

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта

На правах рукописи

ВАН ПЭНФЭЙ

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ РЕЗКИ СТАЛЕЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК**

Направление подготовки 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность 15.06.01_07 «Сварка, родственные процессы и технологии»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы
(диссертации)

Автор работы: Ван Пэнфэй

Научный руководитель: доцент

доктор технических наук,

Паршин Сергей Георгиевич

Санкт-Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШФиТМ Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШФиТМ

Семенча А.В., к.х.н., доцент

Научный руководитель

Паршин С.Г., д.т.н., доцент

Рецензент

Левченко А.М., к.т.н., доцент

Директор ООО «РСЗ МАЦ»

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ РЕЗКИ СТАЛЕЙ.....	10
1.1 Подводно-технические работы с применением подводной сварки и резки.....	10
1.2 Структура рабочего времени при подводно-технических сварочных работах.....	12
1.3 Сущность и производительность дуговых способов подводной мокрой резки сталей.....	19
1.4 Анализ механизмов подводной мокрой резки.....	26
1.5 Задачи работы.....	31
Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ РЕЗКЕ СТАЛЕЙ.....	32
2.1 Методика исследований.....	32
2.2 Механизм и физическая модель подводной мокрой резки.....	35
2.3 Термодинамический анализ реакций диссоциации солей	41
2.4 Термодинамический анализ фазового состава газовой системы при диссоциации шихты.....	44
2.5 Термодинамический анализ фазового состава и теплофизических свойств плазмы.....	46
2.6 Моделирование фазового состава шлаковой фазы.....	53
2.7 Сравнение эффективности реза с применением $FeCO_3$ и KNO_3	55
2.8 Выводы по главе 2.....	57
Глава 3. РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ РЕЗКИ СТАЛЕЙ.....	60
3.1 Методика анализа электрических параметров.....	60

3.2	Исследование технологических свойств опытных порошковых проволок на основе системы $\text{FeCO}_3\text{-KNO}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}$	62
3.3	Анализ плотности вероятности электрических параметров подводной мокрой резки.....	69
3.4	Определение оптимальных концентраций компонентов в составе шихты.....	75
3.5	Выводы по главе 3.....	77
	Общие выводы.....	78
	Список литературы.....	81

ВВЕДЕНИЕ

Подводная сварка и резка широко применяется при строительстве и ремонте ответственных объектов, в том числе нефтегазовых платформ, ветростанций, портов, гидротехнических сооружений, подводных нефтегазопроводов, подъеме и ремонте кораблей.

Обширные исследования в области подводной мокрой сварки и резки ранее были выполнены в СССР в Ленинграде, в Институте электросварки им. Е.О. Патона в Киеве (Украина), в США, Китае, Польше, Бразилии, Германии и Великобритании [1–5]. Большой вклад в исследования процесса подводной мокрой сварки и резки внесли ученые Хренов К.К. [6–8], Савич И.М. [9, 10], Мадатов Н.М. [11], Максимов С.Ю. [12, 13], Грецкий Ю.Я. [14–19], Кононенко В.Я. [20–25], Паршин С.Г. [26–57], Fydrych D. [58–66], Garasik I. [67, 68], Ibarra S. [69–74], Pope A.M. [75–79], Rowe M. [80–84], Klett J. [85, 86] и многие другие.

Подводная сварка и резка производится в опасных условиях при ограниченном времени погружении, при высоком давлении среды на глубинах до 60 метров. Наиболее часто подводная сварка и резка осуществляется водолазами-сварщиками вручную с применением покрытых и трубчатых электродов. Резка применяется для удаления дефектного металла, после которого производится сварка по разрезанным кромкам. Наличие загрязнений, шлака, наводороживание негативно влияет на качество сварки.

Для обеспечения надежности подводных сварных конструкций необходимо обеспечить высокий уровень прочности, пластичности и ударной вязкости [87]. Известно, что подводная мокрая сварка осложняется из-за возникновения холодных трещин, индуцируемых водородом, пористости, шлаковых включений и замедленной водородной хрупкости [88–90]. При подводной мокрой резке сталь претерпевает термическое воздействие и насыщается водородом в зоне термического

влияния, что негативно влияет на последующую сварку разрезанных деталей.

Однако до сих пор подводная мокрая резка осуществляется водолазами вручную с применением покрытых и трубчатых электродов с подачей кислорода. Это снижает качество и производительность подводно-технических работ. После резки часто выполняют сварку по разрезанным кромкам. Наличие загрязнений, шлака и наводороживание ухудшает качество сварных соединений, снижает прочность, пластичность и ударную вязкость. Недостатки ручной резки могут быть устранены за счет разработки и внедрения технологии мокрой автоматической и механизированной резки порошковыми проволоками. Однако в РФ отсутствуют порошковые проволоки для резки, а металлургические процессы и механизм подводной мокрой резки исследованы недостаточно, что обуславливает актуальность настоящей работы.

На основании вышеизложенного сформулирована

Цель работы: повышение производительности и качества подводной мокрой резки сталей путем разработки порошковых проволок окислительного типа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм подводной мокрой резки и каналовая модель формирования реза при окислении металла газовой смесью в активной зоне вокруг анодного пятна дуги с образованием шлака в условиях электрического процесса, состоящего из рабочих и холостых циклов с короткими замыканиями.

2. Результаты моделирования металлургических процессов, фазового состава, термодинамических и теплофизических характеристик газовых окислительных систем, плазмы и шлака при подводной мокрой

резке с применением порошковых проволок с шихтой окислительного типа.

3. Составы порошковых проволок и результаты их испытаний при подводной мокрой резки сталей.

Научная новизна работы:

1. Обнаружен циклический механизм подводной мокрой дуговой резки порошковой проволокой, который состоит из формирования прорези внутри парогазового пузыря под воздействием рабочих и холостых циклов тока и напряжения с короткими замыканиями. Выявлено, что механизм подводной мокрой резки состоит из 5 последовательных фаз, которые имеют общую связь с электрическими параметрами, свойствами дуги, металлургическими процессами и динамикой парогазового пузыря, которая состоит из 6 фаз.

2. Разработана каналовая модель подводной мокрой резки с применением порошковых проволок, которая заключается в формировании узкого канала реза при углублении и удлинении дуги в металле за счет окислительных реакций металла с газовой смесью в зоне вокруг активного пятна дуги с образованием тугоплавкого шлака, который вытесняется давлением дуги из канала реза.

3. На основе термодинамического моделирования фазового состава плазмы и шлака установлена возможность создания газовой смеси в зоне реза с высоким окислительным потенциалом, высокой степенью ионизации, энтальпией, теплоёмкостью и теплопроводностью плазмы за счет совместного введения в состав шихты смеси FeCO_3 и KNO_3 в присутствии криолита Na_3AlF_6 и алюминия. Введение FeCO_3 совместно с KNO_3 позволяет повысить энтальпию газовой смеси на 40–70 % и уменьшить отклонения сварочного тока и напряжения в диапазоне температур окисления железа 1000–4000 К.

4. На основе термодинамического моделирования фазового состава плазмы и шлака установлен механизм улучшения стабильности электрических параметров дуги в рабочих и холостых циклах процесса реза за счет введения FeCO_3 и алюминия для улучшения степени ионизации плазмы и уменьшения образования отрицательных ионов фтора и кислорода.

5. Обнаружено, что при окислении металла внутри прорези образуется тугоплавкий расплавленный шлак, который изолирует металл от кислорода и затрудняет процесс резки. Для удаления шлака предложено снижать его поверхностное натяжение через ионное растворение оксидов в криолите Na_3AlF_6 .

Практическая ценность результатов:

1. В результате исследований разработаны и поданы заявки на изобретение двух химических составов порошковых проволок и на способ подводной резки, определены диапазоны концентраций компонентов для окислительных составов шихты и оптимальные режимы, которые обеспечивают стабильное качество реза в воде с применением серийного сварочного оборудования.

2. Для оценки стабильности и эффективности процесса подводной мокрой резки разработана методика компьютерного анализа осциллограмм на основе математической статистики для расчета нормального распределения плотности вероятности силы тока, напряжения и мощности и предложен критерий качества реза, который основан на отношении плотностей вероятности напряжений в холостом и рабочем циклах.

3. Разработан лабораторный стенд для испытаний порошковых проволок при подводной мокрой резке и сварке, который внедрен в учебный процесс при подготовке магистров, бакалавров и аспирантов СПбПУ.

4. Разработаны технологические рекомендации по технике механизированной подводной резки сталей с применением порошковых проволок с использованием подводного комплекса КОПС-М (ООО "УНТЦ "Сварка").

Апробация работы:

Результаты работы докладывались на МНТК "Актуальные вопросы подводной сварки на опасных производственных объектах и оценки квалификации водолазов-сварщиков" (Санкт-Петербург, 2019), МНТК "Актуальные проблемы повышения эффективности сварочного производства 2020" (Санкт-Петербург, 2020), II Всероссийской НТК, посвященной 65-летию ЛГТУ (Липецк, 2021), XVIII МНТК "Материалы и технологии XXI века"(Пенза, 2021), МНК "Современные материалы и передовые производственные технологии" СМППТ-2021 (Санкт-Петербург, 2021), 31-й международной конференции ISOPE-2021 "International Ocean and Polar Engineering Conference" (Родос, Греция, 2021), на заседании секции 26 "Технология и производство сварки" РНТО судостроителей имени академика А.Н. Крылова в СПбГМУ (Санкт-Петербург, 2021), научном семинаре кафедры "Технологии сварки и диагностики" МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2021).

Внедрение результатов

Результаты исследований, лабораторный стенд и технология производства порошковой проволоки внедрены в учебную и научную деятельность ФГАОУ ВО "СПбПУ" при подготовке аспирантов по направленности 15.06.01_07 "Сварка, родственные процессы и технологии", магистров и бакалавров по направлению "Металлургия".

Личный вклад соискателя заключается в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, разработке

лабораторного стенда и технологии для производства порошковых проволок, расчетно-экспериментальном моделировании составов проволок, математической обработке результатов.

Публикации: по материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 статьи в Scopus, поданы 2 заявки на получение патента РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, общих выводов, списка литературы из 106 наименований и приложения. Диссертация изложена на 91 странице машинописного текста, содержит 80 рисунков и 4 таблицы.

Глава 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ РЕЗКИ СТАЛЕЙ

1.1. Подводно-технические работы с применением подводной сварки и резки

Подводно-технические работы разделяются на долгосрочные, краткосрочные и аварийно-спасательные. Обычно работы производятся на глубинах до 30 м, краткосрочно на глубинах до 60 м и в экстремальных случаях спасения на глубинах до 100 м. Подводная резка применяется для удаления дефектного металла при ремонте металлических конструкций, а также для резки и строжки металлических деталей при монтаже и строительстве подводных объектов с последующей сваркой [91–97]. Поскольку подводная резка часто предшествует сварке, к качеству и производительности резки предъявляются повышенные требования. Типичные объекты, выполненные с применением подводной сварки и резки представлены на рис. 1–3.



Рис. 1. Монтаж морской ледостойкой платформы «Приразломная» в Баренцевом море. Ремонт защитной дамбы (Санкт-Петербург)



Рис. 2. Монтаж конструкций в грузовом порте Бронка (Санкт-Петербург) и оффшорных ветростанций в Норвежском море

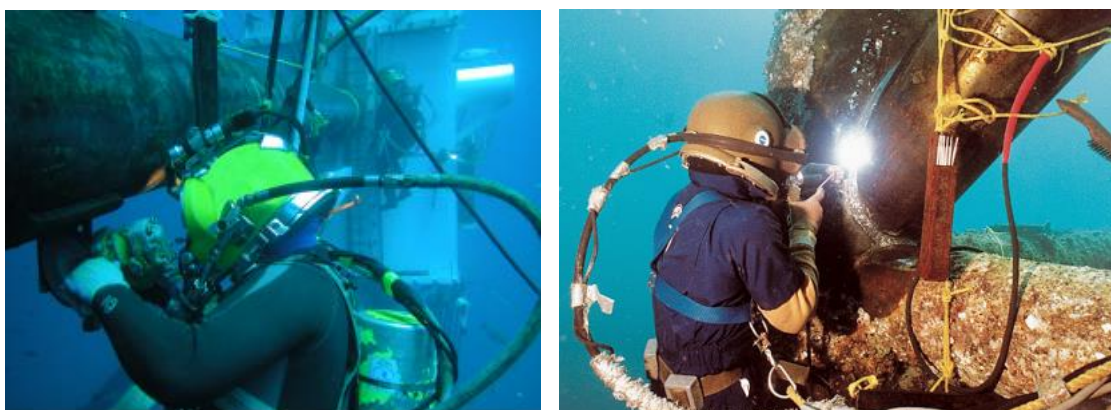


Рис. 3. Ремонт подводных нефтегазопроводов и нефтедобывающей платформы

При подводно-ремонтных сварочных работах необходимо выполнять организационно-технические мероприятия, которые предусматривают разработку проекта производства работ, выполнение мероприятий по охране труда и технике безопасности, проведение процедуры аттестации водолазов-сварщиков, специализированного сварочного и вспомогательного оборудования, водолазов-дефектоскопистов, технологии подводной ручной и механизированной сварки, сварочных покрытых электродов и порошковой проволоки. Для успешного выполнения всех организационно-технических мероприятий требуется

соблюдение нормативных документов и стандартов.

Требования к сварочному персоналу и водолазам-сварщикам должны соответствовать РД 31.84.01-90 «Единые правила безопасности труда на водолазных работах». Для защиты водолазов-сварщиков от излучений сварочной дуги в видимой и инфракрасной области должны применяться защитные светофильтры по ГОСТ Р 12.4.238-2007 «Средства индивидуальной защиты глаз и лица при сварке и аналогичных процессах. Общие технические условия». Снаряжение водолазов-сварщиков должно соответствовать требованиям Единых правил безопасности труда на водолазных работах.

К водолажным спускам и работам допускаются работники, имеющие документ о профессиональном образовании по водолажному делу, личную медицинскую книжку водолаза с заключением водолазно-медицинской комиссии (ВМК) о пригодности к подводным работам с указанием, по состоянию здоровья, максимальной глубины погружения в текущем году и личную книжку водолаза с заключением водолазно-квалификационной комиссии (ВКК), в котором установлена глубина погружения на текущий год.

1.2. Структура рабочего времени при подводно-технических сварочных работах

В работе [2] выполняли подводную сварку образцов контрольных сварных соединений (КСС) из стали с классом прочности К60 в водной среде при ручной и механизированной дуговой сварке с применением источника питания «Магма-315У» с погружным блоком подачи проволоки «Нептун-4» на глубине 14 м при сварке стыковых и нахлесточных соединений фрагментов труб размером 300×200×21,3 мм, рис. 4.

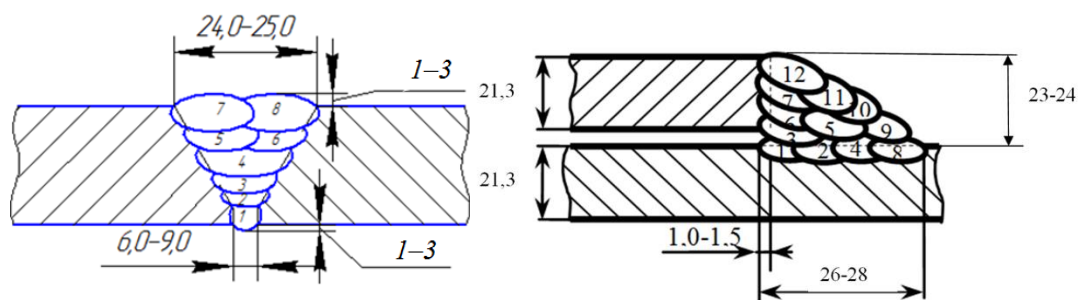


Рис. 4. Конструкция стыкового и нахлесточного сварного соединения при подводной ручной и механизированной сварке [2]

При ручной сварке использовали покрытые электроды BROCO SOFT TOUCH марки UW/CS диаметром 3,2 мм. При механизированной сварке применяли порошковую проволоку марки ППС-АПЛ2 диаметром 1,6 мм. Хронометраж операций при сварке представлен в табл. 1, 2.

Таблица 1

Хронометраж операций при ручной сварке стыкового и нахлесточного соединения покрытыми электродами [2]

№ операции	Наименование операции	Время начала, час.мин	Время окончания, час.мин	Время на операцию, мин
1.	Подготовка оборудования	12.20	12.50	30
2.	Сборка стыков	12.50	13.20	30
3.	Подготовка водолаза-сварщика	13.20	13.40	20
4.	Спуск под воду водолаза-сварщика	13.40	13.55	15
5.	Спуск под воду оборудования и стыков	13.55	14.05	10
6.	Подготовка сварочного поста	14.05	14.15	10
7.	Настройка режима сварки	14.15	14.25	10
8.	Сварка 1-го прохода СШ	14.25	14.30	5
9.	Зачистка шва после 1-го прохода СШ	14.30	14.33	3
10.	Сварка 1-го прохода НШ	14.30	14.40	10
11.	Зачистка шва после 1-го прохода НШ	14.44	14.58	14
12.	Сварка 2-го прохода СШ	14.45	14.57	12
13.	Зачистка шва после 2-го прохода СШ	14.59	15.10	11
14.	Сварка 2-го прохода НШ	14.58	15.05	7
15.	Зачистка шва после 2-го прохода НШ	15.07	15.13	6
16.	Сварка 3-го прохода СШ	15.07	15.15	8
17.	Зачистка шва после 3-го прохода СШ	15.17	15.21	4
18.	Сварка 3-го прохода НШ	15.09	15.23	14
19.	Зачистка шва после 3-го прохода НШ	15.25	15.38	13
20.	Сварка 4-го прохода СШ	15.28	15.39	11

№ операции	Наименование операции	Время начала, час.мин	Время окончания, час.мин	Время на операцию, мин
21.	Зачистка шва после 4-го прохода СШ	15.41	15.45	4
22.	Сварка 4-го прохода НШ	15.42	15.47	5
23.	Зачистка шва после 4-го прохода НШ	15.49	15.53	5
24.	Сварка 5-го прохода СШ	15.49	15.58	9
25.	Зачистка шва после 5-го прохода СШ	15.59	16.03	4
26.	Сварка 5-го прохода НШ	16.10	16.30	20
27.	Зачистка шва после 5-го прохода НШ	16.22	16.36	14
28.	Сварка 6-го прохода СШ	16.30	16.37	7
29.	Зачистка шва после 6-го прохода СШ	16.39	16.45	6
30.	Сварка 6-го прохода НШ	16.39	16.49	10
31.	Зачистка шва после 6-го прохода НШ	16.51	16.58	7
32.	Сварка 7-го прохода СШ	16.50	17.03	13
33.	Зачистка шва после 7-го прохода СШ	17.05	17.10	5
34.	Сварка 7-го прохода НШ	17.05	17.10	5
35.	Зачистка шва после 7-го прохода НШ	17.12	17.19	7
36.	Сварка 8-го прохода СШ	17.11	17.23	12
37.	Зачистка шва после 8-го прохода СШ	17.24	17.31	7
38.	Сварка 8-го прохода НШ	17.23	17.33	10
39.	Зачистка шва после 8-го прохода НШ	17.35	17.43	8
40.	Сварка 9-го прохода СШ	17.35	17.44	9
41.	Зачистка шва после 9-го прохода СШ	17.45	17.57	12
42.	Сварка 9-го прохода НШ	17.49	18.03	14
43.	Зачистка шва после 9-го прохода НШ	18.05	18.10	5
44.	Сварка 10-го прохода СШ	18.05	18.13	8
45.	Зачистка шва после 10-го прохода СШ	18.14	18.19	5
46.	Сварка 10-го прохода НШ	18.30	18.40	10
47.	Зачистка шва после 10-го прохода НШ	18.42	18.48	6
48.	Сварка 11-го прохода СШ	18.42	18.50	8
49.	Зачистка шва после 11-го прохода СШ	18.52	18.59	7
50.	Сварка 11-го прохода НШ	18.52	19.08	18
51.	Зачистка шва после 11-го прохода НШ	19.10	19.17	7
52.	Сварка 12-го прохода СШ	19.10	19.20	10
53.	Сварка 12-го прохода НШ	19.20	19.32	12
54.	Уборка сварочного поста	19.32	19.42	20
55.	Подъем оборудования и образцов	19.42	19.47	5
56.	Подъем водолаза-сварщика	19.47	19.57	10
57.	Раздевание водолаза-сварщика	19.57	20.07	10
58.	Уборка рабочего места, окончание работ	20.07	20.27	20

Таблица 2

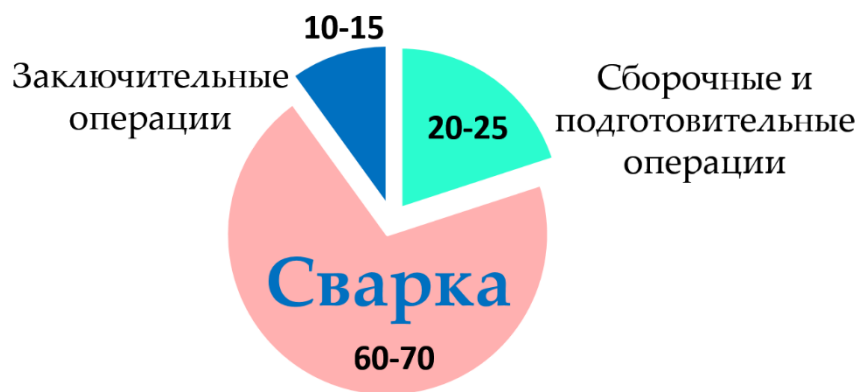
Хронометраж операций при механизированной сварке стыкового и нахлесточного соединения порошковой проволокой [2]

№ операции	Наименование операции	Время начала, час.мин	Время окончания, час.мин	Время на операцию, мин
1.	Подготовка оборудования	09.15	09.45	30
2.	Сборка стыков	09.45	10.15	30
3.	Подготовка водолаза-сварщика	10.15	10.35	20
4.	Спуск под воду водолаза-сварщика	10.35	10.50	15
5.	Спуск под воду оборудования и стыков	10.50	11.02	12
6.	Подготовка сварочного поста	11.02	11.12	10
7.	Настройка режима сварки	11.12	11.22	10
8.	Сварка 1-го прохода СШ	11.22	11.28	6
9.	Зачистка шва после 1-го прохода СШ	11.32	11.39	7
10.	Сварка 1-го прохода НШ	11.35	11.39	4
11.	Зачистка шва после 1-го прохода НШ	11.40	11.46	6
12.	Сварка 2-го прохода СШ	11.42	11.46	4
13.	Зачистка шва после 2-го прохода СШ	11.47	11.53	6
14.	Сварка 2-го прохода НШ	11.50	11.53	3
15.	Зачистка шва после 2-го прохода НШ	11.57	12.05	8
16.	Сварка 3-го прохода СШ	12.00	12.06	6
17.	Зачистка шва после 3-го прохода СШ	12.10	12.20	10
18.	Сварка 3-го прохода НШ	12.12	12.15	3
19.	Зачистка шва после 3-го прохода НШ	12.25	12.28	3
20.	Сварка 4-го прохода СШ	12.25	12.28	3
21.	Зачистка шва после 4-го прохода СШ	12.34	12.39	5
22.	Сварка 4-го прохода НШ	12.33	12.37	4
23.	Зачистка шва после 4-го прохода НШ	12.40	12.44	4
24.	Сварка 5-го прохода СШ	12.39	12.43	4
25.	Зачистка шва после 5-го прохода СШ	12.45	12.50	5
26.	Сварка 5-го прохода НШ	12.46	12.50	4
27.	Зачистка шва после 5-го прохода НШ	12.53	13.05	12
28.	Сварка 6-го прохода СШ	13.22	13.28	6
29.	Зачистка шва после 6-го прохода СШ	13.29	13.40	11
30.	Сварка 6-го прохода НШ	13.30	13.34	4
31.	Зачистка шва после 6-го прохода НШ	13.40	13.48	8

№ операции	Наименование операции	Время начала, час.мин	Время окончания, час.мин	Время на операцию, мин
32.	Сварка 7-го прохода СШ	13.43	13.51	8
33.	Зачистка шва после 7-го прохода СШ	13.52	13.57	5
34.	Сварка 7-го прохода НШ	13.56	14.02	6
35.	Зачистка шва после 7-го прохода НШ	14.03	14.07	4
36.	Сварка 8-го прохода СШ	14.05	14.09	4
37.	Зачистка шва после 8-го прохода СШ	14.11	14.16	5
38.	Сварка 8-го прохода НШ	14.14	14.18	4
39.	Зачистка шва после 8-го прохода НШ	14.20	14.26	6
40.	Сварка 9-го прохода СШ	14.22	14.26	4
41.	Зачистка шва после 9-го прохода СШ	14.30	14.33	3
42.	Сварка 9-го прохода НШ	14.32	14.36	4
43.	Зачистка шва после 9-го прохода НШ	14.37	14.40	3
44.	Уборка сварочного поста	14.40	15.00	20
45.	Подъем оборудования и образцов	15.00	15.10	10
46.	Подъем водолаза-сварщика	15.10	15.20	10
47.	Раздевание водолаза-сварщика	15.20	15.30	10
48.	Уборка рабочего места, окончание работ	15.30	15.50	20

Хронометраж производственных операций по выполнению КСС в водной среде с участием аттестованных водолазов-сварщиков и дефектоскописта по визуально-измерительному контролю показал, что структура рабочего пооперационного времени при ручной и механизированной сварке КСС фрагментов труб разделяется на подготовительные, сборочные, основные и заключительные производственные операции.

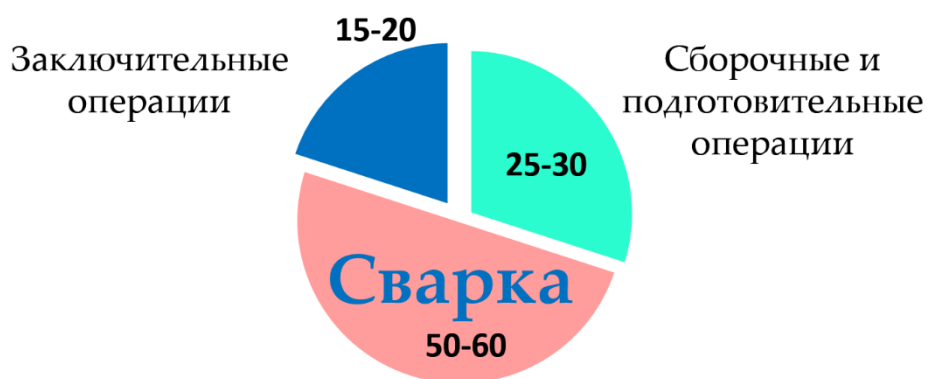
При ручной сварке покрытыми электродами двух КСС в течение одной рабочей смены сборочно-подготовительные операции занимают до 20–25 %, основные операции, включая сварку, зачистку, межваликовый контроль 60–70 % и заключительные до 10–15 % общего рабочего времени, рис. 5.



Ручная дуговая сварка покрытыми электродами, %

Рис. 5. Структура рабочего времени при подводно-технических работах с применением ручной сварки покрытыми электродами

При механизированной сварке порошковой проволокой двух КСС в течение одной рабочей смены сборочно-подготовительные операции занимают до 25–30 %, основные операции, включая сварку, зачистку, межваликовый контроль 50–60 % и заключительные до 15–20 % общего рабочего времени, рис. 6.



Механизированная дуговая сварка порошковой проволокой, %

Рис. 6. Структура рабочего времени при подводно-технических работах с применением механизированной сварки порошковой проволокой

Общее рабочее время при механизированной сварке двух КСС в течение одной смены меньше на 25–30 % по сравнению с ручной сваркой покрытыми электродами, а основное операционное время меньше на 35–45 %, рис. 7, 8.

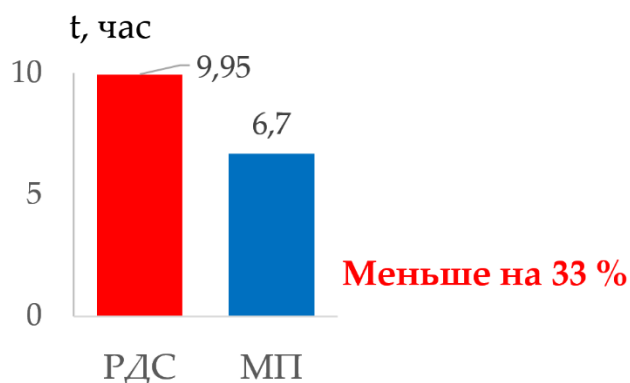


Рис. 7. Общее рабочее время на типовую подводно-техническую работу по ручной и механизированной сварке двух КСС

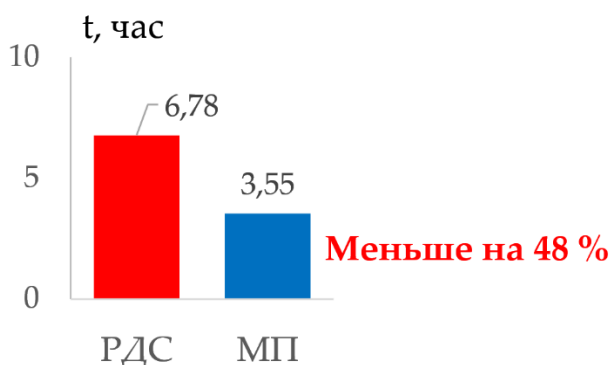


Рис. 8. Рабочее время на ручную и механизированную сварку двух КСС

Трудоёмкость операций и общее рабочее время зависит от ряда факторов, включая квалификацию водолазной группы, надёжности оборудования и правильность организационных мероприятий на месте сварочных работ.

1.3. Сущность и производительность дуговых способов подводной мокрой резки сталей

Согласно классификации К.К. Хренова [1] имеются несколько способов подводной газовой и дуговой термической резки, рис. 9.

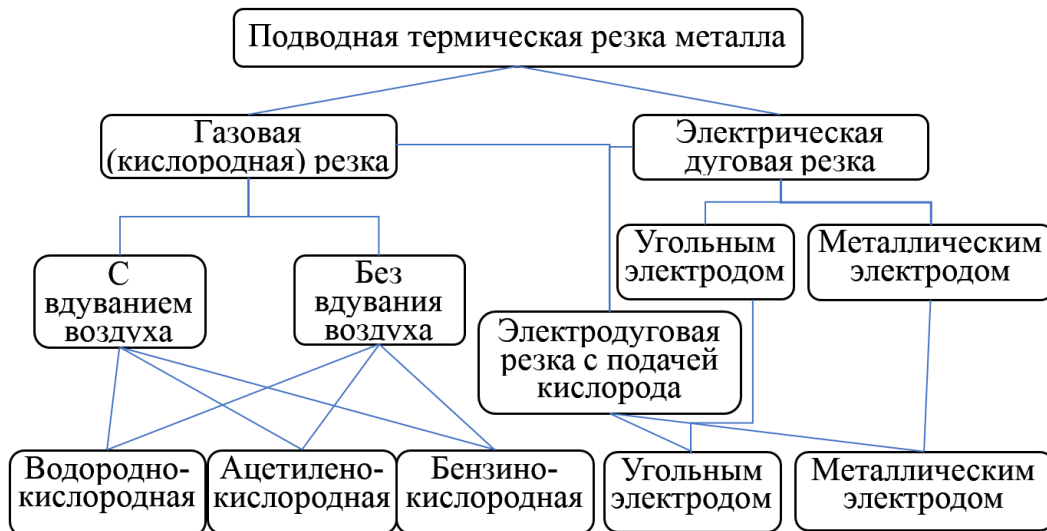


Рис. 9. Классификация основных способов термической резки [1]

Наиболее простыми способами являются дуговые способы резки, среди которых резка металлическим покрытым электродом диаметром 6–7 мм, рис. 10, 11.

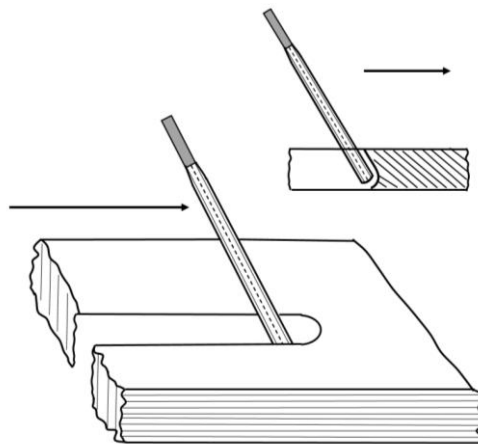


Рис. 10. Положение штучного электрода при подводной резке [1]



Рис. 11. Вид сквозного отверстия, полученного при резке покрытым электродом [1]

Для резки покрытым электродом необходим сварочный ток большой величины, рис. 12.

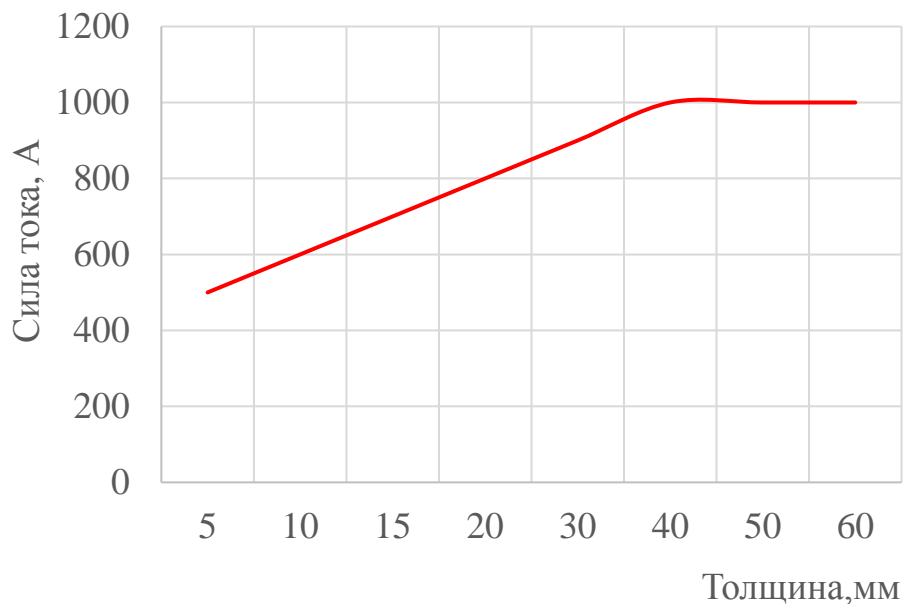


Рис. 12. Зависимость силы тока дуговой резки от толщины [1]

Скорость резки сталей толщиной 10 мм составляет 4 м/ч, рис. 13.

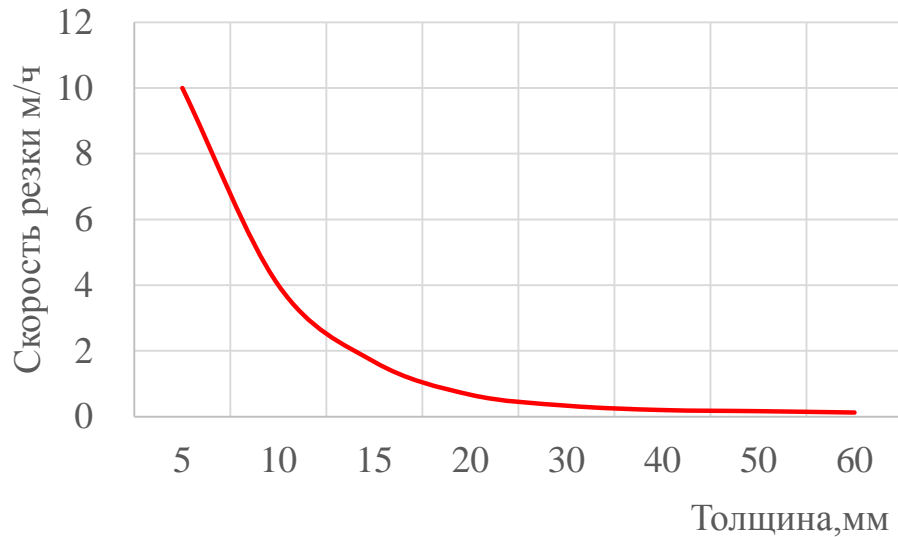


Рис. 13. Зависимость скорости дуговой резки от толщины [1]

Расход электродов зависит от толщины стали и для 10 мм составляет 7 штук при длине электрода 450 мм, рис. 14.

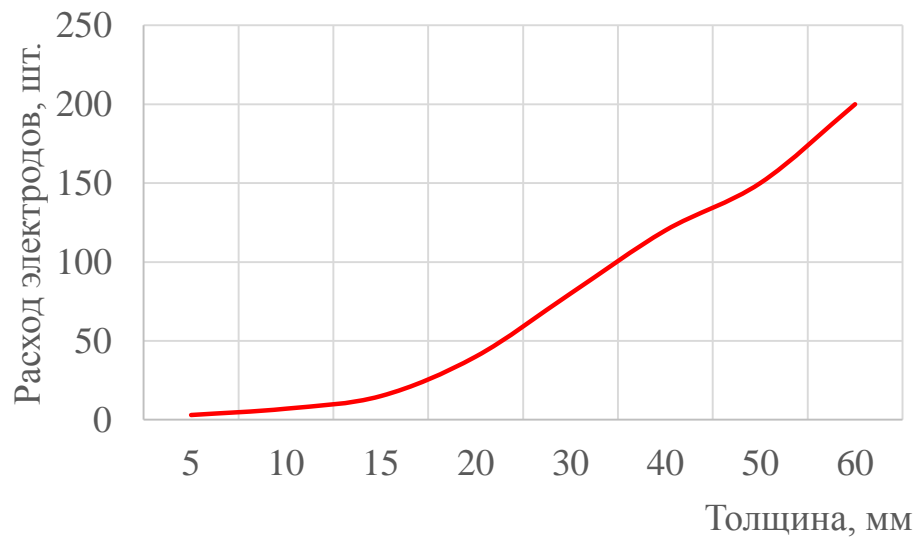


Рис. 14. Зависимость расход электродов на 1 м реза от толщины при электродуговой резке [1]

Другим способом является резка трубчатыми электродами с подачей кислорода, рис. 15–19.

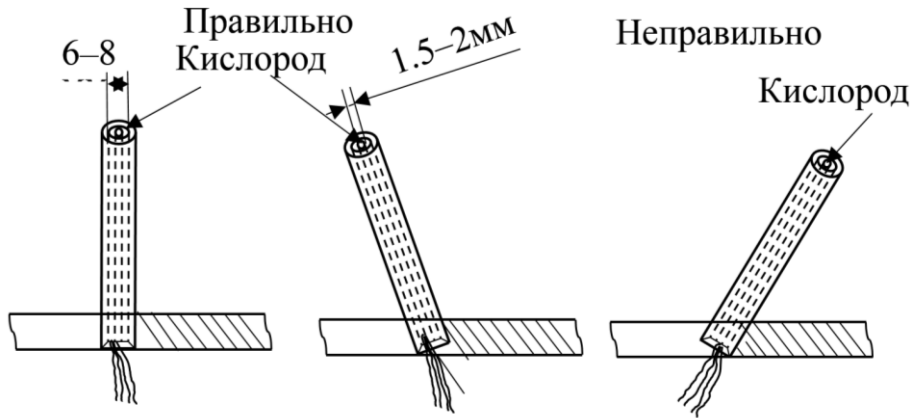


Рис. 15. Резка трубчатым металлическим электродом диаметром 6–8 мм с подачей кислорода [1]

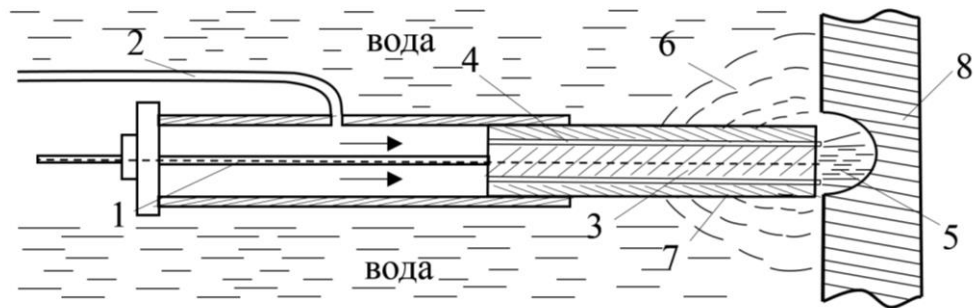


Рис. 16. Схема резки трубчатым угольным электродом [1]: 1 – контакт для подводки тока; 2 – шланг для подвода кислорода; 3 – угольный электрод; 4 – трубочки, пропущенные через электрод для подвода кислорода; 5 – дуга; 6 – газовый пузырь; 7 – обмотка из изоляционной ленты; 8 – разрезаемый металл

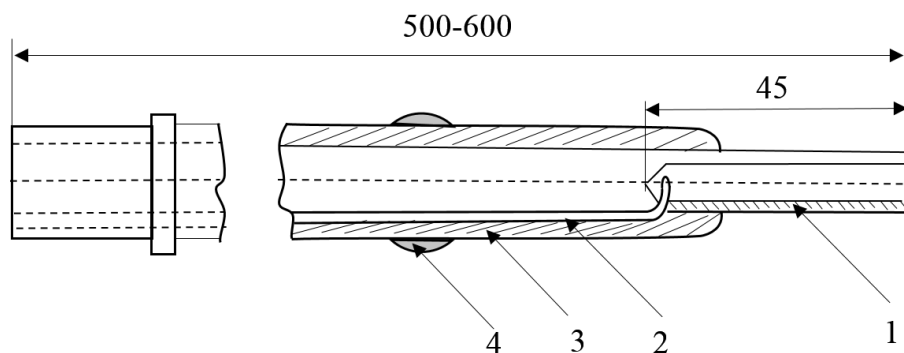


Рис. 17. Трубчатый электрод МЭМИИТ [1]: 1 – электродный стержень; 2 – стеклянная трубка для кислорода; 3 – покрытие; 4 – обвязка ниткой или резиновым кольцом

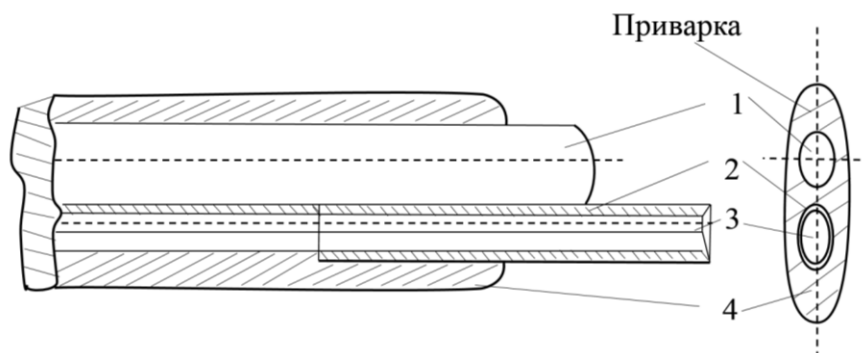


Рис. 18. Комбинированный трубчатый электрод МЭМИИТ [1]: 1 – электродный стержень; 2 – металлическая трубка; 3 – стеклянная трубка; 4 – покрытие

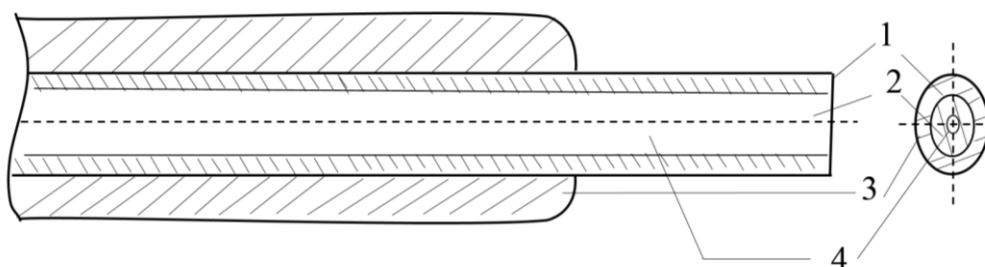


Рис. 19. Медленно сгорающий электрод для подводной дугокислородной резки [1]: 1 – карборундовый стержень; 2 – чугунная оболочка; 3 – изоляция; 4 – канал для кислорода

Резка трубчатым электродом с подачей кислорода требует относительно небольших значений тока, обладает большой производительностью, меньшим расходом электродов, однако требует значительного расхода кислорода, что усложняет процесс резки и увеличивает расходы, рис. 20–23.

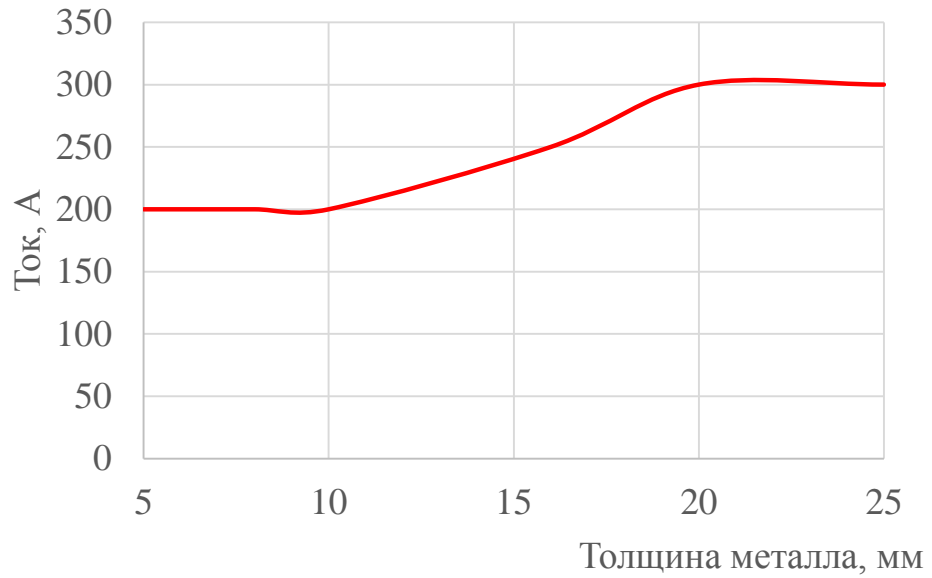


Рис. 20. Зависимость силы тока от толщины металла дуговой резке с подачей кислорода [1]

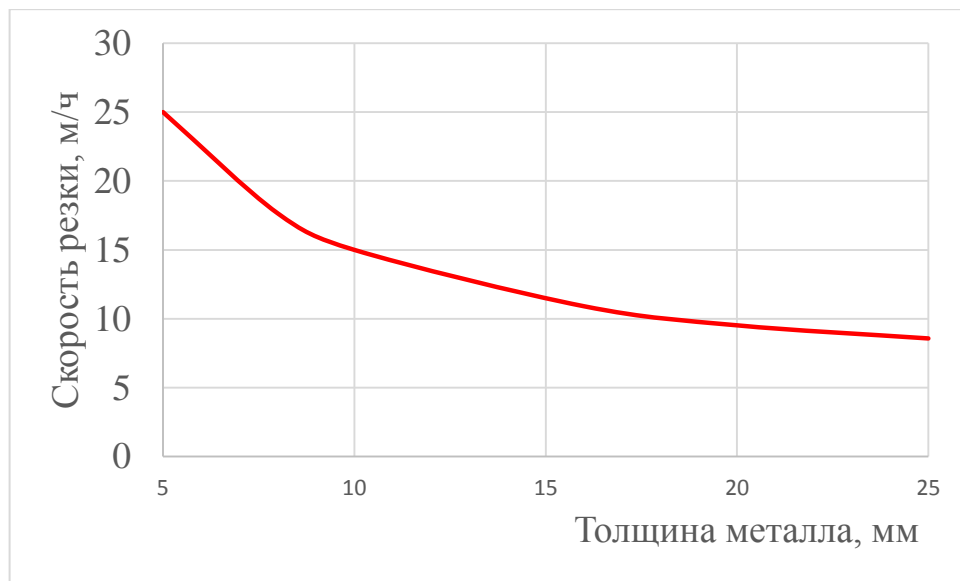


Рис. 21. Зависимость скорости резки трубчатым электродом с подачей кислорода [1]

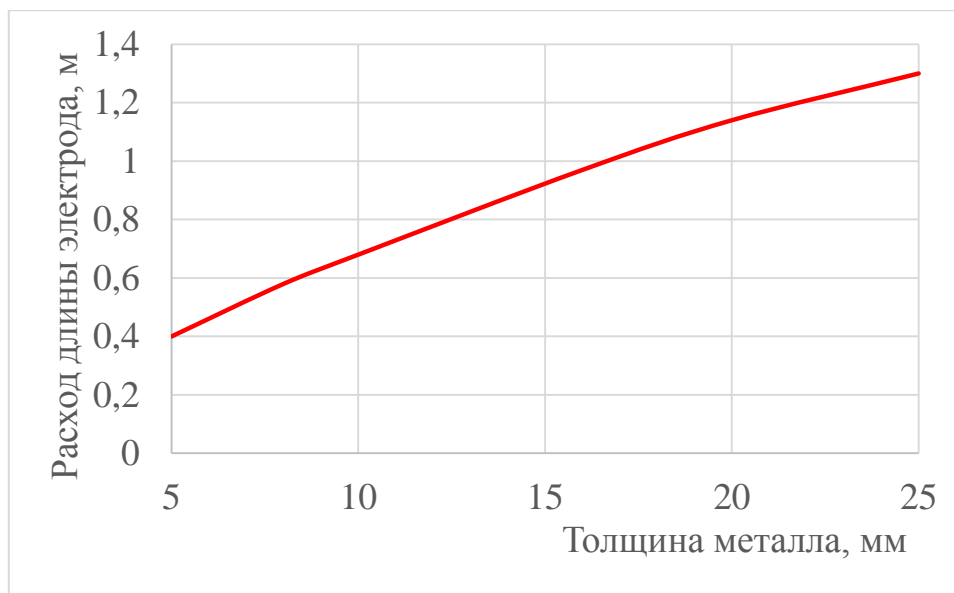


Рис. 22. Зависимость расхода длины электродов на 1 м реза от толщины металла при резке с подачей кислорода [1]

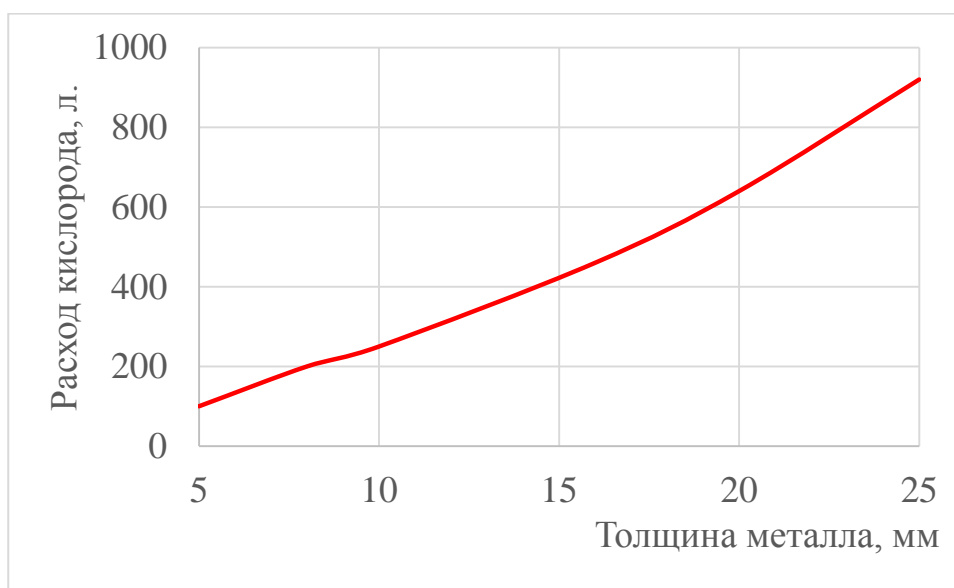


Рис. 23. Зависимость расхода кислорода на 1 м реза от толщины металла при дуговой резке трубчатым электродом [1]

Таким образом, резка обычным покрытым электродом имеет низкую производительность и образует наплывы. Резка трубчатым электродом с подачей кислорода имеет высокую производительность, однако требует применения кислорода, что увеличивает расходы.

1.4 Анализ механизмов подводной мокрой резки

В работе [98] основываясь на результатах исследований [99–103] изучали стабильность дуги по плотности распределения тока и напряжения дуги при подводной мокрой резки, рис. 24.

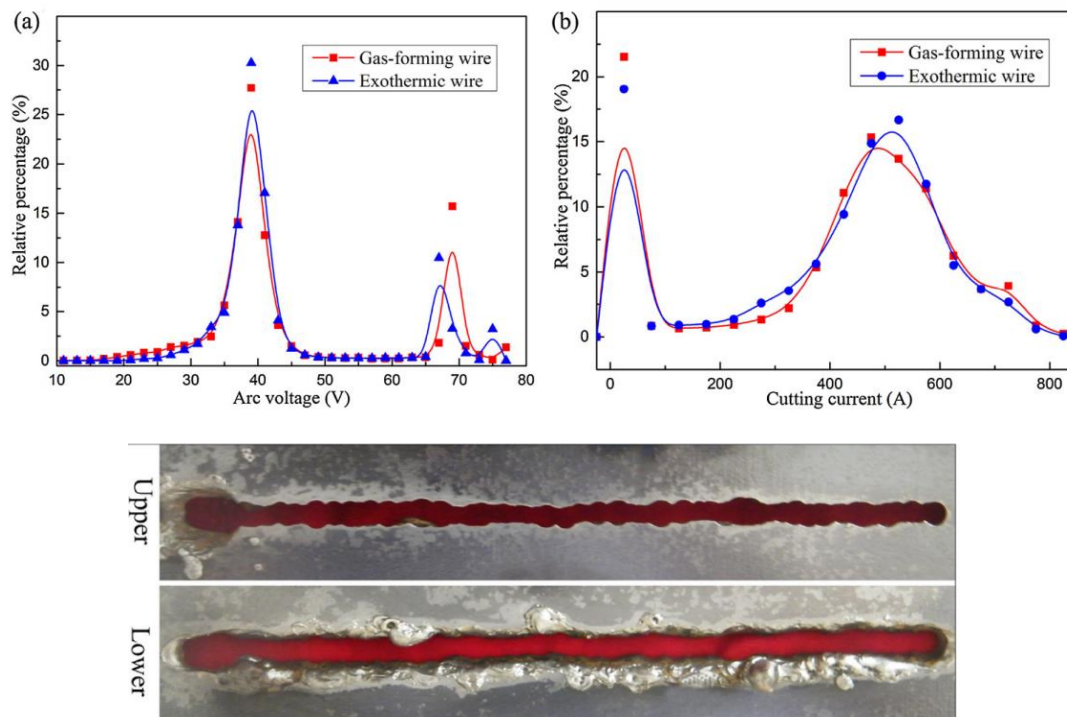


Рис. 24. Плотность вероятности распределения тока и напряжения и вид реза в верхней и нижней стороне пластины [98]

Для исследований использовали окислительную проволоку диаметром 2 мм на основе карбонатов ($MgCO_3$, $BaCO_3$) и пероксидов (BaO_2 , CaO_2) и экзотермической проволоки с введением 75% термитной смеси ($Al+CuO$) с коэффициентом заполнения 25–26%. Качество резки определяли по ширине реза, углу скоса реза, прямолинейности реза, наличию металла на обратной стороне реза. В качестве образцов применяли пластины из стали Q235 толщиной 8 мм, скорость подачи проволоки составляла 8–17 м/мин, ток 390–510 А, напряжение дуги 35–40 В, скорость реза 27–30 см/мин. Стандартное отклонение тока достигало ± 100 –238 А, напряжения $\pm 1,4$ –3,8 В. В зависимости от

параметров режима ширина реза составила в верхней части 3,8–8,8 мм с отклонением $\pm 1,2$ –1,9 мм, в нижней части 6,1–12,1 мм.

Ширина реза была меньше у экзотермической проволоки, добавление порошка Al с низким потенциалом ионизации улучшило ионизацию и стабильность горения дуги, в том числе за счет выделения дополнительной теплоты. Сущность подводной мокрой резки по мнению авторов заключается в заглублении длинной или короткой дуги в металл и формировании прорези, рис. 25.

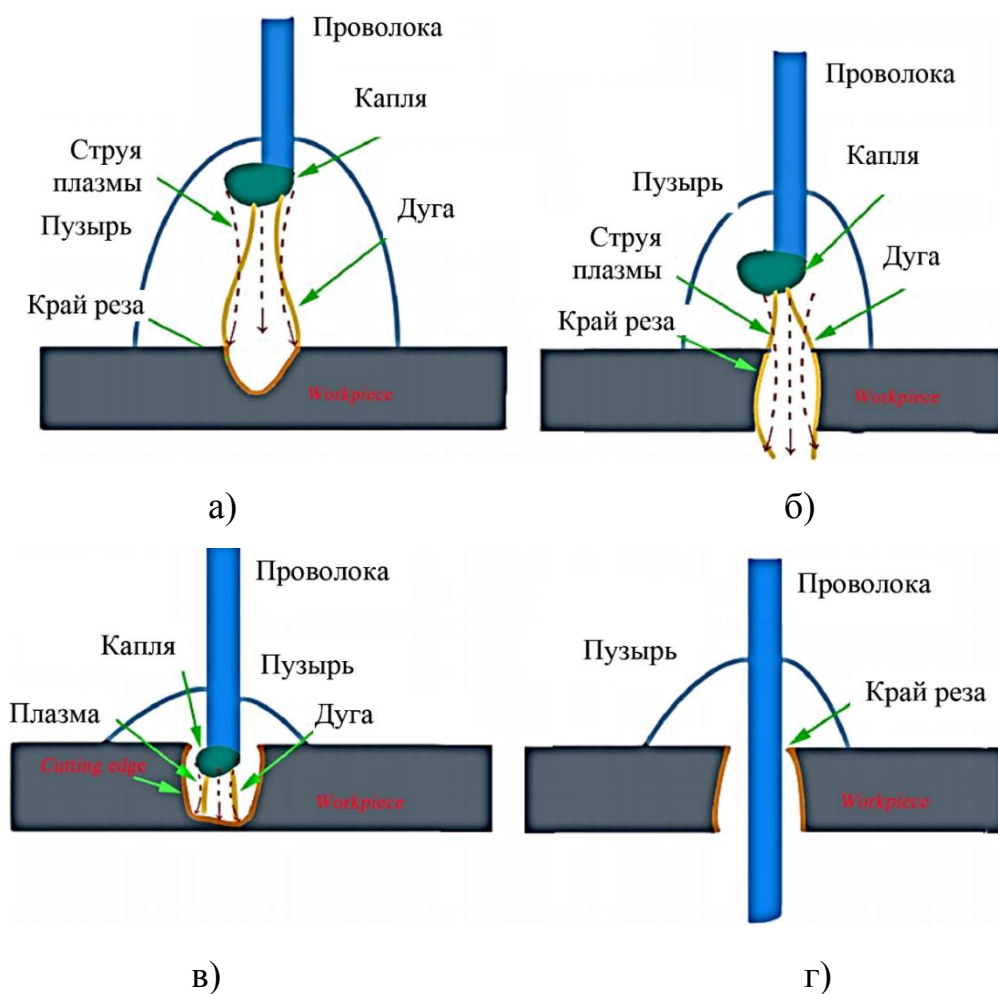


Рис. 25. Фазы процесса подводной мокрой резки: а – нормальная дуга, б – длинная дуга, в – короткая дуга, г – выход проволоки из прорези [98]

При этом не поясняется роль давления дуги, образования и вытеснения шлака, влияние коротких замыканий и не рассматриваются металлургические процессы при диссоциации солей, экзотермических реакций и фазового состава плазмы, что требует дальнейших исследований для разработки механизма подводной мокрой резки.

Для изучения подводной мокрой резки порошковой проволокой применяли высокоскоростную видеокамеру со скоростью 2000 fps при токе 550 А, напряжении 25 В [104]. Исследования показали, что при резке происходит периодическое зажигание и углубление дуги в металл с образованием шлака и мелкокапельного переноса при расплавлении порошковой проволоки в парогазовом пузыре, рис. 26, 27.

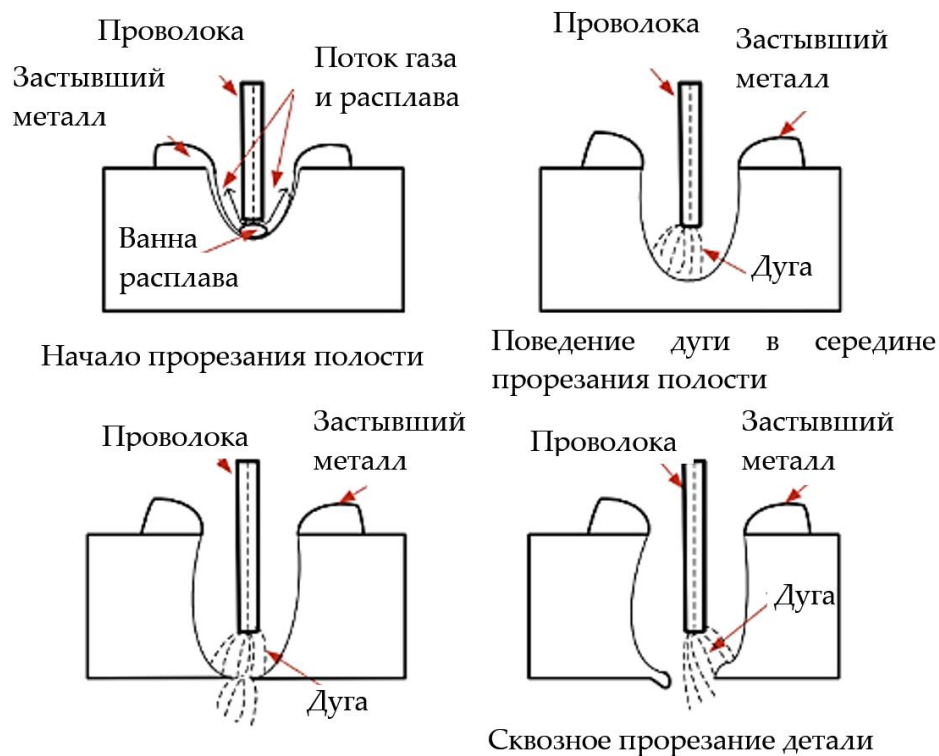


Рис. 26. Механизм подводной мокрой резки порошковой проволокой по данным [104]

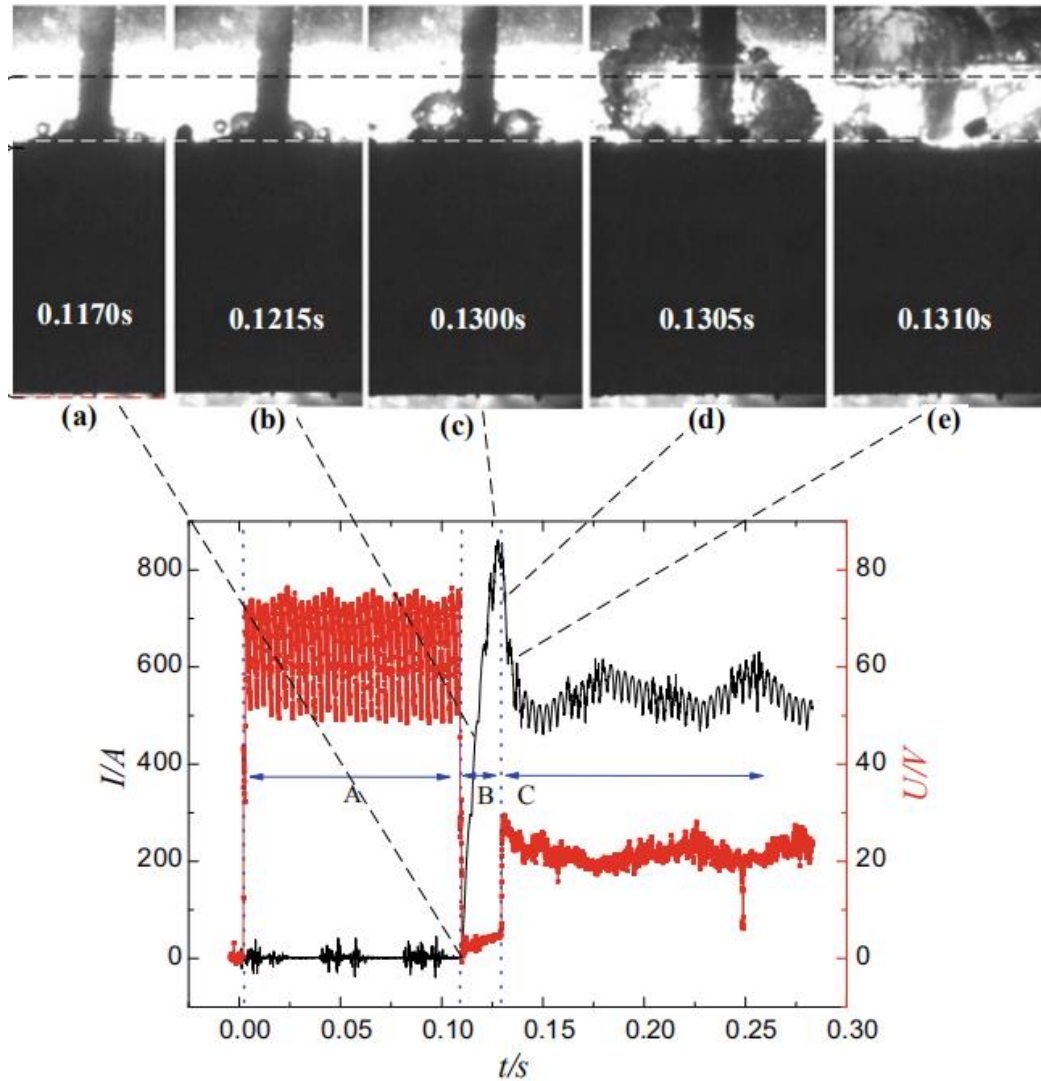


Рис. 27. Фазы короткого замыкания, развития дуги в парогазовом пузыре и углубление дуги металл. Подводная мокрая резка пластин толщиной 6 мм порошковой проволокой ППР-АН2 диаметром 2 мм [104]

В работах [105, 106] моделировали и исследовали механизм резки порошковой проволокой ППР-АН2 диаметром 2 мм при резке пластин толщиной 16 мм из стали Q235 на воздухе и под водой, рис. 28, 29.

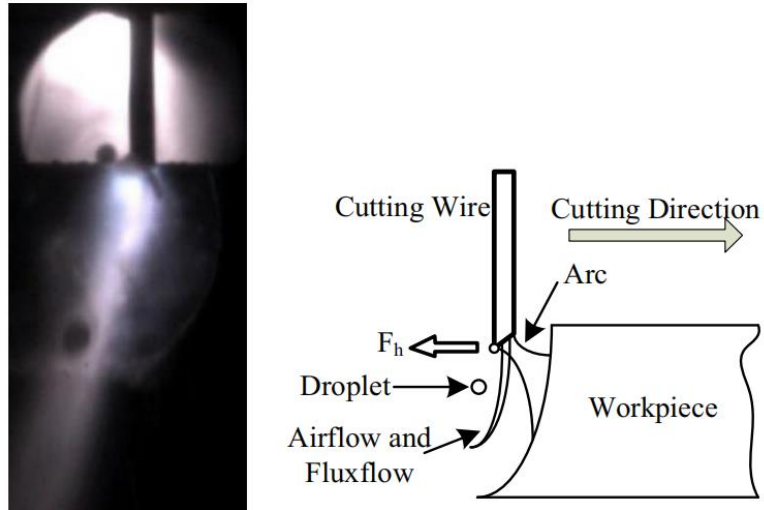


Рис. 28. Схема резки стали порошковой проволокой на воздухе [105]

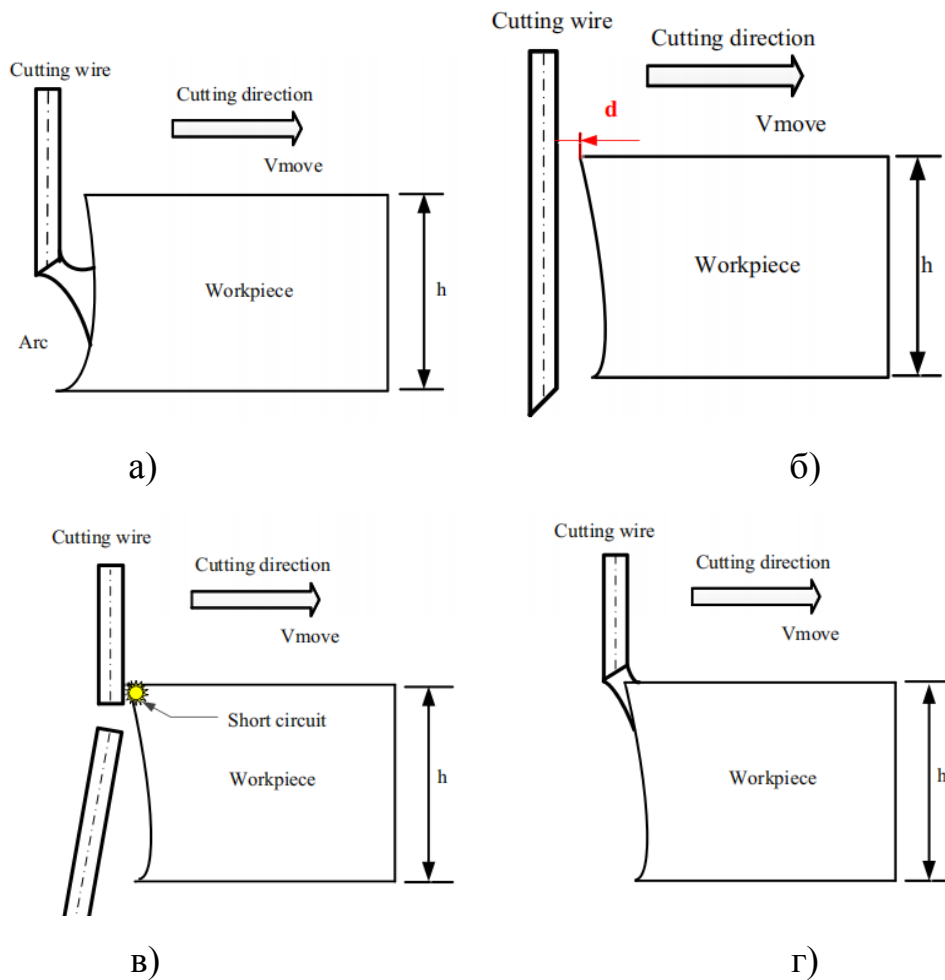


Рис. 29. Механизм подводной резки из 4-х фаз: а – дуга горит внутри образца; б – торец проволоки находится ниже образца; в – короткое замыкание о край образца; г – повторное зажигание дуги [106]

В работе исследовали режимы резки, влияние на ширину и форму реза давления среды, напряжения и силы тока. Однако не рассматривали металлургические процессы, анализ которых может установить подробный механизм реза сталей в водной среде. Таким образом, в работах представлены отдельные представления о фазах механизма резки, что требует дальнейших исследований.

1.5 Задачи работы

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать следующие задачи работы:

1. Выполнить анализ способов повышения производительности и качества подводной мокрой резки сталей.
2. Выполнить термодинамическое и физическое моделирование металлургических процессов при подводной мокрой резке сталей.
3. Разработать химические составы порошковых проволок для подводной мокрой резки сталей.
4. Произвести испытания порошковых проволок при подводной мокрой резке.

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ РЕЗКЕ СТАЛЕЙ

2.1 Методика исследований

Для подводной мокрой резки использовали пластины $200 \times 100 \times 10$ мм из сталей: 3сп 8 мм, 10ХСНД 10 мм. Для изготовления порошковой проволоки диаметром 2 мм с коэффициентом заполнения шихтой 22 % использовали ленту 08пс $10 \times 0,4$ мм, химически чистые порошки. Подводную мокрую механизированную и автоматическую резку производили на лабораторной установке на глубине 300 мм, а также в производственных условиях на глубине 1,5 м в камере "КСМ-018", рис. 30, 31.



Рис. 30. Лабораторная установка для подводной мокрой резки: 1 – резервуар с водой; 2 – выпрямитель; 3 – система циркуляции воды; 4 – механизм подачи проволоки; 5 – погружной стенд с образцом; 6 – автомат перемещения горелки; 7 – USB-осциллограф; 8 – датчики тока и напряжения; 9 – компьютер. Справа – камера для подводной сварки и резки "КСМ-018"



Рис. 31. Узлы лабораторной установки: (а) система циркуляции и очистки воды; (б) автомат перемещения сварочной горелки: 1 – блок управления движения горелки; 2 – шаговый мотор для движения горелки; 3 – крепление горелки; 4 – кнопка для подачи проволоки; 5 – ручка регулятора скорости перемещения; 6 – дисплей

Источником тока являлся выпрямитель ESAB Origo MIG L405. Для анализа токов и напряжений использовали цифровой USB-осциллограф с частотой измерения 32 кГц, программы Multi VirAnalyzer software (Harbin Instrustar), Matlab. Для анализа подводных процессов использовали высокоскоростную видеокамеру Phantom VEO 710L (Vision Research, USA) с частотой записи 2000 кадров/с с программой Phantom CV. Для термодинамического моделирования использовали программу ИВТАНТЕРМО (Институт высоких температур РАН) и программу FactSage (CRCT, Канада). Для производства проволоки использовали модернизированный станок, рис. 32.

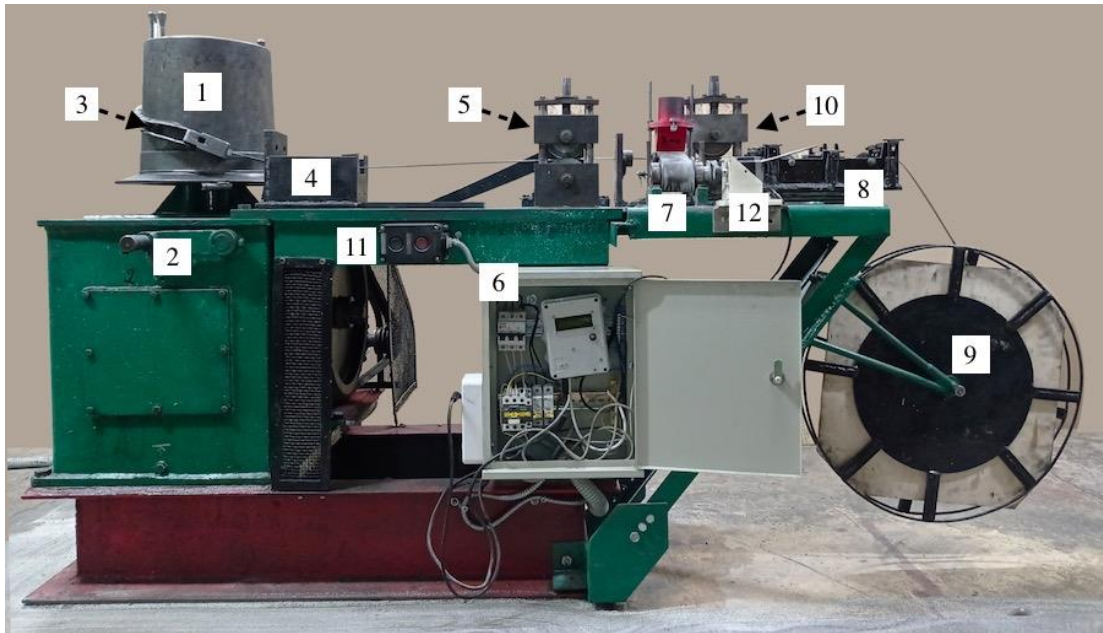


Рис. 32. Станок для производства порошковой проволоки: 1 – барабан намотки; 2 – станина; 3 – крепление барабана; 4 – блок волочения с фильерами; 5 блок деформирования ленты; 6 – блок управления режимами; 7 – блок подачи шихты; 8 – блок подачи ленты; 9 – барабан с лентой; 10 – блок гибки ленты; 11 – автомат подачи питания; 12 – шаговый двигатель

Вид опытных партий проволок, их конструкция и макроструктура поперечного сечения представлены на рис. 33.

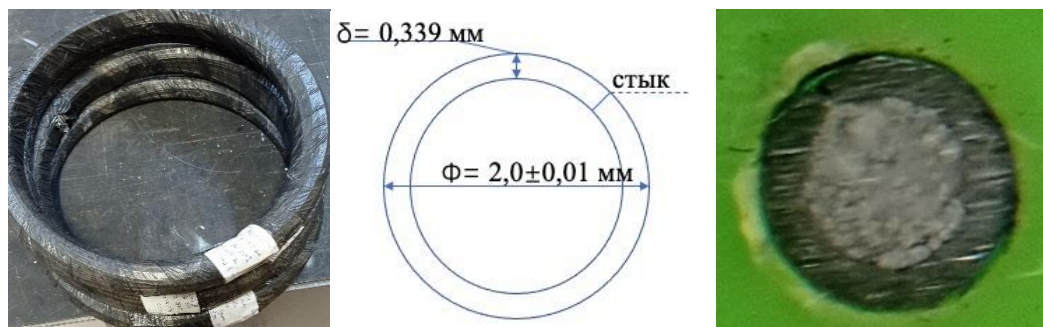


Рис. 33. Опытные партии проволок, конструкция и макроструктура поперечного сечения порошковой проволоки

2.2 Механизм и физическая модель подводной мокрой резки

Известно, что подводная мокрая сварка самозащитной порошковой проволокой осуществляется в парогазовом пузыре, который образуется при разложении воды. Сварочная дуга при подводной сварке порошковой проволокой состоит из центральной части (столба дуги), граничной области вокруг столба дуги и молекулярного слоя, в котором происходит диссоциация водяного пара [49], рис. 34, 35.

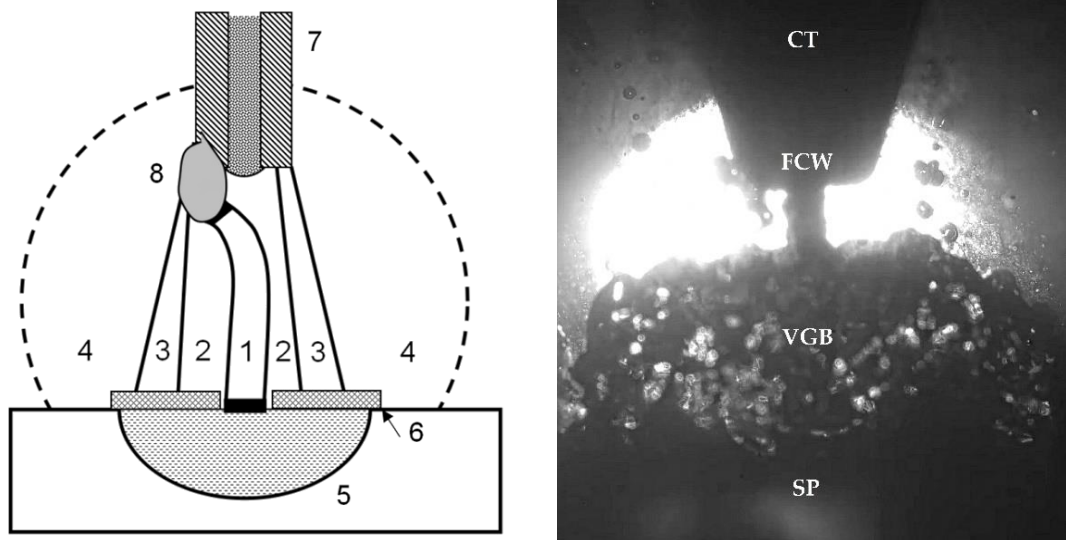


Рис. 34. Модель сварочной дуги при подводной мокрой сварке (а): 1— столб дуги; 2 — граница дуги; 3 — молекулярный слой диссоциации вокруг границы дуги; 4 — парогазовый пузырь; 5 — сварочная ванна; 6 — жидкий шлак; 7 — порошковая проволока; 8 — капля; (b) теневая фотография парогазового пузыря при подводной мокрой сварке порошковой проволокой: FCW — порошковая проволока; CT — токоподводящий наконечник; VGB — парогазовый пузырь; 3 — SP — стальная пластина [49]

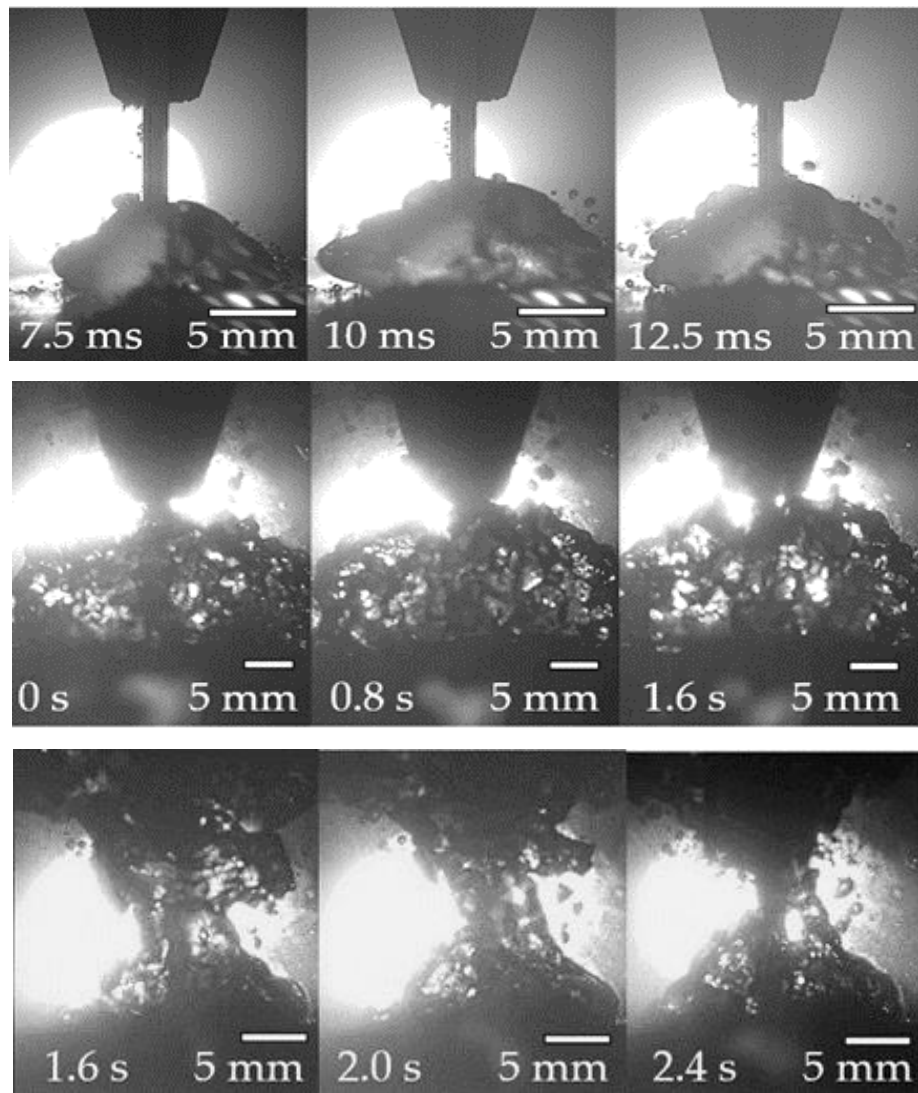


Рис. 35. Динамика парогазового пузыря при подводной мокрой сварке порошковой проволокой: а – зарождение парогазового пузыря при коротком замыкании, б – расширение парогазового пузыря; в – схлопывание парогазового пузыря [49]

Изучение подводной мокрой резки с помощью видеосъемки и осциллограмм показало, что дуговая резка подобно сварке и происходит в атмосфере парогазового пузыря, рис. 36.

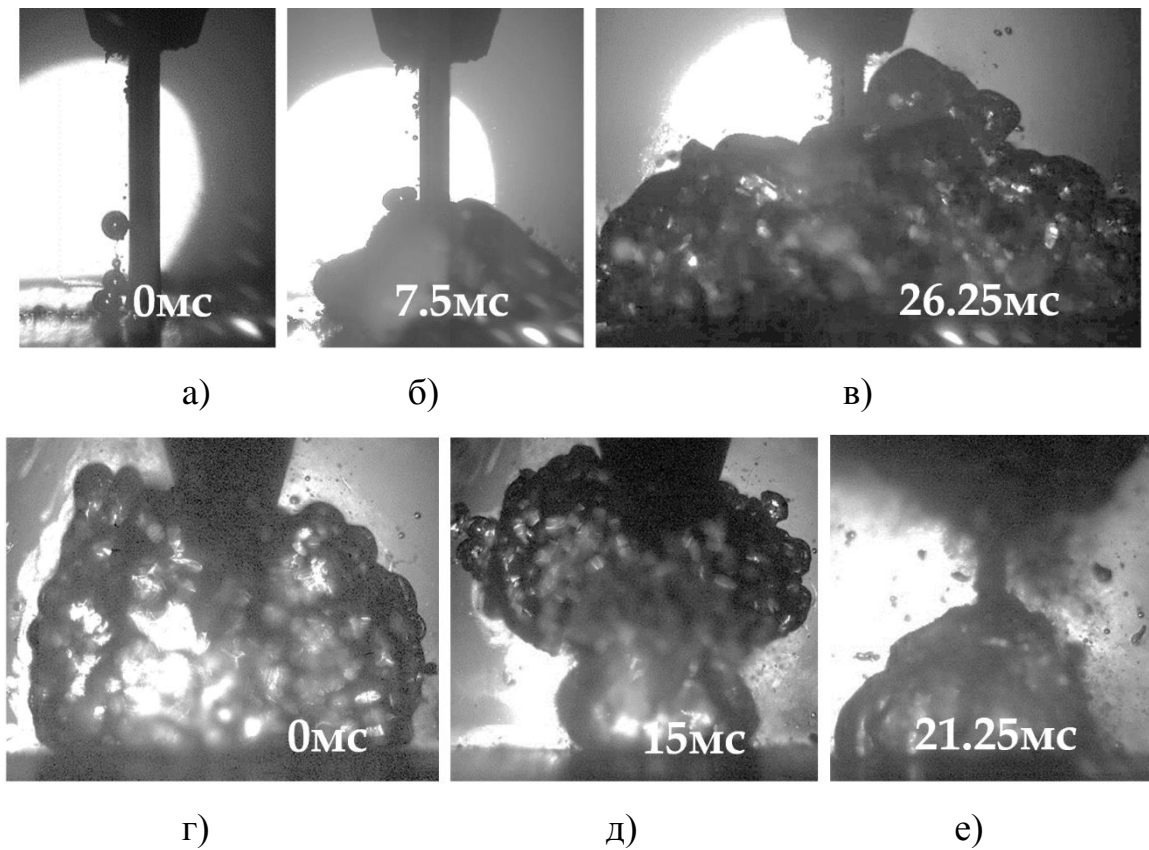


Рис. 36. Динамика парогазового пузыря при подводной мокрой резке с применением порошковой проволоки: а – начало процесса с коротким замыканием; б – разложение воды, образование парогазового пузыря, разогрев металла; в – стабилизация дуги, расширение парогазового пузыря, начало реза; г – углубление дуги в металл, стабилизация парогазового пузыря; д – схлопывание парогазового пузыря и образование нового пузыря; е – отрыв старого пузыря, расширение нового пузыря

Таким образом, в динамике парогазового пузыря отчетливо выделяются 6 фаз, которые связаны с электрическими параметрами, свойствами дуги и металлургическими процессами окислительной резки.

Особенность подводной мокрой резки состоит в том, что при разложении компонентов образуется кислород, который окисляет железо и образует шлак. Затем шлак под давлением дуги вытесняется из зоны реза. Другая особенность состоит в наличии периодических рабочих и холостых циклов в электрическом процессе. Эти циклы связаны с периодическим возбуждением и обрывом электрической дуги при формировании сквозной прорези, рис. 37.

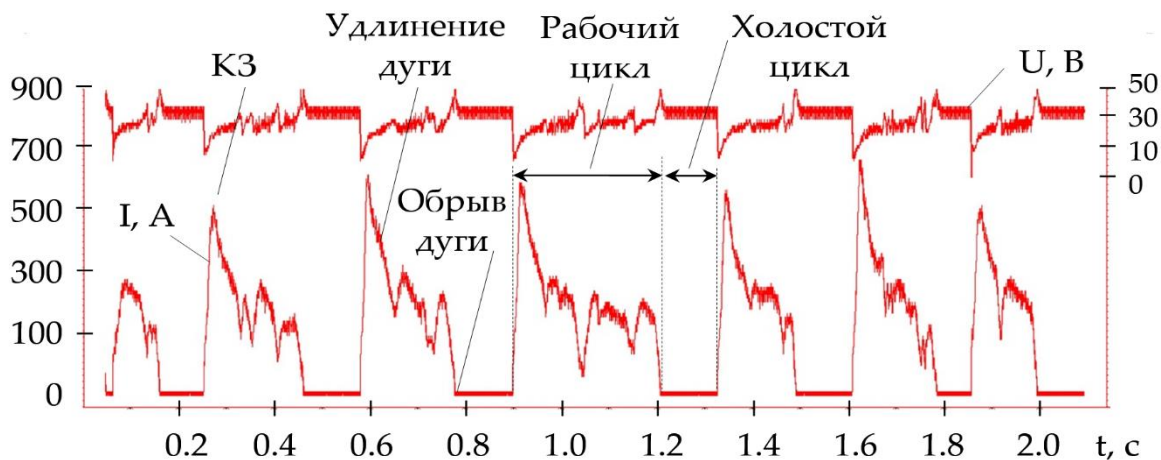


Рис. 37. Типичная осциллограмма тока и напряжения при резке с порошковой проволокой ППР-АПЛ1 диаметром 2 мм

Рабочий цикл реза включает следующие физические явления: короткое замыкание, удлинение дуги и обрыв дуги. Холостым циклом является пауза между обрывом дуги и коротким замыканием. В зависимости от режима реза и состава порошковой проволоки, длительность рабочих циклов составляет 1,5–5 с, холостых циклов 0,6–1,7 с. Механизм процесса подводной мокрой резки состоит из пяти фаз, рис. 38.

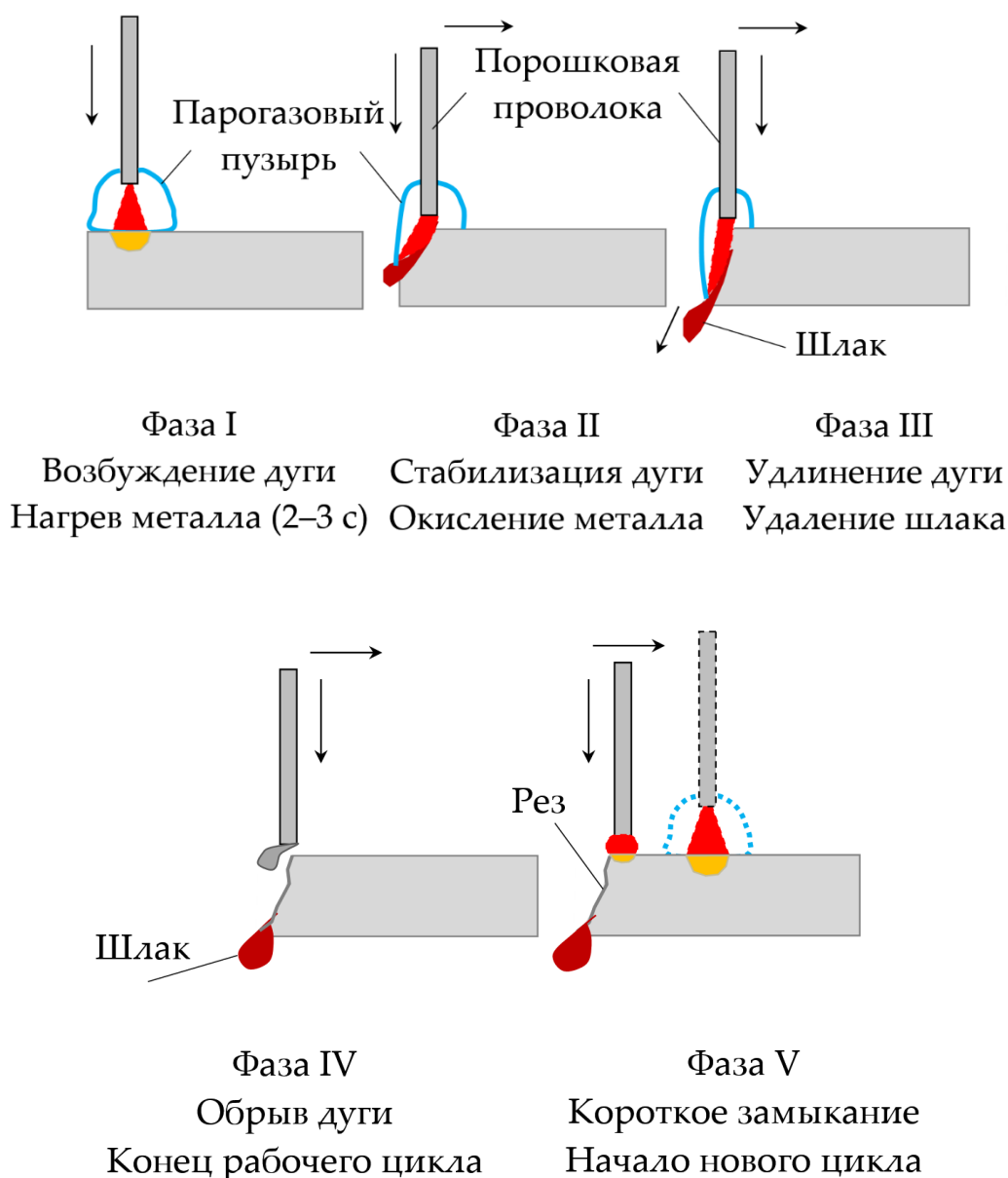


Рис. 38. Механизм подводной мокрой резки с применением порошковых проволок

Процесс резки начинается с фазы I возбуждения дуги, формирования парогазового пузыря и нагрева металла для инициации реакции окисления. Стабилизация дуги и развитие реакции окисления в фазе II ведет к удлинению дуги при углублении дуги в канал реза, к росту напряжения дуги и к образованию шлака. В фазе III происходит дальнейший рост напряжения и длины дуги, снижение тока, формирование сквозной прорези и удаление шлака под давлением дуги.

В момент формирования сквозной прорези происходит обрыв дуги и окончание рабочего цикла в фазе III. Пауза между фазой IV и V является холостым циклом, при котором ток равен нулю, а напряжение равно выходному напряжению источника питания. Короткое замыкание на кромке реза начинает новый рабочий цикл в фазе V.

Подводная мокрая резка подобна сварке, потому что осуществляется в парогазовом пузыре при интенсивном разложении воды и компонентов порошковой проволоки, рис. 39.

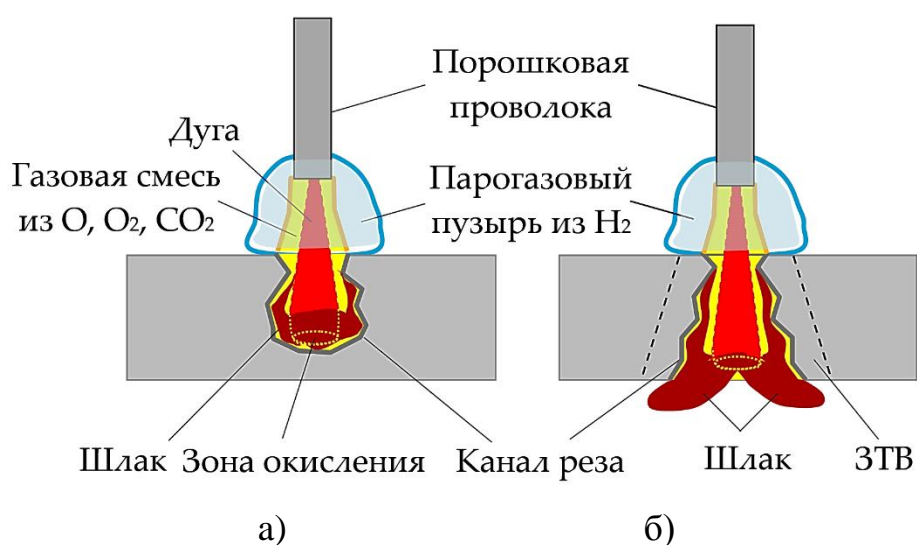


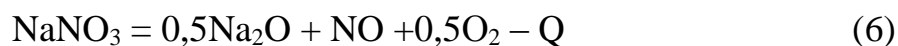
Рис. 39. Каналовая модель подводной мокрой дуговой резки с применением порошковой проволоки в поперечном сечении: а – закрытая полость; б – открытая полость. ЗТВ – зона термического влияния

Однако, в отличие от сварки, процесс резки происходит в узкой прорези, которая стабилизирует горение дуги и процесс ионизации плазмы в окислительной газовой смеси. При углублении дуги в металл, жидкий шлак раздвигается давлением дуги. Оттеснение шлака дугой необходимо для непрерывной реакции окисления металла кислородом. При образовании сквозной прорези, шлак под давлением дуги удаляется из прорези наружу.

Таким образом, физическая модель показывает необходимость стабильного горения дуги, поддержания её ионизации в процессах обрыва и возбуждения дуги с короткими замыканиями. Для эффективного процесса реза нужно создание окислительной газовой смеси, легкого вытеснения шлака из зоны реза. Это требует проведения моделирования фазового состава плазмы, газовой системы, шлаковой системы и изучения их термодинамических и теплофизических свойств.

2.3 Термодинамический анализ реакций диссоциации солей

Образование окислительной атмосферы вокруг дуги является необходимым условием для подводной резки. Состав окислительной атмосферы определяется диссоциацией компонентов порошковой проволоки. В качестве базовых компонентов применяются карбонаты щелочных металлов и железа, а также нитраты натрия и калия. В эндотермических реакциях (1–7) происходит диссоциация солей и образование CO_2 , O_2 , NO , как показано на рис. 40:



Реакции диссоциации требуют затрат энергии, поэтому изменение энтальпии реакций (1–7) имеет положительную величину. Особенно активная диссоциация происходит у солей FeCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 и Li_2CO_3 ,

из которых FeCO_3 и Li_2CO_3 при 1000–3000 К имеют минимальные величины ΔH , рис. 40.

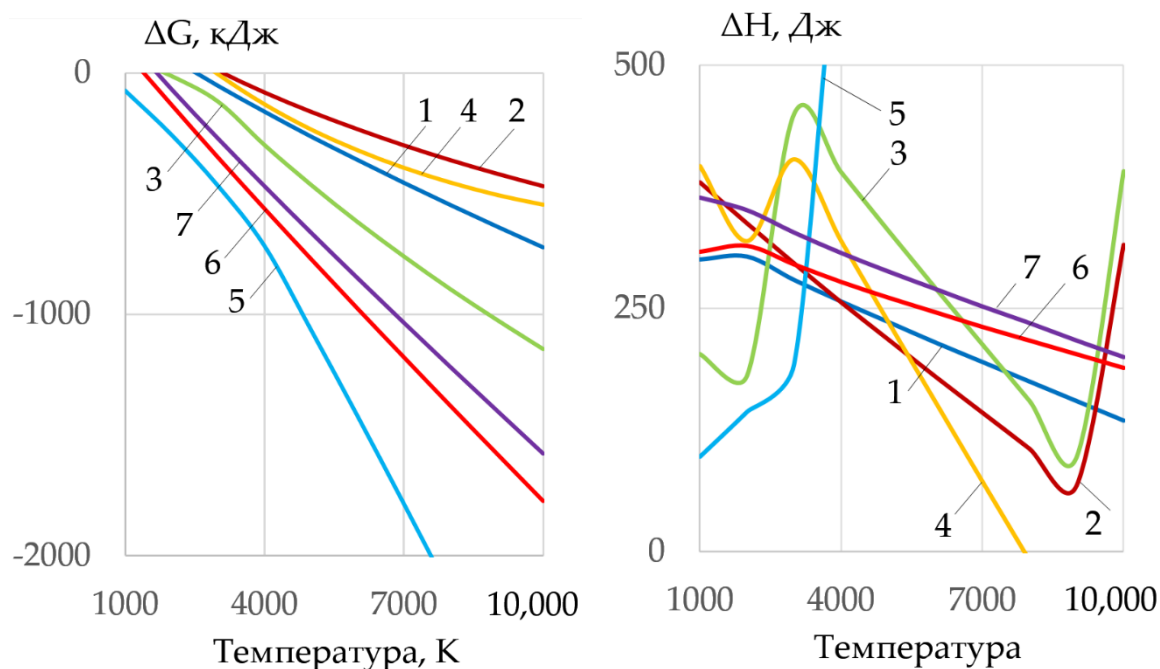
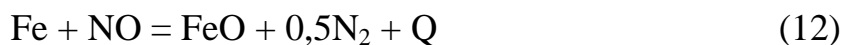


Рис. 40. Изменение свободной энергии Гиббса и энтальпии реакций диссоциации солей

Образование окислительной атмосферы при диссоциации солей при резке ведет к окислению Fe, Cr, Ni по реакциям (8–14):



Моделирование показало, что в реакциях окисления железа наибольшую активность имеют экзотермические реакции с атомарным и молекулярным кислородом и окисью азота, рис. 41.

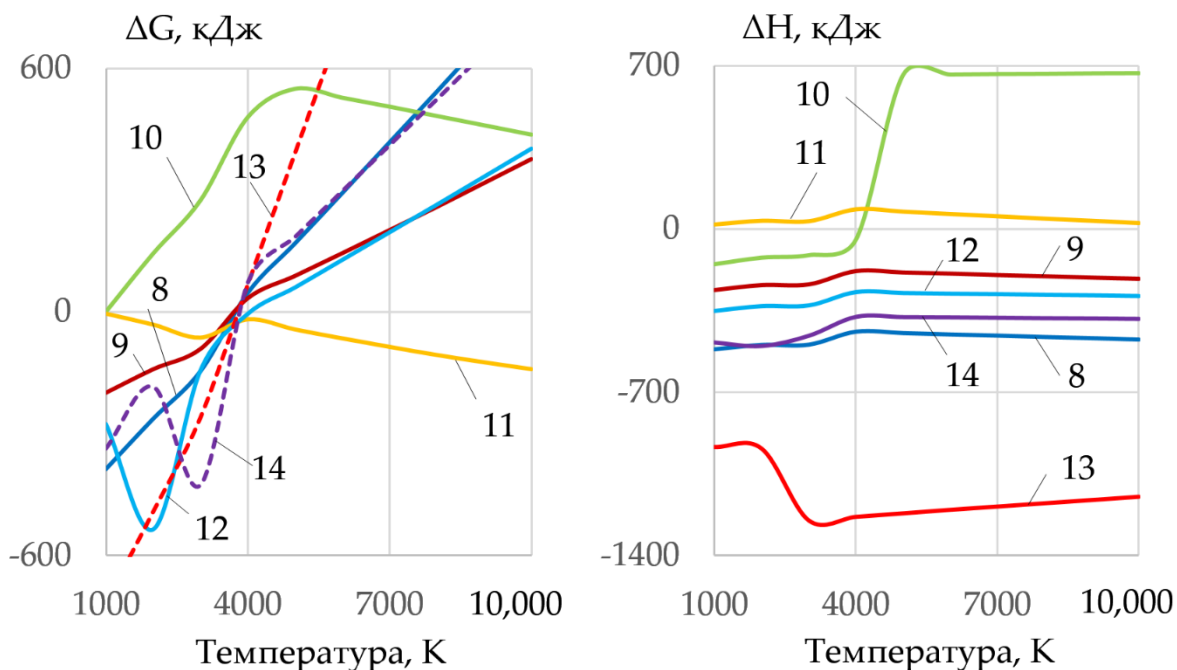
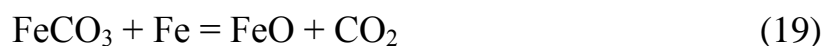
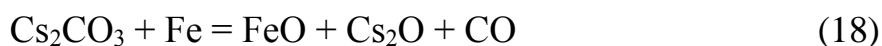
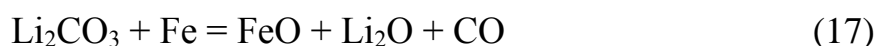
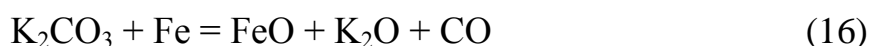
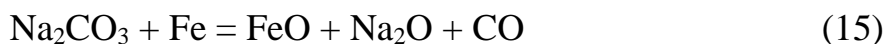


Рис. 41. Изменение свободной энергии Гиббса и энтальпии реакций (8–14) окисления металлов при взаимодействии с газами

При температуре 1000–4000 К возможны реакции окисления железа (15–21) при взаимодействии с солями, особенно с FeCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 :



В реакциях окисления Fe, Cr, Ni наиболее активными компонентами являются O, O_2 , CO_2 , NO. В отличие от реакций диссоциации, реакции окисления выделяют теплоту, т.е. уменьшают внутреннюю энергию газовой системы, как показано на рис. 42.

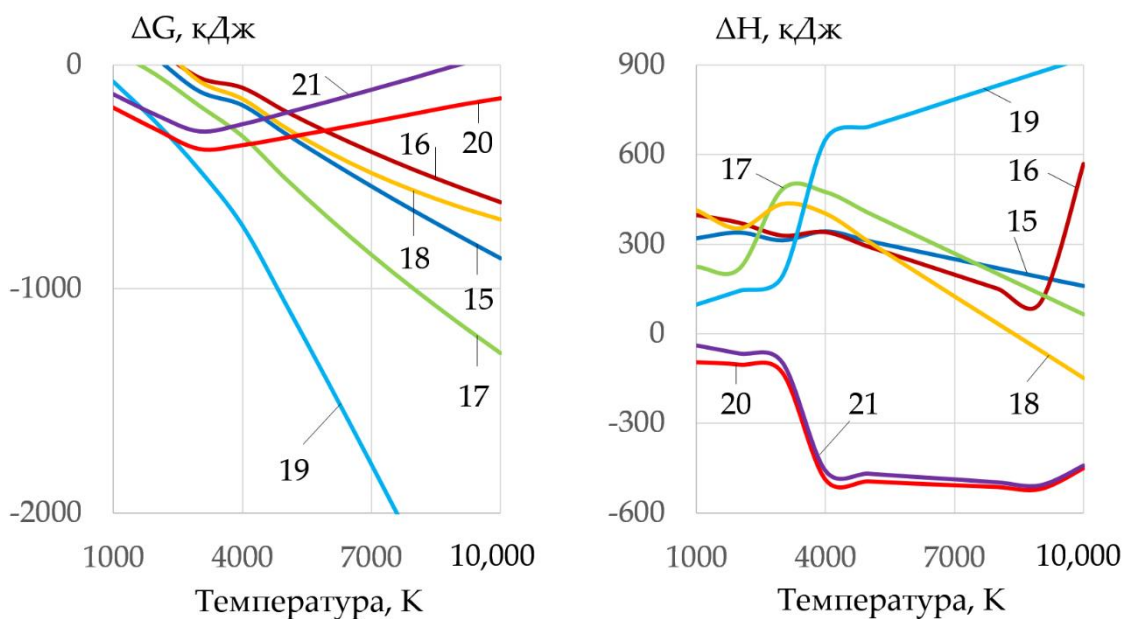


Рис. 42. Изменение свободной энергии Гиббса и энтальпии реакций (15–21) окисления железа при взаимодействии с солями

Таким образом, наиболее перспективными компонентами для разработки порошковых проволок являются соли FeCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 . При этом, наиболее активной в процессах диссоциации является NaNO_3 .

2.4 Термодинамический анализ фазового состава газовой системы при диссоциации шихты

Диссоциация солей ведет к образованию сложной смеси газов O , O_2 , CO , CO_2 , NO , как показано на рис. 43. Анализ фазового состава газовых систем при диссоциации солей выявил различия состава и показал, что наибольшую концентрацию свободного молекулярного и атомарного кислорода обеспечивают азотистые соли KNO_3 , NaNO_3 и углекислая соль железа FeCO_3 при температурах 1000–4000 К. Эти компоненты приняты в качестве основы для создания порошковых проволок. Однако, как оказалось, применение солей KNO_3 , NaNO_3 в большой концентрации ухудшает стабильность дуги из-за образования на границе дуги деионизаторов – отрицательных ионов кислорода O^- .

Для улучшения стабильности дуги использовали смесь 50% FeCO_3 и 50% KNO_3 , которая имеет высокое содержание кислорода и низкую концентрацию O^- , рис. 44.

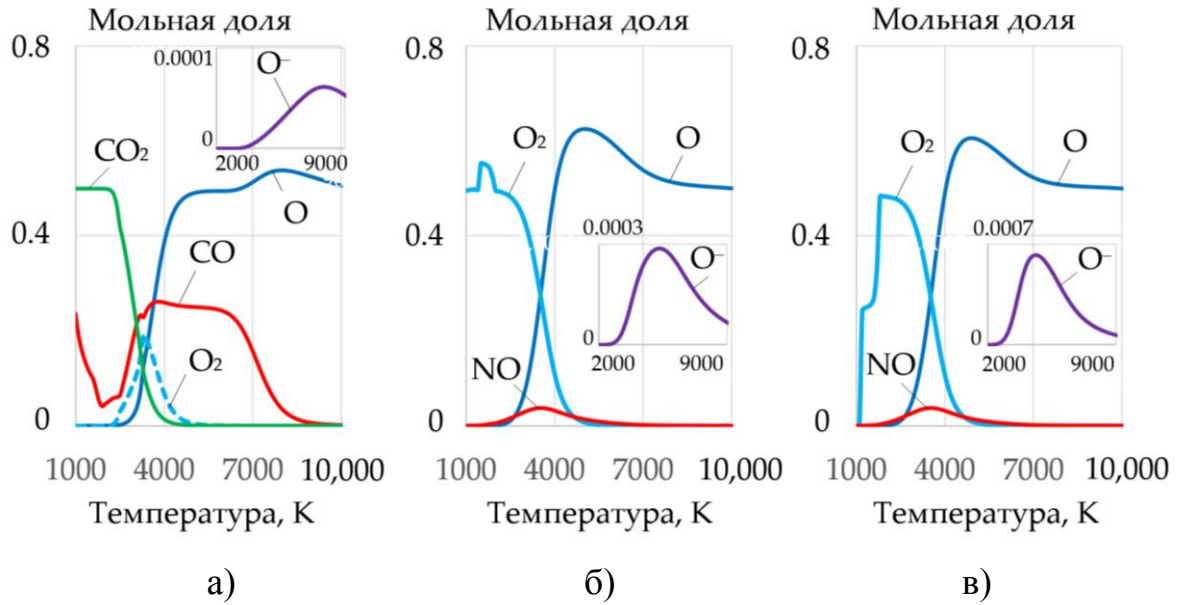


Рис. 43. Мольные доли газов и отрицательных ионов кислорода O^- при диссоциации солей: а – FeCO_3 ; б – NaNO_3 ; в – KNO_3

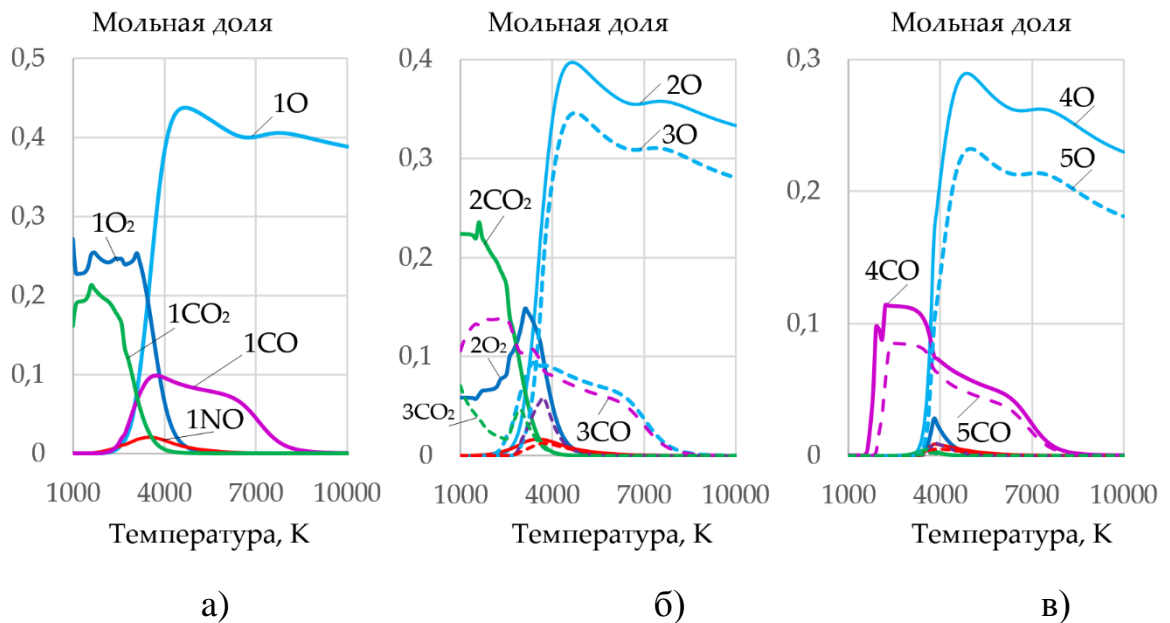
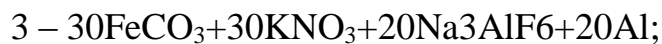


Рис. 44. Мольные доли газов в газовой системе, масс. %: (а):



2.5 Термодинамический анализ фазового состава и теплофизических свойств плазмы

Во время резки происходят периодические короткие замыкания, обрывы и возбуждения дуги. Поэтому плазма дуги должна иметь высокую концентрацию электронов. Введение нитрата калия вызывает увеличение концентрации отрицательных ионов кислорода, что может ухудшать стабильность дуги, рис. 45. Дополнительное ухудшение ионизации плазмы может происходить за счет образования отрицательных ионов фтора F^- при введении криолита Na_3AlF_6 .

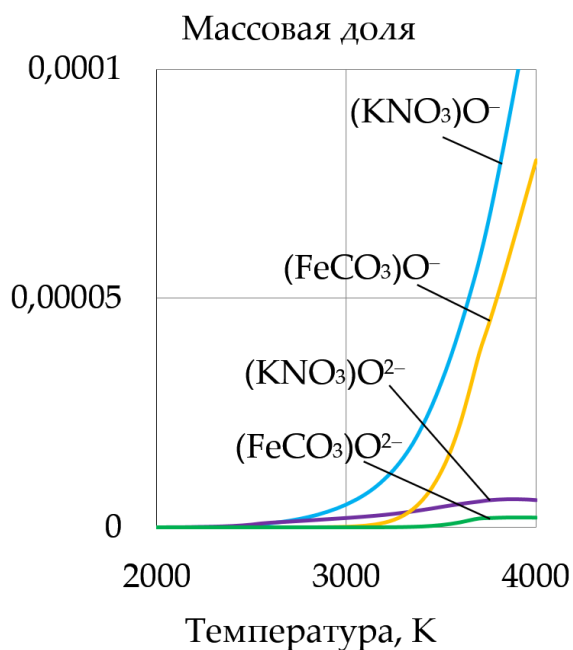


Рис. 45. Концентрация отрицательных ионов кислорода при диссоциации шихты с 60 % KNO_3 и с 60 % FeCO_3

Поэтому для улучшения ионизации дуги лучше вводить смеси KNO_3 и FeCO_3 . Моделирование фазового состава плазмы показывает значительный рост концентрации ионов фтора на границе дуги при 3000–7000 К, особенно при использовании шихты на основе KNO_3 , рис. 46.

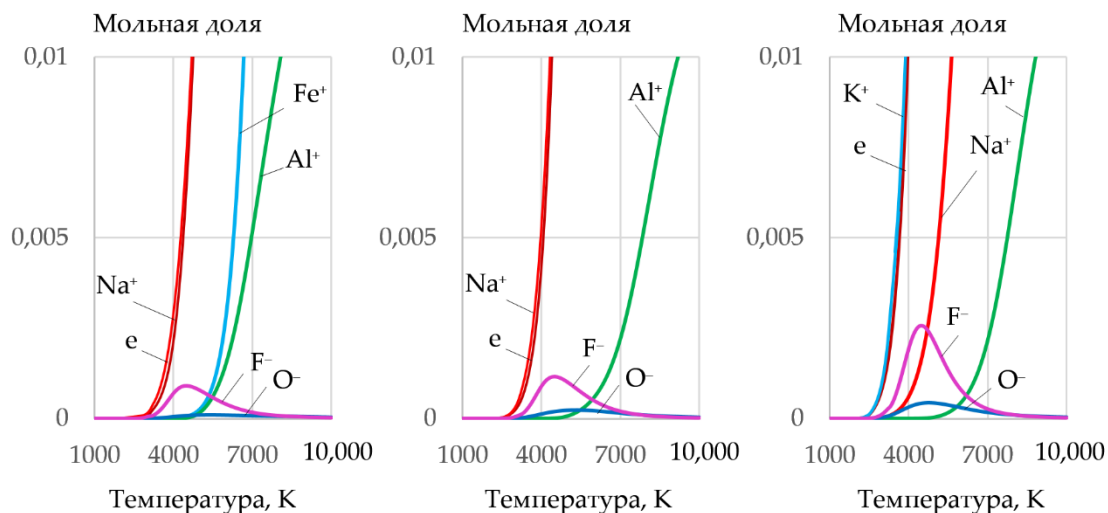


Рис. 46. Мольные доли электронов и ионов в газовой системе, масс. %: а – $80\text{FeCO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6$; б – $80\text{NaNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6$; в – $80\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6$

Минимальная концентрация отрицательных ионов фтора F^- и кислорода O^- в присутствии криолита достигается при использовании шихты на основе FeCO_3 . Однако, использование только FeCO_3 снижает концентрацию свободного режущего кислорода. Поэтому для достижения высокой степени ионизации и концентрации кислорода лучше использовать смеси FeCO_3 с KNO_3 .

Для улучшения ионизации можно вводить алюминий с низкой энергией ионизации – 577,6 кДж/моль. С увеличением содержания алюминия происходит рост концентрации электронов и снижение концентрации ионов F^- , O^- , как показано на рис. 47, 48.

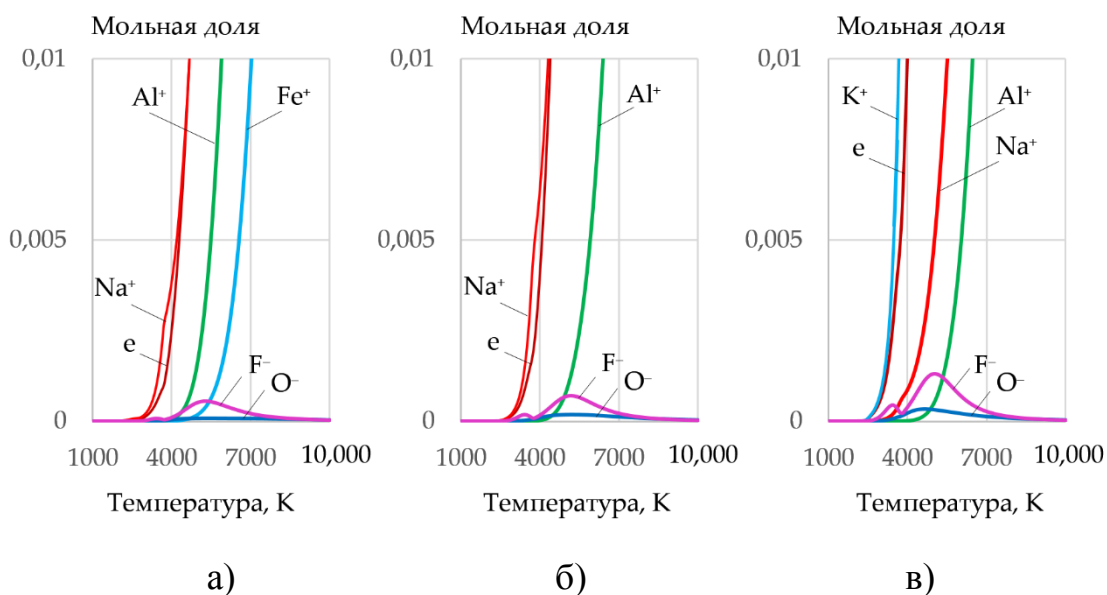


Рис. 47. Мольные доли электронов и ионов в газовой системе, масс. %: а – $60\text{FeCO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+20\text{Al}$; б – $60\text{NaNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+20\text{Al}$; в – $60\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+20\text{Al}$

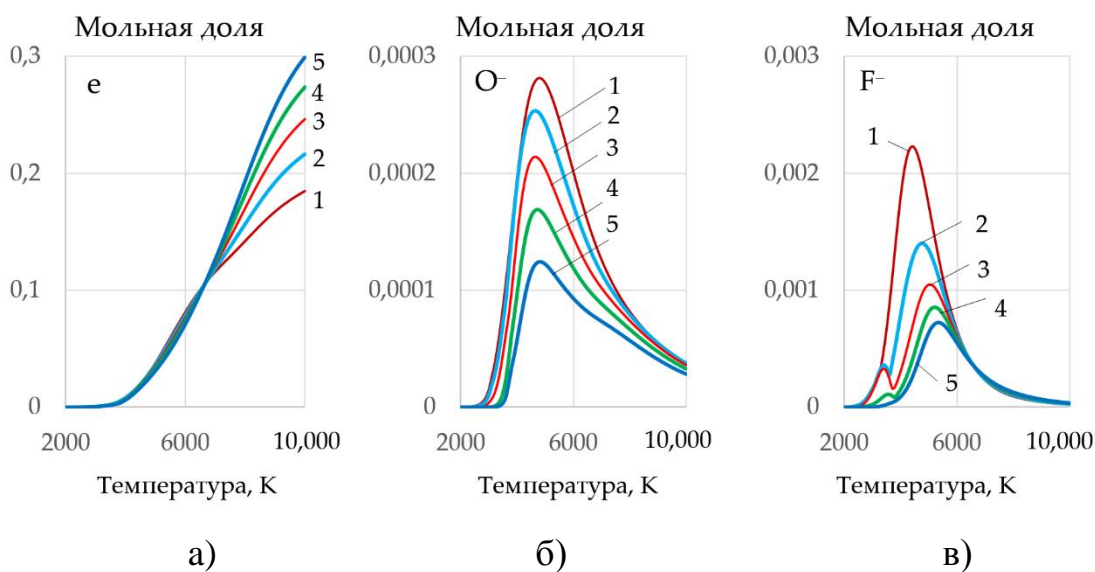


Рис. 48. Мольные доли электронов (а), ионов кислорода (б) и ионов фтора (с) в равновесной газовой системе, масс. %:

- 1 – $40\text{FeCO}_3+40\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6$;
- 2 – $35\text{FeCO}_3+35\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+10\text{Al}$;
- 3 – $30\text{FeCO}_3+30\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+20\text{Al}$;
- 4 – $25\text{FeCO}_3+25\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+30\text{Al}$;
- 5 – $20\text{FeCO}_3+20\text{KNO}_3+20\text{Na}_3\text{AlF}_6+40\text{Al}$

При подводной мокрой резке требуются значительные затраты энергии на процесс диссоциации воды, образование парогазового пузыря, на разложение компонентов шихты порошковой проволоки. Дополнительные затраты энергии связаны с охлаждением металла потоками воды и теплопередачей при нагреве металла, поскольку для реза необходимо инициировать реакцию окисления, которая происходит при температуре более 500 К. В связи с энергозатратами, в соответствии с принципами Ле Шателье и Штейнбека, сварочной дуге требуется увеличивать напряжение для поддержания необходимой мощности, которая при мокрой резке порошковой проволокой достигает 10–20 кВт. С другой стороны, осуществление реза требует удлинения дуги на всю глубину реза, т.е. на толщину металла, максимальная величина которой при резке углеродистой стали порошковой проволокой 2 мм достигает до 20–25 мм, что в 10 раз больше длины обычной сварочной дуги.

Потери энергии и удлинение дуги требует поддержания её стабильного горения, которое определяется процессами ионизации и теплофизическими свойствами плазмы. Поэтому состав шихты порошковой проволоки должен обеспечивать максимум энтальпии, внутренней энергии, теплоёмкости и теплопроводности газовой системы.

Диссоциация молекулярных газов вызывает рост теплопроводности, теплоёмкости и энтальпии системы при уменьшении динамической вязкости плазмы в диапазоне температур диссоциации 1000–4000 К, рис. 49–52.

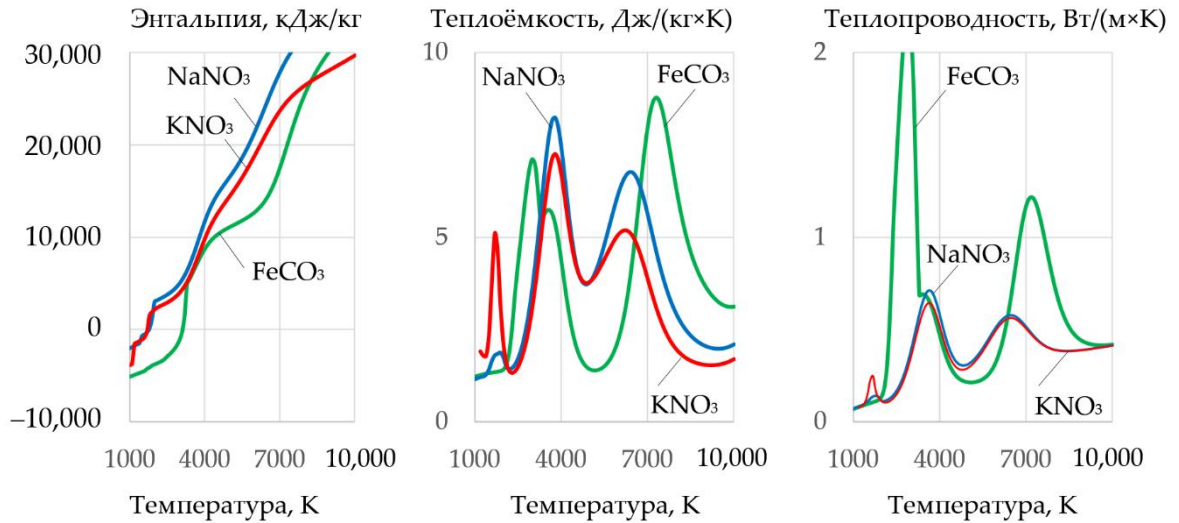


Рис. 49. Теплофизические свойства плазмы при введении чистых солей FeCO_3 , NaNO_3 , KNO_3

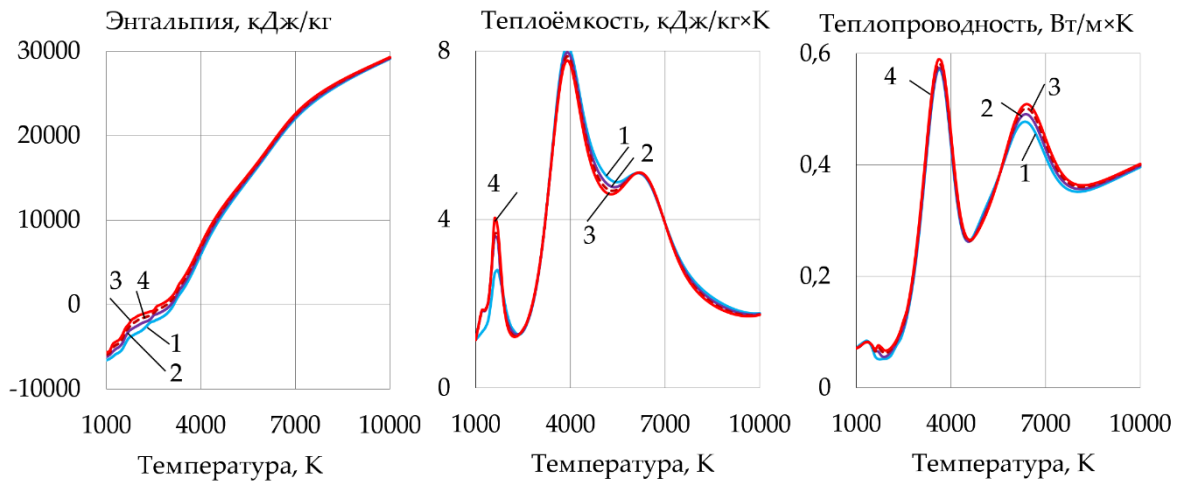


Рис. 50. Энтальпия, теплоёмкость и теплопроводность газовой фазы для смесей компонентов: 1 – $40\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6$; 2 – $50\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6$; 3 – $60\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6$; 4 – $70\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6$

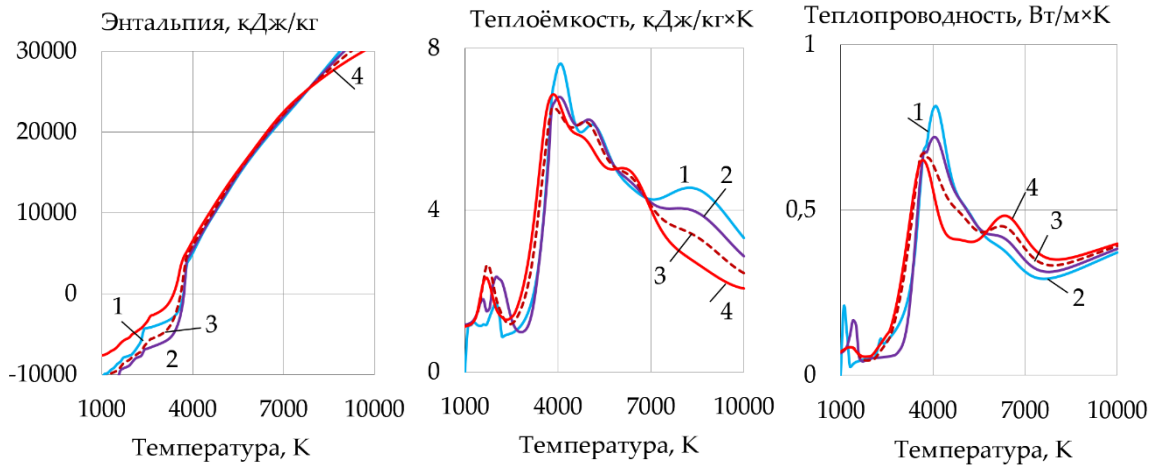


Рис. 51. Энтальпия, теплоёмкость и теплопроводность газовой фазы для смесей компонентов: 1 – $40\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}40\text{Al}$; 2 – $50\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}30\text{Al}$; 3 – $60\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}20\text{Al}$; 4 – $70\text{KNO}_3\text{-}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}10\text{Al}$

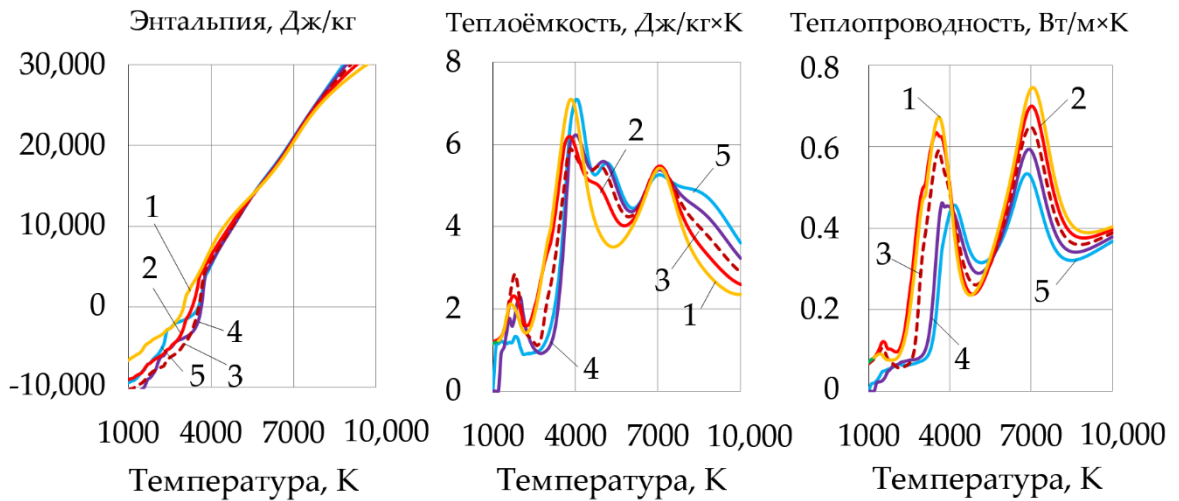


Рис. 52. Теплофизические свойства плазмы для смесей компонентов, %:

- 1 – $40\text{FeCO}_3\text{+}40\text{KNO}_3\text{+}20\text{Na}_3\text{AlF}_6$;
- 2 – $35\text{FeCO}_3\text{+}35\text{KNO}_3\text{+}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{+}10\text{Al}$;
- 3 – $30\text{FeCO}_3\text{+}30\text{KNO}_3\text{+}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{+}20\text{Al}$;
- 4 – $25\text{FeCO}_3\text{+}25\text{KNO}_3\text{+}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{+}30\text{Al}$;
- 5 – $20\text{FeCO}_3\text{+}20\text{KNO}_3\text{+}20\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{+}40\text{Al}$

С ростом температуры и концентрации солей происходит рост энтальпии, теплоёмкости и теплопроводности плазмы. Для эффективной резки важными являются теплофизические свойства плазмы в диапазоне температур 1000–4000 К, в котором реакции окисления имеют отрицательную свободную энергию Гиббса. Увеличение концентрации алюминия ведет к небольшому снижению энтальпии, теплоёмкости и теплопроводности. Введение FeCO_3 совместно с KNO_3 увеличило теплопроводность плазмы с 0,59 до 0,67 Вт/м×К при 3600 К по сравнению с чистым KNO_3 .

2.6 Моделирование фазового состава шлаковой фазы

Подводная мокрая резка может применяться для различных сталей и сплавов в состав которых входят элементы Fe, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, Al, Ti. При окислении металла образуется тугоплавкий шлак, который затрудняет процесс резки, рис. 53–55.

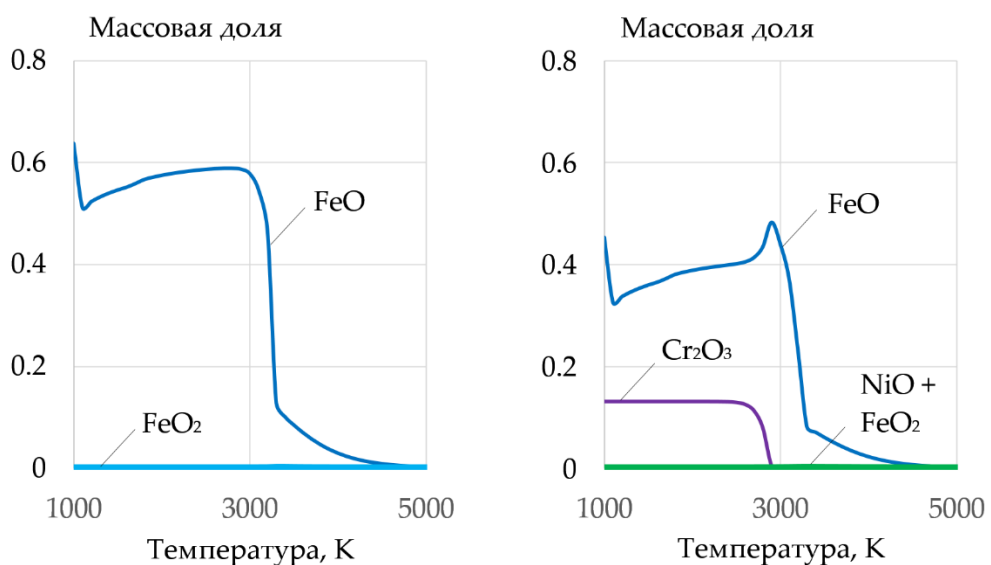


Рис. 53. Массовые доли оксидов в системе: а – 50% FeCO_3 -50%Fe; б – 50% FeCO_3 -36%Fe-9Cr-5Ni

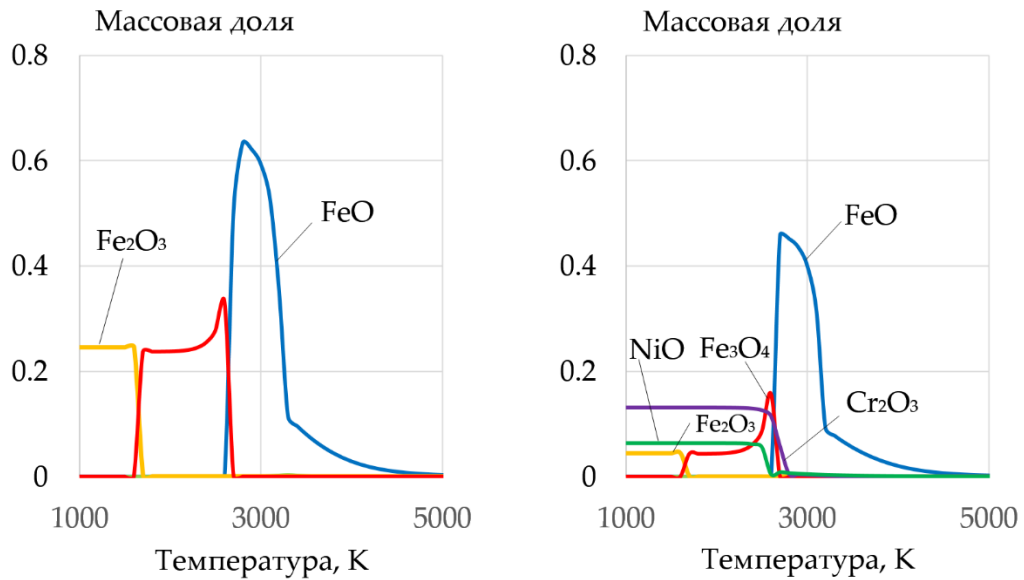


Рис. 54. Массовые доли оксидов в системе: а – 50% NaNO₃-50%Fe; б – 50% NaNO₃-36%Fe-9Cr-5Ni

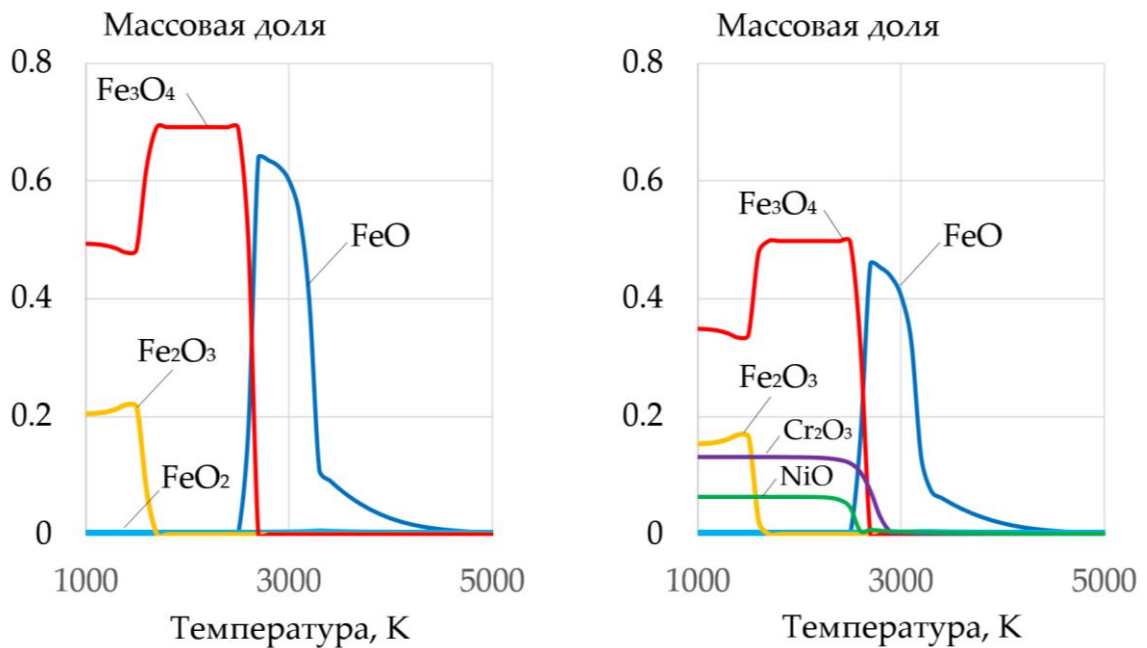


Рис. 55. Массовые доли оксидов в системе: а – 50% KNO₃-50%Fe; б – 50% KNO₃-36%Fe-9Cr-5Ni

Удаление шлака из зоны реза осуществляется под влиянием баланса сил: гравитационная сила, сила давления дуги и сила поверхностного натяжения. Для удаления шлака необходимо снизить его поверхностное натяжение, что может быть достигнуто при ионном растворении оксидов

в криолите Na_3AlF_6 . При высоких температурах (в зоне дуги) возможно взаимодействие оксидов шлака с криолитом по реакциям (22–27), рис. 56:

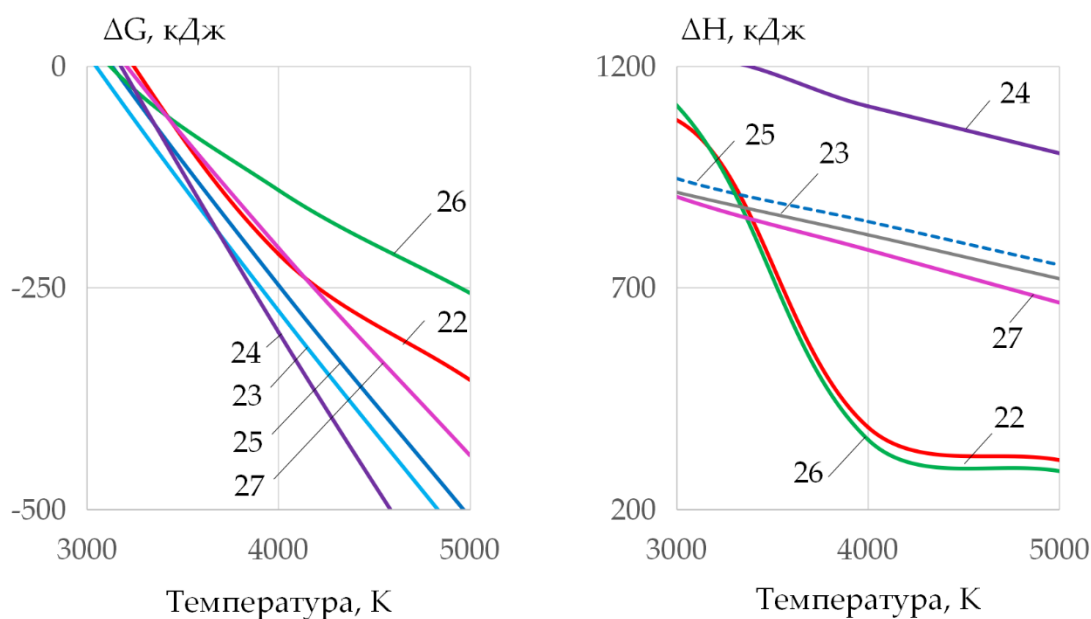
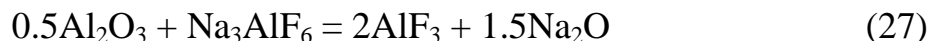
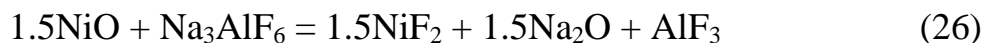
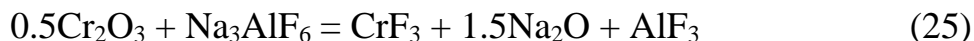
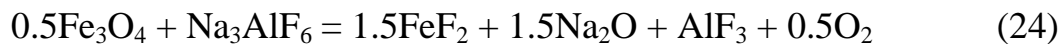
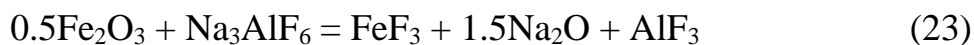
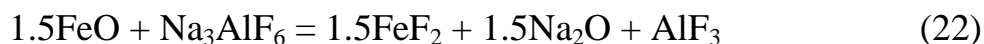
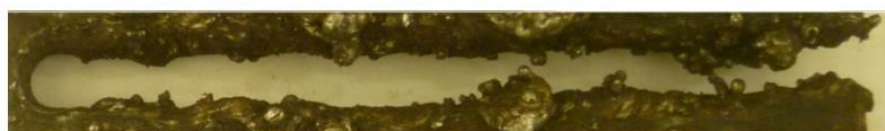
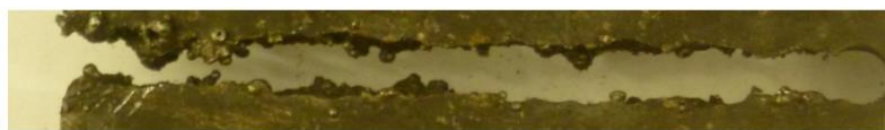


Рис. 56. Изменение свободной энергии Гиббса и энтальпии реакций взаимодействия оксидов с криолитом

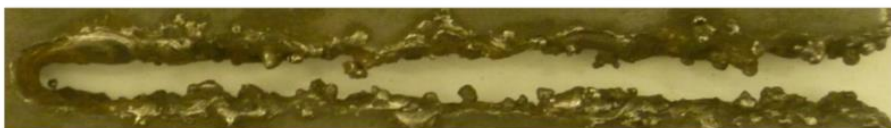
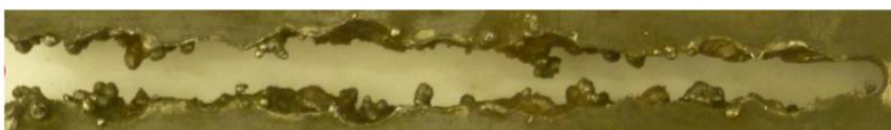
Эндотермические реакции растворения оксидов в криолите возможны, поскольку реакции имеют отрицательную величину свободной энергии Гиббса.

2.7 Сравнение эффективности реза с применением FeCO_3 и KNO_3

Предварительные эксперименты показали, что использование чистого KNO_3 приводит к ухудшению стабильности реза и коротким замыканиям из-за высокого выделения кислорода, рис. 57, 58. Анализ фазового состава плазмы подтверждает образование отрицательных ионов кислорода, которые являются деионизаторами дуги. Чтобы улучшить стабильность дуги и замедлить выделение кислорода применили смесь KNO_3 с FeCO_3 .



а)



б)

Рис. 57. Лицевая и обратная сторона реза проволоками на основе 60 % KNO_3 (а) и 60 % FeCO_3 (б). Скорость подачи проволоки 6 м/мин

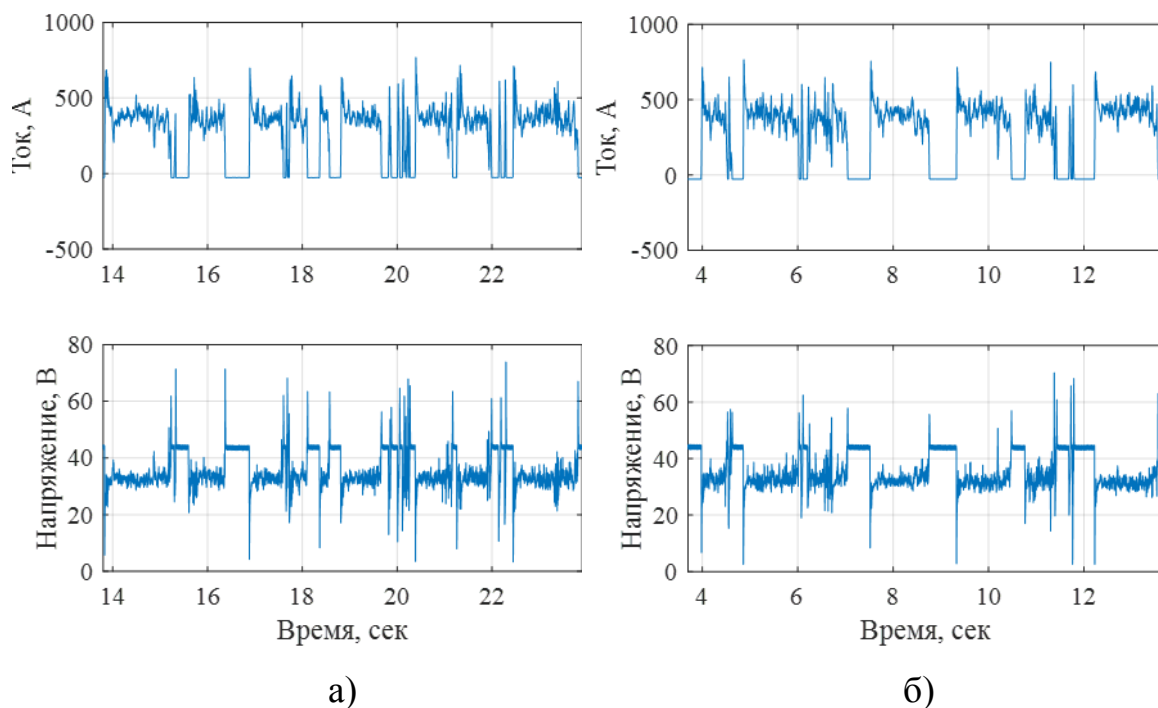


Рис. 58. Осциллограммы реза проволоками на основе 60 % KNO₃ (а) и 60 % FeCO₃ (б). Скорость подачи проволоки 6 м/мин

Таким образом, применение в шихте чистого KNO₃ обеспечивает высокое содержание кислорода, но ухудшает эффективность реза из-за роста количества коротких замыканий, отклонений тока и напряжения по сравнению с FeCO₃.

2.8 Выводы по главе 2

1. Экспериментальными методами скоростной видеосъемки и осциллографирования разработана физическая модель и установлен механизм подводной мокрой дуговой резки порошковой проволокой, который состоит из 5 последовательных фаз: фаза I возбуждения дуги, формирования парогазового пузыря и нагрева металла для инициации реакции окисления; фаза II стабилизации дуги и развитие реакции окисления; фаза III рост напряжения и длины дуги, снижение тока, формирование сквозной прорези и удаление шлака под давлением дуги; фаза IV обрыва дуги и окончание рабочего цикла; фаза V короткого замыкания и начало нового рабочего цикла.

2. Экспериментальными методами установлен механизм динамического поведения парогазового пузыря при подводной резке, который состоит из 6 последовательных фаз: фаза I – начало процесса с коротким замыканием; фаза II – разложение воды, образование парогазового пузыря, разогрев металла; фаза III – стабилизация дуги, расширение парогазового пузыря, начало реза; фаза IV – углубление дуги в металл, стабилизация парогазового пузыря; фаза V – схлопывание парогазового пузыря и образование нового пузыря; фаза VI – отрыв старого пузыря, расширение нового пузыря.

3. Разработана каналовая модель подводной мокрой резки с применением порошковых проволок, которая заключается в формировании узкого канала реза при углублении и удлинении дуги в металле за счет окислительных реакций металла с газовой смесью в зоне вокруг активного пятна дуги с образованием тугоплавкого шлака, который вытесняется давлением дуги из канала реза. Канал стабилизирует дугу, что позволяет дуге увеличивать длину при формировании прорези.

4. Для создания окислительных составов порошковых проволок являются перспективными нитраты NaNO_3 , KNO_3 и карбонаты FeCO_3 и Li_2CO_3 , которые имеют отрицательные значения свободной энергии Гиббса и минимальные значения изменения энтальпии в диапазоне температур диссоциации 1000–3000 К.

5. Процессы окисления металлов определяются концентрацией молекулярного и атомарного кислорода в газовой фазе при температурах 1000–4000 К, т.е. активное окисление происходит на границе активного пятна дуги. Максимальную концентрацию свободного молекулярного и атомарного кислорода обеспечивают азотистые соли KNO_3 , NaNO_3 и углекислая соль железа FeCO_3 при температурах 1000–4000 К.

6. Для улучшения стабильности горения дуги в циклах реза с короткими замыканиями необходимо увеличивать степень ионизации плазмы, что достигается за счет применения смеси нитрата калия KNO_3 и карбоната

железа FeCO_3 при содержании 40–70% смеси совместно с порошком алюминия при содержании 10–40 % от массы шихты.

7. Обнаружено, что ионизация плазмы, стабильность горения дуги и эффективность реза могут ухудшаться при увеличении концентрации отрицательных ионов кислорода и фтора при повышении концентрации кислорода и введении криолита Na_3AlF_6 . Применение смеси KNO_3 и FeCO_3 совместно с порошком алюминия позволило снизить концентрацию отрицательных ионов кислорода и фтора и увеличить степень ионизации и концентрацию электронов в плазме.

8. Состав шихты порошковой проволоки должен обеспечивать максимум энтальпии, внутренней энергии, теплоёмкости и теплопроводности газовой системы. Введение FeCO_3 совместно с KNO_3 увеличило теплопроводность плазмы с 0,59 до 0,67 Вт/м×К при 3600 К по сравнению с чистым KNO_3 .

9. Образование шлака при резке приводит к экранированию поверхности металла от кислорода, что снижает эффективность реза и скорость реакции окисления. Удаление шлака из зоны реза осуществляется под влиянием баланса сил: гравитационная сила, сила давления дуги и сила поверхностного натяжения. Для удаления шлака необходимо снижать его поверхностное натяжение, что было достигнуто при ионном растворении оксидов в криолите Na_3AlF_6 и химическом взаимодействии оксидов с криолитом с образованием летучих фторидов.

**Глава 3. РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ
ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ
РЕЗКИ СТАЛЕЙ**

3.1 Методика анализа электрических параметров

Для испытаний использовали 5 составов шихты с различным содержанием окислительной смеси, табл. 3.

Таблица 3

Состав шихты экспериментальных порошковых проволок

Номер провода	Состав шихты, масс. %
1	$\text{FeCO}_3 + \text{KNO}_3 - 60; \text{Na}_3\text{AlF}_6 - 30; \text{Al} - 10$
2	$\text{FeCO}_3 + \text{KNO}_3 - 55; \text{Na}_3\text{AlF}_6 - 25; \text{Al} - 20$
3	$\text{FeCO}_3 + \text{KNO}_3 - 50; \text{Na}_3\text{AlF}_6 - 20; \text{Al} - 30$
4	$\text{FeCO}_3 + \text{KNO}_3 - 60; \text{Na}_3\text{AlF}_6 - 35; \text{Al} - 5$
5	$\text{FeCO}_3 + \text{KNO}_3 - 70; \text{Na}_3\text{AlF}_6 - 20; \text{Al} - 10$

Источником тока являлся трансформаторный выпрямитель ESAB Origo MIG L405 с напряжением холостого хода 45 В, скорость подачи проволоки изменяли в пределах 5–9 м/мин, скорость реза 190 мм/мин, длина реза 100 мм, глубина погружения образца 300 мм. Напряжение дуги и силу тока измеряли с помощью цифрового USB-осциллографа и программы Multi VirAnalyzer (Harbin Instrustar) с частотой 25 кГц.

Для анализа осциллограмм использовали метод оценки плотности ядра в программе MatLab с использованием функции "ksdensity" для расчета распределения плотности вероятностей f для значений случайной величины x_i в исходной выборке x в равномерно распределенных точках.

Функция распределения ядра определялась по формуле:

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right),$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – случайные выборки из осциллограмм; n – объём выборки; K – функция сглаживания ядра; h – пропускная способность. Для сглаживания кривой функция ядра использует нормальное распределение по Гауссу:

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2}.$$

По результатам анализа построили графики изменения плотности вероятности напряжения и силы сварочного тока при различных скоростях подачи проволоки, рис. 59.

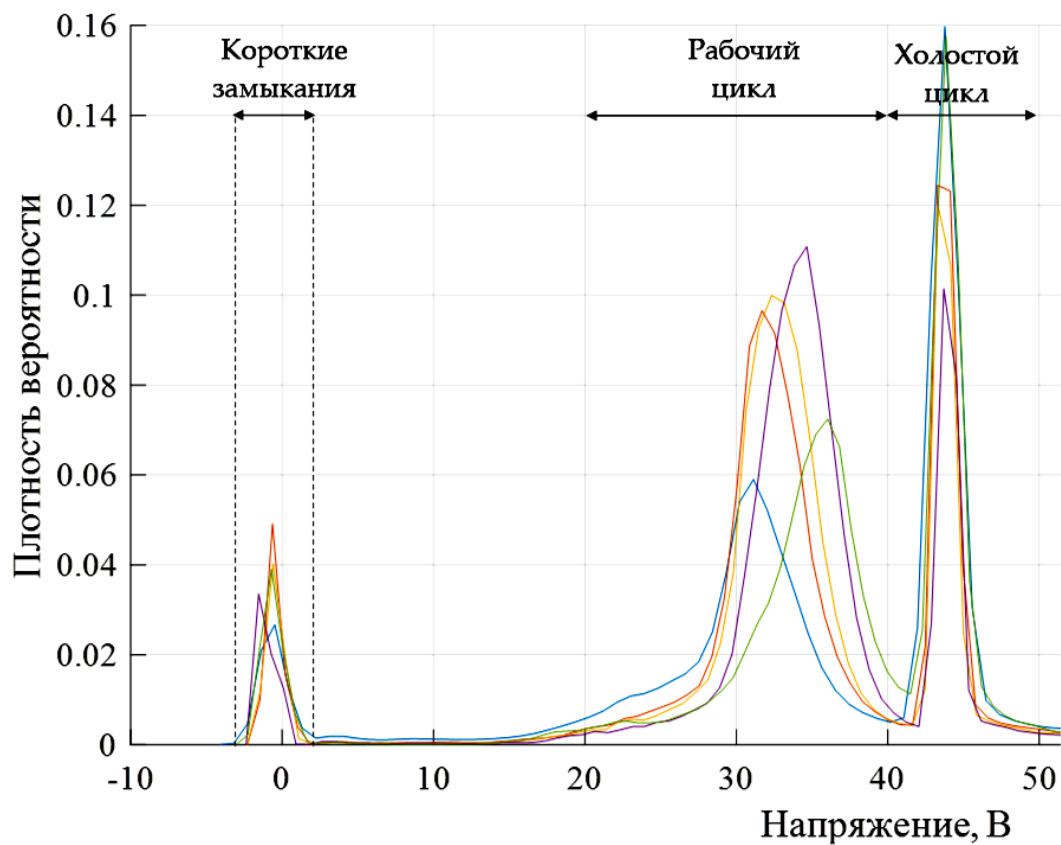


Рис. 59. Типичные циклы при анализе плотностей вероятности напряжения

3.2. Исследование технологических свойств опытных порошковых проволок на основе системы $\text{FeCO}_3\text{-KNO}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}$

Внешний вид образцов после подводной резки представлен на рис. 60–64.

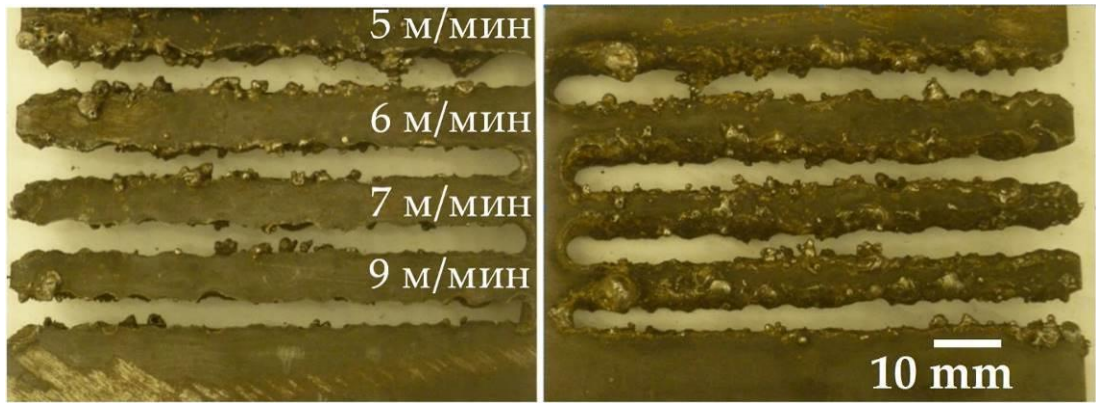


Рис. 60. Внешняя и обратная сторона пластины толщиной 8 мм после резки проволокой № 1 при скоростях подачи проволоки 5–9 м/мин

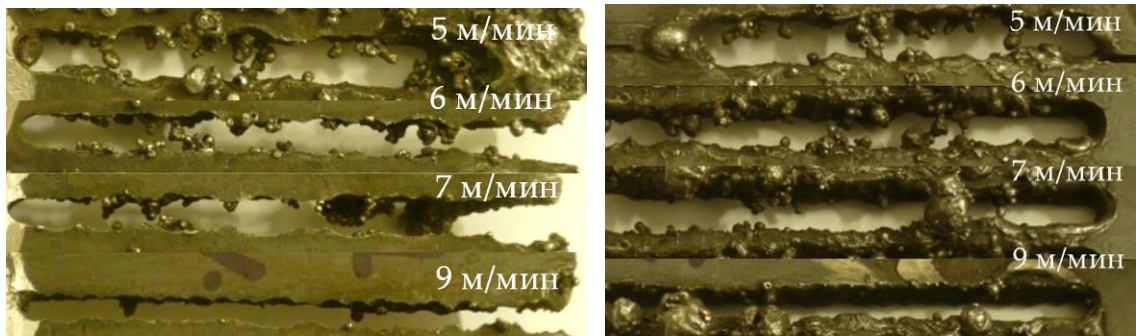


Рис. 61. Внешняя и обратная сторона пластины толщиной 8 мм после резки проволокой № 2 при скоростях подачи проволоки 5–9 м/мин

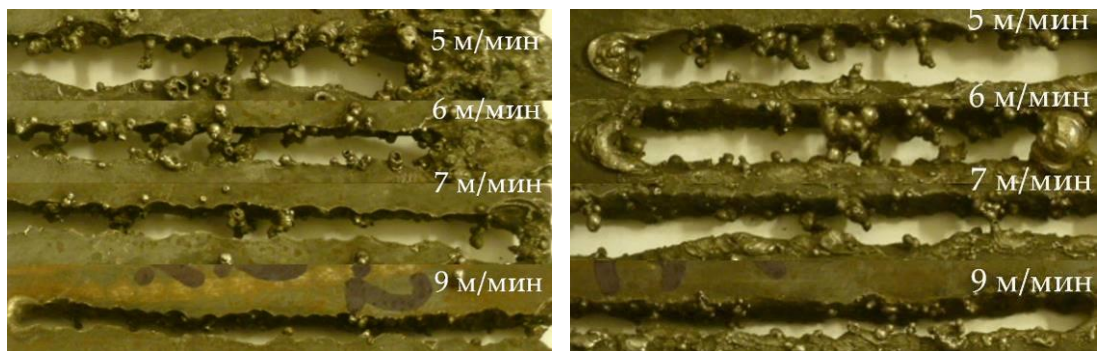


Рис. 62. Внешняя и обратная сторона пластины толщиной 8 мм после резки проволокой № 3 при скоростях подачи проволоки 5–9 м/мин

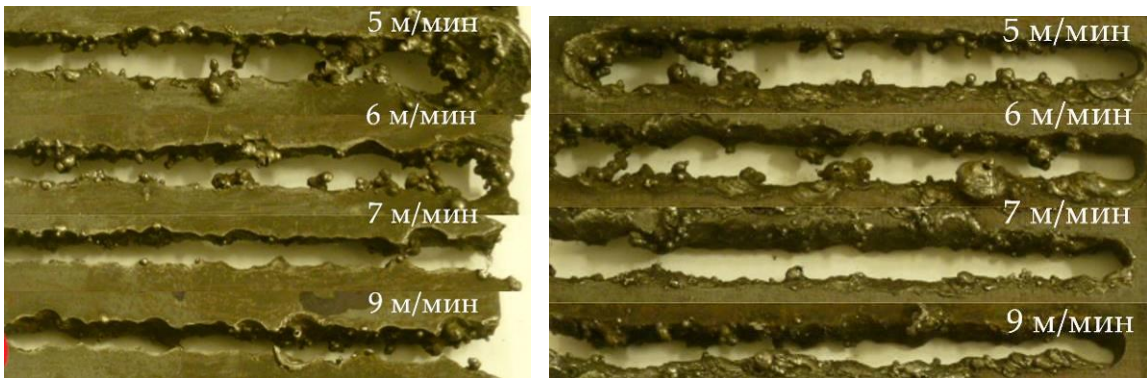


Рис. 63. Внешняя и обратная сторона пластины толщиной 8 мм после резки проволокой № 4 при скоростях подачи проволоки 5–9 м/мин

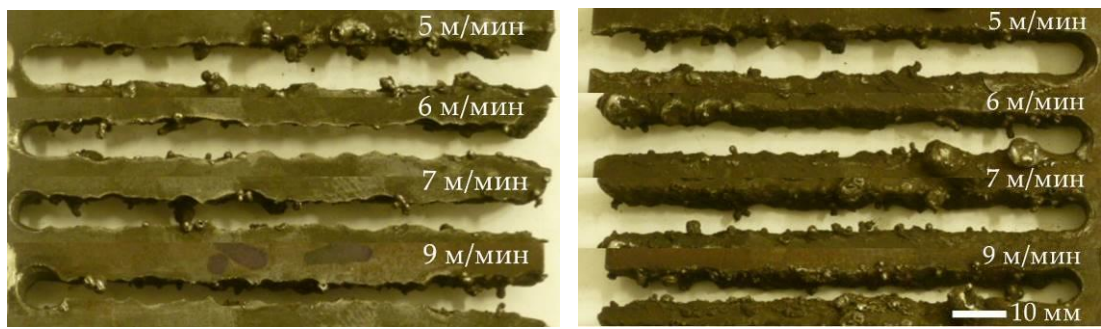


Рис. 64. Внешняя и обратная сторона пластины толщиной 8 мм после резки проволокой № 5 при скоростях подачи проволоки 5–9 м/мин

Осциллограммы процесса подводной резки опытными проволоками представлены на рис. 65–72.

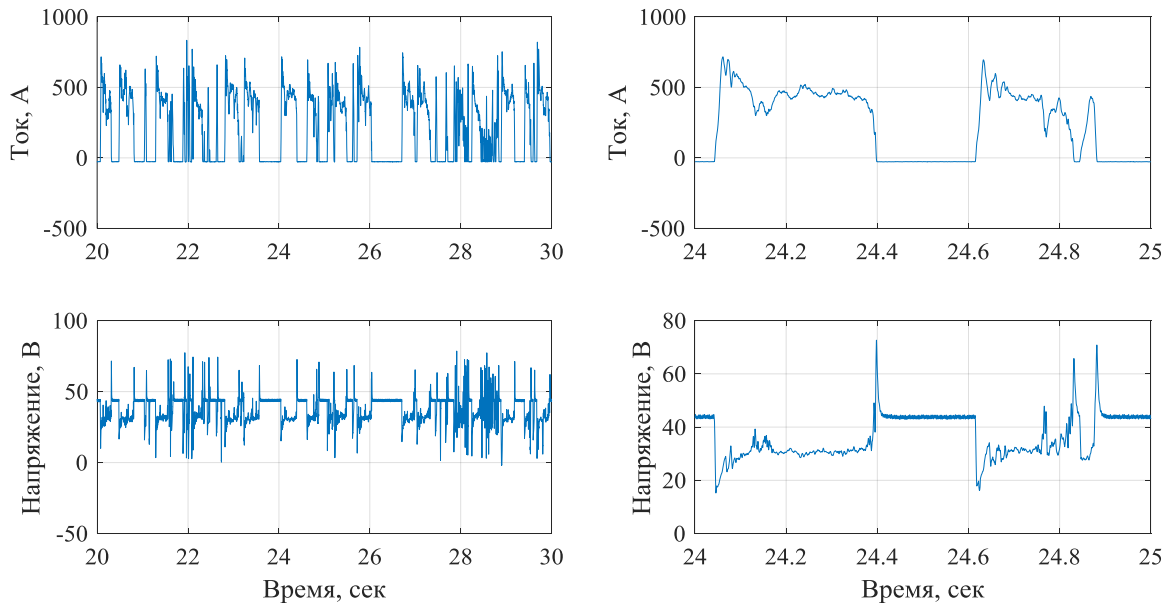


Рис. 65. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 1 при скорости подачи проволоки 9 м/мин

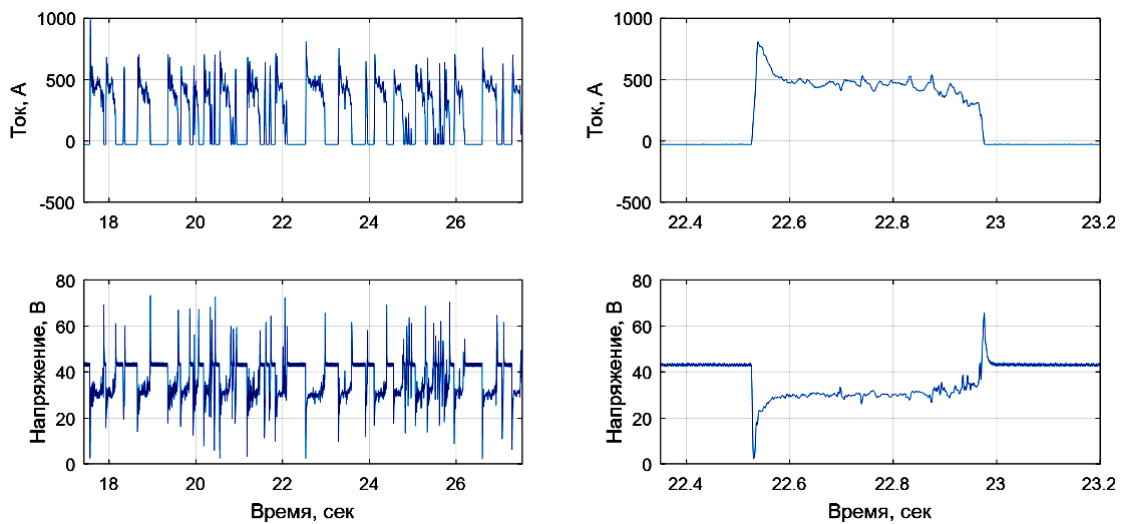


Рис. 66. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 2 при скорости подачи проволоки 9 м/мин

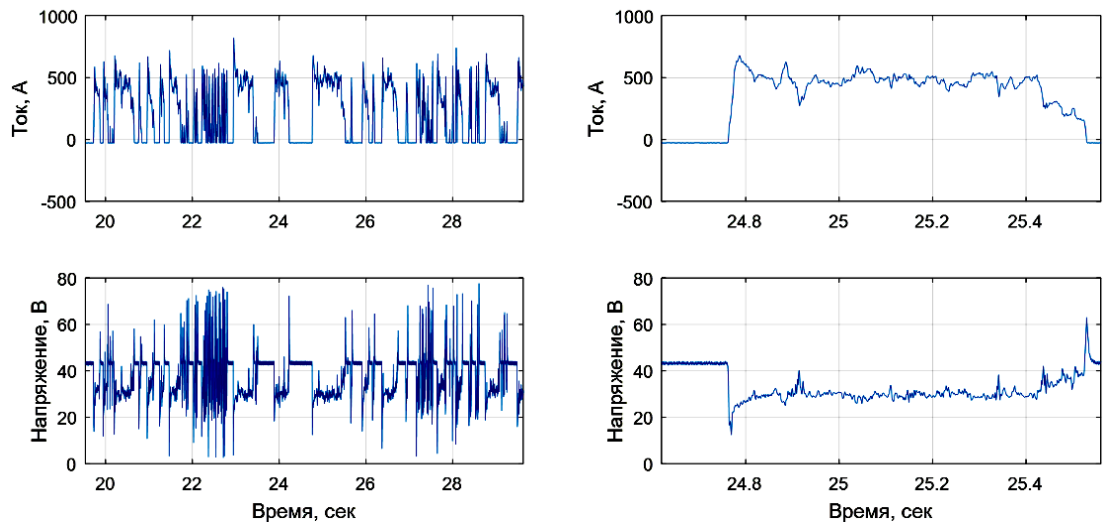


Рис. 67. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 3 при скорости подачи проволоки 9 м/мин

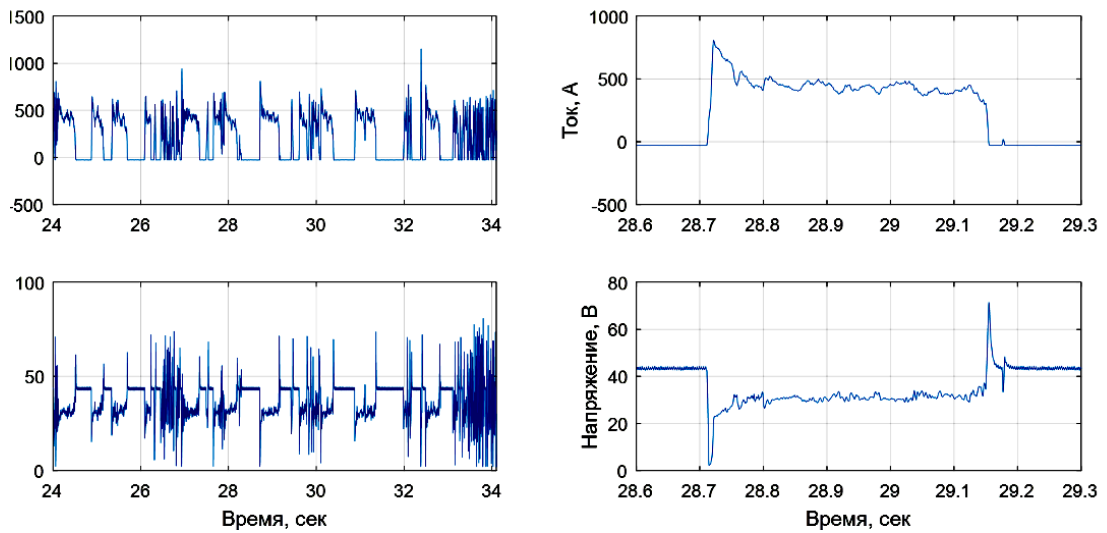


Рис. 68. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 4 при скорости подачи проволоки 9 м/мин

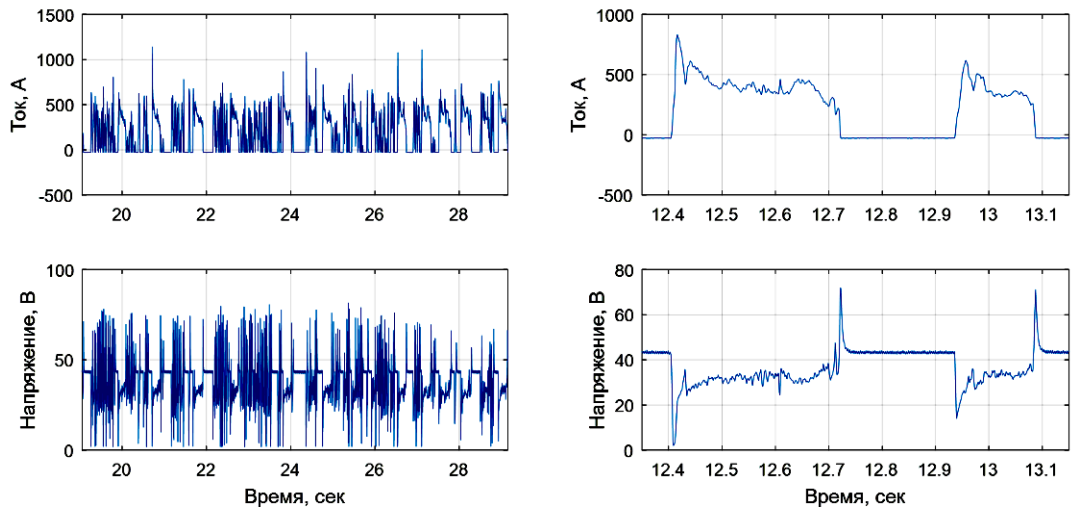


Рис. 69. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 5 при скорости подачи проволоки 9 м/мин

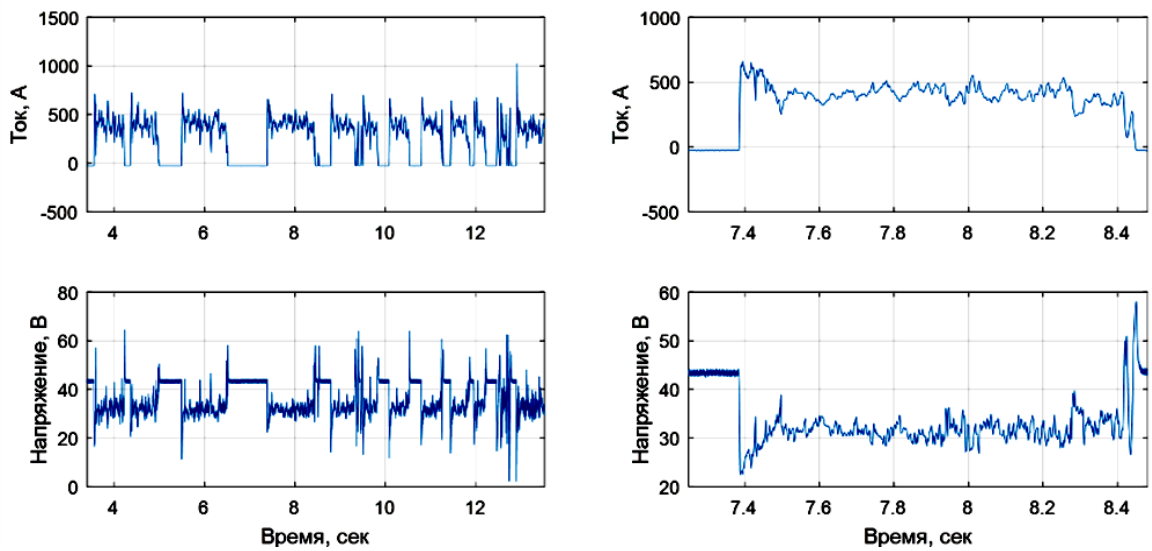


Рис. 70. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 5 при скорости подачи проволоки 7 м/мин

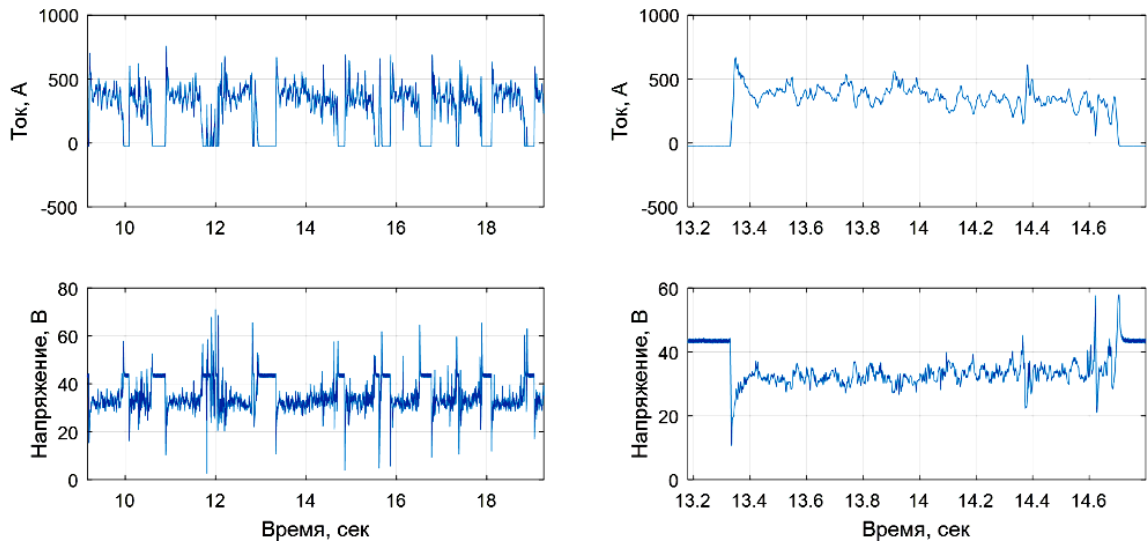


Рис. 71. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 5 при скорости подачи проволоки 6 м/мин

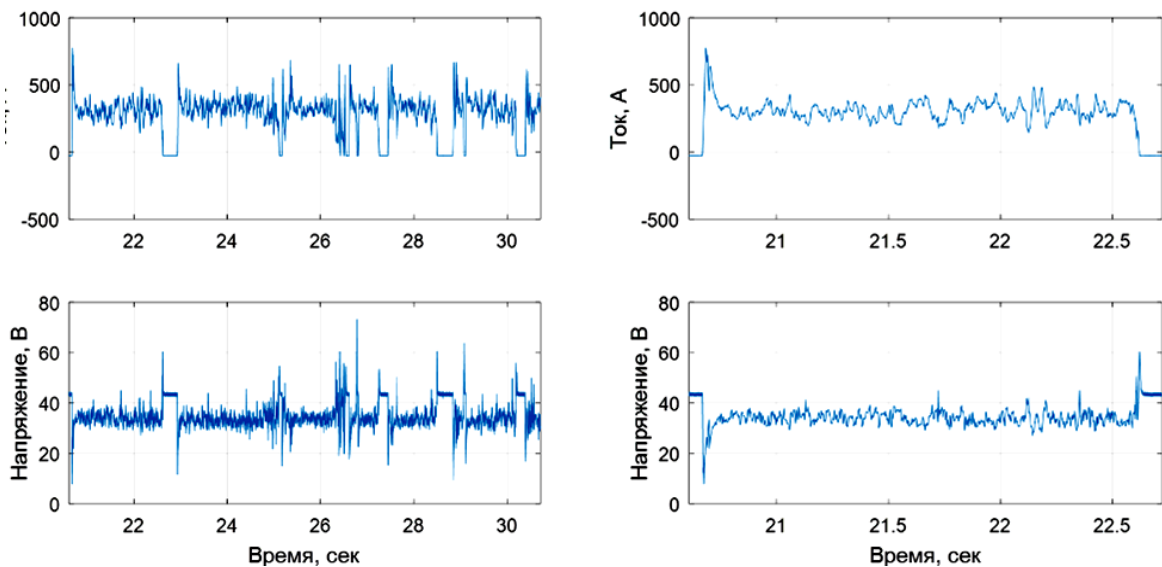


Рис. 72. Осциллограммы процесса резки с проволокой № 5 при скорости подачи проволоки 5 м/мин

Анализ осциллограмм для определения средних величин напряжения и силы тока произвели с помощью математической статистики в программе MatLab, рис. 73.

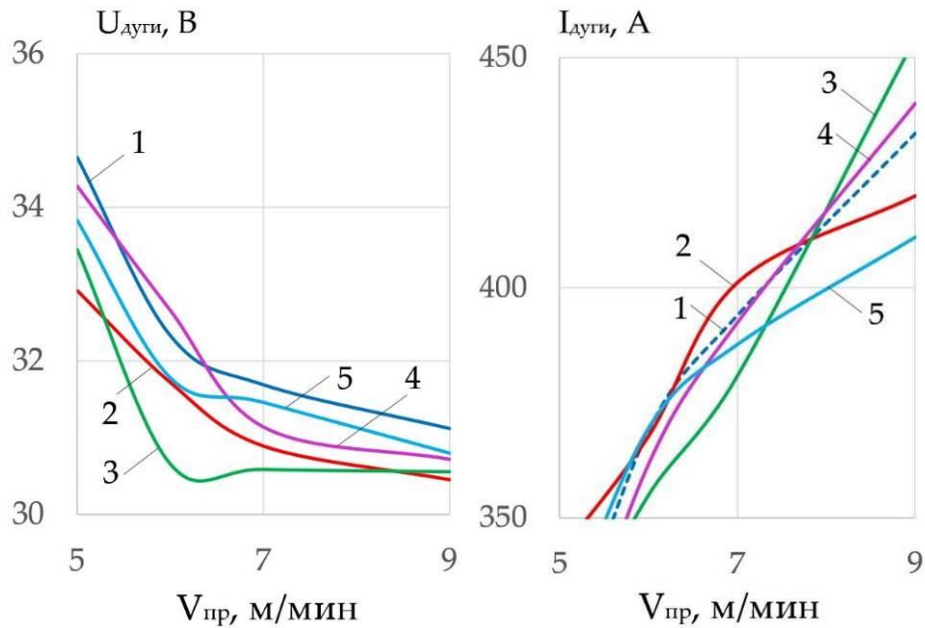


Рис. 73. Распределение среднего напряжения и силы тока при резке с порошковыми проволоками № 1–5

С ростом содержания алюминия в шихте проволок № 1–3 происходит уменьшение напряжения и рост силы тока, особенно для проволоки № 3 при содержании алюминия 30 %. Однако уменьшение содержания окислителя до 50 % вызывает ухудшение качества реза. Уменьшение содержания алюминия до 5 % при высоком содержании окислителя вызывает увеличение напряжения дуги и снижает силу сварочного тока, особенно при малых скоростях подачи проволоки 5–6 м/мин, но при 7–9 м/мин глубина и качество реза улучшается. Увеличение окислителя до 70 % при увеличении содержания алюминия до 10 % приводит к росту ширины реза, особенно при скорости подачи проволоки 5–6 м/мин.

Таким образом, исследование технологических свойств порошковых проволок показало, что оптимальной концентрацией смеси солей является диапазон 50–60 %, криолита 20–30 %, алюминия 10–30%. Проволоки с этими концентрациями компонентов обеспечивают минимальное напряжение и максимальный ток при стабильном резе.

3.3 Анализ плотности вероятности электрических параметров

подводной мокрой резки

Результаты анализа осциллограмм в программе Matlab приведены на рис. 74–78.

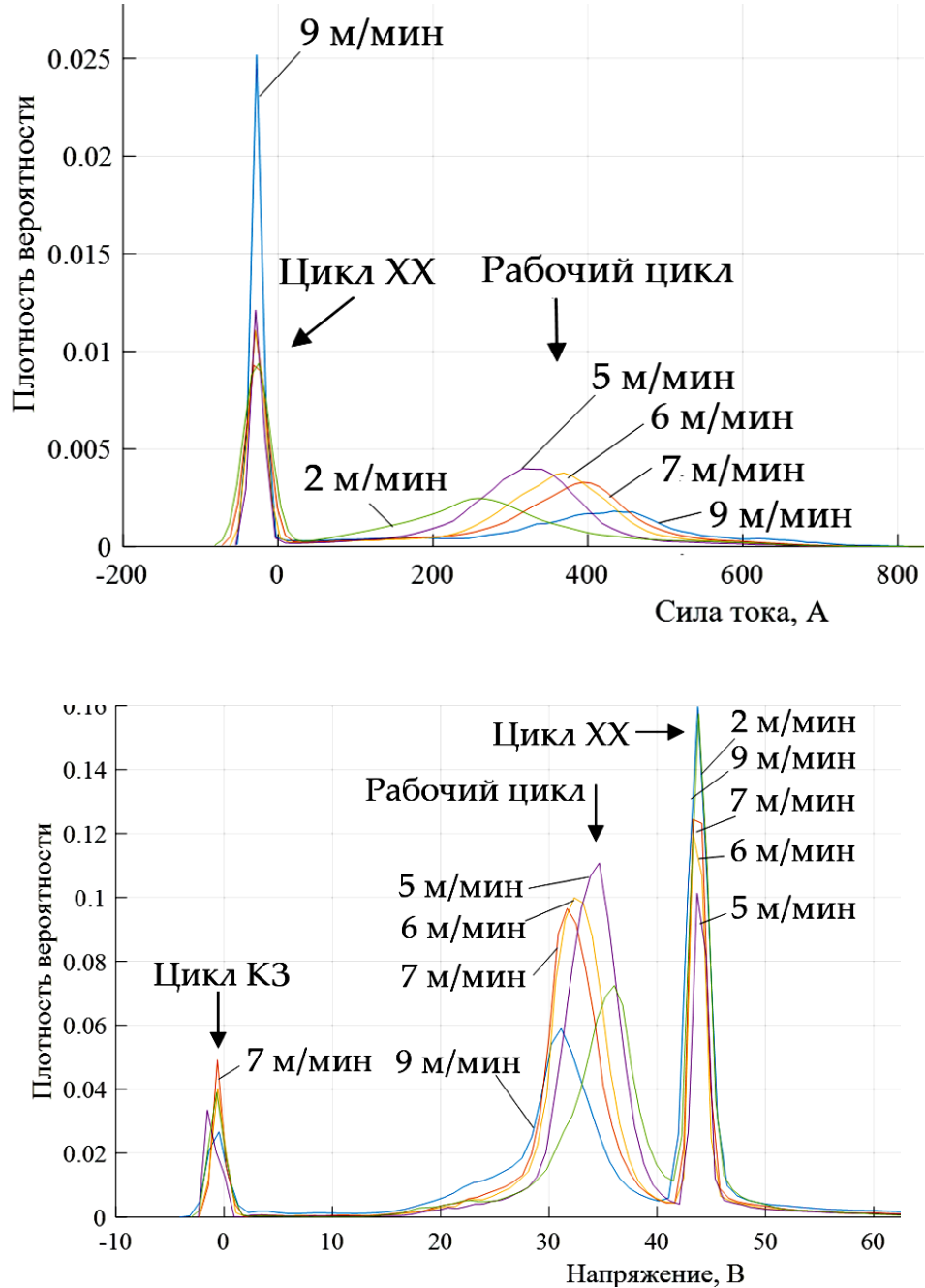


Рис. 74. Распределение плотности вероятности тока и напряжения при резке проволокой № 1

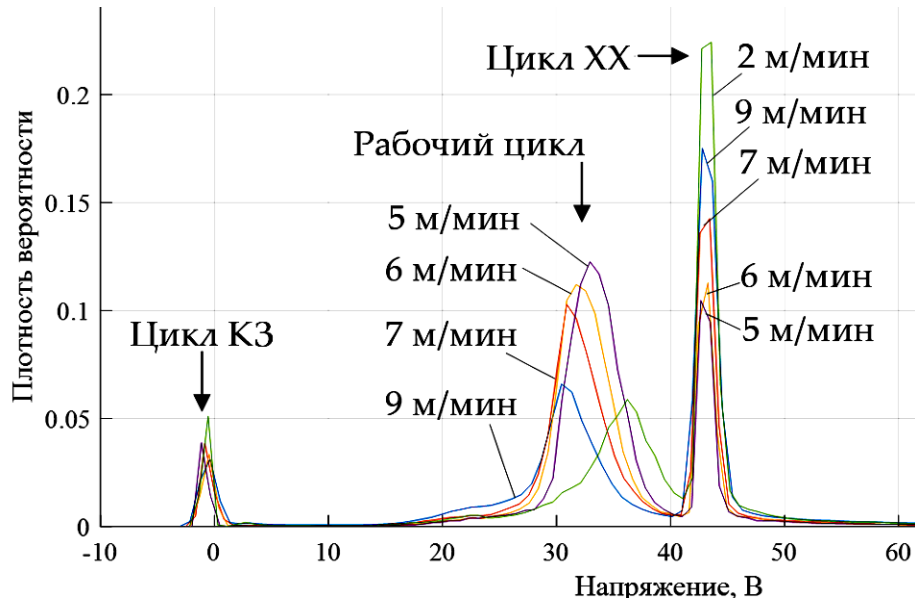
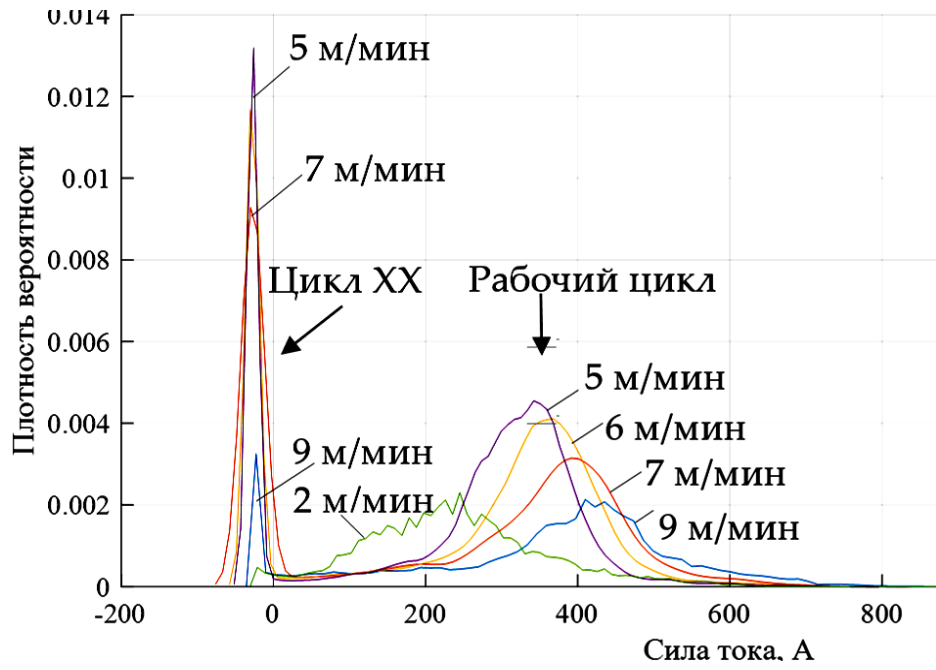


Рис. 75. Распределение плотности вероятности тока и напряжения при резке проволокой № 2

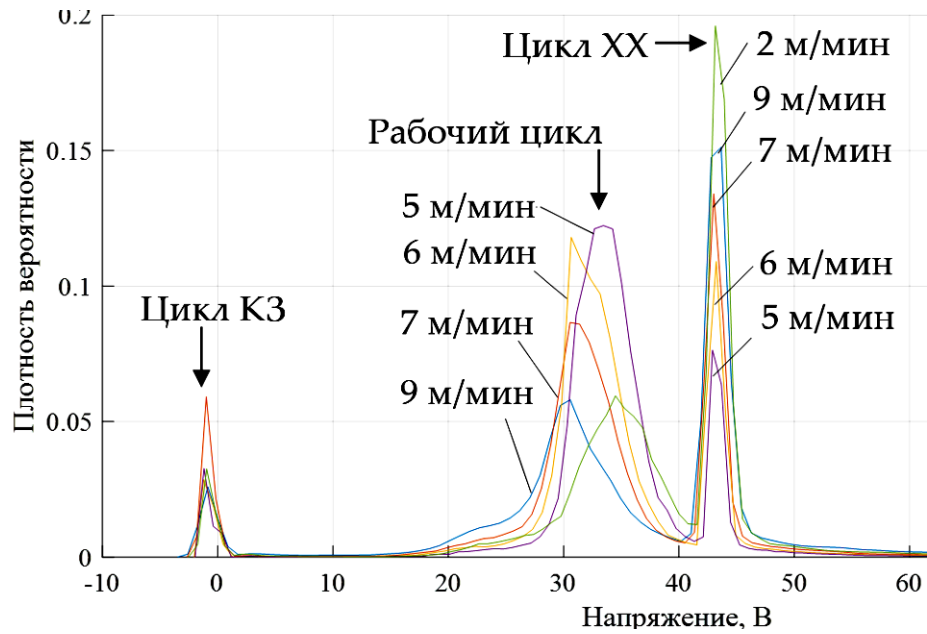
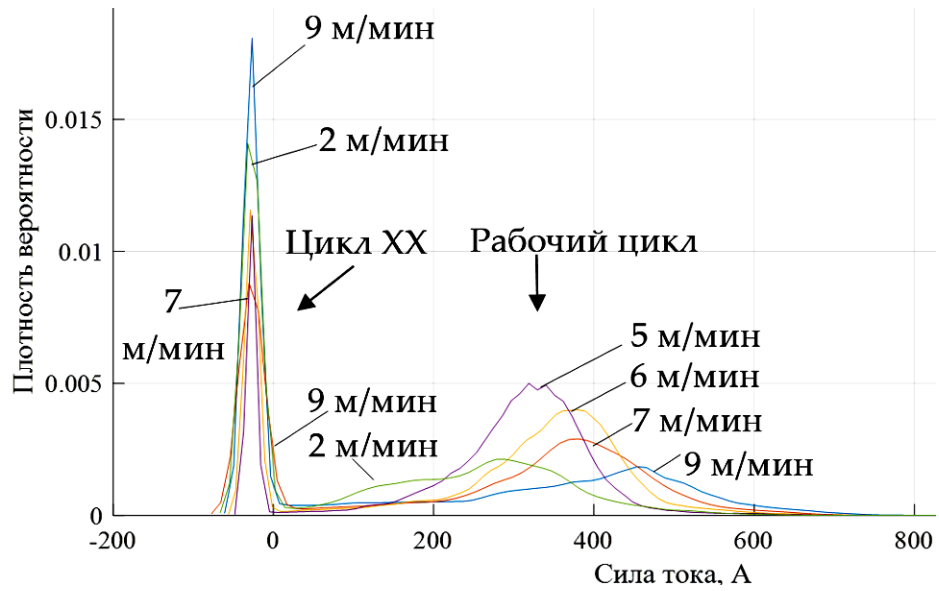


Рис. 76. Распределение плотности вероятности тока и напряжения при резке проволокой № 3

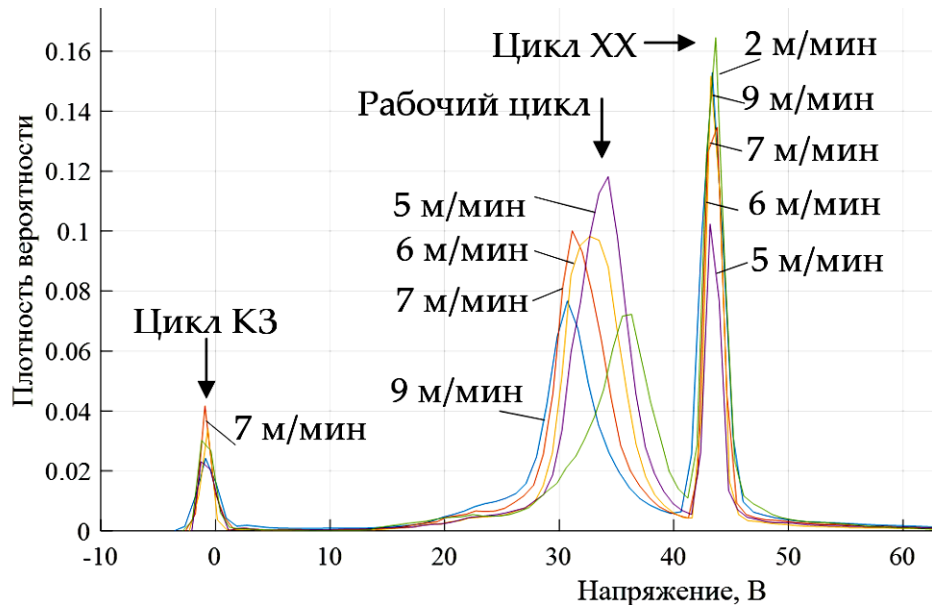
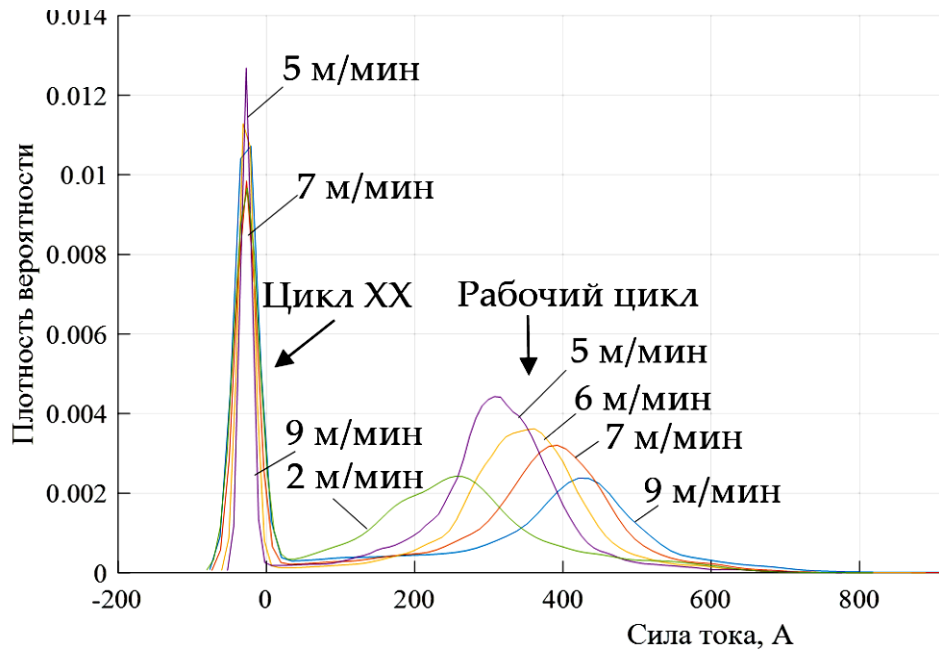


Рис. 77. Распределение плотности вероятности тока и напряжения при резке проволокой № 4

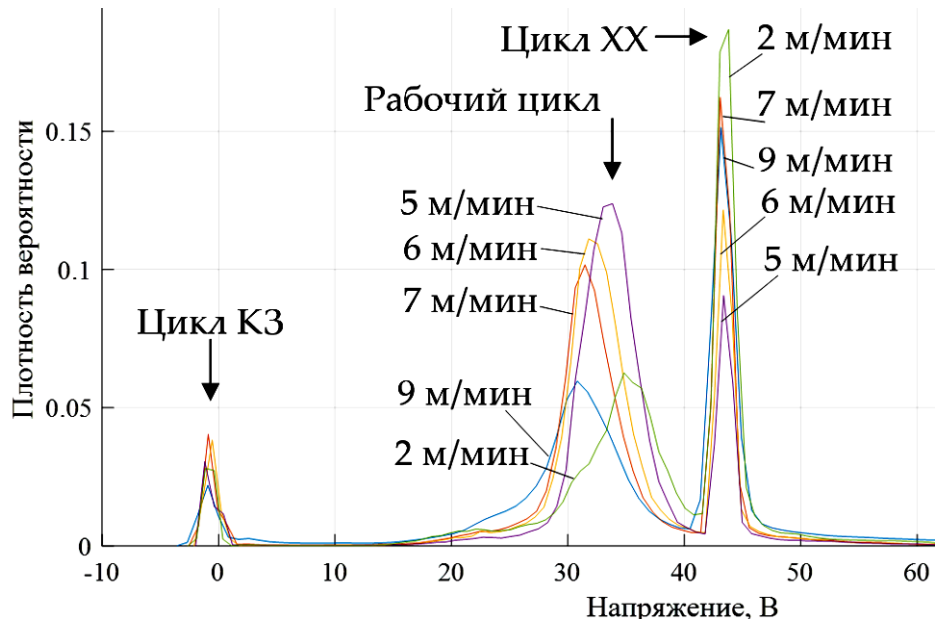
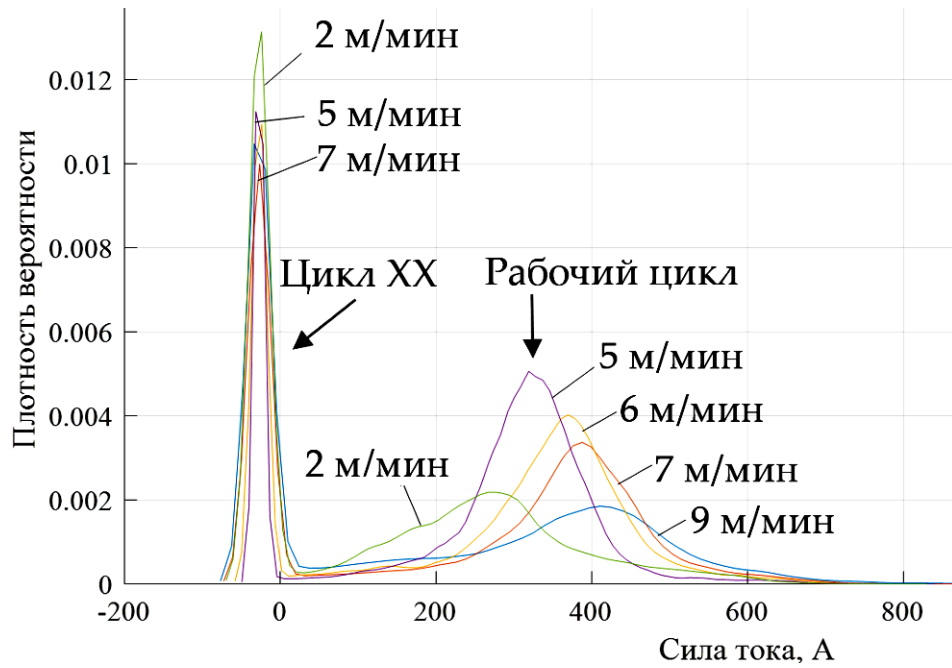


Рис. 78. Распределение плотности вероятности тока и напряжения при резке проволокой № 5

Анализ распределения плотности мощности показывает существенное влияние скорости подачи проволоки на эффективность реза, рис. 79.

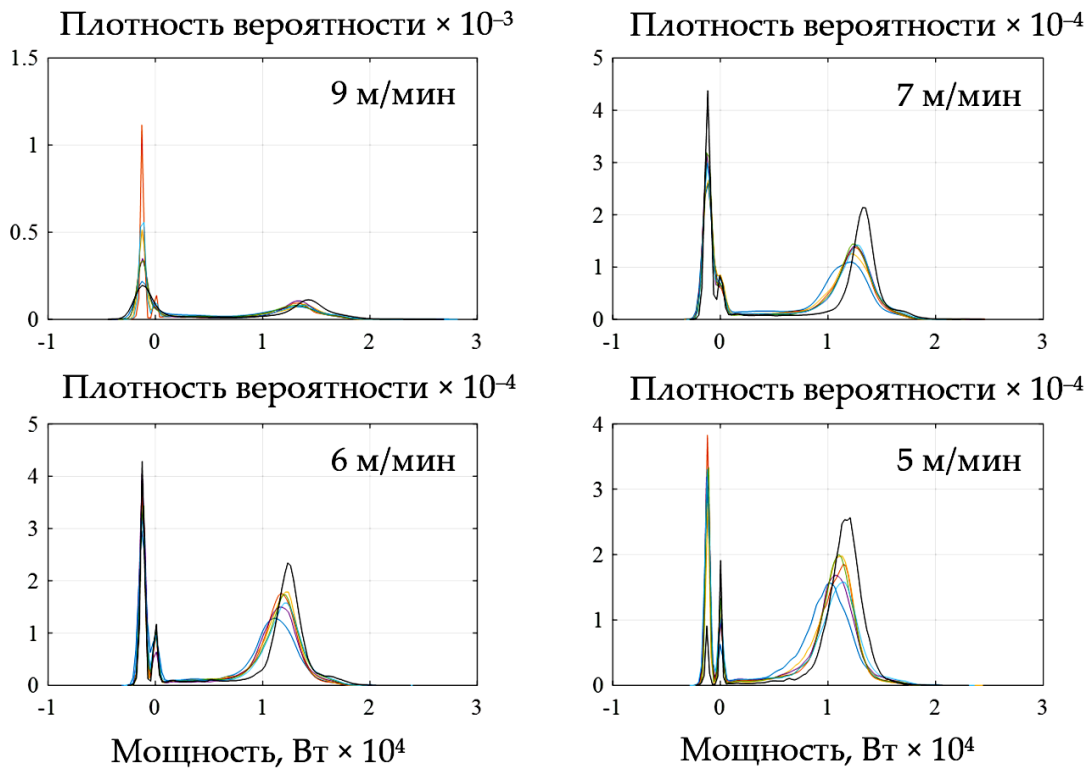


Рис. 79. Плотность вероятности мощности при резке различными проволоками

В частности, увеличение скорости подачи до 9 м/мин приводит к росту мощности и формированию глубокого узкого канала, однако энергетическая эффективность реза уменьшается из-за роста плотности в циклах короткого замыкания. Аналогичные потери из-за коротких замыканий возникают при уменьшении скорости подачи до 5–6 м/мин. Таким образом, наибольшей эффективностью в процессах реза обладают режимы при скорости подачи проволоки от 6–9 м/мин в диапазоне содержания смеси окислителя 50–60 %, Na_3AlF_6 20–30 % и алюминия 10–20 %.

3.4. Определение оптимальных концентраций компонентов в составе шихты

Анализ плотности вероятности тока показал, что с ростом скорости подачи проволоки плотность вероятности силы тока в рабочем цикле реза уменьшается и сдвигается в сторону высоких значений силы тока. При этом плотность вероятности силы тока в холостых циклах увеличивается.

Анализ плотности вероятности напряжения показал, что с ростом скорости подачи проволоки плотность вероятности напряжения в рабочем цикле реза уменьшается и сдвигается в сторону низких значений напряжения. При этом плотность вероятности напряжения в холостых циклах и в циклах короткого замыкания с ростом скорости подачи увеличивается.

На рис. 80 показаны зависимости отношения плотности вероятностей напряжения в холостом и рабочем циклах.

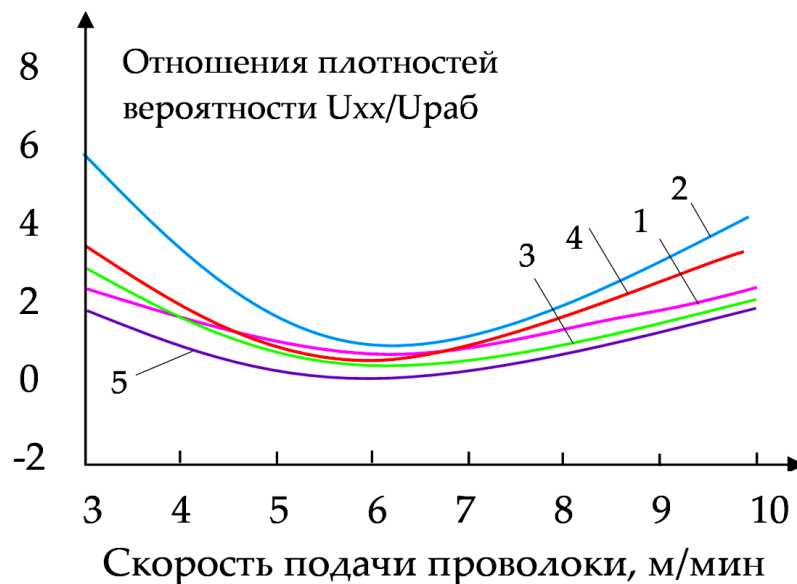


Рис. 80. Зависимости отношения плотности вероятностей напряжения в холостом и рабочем циклах

В диапазоне скоростей подачи проволоки 5–8 м/мин обеспечивается наибольшая эффективность процесса резки. При приближении к нулю

эффективность реза увеличивается, поскольку сокращается вероятность холостых циклов. По отношению плотности вероятностей напряжения в холостом и рабочем циклах наиболее эффективными режимами для резки опытными проволоками 1–5 являются скорости подачи проволоки в диапазоне 5–8 м/мин.

С увеличением концентрации алюминия от 10 до 30 % в проволоках 1, 2, 3 плотность вероятности силы тока в рабочих циклах почти не изменяется и составляет 0,002–0,005, а плотность вероятности напряжения 0,05–0,12. Однако, плотность вероятности напряжения в цикле холостого хода с ростом концентрации алюминия с 10 до 30 % уменьшается с 0,1–0,16 до 0,075–0,15, что свидетельствует об улучшении эффективности процесса резки. Таким образом, оптимальная концентрация алюминия должна составлять 10–30 %.

С ростом концентрации криолита от 20 до 30 % в проволоках 5, 1 происходит некоторое увеличение плотности вероятности напряжения в циклах КЗ с 0,03–0,04 до 0,02–0,05 и значительное увеличение плотности вероятности силы тока в холостом цикле паузы с 0,01–0,011 до 0,01–0,025, что свидетельствует об ухудшении эффективности процесса. Таким образом, оптимальная концентрация криолита не должна превышать 20 %.

С ростом концентрации смеси солей от 50 до 70 % в проволоках 3 и 5 плотности вероятности рабочих токов и напряжений существенно не различаются, поэтому оптимальную концентрацию солей можно принять в диапазоне 50–70 %.

На основании вышеизложенного, определены оптимальные композиции порошковых проволок для дальнейших испытаний согласно, табл. 4.

Таблица 4

Химические составы опытно-серийных порошковых проволок

Марка проволоки	Состав шихты, масс. %			
	KNO_3	$FeCO_3$	Na_3AlF_6	Al
ППР-АПЛ1–1	30	30	20	20
ППР-АПЛ1–2	25	25	20	30
ППР-АПЛ1–3	35	35	20	10

3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана методика анализа электрических параметров процесса подводной мокрой резки на основе математической статистики обработки массивов данных осциллограмм в программе Matlab для расчета нормального распределения плотности вероятности силы тока, напряжения и мощности и предложен критерий качества реза, который основан на отношении плотностей вероятности напряжений в холостом и рабочем циклах.

2. На основе экспериментальных данных установлено, что оптимальной концентрацией смеси солей является диапазон 50–60 %, криолита 20–30 %, алюминия 10–30%. Проволоки с этими концентрациями компонентов обеспечивают минимальное напряжение и максимальный ток при стабильном резе.

3. Предложен критерий оценки эффективности реза, который основан на отношении плотности вероятностей напряжения в холостом и рабочем циклах. При приближении к нулю эффективность реза увеличивается, поскольку сокращается вероятность холостых циклов. По отношению плотности вероятностей напряжения в холостом и рабочем циклах установлено, что наиболее эффективными режимами для резки опытными проволоками 1–5 являются скорости подачи проволоки в диапазоне 5–8 м/мин.

4. Анализ плотности вероятности тока показал, что с ростом скорости подачи проволоки плотность вероятности силы тока и напряжения в рабочих циклах реза уменьшается и сдвигается в сторону высоких значений силы тока и низких значений напряжения. При этом плотность вероятности силы тока и напряжения в холостых циклах и в циклах короткого замыкания с ростом скорости подачи увеличивается.

5. На основе анализа плотностей вероятности тока, напряжения и мощности установлено, что для достижения эффективности процесса резки оптимальная концентрация алюминия должна составлять 10–30 %, оптимальная концентрация криолита не должна превышать 20 %, оптимальная концентрация солей должна быть в диапазоне 50–70 %. На основе результатов анализа разработаны 3 химических состава порошковых проволок для дальнейших испытаний.

Общие выводы

1. Экспериментальными методами скоростной видеосъемки и осциллографирования разработана физическая модель и установлен механизм подводной мокрой дуговой резки порошковой проволокой, который состоит из 5 последовательных фаз: фаза I возбуждения дуги, формирования парогазового пузыря и нагрева металла для инициации реакции окисления; фаза II стабилизации дуги и развитие реакции окисления; фаза III рост напряжения и длины дуги, снижение тока, формирование сквозной прорези и удаление шлака под давлением дуги; фаза IV обрыва дуги и окончание рабочего цикла; фаза V короткого замыкания и начало нового рабочего цикла.

2. Экспериментальными методами установлен механизм динамического поведения парогазового пузыря при подводной резке, который состоит из 6 последовательных фаз: фаза I – начало процесса с коротким замыканием; фаза II – разложение воды, образование

парогазового пузыря, разогрев металла; фаза III – стабилизация дуги, расширение парогазового пузыря, начало реза; фаза IV – углубление дуги в металл, стабилизация парогазового пузыря; фаза V – схлопывание парогазового пузыря и образование нового пузыря; фаза VI – отрыв старого пузыря, расширение нового пузыря.

3. Разработана каналовая модель подводной мокрой резки с применением порошковых проволок, которая заключается в формировании узкого канала реза при углублении и удлинении дуги в металле за счет окислительных реакций металла с газовой смесью в зоне вокруг активного пятна дуги с образованием тугоплавкого шлака, который вытесняется давлением дуги из канала реза. Канал стабилизирует дугу, что позволяет дуге увеличивать длину при формировании прорези.

4. В результате термодинамического моделирования установлены активности реакций диссоциации солей и окисления элементов, определен фазовый состав плазмы и шлака, теплофизические характеристики газовых систем и плазмы, образующихся при диссоциации и ионизации солей щелочных металлов и железа в диапазоне концентраций 40–70 % солей, 10–30 % Na_3AlF_6 и 5–40 % алюминия.

5. Для окислительной подводной резки необходим состав газовой смеси с высоким содержанием кислорода в зоне реза, с высокой ионизацией, энтальпией, теплоёмкостью и теплопроводностью плазмы при температуре 1000–4000 К. Этим условиям удовлетворяют предложенные окислительные смеси из 50–60 % ($\text{KNO}_3 + \text{FeCO}_3$), 20 % Na_3AlF_6 и 20–30 % алюминия.

6. Образование шлака при резке приводит к экранированию поверхности металла от кислорода, что снижает эффективность реза и скорость реакции окисления. Для удаления шлака необходимо снижать его поверхностное натяжение, что было достигнуто при ионном растворении оксидов в криолите Na_3AlF_6 и химическом взаимодействии

оксидов с криолитом с образованием летучих фторидов.

7. Разработана методика анализа электрических параметров процесса подводной мокрой резки на основе математической статистики обработки массивов данных осциллограмм в программе Matlab для расчета нормального распределения плотности вероятности силы тока, напряжения и мощности и предложен критерий качества реза, который основан на отношении плотностей вероятности напряжений в холостом и рабочем циклах. Предложен критерий оценки эффективности реза, который основан на отношении плотности вероятностей напряжения в холостом и рабочем циклах.

8. На основе анализа плотностей вероятности тока, напряжения и мощности установлено, что для достижения эффективности процесса резки оптимальная концентрация алюминия должна составлять 10–30 %, оптимальная концентрация криолита не должна превышать 20 %, оптимальная концентрация солей должна быть в диапазоне 50–70 %. На основе результатов анализа разработаны 3 химических состава опытно-серийных порошковых проволок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хренов К.К. Подводная электрическая сварка и резка металлов. М.:

- Аварийно-спасательное управление военно-морских сил. 8-я типография Военного издательства в Ленинграде. 1946. 160 с.
2. Паршин С.Г. Металлургия подводной и гипербарической сварки. СПб.: Издательство Политехнического университета. 2016. 402 с.
 3. Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой // Автоматическая сварка. 2010. № 10. С. 34–42.
 4. Keats D. Underwater wet welding: a welder's mate. Troubador Publishing, 2011. 300 p.
 5. Leggett W.D. Underwater cutting and welding manual. United States, Navy Department, Bureau of Ships, 1953. 108 p.
 6. Хренов К.К. Электрическая сварочная дуга. Киев; Москва: ГНТИ. 1949. 204 с.
 7. Хренов К.К. Сварка, резка и пайка металлов. Киев; Москва: Машгиз. 1952. 384 с.
 8. Хренов К.К. Sudarea, tăierea și lipirea metalelor: Trad. din limba rusă. București: Ed. tehnică. 1954. 445 с. (in Romanian)
 9. Савич И.М. Подводная сварка порошковой проволокой // Автоматическая сварка. 1968. № 10. С. 70.
 10. Савич И.М., Ляховая И.В., Максимов С.Ю., Кононенко В.Я., Пинтов Н.П. Авторское свидетельство СССР № 1706821 от 13.04.1990 г. Опубликовано 23.01.1992 г. Бюл. № 3.
 11. Мадатов Н.М. Подводная сварка и резка металлов. Л.: Судостроение. 1967. 142 с.
 12. Maksimov S. E.O. Paton Electric Welding Institute activity in the field of underwater welding and cutting // Underwater technology. 2017, No 6. P. 37–45.
 13. Максимов С.Ю. Физико-металлургические особенности и технология дуговой сварки в воде низколегированных сталей. Диссертация на

соискание уч. степени д.т.н. Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона. 2006. 388 с.

14. Грецкий Ю.Я. Максимов С.Ю. Влияние никеля на структуру и свойства швов при подводной сварке порошковой проволокой // Автоматическая сварка. 1995. № 8. С. 56–57.

15. Грецкий Ю.Я. Максимов С.Ю., Кравченко Н.В. Влияние мрамора в рутиловом электродном покрытии на содержание водорода в металле шва при подводной сварке // Автоматическая сварка. 1993. № 7. С. 51–52.

16. Грецкий Ю.Я. Максимов С.Ю., Кравченко Н.В. Влияние флюорита в рутиловом покрытии на содержание водорода в металле шва при подводной сварке // Автоматическая сварка. 1993. № 8. С. 54.

17. Грецкий Ю.Я. Максимов С.Ю., Кравченко Н.В. Содержание водорода в металле шва при подводной сварке электродами с флюоритнокарбонатным покрытием // Автоматическая сварка. 1994. № 2. С. 53–54.

18. Грецкий Ю.Я., Максимов С.Ю. Структура и свойства соединений низколегированных сталей при подводной мокрой сварке покрытыми электродами // Автоматическая сварка. 1995. № 5. С. 7–11.

19. Грецкий Ю.Я., Максимов С.Ю. Переход легирующих элементов в металл шва при подводной мокрой сварке электродами с рутиловым покрытием // Автоматическая сварка. 1994. № 11. С. 49–51.

20. Кононенко В.Я. Подводная сварка и резка. Киев: Экотехнология. 2011. 264 с.

21. Кононенко В.Я. Металлургические особенности сварки в водной среде порошковыми проволоками // Автоматическая сварка. 1996. № 9. С. 22–26.

22. Кононенко В.Я. Современное состояние подводной сварки резки в Украине // Автоматическая сварка. 2002. № 2. С. 44–48.

23. Кононенко В.Я. Разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области подводной сварки и резки // Автоматическая сварка. 2004. № 3. С. 47–52.

24. Кононенко В.Я. Содержание кислорода и водорода в металле шва при мокрой подводной сварке порошковой проволокой // Автоматическая сварка. 1993. № 11. С. 18–21.
25. Кононенко В.Я. Структура и механические свойства сварных соединений, выполненных под водой порошковыми проволоками // Автоматическая сварка. 2004. № 5. С. 25–29.
26. Паршин С.Г., Антипов И.С. Отечественные порошковые проволоки серии ПП-ПС для механизированной подводной сварки сталей мокрым способом // Сборник докладов семинара «Металлургия сварки и сварочные материалы» к 100-летию Петрова Г.Л. Санкт-Петербург: СПбПУ. 2013. С. 84–95.
27. Паршин С.Г., Левченко А.М. Подводная механизированная сварка сталей с порошковыми проволоками // Тезисы докладов VII отраслевого совещания «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «ГАЗПРОМ», 10-14 ноября 2014 г. С. 27.
28. Паршин С.Г., Левченко А.М., Антипов И.С. Механизированная подводная сварка с применением порошковых проволок российского производства // Сварка и диагностика. 2014. № 2. С. 45–48.
29. Паршин С.Г., Левченко А.М., Антипов И.С. Сварочная порошковая проволока с нанокпозиционным покрытием для подводной механизированной сварки // Материалы научно-практической конференции с международным участием Неделя науки СПбПУ: Лучшие доклады. СПб.: Издательство Политехнического университета. 2014. С. 169–173.
30. Паршин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С., Антипов И.С. Сварочно-технологические свойства наноструктурированных электродных проволок при дуговой сварке в инертной и активной среде // Вопросы материаловедения. 2015. № 1. С. 269–275.
31. Паршин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С., Антипов И.С. Сварочно-технологические свойства порошковых проволок для подводной сварки

углеродистых сталей // Доклады III Санкт-Петербургской международной НТК «Сварочные материалы-2015» (Петраньевские чтения), Санкт-Петербург, ЦНИИ КМ Прометей. 2015. С. 136–142.

32. Паршин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С., Антипов И.С., Карпов В.М. Исследование порошковых проволок и сварных соединений при подводной механизированной сварке в водной среде // Сварка и диагностика. 2015. № 3. С. 49–54.

33. Паршин С.Г., Левченко А.М., Хомич П.Н., Антипов И.С. Подводная сварка мокрым способом с применением порошковых проволок // Международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». СПб.: ЦНИИ КМ ПРОМЕТЕЙ, 2014. С. 159–167.

34. Паршин С.Г., Левченко А.М., Хомич П.Н., Антипов И.С. Подводная сварка «мокрым» способом с применением порошковых проволок // Вопросы материаловедения. 2015. № 1. С. 192–199.

35. Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С. Наноструктурированная порошковая проволока для подводной сварки. Патент РФ № 2539284 от 29.07.2014 г. Опубликовано 20.01.2015 г. Бюл. № 2.

36. Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С. Отечественные порошковые проволоки серии ПП-ПС для механизированной подводной сварки сталей мокрым способом // Мир сварки, 2013. № 3–4. С. 40–44.

37. Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С. Порошковая проволока для подводной сварки мокрым способом. Патент РФ № 2536313 от 29.07.2014 г. Опубликовано 20.12.2014 г. Бюл. № 35.

38. Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С. Порошковая проволока для сварки сталей под водой. Патент РФ № 2536314 от 30.07.2014 г. Опубликовано 20.12.2014 г. Бюл. № 35.

39. Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С. Порошковая проволока для механизированной подводной сварки. Патент РФ на изобретение № 2595161 от 29.02.2016 г. Бюл. № 23 от 20.08.2016 г.

40. Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С. Порошковая проволока для подводной сварки сталей. Патент РФ № 2585605 от 09.12.2014 г. Опубликовано 27.05.2016 г. Бюл. № 15.
41. Паршин С.Г. Металлургия подводной и гипербарической сварки. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2016. 402 с.
42. Паршин С.Г., Майстро А.С., Антипов И.С., Махмутов Т.Ю., Севостьянов С.П. Технологии и материалы для подводной и гипербарической сварки арктических конструкций из высокопрочных сталей // Международная конференция по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения Арктики и континентального шельфа Offshore Marintec Russia. Санкт-Петербург, 2016. С. 138–143.
43. Паршин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С. Технологии и сварочные материалы для ремонта подводных газопроводов // VIII отраслевое совещание «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «ГАЗПРОМ», Москва, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 14–18 ноября 2016 г. Тезисы докладов. С. 27.
44. Паршин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С., Востряцов Г.Н. Сварочный комплекс Амфибия и порошковые проволоки ППС-АПЛ для подводной механизированной сварки нефтегазопроводов // Труды Международной научно-практической конференции «Разработка и внедрение передовых технологий сварки и контроля качества сварных соединений на предприятиях нефтегазовой отрасли», Санкт-Петербург. 2017. С. 18.
45. Kah P., Layus P., Omajene J., Parshin S.G. Approaches for Underwater Welding Control to Achieve Quality Welds // Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco, CA, USA, 25-30 June 2017.
46. Паршин С.Г. Исследование подводной гипербарической FCA-сварки высоко-прочной стали X70 в среде защитных газов при давлении до 0,6

МПа // Сварочное производство. 2018. № 5. С. 6–12.

47. Паршин С.Г. Подводная мокрая FCA-сварка высокопрочной стали X70 с применением фтористых порошковых проволок // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 31–36.

48. Kah P., Parshin S.G., Maystro A., Layus P., Belinga E.M. Development of rutile cored wire with high-fluoride content for underwater welding // Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan. 10-15 June 2018. P. 1–8.

49. Parshin S.G., Levchenko A.M., Maystro A.S. Metallurgical Model of Diffusible Hydrogen and Non-Metallic Slag Inclusions in Underwater Wet Welding of High-Strength Steel // Metals. 2020. V. 10. No 1498. P. 1–17.

50. Parshin S.G., Levchenko A.M. Technology and equipment for underwater wet welding and cutting of high strength steel arctic structures using flux-cored wires // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 539. No 012132. P. 1–10.

51. Parshin S.G., Levchenko A.M. Underwater hyperbaric dry welding of high strength steel arctic oil and gas pipelines // 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 539. No 012159. P. 1–8.

52. Паршин С.Г., Левченко А.М., Иванова И.В., Майстро А.С. Металлургические процессы удаления диффузионного водорода и гидроксильных групп в парогазовой атмосфере и шлаке при сварке порошковой проволокой // Сварка и диагностика. 2020, № 3. С. 57–61.

53. Parshin S.G., Levchenko A.M., Wang P., Maystro A. Mathematical Analysis of the Influence of the Flux-Cored Wire Chemical Composition on the Electrical Parameters and Quality in the Underwater Wet Cutting // Advances in Materials Science. 2021. V. 21. No. 1(67). P. 1–11.

54. Паршин С.Г., Левченко А.М., Ван П., Майстро А.С., Переверзев А.Е. Исследование электрических параметров и стабильности процесса подводной мокрой резки с применением порошковых проволок с

окислительной газошлаковой системой // Сварка и диагностика. 2021. № 2. С. 15–19.

55. Ван П., Паршин С.Г., Левченко А.М., Майстро А.С. Подводная мокрая резка стали с применением порошковых проволок // Труды II Всероссийской НПК, посвященной 65-летию ЛГТУ. Липецк: ЛГТУ. 2021. С. 30–34.

56. Parshin S.G., Levchenko A.M., Karkhin V.A., Wang P., Maystro A.S. Metallurgy of Electrochemical Ionic Processes in Molten Slag during Underwater Wet Arc Welding // Proceedings of The 31st (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece. 20-25 June 2021. P. 1–5.

57. Parshin S.G, Levchenko A.M., Wang P. Metallurgy and mechanism of underwater wet cutting using oxidizing and exothermic flux-cored wires // Materials. 2021. (Статья принята для опубликования).

58. Świerczyńska A., Fydrych D., and Rogalski G.: Diffusible hydrogen management in underwater wet self-shielded flux cored arc welding // Int J of Hydrogen Energy. 2017. V. 42. No 38. P. 24532–24540.

59. Tomków J., Fydrych D., and Wilk K. Effect of electrode waterproof coating on quality of underwater wet welded joints // Materials. 2020. V. 13. No 2947. P. 1–15.

60. Fydrych D., Kozak T. Underwater welded joint properties investigation // Advances in Materials Science. 2009. No 4.

61. Fydrych D., Łabanowski J., Rogalski G., Haras J., Tomków J., Świerczyńska A., Jakóbczak P., Kostro Ł. Weldability of S500MC steel in underwater conditions // Advances in Materials Science. 2014. No 3.

62. Fydrych D., Łabanowski J., Rogalski G.: Weldability of high strength steels in wet welding conditions // Polish Maritime Research. 2013. No 2.

63. Fydrych D., Rogalski G., Kunowski A., Miś D.: Zastosowanie izolacji cieplnej przy wykonywaniu złączy w warunkach spawania izobarycznego // Przegląd Spawalnictwa. 2012. No 12.

64. Fydrych D., Rogalski G., Łabanowski J. Problems of Underwater Welding of Higher-Strength Low Alloy Steels // *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. No 5. P. 186–197.
65. Fydrych D., Rogalski G.: Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal // *Welding International*. 2011. No 3.
66. Fydrych D., Rogalski G.: Effect of underwater local cavity welding method conditions on diffusible hydrogen content in deposited metal // *Welding International*. 2013. No 3.
67. Garašić I. Osjetljivost celika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju. Zagreb. 2008. 175 P.
68. Garašić I., Kralj S., Kožuh Z.: Investigation into cold cracking in underwater wet welding of API 5L X70 steel // *Transactions of FAME*. 2009. No 3.
69. Ibarra S., Grubbs C., Olson D. Metallurgical aspects of underwater welding // *Journal of Metals*. 1988. No 12. P. 8–10.
70. Ibarra S., Grubbs C., Olson D. The Nature of metallurgical Reactions in Underwater Wet Welding // 19 Annual Offshore Technology Conference. Report OTC5388. Houston. 1987.
71. Ibarra S., Grubbs C.E., Liu S. State-of-the art and practice of underwater wet welding of steel // *Int. Workshop on underwater welding of Marine Structures*. December 7–9, 1994. New Orleans, Lo. USA. P. 49–112.
72. Ibarra S., Olson D.L. Underwater welding metallurgy // *International Workshop on Quality in Underwater Welding of Marine Structures*. November, 1985. Golden, Colorado. P. 439–477.
73. Ibarra S., Olson D.L., Grubbs C.E. Underwater welding of higher strength offshore steels // 21st Annual Offshore Technology Conf. OTC. Paper N 5889, Houston, May 1–4, 1989. P. 67–76.
74. Ibarra S., Olson D.L., Liu S. Effect of water depth on underwater weld metal porosity formation // *Underwater welding: Proc. Conf.* New Orleans,

March 20–21, 1991. Miami. P. 54–69.

75. Pope A.M., de Medeiros R.C., Liu S. Effect of solidification on underwater wet weld properties // Proc. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - Materials Engineering, ASME, Vol. III, Copenhagen, Denmark, June 1995. P. 517–521.

76. Pope A.M., Liu S. Hydrogen content of underwater wet welds deposited by rutile and oxidizing electrodes // Proc. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - Materials Engineering', ASME, Vol. III, Florence, Italy, June 1996. P. 85–92.

77. Pope A.M., Teixeira C.G., Paes M.P., dos Santos V.R., Ros D., Domingues J.R. Influence of Water Depth on Microstructure and Mechanical Properties of Wet Welds // Proceedings of 16-Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers. 1997.

78. Pope A.M., Teixeira J.C.G., Santos V.R., Paes M.T.P., Liu S. Use of nickel to improve the mechanical properties of high oxygen underwater wet welds // Proc. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – Materials Engineering, ASME, Vol. III, Copenhagen, Denmark, June 1995. P. 529–535.

79. Pope A.M., Teixeira J.C.G., dos Santos V.R., Paes M.T.P., Liu S. The effect of nickel on the mechanical properties of high-oxygen underwater wet welds // ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1996. No 2. P. 165–168.

80. Rowe M., Liu S. Final Report MT-CWJCR-099-032. JIP – Technical Activities Committee. Global Industries, Inc. Lafayette, Louisiana. 1999. 143 P.

81. Rowe M., Liu S. Recent developments in underwater wet welding // Science and Technology of Welding and Joining. 2001. V. 6. No 6. P. 387–396.

82. Rowe M.D., Liu S., Reynolds T.J. Development of SMAW-coatings for underwater wet welding at specific depth ranges // Proc. of the 18th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. Paper

- 99–2231, ASME/OMAE, St. John's, Newfoundland, Canada, 11–16 July 1999.
83. Rowe M.D., Liu S., Reynolds T.J. The effect of ferro-alloy additions and depth on the quality of underwater welds // *Welding Journal*. 2002. No 2. P. 156–166.
84. Rowe M.D., Nelson T.W., Lippold J.C. Hydrogen-induced cracking along the fusion boundary of dissimilar metal welds // *Welding Journal*. 1999. V. 91. No 12. P. 31–37.
85. Klett J., Wolf T., Maier H.J., and Hassel T. The applicability of the standard DIN EN ISO 3690 for the analysis of diffusible hydrogen content in underwater wet welding // *Materials*. 2020. V. 13. No 3750. P. 1–17.
86. Klett J., Hecht Linowitzki V., Grünzel O., Schmidt E., Maier H.J., Hassel T.: Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints // *SN Applied Sciences*. 2020. V. 2. No 1269. P. 1–14.
87. ANSI/AWS D3.6M:2017: Underwater Welding Code. American Welding Society, Miami, USA.
88. Arias R. and Bracarense A.Q. Fatigue crack growth assessment in underwater wet welds // *Welding Journal*. 2017. No 8. P. 287–294.
89. Gao W.B., Wang D.P., Cheng F.J., Deng C.Y. and Xu W. Underwater wet welding for HSLA steels: chemical composition, defects, microstructures and mechanical properties // *Acta Metallurgica Sinica*. 2015. V. 28. No 9. P. 1097–1108.
90. Christensen N. The Metallurgy of Underwater Welding // *Underwater Welding, Proc. Int. Conf., Trondheim, 27–28 June 1983*. Oxford e.a. 1983. P. 71–94.
91. Frazer I., Gibson O.J., Fyffe L., Lucas B. Remotely Operated Underwater Thermal Cutting Processes for the Decommissioning of Large North Sea Platforms // *Proceedings of OMAE'02 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering June 23-28, 2002, Oslo, Norway*. P. 1–9.
92. Данченко М.Е., Савич И.М., Нефедов Ю.Н. Подводная дуговая резка

- порошковой проволокой // Автоматическая сварка. 1988. № 4. С. 59–61.
93. Грецкий Ю.Я., Нефедов Ю.Н. Технология механизированной подводной дуговой резки порошковой проволокой углеродистых и легированных сталей. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. 1993. 24 с.
94. Кононенко В.Я., Рыбченков А.Г. Опыт мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при ремонте под водой газо- и нефтепроводов // Автоматическая сварка. 1994. № 9/10. С. 29–32.
95. Кононенко В.Я., Грицай П.М., Семенкин В.И. Применение мокрой механизированной сварки при ремонте корпусов судов // Автоматическая сварка. 1994. № 12. С. 35–38.
96. Кононенко В.Я. Применение технологии механизированной подводной сварки при строительстве МЛСП «Приразломная» // Автоматическая сварка. 2005. № 12. С. 53.
97. Савич И.М., Максимов С.Ю. Применение механизированной резки при подъеме подводной лодки // Автоматическая сварка. 2001. № 2. С. 59–60.
98. Liu D., Lia H., Yan Y., Guo, N., Song X., Feng J. Effects of processing parameters on arc stability and cutting quality in underwater wet flux-cored arc cutting at shallow water // Journal of Manufacturing Processes. 2018. V. 33. P. 24–34.
99. Hamasaki M., Katsumura M. Underwater oxy-arc cutting of mild steel using contact technique // Trans Jpn Weld Soc. 1977. V. 8. P. 97–101.
100. Danchenko M.E. Underwater arc cutting with a cored electrode // Weld Int. 1989. No 3. P. 562–563.
101. Hamasaki M., Katsumura M., Sumitomo T. Underwater cutting of mild steel using gravity technique // Trans Jpn Weld Soc. 1976. V. 7. P. 85–90.
102. Hamasaki M., Tateiwa F. Underwater cutting using a consumable electrode Water jet technique at a deep water depth // J Jpn Weld Soc. 1981. V. 50. P. 409–414.

103. Bach W., Lindemaier J., Philipp E. Contact arc metal cutting: introduction of an extraordinary underwater cutting technology // *Weld World*. 1998. V. 41. P. 132–137.
104. Li W., Wang H., Yu R., Wang J., Wang J., Wu M. and Maksimov S. Yu. High-Speed Photography Analysis for Underwater Flux-Cored Wire Arc Cutting Process. In book: *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Volume III No. 1 2019, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020. P. 141–150.
105. Li W., Zhao J., Wang Y., Wang J., Wang J., Jia H., Li Z., Wu J. Li W., Research on underwater flux cored arc cutting mechanism based on simulation of kerf formation // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. V. 40. P. 169–177.
106. Zhao J., Wang J, Wang J, Jia H., Li Z., Maksimov S.Y.: Research on arc cutting mechanism and procedure of flux-cored cutting wire in water // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 98. P. 2895–2904.