчика 13ХФА). Как показала практика, это самые востребованные стали для деталей магистральных трубопроводов.

Применение стали 20 в общем машиностроении является повсеместным. Трубопроводная арматура, произведённая из стали 20, характеризуется устойчивостью к высокому рабочему давлению в магистральных.

Для всех углеродистых сталей наиболее значимым является процент содержания в общем составе углерода. Этот показатель и указывается в марке в сотых долях процента. Полный химический состав стали 20 будет следующим:

- железо (Fe) – до 98%;
- углерод (С) – от 0,17 до 0,24%;
- марганец (Mn) – от 0,35 до 0,65%;
- никель (Ni) – до 0,25%;
- сера (S) – до 0,04%;
- фосфор (P) – до 0,04%;
- хром (Cr) – до 0,25%;
- медь (Cu) – до 0,25%;
- мышьяк (As) – 0,08%.

Производство всей наиболее значимой продукции из Стали 20 регламентируется нижеприведёнными стандартами (ГОСТ):

- сортовой прокат, в том числе фасонный - ГОСТ 1050-88, ГОСТ 2590-2006, ГОСТ 2591-2006, ГОСТ 2879-2006, ГОСТ 8509-93, ГОСТ 8510-86, ГОСТ 8240-97, ГОСТ 8239-89;
- калиброванный пруток - ГОСТ 7417-75, ГОСТ 8559-75, ГОСТ 8560-78, ГОСТ 10702-78;
- шлифованный пруток и серебрянка - ГОСТ 14955-77;
- лист толстый - ГОСТ 1577-93, ГОСТ 19903-74;
- лист тонкий - ГОСТ 16523-97;
- лента - ГОСТ 6009-74, ГОСТ 10234-77, ГОСТ 103-2006, ГОСТ 82-70;
- проволока - ГОСТ 5663-79, ГОСТ 17305-91;
- поковки и кованные заготовки - ГОСТ 8479-70;
- трубы - ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 8731-74, ГОСТ 8732-78, ГОСТ 8733-74, ГОСТ 5654-76, ГОСТ 550-75.

Ниже приведены требования к стали 20 обусловленные ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 8731-74, ГОСТ 8732-78, ГОСТ 8733-74, ГОСТ 5654-76, ГОСТ 550-75 : механические характеристики при повышенных и комнатной температурах (табл.1.1, табл.1.2), технологические свойства (табл.1.3) и ударная вязкость (табл.1.4)

Таблица 1.1 - Механические характеристики при повышенных температурах

Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
20	280	430	34	67	218
200	230	405	28	67	186
300	170	415	29	64	188
400	150	340	39	81	100
500	140	245	40	86	88

Таблица 1.2 - Механические свойства Стали 20 при температуре +20С.

Нормативный документ	Состояние поставки	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ (%)	НВ (не более)
ГОСТ 1050-74	Сталь калиброванная:				
	• горячекатаная, кованая и серебрянка 2-й категории после нормализации	410	25	55	
	• 5-й категории после нагартовки	490	7	40	
	• 5-й категории после отжига или высокого отпуска	390	21	50	

Таблица 1.3 - Технологические свойства Стали 20

Удельный вес		7,85 г/см ³
Твёрдость материала	Трубы горячедеформированные, ГОСТ 550-75	НВ 10 = 156 МПа
	Трубы, ГОСТ 8731-87	НВ 10 = 156 МПа

Таблица 1.4 - Ударная вязкость КСУ (Дж/см³) при низких температурах °С

ГОСТ	Состояние поставки	Сечение, мм	КСУ ⁺²⁰	КСУ ⁻⁴⁰	КСУ ⁻⁶⁰
19281-73	Сортовой и фасонный прокат	от 5 до 10	64	39	34
		от 10 до 20 вкл.	59	34	29
		от 20 до 100 вкл.	59	34	-

Марка стали - 09Г2С

Сталь 09Г2С содержит в среднем 0,09% углерода, Г2 - указывает содержание марганца в стали примерно 2%, С - указывает содержание кремния в стали примерно 1%. Низколегированную конструкционную сталь 09Г2С применяют в строительстве и машиностроении для сварных конструкций, в основном без дополнительной термообработки, для ответственных листовых сварных конструкций в химическом и нефтяном машиностроении, судостроении.

Из стали 09Г2С изготавливают паровые котлы, аппараты и емкости, работающие под давлением при температуре от -70 до +450°C, трубопроводы пара и горячей воды, крепежные детали в котлах и трубопроводах. Ниже приведены требования к стали 09Г2С обусловленные ГОСТ 19281-73: механические характеристики при комнатной температуре (табл.1.5), ударная вязкость при низких температурах (табл.1.6), механические свойства при повышенных температурах (табл.1.7), технологические свойства (табл.1.8).

Таблица 1.5 - Механические свойства стали 09Г2С при температуре 20°C

Соответствие по ГОСТ	Вид поставки	Номинальное сечение, мм	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)
19281-73	Сортовой и фасонный прокат	до 10	345	490	21

Таблица 1.6 - Ударная вязкость стали 09Г2С КСУ (Дж/см³) при низких температурах

Соответствие по ГОСТ	Вид поставки	Номинальное сечение, мм	КСУ ⁺²⁰	КСУ ⁻⁴⁰	КСУ ⁻⁶⁰
19281-73	Сортовой и фасонный	от 5 до 10	64	39	34
		от 10 до 20 вкл.	59	34	29

	прокат	от 20 до 100 вкл.	59	34	-
--	--------	----------------------	----	----	---

Таблица 1.7 - Механические свойства стали 09Г2С при повышенных температурах

Температурные испытания, °С	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ (%)
Нормализация 930-950 °С				
20	300	460	31	63
300	220	420	25	56
475	180	360	34	67

Таблица 1.8 - Технологические свойства стали 09Г2С

Температураковки, °С	Начало 1250, конец 850.
Свариваемость	Сваривается без ограничений. Способы сварки: РДС, АДС под флюсом и газовой защитой, ЭШС.
Обрабатываемость резанием	В нормализованном, отпущенном состоянии при $s_B = 520$ МПа $K_{ц\text{ тв.спл.}} = 1,6$, $K_{ц\text{ б.ст.}} = 1,0$.

Сталь 13ХФА

Сталь 13ХФА классифицируют как конструкционная с высокой стойкостью к коррозии, устойчивая к низким температурам легированная. Иногда в технической документации можно встретить обозначение 13ХФ. Это одна и та же марка. Сокращённое наименование вызвано особенностями расшифровки стали.

Как и для других марок, первое двузначное число указывает на допустимое содержание углерода. Последующие заглавные буквы. Позволяют определить наличие легирующих элементов. В нашем случае основными легирующими добавками является хром (о чем свидетельствует буква Х) и ванадий (буква Ф). Добавление заглавной буквы А свидетельствует о том, что такой сплав относится к категории высококачественных марок.

По химическому составу она относится к категории углеродистых легированных сталей. В соответствие с установленным стандартом допускается следующий состав элементов. Как и в любой стали, основу составляет железо. В качестве добавок допускается углерод – в количестве 1,25-1,4, кремния до 0,4. Легирующих добавок: марганца – не более 0,45, хрома – до 0,7, никеля – до 0,35, ванадия более 0,25.

Металл имеет ярко выраженную феррито-перлитную структуру. В основном она имеет округлую форму, ориентированную в направлении возможной деформации, что определяет её свойства.

Механические свойства

Эти свойства 13ХФА определяется входящими в состав сплава химическими элементами. Основные числовые характеристики, полученные при температуре в 20 °С имеют следующие значения:

- величина ударной вязкости составляет 196 кДж/м²;
- допустимый предел кратковременной прочности находится в интервале от 502 до 686 МПа;
- реализуемый предел текучести находится в интервале от 353МПа до 519 МПа;
- максимальная величина относительного удлинения не превышает 25%.

Все приведенные свойства и характеристики соответствуют установленным требованиям ГОСТ для всех изделий из 13ХФА.

13ХФА обладает определёнными достоинствами, что позволяет использовать её для решения целого круга специфических задач. К таким достоинствам относятся:

- устойчивость к длительному воздействию низких и высоких температур (от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- может выдерживать достаточно высокие внешние физические нагрузки (что свидетельствует о хороших показателях прочности);
- высокая износоустойчивость;
- все изделия обладают отличной свариваемостью;
- транспортируемые внутри таких труб растворы могут нагреваться до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- трубы, изготовленные из этого материала, способны выдержать внутреннее давление вплоть до $7,4\text{ МПа}$;
- 13ХФА очень стойкая к образованию различного вида трещин (сульфидных или водородных).

Способы обработки и существующие аналоги

Марка 13ХФА достаточно легко подвергается основным способам обработки:

- резанию механическим инструментом;
- основным видам сварке;
- ковке;
- обычной инструментальной обработке.

Для поперечного или продольного резания, выпускаемых изделий, не требуется специального инструмента. Об этом свидетельствуют физические и механические свойства сплава. Свариваемость такого сплава не имеет ограничений. Его можно подвергать ковке уже при температуре более 860°C . Произведенные исследования выпускаемого металла показали, что он не флокеночувствителен.

Наличие в сплаве необходимых легирующих добавок приводит к появлению специфических, так называемых закалочных структур. Во время сварки их образование может привести к снижению стойкости от холодных и горячих трещин. При сильном перегреве снижаться стойкость к хрупкому разрушению. Этот эффект вызван образованием увеличенного аустенитного зерна.

Наличие легирующих добавок, положительно влияет не только антикоррозионные свойства, но и на стойкость к перегреву. Происходит

повышение ударной вязкости у границ образованного шва. Значительно повышается надёжность места сварки.

Область применения 13ХФА

Металл марки 13ХФА ГОСТ 4543-71 применяется для производства труб по так называемой бесшовной технологии. Сохранением своих механических и физических свойств даже при длительном воздействии, как высоких, так и низких температур. Такие трубы выпускаются длиной от 4 метров до 12,5 метров. В качестве дополнительной продукции производят различные виды трубных заготовок, широкий набор арматуры для соединений (трубные переходы, наконечники, фланцы и так далее).

Из выше изложенного следует, что сталь 20, 09Г2С, 13ХФА соответствует всем предъявляемым свойствам для изготовления элементов трубопроводов. Именно поэтому эти марки стали получили широкое применение в производстве цельнотянутых крутоизогнутых отводов больших диаметров.

1.2 Описание технологического процесса

Схематическое изображение технического процесса (рис.1.1).

Цельнотянутые крутоизогнутые отводы больших диаметров изготавливаются протягиванием трубных заготовок (рис.1.2) мерной длины по нагретому жаропрочному дорну до температуры пластической деформации. На рогообразный сердечник (дорн) нанизывается несколько отрезков труб. Гидравлический пресс проталкивает заготовки по основанию к разогретому индуктору. Каждую последующую заготовку проталкивает по основанию предыдущая до рогообразного наконечника. В индукторе заготовки прогреваются до температуры порядка 700°С, достигая пластического состояния, проходят через рогообразный наконечник принимая его форму. После чего сталкивается в прямок (рис.1.3), идущей сзади, заготовкой.

Затем отвод размечают и обрезаются технологические припуски. После этого на токарно-фрезерном станке (рис.1.4), с применением специальных приспособлений отводы торцуются с двух сторон.

1.3 Описание оборудования

Для производства цельнотянутых крутоизогнутых отводов большого диаметра используется установка индукционного нагрева (рис.1.5). Преимуществами такого оборудования являются:

- отсутствие сварных швов;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- по сечению и длине заготовки равномерный нагрев;
- постоянная температура нагрева;
- малые теплопотери;
- достаточно высокая производительность.

1.4 Преимущества данной технологии

В сравнении со сварными цельнотянутые крутоизогнутые отводы имеют следующие преимущества:

- отсутствие сварных швов;
- температура эксплуатации от – 60 до +400°С;
- максимальное сопротивление давлению (рабочее давление до 160 атм);
- равномерная толщина стенок;
- низкие массогабаритные показатели;
- радиусгиба от 1,5D.

1.5 Постановка задач исследования

Целью исследовательской работы является выявление причин возникновения различных дефектов при протяжке крутоизогнутых цельнотянутых отводов большого диаметра. Как показала практика, при производстве таких изделий

возникает большое количество брака, что ведет к значительным экономическим потерям и сокращению прибыли. В большинстве случаев закупать трубы под протяжку отводов приходится со складов, территориально находящихся ближе к производству, т.е. у посредников. Взаимодействие с непосредственным производителем труб практически отсутствует, поэтому нет возможности обсуждения дополнительных технических требований, предъявляемых к трубам поставляемых для изготовления изделий с последующей горячей деформацией. Целью исследовательской работы является: составить атлас дефектов, выяснить причины возникновения брака при производстве цельнотянутых крутоизогнутых отводов большого диаметра, классифицировать дефекты на группы.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как в ходе исследовательской работы было отобрано достаточно большое количество участков дефектного металла, возникла необходимость оценки качества предоставленных образцов, а также оценка соответствия характеристик исходного сырья требованиям, заявленным в нормативной документации. В ходе исследования был произведен химический анализ, микроструктурные исследования (анализ неметаллических включений, оптический металлографический анализ металла на предмет наличия окалина и обезуглероженного слоя на поверхности).

Исследования проводились на следующем оборудовании:

1. отрезной станок Delta-Abrasimet (рис.2.1),
2. автоматический станок для горячей запрессовки SimpliMet 1000 (рис.2.2),
3. оптический микроскоп Axio Observer.D1m (рис.2.3), оснащенный анализатором изображений Thixomet Pro.
4. автоэмиссионный растровый электронный микроскоп JSM-7001F (JEOL) (рис.2.4),
5. атомно-эмиссионном спектрометр ДФС-500.

Оценка неметаллических включений проводилась по ГОСТ 1778-70 при увеличениях 100 и 200 крат. Определение структурных составляющих и балла зерна проводилось по ГОСТ 5639-82 при увеличениях 200, 500 крат. Оценка балла полосчатости по ГОСТ 5640-68 при увеличениях 100 крат.

Травление образцов проводилось в 4-х процентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

3. РАЗНОВИДНОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ

При протяжке отводов большого диаметра возникают различные виды дефектов. После исследования каждого известного случая все разновидности брака были отнесены на две большие категории. технологические и обусловленные низким качеством полуфабриката. Технологические – это дефекты, связанные с нарушением технологии производства «гофра», геометрические отклонения от ГОСТа (овальность, диаметр, строительная длина, косина, угол фаски, отсутствие притупления) и т.д. К обусловленным низким качеством полуфабриката относятся такие виды брака, которые возникают из-за некачественной трубы.

3.1 Технологические разновидности брака и методы их предотвращения

К технологическим видам брака можно отнести такие как «гофра» (рис.3.1), геометрические отклонения от ГОСТа (овальность, диаметр, строительная длина, косина, угол фаски, отсутствие притупления и т.д.).

3.1.1 «Гофра»

«Гофра» возникает в случае перегрева заготовки, металл достигает избыточную пластичность и при прохождении через рог сбивается в складки «гофру». Предотвращением такого дефекта является дополнительный контроль пирометром и исключение превышения заданной температуры.

Также причиной «гофры» может являться увеличение скорости протяжки. На нагретую заготовку с превышенным усилием давит следующая, и в итоге

заготовки идут внахлест, собираются в складки и рвутся (рис.3.2). Такой вид брака можно избежать при постоянном контроле параметров на оборудовании, в том числе скорости протяжки.

Со временем рогообразный наконечник изнашивается и на отводах значения наружного диаметра D выходят из поля допуска, что приводит к повышенной овальности и недопустимым значениям диаметров. Предотвращением такого вида брака является постоянный контроль за состоянием рога. Отклонения диаметра и овальности устраняются при помощи гидравлического пресса (холодной деформацией).

При разметке перед обрезкой технологических припусков могут сбиться настройки оборудования, что приводит к отклонениям по косине Q (рис.3.3) и строительной высоте F (рис.3.4). Избежать такой брак можно периодической калибровкой оборудования, исправить можно на станке при обработке торцов (если отклонения по строительной высоте в большую сторону). Отклонение размера угла фаски и отсутствие притупления исправимый брак на том же токарно-фрезерном станке.

3.2 Брак, обусловленный низким качеством полуфабриката

К такой разновидности брака относятся такие дефекты, которые возникают из-за некачественного полуфабриката, в данном случае это трубные заготовки. Трубы поставляются горячедеформированные по ГОСТ 8732-78 из стали 20 или 09Г2С. Протяжка отводов происходит при температуре 650-750 °С. Были выявлены такие случаи брака как «разрушение», «пятнистость при нагреве», «расслоение», «повышенная твердость» и т.д.

3.2.1 «Разрушения».

Были выявлены два случая разрушений отводов во время протяжки.

В первом случае в процессе протяжки отвода из стали 09Г2С произошло разрушение на внутреннем радиусе в виде разрыва по центру (рис.3.5). Нагрев

изделия производился индукционно до температуры 695-704°C. Контроль температуры по показаниям встроенного датчика. На месте разрушения была проведена вырезка образцов: 1) вдоль направления прокатки; 2) поперек. Исследовались неметаллические включения и микроструктура отобранных образцов.

Оценка неметаллических включений.

Оценка неметаллических включений проводилась по ГОСТ 1778-70. Оценка показала, что количество точечных оксидов и сульфидов в структуре соответствует 1 баллу (рис.3.6).

Исследование микроструктуры образцов.

Травление образцов проводилось в 4-х процентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Структура основного металла трубы феррито-перлитная. Для структуры характерна разнотернистость: основное зерно 12-го балла по ГОСТ 5639-82, но встречаются отдельные крупные зерна 5-6 балла (рис.3.7). Кроме того структура имеет полосчатость 3 балла по ГОСТ 5640-68 (рис.3.8).

Структура металла у поверхности разрушения обезуглерожена (рис.3.9). Глубина обезуглероженного слоя составляет 30-50 мкм.

Таким образом по результатам анализа можно сделать следующие выводы: разнотернистость металла свидетельствует о нарушении режима термообработки труб (перегрев при нормализации); обезуглероженность поверхности разрушения свидетельствует о наличии трещины в исходной трубе; разрушение отвода в процессе изготовления является следствием низкого качества металла.

Во втором случае в процессе протяжки отвода 720 из трубы стали 20 диаметром 426 мм. при нагреве до температуры 450°C участок отвода начал пузыриться и разрушился (рис.3.10, рис.3.11).

Образцы на исследования были взяты с места разрушения и основного металла трубы (рис.3.12).

Для определения степени загрязненности металла было проведено исследование на химический состав неметаллических включений обоих образцов в нескольких местах.

Таблица 3.1 – Химический анализ образца основного металла, масс. %.

Si	Mn	Fe	Итог
0,29	0,34	99,37	100,00

Как видно по результату химического анализа образца, взятого с области основного металла в пределах нормы (табл.3.1, рис.3.13). Металл по химическому составу соответствует стали 20, неметаллические включения распределены равномерно.

Таблица 3.2 - Химический анализ металла с места разрушения, масс. %.

Спектр	O	Al	Si	S	Cr	Mn	Fe	Итог
Спектр 1	19,45	-	0,90	-	0,82	0,83	78,00	100,00
Спектр 2	-	-	-	-	-	-	100,00	100,00
Спектр 3	17,90	-	0,49	-	0,37	0,78	80,45	100,00
Спектр 4	18,71	-	-	-	-	0,73	80,55	100,00
Спектр 5	-	-	-	-	-	-	100,00	100,00
Спектр 6	30,80	1,16	19,96	-	-	17,18	30,42	100,00
Спектр 7	16,21	-	3,57	-	20,68	10,01	49,54	100,00
Спектр 8	13,29	-	12,68	0,63	1,63	6,18	65,59	100,00

Как видно из полученных результатов исследования образца (табл.3.2, рис. 3.14-3.21), взятого с места разрушения металла, в структуре присутствует большое количество Si, Cr, Mn, при этом распределение этих составляющих неравномерно, в некоторых зонах исследуемого образца отмечена россыпь включений с Cr и Si (рис.3.19, рис.3.21), что приводит к выводу: в составе образца, вырезанного с места разрушения присутствует скопление флюса.

Исследование микроструктуры образцов.

Микроструктура основного металла трубы феррито-перлитная, с баллом зерна 9,5 также наблюдается полосчатость структуры 3-4 балла (рис.3.22).

Обе наружные поверхности имеют обезуглероженный слой (рис.3.23). На одной поверхности глубина полного обезуглероживания достигает 200 мкм, размер ферритного зерна в слое достигает 7 балла.

На участке разрушения металл имеет структуру характерную для сварного соединения: грубые иголки видманштетт феррита как по границам перлитных зерен так и сплошные области видманштетт феррита (рис.3.24).

Вывод: на трубе присутствовал дефект, которой попытались устранить путем заварки. Однако в ходе нарушения технологии сварки образовался непровар со скоплением флюса. Технические требования, предъявляемые к трубам горячедеформированным, соответствуют ГОСТ 8731-74, п.п. 1.4. которого гласит: «На поверхности труб не допускаются трещины, плены, рванины и закаты. Допускаются отдельные незначительные забоины, вмятины, риски, тонкий слой окалины, следы зачистки дефектов и мелкие плены, если они не выводят толщину стенки за пределы минусовых отклонений». Следовательно, ремонт сваркой

недопустим, так как труба поставляется бесшовная горячедеформированная. Возникновение разрушения металла во время протяжки отвода возникло из-за некачественной трубы.

3.2.2 «Пятнистость при нагреве».

Во время протяжки отвода из стали 09Г2С, при нагреве до 730°C на общем равномерном красном фоне выделялись зоны желтого цвета, в виде круглых пятен диаметром приблизительно 20 мм. (рис.3.25).

После остывания были сделаны вырезки образцов с двух областей: общего красного фона и места, имеющего желтый цвет. Назовем их образец с красной нагретой области (образец КНО) и образец с желтой нагретой области (образец ЖНО).

Так как возникло подозрение, что данное явление является следствием того, что металл в трубе негомогенизированный и химический состав будет отличаться, был сделан химический анализ металла с обоих образцов (табл.3.3).

Таблица 3.3 – Результаты химического анализа, масс. %

	С	Si	Mn	Fe	Итого
Образец 1	0,09	0,72	1,36	97,83	100
Образец 2	0,08	0,91	1,42	97,59	100

Как видно по результатам химического анализа, состав металла с обеих областей отличается незначительно и соответствует стали 09Г2С. Следовательно причина данного явления совершенно другая.

При исследовании образцов выяснилось, что толщина образца с желтой поверхностью меньше (рис.3.26), чем толщина красного нагретого металла (рис.3.27).

Оценка неметаллических включений

В образце с желтой нагретой области количество точечных оксидов и сульфидов 1 балл по ГОСТ 1778 (рис.3.29). В образце с красной нагретой области наблюдается аналогичная ситуация (рис.3.30).

У внутренней поверхности образца с ЖНО имеется обезуглерожены слой толщиной порядка 60 мкм, полосчатость структуры соответствует 5 баллу по ГОСТ 5640-68 (рис.3.31). Микроструктура представлена ферритом и бейнитом (рис.3.32). Размер ферритного зерна соответствует 9 баллу по ГОСТ 5639-82.

Полосчатость получается после горячей прокатки труб без дальнейшей термической обработки стали. Полосчатая структура (ферритно-бейнитная смесь) - самый распространённый дефект. В процессе затвердевания, после разливки образуются дендриты феррита, которые вытесняют легирующие элементы (марганец, фосфор), что приводит к формированию междендритных зерен, обогащенных этими элементами. В следствии после горячей прокатки они и станут причиной полосчатости. Сталь после такой обработки характеризуется повышенной прочностью и хладостойкостью, при этом также повышается анизотропия свойств. Металл характеризуется низкой стойкостью к сероводородному растрескиванию.

Микроструктура образца ЖНО неоднородна по толщине стенки. Отмеченная выше полосчатость наблюдается наиболее явно у внутренней поверхности и постепенно устраняется на глубине порядка 7 мм. Оставшаяся толщина (у наружной поверхности) имеет те же структурные составляющие, но полосчатость здесь отсутствует (рис.3.33). Балл зерна в этом участке составляет 9,5-10 балл по ГОСТ 5639-82.

У внутренней поверхности образца КНО имеется обезуглерожены слой толщиной порядка 60 мкм, полосчатость структуры соответствует 5 баллу по ГОСТ 5640 (рис.3.34). Микроструктура представлена ферритом и бейнитом (рис.3.35). Размер ферритного зерна соответствует 9 баллу по ГОСТ 5639.

Микроструктура металла образца КНО так же неоднородна по толщине стенки. Полосчатость, явно выраженная у внутренней поверхности, постепенно устраняется и на глубине порядка 7 мм полностью отсутствует (рис.3.36). Балл зерна в этом участке составляет 9,5-10 балл по ГОСТ 5639.

Вывод: при исследовании образцов с красной и желтой нагретой области металла отличий микроструктуры не выявлено. Химический анализ обоих образцов схож. На поверхности образца с желтой нагретой области присутствует остаток окалины (рис.3.27), толщина стенки обои образцов существенно отличается (рис.3.25, рис.3.26) у образца ЖНО толщина меньше. Следовательно, можно предположить, что на поверхности трубной заготовки имели место значительные слои окалины, которые в процессе нагрева до 730°C отгорали с излучением желтого цвета. После остывания отвода на месте отгоревшей окалины наблюдается утонение толщины стенки. При отсутствии утонения металла ниже минимально допустимых значений (в данном случае $T_{\min}=8,5$ мм.), согласно ГОСТ

17375-2001, данное явление браком не является. Но необходимо дополнительный УЗК контроль толщины стенки на местах с желтой областью нагрева, что приводит к увеличению времени контроля готовой продукции. При выявлении утонения толщины металла ниже минимально допустимых значений, согласно ГОСТ 17375-2001, изделие (отвод) переводится на другую номенклатуру с меньшей толщиной стенки, что влечет удешевление продукции.

3.2.3 «Расслоение»

При межоперационном контроле протянутых отводов было замечено три случая расслоения металла.

В первом случае на поверхности отводов диаметром 530 из стали 09Г2С, были обнаружены многочисленные места расслоения металла в виде полосок длиной до 120 мм. и глубиной до 2,5 мм. (рис.3.37).

Вырезка образцов была сделана с места расслоения металла.

Для выявления причин были проведены химический анализ (табл.3.4) и микроструктурное исследование образцов.

Таблица 3.4 – Результат химического анализа, масс. %

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	Сталь
Образец1	0,111	0,528	1,430	0,127	0,106	0,202	0,013	0,007	09Г2С

Химический анализ проводился на атомно-эмиссионном спектрометре ДФС-500 зав. №110038, годен до 24.06.2020г.

Металлографическое исследование:

Оценка неметаллических включений

В образце количество точечных оксидов и сульфидов 4 балл по ГОСТ 1778 (рис.3.38).

Также, как и в предыдущем случае на поверхности металла трубы присутствует окалина (рис.3.39).

Вывод: химический состав образца соответствует стали 09Г2С. Загрязненность металла образца трубы соответствует 4 баллу. На поверхности образца трубы присутствует вкатанная окалина. Следовательно, качество поверхности трубы неудовлетворительное, заготовки не допускаются по ГОСТ 8732. Причиной возникновения дефекта на поверхности изделия (отвода) является низкое качество трубы. При попытке устранить дефект путем зачистки болгаркой поврежденной расслоем поверхности, произошло критическое утонение толщины стенки (на 3 мм.), ремонт отводов сваркой не допустим. В результате забракованные отводы были списаны и отгружены в металлолом. Данная разновидность брака не исправима.

Во втором случае на отводах диаметром 530 из стали 20 наблюдалось расслоение металла в виде небольших чешуек (рис.3.41).

Так же, как и в предыдущем случае для выявления причин дефекта поверхности отвода были проведены химический анализ (табл.3.5) и микроструктурное исследование образцов.

Таблица 3.5 – Результат химического анализа, масс. %

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	Сталь
Образец1	0,181	0,216	0,400	0,197	0,110	0,197	0,009	0,005	20

Анализ проводился на атомно-эмиссионном спектрометре ДФС-500 зав.

№110038, годен до 24.06.2020г.

Металлографическое исследование:

Так как в предыдущем случае наблюдалась вкатанная окалина, которая и была причиной расслоения. Поставщик трубы тот же, диаметр трубы тот же 377. Было принято решение сразу проверить образец на присутствие вкатанной окислы. В поперечном сечении образца был изготовлен микрошлиф.

На поверхности образца трубы присутствует окалина толщиной до 0,2 мм (рис.3.42). На образце присутствуют многочисленные участки с вкатанной окислой (рис. 3.43).

Вывод: химический состав образца соответствует стали 20. На поверхности образца трубы присутствует вкатанная окалина. Следовательно, качество

поверхности трубы неудовлетворительное качество не допускается по ГОСТ 8732. Причиной возникновения дефекта на поверхности изделия (отвода) является низкое качество трубы. При попытке устранить дефект путем зачистки болгаркой поврежденной расслоем поверхности, не произошло значительное утонение толщины стенки отвода. В результате забракованные отводы были зачищены в месте расслоения до однородной структуры, но утратили товарный вид. После чего на зачищенных местах проводится дополнительный УЗК на соответствие толщины стенки отвода допускам. Данная разновидность брака является исправимой, так как по ГОСТ 17375-2001 п.п. «5.1.2 Разностенность, вмятины, риски, следы зачистки дефектов не должны выводить размеры деталей за пределы поля допуска», но требуются дополнительные трудозатрата на зачистку и дополнительный контроль.

В третьем случае дефект расслоения в виде крупных чешуек (рис.3.44) был замечен на отводах диаметром 720. Площадь с дефектом очень велика от 30 до 40% от всей площади поверхности отвода.

Так же, как во втором случае для выявления причин дефекта поверхности отвода были проведены химический анализ (табл.3.6) и микроструктурное исследование образцов.

Таблица 3.6 – Результат химического анализа, масс. %

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	Сталь
Образец1	0,181	0,215	0,398	0,197	0,112	0,195	0,008	0,005	20

Анализ проводился на атомно-эмиссионном спектрометре ДФС-500 зав. №110038, годен до 24.06.2020г.

Металлографическое исследование:

Так как в предыдущем случае наблюдалась вкатанная окалина, которая и была причиной расслоения. Поставщик трубы тот же, диаметр трубы 426. Было принято решение сразу проверить образец на присутствие вкатанной окислы. В произвольном сечении металла изготовлен микрошлиф. Осмотр поверхности шлифа проводился без травления. В макроструктуре металла присутствуют поверхностные дефекты типа «закат окислы» (рис.3.45).

Вывод: химический состав образца соответствует стали 20. На поверхности образца трубы присутствует вкатанная окалина. Следовательно, качество поверхности трубы неудовлетворительное, заготовки не допускаются по ГОСТ 8732. Причиной возникновения дефекта на поверхности изделия (отвода) является низкое качество трубы. При попытке устранить дефект путем зачистки болгаркой поврежденной расслоем поверхности, не произошло значительное утонение толщины стенки отвода. В результате забракованные отводы были зачищены в месте расслоения до однородной структуры, но утратили товарный вид. После чего на зачищенных местах проводится дополнительный УЗК на соответствие толщины стенки отвода допуском. Данная разновидность брака является

исправимой, так как по ГОСТ 17375-2001 п.п. «5.1.2 Разностенность, вмятины, риски, следы зачистки дефектов не должны выводить размеры деталей за пределы поля допуска», но требуются дополнительные трудозатраты на зачистку и дополнительный контроль.

3.2.4 «Повышенная твердость».

При протяжке отводов диаметра 720 из трубы стали 09Г2С 426 диаметра произошел скачок давления (по показаниям приборов давление с 8,5 МПа до 10-12 при протяжке первой заготовки, на последующих трёх давление стабилизировалось до 10 МПа) (рис.3.46).

При отрезке технологических припусков была замечена повышенная твердость стали (искры красного цвета, сложность порезки, частая замена отрезных дисков). Для исследования был вырезан образец из трубы, подготовленной для протяжки (рис.3.47), при визуальном осмотре отмечено: труба на поверхности не ровная со следами сильной ржавчины.

Микроструктурное исследование показало, что металл имеет однородную микроструктуру, состоящую из феррита и бейнита (рис.3.48). Размер зерна металла соответствует 11,5 балла по ГОСТ 5639-82.

Вывод: как видно из анализа микроструктуры металла трубы, по всему сечению отсутствует полосчатость, мелкое зерно (11,5 балл), феррито-бейнитная структура металла. Следовательно, можно предположить, что после первоначальной термической обработки имела место дополнительная (закалка), которая привела к измельчению зерна и, следовательно, к повышению твёрдости металла. Хотя данное явление и не является браком, так как отводы протянулись хорошо (рис.3.48) и внешний вид готовых изделий удовлетворительный (рис.3.49), тем не менее резкие скачки давления во время протяжки могут привести к выходу из строя оборудования (аварии), а во время обработки торцов на токарном станке из-за повышенной твёрдости требуются более дорогие резцы. Трубы без дополнительных технических требований заказчика должны поставляться нормализованными. Поставка трубы с повышенной твердостью усложняет производственный процесс и усложняет механическую обработку готовых изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что из-за сравнительно не больших объемов производства в большинстве случаев закупать трубы под протяжку отводов приходится со складов, территориально находящихся ближе к производству. Взаимодействие с непосредственным производителем труб практически отсутствует, поэтому нет возможности обсуждения дополнительных технических требований, предъявляемых к трубам поставляемых для изготовления изделий с последующей горячей деформацией. Поэтому целесообразно было бы выпустить новый ГОСТ на бесшовные горячедеформированные трубы, подлежащие дальнейшей обработке горячей деформацией (протяжке цельнотянутых крутоизогнутых отводов, штамповке переходов, вытяжке тройников и т.д.) с такими техническими требованиями как, например, отсутствие вкатанной окалины на поверхности труб, термическая обработка только нормализация, минимальное значение толщины стенки чуть повыше, чем в ГОСТ 8732. Избежать большинства брака при производстве цельнотянутых отводов большого диаметра можно при ужесточении входного контроля трубной продукции (выявление мелких трещин, закатов окалины, ремонта сваркой и т.д.). В остальных случаях дефекты исключить невозможно, так как характеристики поставляемых труб под протяжку отводов соответствуют техническим требованиям ГОСТ 8732 и соответствующим сертификатам качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Структура сталей: учебное пособие / сост. Л. А. Виноградова, Ю. А. Курганова. – Ульяновск : Изд. УлГТУ, 2009. – 54 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др; под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Марочник сталей и сплавов./ Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. под ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: 2014. –1216 с.
4. Медведко, Л.Л. Вопросы технических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. V-VI междунар. науч. - практ. конф. № 1(4). Полосчатость в трубной стали марки 09Г2С. микроструктура и ее свойства./ Л.Л. Медведко, А.В. Шестопалов.– Новосибирск: СибАК, 2018. – с. 50-54.
5. ГОСТ 17375-2001 (ИСО 3419-81) Межгосударственный стандарт. Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Отводы крутоизогнутые типа 3D (R~1,5DN). Конструкция (с Изменением N 1). Введен 01.01.2003 - М.: Стандартиформ, 2010 – 8 с.
6. ГОСТ 8731-74 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования (с Изменениями N 2-6). Введен 01.01.1976 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004 – 8 с.
7. ГОСТ 17380-2001 (ИСО 3419-81) Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Общие технические условия (с Изменением N 1). Введен 01.01.2003 - М.: Стандартиформ, 2010 – 8 с.
8. ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79) Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений (с Изменениями N 1, 2).
9. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна (с Изменением N 1). Введен 01.01.1972 - М.: Стандартиформ, 2011 – 32 с.
10. ГОСТ 5640-68 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. Введен 01.01.1970 - М.: Издательство стандартов, 1988 – 17 с.