

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы
(кафедра)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического

(направленность (профиль)/специализация)

оборудования

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Исследование прочности закрепления замка с буровой трубой

Студент(ка)	<u>А.В. Медведев</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>К.В. Моторин</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Консультанты	<u>Т.А. Варенцова</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель магистерской
программы д.т.н, профессор В.В. Ельцов _____ (личная подпись)
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой _____ д.т.н, профессор В.В. Ельцов _____ (личная подпись)
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Состояние вопроса	6
1.1 Назначение и состав бурильной колонны	6
1.2 Сварные швы трубы и замка	18
1.3 Задачи работы	27
2 Методика исследований	30
2.1 Методика испытания бурильных труб на растяжение и изгиб	30
2.2 Методика испытания сварных швов бурильных труб на усталостную прочность	33
3 Результаты исследований	51
3.1 Статистическая обработка результатов исследований	51
3.2 Результаты испытаний бурильных труб на растяжение и изгиб	52
3.3 Результаты исследований усталостной прочности.....	54
4 Технологические рекомендации предприятиям изготовителям бурильных труб	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	68

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важнейшими товарами Российской Федерации на мировом рынке являются нефть и газ. Также они являются сырьем для многих предприятий в самой России, например, топливно-энергетического комплекса, нефтехимической промышленности. Таким образом, эффективная добыча и транспортировка нефти и газа к потребителю (или покупателю) является актуальной как для нефтегазовой отрасли так и для экономики всей страны.

Главным рабочим инструментом бурильщиков является бурильная колонна с закрепленным на ней долотом. Сама по себе бурильная колонна – дорогостоящий компонент бурильного процесса. При морском бурении стоимость бурильных колонн приближается к стоимости всей буровой установки.

К особенностям бурильной колонны следует отнести ее большую протяженность при малых размерах ее поперечного сечения. Кроме того, бурильная колонна работает в тяжелых, агрессивных условиях. На бурильные трубы действует ряд нагрузок, а также оказывает влияние буровой раствор, содержащий абразивные и химически активные составляющие, которые движутся с внушительной скоростью в трубах и затрубном пространстве.

При этом, максимально действие бурового раствора на бурильные трубы на участках с большим отходом от вертикали и, естественно, горизонтальным зонам.

Кроме того, работа бурильной колонны ведется в условиях абразивного изнашивания, в качестве контртела выступают горные породы, закрепленный абразив. Не исключается возникновение т.н. «прихватов» - бурильная колонна на некоторой длине прочно связывается со стенками скважины корками глинистого раствора или осыпавшейся породой.

Причем, процесс проходки скважины характеризуется постоянными операциями спуска-подъема бурильных колонн, сопровождающимися операциями развинчивания и последующего свинчивания бурильных труб. Таким образом, на бурильные трубы действуют знакопеременные нагрузки.

Вместе с тем, как показала практика, самыми слабыми элементами бурильной колонны являются замковые резьбовые соединения. Замковые резьбовые соединения крепятся к трубе посредством сварки.

С учетом изложенного определим цель работы – повышение качества сварных соединений бурильной трубы и замка.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные задачи:

- выполнить анализ условий эксплуатации бурильной колонны;
- выполнить анализ применяемого способа соединения замка и бурильной трубы;
- разработать методику проведения экспериментальных исследований прочности соединения замка и бурильной трубы;
- выполнить эксперименты и оценить их результаты;
- разработать практические рекомендации для внедрения в производство бурильных труб.

Поставленные задачи определили структуру магистерской диссертации, которая состоит из введения, двух глав, заключения.

Предмет и объект исследования определяется тематикой работы, ее целью и задачами.

Предметом исследования являются сварные соединения замка и бурильной трубы.

Объектом исследования выступают механические характеристики сварного шва замка и бурильной трубы.

Теоретической, методологической и информационной базой исследования послужили:

- государственные и отраслевые стандарты, нормативные документы;
- труды российских и зарубежных специалистов в области сварки и исследований характеристик сварных соединений;
- научные статьи в современной периодической печати;
- данные официальных сайтов промышленных учреждений и

информационно-аналитических агентств.

В процессе выполнения магистерской диссертационной работы применяли общенаучные и специальные методы познания, а именно системный анализ как методология постановки и подхода к решению проблемы в целом, приемы логического и сравнительного анализа и синтеза, методы сравнений, абстрактно-логических суждений.

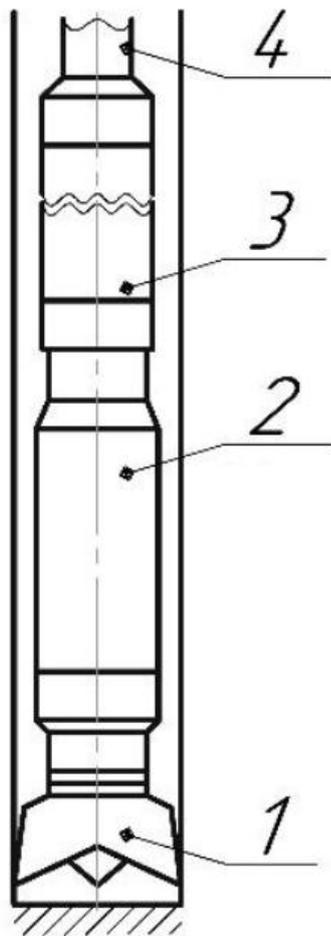
Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в том, что удалось выявить закономерности, связывающие технологические параметры выполнения сварных соединений замков трубы и бурильных труб и эксплуатационные характеристики получаемых сварных соединений.

Практическая значимость исследований заключается в том, что сделанные по их результатам выводы и рекомендации ориентированы на конкретное внедрение на предприятиях производящих трубы для буровых установок.

1 Состояние вопроса

1.1 Назначение и состав бурильной колонны

Общий принцип бурения скважин заключается в образовании цилиндрической пустоты в почвенных слоях за счет воздействия специального оборудования. Перечень данного оборудования, в обязательном порядке, включает в себя буровую вышку, бурильную колонну, буровой снаряд. Обеспечивает процесс бурения комплекс дополнительных механизмов и устройств, включающий в себя талевую систему, насосы, очистительные механизмы для бурового раствора и пр.



- 1 – долото; 2 – забойный двигатель;
- 3 – утяжеленные бурильные трубы (УБТ);
- 4 – бурильные трубы

Рисунок – 1.1 – Схема бурения

Бурильная колонна является связующим элементом между долотом, функция которого непосредственное разрушение породы, и оборудованием расположенным на поверхности. Также бурильная колонна обеспечивает спуск в забой необходимых в процессе бурения скважины устройств и приспособлений.

Таким образом, посредством бурильной колонны на долото воздействует осевая сила и обеспечивается его вращение. Кроме того, посредством бурильной колонны происходит циркуляция бурового раствора в забое скважины. Конструктивно, бурильная колонна выполнена из бурильных труб, соединенных между собой посредством резьбовых соединений.

Схематичное изображение всех действующих документов по стандартизации бурильных труб на международном, национальном и отраслевом уровнях, а также взаимосвязь между ними показаны на рисунке 1.1.

Для того чтобы оценить возможность совместимости и взаимозаменяемости бурильных труб отечественного и зарубежного производства, сопоставление положений указанных стандартов следует провести по следующим аспектам:

- 1) классификация труб (их типоразмеры и группы длин);
- 2) надежность показатели;
- 3) маркировка труб.

Сравнительный анализ требований к типоразмерам в части сочетаний номинального наружного диаметра и номинальной толщины стенки в ISO 11961, API SPEC 5DP, ГОСТ 32696 и ГОСТ Р 50278 представлен в таблице 1.1 Курсивом, жирным шрифтом выделены те значения размеров, которые не имеют аналогов в сопоставляемых стандартах.



Рисунок 1.1 – Общий обзор стандартов на бурильные трубы

Как видно из таблицы 1.1, классификация труб в анализируемых документах идентична: это трубы с внутренней (ПВ, IU), наружной (ПН, EU) и с комбинированной высадкой (ПК, IEU), однако в отношении значений типоразмеров существуют следующие отличия.

1. Для труб с внутренней высадкой в зарубежных стандартах введены два дополнительных типоразмера по сравнению с отечественной практикой, включающие наименьшие значения внешнего диаметра (60,32 мм) и толщины стенки (6,45 мм). При этом два российских документа для данного вида бурильных труб устанавливают практически одинаковые положения, кроме типоразмера 114,306,88 по ГОСТ 32696.

Таблица 1.1 – Сортамент бурильных труб

Типоразмеры (диаметр, мм x толщина стенки, мм)			
Вид трубы	ISO 11961, API SPEC 5DP	ГОСТ 326962014	ГОСТ Р 5027892
С внутренней высадкой	60,32x7,11	-	-
	73,02x9,19	73,02x9,19	73,0x9,2
	88,90x6,45□	-	-
	88,90x9,35	88,9x9,35	88,9x9,4
	88,90x11,40	88,9x11,40	88,9x11,4
	101,60x8,38	101,60x8,38	101,6x8,4
	114,30x6,88	114,30x6,88	-
С наружной высадкой	-	60,32x7,11	60,32x7,11
	-	73,02x9,19	73,02x9,19
	-	88,90x6,45□	-□
	-	88,90x9,35	88,90x9,35
	-	88,90x11,40	88,90x11,40
	101,60x8,38	101,60x8,38	101,60x8,38
	114,30x6,88	114,30x6,88	-
	114,30x8,56	114,30x8,56	114,30x8,6
	-	-	114,30x10,2
	114,30x10,92	114,30x10,92	114,30x10,9
	-	-	127,0x9,2
-	-	127,0x9,2	
С комбинированной высадкой	-	114,30x8,56	114,30x8,56
	-	114,30x10,92	114,30x10,92
	127,0x9,19	127,0x9,19	127,0x9,2
	127,0x12,70	127,0x12,70	127,0x12,70
	139,70x9,17	139,70x9,17	139,70x9,2
	139,70x10,54	139,70x10,54	139,70x10,5
	168,28x8,38	168,28x8,38	-
168,28x9,19	168,28x9,19	-	

2. Диапазоны типоразмеров бурильных труб с наружной высадкой по рассматриваемым отечественным стандартам значительно шире, чем в ISO и API, и охватывают такие значения диаметров, как 60,32, 73,02, 88,90 мм. Более того, ГОСТ Р 50278 также расширяет данный диапазон до 127,0 мм. Тем не менее, российские документы не устанавливают идентичные положения: ряд типоразмеров в ГОСТ 32696 и ГОСТ Р 50278 не совпадает.

3. Трубы вида ПК (IEU) также представлены в российских стандартах большим количеством типоразмеров по сравнению с ISO и API, при этом очевидно влияние сложившейся отечественной практики (ГОСТ Р 50278) при формировании модифицированного стандарта ГОСТ 32696 в него включены типоразмеры, используемые как за рубежом, так и на российских месторождениях.

Таким образом, для бурильных труб с наружной и комбинированной высадкой требования российских стандартов превосходят положения зарубежных документов ISO и API, а для труб с внутренней высадкой нормативные положения в целом обеспечивают взаимозаменяемость и совместимость.

Кроме того, в нормативной документации принята классификация бурильных труб по длине, при этом требования ISO 11961, API SPEC 5DP и ГОСТ 32696:2014 идентичны, а в ГОСТ Р 50278:92 есть заметные отличия.

Так, в зарубежных стандартах и их российском аналоге длина трубы определяется расстоянием между её торцами, а в ГОСТ Р 50278:92 как расстояние между упорным уступом ниппеля и упорным торцом муфты.¹ Между тем, все стандарты устанавливают 3 группы длин бурильных труб, сведения о которых приведены на рисунке 1.2.

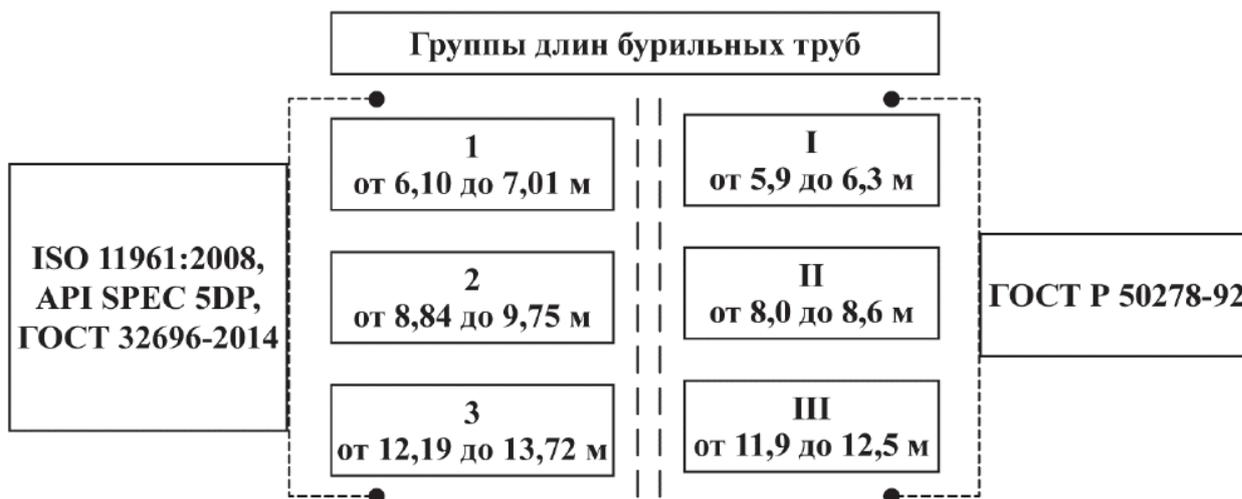


Рисунок 1.2 – Классификация бурильных труб по группам длин

Что касается надежности бурильных труб в контексте прочностных свойств, выпускаемых по отечественным и зарубежным стандартам, то в этом случае сравнение групп прочности выражается в сопоставлении значений предела текучести и временного сопротивления материала, получаемых при испытаниях на растяжение. Данные значения, устанавливаемые рассматриваемыми документами по стандартизации, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Группы прочности бурильных труб

Стандарты	Обозначение группы прочности	Предел текучести, МПа		Временное сопротивление, МПа
		min	max	
ГОСТ 32696-2014, ГОСТ Р 50278-92	D ГОСТ 32696-2014 Д ГОСТ Р 50278-92	379	-	655
ISO 11961 API SPEC 5DP, ГОСТ 32696-2014, ГОСТ Р 50278-92	E (API, ISO), E (ГОСТ 32696-2014)	517	724	689
	X (API, ISO, ГОСТ 32696-2014), Л (ГОСТ Р 50278-92)	655	862	724
	G (API, ISO, ГОСТ 32696-2014),	724	93-931	792-793

	М (ГОСТ Р 50278-92)			
	S (API, ISO, ГОСТ 32696-2014), P (ГОСТ Р 50278-92)	930-931	1138	999
ГОСТ Р 5027892	T (ГОСТ Р 50278-92)	1035	1241	1104
	У (ГОСТ Р 50278-92)	1170	1379	1241

Очевидно, что зарубежные нормы и ГОСТ 32696-2014 имеют различное обозначение групп прочности по сравнению с ГОСТ Р 50278-92 (в первом случае используются буквы латинского алфавита, во втором случае – русского), однако по данным определяющим показателям группы D÷S и Д÷P идентичны. В то же время ГОСТ Р 50278-92 охватывает больший диапазон чем стандарты ISO и API это и группа прочности Д, широко используемая в российской промышленности, и перспективные группы Т, У, изготовление по которым должно происходить по нормативно-технической документации производителя.

При этом в ходе испытаний на растяжение также контролируется относительное удлинение расчетной длины образца, сопоставление значений которого приведено в таблице 1.3.

Как следует из таблицы 1.3, ISO 11961, API SPEC 5 DP и ГОСТ 32696-2014 устанавливают более гибкие требования, так как определяют относительное удлинение в зависимости от типоразмера трубы. С другой стороны, согласно ГОСТ Р 50278-92 относительное удлинение расчетной длины образца при достижении предела текучести приравнивается к минимальному значению удлинения для тела трубы, следовательно, положения зарубежных стандартов, модифицированного ГОСТ 32696-2014 и негармонизированного по отношению к ним ГОСТ Р 50278-92 в части групп прочности D÷S (Д÷P) совпадают.

Таблица 1.3 – Требования к удлинению для тел труб

Обозначение	Относительное удлинение расчетной длины образца, не менее, %
-------------	--

группы прочности	ISO 11961, API SPEC 5DP (в зависимости от типоразмера трубы)	ГОСТ 32696-2014 (в зависимости от типоразмера трубы)	ГОСТ Р 50278-92 (не зависит от типоразмера трубы)
D,Д	-	15-20	16
E,Е	14-19	14-19	14
X,Л	14-18	14-18	14
G,М	12-16	12-16	12
S,Р	10-13	10-13	12
T	-	-	11,5
У	-	-	10,5

Если рассматривать маркировку тела бурильной трубы, то следует отметить, что зарубежные документы по стандартизации и каждый из российских стандартов устанавливают различные требования к ее способам нанесения и обозначению, таблица 1.4.

Так, в соответствие с ISO 11961 и API SPEC 5DP маркировка наносится только краской и не включает вид высадки, а размер и масса трубы представлены в виде условных единиц (Label 1 и Label 2). В свою очередь, российские стандарты предусматривают два способа нанесения, указание типа высаженных концов, размеры трубы представлены в виде отдельных значений наружного диаметра, толщины стенки и фактической длины, также приводится фактическая масса в килограммах. Таким образом, ГОСТ 32696-2014 вобрал в себя последовательность, характерную для распространенной за рубежом маркировки труб, но и оставил привычные для отечественной отрасли элементы обозначения.

Таблица 1.4 – Маркировка бурильных труб

ISO 11961, API SPEC 5DP	ГОСТ 32696-2014	ГОСТ Р 50278-92
-------------------------	-----------------	-----------------

Маркировка				
Краской	Клеймением	Краской	Клеймением	Краской
а) наименование или товарный знак изготовителя б) обозначение «ISO 11961» и/или «Specification 5DP» в) монограмма API (по необходимости) г) дата изготовления д) обозначение размера трубы (Label 1) е) обозначение массы трубы (Label 2) ж) группа прочности з) информация по дополнительным требованиям и) обозначение уровня требований к продукции: L2 или L3	а) наименование или товарный знак изготовителя б) дата изготовления в) наружный диаметр г) толщина стенки д) группа прочности е) порядковый номер трубы	а) наименование или товарный знак изготовителя б) обозначение «ГОСТ 32696» в) вид высадки г) наружный диаметр д) толщина стенки е) группа прочности ж) фактическая длина з) фактическая масса и) информация по дополнительным требованиям к) обозначение уровня требований к продукции: 2 или L3	- товарный знак изготовителя - диаметр - толщина стенки - группа прочности - дата изготовления - номер трубы	- товарный знак изготовителя - вид высадки - диаметр - толщина стенки - группа прочности - длина трубы - масса трубы

--	--	--	--	--

Можно сделать вывод, что результаты проведенного сопоставительного анализа требований ISO 11961, API Spec 5DP, ГОСТ 32696-2014 и ГОСТ Р 50278-92 показали, что в совокупности действующие российские стандарты на бурильные трубы полностью соответствуют и по отдельным положениям содержат более расширенные положения по отношению к зарубежным нормам, так как учитывают и передовую международную, и общепринятую российскую практику.

Теперь рассмотрим конструктивные особенности бурильных труб. В состав бурильной колонны входят рабочие трубы, показаны на рисунке 1.3, и утяжеленные, показаны на рисунке 1.4.

Сечение рабочих труб выполняют, в основном квадратным. Они передают вращение от ротора на бурильную колонну и фиксируются в отверстии ротора, поэтому они вращаются вместе со столом ротора. Кроме того, при углублении скважины рабочие трубы перемещаются в осевом направлении.

Длина рабочих труб достигает 13-14 м. Стороны наружного квадрата 112, 140 и 155 мм. Внутренний канал цилиндрический и диаметр его, соответственно, 74, 85 и 100 мм. Материал рабочих труб - сталь группы прочности Д и марки 36Г2С.

В состав бурильной колонны входят трубы с концами:

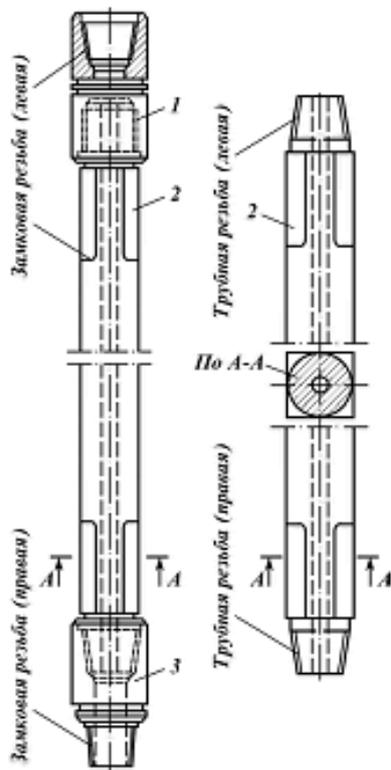
высаженными внутрь, рисунок 1.5, а;

высаженными наружу, рисунок 1.5, б;

приваренными концами, рисунок 1.6.

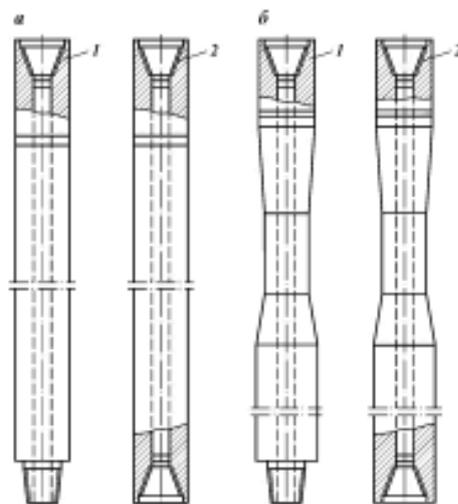
Для соединения труб с высаженными внутрь концами применяют замки следующих типов. ЗШ – диаметр канала, близок к диаметру канала бурильных труб с высаженными внутрь концами и ЗН - диаметр канала существенно меньше диаметра канала труб. На трубах с концами высаженными внутрь и наружу нарезается мелкая трубная наружная резьба. Их соединение

выполняется с помощью бурильных замков или муфт, рисунок 1.7. Поскольку трубы, с концами высаженными наружу характеризуются одинаковым сечением канала по всей длине, сопротивление потоку проходящей.



1 - верхний переводник; 2 - рабочая ведущая труба; 3 - нижний переводник с блокирующим пояском

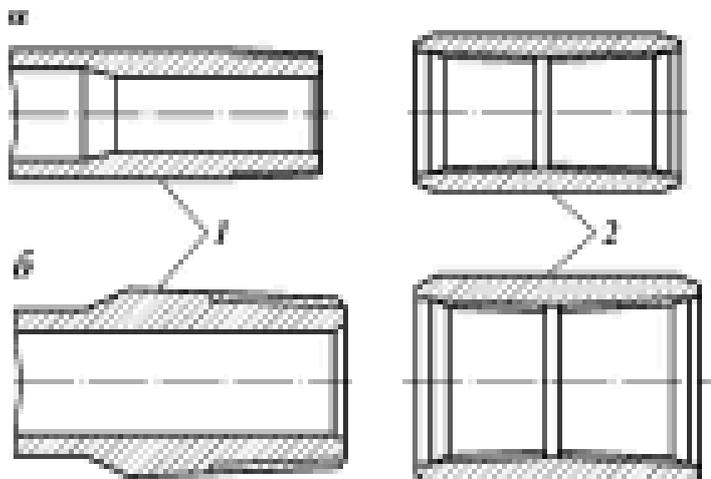
Рисунок 1.3 - Рабочая ведущая бурильная труба



а — с одинаковым диаметром; б — с проточным телом;

1 — тело трубы; 2 — замковая резьба

Рисунок 1.4 - Утяжеленные бурильные трубы



а – концы трубы высажены внутрь; б - с высаженными наружу концами;

1 - труба; 2 - муфта

Рисунок 1.5 - Бурильные трубы

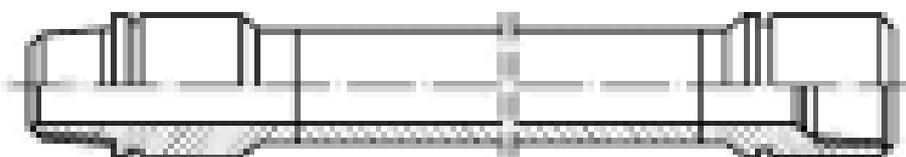
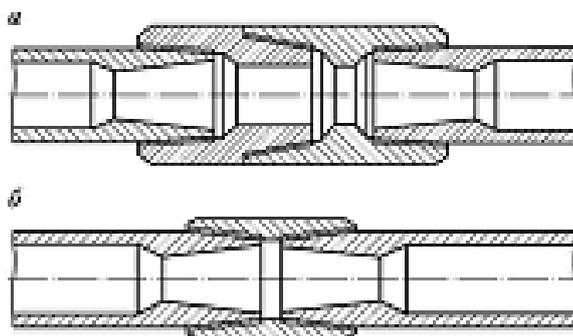


Рисунок 1.6 - Бурильная труба с приваренными соединительными концами



а - при помощи замков; б - при помощи муфт

Рисунок 1.7 - Соединение бурильных труб с высаженными концами

промывочной жидкости в них меньше. Для соединения таких труб применяют замки типа ЗУ - увеличенный диаметр канала.

У бурильных труб с приваренными соединительными концами равнопроходной канал, что благоприятствует проходу промывочной жидкости. Соединение таких труб выполняют за счет крупной замковой резьбы

Достоинство крупной замковой резьбы со значительной конусностью в том, что при свинчивании и развинчивании труб обеспечивается высокая производительность. Трубы свинчиваются и развинчиваются за несколько оборотов.

Наибольшее распространение для бурения стволов нефтегазовых скважин нашли трубы диаметром 114, 121, 146 и 168 мм.

Если выполняется скважина большой глубины, вес бурильной колонны достигает значительных величин, как следствие, значительных величин достигают нагрузки на буровую вышку и талевую систему. Для решения данной проблемы применяют трубы алюминиевых сплавов. Трубы из алюминиевых сплавов производят с высаженными внутрь концами. Диаметр таких труб от 73 до 147 мм.

Теперь рассмотрим утяжеленные бурильные трубы. Они устанавливаются над долотом. Их задача = обеспечивать осевую нагрузку на долото. Значительный вес таких труб обеспечивается за счет толщины стенки, превышающее в 2-3 раза толщину стенки обычных труб.

Кроме тру в бурильной колонне используют переходники, центраторы, расширители. Если требуется прохождение искривленной от горизонтали скважины используют отклонители.

1.2 Сварные швы трубы и замка

Резьбовые концы соединены с трубой сваркой трением, рисунок 1.8. Применение вместо резьбовых соединений буровых замков с трубами применяют прогрессивную и надежную конструкцию с приваренными замками:

исключается изготовление трубной резьбы, сварка является более производительной, чем навинчивание замков с нагревом, исключается замена замков в полевых условиях и т.д.

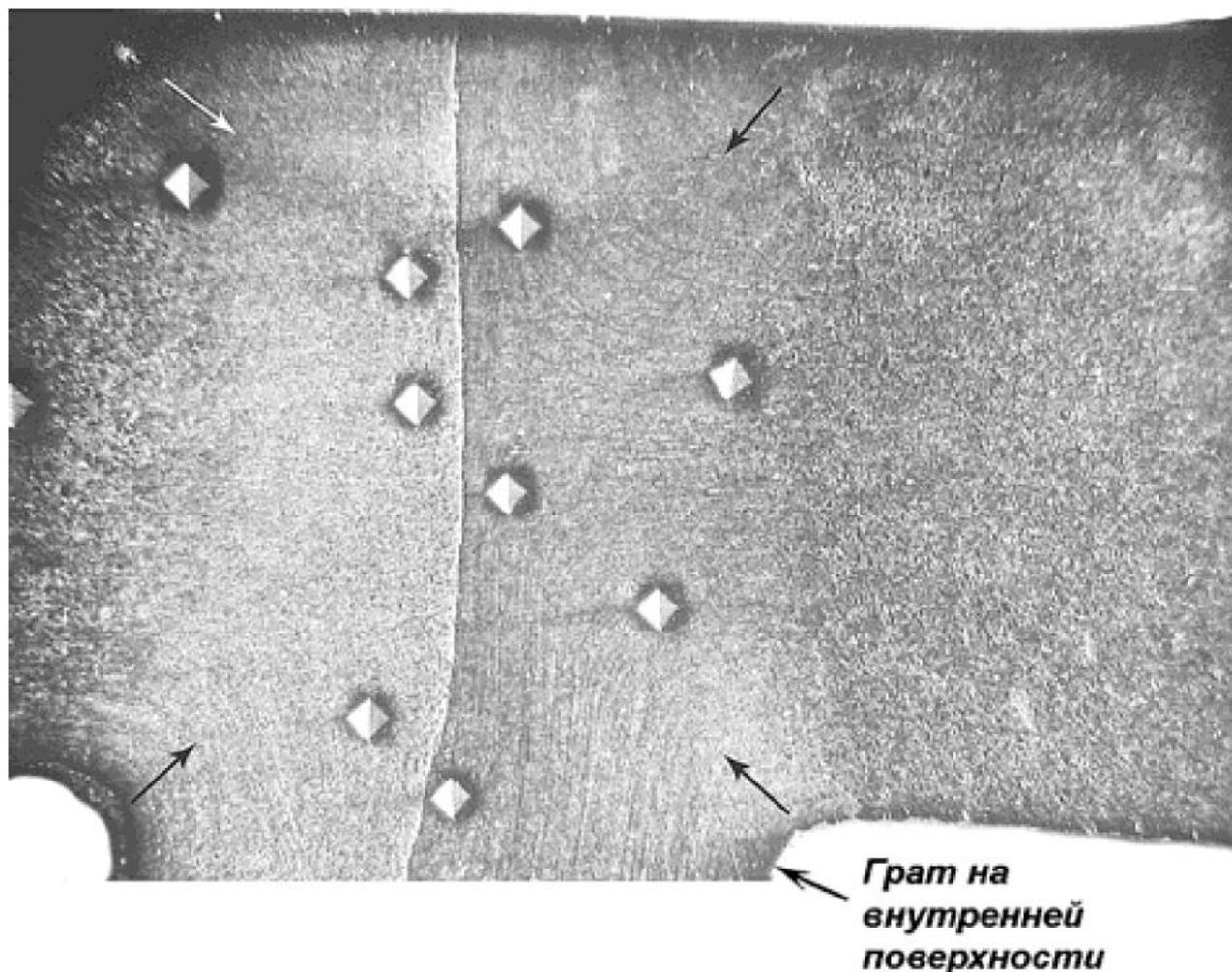


Рисунок 1.8 – Структура сварного соединения муфты с трубой. Стрелками показаны места изменения ориентации волокон

Резьба в разъемном соединении – коническая замковая. Сварка трением используется для соединения труб с замками. При сварке трением используют теплоту, образующуюся при трении. Свариваемая труба вращается, а замок закреплен неподвижно на станке. В результате трения образуется необходимое для сварки тепло.

Когда поверхности торцов обретут достаточную степень пластичности, они сжимаются под большим давлением. Получается качественное сварное соединение.

Преимущества сварки трением при соединении компонентов труб бурильных:

высокий уровень производительности, нагрев всей соединяемой поверхности выполняется одновременно;

высокий коэффициент полезного действия, так как тепло выделяется в локальном и сравнительно небольшом объеме;

способ обеспечивает получение сварного соединения высокого качества, причем, некоторые дефекты, сопутствующие процессам дуговой сварки не могут возникнуть в принципе;

сравнительно простые операции предварительной подготовки соединяемых поверхностей перед сваркой;

способность к соединению разнородных материалов;

нет разбрызгивания расплавленного металла, а также выделения инфракрасного и ультрафиолетового излучения;

процесс сварки легко поддается автоматизации.

К недостаткам способа сварки трением можно отнести следующие [7, 49]: необходимость мощных захватов, которые должны надежно фиксировать свариваемые заготовки;

оборудование является узкоспециализированным;

оборудование имеет громоздкие габариты и значительный вес.

При бурении скважин за счет изгиба буровой колонны бурильные замки контактируют со стенкой скважины, либо со стенкой обсадной трубы. Один и тот же бурильный замок может работать часть времени в открытом стволе скважины, и часть времени в обсадной трубе. При контакте с открытым стволом скважины происходит износ замка, а при контакте со стенкой обсадной трубы - их взаимный износ.

Особенно актуально это для наклонных скважин, так как данные скважины искривлены, начинается скважина как вертикально расположенная, и нуждается в изгибе для перехода в горизонтальную.

Различные варианты упрочнения поверхности замка предусматривают термическую обработку, даже нанесения наплавкой слоя карбидов вольфрама. Существенное упрочнение поверхности замка может привести к протиранию обсадных колонн. Однако проведенные исследования показали, что наплавка слоя электродом ОЗИ-3 (90Х4М4ВФ) обеспечивает высокую стойкость замка при минимальном износе обсадных труб.

Другая проблема, также актуальная при наклонном бурении скважин, усталостные разрушения сварных швов «труба – замок». Само по себе явление усталости металлов является не до конца исследованной областью науки. Однако усталость сварных соединений еще более сложное явление. Таким образом, определяемся с направлением исследований – предотвращение усталостных разрушений сварных соединений труб и замка.

Известно, что сопротивление материала усталости зависит от структуры, напряженного состояния и качества поверхностного слоя. Вместе с тем, трещины зарождаются и развиваются в локальных объемах материала. Зарождение и развитие трещин зависит от структуры материала в данном объеме и ориентации структурных составляющих по отношению к приложенной нагрузке. Поскольку ориентация кристаллической решетки и дефектов кристаллической решетки структурных составляющих (зерен) относительно направления действия приложенной нагрузки носит вероятностный характер, также вероятностный характер носит и возникновение микротрещин.

К дополнительным особенностям, влияющим на возникновение микротрещин, способных развиваться в усталостные относится различие в структуре основного металла и металла шва. Помимо указанного при сварке высока вероятность, при несоблюдении режимов, и иных требований технологического процесса появления закалочных структур, характеризующихся хрупкостью.

Таким образом, проблема повышения работоспособности замковых резьбовых соединений бурильных колонн является актуальной.

Для решения обозначенной проблемы следует выполнить анализ особенностей усталостного разрушения конструкций.

В процессе усталостного разрушения выделяют три этапа, с учетом основных структурных изменений, которые происходят в материалах, при циклических нагрузках:

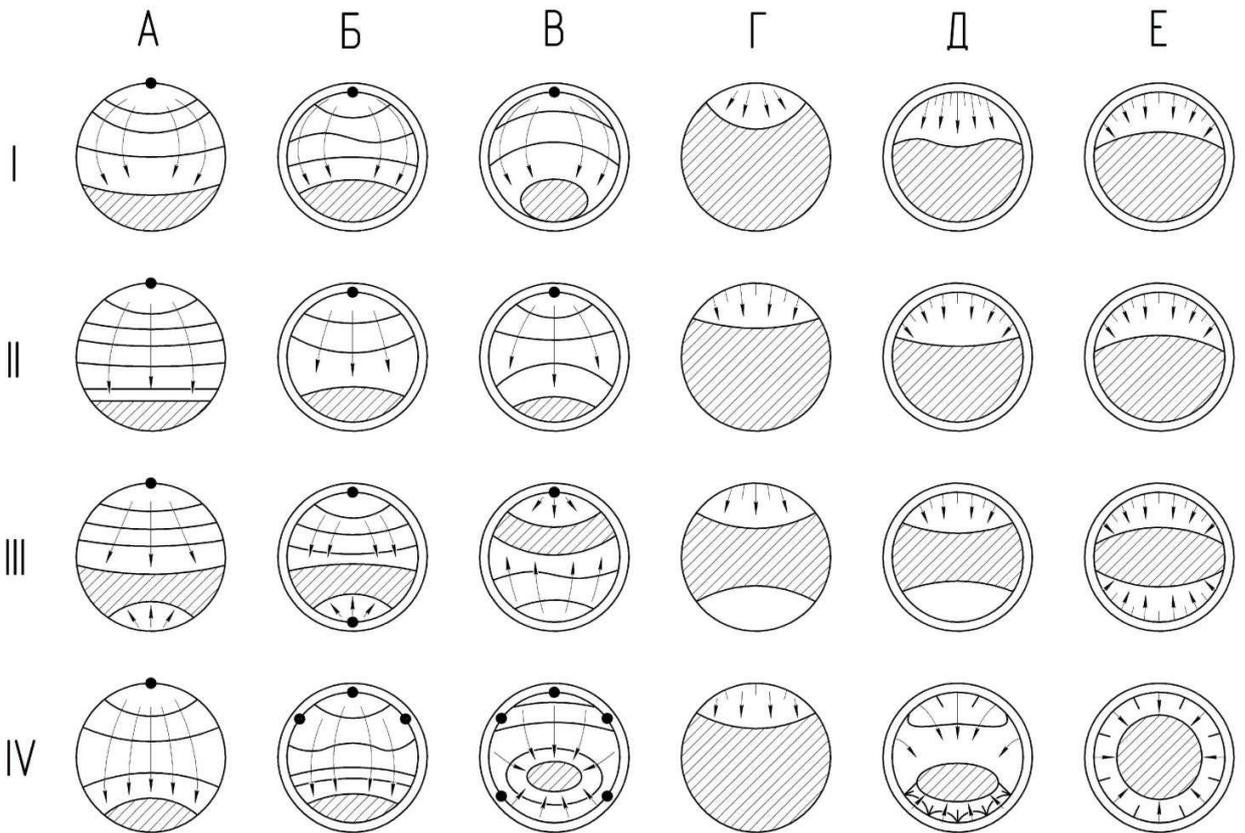
1. Зарождение усталостной трещины;
2. рост или распространение трещины;
3. разрушение.

Согласно [1] в усталостном изломе выделяют 5 зон и участков:

- 1) место зарождения усталостной трещины;
- 2) очаг разрушения – образуется после слияния нескольких усталостных трещин;
- 3) участок медленного развития усталостной трещины;
- 4) участок стремительного развития усталостной трещины;
- 5) участок окончательного разрушения.

Общая классификация изломов металлов приводится в руководящем документе РД 50-672-88. Классификация усталостных макроизломов в зависимости от характера и вида нагружения представлена на рисунке 1.9.

Что касается непосредственно сварных соединений, то в макроскопическом масштабе поверхность усталостного разрушения обычно нормальна к направлению главного растягивающего напряжения. Разрушения начинаются в месте зарождения трещины и распространяется внутрь области трещины, образуя почти концентрические кольца. Всегда есть точка инициирования трещины, рисунок 1.10, которая обычно находится в месте концентрации напряжений.



I - растяжение; II - односторонний изгиб; III - двухсторонний изгиб;

IV - изгиб при вращении

A, Г - естественный локальный концентратор; Б, Д - слабый концентратор по окружности; В, Е - сильный концентратор по окружности

А, Б, В - умеренные номинальные напряжения;

Г, Д, Е - высокие номинальные напряжения

Рисунок 1.9 - Классификация усталостных макроизломов в зависимости от характера и вида нагружения



Рисунок 1.10 - Схема усталостного разрушения поверхности и ее частей.

Зарождение трещины обычно начинается на свободной поверхности. Даже в том случае, если трещины образуются внутри материалов, это всегда связано с поверхностью раздела, такой как слои, карбиды, некогерентные частицы и прочее, рисунок 1.11.

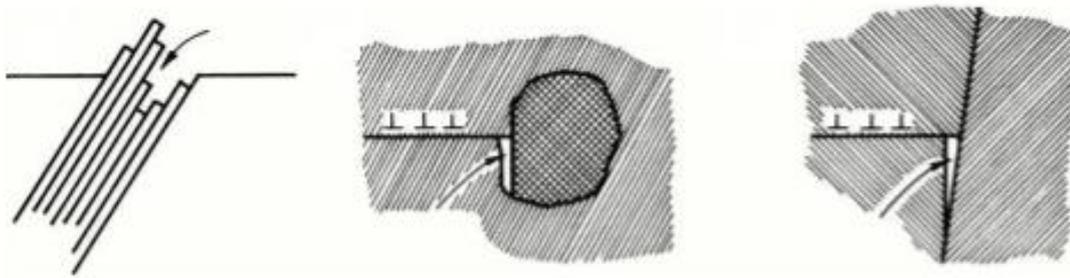


Рисунок 1.11 - Зарождение трещин в полосах стойкого скольжения, включений и границ зерен, соответственно.

В настоящее время наиболее распространенным методом исследования усталости материала является тестирование роста трещин с использованием концепции фактора интенсивности напряжений, ведь технологии обработки материалов, особенно такие как сварка, приводят к появлению различных дефектов [2]. Эти устойчивые полосы скольжения могут в последствии образовывать выдавливания и интрузии путем накопления пластической деформации, как показано на рисунке 1.11 и 1.12

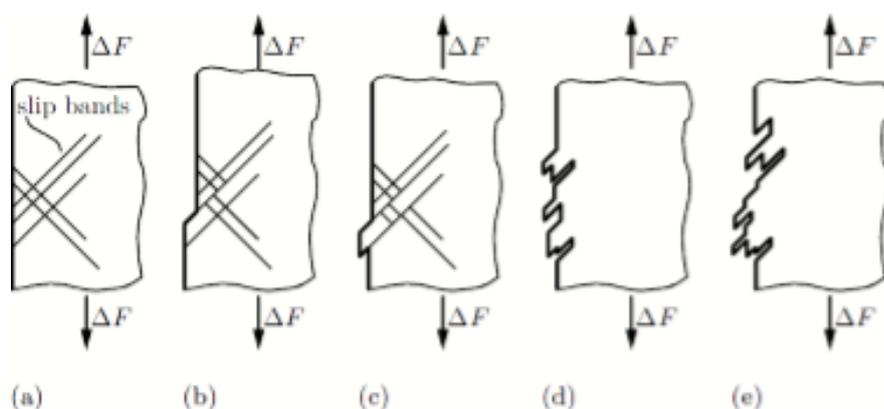


Рисунок 1.12 - Этапы формирования экструзий и интрузий.

На рисунке 1.12 (a) видно, что дислокации скользят в определенных кристаллографических плоскостях, управляемых касательными напряжениями. Постоянные полосы скольжения образуют свободную поверхность, рис. 1.12(b), за которой следует вытягивание или проникновение, рис.1.12 (c). На рисунке

1.12 (d) и 1.12 (e) представлены состояния с различным количеством разрывов на поверхности. Усталостные трещины имеют тенденцию зарождаться в интрузиях, где напряжения высоки, и где накапливается большое количество дислокаций. Рисунок 1.13 представляет собой изображение образования разрывов на поверхности металла.

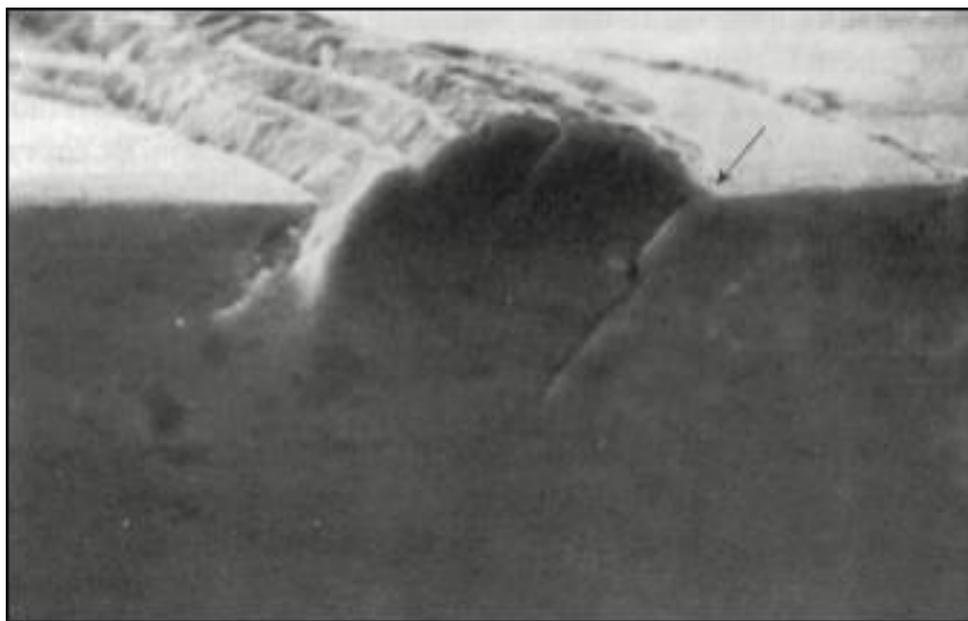


Рисунок 1.13 - Изображение образования разрывов на поверхности металла.

Характерным моментом на этой стадии усталостного разрушения является то, что трещина изначально растет вдоль плоскостей скольжения, а значит, распространяется в сторону максимальных напряжений. Однако, в момент образования она как правило, распространяется по нормали к максимальной нагрузке на растяжение. Скорость распространения трещин, как правило, очень низкая, а поверхность трещин гладкая. Тем не менее, на данном этапе большое влияние оказывает микроструктура. Все усилия, направленные на уменьшение шероховатости поверхностей, приведут к увеличению сопротивления зарождения усталости.

Второй этап касается роста вдоль выше упомянутых полос скольжения, а также распространения перпендикулярно максимальным напряжениям растяжения (1 этап). Также трещина прогрессирует дискретными шагами и

образует, так называемые «бороздки», начиная с острого конца (этап 2), рисунок 1.14. С максимальной долей усилия 45° к осевой нагрузке в этом направлении могут сформироваться диапазоны выскользывания, рис. 1.14(b). Когда они, наконец, достигают максимальной ширины, наконечник затупляется и создается постоянная пластическая деформация при растяжении, рис.1.14(c). Если нагрузка спадет, то упругое восстановление подействует в противоположном направлении, рис.1.14 (d),(e).

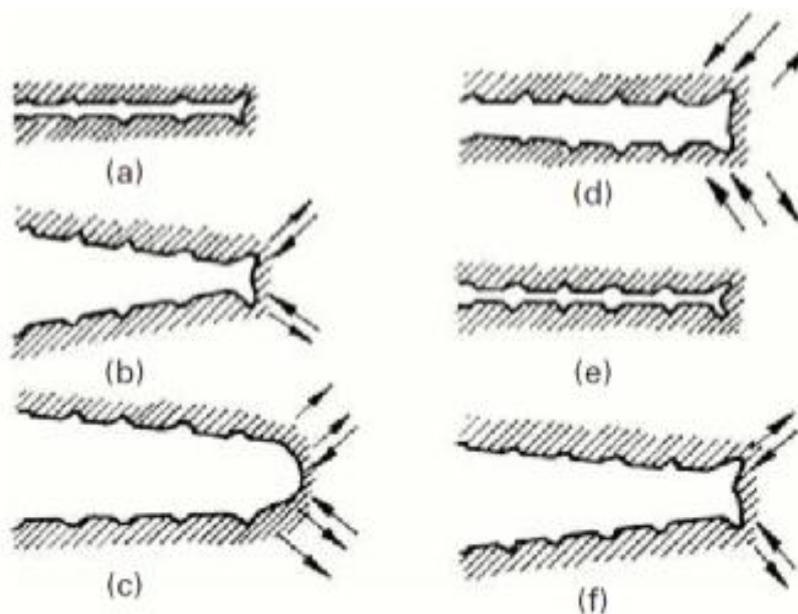


Рисунок 1.14 - Пластичный притупляющий процесс этапа 2.

В условиях постоянной нагрузки упругая деформация не может восстановить исходную форму материала из-за противоположной остаточной пластической деформации, рис.1.12 (f). Во время следующего цикла, новое направление проявляется в противоположную сторону, и процесс повторяется.

В структурных компонентах, подвергнутых усталости, трещина или несколько трещин могут появиться в определенных местах, подверженных их зарождению, например, в местах концентрации напряжений. Эти трещины со временем срастаются, а затем распространяются путем притупления пластической деформации, образуя «бороздки», если количество пластической деформации достаточно велико. Проектирование деталей и узлов выполняется в настоящее время таким образом, чтобы они могли сопротивляться

определенным значениям статической нагрузки. Однако применительно к бурильным трубам следует учитывать фактор знакопеременных нагрузок. Это можно четко увидеть в разрушенных сварных швах, соединяющих бурильную трубу с замком.

Зона окончательного разрушения, которое происходит в сечении, где материал не может больше сопротивляться приложенной нагрузке, может иметь волокнистый характер. Все зависит от того, каким является материал, хрупким или пластичным. В зависимости от условий нагрузки, внешний вид поверхности трещины может отличаться. Например, трещины, вызванные низкими напряжениями, обычно имеют очень гладкую область усталости, а остаточная область при окончательном разрушении мала, что согласуется с тем, что было сказано ранее. С другой стороны, высокие напряжения обычно создают небольшие области усталости и, как правило, вызывают возникновение множественных трещин.

Выводы.

Применяемая при сварке замков бурильных труб и тела трубы технология сварки трением характеризуется малым количеством дефектов. Анализ изломов разрушенных бурильных труб показывает, что разрушение происходит по механизму усталостного разрушения. Зарождение трещины усталости происходит на поверхности раздела, в качестве которой выступают, в основном, дефекты сварного шва. Следовательно, в качестве рекомендации производителям труб бурильных можно предложить строго соблюдать технологическую дисциплину.

1.3 Задачи работы

Новые технологии бурения характеризуются высокой нагруженностью бурового оборудования и, особенно, бурильных труб. С другой стороны должна быть обеспечена высокая эксплуатационная стойкость бурильных труб. Трубы должны эксплуатироваться без разрушений в течение заданного периода эксплуатации. Анализ разрушений бурильных труб свидетельствует о том, что

преимущественно разрушение происходит по сварному соединению. Следовательно, наиболее уязвимым местом бурильной трубы является сварной шов, соединяющий тело трубы и замок, рисунок 1.13. Причем, анализ показывает, что разрушение происходит, преимущественно, по усталостному механизму. Строгое соблюдение параметров режима сварки трением позволяет минимизировать количество дефектов, являющихся местом зарождения усталостных трещин [1]. Однако актуальным является проведение исследований, позволяющих установить влияние параметров режима сварки на усталостную прочность сварного шва.

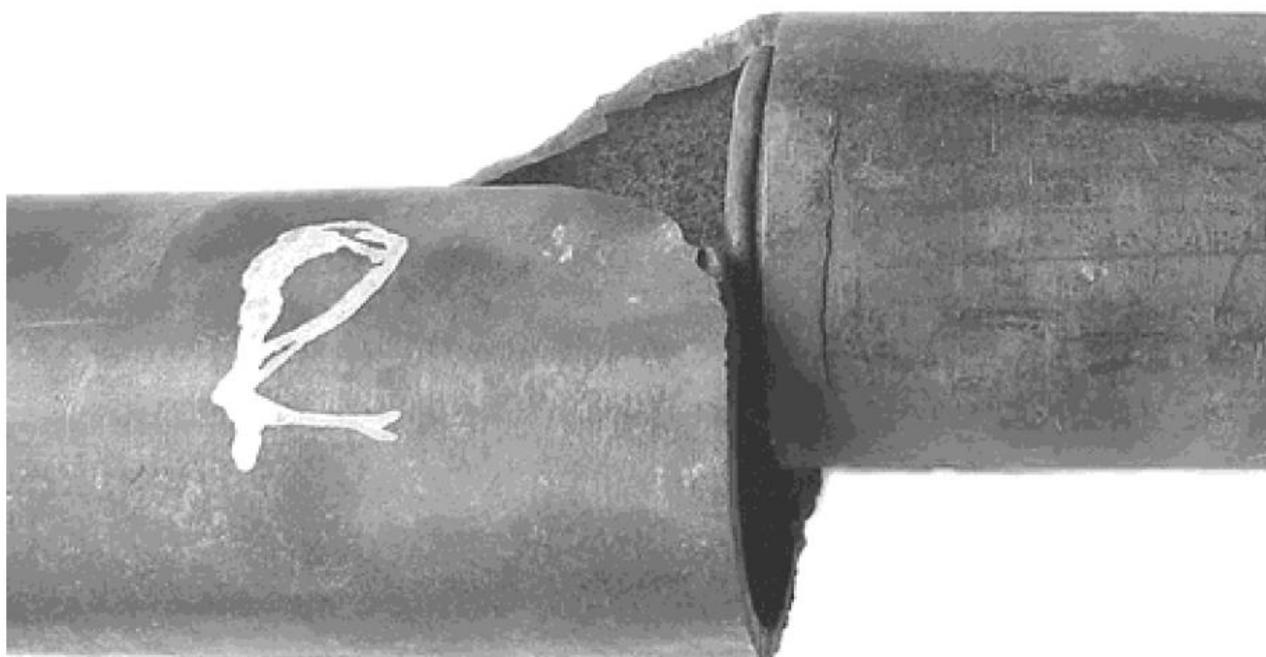


Рисунок 1.15 – Разрушенная труба

Исходя из изложенного и сформулированной цели, в работе поставлены следующие основные задачи, последовательное выполнение которых позволит достичь сформулированной в разделе Введение цели:

- подобрать оборудование для проведения усталостных исследований;
- подобрать оборудование для сравнительных статических испытаний труб;
- определить необходимые исследования, требуемые для выявления влияния параметров режима сварки труб бурильных на их долговечность;

- разработать методику проведения экспериментальных исследований;
- выполнить эксперименты и обработать их результаты;
- по результатам исследований выдать технологические рекомендации предприятиям изготовителям бурильных труб и внедрить их в практику.

.

.

2 Методика исследований

2.1 Методика испытания бурильных труб на растяжение и изгиб

Основной задачей испытания труб на растяжение является определение допустимого значения осевой нагрузки при бурении скважин вращательным способом.

Испытания проводятся на специальной разрывной машине, выполненной в виде горизонтального гидравлического пресса. Машина имеет стационарную раму со специальными захватами в виде Т-образных упоров для присоединения испытуемых образцов. Машина имеет следующие параметры технической характеристики:

Максимальное усилие растяжения-сжатия, кН(тс) 1100(110);

Длина образцов бурильных труб, м 1,20...3,6;

Диаметр образцов, мм 27...114;

Рабочее давление маслососа, МПа(кгс/см²) 29(290);

Габаритные размеры, м 4,5x1,2x0,8;

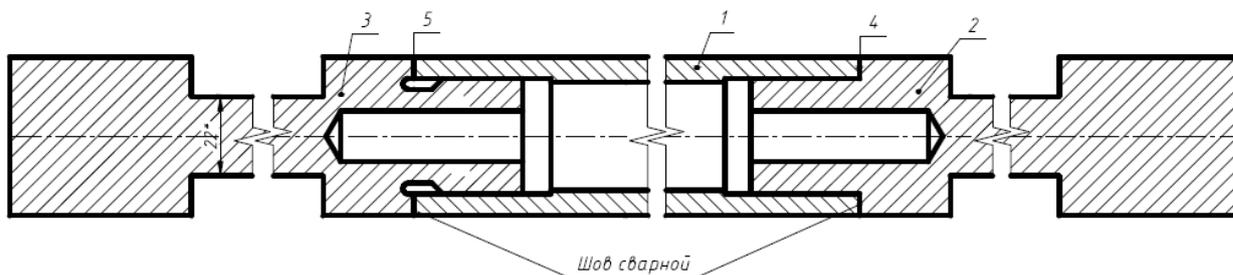
Масса, кг 600.

Растягивающее усилие измеряется электронным манометром, имеющим настройку задаваемого давления (растягивающего усилия), при котором маслосос отключается. Усилие растяжения задается в соответствии с программой испытаний и выбирается из расчета достижения предела текучести материала $0,8\sigma_T$ или разрыва трубы или сварного шва.

Испытание проводится на образцах, изготовленных по принятой технологии, в частности, с приваренными замками из материалов с различными механическими свойствами и подвергшимся термохимическому упрочнению и термической обработке.

На рисунке 2.1 изображен образец бурильной трубы для горизонтально направленного бурения с замковым соединением (ниппелем и муфтой) приваренными при нагревании за счет трения. Опытное соединение имеет два конструктивных исполнения: в виде тупикового торцевого сварного шва и с

наличием полости на контактной поверхности приварной детали замка для размещения в ней части образовавшегося при нагревании грата.



1 – труба 45×5 из стали 30ХГСА; 2 – приварной упор с образованием сварного шва без зазора между плоскостями; 3 – приварной упор с наличием полости (камеры) для размещения грата; 4 – вид (форма) торцов свариваемых деталей без наличия открытой полости; 5 – вид торцов деталей с наличием полости (камеры) для размещения грата

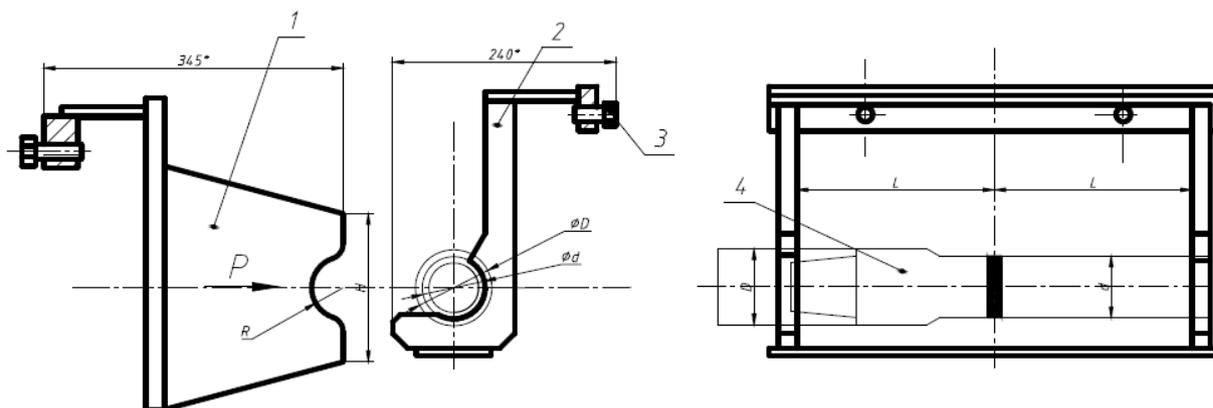
Рисунок 2.1 - Образец трубы 45×5 с приварными элементами замка при нагревании за счет трения.

В качестве материалов для изготовления образца принята горячекатаная труба по ГОСТ 8732-78 диаметром 45 мм с толщиной стенки 5 мм из стали марки 30ХГСА по ГОСТ 8731-87 и приварные замковые детали из круглого проката сталь марки 40Х ГОСТ 4543-71, подвергшиеся термической обработке с твердостью по Бринеллю НВ = 255...321.

Испытание бурильных труб с приваренными замками на изгиб является альтернативой испытанию на растяжение. Этот способ дает более надежные результаты и дает возможность вскрыть микротрещины в сварном шве и выявить скрытые дефекты, которые другими способами не определяются. Так при приложении растягивающей нагрузки, соответствующей $0,8\sigma_T$, сварной шов не разрушится при наличии микротрещины или недостаточного нагрева металла на площади поперечного сечения до 0,25 от общей площади сварного шва. Однако при бурении скважины при возникновении знакопеременных напряжений в сварном шве произойдет разрушение соединения.

На рисунке 2.2 приведен чертеж приставки к разрывной машине. Приставка состоит из упора 1, закрепленного с помощью болтов на подвижном поршне гидравлического пресса; пространственной опоры 2, закрепленной на неподвижной стенке пресса и крепежных болтов 3.

Образец бурильной трубы в горизонтальном положении опирается на выступы опоры при размещении сварного шва на середине опоры.



1 – упор; 2 – опора; 3 – болты; 4 – испытуемый образец сварного шва
 Рисунок 2.2 - Приставка к разрывной машине ДЗБО для испытания труб
 на изгиб

Испытание на изгиб производится следующим образом. На манометре гидравлического пресса устанавливается предельное давление масла в гидроцилиндре, при котором усилие P равно величине усилия, определенного из условия достижения напряжений изгиба в теле бурильной трубы $0,8\sigma_T$. В таблице 2.1 приведены рекомендуемые значения усилия и давления масла в гидроцилиндре разрывной машины ДЗБО для различных размеров бурильных труб при группе прочности материала К (предел текучести $\sigma_T = 500$ МПа).

Испытания бурильных труб с приваренными замками проводятся путем приложения расчетной нагрузки в точке нахождения сварного шва (наружный грат удаляется в процессе приварки элементов замка) в трех положениях через 1200 ± 50 . Бурильная труба не должна разрушаться в месте сварного шва и после

снятия нагрузки должна принять первоначальное положение без искривления и перекоса оси трубы.

Таблица 2.1 – Рекомендуемые значения изгибающего момента и усилия при испытании бурильных труб и сварного шва.

Показатель	Ед. изм	Величина показателя для труб при значениях DхS, мм							
		43х4,5	55х4,5	63,5х4,5	70х4,5	80х4,5	73х9	89х9	102х9
Момент сопротивления W	мм ³	4850	8480	11780	14400	18430	28900	24670	32900
Изгибающий момент Mi	Нм	194	326	471	576	884	560	987	1315
Усилие на упоре F	кН	13	22	31	38	59	37	66	88
Давление на насосе p	МПа	34	57	81	100	150	98	170	230

Способ испытание труб при изгибе в ДЗБО применяют в процессе отработки технологии сварки и выбора оптимальных режимов сварки трением.

2.2 Методика испытания сварных швов бурильных труб на усталостную прочность

Испытания на усталостную прочность регламентированы ГОСТ 25.502-79. Важным в данном стандарте является выбор типа исследуемого образца. Всего ГОСТ предусматривает 10 типов образцов, круглые, плоские и т.д.

К круглым образцам относят образцы типа I, II,

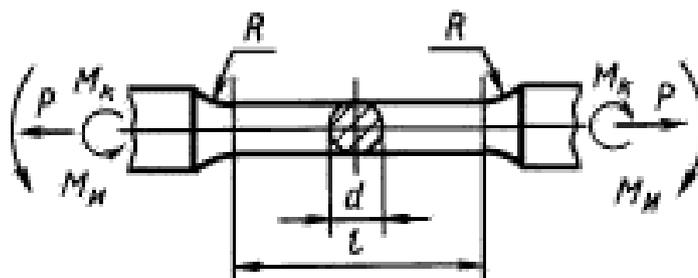


Рисунок 2.3 – Образец типа II

К плоским образцам образцы типа III, рисунок 2.4, типа IV.

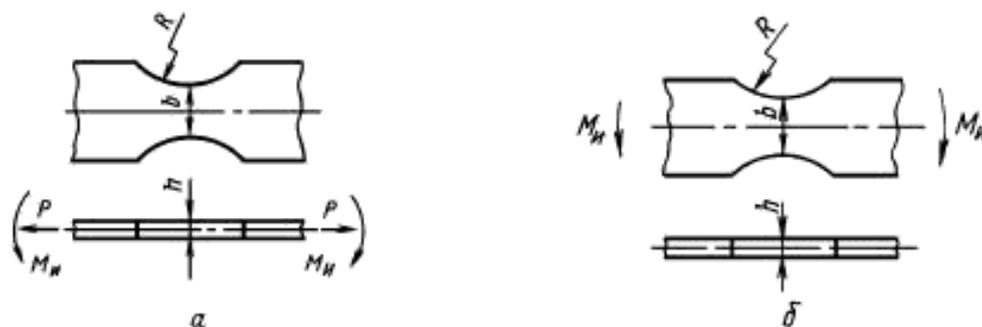


Рисунок 2.4 – Образец типа III

Также ГОСТ предусматривает образцы с кольцевыми выточками, симметричными надрезами, с круглыми отверстиями, рисунок 2.4.

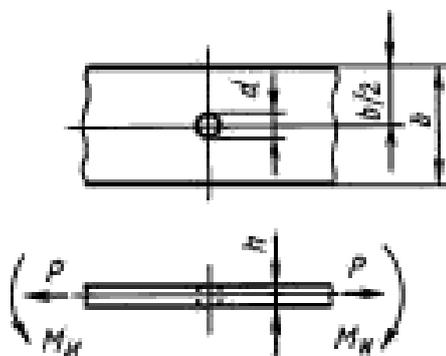


Рисунок 2.4 – Плоский образец с круглым отверстием

Анализируя представленные в ГОСТ образцы, остановили свой выбор на образце типа I, рисунок 2.5. Диаметр рабочей части данного образца, d , может составлять 5 мм, радиус $2,5 d$, таким образом, мы можем вырезать его из бурильных труб.

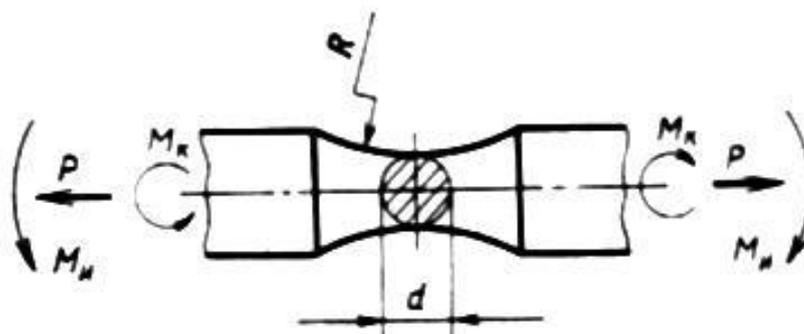


Рисунок 2.5 – Образец для исследований.

Сварку труб выполняли на предприятии – поставщике труб (один из поставщиков), ООО «Металл Комплекс». Предприятие располагается в Московской области. На предприятии для сварки применяют станки для сварки трением ПСТ-120. Осевое усилие сжатия станка составляет 1200 кН. Максимальная площадь свариваемого сечения 11000 мм². Максимальный диаметр свариваемых труб составляет 130 мм.

Станок в ООО «Металл Комплекс» встроен в технологическую линию, которая включает в себя помимо поста сварки трением пост нормализации сварного соединения, рольганги перемещения, карманы – накопители.

Для режима сварки трением вообще характерными являются следующие параметры:

- 1 - частота вращения - n , об/мин (c^{-1})
- 2 - давление нагрева - P_n , МПа
- 3 - давление проковки - $P_{пр}$, МПа
- 4 - продолжительность нагрева - t_n , с
- 5 - продолжительность проковки – $t_{пр}$, с.

Качественное сварное соединение может быть получено при правильном сочетании всех основных параметров.

При сварке труб бурильных применяется вариант сварки с одной вращающейся деталью. Частота вращения устанавливается 900 об/мин.

Величина удельного давления устанавливалась 6 кГ/мм² при нагреве и 12 кГ/мм² при сжатии.

Для того, чтобы удостовериться, насколько геометрические характеристики вырезанных образцов соответствуют характеристикам, установленным ГОСТ 25.502–79, выполняли измерения полученных образцов в трех сечениях. Точность измерений составляла 0,01 мм. Выполняли измерения геометрических характеристик в рабочей части образцов и местах для закрепления. образцов в захватах испытательной

установки при помощи микрометра со вставками МВМ 0–25. , Общий вид микрометра приведен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Микрометр со вставками МВМ 0–25

Цена деления микрометра составляет 0,01 мм. Диапазон измерений составляет 0...25 мм.

Для дополнительного контроля поверхности вырезанных образцов на наличие поверхностных трещин, забоин, расслоений, закатов, рисок и других дефектов поверхности образцов выполняли их осмотр при увеличении $\times 10$ с применением микроскопа МБС–9.

Общий вид микроскопа МБС-9 представлен на рисунке 2.7.

Поскольку известно, что на усталостную прочность существенное влияние оказывает шероховатость поверхности, то для повторяемости результатов исследований проводили исследование шероховатости изготовленных образцов. Для измерения параметра шероховатости образцов использовался микроинтерферометр МИИ–4 и аттестованные образцы шероховатости. Микроинтерферометр показан на рисунке 1.4.

Данный прибор обеспечивает измерение шероховатости поверхности в пределах 0,4...0,05 мкм.

При работе микроинтерферометра в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности равной 0,27 мкм.



Рисунок 2.7 – Микроскоп МБС-9



Рисунок 2.8 – Микроинтерферометр МИИ-4

Усталостные испытания образцов после проведения необходимых контрольных операций выполнялись согласно ГОСТ 25.502—на машине UBM-500, соответствующей требованиям ГОСТ 28841—90 и работающей по схеме чистого изгиба с вращением образцов с частотой 6000 мин^{-1} (частота нагружения $f = 100 \text{ Гц}$) [143]. Кинематическая схема машины UBM-500 изображена на рисунке 2.9.

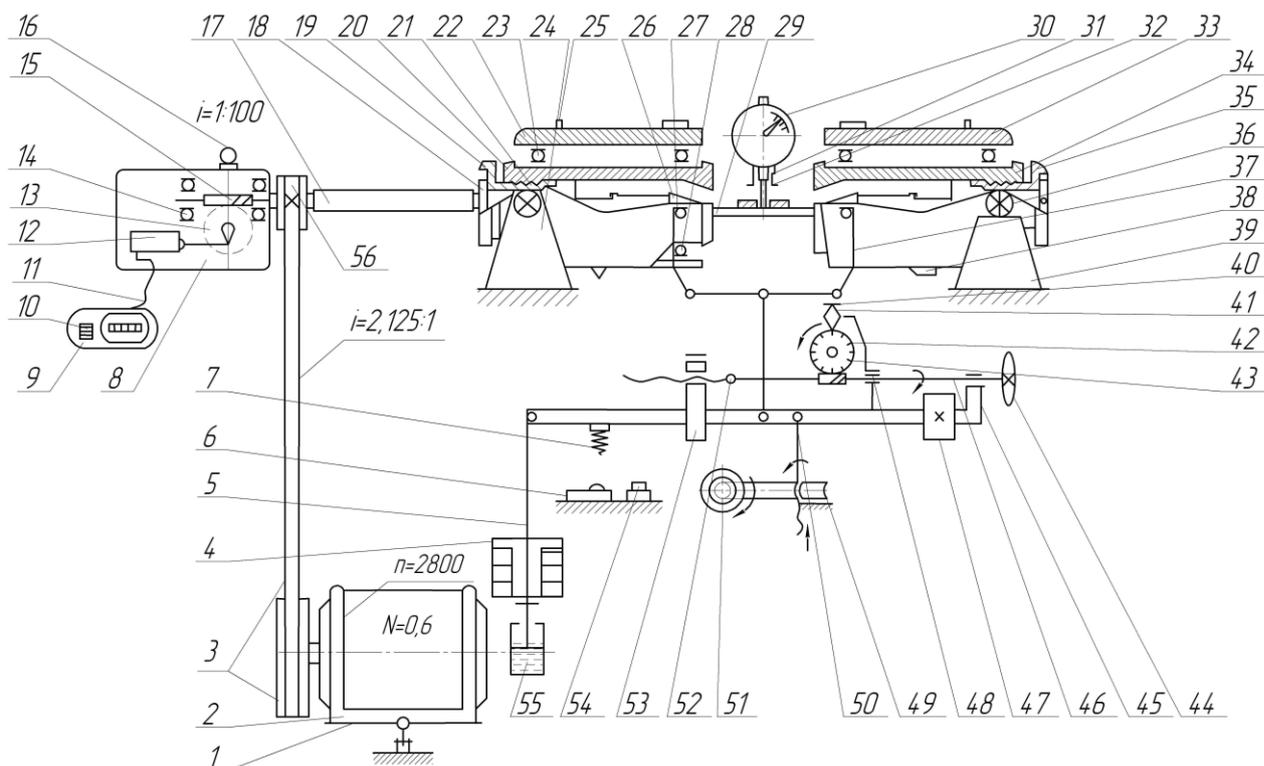


Рисунок 2.9 – Схема кинематическая.

Все механизмы машины смонтированы на литой чугунной станине, состоящей из двух частей: верхней – корпуса и нижней – цоколя.

Машина включает следующие основные узлы:

- шпиндельные бабки с приводом и счетчиком циклов;
- механизм нагружения;
- устройство для автоматического отключения привода в случае разрушения образца;
- электрооборудование.

В корпус каждой шпиндельной бабки вмонтированы шпиндели 20 и 34. Внутри каждого шпинделя с возможностью вращения установлены

конусные цанги 26. Образец, исследование которого предполагается выполнить своими цилиндрическими головками крепится в цангах.

Вращение шпинделя 20, а, следовательно, и испытуемого образца выполняется электродвигателем 2 через клино-ременную передачу 3 и через гибкий валик 17. При этом, частота вращения исследуемого образца составляет 6000 мин^{-1} .

Число циклов фиксируется счетчиком 9, на который с помощью ротора датчика импульсов подается электрический сигнал. Ротор датчика импульсов 12 и червячное колесо 13 жестко закреплены на одном валу. Передаточное отношение червяк 15 – датчик импульсов 100:1.

Счетчик электроимпульсный, выдерживает не менее 50 млн. срабатываний гарантированных изготовителем. Для сбрасывания показаний счетчика имеется ручка 10.

При исследовании усталостной прочности ГОСТ 25.502–79 [46] для построения кривой усталости и определения предела выносливости, соответствующего вероятности разрушения 50%, предусматривает испытания не менее 15 одинаковых образцов для каждой из марок сталей. В интервале напряжений 0,95–1,05 от предела выносливости, соответствующего вероятности разрушения 50%, требуется испытать не менее трех образцов, при этом не менее половины из них не должны разрушиться до базы испытаний.

База испытаний для определения пределов выносливости принимается:

$10 \cdot 10^6$ циклов – для металлов и сплавов, имеющих практически горизонтальный участок на кривой усталости;

$100 \cdot 10^6$ циклов – для легких сплавов и других металлов и сплавов, ордина-ты кривых усталости которых по всей длине непрерывно уменьшаются с ростом числа циклов.

При проведении усталостных испытаний серий образцов сталей соблюдались следующие условия:

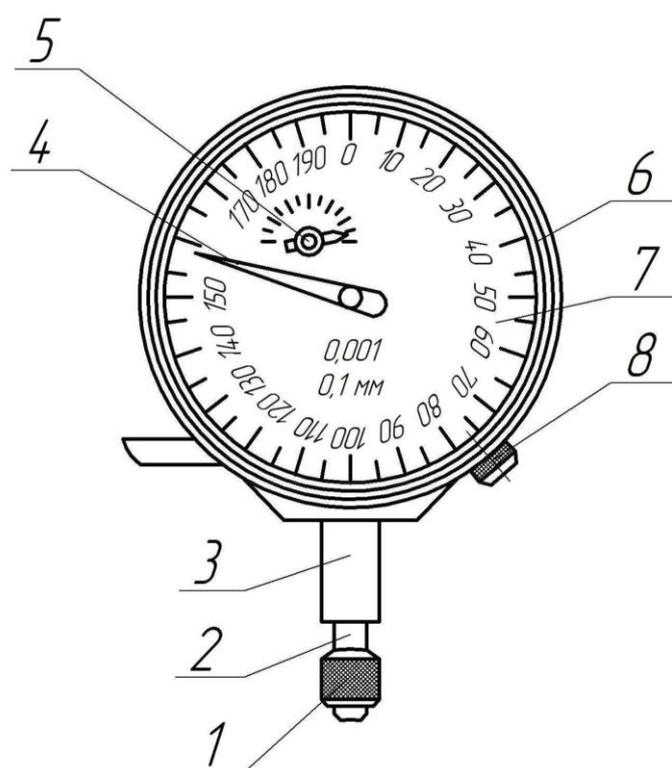
- температура окружающей среды плюс $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$;
- относительная влажность воздуха от 45 до 80 %;
- атмосферное давление от 84 до 106 кПа.

Методика испытаний включает в себя этап подготовки машины UBM-500 к проведению экспериментов. На подготовительном этапе выполняли визуальный внешний осмотр, определяли погрешность приложения нагрузки и проверяли биение шпинделей.

При визуальном внешнем осмотре перед проведением испытаний определяли уровень масла в редукторе датчика 8, успокоителя 55 и шпиндельных бабках 22 и 33.

– надежности крепления контрольного валика в шпиндельных бабках 22 и 33, надежность работы электродвигателя 2, четкость и безотказность работы системы автоматического отключения электродвигателя, правильность работы счетчика циклов 9.

Проверка биения шпинделей 20 и 34 производили с использованием индикатора часового типа МИГ–1 ГОСТ 9696–82. Индикатор часового типа МИГ–1 приведен на рисунке 1.6.

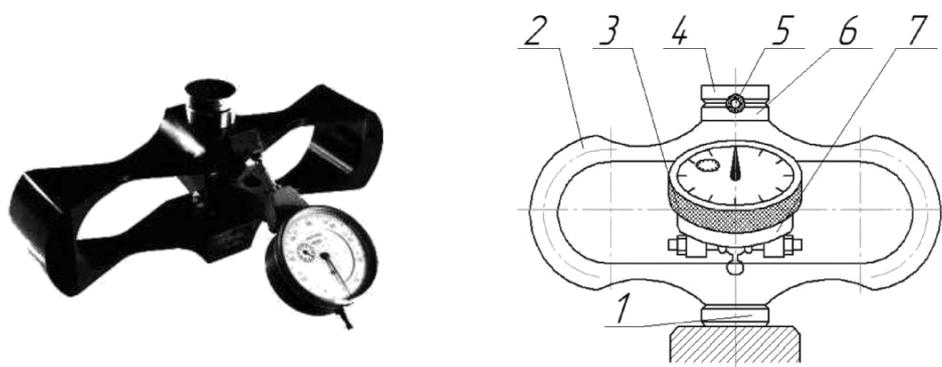


1 – измерительный наконечник; 2 – измерительный стержень; 3 – присоединительная гильза; 4 – стрелка; 5 – указатель перемещения измерительного стержня; 6 – корпус; 7 – циферблат;
8 – винт для установки механизма в нулевое положение

Рисунок 2.10 – Индикатор часового типа МИГ–1

Для проверки биения шпинделей 20 и 34 в шпиндельные бабки 22 и 33 устанавливали контрольный образец типа тела вращения, образец вращали от руки, и по наибольшей разности в показаниях индикатора МИГ–1 выявляли биение контрольного валика, и сравнивали его с допустимым биением, величина которого составляла 0,03 мм.

Проверка машины по нагрузкам на точность показаний выполнялась образцовым динамометром третьего разряда ДОСМ–3–1 У 5094 по ГОСТ 9500–84 [29], предназначенным для поверки испытательных рабочих средств измерений при статических нагрузках. Динамометр образцовый переносной сжатия 3-го разряда ДОСМ-3-1У 5094 представлен на рисунке 2.11.



1 – упор нижний; 2 – скоба; 3 – индикатор; 4 – подушка; 5 – шарик;
6 – упор верхний; 7 – центр

Рисунок 2.11 – Динамометр образцовый переносной сжатия 3-го разряда
ДОСМ–3–1 У 5094

Проверка производилась три раза в пяти точках, соответствующих 0,1; 0,2; 0,5; 0,8; 1,0 верхнего предела измерения шкалы при прямом и обратном ходе.

На следующем этапе разработки методики исследований выбираем оборудование. Машины для проведения исследований на усталость можно разделить на следующие четыре типа: 1) при повторно-переменном изгибе; 2) при растяжении, сжатии; 3) при кручении и 4) при изгибе с перегибом [9]. Помимо этого существуют машины для испытания металлов на усталость при повторной ударной нагрузке, а также для исследования длительного действия высоких температур на устойчивость нагруженного образца против деформации [12]. Общий вид схемы наиболее простого варианта – повторно-переменный изгиб представлен на рисунке 2.12.

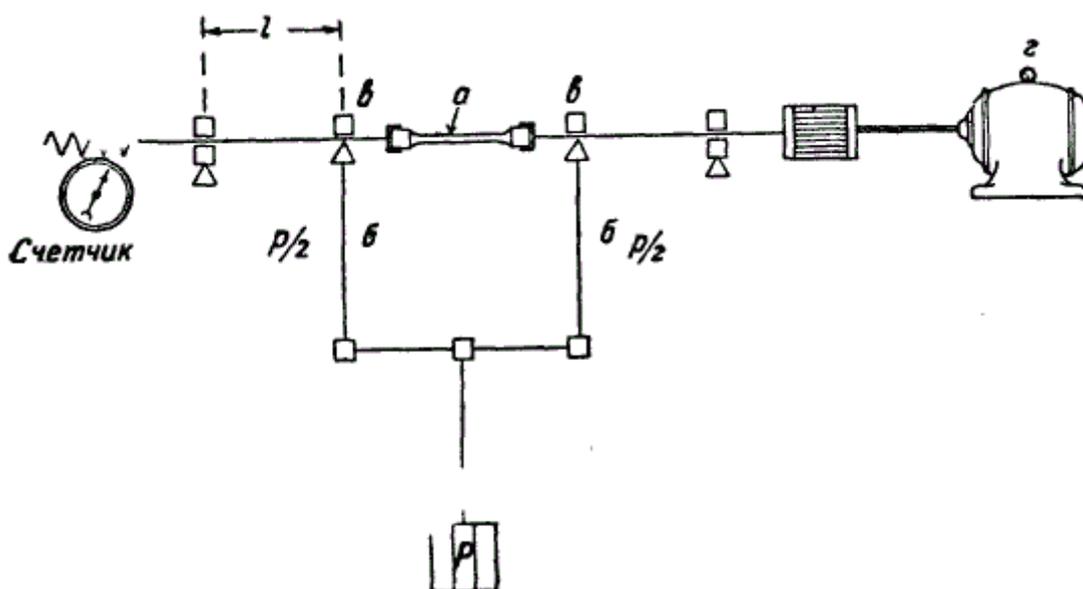


Рисунок 2.12 – Схема испытаний образцов при повторно-переменном изгибе

Образец *a* нагружается с помощью груза *P* через систему двух тяг *б* и двух шариковых подшипников *в*, таким образом образец подвергается чистому изгибу постоянным моментом $Pl/2$. Следовательно верхние волокна образца подвергаются сжатию, а нижние - растяжению; после поворота образца на 180° сжатые волокна попадут вниз и испытают растяжение, а растянутые, наоборот, попадут вверх и будут сжиматься. Т. о. при вращении от электромотора *z* периферические волокна образца подвергаются переменному растяжению-сжатию. Имея большое количество образцов одного какого-нибудь металла, их

подвергают испытанию сначала при небольшом напряжении. Число оборотов берут по счетчику: для стали - около 10000000. Постепенно увеличивая напряжение, доводят один из серии образцов до разрушения при числе оборотов, меньшем вышеуказанного. Тогда максимальное из напряжение, не разрушившее образец, и будет пределом усталости. Для данных испытаний при простоте реализации следует отметить большую длительность. Однако следует помнить, что зарождение внутренних трещин, т. е. начало усталости в некоторых материалах, появляется настолько медленно и незаметно, что в некоторых случаях методы быстрого определения предела усталости ненадежны. Указанный способ определения предела усталости длительными испытаниями образцов является очень точным. Только в сочетании с ним быстрые методы ускоряют результаты испытаний, нащупывая приблизительно предел усталости, который затем проверяется длительными испытаниями.

Выпускаемое промышленностью оборудование для испытаний лабораторных образцов на усталость, как правило, обеспечивает два вида периодического регулярного нагружения: чистый изгиб и осевое растяжение-сжатие [7].

Например, машина УКИ-3000Т-2 предназначена для испытаний на усталость при консольном изгибе и повышенной температуре в интервале от 300 до 1000 °С. Машина состоит из испытательной установки и щита управления.

Испытательная установка имеет две симметричные секции, которые совершенно автономны как в работе, так и в управлении. В машине обеспечено одностороннее обслуживание, имеется приспособление для испытания укороченных образцов.

На машине может одновременно испытываться два образца, рабочий диапазон нагрузок от 0,5 до 100 кгс (от 4,9 до 981 Н). Частота изменения циклов испытательной нагрузки по ступеням 3000 и 6000 об/мин. Нагрев образцов осуществляется в специальной термокамере.

Для испытания на усталость при чистом изгибе вращающегося образца с целью экспериментального исследования циклической прочности различных сортов металлов и сплавов в обычных условиях применяется машина 1709УИ-600/1800.

Конструктивно машина выполнена в виде двух независимых секций, которые имеют следующие основные узлы и механизмы: привод с редуктором и счетчиком циклов, шпиндельные бабки, механизм нагружения, панель управления и панель с электрооборудованием. Обе секции смонтированы на сварном цоколе.

Машина имеет программное нагружение. На шкале нагрузок установлены два подвижных указателя с микропереключателями, при помощи которых устанавливаются наибольшее и наименьшее значения нагрузки.

На машине можно одновременно испытывать два образца, условия испытания независимые. Для испытаний применяют образцы с диаметрами 5; 7,5 и 10 мм. Частота вращения испытуемого образца 2700, 4800 и 7800 об/мин.

Для испытания образцов при повышенных температурах применяется машина 17 ШУИ-800/7800, устройство и технические характеристики которой те же, что и в машине 1709УИ-600/1800.

Для испытания образцов при повышенных температурах машина снабжена электропечью ЭПР-1100 с пультом регулирования температуры.

Универсальные машины 1249УРС-2/30000, 1864УРС-2/30000 и 1254УРС-10/30000, а также 1863УРС-05/15000 предназначены для испытания на усталость образцов конструкционных материалов в симметричном и асимметричном цикле при постоянстве заданных напряжений или деформаций.

Машины работают в автоколебательном режиме, т. е. на частоте собственных колебаний механической колебательной системы.

В состав машин входят: испытательная секция, пульт управления, усилитель мощности и насосная установка, а также электропечь и термокриокамера.

Для создания циклических нагрузок использован электромагнитный силовозбудитель, обеспечивающий высокую частоту нагружения, что позволяет повысить производительность усталостных испытаний в 5—7 раз по сравнению с механическими и гидравлическими машинами.

Машины выполнены по схеме, позволяющей в процессе испытания осуществлять независимое управление (поддержание постоянства заданных значений или программное изменение) режимами статического и циклического нагружения. Статическое нагружение осуществляется с помощью ручного механического привода.

Комплект сменных приспособлений обеспечивает возможность проведения испытаний круглых и плоских образцов на растяжение-сжатие, чистый, поперечный и консольный изгибы. Достоинством машины является также возможность одновременной имитации частотных, силовых и температурных условий работы материалов.

Высокочастотная машина УРС-0/30000 с электромагнитным возбудителем и программированием нагрузки предназначена для испытания на усталость образцов и элементов конструкций из металлов при симметричном и асимметричном циклах растяжения - сжатия или изгиба со ступенчатым программированием циклической нагрузки (13 ступеней).

Установка состоит из испытательного агрегата и аппаратуры управления и регистрации; работает в резонансном автоколебательном режиме, что позволяет при малой затрате энергии создавать необходимые нагрузки на испытываемый образец. Изменение частоты нагружения производится сменой инерционных масс. Силовозбудитель электромагнитный, поляризованный, дифференциального типа.

Наибольшая испытательная нагрузка 10 тс (98 кН), наибольшая амплитуда циклической нагрузки ± 5 тс (49,5 кН), диапазон рабочих частот от 50 до 500 Гц. Емкость счетчика циклов составляет 10^9 , интервал испытательных температур от 350 до 1200 °С.

УРС-100/25, УРС-200/20 предназначены для испытания металлических и пластмассовых образцов на усталость и малоцикловую усталость при знакопеременном и знакопостоянном приложении осевой или изгибающей нагрузки с любым коэффициентом асимметрии при нормальных и повышенных температурах при отсутствии агрессивных сред.

Машины снабжены пультом программного управления. В обозначении марки машин цифра над чертой показывает наибольшую предельную (статическую и динамическую) нагрузку, выраженную в тонна-силах, цифра, стоящая под чертой, — наибольшее значение частоты циклического нагружения, выраженное в герцах. Например, для машины УРС-20/100 наибольшая предельная нагрузка 20 тс, диапазон частот циклического нагружения от 0,001 до 100 Гц.

Для испытания на усталость применяются машины УМ-10, УРС-20/6000, УРС-5/6000, УЭ-10, УЭ-20, УЭ-50, УЭ-100 и др., а также машины фирмы «Шенк»: для испытаний на плоский изгиб и кручение — PWS (номинальный изгибающий момент 160 Н • м); для усталостных испытаний на изгиб при нагружении симметричным циклом — PWO (номинальный изгибающий момент 30Н • м); ротационная машина для усталостных испытаний на изгиб — PUN (номинальный изгибающий момент 27 Н • м) с устройством для испытаний при повышенных температурах, а также универсальные пульсаторы вертикального (PVM) и горизонтального (PHX) исполнения для нагружения сжатием, изгибом и кручением (номинальная сила соответственно 20 и 600 кН).

Настольная машина UBM-100 для испытаний на вращение при изгибе с постоянным моментом 100 Нм. Применяется для испытаний на усталостную прочность при вращении по стандарту DIN 50113, рисунок 2.13.



Рисунок 2.13 – Машина UBM-100

Основные преимущества машины:

- Может работать в комбинации с высокотемпературной печью, которая устанавливается в область испытания. Испытания при комнатной температуре и повышенной температуре до $+1000^{\circ}\text{C}$.
- Специальные шариковые подшипники, регулируемый зазор, в продольной оси и оси вращения.
- Гидравлический силовой блок: для масляной смазки, охлаждения подшипников и держателя патронов, встроенный в 19“ консоль управления.
- Низкие эксплуатационные расходы
- Простота управления
- Высокая производительность
- Низкая стоимость по сравнению со стандартными динамическими системами.

Настольная машина UBM-500 для испытаний на вращение при изгибе с постоянным моментом 500 Нм. Предназначена для испытаний на усталостную прочность при вращении по стандарту DIN 50113, рисунок 2.14.



Рисунок 2.14 - Машина UBM-500

Главные преимущества:

- Может работать в комбинации с высокотемпературной печью, которая устанавливается в область испытания. Испытания при комнатной температуре и повышенной температуре до +1000°C.
- Специальные шариковые подшипники, регулируемый зазор, в продольной оси и оси вращения.
- Гидравлический силовой блок: для масляной смазки, охлаждения подшипников и держателя патронов, встроенный в 19“ консоль управления.
- Низкие эксплуатационные расходы
- Простота управления
- Высокая производительность
- Низкая стоимость по сравнению со стандартными динамическими системами

Машина для испытания на усталость МУИ-6000 не является настольной, рисунок 1.5.



Рисунок 2.15 – Машина МУИ 60000

Нагрузка на образец, кгс 10—100. Наибольший изгибающий момент, кгс. см . 500. Погрешность показаний машины при проверке статическим методом от измеряемого усилия, % не более ± 2 . Частота изменения испытательной нагрузки, об/мин 6000. Характеристики испытуемых образцов: образцы с цилиндрическими головками диаметром 12 мм и 17 мм длиной 226 мм типа I, VII, VIII по ГОСТу 2860-65; укороченный образец с конусной головкой дет. 0—10 МВП-12000 (при поставке шпиндельных бабок для испытания укороченных образцов). Наибольшее биение образца при отключенном электродвигателе и при вращении его от руки, мм . 0,03. Привод от электродвигателя переменного трехфазного тока 220/380 В. Мощность двигателя, 0,6 кВт. Габаритные размеры, мм: длина: 810 ширина: 385 высота с индикатором: 1280 высота без индикатора: 1180 Вес машины 250 кг. Вес принадлежностей, кг: 27

Машина ИС 5116-01 предназначена для испытания образцов из металлов и сплавов на усталость в резонансном режиме нагружения, рисунок 1.6. Машина состоит из испытательной установки, системы управления, регулирования и контроля, системы измерения заданных параметров. Электромеханический способ обеспечивает прямое измерение уровня нагружения образца в любой момент времени с выводом результатов измерения на цифровое табло.

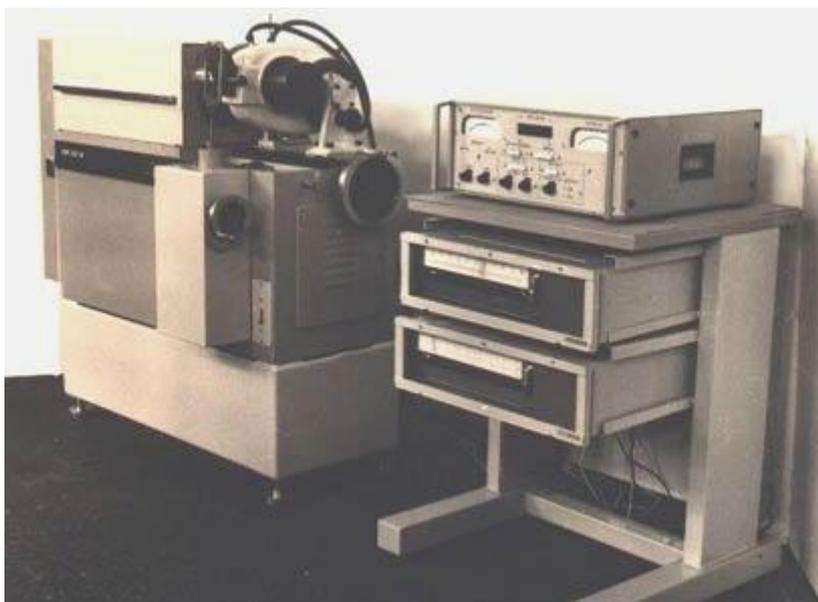


Рисунок 2.16 - Машина ИС 5116-01

Анализ наиболее распространенного для проведения исследований усталостной прочности оборудования позволяет сделать вывод, что для наших условий наиболее подходящей является машина UBM-500

На данной машине планируется проводить исследования образцов. рисунок 2.1 по схеме 2.12.

3 Результаты исследований

3.1 Статистическая обработка результатов исследований

Результаты исследований, выполненных согласно методике, описанной в разделе 2 работы обрабатывали на наличие грубых ошибок по формуле 3.1 – выполняя отсев грубых ошибок.

$$\tau_{1-p} = \frac{\left(X_i - \bar{X} \right)}{\sqrt{\frac{n-1}{n} \bar{S}}} \quad (3.1)$$

где τ_{1-p} табличное значение статистики τ , вычисленной при доверительной вероятности $q = 1 - p$;

X_i - крайний (наибольший или наименьший) элемент выборки, по которой подсчитывались значения \bar{X} и \bar{S} ;

n – количество испытанных образцов;

\bar{S} - несмещенная оценка среднеквадратичного отклонения.

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \bar{X} \right)^2} \quad (3.2)$$

Полученный результат сравнивается с критическим значением, взятым из таблицы для выполненного количества исследованных образцов n и уровне доверительной вероятности $q = 1 - p$.

Для проверки нормального распределения и доверительных границ использовали следующее неравенство:

$$\left(\frac{\bar{\Delta}_a}{\bar{S}} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \right) < \frac{0.4}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

где $\bar{\Delta}_a$ - среднее абсолютное значение выборки определяется по расчетной зависимости.

$$\bar{\Delta}_a = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n} \quad (3.4)$$

Выборку значений можно отнести к нормальному закону распределения, при условии выполнения неравенства 3.3.

Для расчетной оценки доверительных границ случайной величины использовали зависимость:

$$M(x) = \bar{X} \pm \xi \cdot \bar{\Delta}_a \quad (3.5)$$

где ξ - коэффициент 95% доверительности, для $n=15$ измерений равен 0,71.

Для того, чтобы найти ошибку при выполнении экспериментальных исследований определяли расчетным путем погрешность Δ_Σ по формуле

$$\Delta_\Sigma = \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{СТ}} \quad (3.6)$$

где $\Delta_{\text{из}}$ - измерительная составляющая погрешности; определяется по расчетной зависимости

$$\Delta_{\text{из}} = (\Delta_{\text{П}} + 0,001 \cdot P_{\text{ОЦ}}) \cdot t_{1-\alpha}(r) \cdot N_{\text{В}}^{-0.5} \quad (3.7)$$

где $\Delta_{\text{П}}$ - ошибка прибора;

α – уровень значимости;

$P_{\text{ОЦ}}$ - оцениваемый параметр;

r – число степеней свободы;

$t_{1-\alpha}(r)$ – квантиль Стьюдента, при $r=2$ и $\alpha=0,2$ составит 1,886.

$N_{\text{В}}$ - число измерений

$\Delta_{\text{СТ}}$ - статистическая составляющая погрешности.

$$\Delta_{\text{СТ}} = \bar{S} \cdot t_{1-\alpha}(r) \cdot N_{\text{В}}^{-0.5} \quad (3.8)$$

3.2 Результаты испытаний бурильных труб на растяжение и изгиб

Испытания на растяжение проводились до разрушения образца – разрыва при максимальном усилии растяжения. Разрушение произошло по телу трубы 45x5 в виде уменьшения диаметра и разрыва трубы. Сварные швы оказались прочнее материала трубы и не разрушились. При анализе качества сварных швов оказалось, что тупиковый шов образовался с увеличенным размером наружного грата и незначительным непроваром материала приварного замка.

Разрушение трубы произошло при усилии 304 кН (31,0 тс) то есть напряжения растяжения в момент разрушения составили $\sigma_p = 494 \text{ МПа} = 1,3\sigma_T$.

Выполненные результаты исследований на растяжение и изгиб показали, что возникновение излома связано с особенностями технологии соединения муфты с трубой, осуществляемого посредством сварки трением. При сварке трением металл из зоны стыка выдавливается в радиальных направлениях – на поверхности свариваемых деталей образуется грат. В процессе пластического деформирования в зоне стыка волокна металла меняют ориентацию с продольной (по направлению прокатки) на радиальную, т. е. располагаются перпендикулярно поверхности изделия. Стык с такой ориентацией волокон после удаления грата с наружной поверхности может оказаться очагом усталостного разрушения.

Повышенная чувствительность к циклическому нагружению металла сварного соединения, выполненного сваркой трением с последующим удалением грата, отмечается в ряде публикаций, например в [4].

Грат с наружной поверхности сварного соединения муфты с трубой удаляется механическим способом, с внутренней – не удаляется, рисунок 3.1.

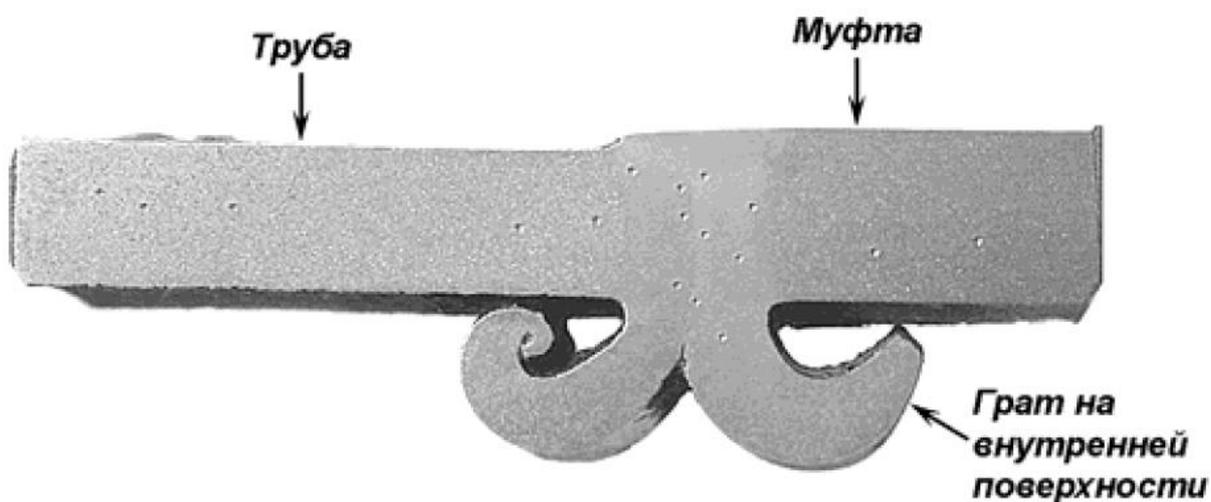


Рисунок 3.1 – Шлиф поперечного сечения муфты с трубой

Интенсивность протекания процесса разрушения будет в значительной степени зависеть от механических свойств металла трубы и муфты. При соответствующих нормативным требованиям прочностных характеристиках металла, при его малой чувствительности к концентрации напряжений и

высоком сопротивлении развитию трещин скорость распространения повреждения в режиме усталостного нагружения может быть очень низкой.

Для определения условий, при которых трещины не зарождаются или распространяются медленно выполняли исследования усталостной прочности.

3.3 Результаты исследований усталостной прочности

Параметры режима сварки на предприятии изготовителе труб бурильных, как было указано в разделе 2, составляют: частота вращения 900 об/мин; величина удельного давления 6 кГ/мм² при нагреве и 12 кГ/мм² при сжатии.

Для исследования влияния параметров режима на усталостную прочность в качестве изменяемых факторов эксперимента принимали изменение удельного давления при нагреве. Численные значения данного параметра режима принимали 5, 6 и 7 кГ/мм².

Также при неизменной величине давления при нагреве изменяли величину удельного давления при сжатии. Ее меняли 11, 12 и 13 кГ/мм².

Следовательно, с учетом всех сочетаний изменяющихся величин, получается 9 вариантов. По каждому из вариантов сваривали 3 трубы. После положительных результатов операционного контроля сваренных труб принятых на предприятии изготовителе вырезали по 5 образцов из сварных швов, следовательно, получалось по 15 образцов на одно сочетание параметров режима, согласно разделу 2 данной работы.

Каждый образец испытывался согласно методике, описанной в разделе 2. Поле обработки результатов по формулам 3.1- 3.8 строили графики. Величину напряжений в образцах задавали, начиная от предела прочности для стали тела трубы и последовательно снижали по 25 МПа до достижения предела усталостной прочности. Исследовали группу прочности бурильных труб D, сталь 30ХМА. Начальное напряжение задавали 600 МПа.

Для сочетания нагрузок давление при нагреве 5 кГ/мм² и давление при сжатии 11 кГ/мм² построенный график показан на рисунке 3.2.

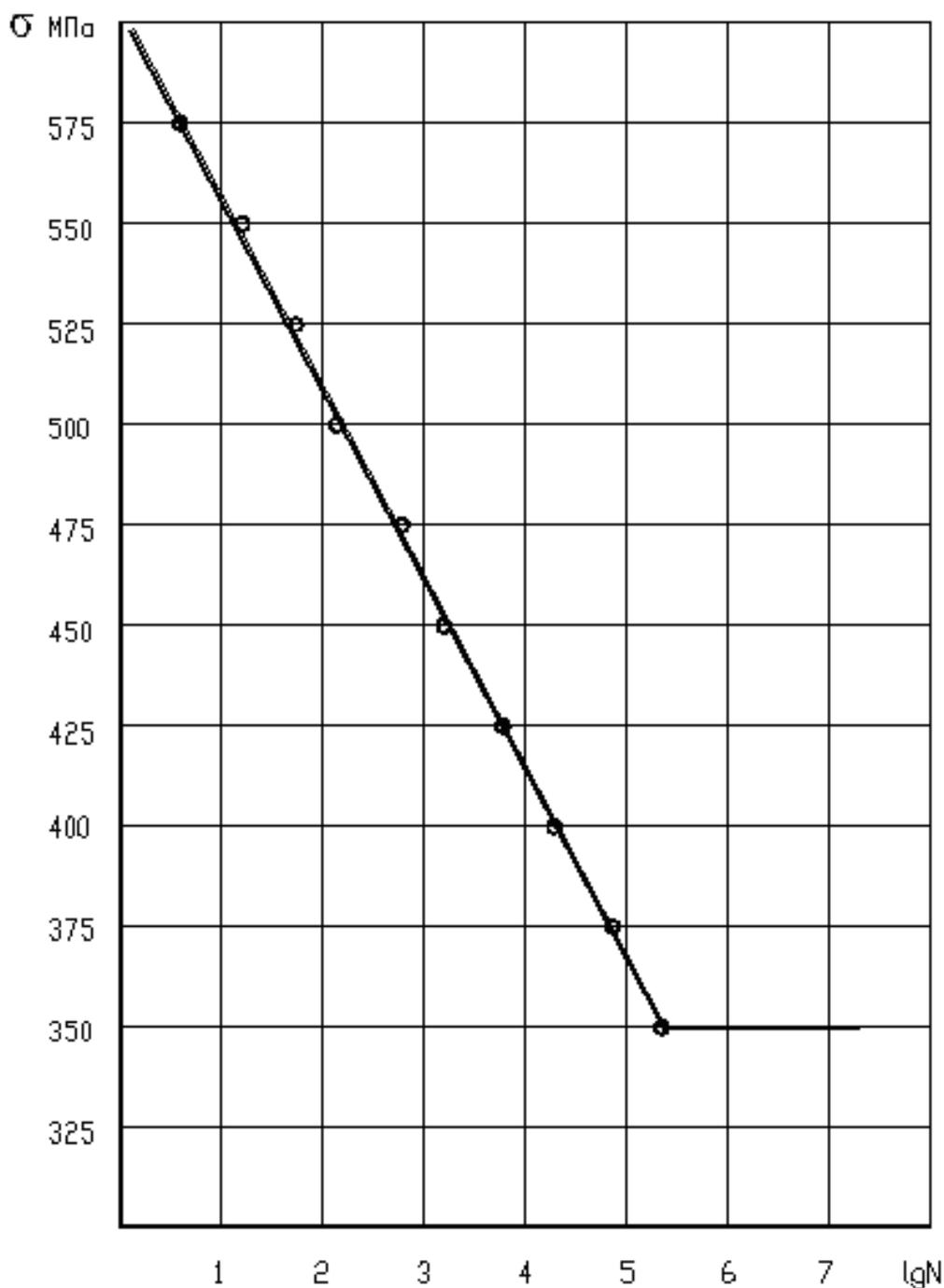


Рисунок 3.2 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 5 кГ/мм^2 и при сжатии 11 кГ/мм^2 .

Анализ указанного графика показывает, что предел усталостной прочности достигнут при нагрузке 350 МПа .

Для сочетания нагрузок давление при нагреве 6 кГ/мм^2 и давление при сжатии 11 кГ/мм^2 построенный график показан на рисунке 3.2.

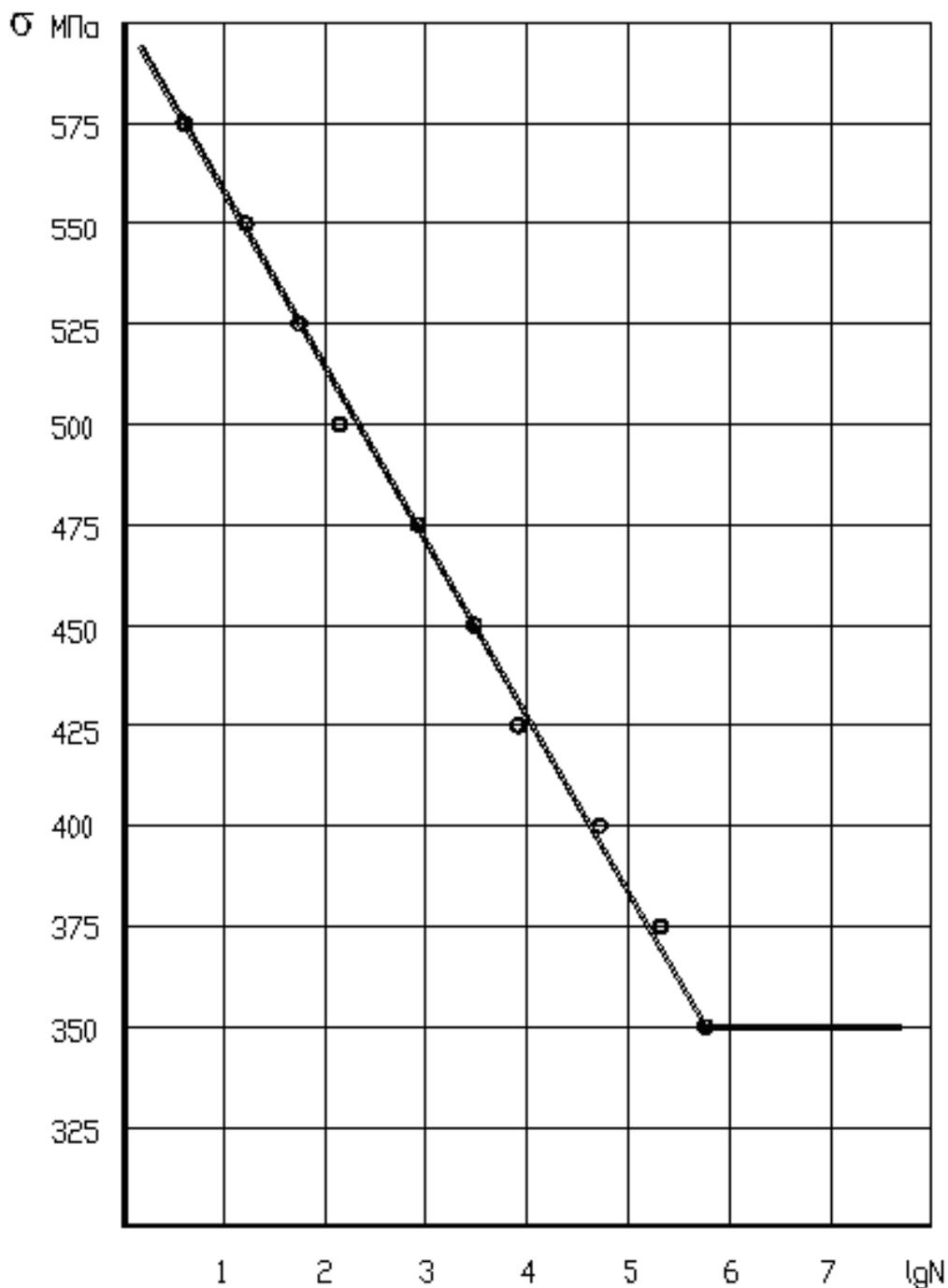


Рисунок 3.3 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 6 кГ/мм^2 и при сжатии 11 кГ/мм^2 .

Анализ графика позволяет сделать вывод, что предел усталостной прочности остался неизменным, 350 МПа .

Следующее сочетание нагрузок давление при нагреве 7 кГ/мм^2 и давление при сжатии 11 кГ/мм^2 построенный график показан на рисунке 3.4.

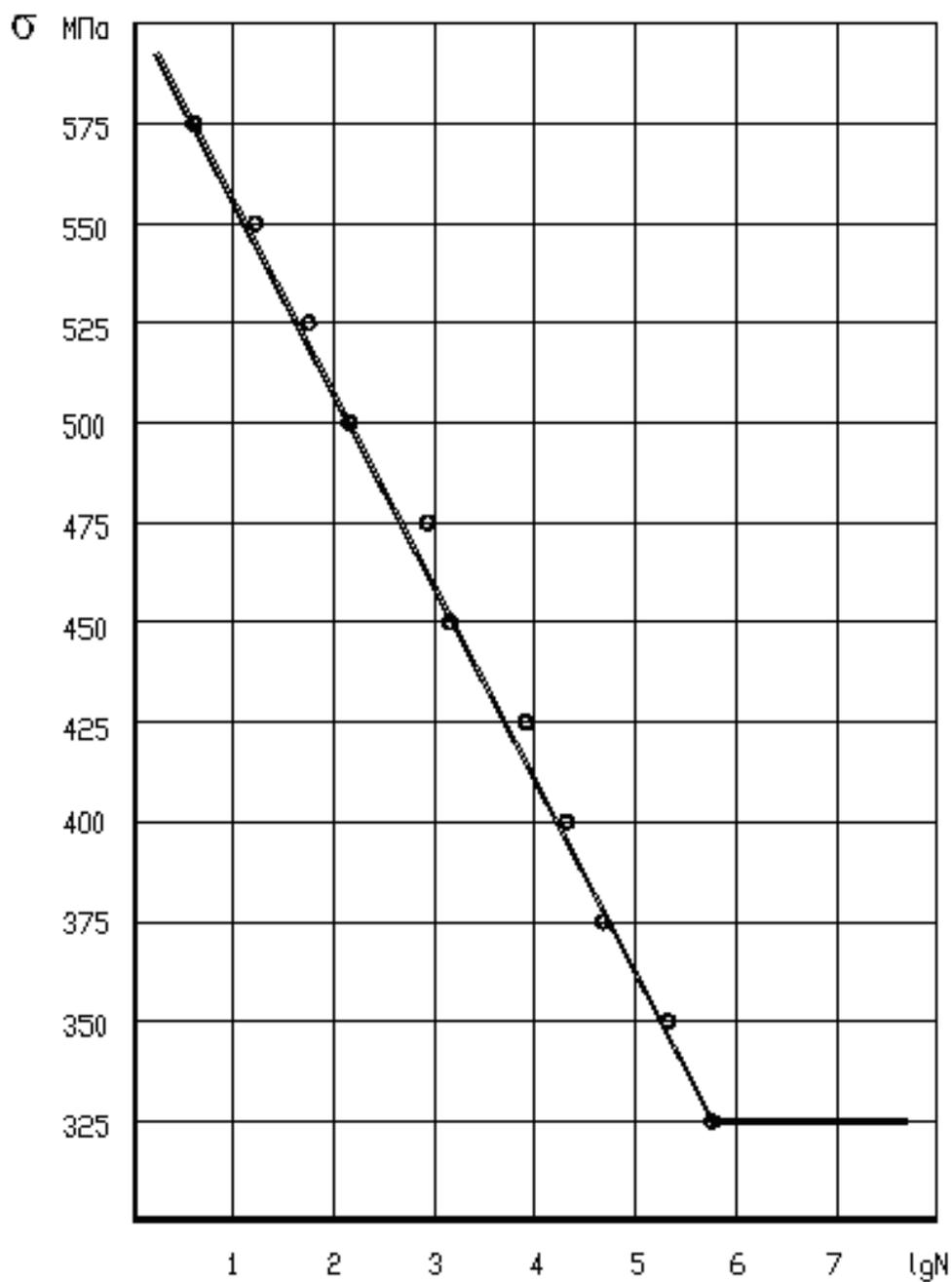


Рисунок 3.4 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 7 кГ/мм² и при сжатии 11 кГ/мм².

Предел усталостной прочности снизился до 325 МПа.

Следующее семейство графиков при давлении сжатия 12 кГ/мм². При давлении нагрева 5 кГ/мм² график показан на рисунке 3.5.

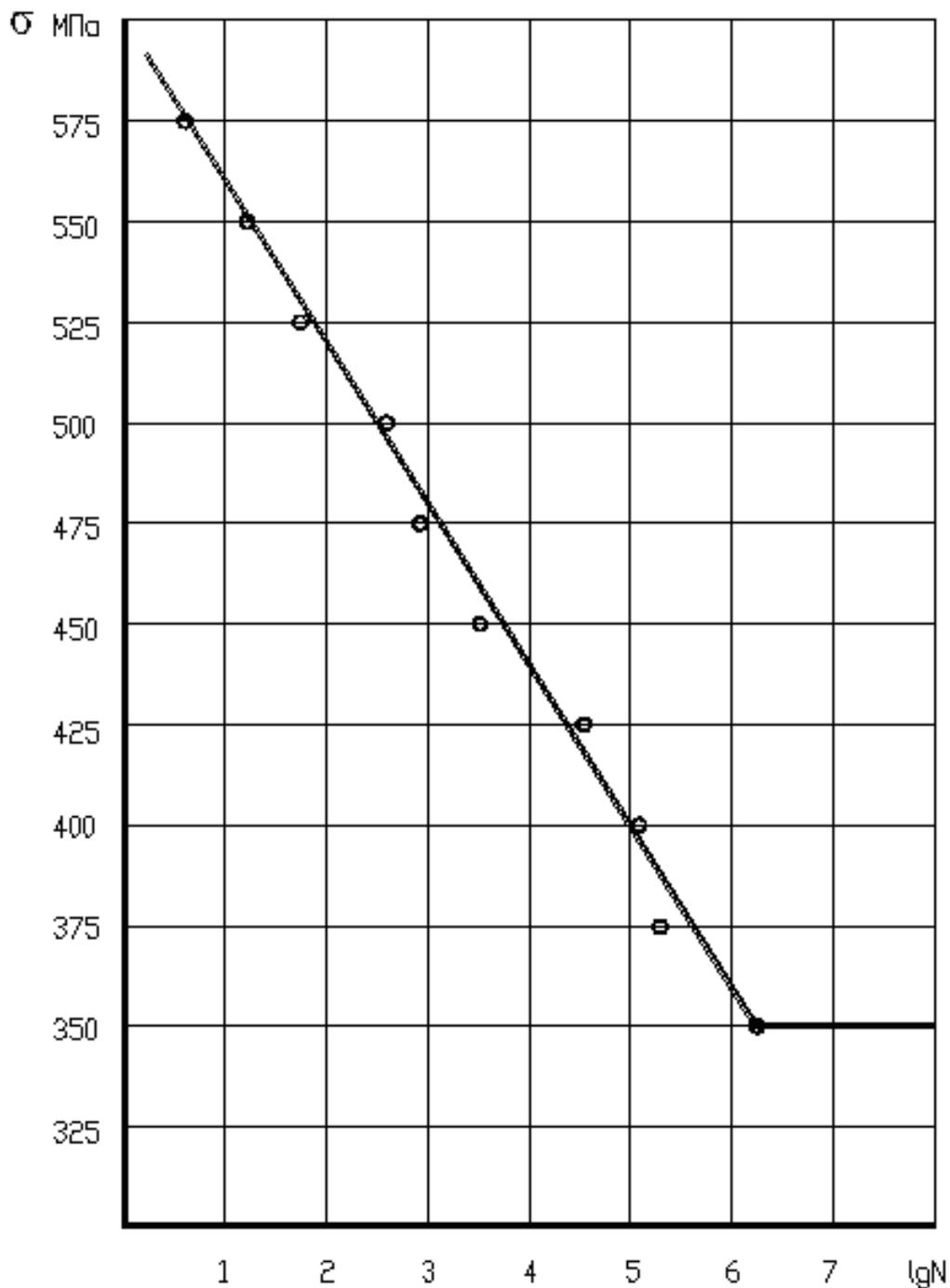


Рисунок 3.5 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 5 кГ/мм^2 и при сжатии 12 кГ/мм^2 .

Предел усталостной прочности, как следует из данного графика, 350 МПа .

График при увеличенном давления нагрева до 6 кГ/мм^2 показан на рисунке 3.6.

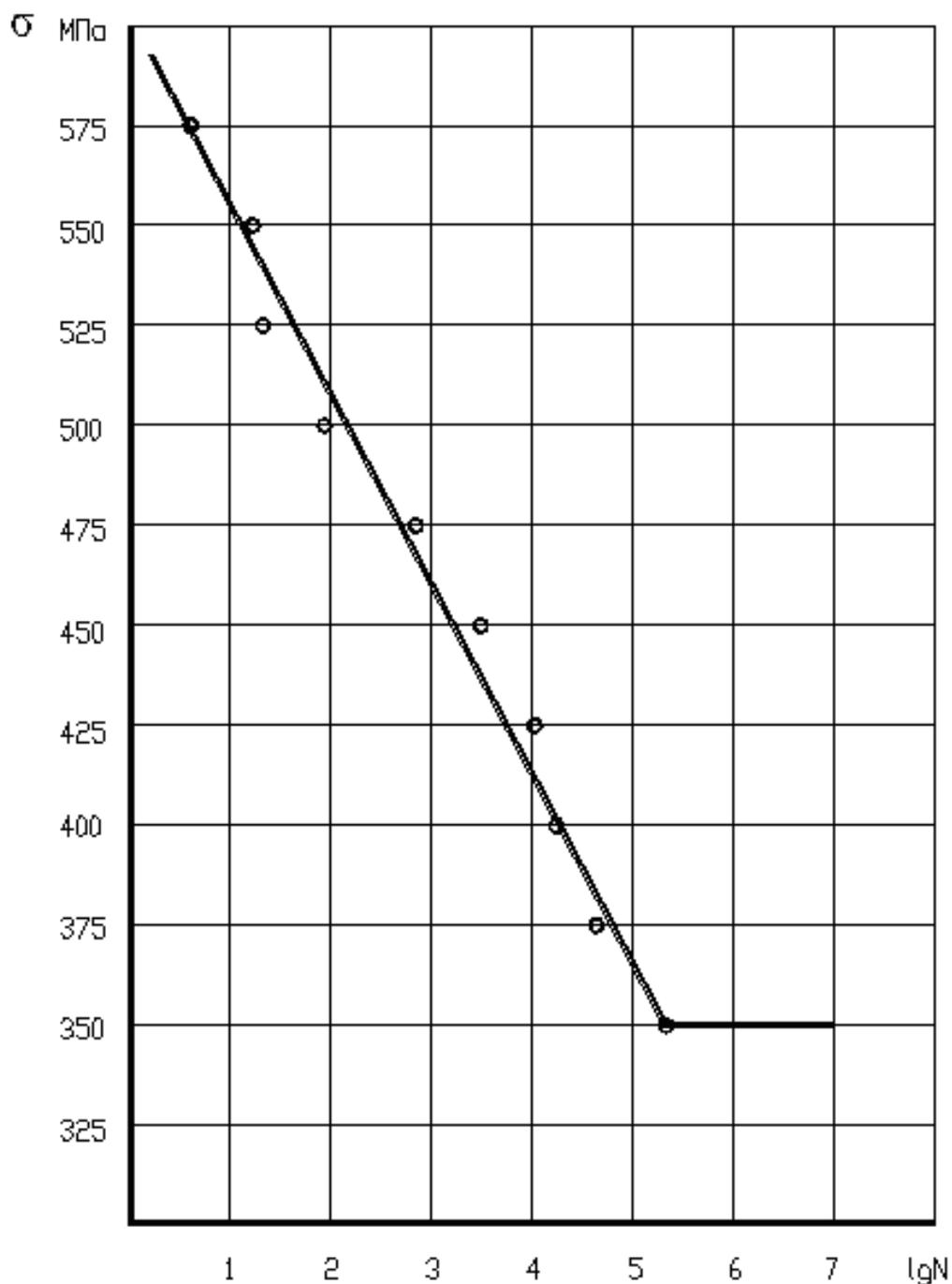


Рисунок 3.6 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 6 кГ/мм² и при сжатии 12 кГ/мм².

Предел усталостной прочности составил, 350 МПа. Следует отметить, что именно данный режим сварки труб в настоящее время применяется при сварке на станке ПСТ-120.

График при увеличенном до 7 кГ/мм² давлении нагрева показан на рисунке 3.7.

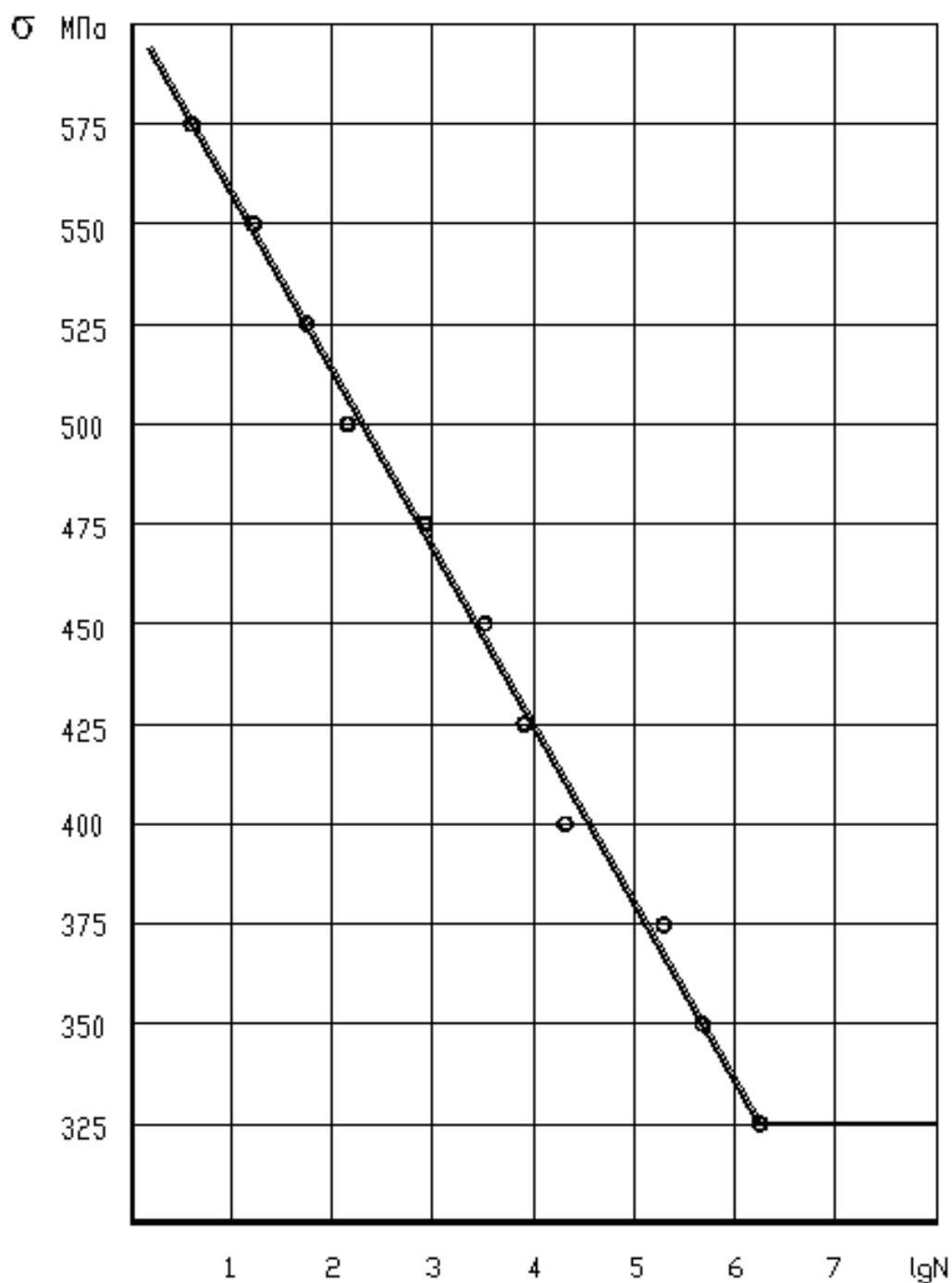


Рисунок 3.7 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 7 кГ/мм² и при сжатии 12 кГ/мм².

Отмечено снижение предела усталостной прочности до 325 МПа.

Далее приведены графики при давлении сжатия 13 кГ/мм². На рисунке 3.8 график при давлении нагрева 5 кГ/мм²

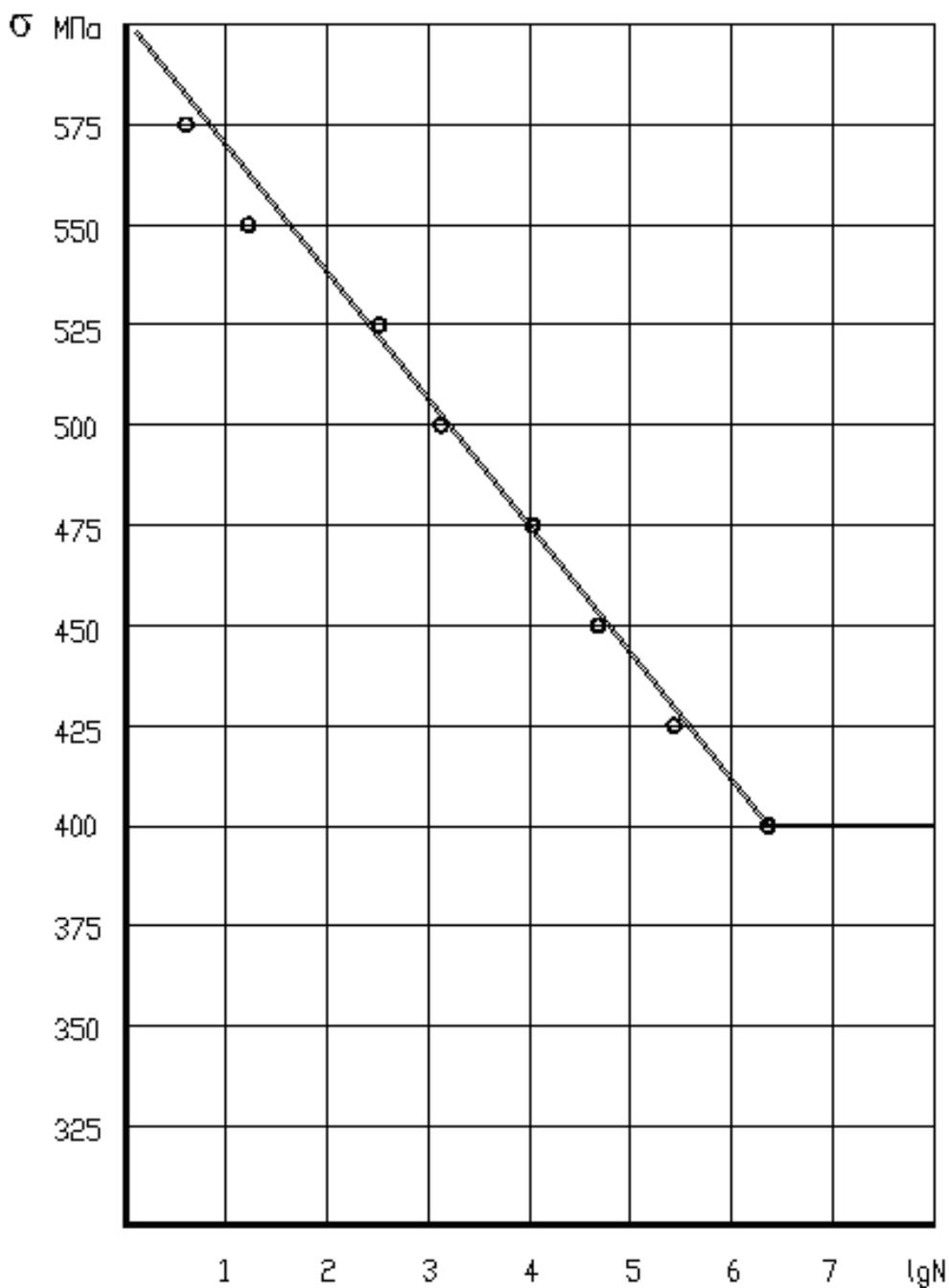


Рисунок 3.8 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 5 кГ/мм^2 и при сжатии 13 кГ/мм^2 .

На данном графике отмечено максимальное значение предела усталостной прочности – 400 МПа .

Результаты исследований при увеличении давления нагрева до 6 кГ/мм^2 при фиксированной величине давления сжатия, 13 кГ/мм^2 приведены на рисунке 3.9.

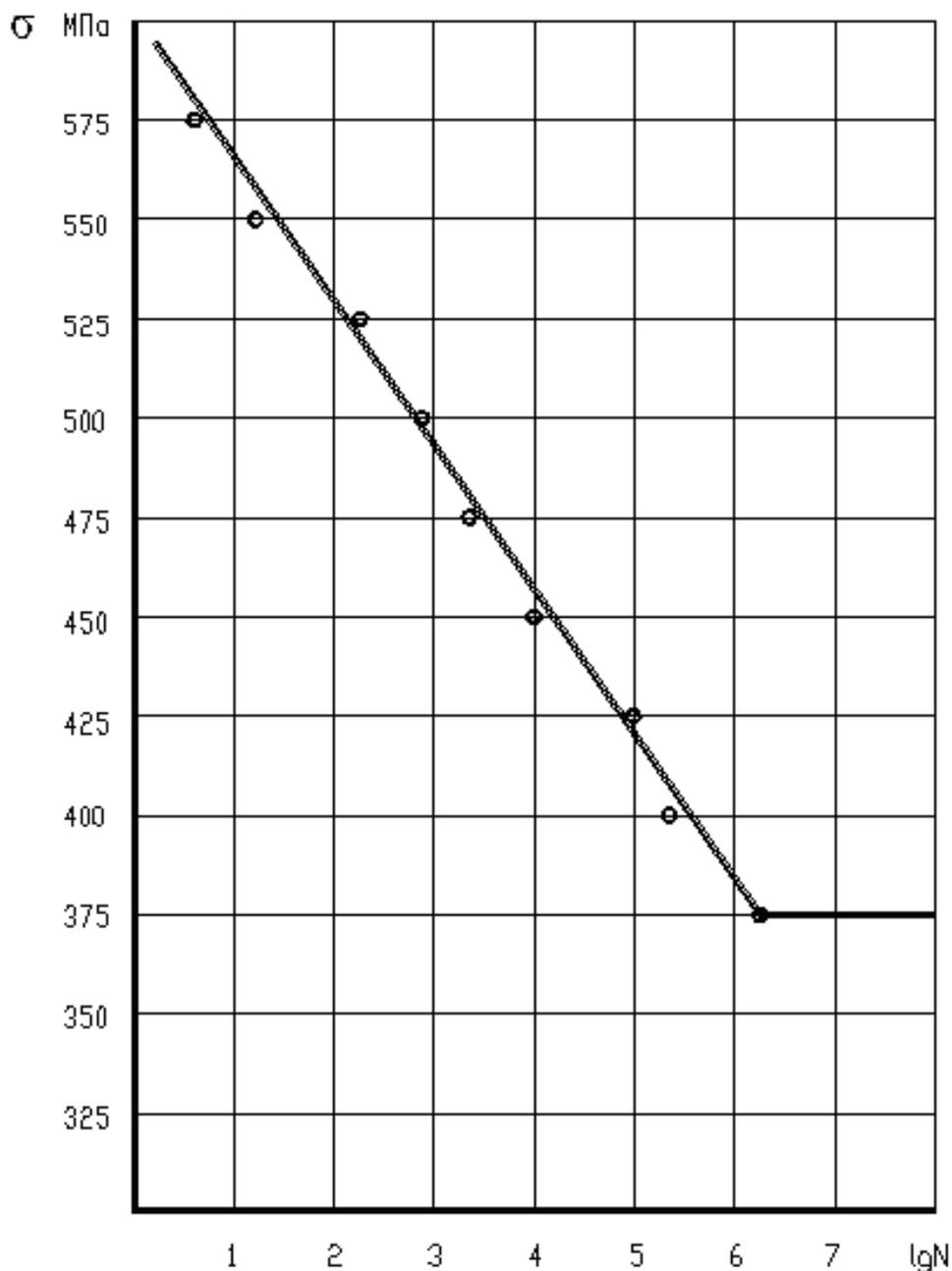


Рисунок 3.9 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 6 кГ/мм² и при сжатии 13 кГ/мм².

По сравнению с давлением нагрева 5 кГ/мм² отмечено снижение предела усталостной прочности до 375 МПа.

Результаты исследований при давлении нагрева 7 кГ/мм² и сжатия 13 кГ/мм² приведены на рисунке 3.10. Показанный результат 375 МПа.

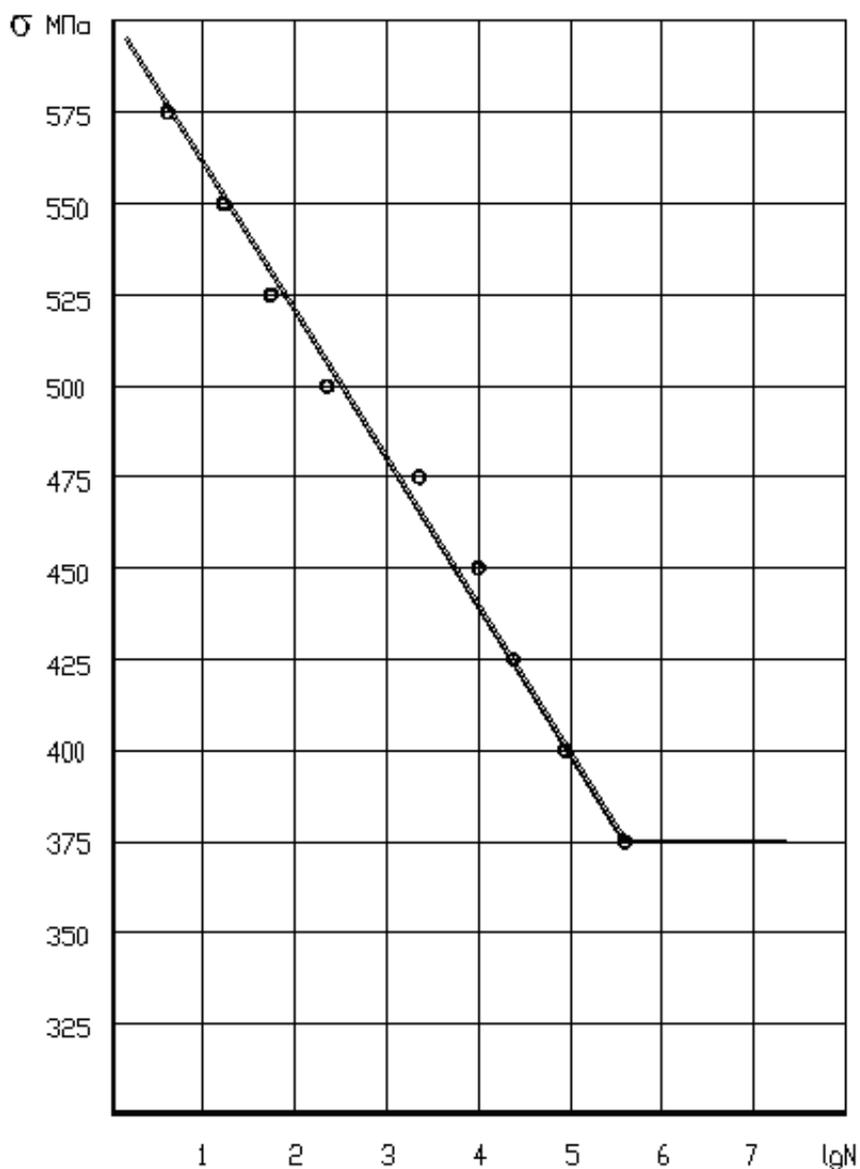


Рисунок 3.10 – Результаты исследований усталостной прочности для давления при нагреве 7 кГ/мм^2 и при сжатии 13 кГ/мм^2 .

По результатам анализа полученных данных можно сделать вывод, что максимальные давления усталостной прочности в исследованных диапазонах режимов сварки труб достигаются при давлении сжатия 13 кГ/мм^2 . Это можно объяснить тем, что чем больше давление сжатия, тем больше в грат будет удалено металла и соответствующих дефектов. Вместе с тем, максимальный результат был получен при сравнительно низком значении давления нагрева. Объяснить данный результат можно тем, что при низких

значениях нагрева выделившееся тепло не распространяется в тело трубы на значительные расстояния, следовательно, зона структурных изменений получается меньше по ширине.

4 Технологические рекомендации предприятиям изготовителям бурильных труб

С учетом результатов проведенных исследований усталостной прочности для производителей бурильных труб могут быть выданы следующие рекомендации.

Существующий на предприятии технологический процесс характеризуется стабильностью и высокими параметрами механических характеристик сварных соединений.

Операции подготовки к сварке обеспечивают должный уровень очистки соединяемых поверхностей от загрязнений и высокую стабильность процесса.

Применяемое оборудование, технологическая линия на базе станка ПСТ-120, рисунок 4.1, обеспечивает высокий уровень механических характеристик.



Рисунок 4.1 – Станок ПСТ-120.

Выполненные исследования влияния режимов сварки на усталостную прочность позволяют рекомендовать производителям труб увеличение примерно на 8% давления сжатия при одновременном уменьшении на 10%

давления нагрева. За счет указанного изменения параметров режима обеспечивается рост усталостной прочности сварного соединения с 350 МПа до 400 МПа.

С учетом сделанных по результатам исследований в разделе 3 настоящей работы выводов можно предположить, что варьируя время нагрева в сторону уменьшения можно добиться дальнейшего уменьшения размера зоны термического влияния. Однако для выдачи конкретных технологических рекомендаций нужны будут дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ эксплуатации труб бурильных выявил их разрушение, особенно при проходке горизонтальных скважин, по сварному шву, соединяющему тело трубы и замок.

В качестве рабочей гипотезы была принята гипотеза усталостного разрушения. Выполненный анализ особенностей усталостного разрушения материалов, позволил сделать вывод, о необходимости минимизации количества дефектов в сварном соединении.

В рамках проверки данной гипотезы исследовали прочность бурильных труб при статическом растяжении и изгибе, а также прочность вырезанных из труб образцов при знакопеременных нагрузках.

Результаты исследований показали, что при статических нагрузках разрушение исследуемых фрагментов сварных труб происходит по основному металлу.

Выполненные исследования прочности образцов, вырезанных из сварных швов, показали на необходимость коррекции применяемых в настоящее время на предприятиях изготовителях режимов получения сварных соединений. Требуется незначительное, 10% уменьшение давления нагрева, и увеличение около 8% давления сжатия. Коррекция режимов в указанном направлении обеспечивает увеличение усталостной прочности 10-12%.

Таким образом, можно сделать вывод, что цель работы, повышение качества сварных соединений бурильной трубы и замка, достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н.Степнов. М. : Машиностроение, 1985.- 231 с.
2. Тихонов, А. Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А. Н. Тихонов, М. В. Уфимцев. М. : Изд-во МГУ, 1988. - 174 с.
3. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.
4. Алешин, Н.П. Контроль качества сварочных работ / Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский В.Г. - М.: Высшая школа, 1986. - 167 с.
5. Ушаков, А.С. О производстве стальных труб / А.С. Ушаков, Л.А. Кондратов // Сталь. 2018. № 7. - С. 33-43.
6. Кершенбаум, В.Я. Проблематика импортозамещения с позиций конкурентоспособности оборудования нефтегазового комплекса / В.Я. Кершенбаум, Т.А. Гусева, А.С. Пантелеев. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2018. - №2. – С. 8-16.
7. Кершенбаум, В.Я., Гусева Т.А. Корпоративные системы стандартизации и сертификации при совершенствовании поставок оборудования для нефтегазового комплекса / В.Я. Кершенбаум, Т.А. Гусева // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса . – 2016. - №3. – С. 4-8.
8. Матвеев, Ю.М. Теоретические основы производства сварных труб / Ю.М. Матвеев. - М.: Металлургия, 1967. - 169 с.
9. Негода, Е.Н. Оценка выносливости сварных конструкций при многоцикловом нагружении / Е. Н. Негода, А. А. Дзюба // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – №2. – С. 18–31.
10. Щербинский, В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. - М.: изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. - 496 с.
11. Троицкий, В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений / В.А. Троицкий. ИЭС им. Е.О. Патона НАЛ Украины. - 1997. - 224 с.

12. Рудзей, Г. Ф. Особенности статистической обработки результатов усталостных испытаний / Г. Ф. Рудзей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. - Т. 70, №1. - С. 66-70.
13. Кершенбаум, В.Я. Из импортозависимости – в конкурентоспособность. Реалии и мифы / В.Я. Кершенбаум. М.: «Национальный институт нефти и газа». 2017. 400 с.
14. Воробьев, А.З. Сопротивление усталости элементов конструкций / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебеньев, Т. С. Родченко. М. : Машиностроение, 1990. - 237 с.
15. Быков, И.Ю. Особенности определения толщины стенки труб нефтегазового сортамента / И.Ю. Быков, С.В. Петров, А.С. Кузьбожев, С.А. Шкулов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море – 2009. – № 9. – С. 15-20.
16. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбулл. М. : Машиностроение, 1964. - 276 с.
17. Иванова, В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. - М. : Metallurgy, 1975. -451 с.
18. Трощенко, В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. Киев : Наукова Думка, 1981. - 344 с.
19. Серенсен, С. В. Усталость материалов и элементов конструкций / С. В. Серенсен. 1985.-256 с.
20. Болотин, В. В. Механика усталостного разрушения / В. В. Болотин // Машинovedение. 1988. - № 5. - С. 21-27.
21. Ботвина, Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л. Р. Ботвина. М. : Наука, 1989. - 229 с.
22. Терентьев, В. Ф. Усталость металлических материалов / В. Ф. Терентьев. - М. : Наука, 2002. 248 с.
23. Болотин, В. В. Устойчивость и рост усталостных трещин / В. В. Болотин // Механика твердого тела. 1988. - № 4. - С. 133-140.

24. Болотин, В. В. Прогнозирование роста трещин усталости с учетом факторов окружающей среды / В. В. Болотин, А. А. Шипков // Прикладная математика и механика. 2001. - Т. 65, № 6. - С. 1033-1034.
25. Martinez-Esnaolo, J. M. Modelling fatigue propagation of surface cracks / J. M. Martinez-Esnaolo // Int. J. Fract. 2001. - V. 109, № 3. - P. L17-L22.
26. Shipilov, S. A. Mechanisms for corrosion fatigue crack propagation / S. A. Shipilov // Fatigue and Fract. Eng. Mater, and Struct. 2002. - V. 25, № 3. - P. 243-259.
27. Трощенко, В. Т. Некоторые особенности роста усталостных трещин на различных стадиях их развития / В. Т. Трощенко // Проблемы прочности. - 2003.-№ 6.-С. 5-29.
28. Дегтярев, В. А. Оценка эффективности методов повышения сопротивления усталости сварных соединений при ударном нагружении в условиях низкой температуры / В. А. Дегтярев, Б. С. Шульгинов // Проблемы прочности. - 2000.-№6.-С. 115-123.
29. Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей и др. М. : Машиностроение, 1973. - 216 с.
30. Бережницкая, М. Н. Повышение долговечности конструкционных сталей и их сварных соединений с помощью пластического деформирования / М. Н. Бережницкая, Г. П. Гусякова, В. И. Ткачев // Физ. хим. мех. материалов. - 2000.-№3.-С. 121-122.
31. Torres, V. F. S. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel / V. F. S Torres, H. J. C. Voorwald // Int. J. Fatigue. 2002. - V. 24, № 8. - P. 877-886.
32. Труфяков, В.И. Аналитическое описание закономерностей распространения усталостных трещин с учетом остаточных сварочных напряжений / В. И. Труфяков, В. В. Кныш, П. П. Михеев, А. З. Кузьменко // Автоматическая сварка. 1983. - № 6.-С. 1-4.

33. Itoh, Y. Z. Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field / Y. Z Itoh and oth. // Engineering Fracture Mechanics. 1989. - V. 33, №. 3. -P. 397-407.
34. Фридман, Я. Б. Строение и анализ изломов металлов / Я. Б. Фридман, Т. А. Гордеева, А. М. Зайцев. - М. : «Машгиз», 1960. - 128 с.
35. Ботвина, Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л. Р. Ботвина. М. : Наука, 1989. - 229 с.
36. Заляев М.Ф. Исследование вибрации при бурении скважин на Термокарстовом газоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. 2015. № 4. С. 36-40.
37. Бадретдинов Т.В., Ямалиев В.У. Анализ колебаний бурильной колонны и применения демпфирующих устройств // Нефтегазовое дело. 2016. № 6. С. 5-22.
38. Заляев, М.Ф. О необходимости учета вибрации при конструировании элементов бурильной колонны / М.Ф. Заляев, В.У. Ямалиев, Е.М. Абуталипова, А.Н. Авренюк // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 9. С. 45-48.
39. Балицкий, П.В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины / П.В. Балицкий. М.: Недра, 1975. 293 с.
40. Молоканов Д.Р. Вопросы и способы снижения сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин / Д.Р. Молоканов, Г.В. Буслаев // Инженер-нефтяник. - 2008. - № 3. - С. 16-17.
41. Калинин, А.Г. Бурение наклонных скважин / А.Г. Калинин, Н.А. Григорян, Б.З. Султанов. - М.: Недра. – 1990. – 348 с.
42. Буслаев, В.Ф. Снижение сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин за счет протяженности ствола / В.Ф. Буслаев, Д.Р. Молоканов // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. - 2008. - № 2. - С. 26-29.
43. Миллер, К.Ж. Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее / К.Ж. Миллер // Заводская лаборатория. – 1994. – № 3. – 544 с.

44. Уляшева, Н.М. К вопросу регулирования реологических свойств буровых растворов в скважинах сложного пространственного профиля / Н.М.Уляшева, В.В. Дуркин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2003. – №2. – С.35-38.
45. Басарыгин, Ю.М. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. / Ю.М. Басарыгин, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. – М.: Недра. – 2001. – 675 с.
46. Доможиров, Л.И. Обобщенное уравнение для оценки влияния трещин на предел выносливости материалов / Л.И. Доможиров // Заводская лаборатория, 1995. – № 10. – С. 27-31.
47. Федоров, А.Ф. Метод оптимизации параметров компоновок для стабилизации зенитного угла наклонных скважин/ / А.Ф. Фёдоров, К.М. Солодкий, А.Г. Калинин, А.С. Повалихин // Нефтяное хозяйство. – 1982. - № 11. – С.35-39.
48. Сушон, Л.Я. Управление искривлением наклонных скважин в Западной Сибири / Л.Я. Сушон, П.В. Емельянов, Р.Т. Муллагалиев. – М.: Недра. – 1988. – 124с.
49. Булатов, А. И. Бурение горизонтальных скважин / А. И. Булатов, Е. Ю. Проселков, Ю. М. Проселков. – Краснодар: Совет. Кубань. – 2008. – 424 с.
50. Султанов, Б.З. Влияние геологических условий на отклонение скважины / Б.З. Султанов, Г.В. Шандалов // Изв. Вузов. Геология и разведка. - 1961. – №3. – С. 107-110.
51. Солодкий, К.М. Принцип выбора стабилизирующих компоновок с заданными оптимальными размерами / К.М. Солодкий, А.Ф. Фёдоров, А.С. Повалихин, А.Г. Калинин, В.П. Шагалов // Нефтяное хозяйство. – 1984. – № 9. – С.29-33.
52. Повалихин, А.С. Оптимизация профиля наклонной скважины / А.С. Повалихин, А.С. Оганов, К.М. Солодкий // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1994. – №№ 6-7.

53. Миллхейм, К.К. Влияние компоновки низа бурильной колонны на отклонение долота / К.К. Миллхейм, М.С. Апостол // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. -1981. - №5. –С. 52-59.
54. Ганджумян, Р.А., Инженерные расчёты при бурении глубоких скважин / Р.А. Ганджумян, А.Г. Калинин, Б.А. Никитин. – М.: Недра. – 2000. – 489 С.
55. Линд, Ю. Б. Современные информационные технологии в проектировании строительства скважин / Ю. Б. Линд, А. Р. Кабирова, Г. Г. Елкибаева и другие // Научно-технический журнал «Нефть и газ». – 2013. – № 5 – С. 37-42
56. Bradley, W. B. Bottom-hole assemblies – key to control of deviation / W. B. Bradley //Oil and gas journal. -1975. –Vol.73. -№29. –pp.60-66.
57. Абдуллин, И. Г. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности / И.Г. Абдуллин, А. Г. Гареев, А. В. Мостовой. – Уфа : «Гилем», 1997. – 177 с.
58. Трощенко, В.Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Трощенко, А. А. Лебедев, В. А. Стрижало [и др.]. – Киев : «Логос», 2000. – 571 с.
59. Негода, Е. Н. Основы методики расчетной оценки многоциклового выносливости сварных конструкций / Е. Н. Негода, А.А. Дзюба, Е.А. Щербаков // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – №2. – С. 6–17.