

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
(направленность (профиль)/специализация)

оборудования

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование автоматических способов наплавки замковых
соединений бурильных труб

Студент

И.Н. Гайнетдинов
(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент К.В. Моторин
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ состояния вопроса	7
1.1 Состав буровой установки	7
1.2 Сварка тела трубы и замка	17
1.3 Анализ возможных способов автоматической наплавки.....	21
1.4 Анализ возможных вариантов присадочных материалов.....	33
1.5 Задачи работы	38
2 Методика исследований	40
2.1 Нанесение слоя для проведения исследований.....	40
2.2 Изготовление образцов для проведения исследований	45
2.3 Исследования твердости получаемых слоев	47
2.4 Исследования износостойкости получаемых слоев	49
2.5 Статистическая обработка результатов исследований	53
3 Результаты исследований	55
3.1 Результаты исследований геометрии получаемых сварных соединений	55
3.2 Результаты исследований твердости.....	58
3.3 Результаты исследования износостойкости наплавленных слоев	64
4 Технологические рекомендации по наплавке муфт.....	68
Заключение	70
Список используемой литературы и используемых источников.....	72

Введение

Для экономики России очень важны финансовые поступления от продажи на мировом рынке жидких или газообразных углеводородов, нефти и газа. Также без нефти и газа немыслима работа некоторых предприятий и целых отраслей промышленности в России. Перечисленное требует извлечения из недр указанных полезных ископаемых и транспортировки их к потребителю (или покупателю).

Поскольку содержащие жидкие или газообразные углеводородные пласты располагаются глубоко под землей, добраться до них можно только пробурив скважину. При этом задействован целый комплекс оборудования. Основу составляет буровая вышка, буровая лебедка, талевая система. Все перечисленное относится к исполнительным органам. Обеспечивает работу исполнительных органов силовая часть буровой установки – источники электричества, пневмосистема, гидросистема, механизмы подачи бурового раствора [50, 53].

Непосредственно саму скважину прокладывает бурильная колонна. На конце бурильной колонны закреплен буровой инструмент. Сама по себе бурильная колонна характеризуется большой протяженностью и малыми размерами в поперечном сечении. Так сверхглубокая скважина, пробуренная на Кольском полуострове, достигает глубины от поверхности свыше 12000 м. Однако если рассматривать длину непосредственно скважины, то скважины пробуренные под углом к поверхности земли, достигают длины 15000 м. При этом диаметр бурильной колонны не достигает и полуметра. Состоит бурильная колонна из бурильных труб, соединяемых друг с другом посредством т.н. бурильных замков [12].

Бурильная колонна работает в условиях механического истирания из-за контакта со стенками скважины. Даже если бурение ведется в рыхлых осадочных породах, их основу составляют пески, щебни, твердые сами по себе. Кроме того, при больших длинах бурильной колонны ее собственный вес

может достигать значительных величин. Так уже упомянутая здесь Кольская сверхглубокая скважина до глубины 12000 м выполнялась стальными бурильными трубами, для достижения больших глубин применяли трубы из легких алюминиевых сплавов. Стальные разрушились бы под собственным весом.

Перечисленные факторы механического воздействия на бурильные трубы ведут к их ускоренному разрушению. Наиболее энергично разрушаются замки бурильные. Их диаметр превосходит диаметр непосредственно тела трубы, значит истирающее воздействие породы на них достигает больших значений [13, 14].

Проблема восстановления замков бурильных решается, преимущественно, дуговой наплавкой. Из всего многообразия методов восстановления именно дуговая наплавка обеспечивает наилучшее сцепление нового слоя к поверхности замка трубы.

Вместе с тем, геометрические параметры замка и химический состав материала замка накладывают ограничения и на способы дуговой наплавки. Так в работе [62] показано, что вместо наплавки под слоем флюса лучше применить наплавку в среде защитных газов. Разработан технологический процесс наплавки изношенных муфт проволокой Нп-30ХГСА. Вместе с тем, известно множество способов наплавки, обеспечивающих получение слоев с высокой износостойкостью.

Исходя из вышеизложенного можно поставить цель настоящей работы – повышение качества восстановленных муфт труб бурильных путем подбора способа наплавки.

Чтобы достичь поставленной цели, в работе были решены следующие задачи:

– аналитический подбор наплавочного материала, обеспечивающего необходимые значения твердости наплавленного слоя и обладающего удовлетворительными характеристиками при механической обработке;

– разработка методики выполнения экспериментальных исследований;

– проведение экспериментальных исследований свойств покрытий, получаемых наплавкой выбранным материалом;

– обработка результатов экспериментальных исследований и оценка их результатов;

– на основании анализа полученной при проведении экспериментальных исследований информации сформулировать необходимые рекомендации и довести их до сведения предприятий и организаций, занимающихся проблемами восстановления бурильных труб.

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

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

Предмет исследования – технологические решения для увеличения продолжительности эксплуатации труб бурильных.

Объект исследования – применяемое для восстановления наплавкой муфт труб бурильных оборудование и технологические приемы.

Теоретической, методологической и информационной базой исследования послужили:

– государственные и отраслевые стандарты, нормативная база применяемая на предприятиях, занимающихся бурением скважин;

– опубликованные работы российских и зарубежных ученых и инженеров в области сварки, наплавки и контроля;

– сведения по проблеме исследования, полученные из глобальных компьютерных сетей.

В ходе исследования использовались специальные и общенаучные методы исследования. В качестве специальных при написании работы применялись аналитические и логические методы. Выполнялся анализ литературных источников по теме исследования, анализ полученных при экспериментальных исследованиях результаты. Методы логики применялись для получения выводов из результатов экспериментальных исследований. В

качестве общенаучных методов при написании работы применялись методы наблюдения за объектом во время проведения экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследовано действие химического состава наплавочного материала на механические свойства и эксплуатационные характеристики получаемых при наплавке на изношенную поверхность муфт труб бурильных покрытий.

Практическая значимость исследования заключается в том, что рекомендации сформулированные по результатам выполнения работы направлены на конкретное внедрение в практику восстановления наплавкой для предприятия “Ульяновскнефть”.

1 Анализ состояния вопроса

1.1 Состав буровой установки

В составе буровой установки входит, рисунок 1, колонна бурильная обеспечивает вращение бурильного долота и передачу требуемого усилия. Посредством бурильной колонны на долото воздействует осевая сила и обеспечивается его вращение. Кроме того, внутри труб бурильных в зону взаимодействия долота и горной породы подаются растворы для очистки ствола от измельченной породы.

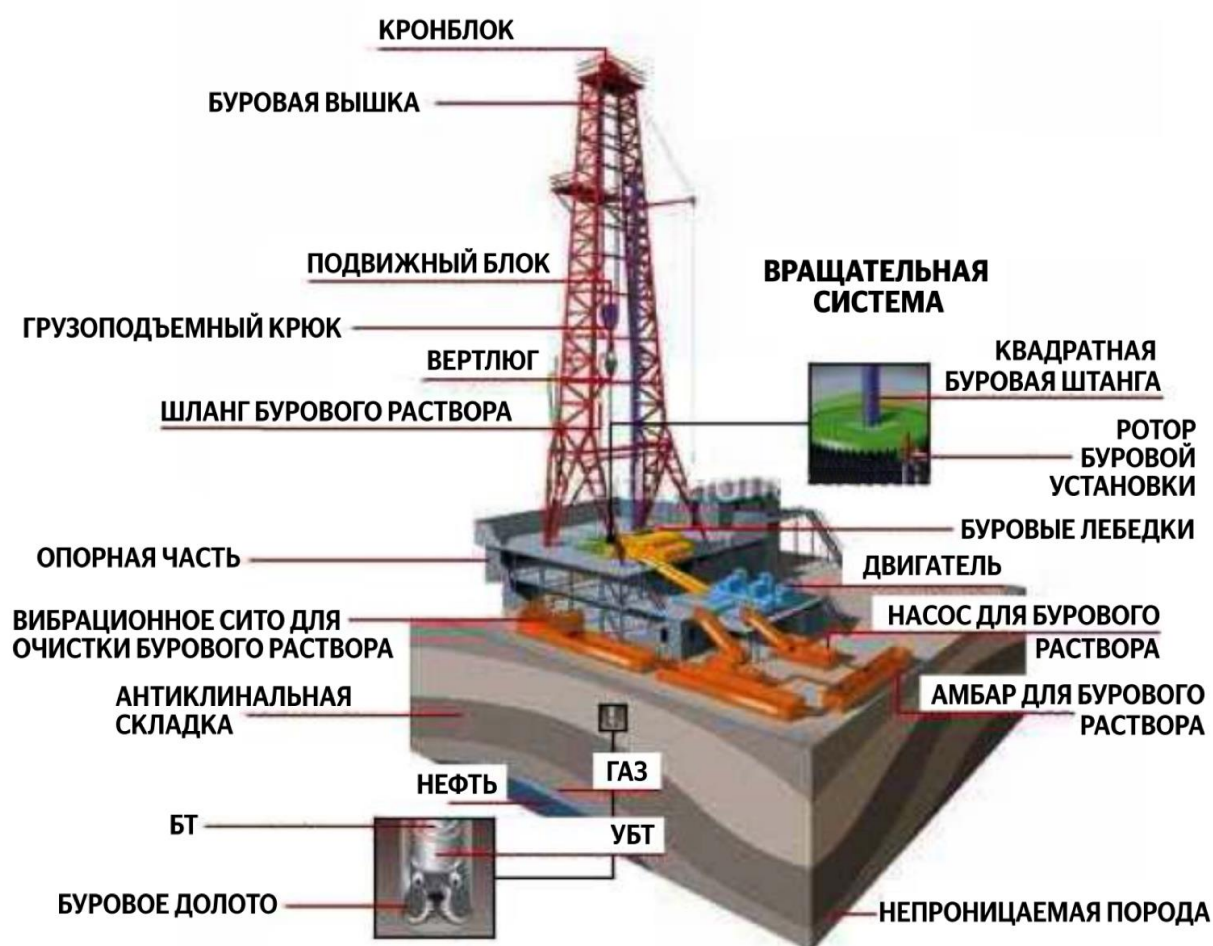


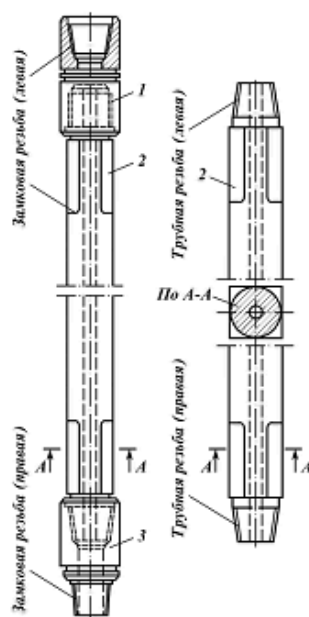
Рисунок 1 – Буровая установка

Конструктивно, бурильная колонна выполнена из бурильных труб, соединенных между собой посредством резьбовых соединений.

В состав бурильной колонны включены т.н. рабочие (ведущие) трубы, рисунок 2, и утяжеленные, рисунок 3.

Поперечное сечение рабочих труб преимущественно квадратной формы [1, 2, 4, 6]. Рабочие трубы 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.



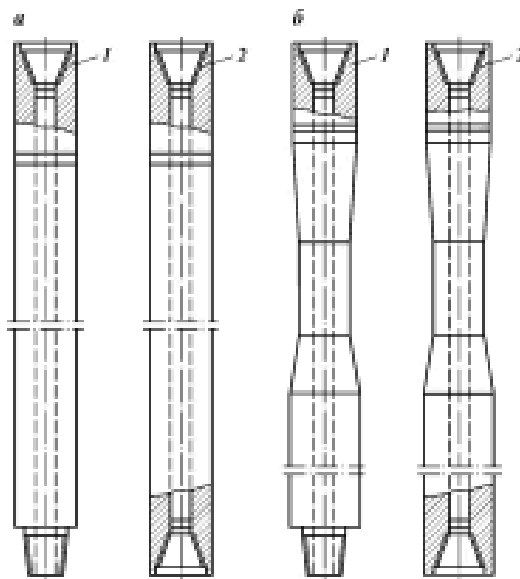
1 – верхний переводник; 2 – рабочая ведущая труба; 3 – нижний переводник с блокирующим пояском

Рисунок 2 – Рабочая ведущая бурильная труба

В состав бурильной колонны входят трубы с концами:

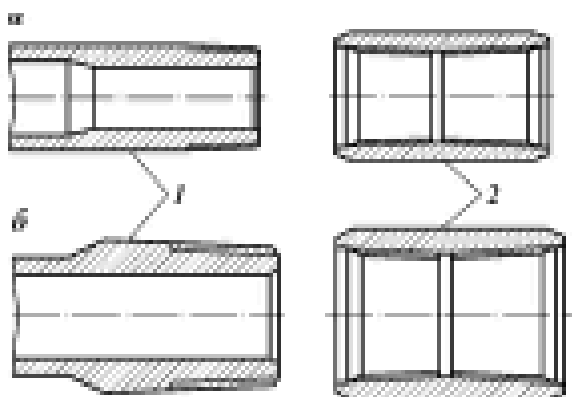
– высаженными внутрь, рисунок 4, а;

- высаженными наружу, рисунок 4, б;
- приваренными концами, рисунок 5.



а – с одинаковым диаметром; б – с проточным телом;
1 – тело трубы; 2 – замковая резьба

Рисунок 3 – Утяжеленные бурильные трубы



а – концы трубы высажены внутрь; б – с высаженными наружу концами;
1 – труба; 2 – муфта

Рисунок 4 – Бурильные трубы

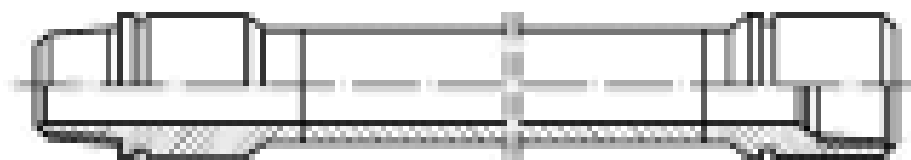
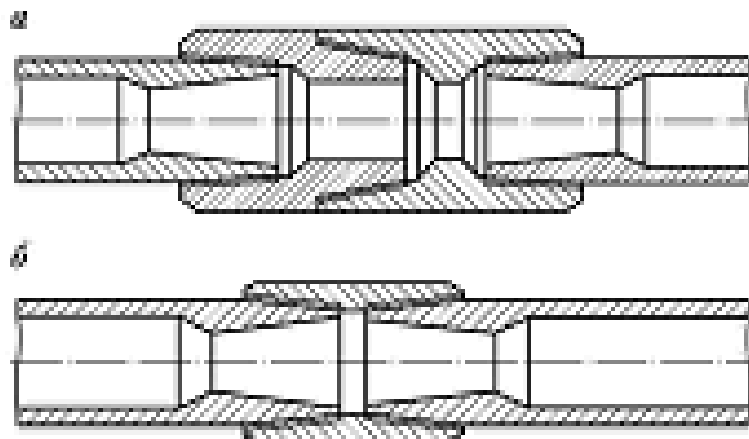


Рисунок 5 – Бурильная труба с приваренными соединительными концами



а – при помощи замков; б – при помощи муфт

Рисунок 6 – Соединение бурильных труб с высаженными концами

На трубах первых двух конструктивных исполнений выполнена мелкая трубная резьба и соединяются они вместе бурильными замками или муфтами, см. рисунок 5. У труб второй конструкции, по сравнению с трубами первой конструкции, улучшенная гидравлическая характеристика, потому что в них равнопроходной канал, а значит, минимизированы местные гидравлические сопротивления потоку промывочной жидкости.

Если соединительные концы бурильных труб к телу самой трубы крепятся сваркой, внутренний канал получается одинакового по всей длине поперечного сечения. Взаимное соединение труб в данной ситуации осуществляют крупной замковой резьбой [51, 52].

У бурильных труб с блокирующим пояском крепление реализуется по-другому. Возле резьбы выполнена проточка по телу, на которую в горячем состоянии наворачивают часть замка с внутренней проточкой, поэтому, после

остывания, получается герметичный напряженный контакт между замком и трубой.

Диаметр выпускаемых промышленностью бурильных труб колеблется в пределах от 60 до 168 мм и длина труб составляет 6; 8; 11,5; 12,0 м. Материал бурильных труб – сталь групп прочности С, Д, Е, К, L, М.

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.

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, превышающей в 2-3 раза толщину стенки обычных труб.

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

В настоящее время на рынок России внедряются зарубежные производители труб бурильных. Сравним Российские и зарубежные стандарты на трубы [3, 8]. Анализ таблицы 1, показывает, что классификация труб в Российских и зарубежных стандартах практически идентична: это трубы с

внутренней (ПВ, IU), наружной (ПН, EU) и с комбинированной высадкой (ПК, IEU). Но геометрические характеристики бурильных труб отличаются.

Таблица 1 – Геометрические характеристики бурильных труб

Типоразмеры (диаметр, мм x толщина стенки, мм)			
Вид трубы	ISO 11961, API SPEC 5DP	ГОСТ 32696-2014	ГОСТ Р 50278-92
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	-

В стандартах ISO 11961, API SPEC 5DP у труб с внутренней высадкой введен размер 60,32x7,11 и 88,90x6,45, в стандартах ГОСТ 32696-2014 и ГОСТ Р 50278-92 отсутствующий. В остальном показатели геометрических

характеристик в отечественных и зарубежных стандартах совпадают. За исключением 114,30x6,88, отсутствующего в стандарте ГОСТ Р 50278-92 [17, 18].

В стандартах ISO 11961, API SPEC 5DP у труб с наружной высадкой размерный ряд не столь представительен, как в российских стандартах. ГОСТ 32696-2014 и ГОСТ Р 50278-92 предусматривают диаметры 60,32 мм, 73,02 мм и 88,90 мм. Дополнительно в ГОСТ Р 50278-92 предусмотрен размер 127,0 мм. Однако в ГОСТ 32696 и ГОСТ Р 50278 есть разночтения по геометрическим характеристикам труб.

3. Трубы с комбинированной высадкой, ПК (IEU), в отечественных стандартах также представлены большим количеством типоразмеров.

Таким образом, по таблице 1.1. можно сделать вывод, что в отечественных стандартах для труб с наружной и комбинированной высадкой предусмотрено большее количество типоразмеров, чем в зарубежных. Трубы с внутренней высадкой согласно отечественных и зарубежных стандартов выпускаются практически идентичными.

Длина труб, согласно, отечественных и зарубежных стандартов идентична. Но, в ГОСТ Р 50278-92 есть принципиальное отличие как от зарубежных стандартов, так и ГОСТ 32696-2014. В ГОСТ Р 50278-92 длина трубы определяется как расстояние между упорным уступом ниппеля и упорным торцом муфты. В зарубежных стандартах и ГОСТ 32696-2014 длина труб определяется как расстояние между ее торцами [17].

Однако все рассмотренные стандарты предусматривают 3 группы длин бурильных труб, рисунок 7.

Основой классификации труб по механическим характеристикам являются показатели предела прочности и предела текучести при испытаниях на растяжение [17].

Классификация по механическим характеристикам показана в таблице 2. Также испытания на растяжение обеспечивают получение такого показателя, как удлинение тела трубы, таблица 3.

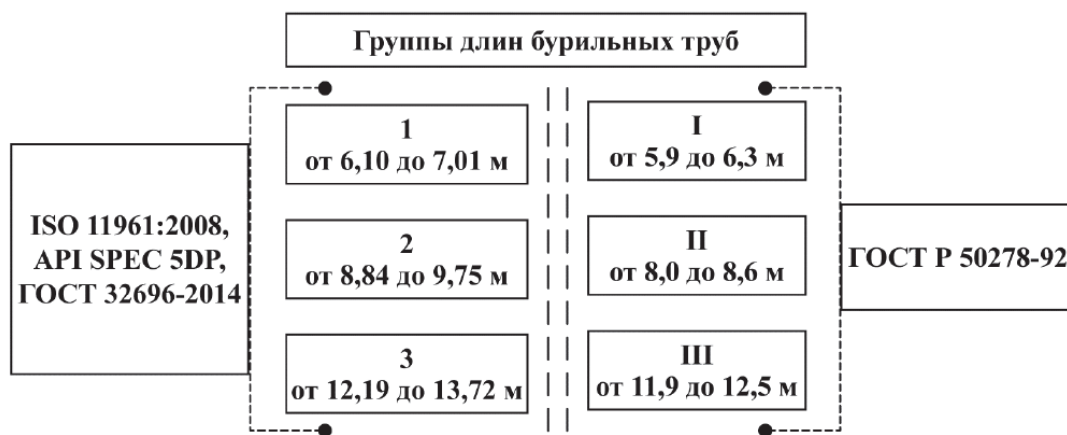


Рисунок 7 – Классификация бурильных труб по группам длин

Таблица 2 – Группы прочности бурильных труб

Стандарты	Обозначение группы прочности	Предел текучести, МПа		Временное сопротивление, МПа
		min	max	min
ГОСТ 32696-2014, ГОСТ P 50278-92	D ГОСТ 32696-2014 Д ГОСТ P 50278-92	379	-	655
ISO 11961 API SPEC 5DP, ГОСТ 32696-2014, ГОСТ P 50278-92	E (API, ISO), E (ГОСТ 32696-2014)	517	724	689
	X (API, ISO, ГОСТ 32696-2014), Л (ГОСТ P 50278-92)	655	862	724
	G (API, ISO, ГОСТ 32696-2014), M (ГОСТ P 50278-92)	724	931	792-793
	S (API, ISO, ГОСТ 32696-2014), P (ГОСТ P 50278-92)	930-931	1138	999
ГОСТ P 50278-92	T (ГОСТ P 50278-92)	1035	1241	1104
	У (ГОСТ P 50278-92)	1170	1379	1241

В ГОСТ 32696-2014 для обозначения групп прочности используются буквы латинского алфавита, в ГОСТ P 50278-92 – русского алфавита. Но по

численными значениями предела прочности и предела текучести группы D÷S и D÷P совпадают. Однако стандарт ГОСТ Р 50278-92 по сравнению со стандартами ISO 11961, API SPEC 5DP включает в себя группу прочности D, а также группы T и Y производство которых планируется в будущем.

Таблица 3 – Удлинение тела труб в зависимости от групп прочности

Обозначение группы прочности	Относительное удлинение расчетной длины образца, не менее, %		
	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
Y	-	-	10,5

Если рассматривать маркировку, то зарубежные и каждый из российских стандартов устанавливают различные требования к ее способам нанесения и обозначению, таблица 4. Зарубежные стандарты предусматривают нанесение маркировки краской [52]. Согласно российским стандартам трубы можно маркировать и клеймением и краской.

В целом анализ показывает, что российские стандарты учитывают и международную и российскую практику.

Таблица 4 – Маркировка бурильных труб

ISO 11961, API SPEC 5DP	ГОСТ 32696-2014		ГОСТ Р 50278-92	
Маркировка				
Краской	Клеймением	Краской	Клеймение м	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	- 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

1.2 Сварка тела трубы и замка

Резьбовые концы соединены с трубой сваркой трением [54]. 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.

Основные режимы при соединении деталей сваркой трением:

- частота вращения деталей - n , об/мин (c^{-1});
- давление нагрева - P_n , МПа;
- давление проковки - $P_{пр}$, МПа;
- время нагрева - t_n , с;
- время проковки - $t_{пр}$, с.

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.

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]:

- необходимость мощных захватов, которые должны надежно фиксировать свариваемые заготовки;
- оборудование является узкоспециализированным;
- оборудование имеет громоздкие габариты и значительный вес.

Привариваемые к телу трубы замки изготавливают согласно ГОСТ 27834-95 из стали 40ХМФА. Материал тела трубы сталь 35Г2, группа прочности согласно приведенной в таблице.

Рассмотрим свариваемость этих сталей. Анализ свариваемости сталей позволит оценить возможность выбора иного способа соединения, обеспечивающего устранение выявленных недостатков.

Основой применяемых на практике методов оценки свариваемости является анализ содержания химических элементов в соединяемом металле.

Для стали 40ХМФА содержание химических элементов приведено в таблице 5. Для стали 35Г2 в таблице 6.

Таблица 5 – Содержание химических элементов в стали 40ХМФА

С, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	V, %	S, %	P, %
0,37-0,44	0,17-0,37	0,4-0,7	0,8-1,1	≤0,3	0,2-0,3	0,1-0,18	≤ 0,025	≤ 0,03

Таблица 6 – Содержание химических элементов в стали 35Г2

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	S, %	P, %
0,31- 0,39	0,17- 0,37	1,4-1,8	≤0,3	≤0,3	≤0,3	≤ 0,035	≤ 0,035

В разработке математических моделей эквивалента углерода существуют два подхода.

Первый учитывает отдельное влияние каждого из элементов, входящих в состав стали:

$$C_{\text{Э}} = C + \frac{Mn}{kMn} + \frac{Cr}{kCr} + \frac{Si}{kSi} + \frac{Ni}{kNi} + \frac{Mo}{kMo} + \frac{Cu}{kCu} + \frac{V}{kV} + \frac{P}{kP}, \quad (1)$$

где C, Mn, Cr, Si, Ni, Mo, Cu, V, P — массовые доли химических элементов; kMn, kCr, kSi, kNi, kMo, kCu, kV, kP — коэффициенты влияния упомянутых химических элементов на Сэкв.

Второй подход учитывает совместное влияние некоторых элементов:

$$C_{\text{Э}} = C + 0,155(Cr + Mo) + 0,14(Mn + V) + 0,11Si + 0,045(Ni + Cu),$$

Существующие расчетные зависимости позволяют применительно к сталям рассчитать т.н. эквивалент углерода, и по его значениям определить, насколько успешно можно получить соединение сваркой.

В настоящее время насчитывается более десятка моделей расчета Сэкв. Каждый исследователь применяет их по своему усмотрению. Однако, с нашей точки зрения, надо придерживаться руководящих материалов.

Например, для применяемых в нашем случае низкоуглеродистых и низколегированных сталей указанный расчет можно выполнить по формуле согласно ГОСТ 27772-2015:

$$C_{\text{Э}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2}, \quad (2)$$

После расчетов идет сравнение полученных значений показателя эквивалента:

– если полученное значение показателя эквивалента углерода не более 0,2, то сталь относится к группе хорошо свариваемых;

– если полученное значение показателя эквивалента углерода лежит в пределах 0,2...0,35, то сталь относится к группе удовлетворительно свариваемых;

– если полученное значение показателя эквивалента углерода лежит в пределах 0,35...0,45, то сталь относится к группе ограниченно свариваемых;

– если полученное значение показателя эквивалента углерода превышает 0,45, то сталь относится к группе трудносвариваемых.

В Европе применяют для определения значений величины углеродного эквивалента зависимость:

$$C_{\text{Э}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (3)$$

Стандарты Японии предусматривают расчет по следующей зависимости:

$$C_{\text{Э}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14}, \quad (4)$$

Британский институт сварки предлагает для расчетов зависимость:

$$C_{\text{Э}} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr + Mo + V}{10} + \frac{Ni}{15}, \quad (5)$$

Хорошо свариваемые стали при получении соединения не требуют подогрева до сварки и во время сварки. Также данные стали не требуют проведения термообработки после сварки.

Рассмотрим сталь 35Г2. Содержание углерода в данной стали находится в пределах 0,31-0,39%, марганца в пределах 1,4-1,8%, кремния в пределах 0,17-0,37%. Перечисленные элементы оказывают определяющее влияние на свойства данной стали.

Расчеты показывают, что для стали 35Г2 величина углеродного эквивалента превышает 0,69%. Следовательно, данная сталь относится к трудносвариваемым.

Расчеты показывают, что для стали 40ХМФА полученное значение показателя эквивалента углерода лежит в пределах 0,35...0,45. Следовательно, данная сталь относится к группе ограниченно свариваемых.

1.3 Анализ возможных способов автоматической наплавки

Ученые работают над продлением срока службы замковых соединений бурильных труб по множеству направлений. Например, в статье [19] исследуется перенос осевой нагрузки вдоль бурильных колонн в наклонных скважинах путем разработки модели конечных элементов, основанной на теории пучка Эйлера и алгоритмах контактного увеличения лагранжевых контактов. Модель может имитировать все бурильные колонны, показывая нелинейную модель контакта между бурильными колоннами и обсадной колонной. Особое внимание уделяется потере осевой нагрузки, распределению силы контакта поверхности трубы и деформации тонкой трубы. Эффективность предложенной модели подтверждена экспериментально с использованием процедуры высвобождения пакера. Для оценки эффективности передачи осевой нагрузки рассматриваются различные факторы бурильной колонны, такие как угол отклонения, серьезность изгиба, величина нагрузки на крюк и конфигурации потери устойчивости. Наш анализ показывает, что тяжесть изгиба имеет существенное влияние на передачу, а спиральная деформация бурильных колонн из-за чрезмерной нагрузки может ухудшить ситуацию. Это исследование обеспечивает теоретическое понимание изменения контактного усилия и передачи осевой нагрузки для бурильных колонн в наклонных скважинах. Он может быть использован для лучшего понимания рабочего состояния скважинного и направляющего бурения.

Статья [33, 45] посвящена проблемам бурения наклонных скважин. Цель отклоненного бурения скважины состоит в том, чтобы удерживать скважину в пласте на большом расстоянии и максимизировать ее продуктивность. Одной из основных проблем бурения наклонных скважин является управление механическими нагрузками на бурильные колонны, а именно так называемая передача осевой нагрузки. На этапе разработки скважины эффективный вес на долоте (WOB) имеет большое значение для поддержания скорости бурения. Для этого необходимо оптимизировать осевые нагрузки на бурильные колонны и траекторию скважины. Но в процессе бурения наклонных скважин чрезмерное сопротивление снижает эффективность передачи осевой нагрузки. Здесь сопротивление – это дополнительная сила, необходимая для подъема или опускания бурильных колонн. При этом максимально воздействие на муфты бурильной колонны со стороны породы, как было указано выше. А значит, максимален износ муфт. Большое сопротивление проблематично в наклонных скважинах из-за увеличенной горизонтальной длины скважины, особенно для менее толстых и жестких бурильных колонн. Итак, эта проблема привлекла большое внимание в последние несколько лет.

Для повышения эффективности передачи осевой нагрузки была проведена большая часть теоретических и экспериментальных работ, посвященных силе сопротивления бурильных колонн. В традиционном подходе бурильные колонны рассматривались как натянутый кабель, так называемая модель мягких колонн, которая может быть математически выражена. Где F_n и F_t – величины приращения нормальной силы и натяжения соответственно.

В настоящей работе изучена конечно-элементная модель бурильных колонн, взаимодействующих со скважиной, которая учитывает фактическую траекторию скважины во время процедуры высвобождения пакера с использованием ANSYS / APDL.

Применение на практике данной модели позволяет снизить силовое воздействие на муфты, снизить их повреждаемость.

В статье [54] в основном изучался перенос осевой нагрузки по всей бурильной колонне в наклонной скважине с использованием модели конечных элементов с учетом нелинейного контакта обсадной трубы и фактической траектории скважины. На основе этой новой модели наши исследования были сосредоточены на анализе потери осевой нагрузки, распределении контактного усилия обсадной колонны и деформации бурильной колонны, включая операции вытягивания и спуска. Эффективность предложенной модели была подтверждена экспериментально с использованием данных полевых испытаний, полученных в результате процедуры высвобождения пакера на нефтяном месторождении. В результате вышеуказанного анализа были получены некоторые полезные выводы и предложения.

При операции вытягивания, с увеличением нагрузки на крюк, потеря осевой нагрузки и контактное усилие кожуха трубы значительно увеличиваются в секции наращивания, но имеют меньшие отклонения в наклонной прямой секции. Изучен угол отклонения и влияние общей скорости изменения угла траектории скважины. Результаты показывают, что общая скорость изменения угла оказывает существенное влияние на передачу осевой нагрузки и распределение постоянной силы. Когда эта скорость изменения остается постоянной, потеря осевой нагрузки линейно возрастает с нагрузкой на крюке. При этом возрастает давление на муфту. Кроме того, обнаружено, что осевая сила вытягивания возрастает с увеличением скорости срабатывания, и этот эффект более очевиден в секции наращивания.

Однако как ни продлевай срок службы муфты, она, все таки, изнашивается. При этом наилучшим вариантом является наплавка слоя на изношенную поверхность, обеспечивающего восстановление исходной геометрии муфты [55].

В распоряжении заводского технолога для наплавки рассматриваемого изделия есть множество способов. Однако, выполняя исследования необходимо, прежде всего, ориентироваться на экономическую целесообразность. В свою очередь, на экономическую целесообразность

оказывает влияние множество факторов. Точную оценку затрат при наплавке изделия тем или иным способом можно получить, выполнив по принятым на практике методикам экономических расчетов. Однако для предварительного выбора способа сварки рассматриваемого изделия следует проанализировать условия применимости каждого из них, достоинства и недостатки.

Предварительную оценку возможных способов наплавки следует выполнять с учетом содержания химических элементов в свариваемом изделии. Также следует ориентироваться на толщину соединяемых деталей, пространственное положение сварных швов и иные геометрические характеристики рассматриваемого изделия.

Также следует принять во внимание программу выпуска свариваемых изделий. Это позволит корректно сориентироваться в необходимости механизации и автоматизации применяемых для сварки заданного изделия процессов подготовки к сварке.

Любой способ сварки, за исключением холодной сварки, предусматривает термическое воздействие на соединяемые детали в зоне получения сварного шва [56]. Если в состав соединяемого материала входят химические элементы, обладающие высоким сродством к кислороду, необходимо, чтобы анализируемый способ обеспечивал должную степень защиты от окружающей среды. Помимо кислорода, опасность для получаемого сварного соединения может представлять азот. Растворяясь в расплавленном металле сварочной ванны, он попадает в сварной шов, ухудшая его эксплуатационные характеристики [15, 20, 40].

Также при предварительном выборе способа сварки необходимо учитывать геометрические характеристики соединяемых деталей, в первую очередь свариваемые толщины.

Критерий толщины также является важным при выборе способа сварки. Для каждого диапазона толщин существует наиболее экономичный вариант соединения сваркой. Например, при толщинах свыше 5 мм не рекомендуется сварка при нагреве газовым пламенем. В то же время при толщинах менее 5 мм

не рекомендуется применение способа сварки при нагреве дугой, горячей под слоем флюса. Вообще, в ГОСТах на сварные соединения, например, ГОСТ 8713-79, диапазон толщин указан. Так для соединения С47 – односторонняя сварка без разделки – указаны диапазоны толщин от 2-х до 14-ти мм. В то же время двусторонняя сварка без разделки, соединение С7, диапазон толщин от 2-х мм до 20-ти мм.

Некоторые способы сварки предпочтительны для соединения металла больших толщин, например при электрошлаковой сварке, согласно ГОСТ 15164-78, толщина соединяемого металла может составлять до 800 мм. Вместе с тем, минимальная толщина соединяемых деталей данным способом 30 мм.

Анализ начнем со способа наплавки при нагреве пламенем от сгорания в кислороде различных углеводородов. Характерной особенностью данного вида наплавки является простота оборудования. Кроме того, возможность регулирования в широких пределах механических воздействий пламени является важным фактором управления формированием шва, особенно при сварке в различных пространственных положениях.

Серьезным достоинством газовой сварки является отсутствие магнитных полей, которые имеют место при дуговых процессах сварки и могут отрицательно сказываться на качестве швов [60].

Существенными недостатками газовой сварки по сравнению с дуговой является сравнительно низкая производительность процесса, относительно высокая стоимость сварочных материалов и повышенная степень взрывоопасности в связи с использованием горючих газов, кислорода, ацетиленовых генераторов и баллонов под высоким давлением [40].

Дуговая сварка. Это сварка плавлением, при которой нагрев осуществляют одной или несколькими электрическими дугами. Различают сварку плавящимся и неплавящимся электродами.

В настоящее время, несмотря на разработки в направлении применения новых источников нагрева при наплавке, электрическая дуга занимает ведущее положение в сварке металлов благодаря простоте возбуждения, поддержания и

регулирования, широкому диапазону мощностей, высокой эффективности нагрева, реакции на различные условия существования и внешние воздействия.

Сварочная дуга относится к типу дуг высокого давления [59]. Это короткая дуга, у которой длина разрядного промежутка и поперечные размеры столба — величины одного порядка, обычно измеряемые несколькими миллиметрами. Величина силы тока в большинстве случаев равна нескольким десяткам или сотням ампер и достигает иногда 1500–2000 А и более. Напряжение сварочной дуги вследствие малой ее длины и большой силы тока изменяется обычно в пределах 20–45 В. В пространстве между электродами, имеющем очень малый объем (обычно до 0,5 см³), происходит преобразование в теплоту электрической энергии мощностью 2–70 кВт, в результате чего электроды сильно нагреваются, плавятся и испаряются [40].

В дуге при сварке плавящимся электродом, помимо потоков плазмы и пара, присутствуют и потоки капель переносимого расплавленного металла.

Электрическая сварочная дуга, как и другие виды самостоятельных установившихся разрядов, характеризуется резко неравномерным распределением потенциала между электродами. В областях, примыкающих к электродам дуги, названных катодной и анодной, несмотря на малую протяженность (l_k и l_a), напряжения U_k и U_a значительны. В остальной части разряда, расположенной между этими областями и названной столбом дуги (l_c), напряженность поля сравнительно невелика.

Температура газа в анодной области падает на несколько тысяч градусов от температуры столба T_c до температуры поверхности активного пятна анода. Большинство металлических анодов, кипящих при температуре ниже 4000 К, испаряется в зоне активных пятен под действием теплоты дуги, поэтому перепад температур ΔT в анодных областях в таких случаях может быть найден из уравнения [40, 49].

«При сварке тяжелоагружаемых и работающих в условиях ударноабразивного изнашивания деталей и узлов из высокопрочных и разнородных сталей существует опасность образования в соединениях

холодных трещин, что обуславливает необходимость выполнения подогрева и последующего отпуска. Это усложняет технологический процесс, и не всегда возможно при сварке массивных и крупногабаритных изделий. Во избежание проведения этих дополнительных операций можно использовать высоколегированные Fe-Cr-Ni-Mo электроды» [36, 58]. «Однако они обладают относительно невысокими показателями прочности и износостойкости, что вызывает необходимость их утолщения наплавкой с перерасходом дорогостоящих сварочных материалов и увеличением трудозатрат. При этом ухудшается работоспособность соединения вследствие инициирования разрушения в местах резкого перехода от утолщенного шва к основному металлу» [57].

В Институте электросварки Национальной академии наук Украины созданы электроды марок АНВМ-2 и АНВМ-3 не содержащие никеля с целью нанесения покрытий на сталь 110Г13Л и получения сварных швов с углеродистыми и низколегированными сталями. Данные электроды содержат марганец свыше 10% и в сварных соединениях получается аустенитная структура. Стержни электродов выполняют из низкоуглеродистой стальной проволоки Св08 или Св08А. Но в покрытие введены порошкообразные чистые металлы, ферросплавы и графит до 0,15–0,39% С; 8,5–9,5% Cr; 19,0–24,0% Mn; 0,08–0,12% Ti; 0,15–0,20% V и до 0,16% N. Перечисленные компоненты в процессе получения сварного шва переходят в сварочную ванну обеспечивая получение требуемого химического состава наплавленного металла. «Газошлаковую защиту зоны сварки обеспечивают минералы электродного покрытия, образующие при расплавлении и диссоциации основной шлак, оксид углерода и углекислый газ, а стабильное горение дуги — щелочные и щелочно-земельные элементы в атмосфере дуги. Коэффициент массы покрытия составляет 0,9-1,0, толщина покрытия возрастает с увеличением диаметра стержня электрода» [41, 44, 54].

«Газошлаковая защита и связывание водорода во фтористый водород, не растворимый в металлическом расплаве, обеспечивают предотвращение образования пор» [16, 28].

«Благодаря использованию чистых, без серы и фосфора шихтовых материалов, замене никеля марганцем, введению азота, снижению содержания кремния, легированию ванадием и модифицированию металла присутствующими дисперсными оксидами хрома и титана, а также высокой основности шлака образование горячих трещин в аустенитных швах исключается» [24].

Высокая стойкость против замедленного разрушения и образования холодных трещин в сварных соединениях достигается за счет:

- пониженной температуры плавления хромомарганцевого металла шва и степени перегрева металла в ЗТВ;
- связывания в HF и повышенной растворимости в аустенитном металле шва водорода;
- растягивающих напряжений в процессе сварки, повышающих температуру превращения охлаждаемого аустенита в ЗТВ с уменьшением доли и снижением твердости образующегося мартенсита;
- отпуска при очередных проходах сварки.

Получаемый хромомарганцевый металл шва имеет аустенитную структуру с выделениями карбидов и карбонитридов. Он обладает повышенной прочностью. Электроды АНВМ-2 обеспечивают предел прочности наплавленного металла 610-720 МПа, предел текучести 380-540 МПа. Электроды АНВМ-3 обеспечивают большие значения предела прочности наплавленного металла 670-760 МПа, и большие значения предела текучести, 420-610 МПа. Металл шва обладает склонностью к упрочнению при механическом наклепе. После холодной пластической деформации его твердость возрастает с 21–22 HRCэ (235–240 HV) до 39–50 HRCэ (380–550 HV), что повышает стойкость против ударноабразивного изнашивания.

У зоны сплавления разнородных по структуре шва, выполненного электродами АНВМ-2 и АНВМ-3, и легированных сталей наблюдается локальное повышение твердости соответственно до 290 и 370–460 НВ вследствие образования мартенситной прослойки шириной 5–15 мкм [9, 21, 37, 42, 46].

Конечно, следует помнить и о недостатках способах ручной дуговой наплавки. Главный из них – затраты времени на замену израсходованного электрода. Помимо затрат времени прерывание цикла сварки чревато появлением дефектов наплавленного валика. Кроме того, сварщик при выполнении соединения вручную, в соответствии со своим опытом и практическими навыками управляет процессом.

В частности при получении сварного соединения способом РДСПЭ рабочему приходится выполнять движение электродом в трех направлениях. Первое направление – вдоль оси стержня электрода. Второе – вдоль оси шва, по сути оно определяет скорость сварки. Третье – поперек шва. Выполняя движения электродом в данном направлении, рабочий обеспечивает качественный провар кромок соединяемых деталей [29, 30, 40].

Необходимость управления и контроля множества параметров процесса требует высокой квалификации сварщика, приводит к быстрой его утомляемости.

В какой-то степени перечисленные недостатки устраняются применением длинного электрода (присадочной проволоки), механизированная сварка, но данный способ требует обеспечения защиты сварочной ванны, наличия устройства, подающего из бухты в зону горения сварочной дуги проволоку.

Устранить приведенный здесь первым недостаток механизированной сварки в газовых смесях можно, применив способ сварки порошковой проволокой, рисунок 9 Порошковая проволока по сути является вывернутым наизнанку штучным электродом, рисунок 10.

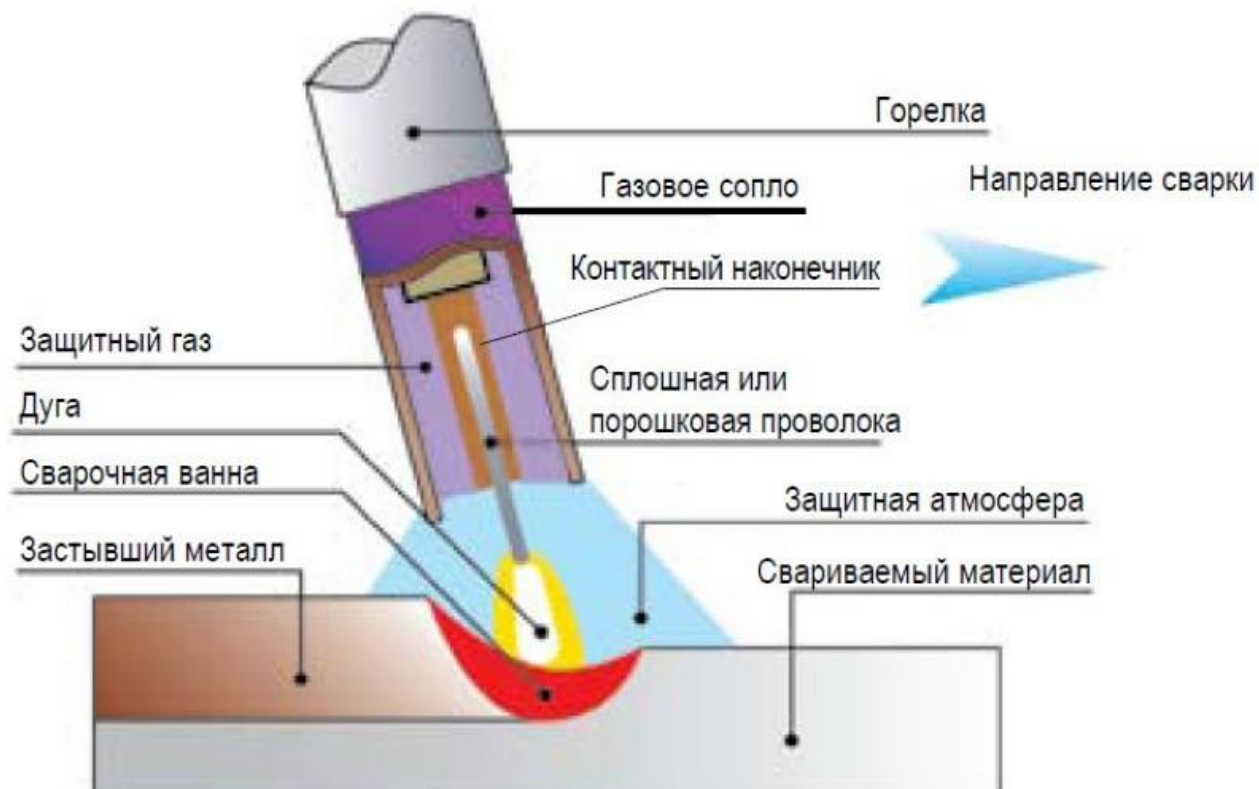


Рисунок 8 – Схема процесса механизированной сварки

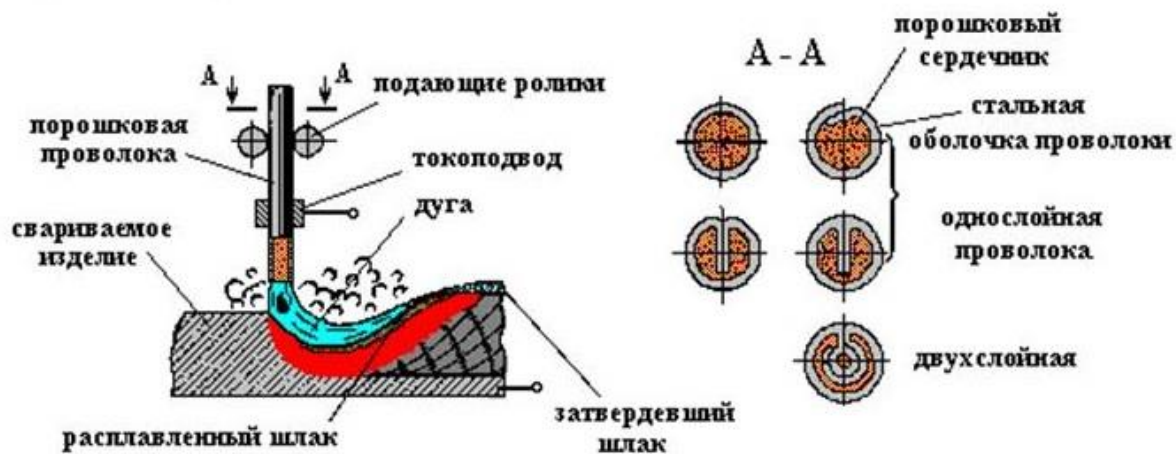


Рисунок 9 – Схема сварки порошковой проволокой



Рисунок 10 – Общий вид порошковой проволоки

Она может применяться при обеспечении газовой защиты зоны горения дуги и без газовой защиты – самозащитная проволока.

К достоинствам сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа следует отнести широкий спектр соединяемых материалов. Практически все цветные металлы успешно соединяются данным способом. В некоторых случаях, при сварке титана, например, требуется дополнительная защита инертным газом и зон, подвергшихся нагреву до высоких температур [39, 40, 47].

Недостатки способа – при сварке активных металлов требуется в качестве защитного применять дорогостоящий аргон. Кроме того, традиционно сварщик одновременно выполняет манипуляции присадочным прутком и сварочной горелкой [57]. Различные варианты механизации данного способа приводят к необходимости создания конструктивно сложной горелки, рисунок 11. Фотография такой горелки на рисунке 12.

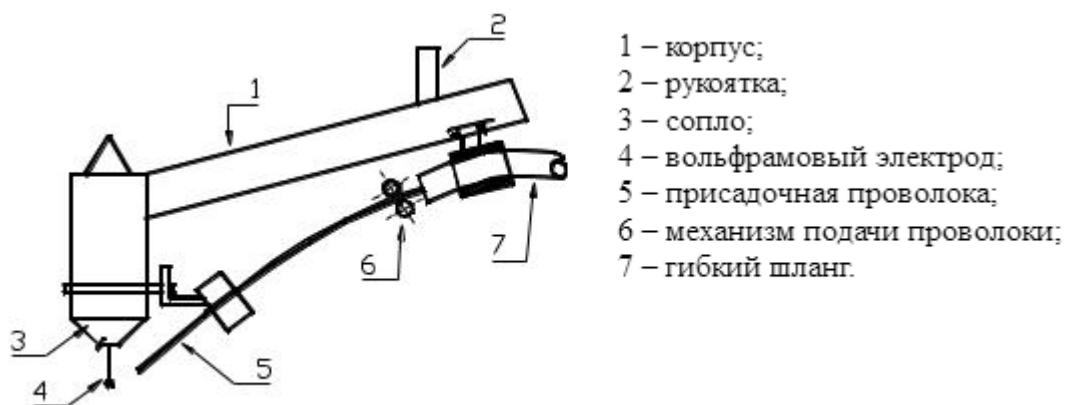


Рисунок 11 – Схема механизированной сварки неплавящимся электродом

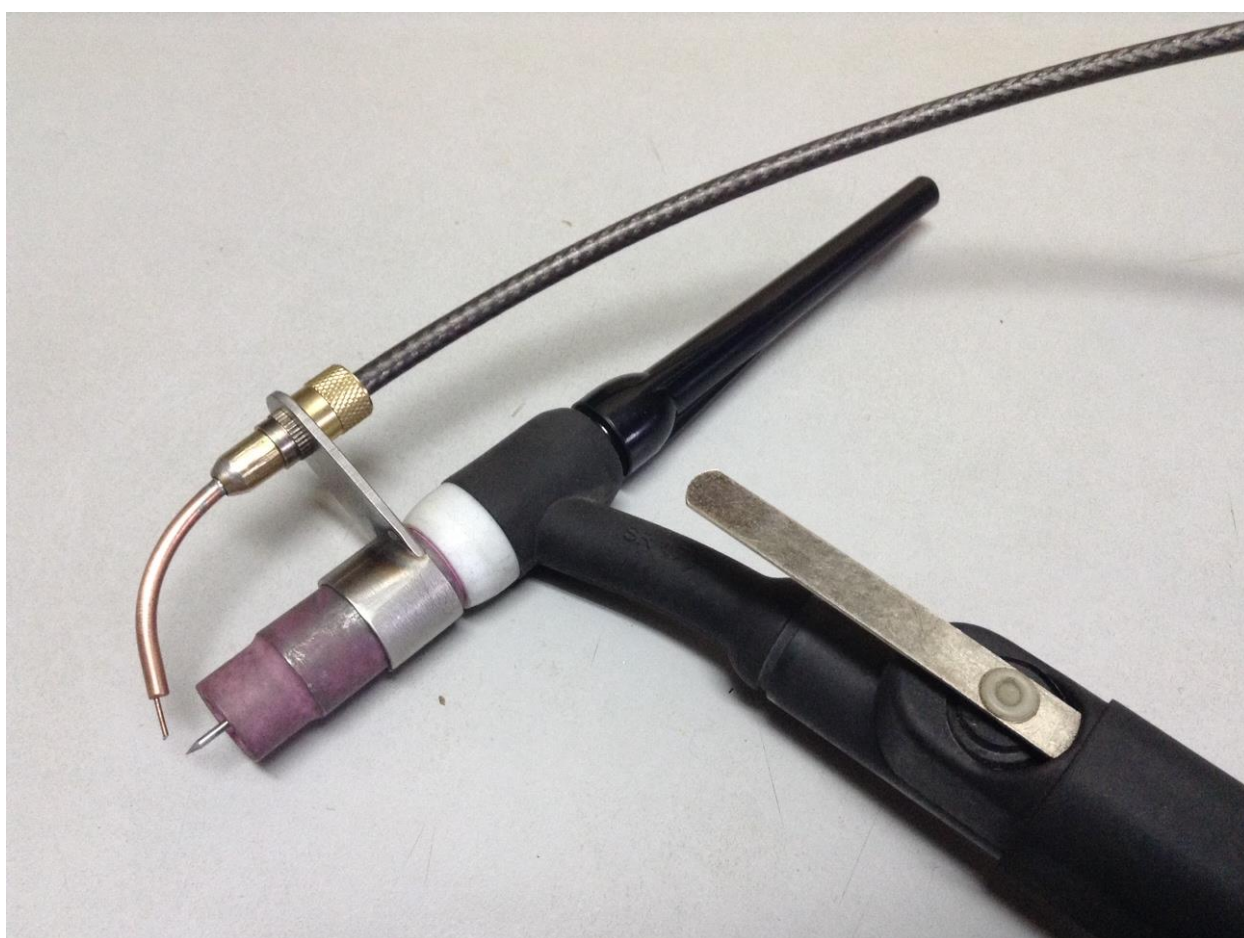


Рисунок 12 – Горелка для TIG сварки при механизированной подаче проволоки

В целом, можно сделать вывод, что замена способа механизированной сварки не является целесообразной. Значит необходимо рассмотреть возможные варианты присадочных материалов.

1.4 Анализ возможных вариантов присадочных материалов

Сначала разработка технологии нанесения слоя наплавкой предусматривает выбор наплавочного материала [11]. Здесь есть смысл проанализировать предложения ведущих производителей наплавочных материалов. Рассмотрим, что предлагает из наплавочных материалов порошковой проволоки фирма LINCOLN ELECTRIC [31, 59].

Проволока Lincore 15CrMn применяется для нанесения предварительного слоя. Химический состав наплавленного данной проволокой материала около 0,4% углерода, и по 15% хрома и марганца. Структура наплавленного слоя – аустенит. Ввиду высокого содержания марганца наплавленный слой склонен к наклепу, как сталь Гадфилда. При этом происходит увеличение твердости от значений 18 – 22 HRC (после наплавки) до 40 – 50 (после наклепа).

Проволока Lincore M также в наплавленном слое содержит около 13% марганца и обладает аустенитной структурой. Наплавленный металл обладает склонностью к наклепу. При этом происходит увеличение твердости от значений 18 – 28 HRC (после наплавки) до 30 – 48 (после наклепа).

Проволока Lincore 50 обеспечивает содержание в наплавленном слое углерода, до 2% и хрома до 10%. За счет высокого содержания данных химических элементов твердость наплавленного слоя составляет 48 – 52 HRC.

Проволока Lincore 60 также обеспечивает значительную твердость наплавленного слоя за счет высокого содержания углерода и хрома в наплавленном слое. Твердость 55 – 60 HRC.

Проволока Lincore 65-O характеризуется еще большим содержанием углерода и хрома в наплавленном слое. Поэтому его твердость еще больше, достигает 60 – 65 HRC.

Другим всемирно известным производителем присадочных материалов, в том числе и для нанесения слоев, является фирма Castolin Eutectic [43, 48, 60]. Среди выпускаемых данным предприятием самозащитных наплавочных проволок рассмотрим следующие варианты.

TeroMatec AN 4630. Наплавочная проволока для защиты от абразивного и эрозионного износа в условиях минимальных ударных нагрузок. Твердость 1-го слоя [HRC] 66, 2-го слоя [HRC] 70.

TeroMatec AN 4660. Наплавочная проволока для защиты от абразивного и эрозионного износа в условиях умеренных ударных нагрузок. Твердость 1-го слоя [HRC] 59, 2-го слоя [HRC] 62.

TeroMatec AN 4666. Наплавочная проволока для защиты от абразивного и эрозионного износа в условиях умеренных ударов и давления.

Предприятие ESAB выпускает самозащитные порошковые проволоки для наплавки [61].

Проволока ОК Tubrodur 14.70 используется на практике для наплавки деталей, работающих в контакте с рудой, землей и т.д. в условиях абразивного износа. Проволока после того, как получен наплавленный слой обеспечивает следующий его химический состав, %. С 3,5; Si 0,4; Mn 0,9; Cr 22,0; Mo 3,5; V 0,4. Твердость полученного слоя 50 - 60 HRC.

Отечественные разработки по порошковой самозащитной проволоке. Проволока ПП-Нп-200X15С1ГРТ, старое обозначение ПП-АН125. Применяется для автоматической и полуавтоматической наплавки открытой дугой деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания. Проволока после того, как получен наплавленный слой обеспечивает следующий его химический состав, %. С 1,9; Si 1,5; Mn 1,2; Cr 17,0; Ti 0,5; V 0,7. Твердость полученного слоя 46 - 58 HRC.

Проволока ПП-Нп-250X10В8С2Т, старое обозначение ПП-АН135. Применяется для наплавки открытой дугой деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с ударными нагрузками. Проволока после того, как получен наплавленный слой обеспечивает следующий его химический состав, %. С 2,6; Si 2,0; Mn 1,2; Cr 9,5; Ti 0,9; Nb 7,5. Твердость полученного слоя 50 - 58 HRC.

Проволока ПП-Нп-80X20Р3Т, старое обозначение ПП-АН170. Применяется для наплавки открытой дугой деталей, работающих в условиях

абразивного изнашивания. Проволока после того, как получен наплавленный слой обеспечивает следующий его химический состав, %. С 0,8; Si 0,8; Mn 0,8; Cr 20,0; Ti 0,5; V 3,4. Твердость полученного слоя 58 - 65 HRC.

Анализ химического состава проволоки показывает, что характерным является повышенное содержание углерода. Это обеспечивает наплавленному слою высокие значения твердости. Также для химического состава проволоки является характерным высокое содержание хрома.

Рассмотрим подробнее характеристики отечественных проволок: ПП-Нп-200X15C1ГРТ; ПП-Нп-250X10B8C2Т; ПП-Нп-80X20P3Т [27, 38].

Данные проволоки выпускаются следующих диаметров.

ПП-Нп-200X15C1ГРТ 1,6-1,8; 2,0-2,2; 2,4-2,6; 2,8-3,0; 3,2 мм.

ПП-Нп-250X10B8C2Т, ПП-Нп-80X20P3Т: 2,0-2,2; 2,4-2,6; 2,8-3,0; 3,2 мм.

Соответственно диаметру проволоки устанавливаются и параметры режима наплавки.

Для проволоки ПП-Нп-200X15C1ГРТ параметры режима наплавки составят:

– при диаметре 1,6-1,8 мм сила тока 160-240 А; напряжение 24-27 В; скорость наплавки 10-15 м/час;

– при диаметре 2,0-2,2 мм сила тока 180-260 А; напряжение 25-28 В; скорость наплавки 12-18 м/час;

– при диаметре 2,4-2,6 мм сила тока 200-320 А; напряжение 26-28 В; скорость наплавки 15-20 м/час;

– при диаметре 2,8-3,0 мм сила тока 260-350 А; напряжение 26-29 В; скорость наплавки 18-23 м/час;

– при диаметре 3,2 мм сила тока 300-450 А; напряжение 27-30 В; скорость наплавки 20-25 м/час.

Для проволоки ПП-Нп-250X10B8C2Т параметры режима сварки:

– при диаметре 2,0-2,2 мм сила тока 180-260 А; напряжение 26-29 В; скорость наплавки 12-18 м/час;

– при диаметре 2,4-2,6 мм сила тока 200-320 А; напряжение 27-30 В; скорость наплавки 15-20 м/час;

– при диаметре 2,8-3,0 мм сила тока 260-350 А; напряжение 28-32 В; скорость наплавки 18-23 м/час;

– при диаметре 3,2 мм сила тока 300-450 А; напряжение 29-33 В; скорость наплавки 20-25 м/час.

Для проволоки ПП-Нп-80Х20Р3Т параметры режима сварки:

– при диаметре 2,0-2,2 мм сила тока 200-280 А; напряжение 26-28 В; скорость наплавки 12-18 м/час;

– при диаметре 2,4-2,6 мм сила тока 220-320 А; напряжение 27-29 В; скорость наплавки 15-20 м/час;

– при диаметре 2,8-3,0 мм сила тока 280-350 А; напряжение 28-30 В; скорость наплавки 18-23 м/час;

– при диаметре 3,2 мм сила тока 320-450 А; напряжение 30-32 В; скорость наплавки 20-25 м/час.

По предложенным производителями режимам выполняем наплавку слоя на замок трубы.

Выполним анализ комбинированного способа нанесения слоев на изношенные поверхности муфт. Данный способ подробно рассмотрен в работах [10, 11, 12]. Показано, что управляя режимами при наплавке алюминия на сталь можно получать покрытия с различными свойствами. Так твердость получаемых покрытий находится в диапазоне 19-60 НРС. Расширяют эксплуатационные возможности сплавов добавки кремния.

Если рассмотреть диаграмму состояния железо – алюминий, то она характеризуется наличием нескольких интерметаллидных фаз, рисунок 13.

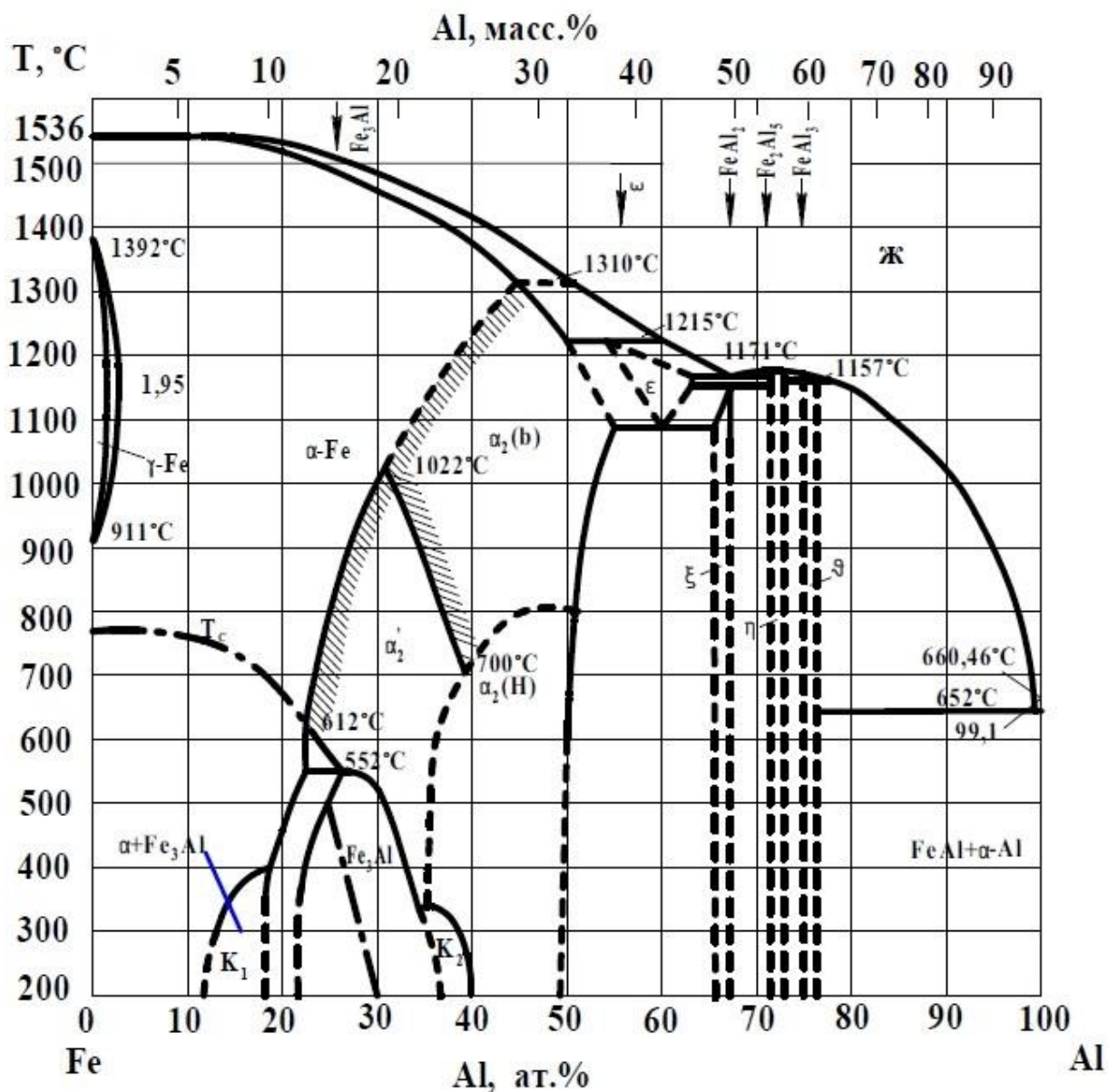
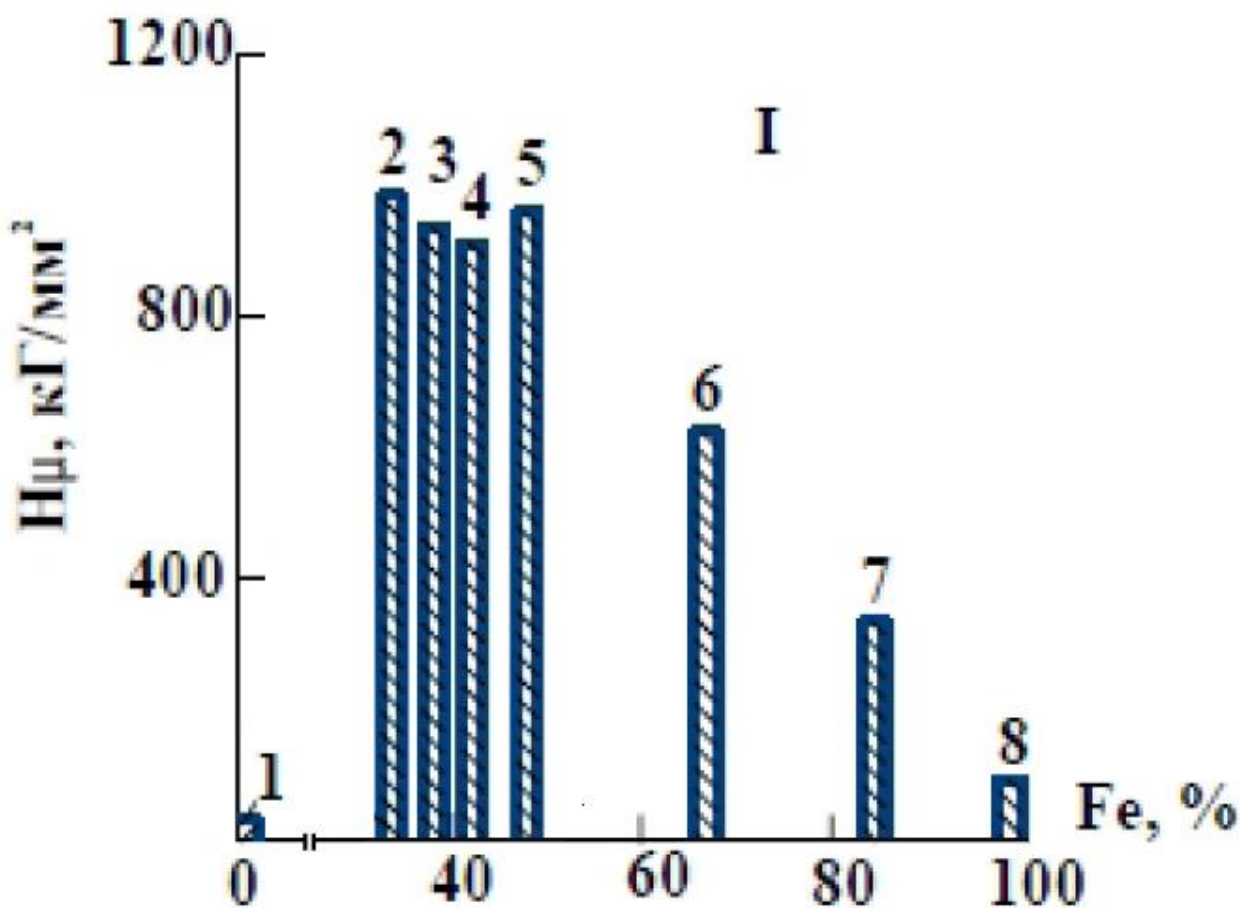


Рисунок 13 – Диаграмма состояния алюминий железо

Как видно из рисунка 14 микротвердость интерметаллических соединений FeAl_3 , FeAl_2 , Fe_2Al_7 , Fe_2Al_5 достигает значительных величин. Перечисленные химические соединения алюминия и железа обладают микротвердостью от 9,6 до 11,5 ГПа.

Максимальная твердость характерна для соединения Fe_2Al_5 . Ее величина составляет 11,5 ГПа. При увеличении содержания железа величина твердости уменьшается.



1 – чистый алюминий; 2 – Fe₂Al₇; 3 – FeAl₃; 4 – Fe₂Al₅; 5 – FeAl₂; 6 – FeAl; 7 – Fe₃Al; 8 – чистое железо

Рисунок 14 – Значения микротвердости интерметаллидов алюминия

1.5 Задачи работы

Подводя итоги анализа, выполненного в разделе 1 можно сделать следующие промежуточные выводы. При бурении скважины обладающая большим, чем сама труба, диаметром муфта бурильного замка находится в условиях трения со стенками скважины и со стенками обсадных труб. Второй вариант работы приводит к взаимному износу обсадных труб и муфты. Поэтому различные варианты упрочнения замков могут привести к протиранию труб обсадных колонн [5]. Требуется поиск материала для восстановления муфт труб бурильных, хорошо сопротивляющегося абразивному износу от действия горных и осадочных пород и не допускающего износа металлических труб

обсадных скважин.

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

- выбрать наплавочный материал;
- определить необходимые исследования получаемых слоев на поверхности муфты;
- разработать методику выполнения экспериментальных исследований;
- выполнить эксперименты согласно разработанной методике;
- обработать и проанализировать результаты экспериментальных исследований;
- по результатам выполненных исследований разработать технологические рекомендации для применения их в практике наплавки на поверхность муфт.

2 Методика исследований

2.1 Нанесение слоя для проведения исследований

Сначала наплавка выполняется проволокой Св-08Г2С. Выполняется наплавка сектора в 120 градусов. В один слой.

Для наплавки проволокой диаметром 2 мм сила тока $I_{св} - 165$ А, напряжение на дуге $U_{д} - 26,2$ В, скорость наплавки $V_{н} - 15$ м/ч, скорость подачи проволоки $V_{пп} - 95$ м/ч. Расход аргона 8-10 л/мин.

Затем проволокой сплошного сечения НП-30ХГСА диаметром 2 мм. Выполняется наплавка сектора в 120 градусов.

Режимы наплавки: сила сварочного тока 220 А; напряжение на дуге 27 В; вылет сварочной проволоки $20 \div 25$ мм; скорость подачи проволоки ≈ 100 м/ч; расход аргона $\approx 8-10$ л/мин.

Непосредственно после наплавки каждого валика отжиг, при температуре $T = 350^{\circ}\text{C}$ в течении 3-4 часов. Остывание вместе с печью до 50°C .

Начало валика, отступ от кромки 10 мм, и его протяженность показаны на рисунке 15.

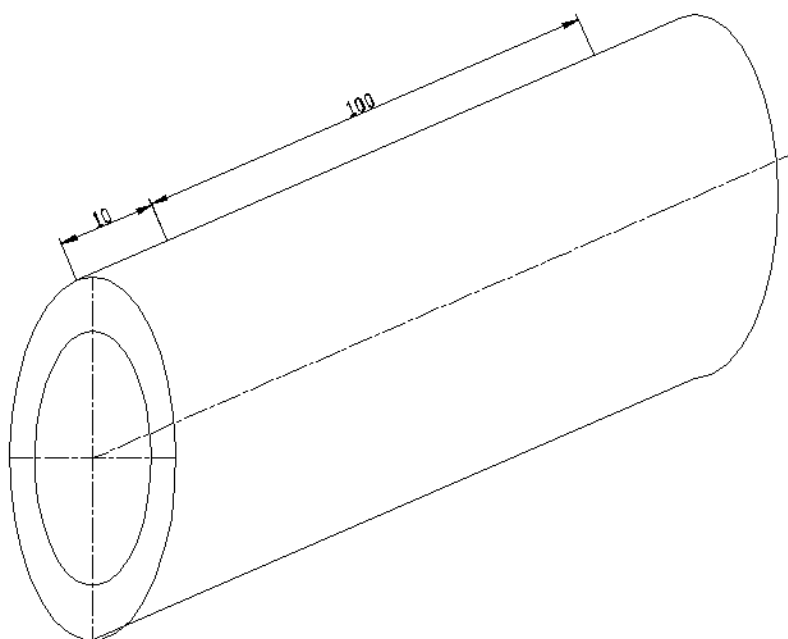


Рисунок 15 – Начало валика, отступ 10 мм и его протяженность

Предварительно сварочная проволока обезжиривается ацетоном. Обточенная, зачищенная абразивной бумагой и обезжиренная ацетоном муфта крепится в тиски. Горелки выставляются на расстоянии 10 мм от края муфты, устанавливаются режимы наплавки. Включается установка. Наплавляется первый валик. Движение горелок вдоль образующей муфты. Длина наплавленного валика, в соответствии с характеристиками установки составляет 100 мм.

Далее, по окончании наплавки первого валика обеспечиваем замедленное охлаждение. Для чего опускаем наплавленную муфту в ящик с песком, охлаждаем до температуры 100 градусов цельсия. После чего зачищаем наплавленный слой щеткой металлической. Выполняем контроль на наличие непроваров и трещин.

Затем выполняем установку муфты в тиски с учетом смещения на угол, обеспечивающий перекрытие наплавленного валика на 1/3 ширины. Величину угла поворота муфты определяли в зависимости от ширины наплавленного валика. Для нормального формирования слоя согласно [33] необходимо пересечение наплавленных валиков на 1/3. Значит в равнобедренном треугольнике ABC стороны AB и сторона AC будут равны 90 мм, рисунок 16. А сторона CB будет определяться исходя из выражения:

$$CB=L-1/3L \quad (1)$$

Тогда согласно известным зависимостям:

$$\cos\alpha = (L-1/3L)/2*90 \quad (2)$$

Определяем величину угла α и по известной зависимости определяем величину угла поворота:

$$\beta=180^\circ- 2\alpha \quad (3)$$

Повторно зажимаем муфту в тиски со смещением на угол β , см. рисунок 16, наплавляем следующий слой. Таким образом, наплавляем слои всеми проволоками.

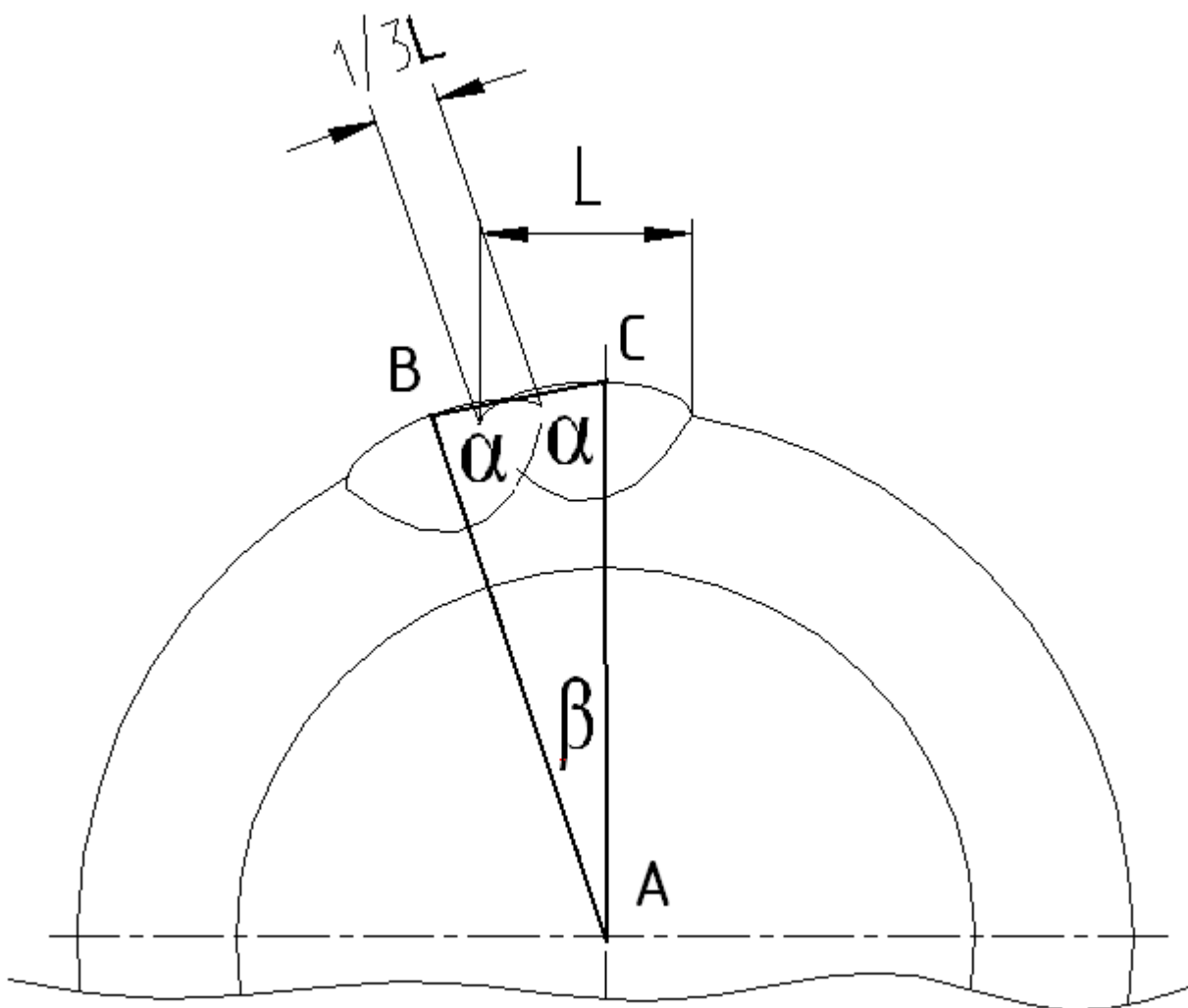


Рисунок 16 – Угол поворота наплавленной муфты

Выполняем наплавку валика, обеспечиваем замедленное охлаждение, контроль наплавленных слоев. Наплавливаем по аналогичной методике еще один валик, но поворачиваем муфту при установке в тиски в противоположном направлении. Таким образом, поочередно меняя направление, валики наплавливаем до тех пор, пока не получится сектор 120 градусов. Первый слой наплавлен.

Современная цивилизация развивалась во многом благодаря использованию превосходных свойств металлов. Они легко обрабатываются и после соответствующей обработки имеют достаточно высокую прочность. Однако научно-технический прогресс требует производить машины и аппараты, работающие в таких жестких условиях (высокие температуры,

агрессивные среды), где металлические материалы не могут выдерживать. Вместо металлов в качестве конструкционных материалов начинают применять керамики. К недостаткам керамик относятся их значительная хрупкость, плохая обрабатываемость.

Интерметаллиды по своим характеристикам находятся в промежуточном положении между металлами и керамики. Главное отличие интерметаллидов от составляющих их металлов – повышенные значения прочности и твердости.

Рассмотрим сначала наплавку комбинированного слоя на поверхность муфты бурильной трубы, сталь + алюминий.

Диаграмма состояния железо-алюминий характеризуется наличием нескольких интерметаллических соединений Fe_3Al , $FeAl_2$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$. Для интерметаллидов одним из характерных свойств является высокая прочность и твердость при низкой пластичности.

Для получения слоя, в состав которого входит железо и алюминий предложено использовать двухдуговую наплавку [10]. Двухдуговая наплавка, в общем случае, совершается двумя горелками. Через сопло одной горелки подается, в нашем случае, алюминий. Через сопло другой горелки подается стальная проволока.

Предложено применить сварочную проволоку Св-08Г2С, и алюминиевую проволоку Св-А5. Для совместного нанесения слоя на поверхность муфт труб бурильных предложено использовать способ двухдуговой наплавки. Реализация данного способа возможно при защите сварочной ванны аргоном. Установку для двухдуговой наплавки предложено применять находящуюся в ССДЦ Дельта, рисунок 17.

Установка оснащена устройствами для регулировки угла наклона горелок. Оснащена также механизмом для автоматического перемещения. Механизм для автоматического перемещения представляет из себя зубчатую шестерню и зубчатую рейку. Данный механизм обеспечивает величину рабочего хода 100 мм.



Рисунок 17 – Установка для двухдуговой наплавки [2]

Питание двух дуг и подача присадочной проволоки осуществляется от сварочных аппаратов Megatronic BDH 550, рисунок 18.

Параметры режима наплавки устанавливать следующие: для горелки, обеспечивающей подачу сварочной проволоки Св08Г2С. Напряжение на дуге принимали 30 В. Скорость подачи присадочной проволоки 6 м/мин. Скорость наплавки 0,3 м/мин. Величина сварочного тока 260-280 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин.

Для горелки, обеспечивающей подачу алюминиевой проволоки. Напряжение на дуге принимали 30 В. Скорость подачи присадочной проволоки 10 м/мин. Величина сварочного тока 240-260 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин.



Рисунок 18 – Сварочный полуавтомат Megatron BDH 550

2.2 Изготовление образцов для проведения исследований

После наплавки исследуемого слоя муфта разрезается на две части, посередине, перпендикулярно осевой. Затем на сектора на станке фрезерном, рисунок 2.5. Сначала разрезается на три сектора, в соответствии с наплавленными слоями по 120 градусов каждый сектор. Потом каждый сектор дополнительно разрезается на образцы для проведения экспериментальных исследований. Например, вырезка образцов для исследования прочности наплавленного слоя осуществляется следующим образом, рисунок 19.

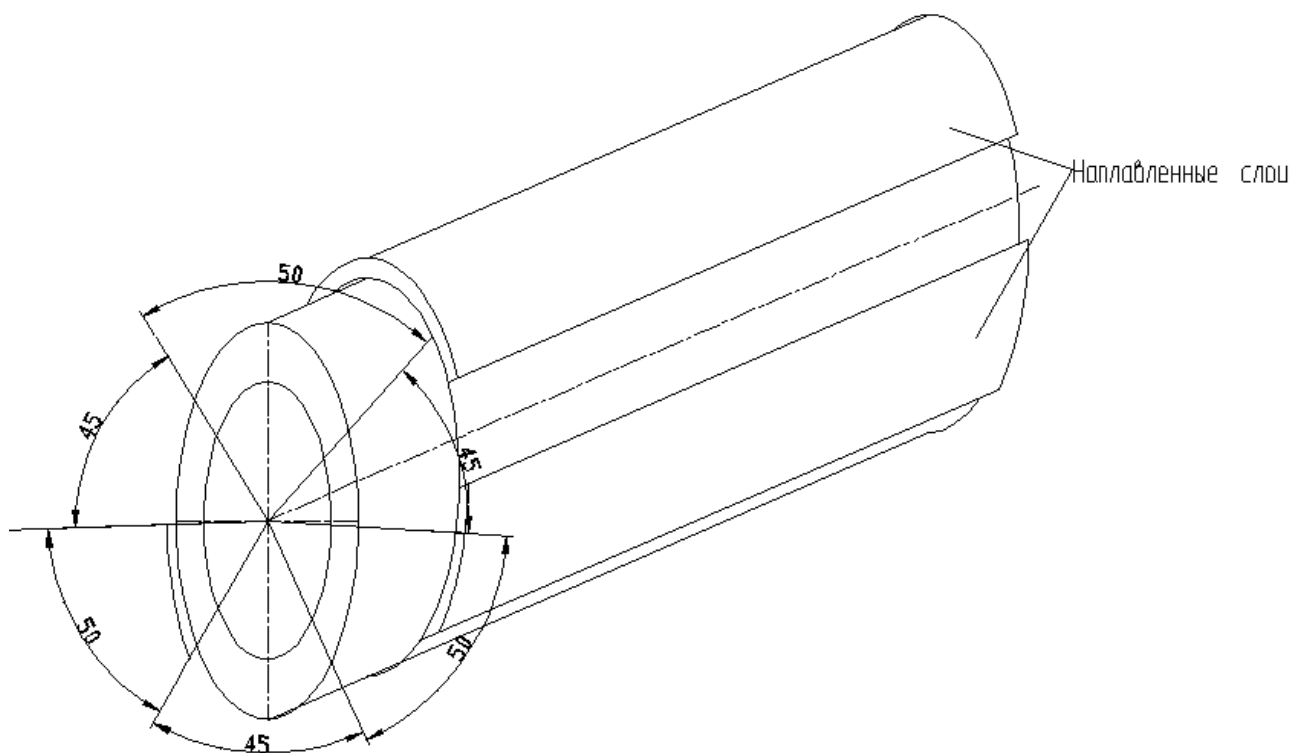


Рисунок 19 – Разрезка наплавленной муфты на сектора

Для исследования износостойкости получаемых слоев применяли образцы в форме параллелепипеда. Место вырезки образца показано на рисунке 20.

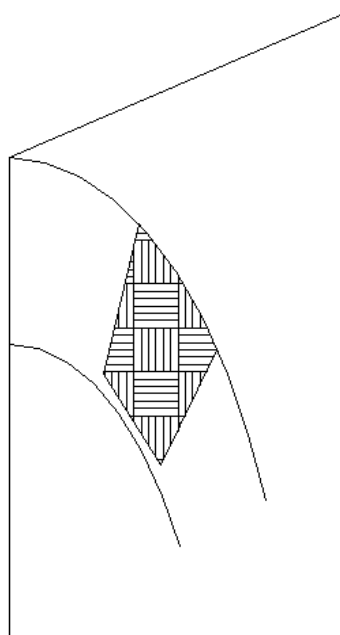


Рисунок 20 – Место вырезки образца для исследования износостойкости

2.3 Исследования твердости получаемых слоев

Учитывая, что у нас образец – не сварной шов, а наплавленный слой, то принимаем следующую схему измерения, рисунок 21. Сказать по численным значениям геометрии наплавленного валика что-то определенное можно только после изготовления шлифа.

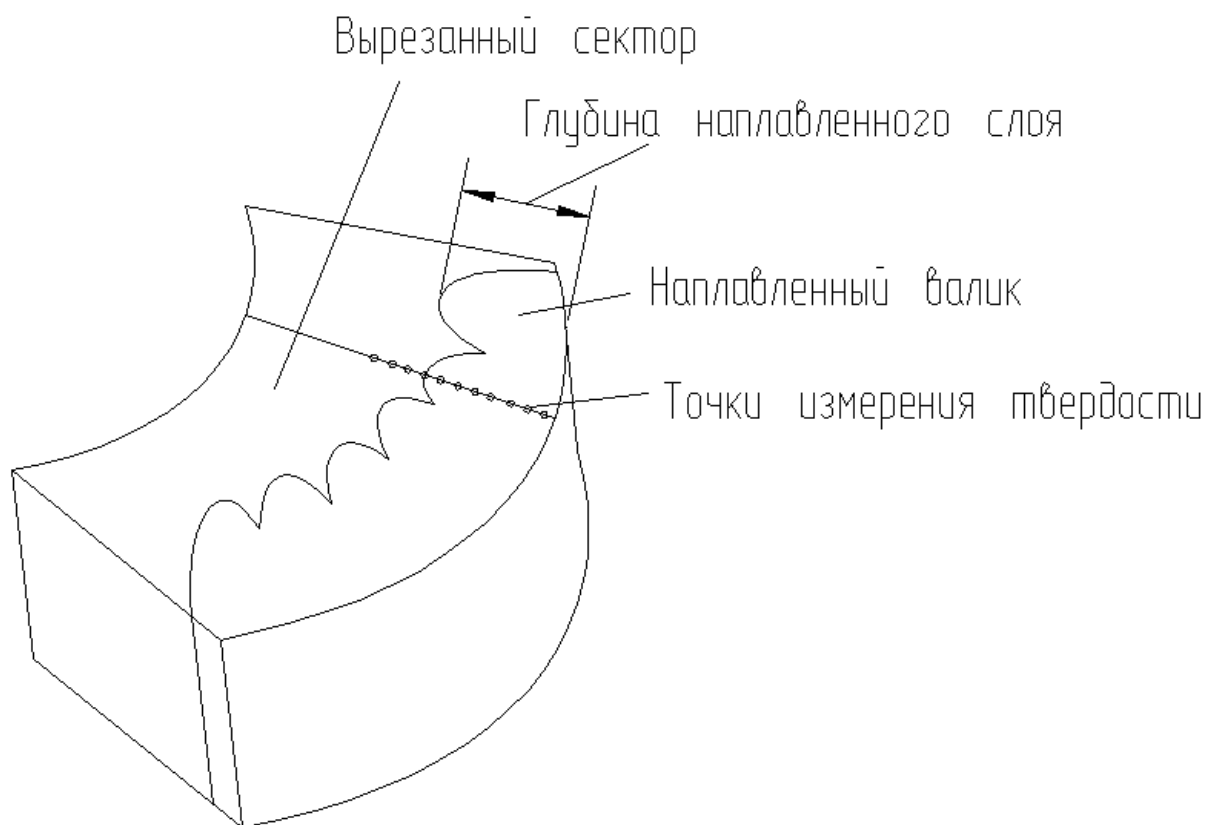


Рисунок 21 – Расположение точек при измерении твердости наплавленного слоя

Согласно ГОСТ измерение твердости проводят на микрошлифах или образцах с полированной поверхностью, если очертания шва видны без травления. Шероховатость поверхности таких образцов должна быть от 0,40 до 0,63 мкм. Измерение твердости по Бринеллю или Роквеллу проводят на макрошлифах или на образцах со шлифованной поверхностью, если очертания шва видны без травления. Шероховатость поверхности таких образцов должна

быть от 1,25 до 2,00 мкм. В образцах должна быть соблюдена параллельность рабочей и опорной поверхностей.

При вырезке образцов для измерения твердости из образцов применяем фрезерный станок и подачу смазочно-охлаждающей жидкости с тем, чтобы исключить термическое воздействие на образец.

Измерения твердости проводить на твердомере МЕТ-У1А, рисунок 22.



Рисунок 22 – Твердомер МЕТ-У1А

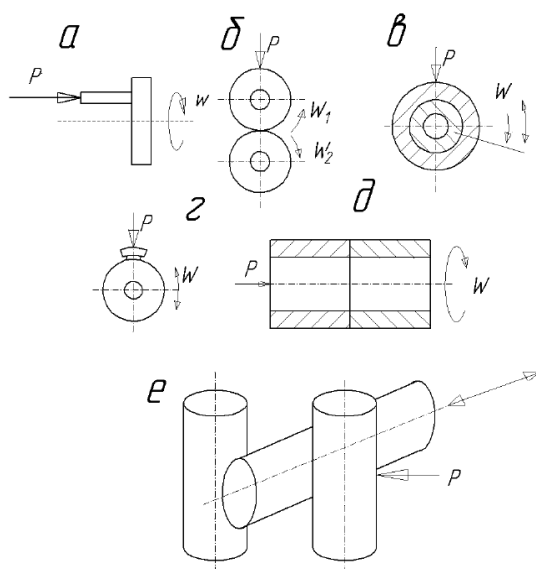
Данный прибор работает по UCI-методу (принцип ультразвукового контактного импеданса), не оставляющему отпечаток на исследуемой поверхности. При данном условии возможно повторное проведение измерения

твердости на том же участке. За счет этого возможна обработка полученных результатов методами математической статистики.

2.4 Исследования износостойкости получаемых слоев

Машины трения предназначены для выполнения исследований износа трущихся поверхностей, свойства применяемых для смазки трущихся поверхностей материалов, свойств в условиях трения фрикционных материалов [35, 63, 64]. Перечисленные варианты исследований могут реализовываться в широком диапазоне температур. Износ характеризует потерю материала при работе трущихся деталей и определяет долговечность узла трения. Потеря материала может измеряться в единицах длины, линейный износ, единицах объема (объемный износ) и единицах массы [35, 63].

Поскольку трущиеся поверхности взаимодействуют при самых различных условиях, и параметры характеризующие трение и износ разнообразны, разработаны и используются на практике различные схемы исследования процессов трения [63]. Некоторые представлены на рисунке 23.



а – «диск-палец», б – «диск-диск», в – «кольцо-кольцо»,
 г – «диск-колодка», д – «торец - торец», е – «цилиндр-цилиндр»

Рисунок 23 – Схемы измерения трения

Поэтому универсальные машины трения имеют возможность проведения испытаний по нескольким схемам.

Основными показателями, по которым характеризуют машины трения, являются:

- величина силы, создаваемой машиной в паре трущихся поверхностей;
- величина момента силы трения;
- величина частоты вращения приводного вала.

Кроме того, важным показателем является коэффициент взаимного перекрытия. От величины данного коэффициента зависят протекающие во взаимодействующих образцах тепловые процессы.

Универсальная машина трения СМЦ-2 обеспечивает проведение испытаний по схемам, (рисунок 23, б – «диск-диск», в – «кольцо-кольцо», г – «диск-колодка»).

При проведении исследований трения приняты следующие количественные характеристики процесса изнашивания: износ (линейный, объемный, массовый), скорость изнашивания, интенсивность изнашивания, износостойкость [63, 64].

Износ – экспериментально определяемая величина. Скорость и интенсивность изнашивания являются величинами, определяемыми путем расчетов [23, 35].

При проведении исследований будем строить кривые «износ-время». В общем случае кривая "износ-время" имеет три участка, рисунок 24 (а).

I – на начальном этапе детали сопрягаются по выступам неровностей. Площадь контакта у деталей при этом мала, т.е. при нагружении пары трения действуют большие давления. В результате этого в начале работы имеет место повышенный износ трибосопряжения.

II – произошла деформация микронеровностей на контактирующих поверхностях. Интенсивность изнашивания снизилась, так как увеличилась несущая поверхность.

III – увеличение интенсивности изнашивания и выход из строя контактирующих деталей.

Схема на рисунке 24, (б) имеет место при неправильной конструкции трибосопряжения.

Схема на рисунке 24, (в) характерна для износа под действием абразивов.

Схема на рисунке 24, (г) характерна для подшипников качения. Нет стадий приработки и стадии установившегося износа.

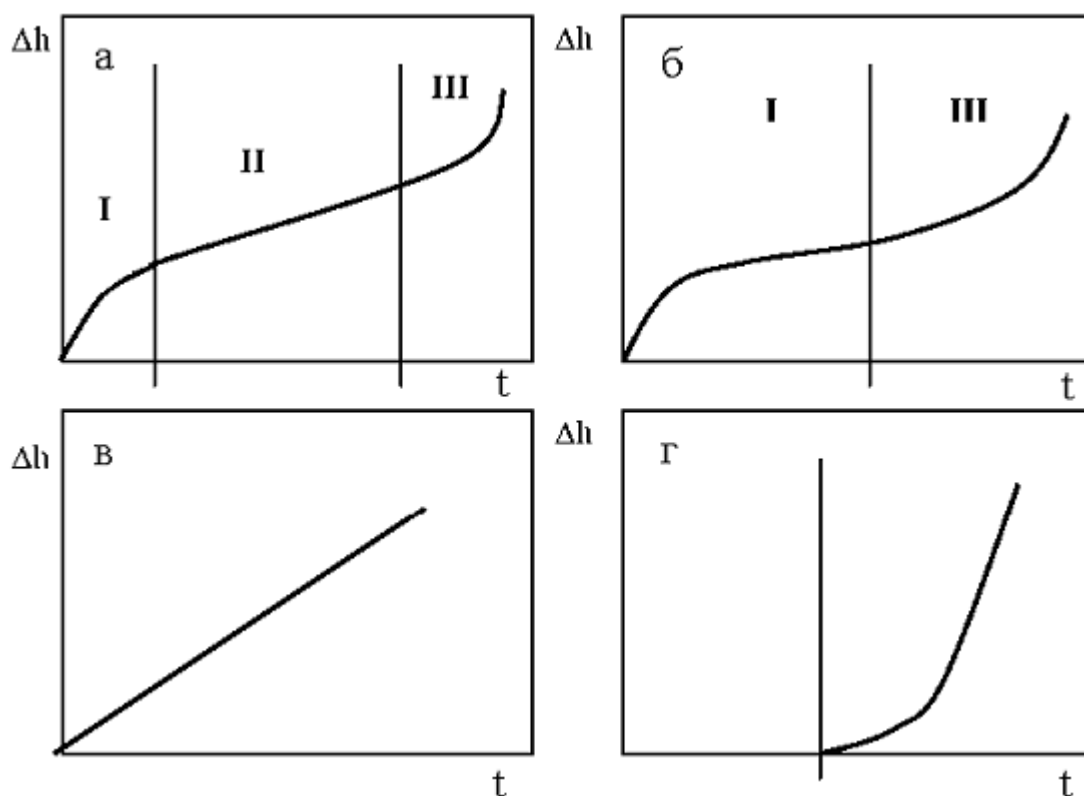


Рисунок 24 – Кривые кинетики износа

Предложено исследования износостойкости выполнять на специализированной установке и по методике согласно [25, 32, 34]. Общий вид установки для проведения экспериментальных исследований износостойкости приведен на рисунке 25.

Исследуемые образцы закрепляются в тисках – 1. С помощью рычага образцы вводятся в контакт с абразивной шкуркой – 2. Устройство привода абразивной шкурки – 3. Установка снабжена таймером, позволяющим

задавать необходимое время испытаний. Давление на образец при испытании регулируется установкой грузов на рычаг.

Износостойкость при абразивном изнашивании выражается в виде относительной износостойкости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{Э}}}{\Delta l_{\text{М}}} \quad (4)$$

где:

$\Delta l_{\text{Э}}$ – линейный износ эталона;

$\Delta l_{\text{М}}$ – линейный износ испытываемого материала.

Износ образцов измерять штангенциркулем ШЦ-1 со значением отсчета по нониусу 0,1 мм.



Рисунок 25 – Общий вид установки для проведения исследования износостойкости

На каждое измерение параметра принимается три образца. Суммировали показания в одних и тех же точках образцов, определяли среднее значение и затем для каждой точки определяли среднеквадратичное отклонение согласно [22].

2.5 Статистическая обработка результатов исследований

Для полученных результатов исследований твердости и износостойкости, описанной в разделе 2.3 и 2.4 работы в первую очередь выполняли расчеты на наличие грубых ошибок по расчетной зависимости 3.1 [22].

$$\tau_{1-p} = \frac{\left(X_i - \bar{X} \right)}{\sqrt{\frac{n-1}{n} \bar{S}}} \quad (5)$$

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 – в данном случае принимали три образца;

\bar{S} – несмещенная оценка среднеквадратичного отклонения.

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \bar{X} \right)^2} \quad (6)$$

Затем выполняли сопоставление результата расчетов табличным значением для принятого количества образцов в количестве 3 и уровне доверительной вероятности $q = 1 - p$.

Подтверждение нормального распределения результатов экспериментов и для вычисления доверительных границ применяли расчетную зависимость:

$$\left(\frac{\bar{\Delta}_a}{\bar{S}} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \right) < \frac{0.4}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

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

$$\bar{\Delta}_a = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n} \quad (8)$$

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

Для расчетной оценки доверительных границ случайной величины использовали зависимость:

$$M(x) = \bar{X} \pm \xi \cdot \bar{\Delta}_a \quad (9)$$

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

$$\Delta_\Sigma = \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{ст}} \quad (10)$$

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

$$\Delta_{\text{из}} = (\Delta_{\text{п}} + 0,001 \cdot P_{\text{оц}}) \cdot t_{1-\alpha}(r) \cdot N_{\text{в}}^{-0.5} \quad (11)$$

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.

$$\Delta_{\text{ст}} = \bar{S} \cdot t_{1-\alpha}(r) \cdot N_{\text{в}}^{-0.5} \quad (12)$$

3 Результаты исследований

3.1 Результаты исследований геометрии получаемых сварных соединений

Первая операция технологического процесса наплавки подразумевала приобретение самой муфты. Муфту от бурильной трубы отрезали на ленточнопильном станке в организации ООО «Ульяновскнефть». Затем муфта транспортировалась в Тольятти и подготавливалась к наплавке.

Выполняли обточку муфты на токарном станке с целью удаления загрязнений. Затем выполняли зачистку поверхности обточенной муфты абразивной бумагой и обезжиривание поверхности муфты ацетоном.

Параллельно готовили сварочные проволоки. Согласно разработанной в разделе 3 методике сварочные проволоки обезжиривали ацетоном.

Применяли для наплавки 3 варианта проволоки: Св08Г2С (И-1); НП-30ХГСА (И-2); и комбинированный вариант двумя проволоками Св08Г2С + Св-А5 (И-3). Наплавка выполнялась вдоль образующей муфты по трем секторам. Горелки выставляли отступив на расстоянии 10 мм от края муфты, устанавливали режимы наплавки.

Образец И-1 наплавлялся проволокой Нп - 08Г2С диаметром 2 мм при силе тока $I_{св} = 165$ А, напряжении на дуге $U_d = 26,2$ В, скорости наплавки $V_n = 15$ м/ч, скорости подачи проволоки $V_{пп} = 95$ м/ч. Расход аргона составлял 8 - 10 л/мин. Провели наплавку пяти слоев внахлестку на 1/3 ширины слоя (рисунок 26).

Образец И-2 наплавлялся проволокой Нп-30ХГСА диаметром 2 мм при силе сварочного тока 220 А; напряжении на дуге 27 В; вылет сварочной проволоки 20 ÷ 25мм; скорость подачи проволоки ≈ 100 м/ч, скорость наплавки 18 м/час, расход аргона 8-10 л/мин. Провели наплавку пяти слоев внахлестку на 1/3 ширины слоя (рисунок 27).

Далее, по окончании наплавки первого валика обеспечивали замедленное охлаждение.

Образец И-3 наплавлялся двумя проволоками одновременно Св08Г2С и Св-А5 и двумя горелками (рис.3.3). Подобного рода технологическая схема обеспечивала комбинированный вариант нанесения покрытий системы алюминий-железо (рисунок 28).

Питание двух дуг и подача присадочной проволоки осуществляется от аппаратов Megatronic BDH 550.

Параметры режима наплавки принимали следующие: для горелки, обеспечивающей подачу сварочной проволоки Св08Г2С. Напряжение на дуге принимали 26,2 В. Скорость подачи присадочной электродной проволоки 9 м/мин. Скорость наплавки 15 м/час. Величина сварочного тока 260-280 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин.

Для горелки, обеспечивающей подачу алюминиевой проволоки. Напряжение на дуге принимали 26,2 В. Скорость подачи присадочной проволоки 9 м/мин. Величина сварочного тока 240-260 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин.

Диаметр присадочной проволоки принимали 1,2 мм для обеих случаев.

Фотография со стороны слоя, наплавленного проволокой Нп-08Г2С (И-1), приведена на рисунке 26. На фотографии просматривается хорошее формирование наплавленного слоя.

Фотография со стороны слоя, наплавленного проволокой Нп-30ХГСА (И-2), приведена на рисунке 27. Также на фотографии просматривается хорошее формирование наплавленного слоя.



Рисунок 26 – Наплавленная муфта, слой выполнен проволокой Нп-08Г2С (И-1)



Рисунок 27 – Наплавленная муфта, слой выполнен проволокой Нп-30ХГСА (И-2)

Наплавленная муфта слоем системы железо-алюминий показана на рисунке 28. Данная фотография сделана со стороны слоя, наплавленного

системой железо-алюминий (И-3). Фотография показывает удовлетворительное формирование слоя.



Рисунок 28 – Наплавленная муфта, комбинированный слой (И-3)

3.2 Результаты исследований твердости

Выполнялась наплавка муфты согласно методике, раздел 2. После наплавки исследуемого слоя муфта сначала разрезается пополам, перпендикулярно осевой линии, потом на три сектора, в соответствии с наплавленными слоями по 120 градусов каждый сектор. Сектор с наплавленным слоем (И-1) показан на рисунке 29. Данный слой наплавлялся проволокой Нп-08Г2С. И на рисунке 30 показан сектор с наплавленным слоем проволокой Нп-30ХГСА (И-2). На рисунке 31 показан сектор с наплавленным слоем системы железо-алюминий (И-3). Данный слой наплавлен по технологии совместной подачи в сварочную ванну стальной и алюминиевой проволоки.

Если рассмотреть глубину получаемого слоя, то наплавленный проволокой Нп-08Г2С находится в среднем 5 мм, наплавленный проволокой Нп-30ХГСА и комбинированным вариантом в среднем 3 мм.



Рисунок 29 – Сектор муфты с наплавленным слоем (И-1)



Рисунок 30 – Сектор муфты с наплавленным слоем (И-2)



Рисунок 31 – Сектор муфты с наплавленным слоем (ИЗ)

Для замера твердости применялся UCI-метод (принцип ультразвукового контактного импеданса), не оставляющий отпечаток на исследуемой поверхности. При данном условии возможно повторное проведение измерения твердости на том же участке. Для этого использовался твердомер МЕТ-У1А. Преимущество данного прибора в том, что он обеспечивает измерение твердости поверхностного слоя. Устанавливаемые стационарные твердомеры под действием высоких нагрузок поверхностный слой продавливают. После измерения твердости стационарным твердомером остается вмятина. При измерении прибором МЕТ-У1А таковых нет. Следовательно, есть возможность выполнить измерения твердости на одном и том же месте несколько раз.

Преимуществом прибора являются его малые габариты, которые обеспечивают возможность измерения непосредственно на месте, где расположен объект. При этом пространственное положение прибора на точность измерений не влияет. Измерения твердости проводилось по ГОСТ 9013, по стандартной шкале Роквелла (HRC).

UCI-метод в качестве датчика использует стальной стержень, на конце которого установлена алмазная пирамида Виккерса (угол между гранями 136°). «Данное устройство является акустическим резонатором (вибратором) встроенного автогенератора ультразвуковой частоты. При внедрении пирамиды в контролируемое изделие под действием фиксированного усилия калиброванной пружины происходит изменение собственной частоты резонатора, определяемое твёрдостью материала. Относительное изменение частоты резонатора преобразуется электронным блоком в значение твёрдости выбранной шкалы и выводится на дисплей» [26].

Есть у прибора и некоторые ограничения на возможность измерения. Так радиус кривизны поверхности не должен превышать 5 мм. Толщина измеряемого образца не должна быть менее 1 мм.

Учитывая, что у нас образец – не сварной шов, а наплавленный слой, то принимаем следующую схему измерения твердости, рисунок 32.

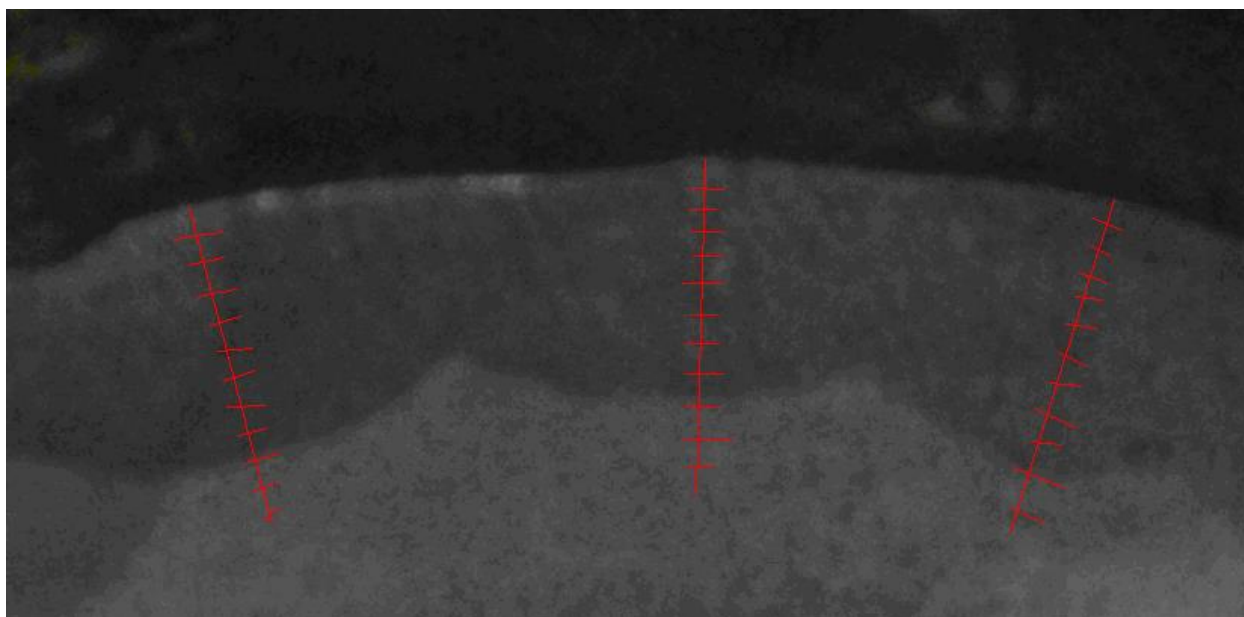


Рисунок 32 – Расположение точек (крестики) при измерении твердости наплавленного слоя

Измеряли 3 валика от вершины до нижней части и в основной металл. Между точками измерений принимали расстояние 0,5 мм. Обработку результатов измерений проводили по стандартным методикам, описанный в

разделе 2.5. На графиках выставлены средние из 3-х значения результатов. Значению 0 соответствует переход от наплавленного валика к основному металлу.

Результаты измерений твердости наплавленного слоя И-1 проволокой Нп-08Г2С показаны на рисунке 33.

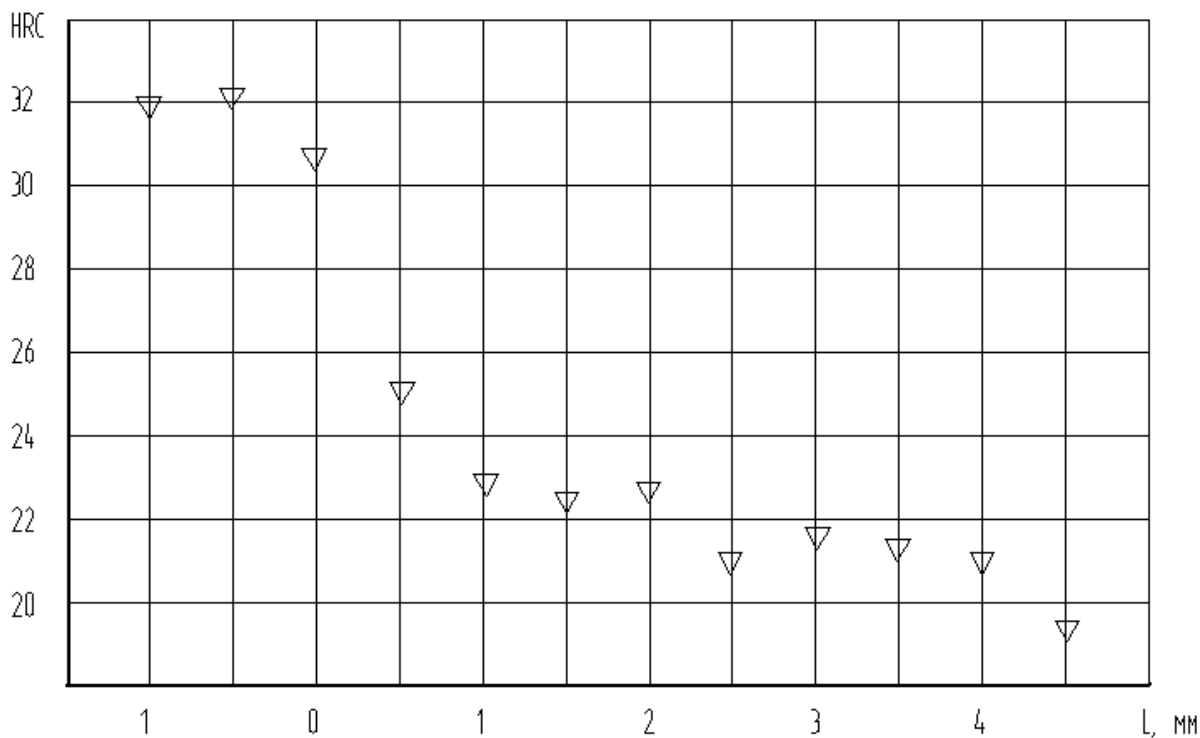


Рисунок 33 – Твердость слоя, полученного наплавкой проволокой Нп-08Г2С (И-1)

Результаты измерений твердости наплавленного слоя И-2 проволокой Нп-30ХГСА показаны на рисунке 34.

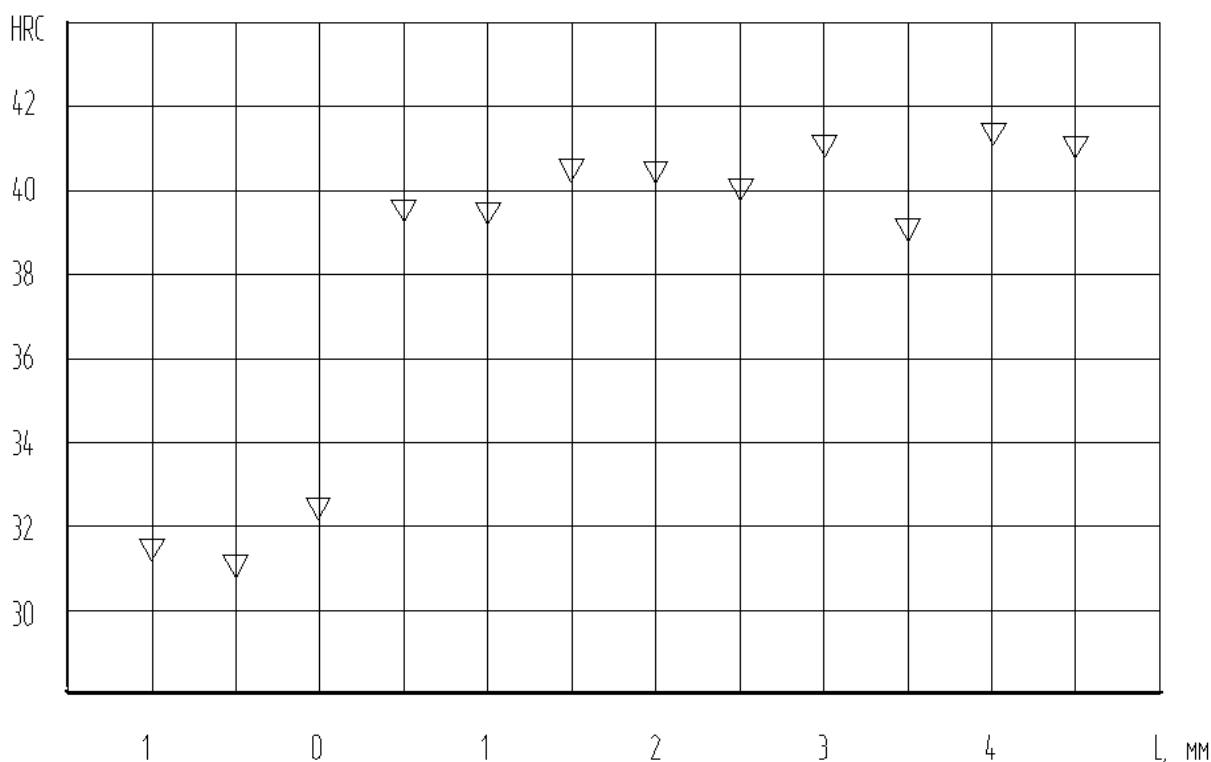


Рисунок 34 – Твердость слоя, полученного наплавкой проволокой Нп-30ХГСА (И2)

Результаты измерения твердости для комбинированного слоя, наплавка выполнялась проволоками Св-08Г2С и Св-А5 (И-3) показаны на рисунке 35. На приведенных графиках по оси абсцисс отложено расстояние от поверхности образца. Жирная вертикальная линия – раздел между основным металлом и наплавленным.

Показано, что при комбинированной наплавке (И-3) твердость достигает величин 55 HRC. Это больше, чем при наплавке проволокой Нп-30ХГСА. Общеизвестно, что по определению твердость характеризует сопротивление тел проникновению в них других тел. Значит, чем больше твердость наплавленного слоя, тем успешнее будет работать муфта в условиях абразивного изнашивания.

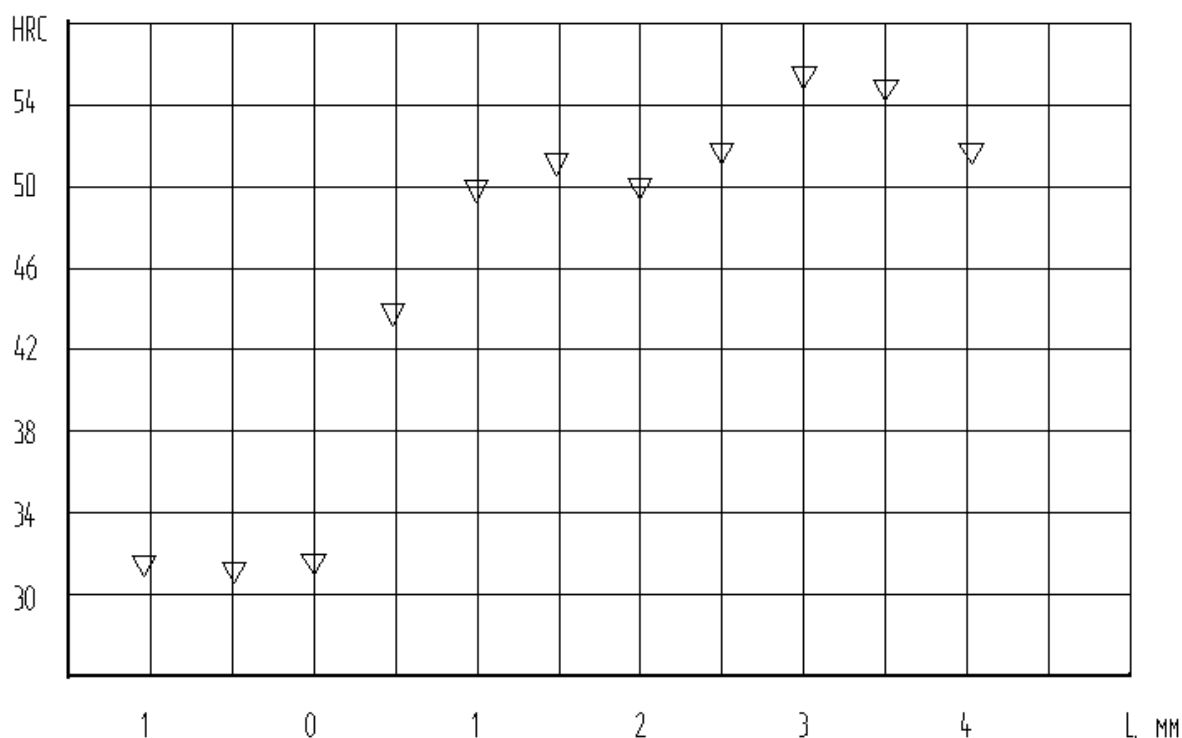


Рисунок 35 – Твердость слоя, полученного наплавкой проволоками Св-08Г2С и Св-А5 (И-3)

3.3 Результаты исследования износостойкости наплавленных слоев

Исследования проводили согласно методике по следующей схеме. Зажимали в тиски, рисунок 25, два образца. Образец – свидетель, в качестве которого принимали образец, вырезанный из слоя наплавленного проволокой Нп-08Г2С (И-1) и образец, вырезанный из слоя наплавленного проволокой Нп-30ХГСА (И-2). Следует отметить, что в работе [2] исследований износостойкости не проводилось. Затем включали машину трения на 5 минут. Выполняли измерения посредством штангенциркуля. Затем на 5 минут. После выполнения измерений включали снова на 5 минут. Так проделывали опыты 3 раза.

Затем зажимали в тиски образец – свидетель, в качестве которого принимали образец, вырезанный из слоя наплавленного проволокой Нп-08Г2С (И-1) и образец, вырезанный из слоя наплавленного проволокой Св-08Г2С и Св-А5 (И-3). Результаты измерений также фиксировали через 5 10 и 15 минут.

График износа образца свидетеля показан на рисунке 36. Показаны значения износа по двум кривым – одна износ в паре с образцом 30ХГСА (И-2) другая кривая износ в паре с образцом Св-08Г2С и Св-А5 (И-3).

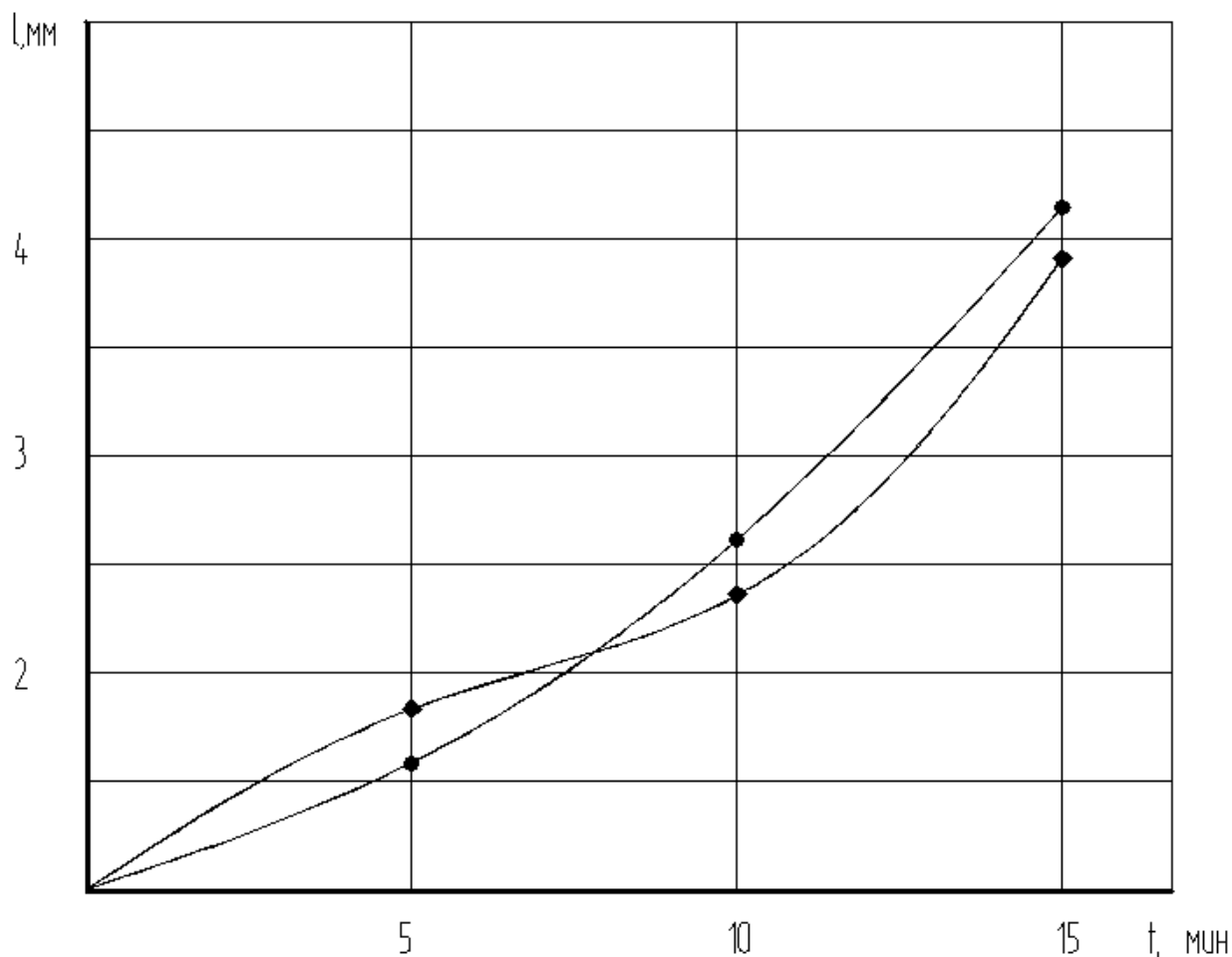


Рисунок 36 – Износ образца свидетеля

Разброс значений, полученных при износе образца сравнительно невелик. Кинетика кривой износа подходит к случаю см. рисунок 24 (в).

График износа образца, вырезанного из слоя наплавленного проволокой 30ХГСА (И-2) показан на рисунке 37. Кинетика кривой износа также близка к случаю см. рисунок 24 (в).

Для образца, вырезанного из покрытия, наплавленного двухдуговым способом, проволокой Св-08Г2С и Св-А5 (И-3) характерным является некоторое стабилизации скорости износа на участке от 10 до 15 минут.

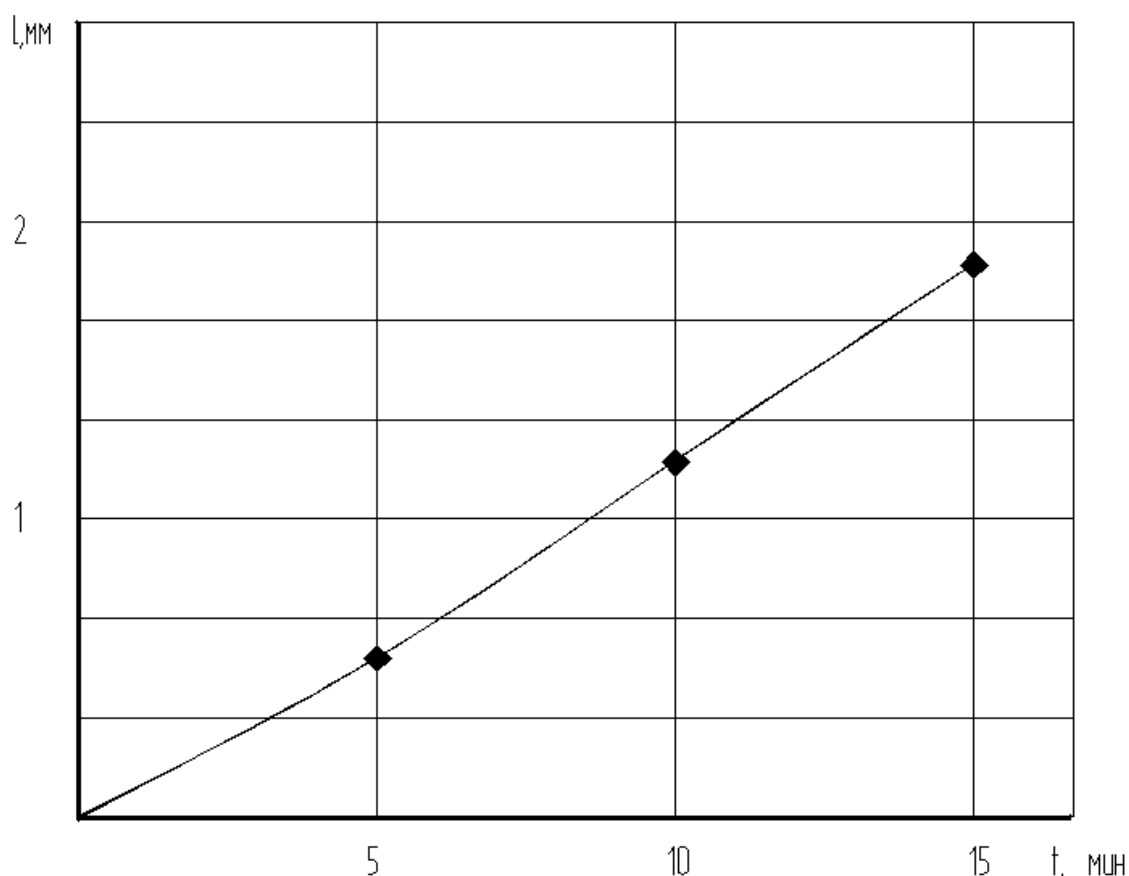


Рисунок 37 – Износ образца наплавленного проволокой Нп-30ХГСА (И-2)

Данное явление является положительным моментом. После этапа приработки наступает этап нормального износа, рисунок 38.

Определение относительной износостойкости выполняли по расчетной зависимости (3). По результатам исследования сравнительной износостойкости можно сделать следующий вывод. Относительная износостойкость, принятая у слоя, наплавленного проволокой Нп-08Г2С (И-1) за единицу у слоя, полученного наплавкой проволокой Нп-30ХГСА (И-2) больше почти в 2 раза. Для слоя, полученного двухдуговой наплавкой (И-3), относительная износостойкость составляет 3,8 (рисунок 3.14).

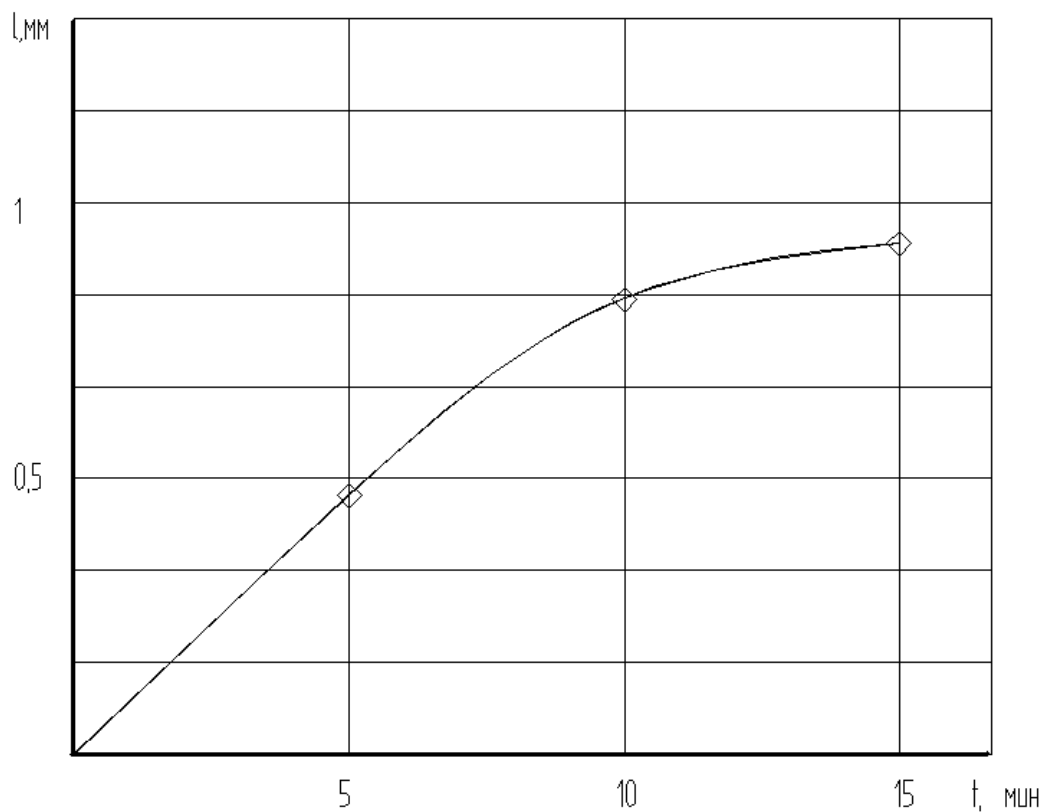


Рисунок 38 – Износ образца наплавленного проволокой Св-08Г2С и Св-А5 (И-3)

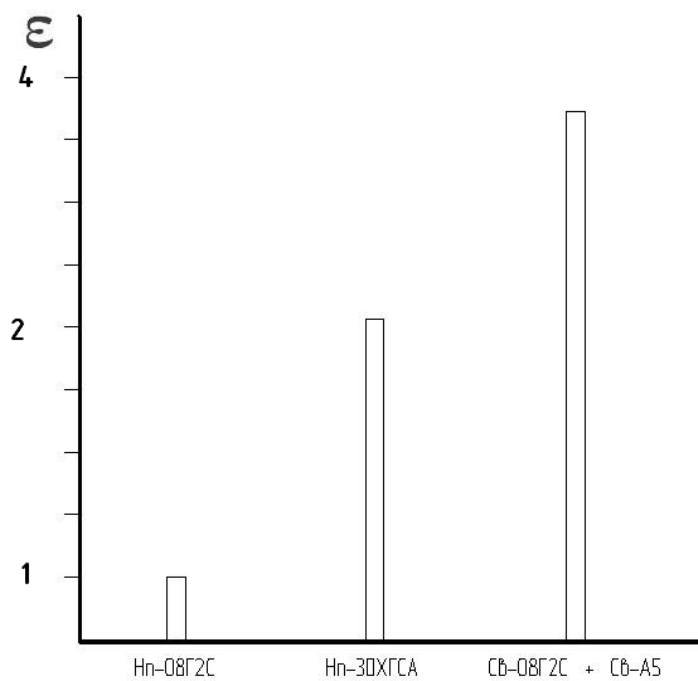


Рисунок 39 – Относительная износостойкость покрытий

4 Технологические рекомендации по наплавке муфт

Сопоставительный анализ полученных результатов экспериментальных исследований показывает, что предпочтительным способом наплавки замковых соединений бурильных труб является двухдуговая наплавка проволоками из алюминия и стали. Получаемый при данном способе наплавленный слой характеризуется высокими значениями твердости и износостойкости.

Анализ результатов показывает, что применяемый метод двухдуговой сварки TIG, обеспечивает получение наплавленных валиков, геометрия которых находится в соответствии с требованиями.

Первая операция технологического процесса – дефектация. Определяется вариант ремонта трубы, и если она нуждается в наплавке слоя для восстановления геометрии, вначале выполняется механическая обработка поверхности муфты. Затем производится обезжиривание поверхности муфты. Для обезжиривания применяется моющее средство типа ТМС УНИВЕКО [2]. Следует выполнять входной контроль защитного газа.

Затем газоздушной горелкой выполняется операция предварительного подогрева. Предварительный подогрев выполняется до температур 240...260 С.

Затем непосредственно выполняется операция наплавки. Устанавливаются параметры режима наплавки. Для горелки, обеспечивающей подачу сварочной проволоки Св08Г2С напряжение на дуге 30 В, скорость подачи присадочной проволоки 6 м/мин. Скорость наплавки 0,3 м/мин. Величина сварочного тока 260-280 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин. Диаметр проволоки

Для горелки, обеспечивающей подачу проволоки Св-А5 напряжение на дуге принимали 30 В, скорость подачи присадочной проволоки 10 м/мин. Величина сварочного тока 240-260 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин.

Наплавка ведется в нижнем положении параллельно образующей. После выполнения валика нельзя сразу после погашения дуги выключать защитный газ, так как разогретый вольфрам окислится, и на его поверхности могут

образоваться раковины. Наплавленный валик охлаждают до температур не ниже температуры предварительного подогрева, и выполняют наплавку следующего валика. Перекрытие валиков выполняют по схеме, см. рисунок 16.

По окончании сварки выполняется 100% визуально-измерительный контроль шва. При необходимости возможно применение лупы 4-7-кратного увеличения и переносного источника света.

Затем выполняется механическая обработка поверхности наплавленного слоя муфты, точение и шлифование посредством ленточной шлифовальной машины BOSCH GRB 14 CE PROFESSIONAL.

Итогом процесса восстановления является капиллярный контроль наплавленного слоя. Такие дефекты как трещины в наплавленном слое можно выявить, применив капиллярный контроль согласно ГОСТ 18442-80, 100%.

Заключение

Цель магистерской диссертации – повышение качества восстановленных муфт труб бурильных путем подбора способа наплавки. По ходу выполнения выпускной квалификационной работы была изучена литература по теме нанесения упрочняющих покрытий на муфты бурильных труб. Прочитаны научные статьи отечественных и зарубежных авторов, посвященные продлению срока службы муфт бурильных труб. Выполнялся поиск и анализ патентов в России и за рубежом по теме нанесения покрытий на муфты бурильных труб с целью уменьшения интенсивности их износа.

Анализ научной и патентной литературы позволил найти способы нанесения покрытий, обеспечивающие повышение срока эксплуатации муфт труб бурильных, но обладающие высокой эффективностью с экономической точки зрения. Главные источники информации, которые принимались во внимание – труды ученых Тольяттинского государственного университета по наплавке комбинированных слоев железо-алюминий.

Разработана методика, включающая в себя исследования твердости и износостойкости перспективных вариантов нанесения покрытий. Проведенные экспериментальные исследования обеспечили данными, согласно которым наилучшим вариантом покрытия признана система железо-алюминий.

При определении режимов наплавки покрытия системы железо-алюминий ориентировались на результаты работы Бочкарева А.Г. Параметры режима двухдуговой наплавки составляют для горелки, обеспечивающей подачу сварочной проволоки Св08Г2С напряжение на дуге принимали 30 В, скорость подачи присадочной проволоки 6 м/мин, скорость наплавки 0,3 м/мин, величина сварочного тока 260-280 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин. Для горелки, обеспечивающей подачу алюминиевой проволоки. Напряжение на дуге принимали 30 В. Скорость подачи присадочной проволоки 10 м/мин. Величина сварочного тока 240-260 А. Расход аргона головки 8-10 л/мин.

Для слоя наплавленного по указанной методике показаны значения твердости, превышающие 40 HRC. Что больше, чем значения твердости слоя, получаемого наплавкой проволокой Нп-30ХГСА. Исследования сравнительной износостойкости получаемого комбинированной наплавкой слоя также показали, что износостойкость в 2 раза больше, чем износостойкость слоя, получаемого наплавкой проволокой Нп-30ХГСА.

Вместе с тем, пластические характеристики слоя являются достаточными, для обработки получаемой поверхности резанием.

Полученные результаты выпускной квалификационной работы могут применяться на предприятиях соответствующего профиля для нанесения покрытий на поверхность муфт, обеспечивающих увеличение срока службы изделия. Это безусловно окажет положительный экономический эффект, что немаловажно в нынешней непростой экономической ситуации.

Цель достигнута.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Алешин, Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. М.: Высшая школа, 1986. 167 с.
2. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.
3. Арефьев И.В. Снижение остаточных напряжений в восстановленных наплавкой конструкциях из низкоуглеродистых сталей электродуговой обработкой. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Волгоград, 2011. 21 с.
4. Бадретдинов Т.В., Ямалиев В.У. Анализ колебаний бурильной колонны и применения демпфирующих устройств // Нефтегазовое дело. 2016. № 6. С. 5-22.
5. Балицкий, П.В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. М.: Недра, 1975. 293 с.
6. Бочкарев А.Г. Исследование процессов наплавки жаростойких покрытий системы железо-алюминий // Магистерская диссертация. Тольятти, ТГУ. – 2017. – 132 с. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/9905>.
7. Булатов А.И., Проселков Е. Ю., Проселков Ю.М. Бурение горизонтальных скважин. Краснодар: Совет. Кубань. 2008. – 424 с.
8. Буслаев В.Ф., Молоканов Д.Р. Снижение сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин за счет протяженности ствола // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. 2008. № 2. С. 26-29.
9. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.
10. Гайнетдинов, И.Н. Ремонтная наплавка замковых соединений бурильных труб // Бакалаврская работа. Тольятти, ТГУ. – 2019. – 42 с. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/9905>.

11. Глазов В.В., Работинский Д.Н., Дьяков А.Н. Восстановительная наплавка замков бурильных труб // Сварочное производство. 2013. № 8. с. 32-34.
12. Голиков, Н.И. Исследование перераспределений остаточных напряжений при циклическом нагружении сварных соединений / Голиков Н. И. Сидоров М.М. // Сварочное производство. – 2013. – № 12. – С. 18-20.
13. Горохов, В.А. Восстановление износа деталей машин / В.А. Горохов, О.Г. Девойно, В.П. Иванов и др. - Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2020. - 380 с.
14. Гуревич, А.К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений / А.К. Гуревич. - Киев: Укртехиздат, 1963. - 152 с.
15. Гусев, В.В. Газопламенное упрочнение буровых замков бурильных труб самофлюсующимися порошками / В.В. Гусев // Сварочное производство. – 1991. – № 4. – 25 с.
16. Дудко Д.А., Шнайдер Б.И., Тухметов Р.Ю., Вербицкий В.Г., Ланда М.И., Тимашев Р.М. Повышение эффективности газовой защиты сварочных горелок. — Автоматическая сварка, 1974, № 9, с. 47—49.
17. Иванов, В.П. Механизм разрушения валов с покрытиями, работающих в условиях циклического нагружения / Иванов В.П., Вигерина Т.В. // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 3 (24). С. 30-36.
18. Ильященко Д.П. Влияние энергетических характеристик инверторного источника питания на химический состав и микроструктуру сварного шва из стали 12Х18Н10Т // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013 – №. 4. – С. 178–180.
19. Казаков, Ю.В. Магистерская диссертация: учебно-методическое пособие по выполнению выпускной квалификационной работы / Ю.В. Казаков. – Тольятти, ТГУ, 2017. – 60 с.
20. Калачев И.Ф. Новое поколение бурильных труб / И.Ф.Калачев // Бурение и нефть. 2011. № 5. С. 51-52.
21. 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.
22. 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.
23. Ковтунов А.И. Влияние подогрева на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы титан-алюминий / А.И. Ковтунов, А.А. Гуцин, А.Г. Бочкарёв // Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» - Стерлитамак: Агентство международных исследований, 2018. - С.60-66.
24. Ковтунов А.И. Особенности применения сплавов системы железо-алюминий для наплавки покрытий литейных форм / А.И. Ковтунов, Д.И. Плахотный, А.Г. Бочкарев. // Сварочное производство. – 2017. - №1. – С. 31-35.
25. Ковтунов А.И. Физико-химическая кинетика взаимодействия алюминия со сталью при формировании металла шва с заданными свойствами: дисс. док. тех. наук/ А.И. Ковтунов. – Тольятти, 2011. – 357 с.
26. Козловский Е.А. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Е.А. Козловский и др. - М: Недра, 1984. - 490 с.
27. Козулин, М.Г. Технология изготовления сварных конструкций. Учеб-метод. пособие к курсовому проектированию. - Тольятти: ТГУ 2008.-77 с.
28. Коротков, В.А. Наплавка железнодорожных колес проволокой Нп-30ХГСА / В.А. Коротков, В.А. Чубелов // Сварочное производство. - 2001. - № 2. С. 29-
29. Косинцев В.И. Основы проектирования химических производств и оборудования / В.И. Косинцев [и др.] – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – 395 с.

30. Купавых, В.А. Влияние фракционного состава механических примесей на износ скважинного оборудования / Купавых В.А., Мерзляков В.Ф., Валеев М.Д. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 3 (105). С. 52-58.
31. Мазур А.А. Порошковые проволоки на мировом и региональном рынках сварочных материалов / А.А. Мазур, О.К. Маковецкая, С.В. Пустовойт, Н.С. Бровченко // Автоматическая сварка. 2015. № 5-6 (742). С. 68-74.
32. Михеев Д.А. Оптимизация технологии восстановления бурильных труб методом наплавки // Материалы IV Международной научно-практической конференции (Москва, 22 сентября 2014 г.). «Современные научные исследования: методология, теория, практика», М.: Грифон, 2014. - С.129 - 136.
33. Михеев Д.А. Подбор защитной атмосферы при восстановлении замковых соединений бурильных труб // Сборник научных статей 1У-ой Международной научно-практической конференции 17-18 октября 2014 года «Перспективное развитие науки, техники, технологий», Курск, 2014. - С.226-230.
34. Национальный институт авиационных технологий. Производственная инструкция Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов – М.:2000-134с.
35. Нефедьев С.П. Методика исследования износостойких покрытий, полученных плазменным селективным припеканием порошков на машине трения СМЦ-2 / Нефедьев С.П., Харченко М.В., Дема Р.Р., Шаповалов А.Н., Вдовин К.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 8. С. 53-55.
36. Пичкасков, А.Н. Исследование процессов и разработка технологии наплавки шпули для рулонирования алюминиевого проката // Магистерская диссертация. Тольятти, ТГУ. – 2017. – 132 с. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/9905>.

37. Рудзей, Г.Ф. Особенности статистической обработки результатов усталостных испытаний / Г.Ф. Рудзей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. - Т. 70, №1. - С. 66-70.
38. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М., Машгиз, 1951. 296 с.
39. Селяненок, В.Н. Зависимость давления сварочной дуги от параметров вольфрамового электрода / В.Н. Селяненок, В.В. Степанов, Р.З. Сайфиев // Сварочное производство. - 1980. - № 5. - С. 5 - 7.
40. Сергеев Ю.Е., Бабков Г.Г. Система автоматического регулирования длины непрерывно горящей дуги. — В кн.: Разработка и внедрение прогрессивных методов сварки и изготовления сварных изделий на предприятиях машиностроения. Тезисы докладов научно-технической конференции. Омск. 1973, с. 41—44.
41. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М.Н.Степнов. М.: Машиностроение, 1985.- 231 с.
42. 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.
43. Сушон, Л.Я. Управление искривлением наклонных скважин в Западной Сибири / Л.Я. Сушон, П.В. Емельянов, Р.Т. Муллагалиев. – М.: Недра. – 1988. – 124с.
44. Тихонов, А.Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А.Н. Тихонов, М.В. Уфимцев. М.: Изд-во МГУ, 1988. - 174 с.
45. Троицкий, В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений / В.А. Троицкий. ИЭС им. Е.О. Патона НАЛ Украины. - 1997. - 224 с.
46. 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.

47. Чебац, В.А. Сварочные работы: Учеб. пособие / В.А. Чебац - 3-е изд. перераб.- Ростов-на-Дону: изд. центр «Феникс», 2006. - 412 с.
48. Щербинский, В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. - М.: изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. - 496 с.
49. Шульга Г.И., Скринников Е.В., Шульга Т.Г. Оценка эффективности водорастворимых технологических смазочных средств при алмазно-абразивной обработке на машине трения СМЦ-2 // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3 (30). С. 63.
50. Abdo J., Hassan E., Al-Shabibi A., Kwak J. Design of a Testing Facility for Investigation of Drill Pipes Fatigue Failure // The Journal of Engineering Research. 2017. Volume 14. Issue 2. PP. 105-114. URL:
<https://journals.squ.edu.om/index.php/tjer/article/view/2345/2253>
51. Argirov J., Yankova R., Antonov G. Study Fatigue in Materials of Drill Pipes // TEM Journal. 2016. Volume 5. Issue 1. PP. 50-55. URL:
http://www.temjournal.com/content/51/08/TemJournalFebruary2016_50_55.pdf
52. Bruce, W.A., Amend W.E. Advantages of Steel Sleeves over Composite / W.A. Bruce, W.E. Amend. Materials for Pipeline Repair, Evaluation, Rehabilitation & Repair of Pipelines, Clarion Technical Conferences and Tiratsoo Technical. Berlin. October 20–21, 2010.
53. Haige W., Yunhua G., Lin S. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016-2020) // Natural Gas Industry B. 2017. Volume 4. Issue 5. PP. 319-326. URL: <https://doaj.org/article/6d8533cbaee044caaf159a0e28abbb0d>
54. Lekovic B., Sumar N., Karovic-Maricic V., Danilovic D. The radial cutting torch device application due to drill string sticking // Podzemni Radovi. 2016. Volume 2016. Issue 28. PP. 29-38. URL:
<https://doaj.org/article/50aa63b9f5ed4964b924dc9dc5f6bb8a>
55. Hassan E., Abdo J., Kwak J., Al Shabibi A. Drillstring Failure: Analytical and Experimental Approach // MATEC Web of Conferences. 2019. Volume 300. PP. 1-8. URL: <https://doaj.org/article/6a84577cd5374a4cb407dad3be51c7b1>

56. Raican I., Provoked damages in the domestic crude oil pipeline system
// Journal of Engineering Studies and Research. 2012. Volume 18. Issue 4. PP. 140-150. URL:
http://journaldatabase.info/articles/provoked_damages_domestic_crude_oil.html
57. Sanchez F.J., Al-Abri O.S. Tube Expansion Under Various Down-Hole End Conditions // The Journal of Engineering Research. 2013. Volume 10. Issue 1. PP. 25-40. URL:
<https://doaj.org/article/15aef0be77de4b95b1ab47f3e385b9ab>
58. Simion P. Free torsional vibrations of big diameter drill string and 103/4" drill pipe breaking // Journal of Engineering Studies and Research. 2012. Volume 18. Issue 1. PP. 140-150. URL:
<https://doaj.org/article/ec563d9175fa4fac922ca65bfac677c7>
59. Shaikh S.N. Vibratory Residual Stress Relieving- A Review // Journal of Mechanical & Civil Engineering, 2016. № 3. P. 01–04.
60. Thomazic A., Rodrigues R., Thebault F., Mauries S., Flores V., Lambet E. New generation of Sour Service Drill Pipe allows addressing highly sour field challenges // MATEC Web of Conferences. 2013. Volume 7. PP. 1-3. URL:
<https://doaj.org/article/74a8bb15468449baab7213478e9db436>
61. Yuchun K., Wei L., Yang L., Qin W., Jianzhong Z. Numerical modelling and field experimental validation of the axial load transfer on the drill-strings in deviated wells // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2020. Volume 75. PP. 3-18. URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510019303762>.
62. Yuanwei S., Meng M., Xiaodong D., Yuanfang C., Yanli W., Shuxin D., Yongchao H., Guowei P. Large scale experiments of the borehole instability on shale formation influenced by drill pipe rotation // Energy Science & Engineering. 2019. Volume 7. Issue 6. PP. 2895-2920. URL:
<https://doaj.org/article/2eb5e1e222f4465082e0d176b4bb64b3>