

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Волгоградский государственный технический университет

На правах рукописи



Муругов Дмитрий Александрович

**Повышение производительности сварки алюминия и сплава АМц  
неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний  
на дугу переменного тока с прямоугольной формой импульсов**

2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии  
(технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Савинов Александр Васильевич

Волгоград, 2026

**Содержание:**

Введение.....	4
Глава 1. Способы повышения производительности дуговой сварки неплавящимся электродом (литературный обзор).....	15
1.1 Применение активирующих флюсов .....	16
1.2 Сварка алюминия и его сплавов на переменном токе.....	20
1.3 Влияние ультразвуковых колебаний на свойства дугового разряда .....	24
1.4 Цель и задачи исследований .....	52
2 Материалы, оборудование и методики выполнения экспериментов .....	54
2.1 Материалы и оборудование, применяемые в исследованиях.....	54
2.2 Методика определения электрофизических и энергетических характеристик дуги .....	57
2.3 Методы исследования падения напряжений в приэлектродных областях .....	60
2.4 Оценка проплавляющей способности дуги переменного тока с неплавящимся электродом .....	62
2.5 Определение силового воздействия дугового разряда.....	64
2.6 Методика визуализации формы дугового разряда .....	66
2.7 Методика определения интенсивности ультразвуковых колебаний .....	68
Выводы к главе 2 .....	69
Глава 3. Исследование влияния ультразвука на свойства дуги переменного тока	71
3.1 Влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на свойства дуги .....	71
3.2 Статические вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов .....	73
3.3 Форма дуги переменного тока при воздействии ультразвуковых колебаний ..	76
3.4 Эластичность дуги переменного тока .....	83
3.5 Энергетические характеристики дуги переменного тока .....	88
Выводы к главе 3 .....	99

Глава 4 Технологические характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ).....	101
4.1 Силовое воздействие дуги переменного тока с воздействием ультразвука ...	101
4.2 Проплавляющая способность дуги переменного тока с неплавящимся электродом при воздействии на нее ультразвуковых колебаний.....	106
4.3 Формирование швов при сварке неплавящимся электродом.....	110
4.5 Стойкость неплавящихся электродов.....	115
4.6 Микроструктура и механические свойства сварных соединений.....	117
4.7 Технологические рекомендации по аргонодуговой сварке неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний.....	120
Выводы к главе 4.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
Список использованных источников.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	143

## **Введение**

Современные тенденции развития машиностроения обуславливают необходимость внедрения высокопроизводительных технологий дуговой сварки неплавящимся электродом. Алюминиевые сплавы по объемам применения в качестве конструкционных материалов занимают второе место после сплавов на основе железа, причем область их применения неуклонно расширяется. Это объясняется как доступностью этих материалов, так и уникальным комплексом свойств (низкая плотность  $\sim 2,7$  г/см<sup>3</sup>, относительно высокий предел прочности, коррозионная стойкость), обуславливающим предпочтительное применение алюминия и его сплавов в аэрокосмической технике, автомобилестроении, судостроении, химическом аппаратостроении, строительстве и других отраслях.

Исследованию свойств дуги с неплавящимся электродом посвящены работы Паршина С.Г., Порицкого П.В., Лысака В.И., Полесского О.А., Казакова Ю.В., Потапова А.Н., Ковалева И.М., Григоренко В.В., Савинова А.В., Ельцова В.В., Зернина Е.А., Советкина Д.Э., Косовича В.А., Чудина А.А., Бадьянова Б.Н., Ленивкина В.Я., Полетаева Ю.В., Loureiro A. R., Sarrafi R., Kumar N., Sanbao L., Watanabe T., Chao C., Xie W., Xiaoyu C., Sun Q. и других ученых.

Основная причина, ограничивающая применение аргонодуговой сварки неплавящимся электродом для толстолистовых изделий, связана с невысокой производительностью, обусловленной относительно низкой тепловой эффективностью дуги и нарушением формирования швов (образование подрезов, пор, наплывов, кратеров и др.) на высоких значениях силы тока и скорости сварки [1-5]. Образование данных дефектов значительно снижает механические характеристики сварных соединений и, как следствие, приводит к преждевременному выходу конструкции из строя. При этом чувствительность процесса сварки к образованию дефектов проплавления (непровары, прожоги), вызываемых, например, случайными изменениями параметров режима сварки на геометрию шва, возрастает с увеличением скорости перемещения дуги.

Одним из существующих способов повышения производительности сварки является применение активирующих флюсов и галоидосодержащих газов (Паршин С.Г., Бадьянов Б.Н., Loureiro A. R.), обеспечивающих сжатие дуги и, как следствие, повышение концентрации вводимой энергии. Однако применение активирующих флюсов значительно влияет на стойкость рабочего участка электрода и малоэффективно при значениях сварочного тока свыше 270 А ввиду того, что флюс переходит в состояние пара и удаляется из сварочной зоны, не оказывая влияния на дугу [6].

Согласно исследованиям (Sanbao L., Chao C., Xie W., Xiaoyu C., Чудин А.А.) при воздействии высокочастотных волн на дугу происходит ее сжатие, что повышает концентрацию тепловой энергии в зоне сварки, вследствие чего увеличивается площадь проплавления, а также происходит измельчение микроструктуры благодаря эффекту кавитации, создающим новые центры кристаллизации. Однако данные о взаимосвязях процессов, происходящих в дуге переменного тока от параметров горения дуги и УЗ колебаний.

Таким образом, с целью повышения производительности и качества сварных соединений при сварке неплавящимся электродом необходимо комплексное изучение воздействия параметров ультразвуковых колебаний и разнополярных импульсов тока прямоугольной формы на свойства дуги, глубину проплавления, качество катодной очистки, а также на микроструктуру и механические свойства сварных швов алюминиевых сплавов.

Актуальность диссертационной работы также подтверждается ее выполнением в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № FZUS-2026-0003 на основании соглашения № 075-03-2026-526 от 16.01.2026), гранта РНФ №23-13-00354 в 2023-2025 г., а также грантом на фундаментальные и прикладные научные исследования, выполняемые молодыми учеными ВолГТУ по программе «Приоритет-2030» по проекту №15/631-24. Автор (в составе коллектива) удостоен серебряной медали имени А.Ф. Дэвиса Американского сварочного общества (AWS) за лучшую статью (Влияние ультразвуковых

колебаний на электрофизические свойства дуги с неплавящимся электродом) в номинации «Проектирование сварочных процессов, машин и оборудования», опубликованную в 2025 г.

Целью работы является повышение производительности и качества сварки неплавящимся электродом на переменном токе с прямоугольной формой импульсов алюминия и сплава АМц на основе исследования взаимосвязей параметров ультразвуковых колебаний, электрофизических, энергетических характеристик дуги и ее термосилового воздействия на свариваемый материал.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние ультразвукового поля на изменение формы столба дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ) с неплавящимся электродом.

2. Исследовать влияние мощности и положения сфокусированных ультразвуковых колебаний на электрофизические и энергетические характеристики дугового разряда переменного тока с ПФИ.

3. Выявить зависимости термосилового воздействия сварочной дуги на сварочную ванну от интенсивности высокочастотных акустических волн.

4. Определить влияние ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги переменного тока с ПФИ (величина катодной очистки, проплавливающая способность, структура и свойства сварных соединений).

5. Разработать пути и средства повышения производительности и качества формирования сварных швов при сварке неплавящимся электродом алюминия и сплава АМц на переменном токе с прямоугольной формой импульсов с воздействием ультразвуковых колебаний.

**Научная новизна работы** заключается в установлении взаимосвязей параметров ультразвуковых колебаний и разнополярных импульсов прямоугольной формы с электрофизическими и энергетическими характеристиками дуги переменного тока, геометрией и качеством формирования сварного шва при сварке неплавящимся электродом алюминия и сплава АМц.

Впервые обнаружена зона разрежения в анодной приэлектродной области дуги при воздействии ультразвуковых колебаний на неё и соответствующее падение напряжения в этой области на 0,5-0,8 В, что приводит к снижению температуры рабочего участка неплавящегося электрода. Это позволяет увеличить стойкость электрода на 20% и повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

Выявлено, что применение ультразвуковых колебаний мощностью 20-140 Вт при сварке на высоких значениях тока ( $I_{св.} \geq 300$  А) и скорости ( $V_{св.} \geq 20$  м/ч) стабилизирует положение активного пятна дуги на поверхности алюминия, препятствуя ее отклонению от оси электрода, что способствует улучшению качества формирования шва на малых значениях длительности импульсов обратной полярности в периоде переменного тока ( $\tau_{обр}/T \leq 0,15$ ).

Показано, что воздействие на дугу ультразвуковых колебаний приводит к ее сжатию и повышению пространственной устойчивости, что увеличивает эффективный коэффициент полезного действия  $\eta_i$  при сварке неплавящимся электродом на переменном токе с прямоугольной формой импульсов на 5-12%, способствуя росту глубины проплавления при сварке алюминия и сплава АМц в 1,3-1,5 раза.

**Практическая значимость результатов исследования.** На уровне изобретения разработан способ сварки неплавящимся электродом алюминия и сплава АМц на переменном токе с импульсами прямоугольной формы, обеспечивающий высокую производительность процесса (пат. РФ №2817683).

На основе результатов исследований разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом на переменном токе алюминиевых сплавов в аргоне с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, позволяющие повысить производительность процесса и качество получаемых сварных соединений.

Разработанная технология сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний была апробирована в условиях предприятия ООО ПТП

«Поршень» при производстве дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц, что позволило увеличить производительность на 40%.

**Методы исследования.** Изучение силового воздействия дуги и ультразвуковых колебаний выполнялись на специальном стенде. Основу измерительной системы составили аналитические весы ВСЛ-60, обеспечивающие точность измерений до 0.0001 г. Цифровую фото- и видеосъемку сварочной дуги проводили с помощью высокоскоростных камер Nikon J1 с частотой 1/400 и 1/1400 кадров в секунду и Contrastech iSpeedy50MT13M-SE с частотой до 1/50000 кадров в секунду. Осциллографирование напряжения переменного тока выполняли с помощью прибора FNIRSI 1014D. Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний производили с использованием лазерного доплеровского виброметра VibroFlex. Исследование полученных образцов проводили с использованием оптической (оптический микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT) и электронной (сканирующий электронный микроскоп Versa 3D DualBeam) микроскопии.

Основные положения диссертационного исследования **опубликованы** в работах:

Статьи, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science:

1. Influence of Ultrasonic Vibration on the Electrophysical Properties of an Arc with a Non consumable Electrode / А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, В.И. Лысак, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // *Welding Journal*. - 2025. - Vol. May. - 10 p. - DOI: <https://doi.org/10.29391/2025.104.012>. - URL: <https://aws-p-001-delivery.sitecorecontenthub.cloud/api/public/content/2025.104.012?v=c3f5656e>.

2. Influence of ultrasonic vibration on the static characteristics of an arc with a non-consumable electrode / А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, В.И. Лысак, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // *China Welding*. - 2025. - Vol. 34 (3). - 10 c. - DOI: 10.12073/j.cw.202410711007. - URL: <https://chinawelding.hwi.com.cn/archive>.

Статьи из перечня ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Влияние ультразвуковых колебаний на силовое воздействие и проплавливающую способность дуги постоянного тока с неплавящимся электродом /

В.И. Лысак, А.А. Чудин, А.В. Савинов, О.А. Полесский, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // Сварка и диагностика. - 2025. - № 4. - С. 29-33.

2. Влияние ультразвуковых колебаний на форму и строение столба дуги переменного тока / В.И. Лысак, Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский // Сварка и диагностика. - 2025. - № 1. - С. 27-30.

3. Влияние сфокусированных ультразвуковых колебаний на проплавляющую способность дуги переменного тока / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, В.И. Лысак, О.А. Полесский, П.П. Красиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2024. - № 6 (289). - С. 71-75. - DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-71-75.

4. Влияние ультразвуковых колебаний на проплавляющую способность дуги переменного тока / В.И. Лысак, Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, О.А. Полесский, П.П. Красиков // Сварка и диагностика. - 2024. - № 4. - С. 13-16. - DOI: 10.52177/2071-5234\_2024\_04\_13.

5. Статические характеристики дуги переменного тока с неплавящимся электродом / А.В. Савинов, О.А. Полесский, В.И. Лысак, А.А. Чудин, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2024. - № 2 (285). - С. 60-64. - DOI: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-60-64.

6. Проплавляющая способность дуги с неплавящимся электродом (обзор) / А.В. Савинов, О.А. Полесский, В.И. Лысак, П.П. Красиков, А.А. Чудин, Д.А. Муругов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2023. - № 10 (281). - С. 59-63. - DOI: 10.35211/1990-5297-2023-10-281-59-63.

7. Физико-математическая модель распространения ультразвуковых колебаний в приэлектродных областях дуги с неплавящимся электродом / В.И. Лысак, А.А. Чудин, А.В. Савинов, О.А. Полесский, Д.А. Муругов, П.П. Красиков // Сварка и Диагностика. - 2023. - № 6. - С. 17-20. - DOI: 10.52177/2071-5234\_2023\_06\_17.

8. Давление дуги с неплавящимся электродом на сварочную ванну (обзор) / А.В. Савинов, О.А. Полесский, В.И. Лысак, П.П. Красиков, А.А. Чудин, Д.А. Муругов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2022. - № 10 (269). - С. 72-76.

9. Характер процесса формирования швов и образования дефектов при сварке неплавящимся электродом (обзор) / А.В. Савинов, О.А. Полесский, П.П. Красиков, А.А. Чудин, Д.А. Муругов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2022. - № 2 (261). - С. 53-58.

10. Стойкость неплавящихся электродов при сварке разнополярными импульсами тока прямоугольной формы / В.И. Лысак, А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин, П.П. Красиков, Д.А. Муругов // Сварка и Диагностика. - 2022. - № 6. - С. 37-41. – DOI: 10.52177/2071-5234\_2022\_06\_37.

11. Газодинамическое воздействие дуги на металл сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом (обзор) / А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин, П.П. Красиков, Л.С. Красикова, Д.А. Муругов // Известия ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2021. - № 10 (257). - С. 60-63.

12. Тепловой баланс малоамперной дуги с неплавящимся электродом / А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин, П.П. Красиков, Л.С. Красикова, В.В. Филиппов, Д.А. Муругов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2021. - № 4 (251). - С. 69-71.

#### **Остальные публикации:**

13. Применение ультразвуковых колебаний при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом / А.А. Чудин, В.И. Лысак, А.В. Савинов, О.А. Полесский, Д.А. Муругов // Сварка и диагностика : I Всерос. науч.-техн. конф. им. акад. РАН Н. П. Алешина (с междунар. участием) (г. Москва, 11-13 ноября 2024 г.) : сб. тез. / МГТУ им. Н.Э. Баумана. - Москва, 2024. - С. 17-21.

14. Пат. 2788385 Российская Федерация, МПК В23К 9/167, В23К 9/235, В23К 35/362 Способ сварки неплавящимся электродом углеродистых и

низколегированных конструкционных сталей / П.П. Красилов, А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин, В.И. Лысак, Д.А. Муругов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2023.

15. Изменение технологических свойств дуги переменного тока при воздействии ультразвуковых колебаний / Д.А. Муругов, А.В. Савинов, А.А. Чудин, А.А. Петров, И.А. Яковлев, О.А. Гвоздев, А.А. Чумаченко // Новые материалы и технологии в машиностроении : сб. науч. тр. / под общ. ред. Е. А. Памфилова ; Брянский гос. инженерно-технологический университет. - Брянск, 2023. - Вып. 37. - С. 54-56.

16. Повышение качества формирования шва при сварке неплавящимся электродом / А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин, Д.А. Муругов, Р.Р. Иванов, О.А. Гвоздев, А.А. Чумаченко // Новые материалы и технологии в машиностроении : сб. науч. тр. / под общ. ред. Е. А. Памфилова ; Брянский гос. инженерно-технологический университет. - Брянск, 2023. - Вып. 37. - С. 61-63.

17. Муругов, Д.А. Применение ультразвуковых колебаний при сварке неплавящимся электродом алюминия и его сплавов / Д.А. Муругов // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16 сентября – 15 ноября 2024 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2024. - С. 82-83.

18. Муругов, Д.А. Применение ультразвуковых колебаний при сварке неплавящимся электродом алюминиевых сплавов / Д.А. Муругов, М.А. Ефимов // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября - 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2023. - С. 102-104.

19. Муругов, Д.А. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги переменного тока при сварке неплавящимся электродом / Д.А. Муругов // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 2–15 ноября 2022 г.) : сб.

материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2022. - С. 134-135.

20. Муругов, Д.А. Влияние ультразвуковых колебаний на формирование швов при сварке неплавящимся электродом на постоянном и переменном токе / Д.А. Муругов // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2022. - С. 93-94.

21. Исследование силового воздействия дуги на расплавленный металл сварочной ванны при воздействии ультразвука / А.А. Чудин, А.В. Савинов, О.А. Полесский, П.П. Красиков, Д.А. Муругов, В.Р. Колышкин // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : сб. ст. по материалам LXXVII междунар. науч.-практ. конф / Научное издательство «СибАК». - Новосибирск, 2022. - № 5 (70). - С. 36-42.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных и всероссийских конференциях: «Сварка и диагностика» имени академика РАН Н.П. Алёшина (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва – 2024, 2026), XXVI научно-практическая конференция «Трубы-2025» (РусНИТИ, Челябинск), «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск – 2021, 2022, 2023), «Актуальные вопросы науки и образования» (Москва, 2024), «Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023» (Красноярск, 2023), «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» (Новосибирск, 2022), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2021), «Технические и естественные науки» (Санкт-Петербург, 2020), а также на XXVI, XXVII, XXVIII и XXIX (II премия) XXX региональных конференциях молодых исследователей Волгоградской области, ежегодных внутривузовских конференциях ВолгГТУ (2021-2025 гг.), XIII и XIV (III премия) научно-технических конференциях ОАО «Волгограднефтемаш» (2023, 2024) и научных семинарах кафедры «Оборудование

и технология сварочного производства» ВолгГТУ, г. Волгоград. В 2026 г. авторский коллектив удостоен серебряной медали имени А.Ф. Дэвиса Американского сварочного общества (AWS) в номинации «Проектирование сварочных процессов, машин и оборудования».

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа содержит 147 страниц машинописного текста, 94 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 119 наименований.

**В первой главе** проведен анализ научно-технической литературы, рассмотрены способы увеличения производительности сварки неплавящимся электродом, выявлены проблемы сварки алюминиевых сплавов. Согласно исследованиям процессов аргонодуговой сварки неплавящимся электродом существенное влияние на качество формирования сварного шва оказывает силовое воздействие и пространственная устойчивости дуги. Показано, что при воздействии мощного акустического поля, формируемого плоским излучателем, происходит повышение давления дуги, и в результате увеличение глубины проплавления.

**Во второй главе** приведены методики исследования силового воздействия дуги, измерения амплитуды УЗ колебаний, определение формы и строения дуги переменного тока, а также методы исследований влияния УЗК на физические и энергетические свойства дуги с прямоугольной формой импульсов (ПФИ).

**В третьей главе** приведены результаты исследований электрофизических и энергетических характеристик дугового разряда. На основе теоретического анализа объясняется механизм влияния ультразвуковых колебаний на энергетические и физические свойства дуги переменного тока с ПФИ.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования влияния ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги переменного тока, на основе которых сделаны рекомендации по сварке алюминия и сплава АМц. Экспериментально доказано, что с воздействием УЗ колебаний на дугу

переменного тока с ПФИ происходит сжатие дугового разряда, которое повышает плотность заряженных частиц и, как следствие, увеличивается давление дуги.

***В заключении*** показаны общие выводы по работе.

***В приложении*** приведен патент на изобретение, копия акта апробации. Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Волгоградского государственного технического университета.

*Автор выражает глубокую благодарность академику РАН, Заслуженному деятелю науки РФ В.И. Лысаку и чл.-корр. РАН, профессору, С.В. Кузьмину за участие в формировании направления и стратегическое направление исследований, а также профессору, д.т.н. А.В. Савинову и доценту, к.т.н. А.А. Чудину за помощь в проведении исследований, анализе результатов и подготовке диссертации.*

## **Глава 1. Способы повышения производительности дуговой сварки неплавящимся электродом (литературный обзор)**

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом по сравнению с другими способами обладает целым рядом преимуществ. К ним можно отнести технологичность процесса, универсальность, получение качественных сварных швов при изготовлении конструкций ответственного назначения из трудносвариваемых материалов. Однако, по концентрации тепловой энергии дуги с неплавящимся электродом, вводимой в металл, последняя сильно уступает многим известным дуговым источникам энергии при сварке, от чего снижается производительность. Поэтому актуальным является увеличение эффективной мощности дуги с неплавящимся электродом в инертных газах.

Способы повышения производительности процесса и улучшения качества формирования швов можно разделить на несколько групп.

1. Изменение концентрации энергии в пятне нагрева основано на действии активирующего флюса или галоидосодержащих газов, вводимых в зону сварки, и заключается в сжатии дуги, увеличении концентрации нагрева и давления дуги на сварочную ванну, увеличении в 2,5 раза её проплавляющей способности, а также уменьшении ширины шва в сравнении с традиционной сваркой неплавящимся электродом на тех же режимах сварки [1-7]. Однако авторы работы [4] заявляют о том, что при сварке на токах более 275 А флюс испаряется из сварочной зоны, прекращая влиять на строение дуги, а все области дугового разряда по свойствам становятся такими же, как и без флюса. Это можно объяснить действием газодинамического напора, образующегося в дуге и в околодуговом пространстве.

2. Увеличение погонной энергии может привести к повышению производительности. Однако, существуют критические значения сварочного тока и скорости сварки, которые не позволяют в значительной мере повысить производительность из-за резкого снижения качества формирования швов ввиду возникновения дефектов, таких как подрезы, раковины, бугры, поры и др. [8-10]. Подобные дефекты приводят к снижению прочностных свойств сварных

соединений и, следовательно, к преждевременному выходу конструкции из строя [11]. При этом чувствительность процесса сварки к образованию дефектов проплавления (непровары, прожоги), вызываемых, например, случайными колебаниями параметров режима сварки и геометрии соединения, возрастает с увеличением скорости сварки [12].

3. Повышение пространственной устойчивости дугового разряда в целом и стабильности положения его активных пятен является перспективным способом увеличения производительности, особенно на высоких скоростях сварки. Повышение устойчивости дуги может обеспечиваться с помощью дополнительных электродинамических сил, возникающих в дуге при пропускании через нее сильноточных импульсов [13,14] и внешних сил магнитного или газодинамического происхождения, направленных противоположно возмущающим силам [10]. Продольное магнитное поле приводит к сжатию столба дуги, повышая напряжение дуги и увеличивая её проплавляющую способность [12]. Это приводит к уменьшению диаметра активного пятна на изделии и газодинамического давления в центре дуги, а распределение плотности тока по радиусу становится равномернее, чем при сварке без продольного магнитного поля. Однако создание внешнего магнитного поля требует дополнительного громоздкого оборудования, размещаемого непосредственно на горелке, а увеличение магнитной индукции поля при повышении силы сварочного тока приводит к росту тепловой нагрузки на неплавящийся электрод [15]. Кроме того, этот способ малоэффективен при сварке ферромагнитных материалов из-за замыкания силовых линий поля через основной металл.

### **1.1 Применение активирующих флюсов**

Исследование влияния активирующих флюсов при сварке неплавящимся электродом начали проводить еще в 80-е годы прошлого века. Простым и экономичным способом повышения производительности этого способа сварки является применение галогенидных активирующих флюсов, изменяющих

теплофизические свойства дуги, увеличивающих глубину проплавления металла и улучшающих качество сварных соединений. Вместе с защитным газом в область дуги вводят газообразные активирующие потоки. Кристаллические флюсы осаждаются на поверхности деталей в виде микропорошков, спиртовых и водных суспензий (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Макрошлифы сварных соединений алюминиевого сплава АМг-5: а) без флюса; б) с флюсом  $\text{CaF}_2\text{-BaF}_2\text{-SrF}_2$  ( $I_{\text{св.}}=210$  А,  $V_{\text{св.}}=54$  см/мин,  $S=4$  мм) [16]

Результаты экспериментов [16] показали, что сварочная дуга при сварке с активирующими флюсами представляет собой замкнутую систему, стремящуюся к термодинамическому равновесию, вокруг дуги формируется кольцеобразный продольный поток, состоящий из многокомпонентной смеси активирующего флюса и продуктов его взаимодействия со свариваемым металлом. При насыщении дуги молекулами активирующих флюсов происходит изменение напряжения на дуге.

Таким образом, применение ультрадисперсных активирующих флюсов улучшило качество сварных соединений, а также увеличило производительность процесса сварки алюминиевого сплава АМг-5 на 50-80%.

Хотя влияние активирующих флюсов на глубину сварного шва широко изучено, в литературе имеется мало информации об их влиянии на микроструктуру. Увеличение содержания феррита было обнаружено в сварном шве, выполненного с активирующими флюсами на основе оксидов. С увеличением содержания феррита в металле шва повышается стойкость к горячим трещинам, но может

отрицательно сказываться на физических и механических свойствах, а также на сопротивлении коррозии сварных швов из нержавеющей стали.

A.R. Loureiro, V.F.O. Costa и др. [17] исследовали влияние активирующего флюса на основе оксида титана на структуру шва. Авторами было установлено, что применение активирующего флюса приводит к незначительному измельчению микроструктуры сварных швов, повышению содержания феррита, а также увеличению глубины проплавления на 20-30% (рисунок 1.2).

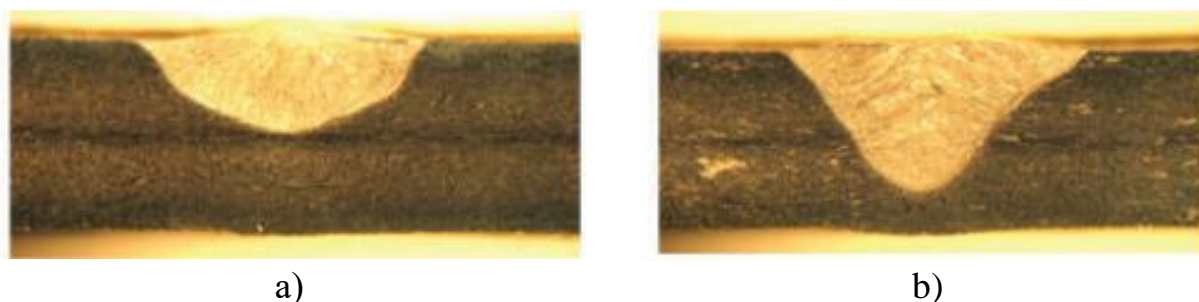


Рисунок 1.2 – Влияние активирующего флюса на глубину проплавления:

а) без активирующего флюса; б) с активирующим флюсом [17]

В работе [18] для исследования влияния активирующих флюсов на геометрические параметры и механические характеристики сварных соединений использовалось четыре оксидных флюса ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$ ). Авторами изучалось влияние плотности покрытия активирующего флюса на форму сварочной ванны и содержание кислорода в шве после сварки. Было обнаружено, что определенный диапазон содержания кислорода, растворенного в сварном шве, привел к значительному увеличению проплавляющей способности дуги.

Результаты [18] подтверждают, что с применением оксидных активирующих флюсов увеличивается глубина проплавления и, следовательно, повышается производительность.

Авторы [19] исследовали влияние трехкомпонентного оксидного флюса ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{MoO}_3$ ) на свариваемость, геометрические параметры шва, изменение температуры сварочной ванны и механические свойства сварных соединений.

Результаты показывают, что с трехкомпонентным флюсом увеличивается соотношение глубины и ширины шва примерно в 1,5 раза по сравнению с традиционной сваркой. Сужение дуги, вызванное вновь возникшим оксидным флюсом, повышает плотность тепла и температуру сварочной ванны. Эффект легирования, вызванный частицами флюса, значительно улучшает твердость, а также предел прочности на растяжение.

Однако большинство исследователей, работающих над различными аспектами сварки неплавящимся электродом, либо игнорировали, либо уделяли мало внимания влиянию активирующих флюсов на стойкость электродов [20–23]. В работе [19] авторы отмечают, что наряду со многими преимуществами, применение активирующих флюсов оказывает отрицательное воздействие на электрод. На рисунке 1.3 (а–с) показан вид сварочных электродов методом сканирующей электронной микроскопии с полевой эмиссией (до и после сварки).

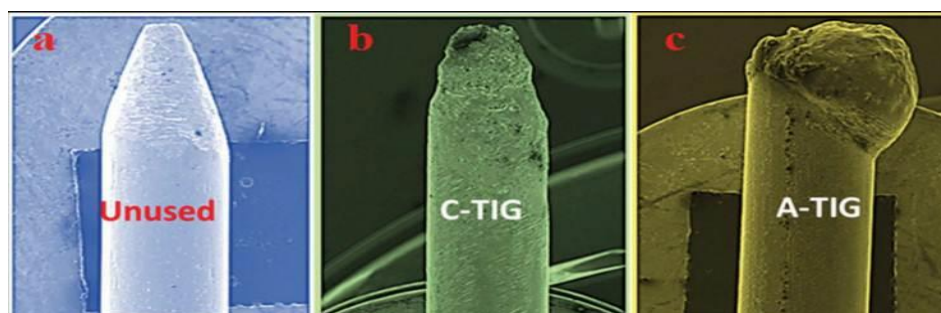


Рисунок 1.3 – Влияние активирующего флюса на стойкость электрода [19]:

- а) до сварки; б) после сварки без активирующего флюса;
- с) после сварки с применением активирующего флюса

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что, несмотря на преимущества применения активирующих флюсов, их использование снижает стойкость электродов и практически неэффективно при значении сварочного тока более 270 А ввиду того, что флюс переходит в состояние пара и удаляется из зоны сварки, переставая влиять на свойства дугового разряда.

## 1.2 Сварка алюминия и его сплавов на переменном токе

Переменный ток эффективен при сварке алюминия для обеспечения катодной очистки (удаление окисной пленки  $Al_2O_3$ ) во время полупериода обратной полярности. В работе [24] с целью изучения влияния параметров сварки на формирование швов исследовали полученные нахлесточные сварные соединения алюминиевого сплава 5052 при различных значениях сварочного тока и длительности импульсов тока обратной полярности, скорость сварки оставалась постоянной.

Результаты экспериментов показывают тенденцию к более высокому подводу тепла при обратной полярности, что не соответствует традиционной теории дуги, поскольку известно, что прямая полярность более эффективна для подвода тепла, чем обратная. Об этом явлении указывает несколько авторов [25-26], и оно до сих пор вызывает споры, поскольку механизм удаления оксидной пленки с поверхности алюминия еще недостаточно изучен, за исключением теории «бомбардировки ионами», поэтому данный вопрос требует дальнейшего исследования.

Известно, что с ростом длительности импульсов тока обратной полярности площадь катодной очистки увеличивается, а стойкость электрода снижается (рис. 1.4, 1.5).

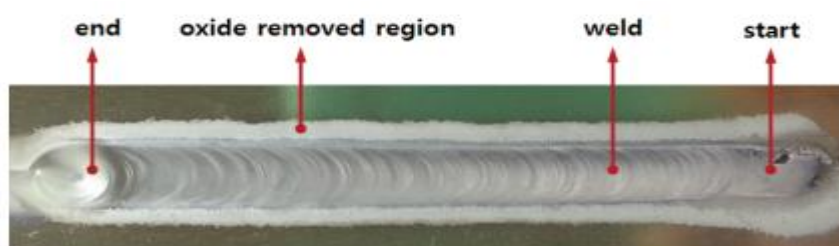


Рисунок 1.4 – Формирование шва при сварке алюминиевого сплава 5052 [24]

Видно, что электрод значительно оплавляется при 40% обратной полярности. В полупериод обратной полярности положительные ионы плазмы дуги перемещаются к основному материалу и разрушают оксидную пленку, но энергия

электронов повышает температуру на торце электрода, вызывая оплавление рабочего участка.

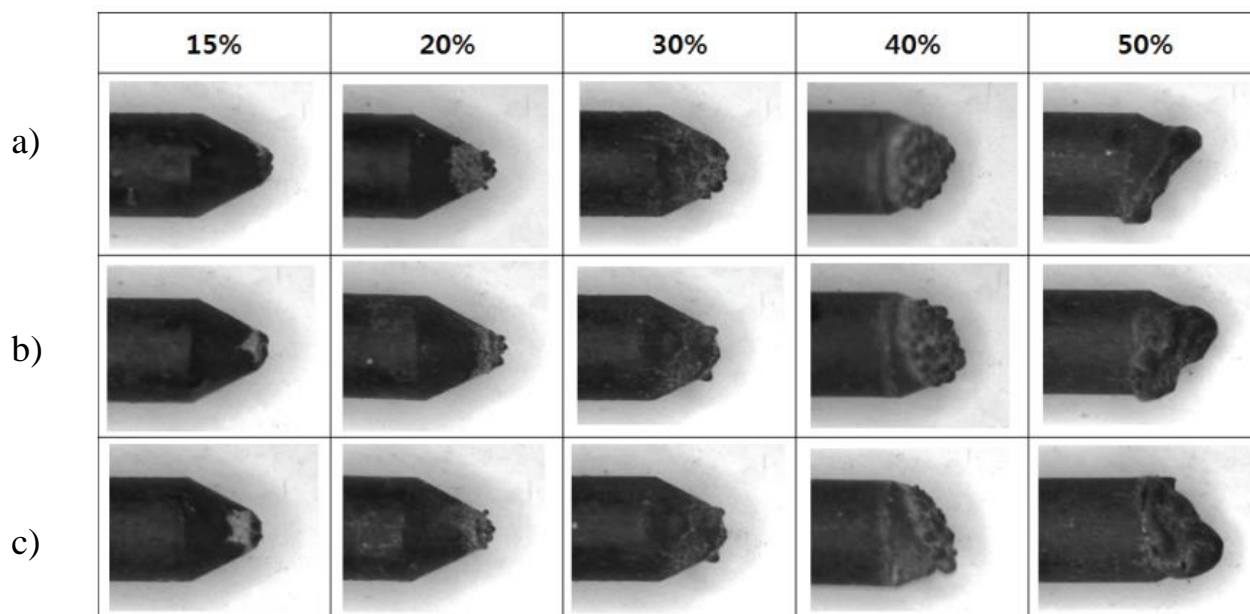


Рисунок 1.5 – Внешний вид рабочего участка неплавящегося электрода после сварки (при  $f=100$  Гц) [24]: а)  $I_{св.}=100$  А; б)  $I_{св.}=110$  А с)  $I_{св.}=120$  А

Yarmuch M.A. и Patchett В. М [25] исследовали сварку алюминия на переменном токе и обнаружили, что глубина проплавления и ширина шва увеличиваются с ростом обратной полярности, а изменения частоты переменного тока от 20 до 240 Гц не влияют на геометрические параметры шва.

В работе Jungho Cho, Jung-Jae Lee и др. [26] результаты экспериментов показали пропорциональную зависимость между подводимым теплом и длительностью обратной полярности, хотя существовали колебания из-за увеличения нестабильности дуги, вызванного оплавлением вольфрамового электрода. Полученные данные противоречат общепринятой теории нагрева анода, поэтому был предложен новый подход, сочетающий эффект сжатия и случайное блуждание катодного пятна. Чем больше значение обратной полярности, тем лучше стабильность дуги. Это, в свою очередь, привело к более высокому подводу тепла. Предлагаемый механизм, сочетающий эффект сжатия и блуждание катодного пятна, может не только объяснить результаты работы [25], но и

противоречивые данные по увеличению проплавления.

R. Sarrafi и R. Kovacevic [27] исследовали физические процессы катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия. Было обнаружено, что зона катодной очистки в процессе горения дуги увеличивается, однако через некоторое время скорость ее расширения снижается, а затем резко прекращается. В отличие от катодных пятен вакуумной дуги, катодные пятна дуги образуются на поверхности с исходными оксидами, а также на сканированной поверхности (возможно, из-за повторного образования тонкого слоя окисной пленки на поверхности изделия).

Таким образом, среди параметров сварки на переменном токе, длительность обратной полярности оказывает наиболее существенное влияние на технологические свойства дуги.

Авторы работы [28] представили трехмерную модель теплопередачи и потока расплавленного металла при сварке алюминия на переменном токе, а также влияние длительности обратной полярности на структуру шва. Выводы заключаются в следующем: сварка на переменном токе алюминия обеспечивает бездефектные сварные швы, погонная энергия уменьшается с увеличением обратной полярности при одном и том же значении сварочного тока, в результате глубина проплавления с увеличением  $\tau_{обр}$  снижается.

Также было обнаружено, что длительность обратной полярности влияет на размер зерна в металле шва, следовательно, и на твердость по Виккерсу при одном и том же значении сварочного тока. Авторы предполагают, что изменения в структуре шва связаны с колебаниями сварочной ванны, вызванные силовым воздействием дуги переменного тока.

В работе [29] исследовали процесс сварки алюминиевого сплава AA2219 неплавящимся электродом на переменном токе. Во время пиковой фазы импульса ( $I_{св.}=360$  А) благодаря высокой проплавляющей способности дуги в сварочной ванне образовывалось сквозное проплавление. При снижении тока до базового уровня мощность дуги снижалась, что приводило к уменьшению глубины

проплавления. (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Влияние импульсного базового тока на формирование сварного шва [29]: вид проплавления с внешней (а) и обратной стороны (b)

На низкочастотном импульсном базовом токе силовое воздействие дуги меньше, по этой причине нарушения формирования шва не происходило. Благодаря эффекту перемешивания при сварке двойными импульсами тока были получены полностью равноосные зерна в структуре швов. Подтверждена эффективность применения импульсного метода при сварке алюминиевых сплавов.

Song и др. [30] показали, что существенное увеличение сварочного тока может привести к значительному оплавлению вольфрамового электрода, что приведет к вольфрамовым включениям в металле шва и дополнительно повлияет на стабильность горения дуги и качество сварного соединения. На геометрию сварного шва и характеристики пористости сварных швов из сплава AA2219-T851 существенно влияют различные процессы и тепловложение. В нижней и верхней части сварных швов имеется большое количество пор.

В статье [32] исследовали изменение формы и электромагнитной силы дуги при двухимпульсной аргонодуговой сварке на переменном токе алюминиевого сплава (рисунок 1.7).

Характерные размеры дуги (диаметр и длина) были измерены и проанализированы в области столба дуги. В периоды переменного тока форма дуги менялась – уменьшалась на обратной полярности и увеличивалась в период смены полярности на прямую. Таким образом, размер профиля дуги

периодически менялся на протяжении всего процесса сварки.

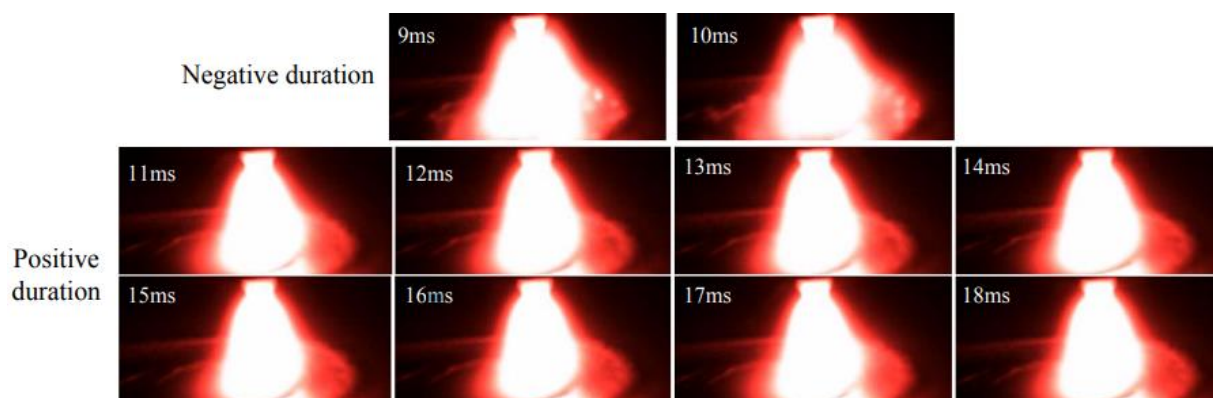


Рисунок 1.7 – Форма дуги в зависимости от длительности обратной полярности ( $f=50$  Гц) [32]

Сужение дуги происходило в момент смены прямой полярности на обратную. Электромагнитная сила и давление дуги меняются в зависимости от циклов с изменением профиля дуги, что способствовало улучшению качества сварного шва.

### 1.3 Влияние ультразвуковых колебаний на свойства дугового разряда

Применение ультразвуковых колебаний при дуговой сварке плавлением способствует повышению качества сварного шва, снижению трещинообразования, улучшению механических характеристик сварных швов [31-35]. Однако применение ультразвуковых колебаний не распространено в производстве из-за отсутствия рациональных колебательных систем, которые способны стабильно работать при определенных механических и тепловых нагрузках, а также отсутствия рациональных способов введения ультразвука в сварочную ванну и плазму сварочной дуги. Кроме того, еще не исследованы процессы воздействия ультразвуковых колебаний на дугу переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ) посредством ультразвуковых излучателей.

Ниже приведены работы, представляющие значительный интерес, в которых рассмотрены способы введения ультразвуковых колебаний, а также

результаты исследования влияния ультразвука на свойства сварных соединений при сварке.

В статье [32] представлен способ сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвука на дугу постоянного тока прямой полярности. При непосредственном воздействии УЗ колебаний на сварочную дугу происходит взаимодействие ультразвука с плазмой дуги. Результаты экспериментов показывают, что с воздействием ультразвука давление дуги значительно увеличивается. Авторы подтверждают, что эта технология может влиять на сварочную ванну и увеличивать глубину проплавления.

Результаты исследований подчеркивают потенциал применения ультразвука в дуговой сварке для увеличения производительности процесса и улучшения качества сварных швов. Особое внимание уделяется методам использования ультразвуковых излучателей, которые бывают пьезоэлектрическими, либо магнитострикционными [32]. Также разработан новый метод, основанный на импульсном токе ультразвуковых частот, и названный дуговым с ультразвуковым возбуждением тока. В этом методе дуга действует не только как источник тепла, но и как механизм, который воздействует ультразвуком на сварочную ванну [33, 34].

Способы применения ультразвуковых колебаний можно классифицировать следующим образом:

- 1) воздействие на заготовку (Wen, Dong, Watanabe и др.);
- 2) влияние на сварочную ванну в процессе сварки (L. He, T. Yuan);
- 3) воздействие на электрод или сварочную проволоку (Watanabe и др.)
- 4) ультразвук с дуговым возбуждением (Hua и др.);
- 5) воздействие на сварочную дугу (Sanbao, Wang, Sun, Fan и др.).

В последние годы основное внимание уделяется воздействию ультразвука на дугу (U-GTAW).

Атаманенко Т.В. и Ескин Д.Г. [35] исследовали влияние ультразвука на расплавленный металл и установили, что механические свойства

улучшаются. С. Хяоуи и др. [36] предложили процесс сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковыми колебаниями на заготовку (рисунок 1.8).

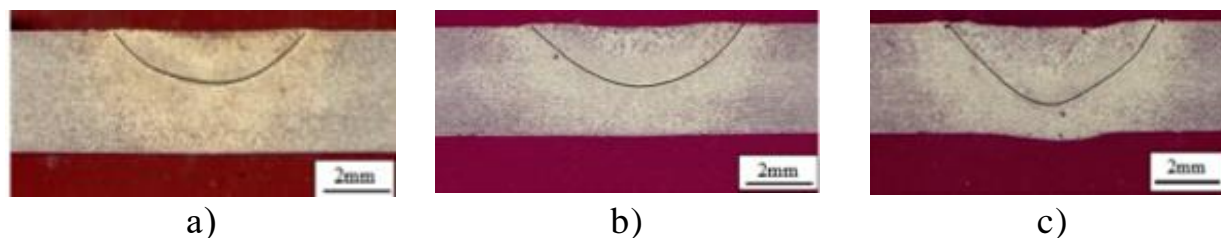


Рисунок 1.8 – Влияние мощности УЗК на глубину проплавления:

а) без УЗК; б) 400 Вт; в) 1000 Вт [36]

Авторы работы [36] утверждают, что увеличение мощности УЗ колебаний приводило к росту глубины проплавления, ультразвуковая кавитация способствует измельчению микроструктуры, следовательно, повышались механические свойства. По сравнению со сварными соединениями, выполненными традиционной сваркой, твердость увеличилась всего на 8%, а предел прочности на растяжение повысился на 29%.

Sun и др. [37, 38] предложили способ, в котором применялся пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь. Таким образом, во время сварки ультразвуковые колебания передаются в сварочную ванну независимо от формы волны и полярности сварочного тока. Используя этот метод и основываясь на результатах, полученных при сварке коррозионностойкой стали AISI 304, Sun и др. [38, 39] показали, что применение УЗК может значительно увеличить глубину проплавления. По результатам экспериментов установлено, что глубина проплавления увеличилась с 1,18 до 3,12 мм и с 1,20 до 3,71 мм, при значении сварочного тока 100 А и 150 А, соответственно. Частота УЗК составляла 20,5 кГц, мощность 200 Вт [39] (рисунок 1.9).

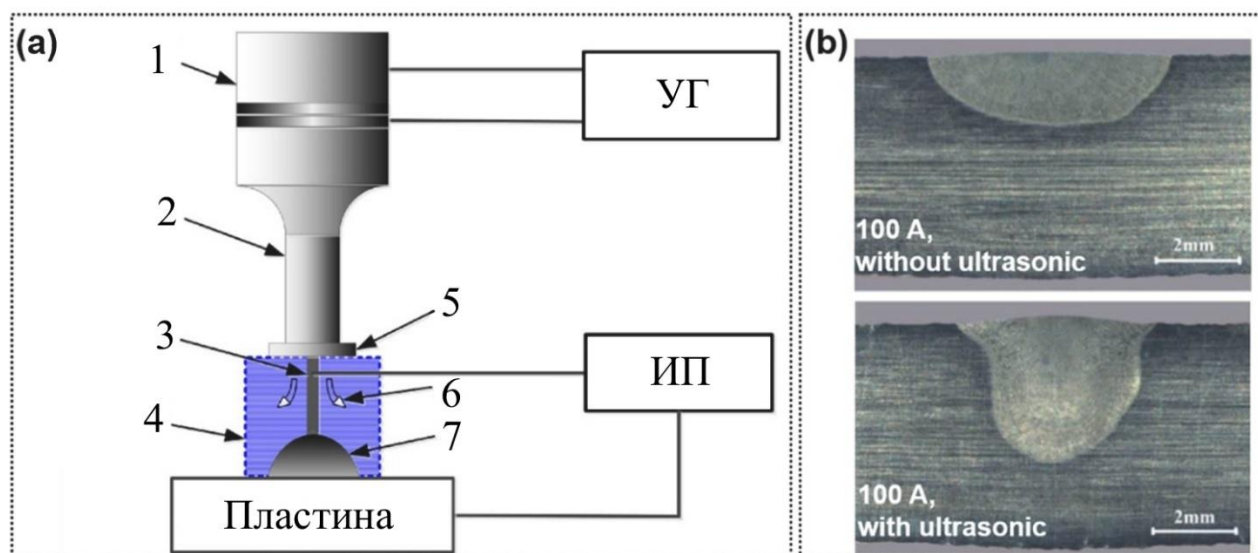


Рисунок 1.9 – Схема U-GTAW (a) и макрошлифы проплавлений (b) [39]:

1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – волновод; 3 – неплавящийся электрод; 4 – акустическое поле; 5 – ультразвуковой излучатель; 6 – аргон; 7 – дуга; ИП – источник питания; УГ – ультразвуковой генератор

Соотношение глубины/ширины сварных швов с УЗК было явно выше, чем без ультразвука, независимо от значения сварочного тока.

Увеличение проплавления подтверждается в работах [40, 41] за счет применения ультразвуковых колебаний мощностью до 1 кВт. Кроме того, при тех же условиях, когда рассматривается коэффициент формы шва, наблюдается увеличение проплавления на 235% при значении сварочного тока  $I_{св.}=100$  А и на 380% при  $I_{св.}=150$  А по сравнению с проплавлениями, выполненными без УЗК [40]. По мнению авторов [40, 41], это связано с большей проникающей способностью ультразвукового поля, что, по-видимому, увеличивает давление дуги на сварочную ванну.

В работе [42] показано, что давление дуги при сварке с УЗК имеет некоторые особенности. В отличие от того, что происходит при обычной сварке, где давление дуги постоянно уменьшается с увеличением расстояния между электродом и заготовкой, при использовании УЗК максимальное

значение давления дуги достигается при межэлектродном расстоянии, равном 4,4 мм.

Авторы работы [43] подтверждают увеличение глубины проплавления при сварке с УЗК. По результатам, полученным при аргонодуговой сварке алюминиевого сплава 7075-T6 с частотой ультразвуковых колебаний 20 кГц и мощностью 2 кВт, произошло увеличение глубины проплавления до 45% и уменьшение размера зерна до 42%.

Wen, Dong [43, 44] исследовали влияние УЗК при сварке внахлест пластин АМг-6 с оцинкованной сталью и коррозионностойкой сталью 304. Предел прочности сварного соединения на растяжение увеличился на 20%.

В отличие от того, что предлагают исследователи Wen, Dong [43, 44], Watanabe и др. [45] применяли ультразвуковые колебания параллельно перемещению горелки при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом. С помощью этого метода авторы [45] получили увеличение предела прочности на растяжение сварных швов и уменьшение ширины аустенитных зерен, выполненных при различных скоростях сварки.

Методы, в которых ультразвуковой преобразователь не соединен со сварочной горелкой [43, 44, 31], являются более гибкими, поскольку ультразвуковая колебательная система не подвергается воздействию высоких температур дуги или перемещению во время сварки. Однако эти способы предназначены для сварки изделий небольших размеров, так как по мере увеличения размеров пластины, в которую вводятся ультразвуковые колебания, требуется большая мощность УЗК, что делает их применение нецелесообразными [45].

Столкнувшись с этой трудностью, Watanabe и др. [46] разработали метод введения ультразвуковых колебаний непосредственно в сварочную ванну через присадочную проволоку. Таким образом УЗК передаются в сварочную ванну через присадочный материал, колебания осуществляются перпендикулярно направлению сварки и параллельно поверхности заготовки (рисунок 1.10).

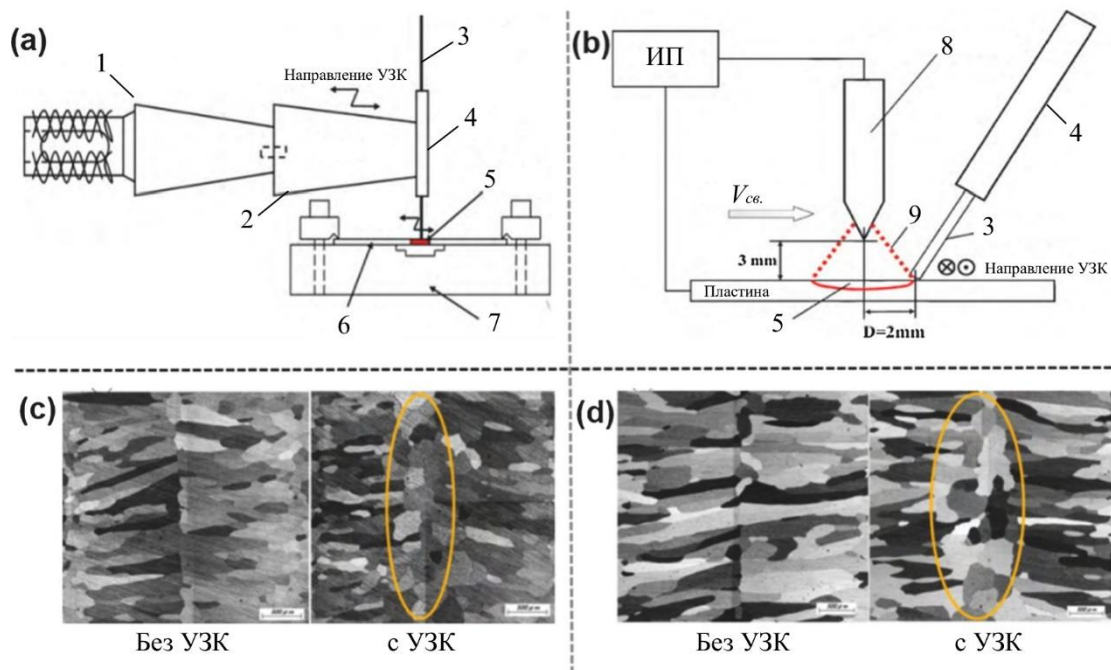


Рисунок 1.10 – Схема устройства (а) и расположения присадочной проволоки (b) и микроструктуры сварных соединений (с, d) [46]: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – волновод; 3 – присадочная проволока; 4 – направляющая трубка; 5 – сварочная ванна; 6 – пластина; 7 – сварочный стол; 8 – неплавящийся электрод; 9 – дуга

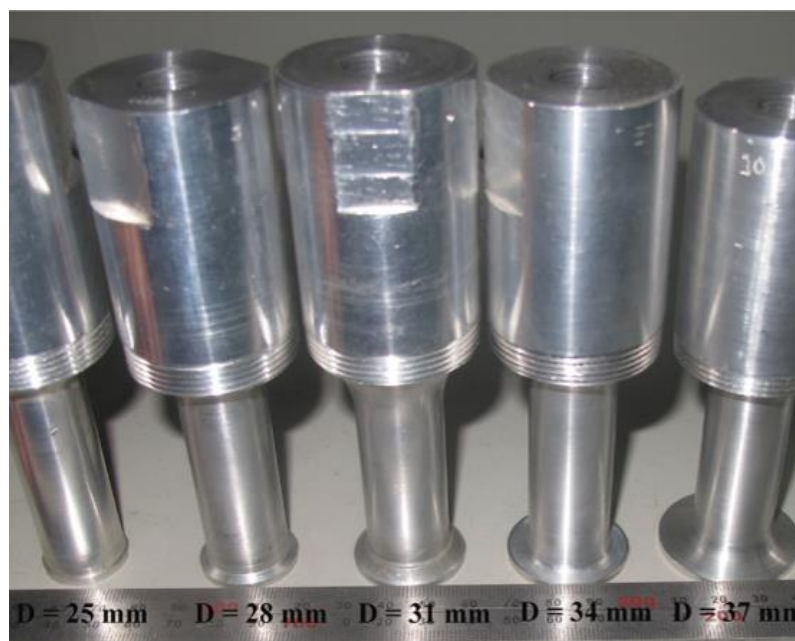


Рисунок 1.11 – Концентраторы ультразвуковых колебаний с различными диаметрами излучателей [47]

Результаты [46] показали, что предел прочности на растяжение увеличился на 20%, а относительное удлинение на 40%.

Sun и др. [47] исследовали влияние УЗК на дугу постоянного тока при сварке неплавящимся электродом (рисунок 1.11).

На рисунке 1.12 показаны макрошлифы проплавлений с воздействием УЗК при различном расстоянии излучателя до поверхности заготовки.

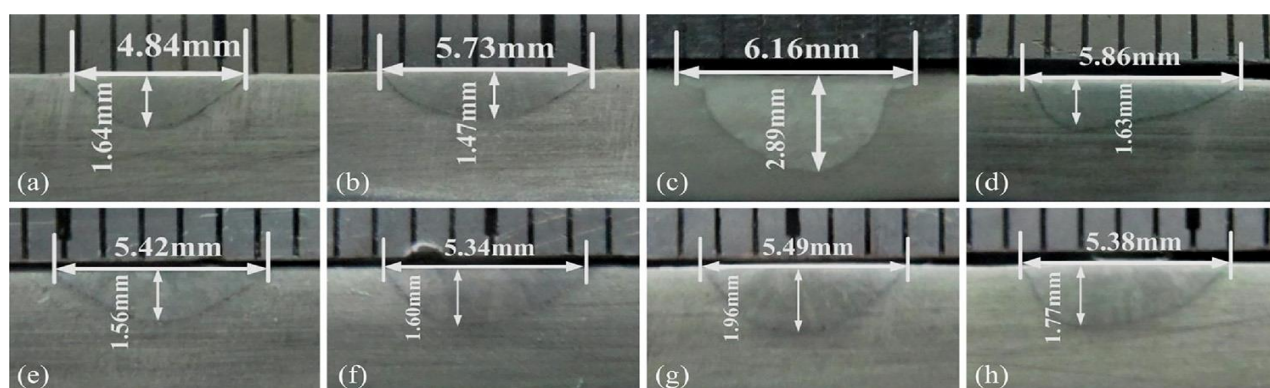


Рисунок 1.12 – Проплавления при различной высоте излучателя:

a) 15 мм; b) 17 мм; c) 19 мм; d) 21 мм; e) 23 мм; f) 25 мм;

g) 27 мм; h) 29 мм [47]

По результатам экспериментов [47] с различными диаметрами излучателя было обнаружено, что глубина проплавления увеличивается при диаметре излучателя от 25 до 31 мм. Наибольшее проплавление наблюдается при диаметре 31 мм, что составляет 250% от значения, полученного при обычной аргодуговой сварке (0,78 мм), рисунок 1.13.

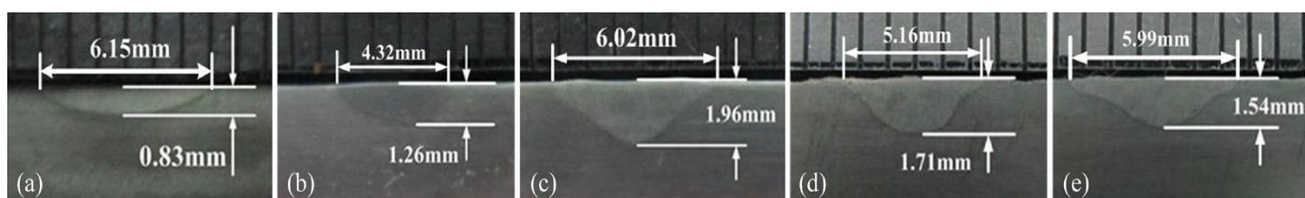


Рисунок 1.13 – Поперечное сечение сварных швов при разных диаметрах излучателя: a) 25 мм; b) 28 мм; c) 31 мм; d) 34 мм; e) 37 мм [47]

Выводы по результатам экспериментов [47]:

1) Степень сужения сварочной дуги приближается к максимальному значению при высоте излучателя  $H=19$  и  $27$  мм. Наименьшее значение коэффициента сжатия дуги при диаметре излучателя  $31$  мм, что указывает на оптимальный размер;

2) Размер зерна значительно уменьшается, что приводит к улучшению механических характеристик сварных соединений;

3) Основной механизм дуго-акустического взаимодействия объясняется с учетом распределения акустического давления. Оптимальная конфигурация излучателя со ступенчатыми пластинами имеет самое высокое акустическое давление, что создает сильный вибрационный эффект.

За последнее десятилетие ряд исследователей предложили различные варианты метода, первоначально предложенного [39]. Например, в работе [48] продемонстрировали сварку неплавящимся электродом с использованием переменного тока с высокой частотой импульсов тока.

В этом случае импульсная ультразвуковая мощность модулируется только во время импульса обратной полярности переменного тока. Ван и др. [48] объединили методы дуги с ультразвуком и двухдуговые. Они использовали основную дугу с постоянным током, а также вторую, которая традиционно используется при сварке в качестве основного источника тепла для плавления основного металла. Вторая дуга с более низкой интенсивностью и импульсным током на ультразвуковых частотах, как это было задумано, с целью введения ультразвуковых колебаний в сварочную ванну. Эти две дуги располагаются рядом друг с другом, образуя единую гибридную дугу, воздействующую на сварочную ванну, как показано на рисунке 1.14. Согласно результатам [48] ультразвук способствует повышению механических свойств сварного шва.

Авторами [48] был разработан новый метод двухдуговой сварки неплавящимся электродом с использованием комбинированной технологии дуги с УЗК и обычной дуги постоянного тока. Дуга с ультразвуком использовалась для

подачи ультразвуковых колебаний в сварочную ванну для улучшения качества сварки, а вторая дуга постоянного тока использовалась в качестве основного источника тепла для повышения эффективности процесса.

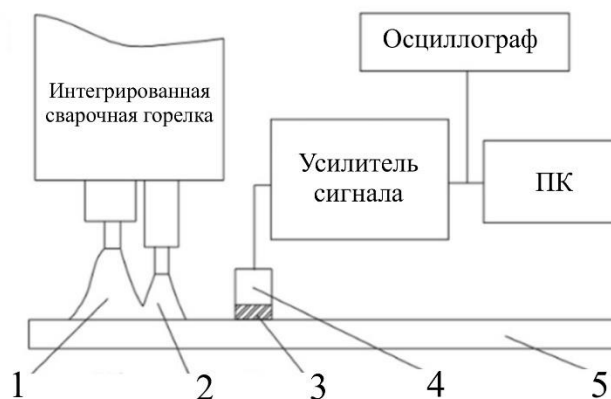


Рисунок 1.14 – Схема двухдугового метода сварки неплавящимся электродом [48]:

- 1 – основная дуга; 2 – вспомогательная дуга с УЗК; 3 – соединитель;  
4 – ультразвуковой зонд; 5 – пластина

С. Chen, С. Fan и др. [49] сравнивали способ сварки неплавящимся электродом с импульсным воздействием УЗК (PU-GTAW) и с постоянным воздействием УЗК (U-GTAW) путем анализа микроструктуры и механических свойств сварных соединений. Результаты показали, что улучшение микроструктуры при импульсном воздействии ультразвука было более эффективным, чем в обычном режиме. Размер зерен в металле шва был меньше по сравнению с обычной сваркой. Степень влияния U-GTAW и PU-GTAW на твердость сварного шва была одинаковой и составляла на 30 HV больше по сравнению со сваркой без УЗК.

Авторы [50] обнаружили периодические изменения формы дуги при воздействии УЗК. Процесс изменения формы дуги заключался в том, что она сначала сжималась, а затем расширялась, и наоборот. Между тем, постоянно меняющаяся сила акустического давления и электромагнитная сила были основной причиной периодического изменения формы дуги в процессе сварки с ультразвуком.

Авторы работ [53, 54] исследовали влияние ультразвуковых колебаний на сварочную ванну. Было обнаружено, что ультразвуковые колебания увеличивают глубину проплавления. Фан и др. [51] получили аналогичные результаты. Также было обнаружено, что применение ультразвука улучшило качество сварного шва. По сравнению с традиционной сваркой неплавящимся электродом, с применением УЗК глубина проплавления увеличилась в 2 раза [51].

Вышеупомянутые улучшения были связаны с более глубоким проплавлением, вызванным ультразвуковыми колебаниями, которые увеличили давление дуги [54]. Применение ультразвуковых колебаний на сварочную дугу вызывало её сужение и увеличивало глубину проплавления [53]. Авторы работы [55] изучали влияние ультразвуковых колебаний на расплавленный металл при сварке алюминия. Результаты показали, что зерна в зоне сварного шва были измельчены, а пористость уменьшена (рисунок 1.15).

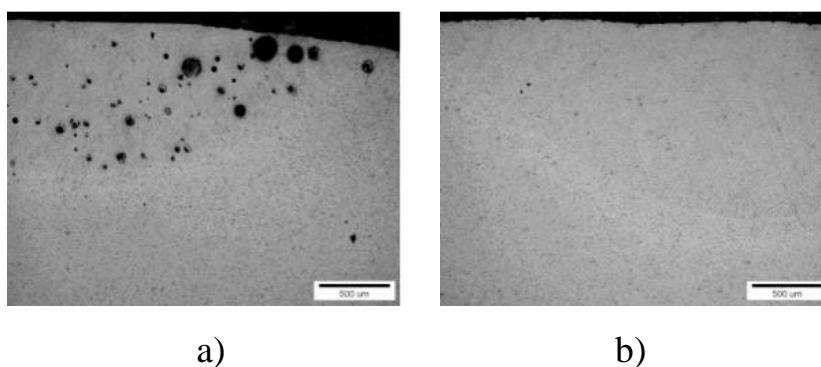


Рисунок 1.15 – Микроструктура сварного шва алюминиевого сплава:

а) без УЗК; б) с УЗК [55]

Н. Dong и др. [56] исследовали влияние УЗК при сварке алюминия с низколегированной сталью. Применение УЗ колебаний при сварке повысило предел прочности на 27%. Также было обнаружено измельчение зерна в структуре шва, а также уменьшение интерметаллидов Fe-Al и повышение микротвердости как в зоне термического влияния, так и в сварном шве, что объясняет увеличение предела прочности соединения.

Авторы [57] исследовали сварку неплавящимся электродом с импульсным

воздействием ультразвуковыми колебаниями на дугу (U-GTРА). В этой статье систематически сравниваются: микроструктура, механические свойства и стойкость к коррозии сварных соединений нержавеющей стали 316L, выполненных обычной сваркой и с ультразвуком. Результаты показывают, что отношение глубины зоны сварки к ширине сварного соединения U-GTРА увеличилось, а площадь зоны равноосного зерна была больше, чем у сварного соединения без УЗК. Предел прочности на растяжение и относительное удлинение сварных соединений, выполненных U-GTРА, были на 7% и 26% больше (рисунок 1.16).

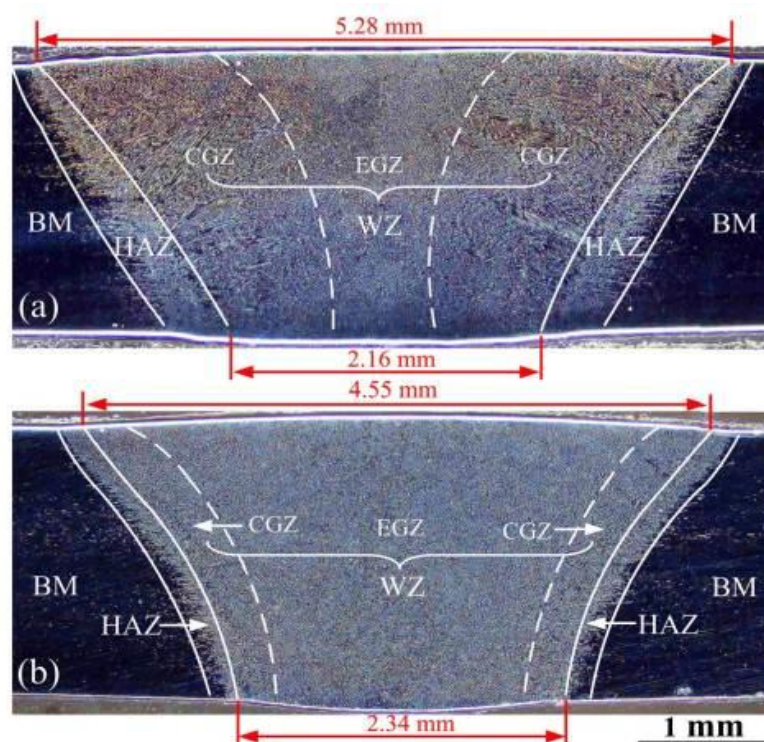


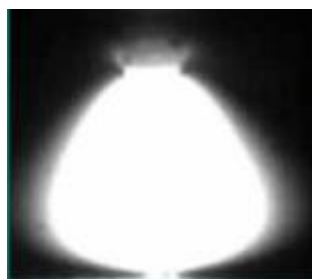
Рисунок 1.16 – Макрошлифы сварного соединения без УЗК (а) и с УЗК (b) [57]

Ультразвуковые колебания оказывают значительное влияние на структуру сварного шва. При совместном влиянии ультразвука и дуги, происходило повышение давления дуги и скорости теплоотвода по сравнению со сваркой без УЗК, ширина ЗТВ сварного соединения U-GTРА уменьшается, а отношение глубины ЗТВ к ширине увеличивается. Применение ультразвука способствует существенному измельчению зерен в зоне термического влияния, средний размер зерна составил 39,7 мкм, а их доля составила всего 37%, а доля зерен размером 56,2

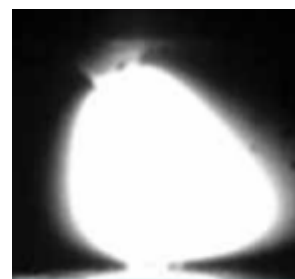
мкм уменьшилась до 48%.

Авторы [58] исследовали дуговую сварку неплавящимся электродом сплава Inconel 718 с воздействием ультразвуковых колебаний (УЗК). Образцы, сваренные без УЗК при силе тока 80 А, имеют трещину длиной 15 мм, которая увеличивается до 35 мм при повышении сварочного тока до 120 А. Низкая скорость кристаллизации, связанная с относительно высоким значением сварочного тока, вызывает увеличение размеров трещин. Применение ультразвука позволило снизить чувствительность к трещинам с 47,5 % до 13%. Кроме того, было обнаружено, что величина сварочного тока влияет незначительно на размер трещин, когда применяются ультразвуковые колебания. Фрагментация дендритов и измельчение зерна признаны основными факторами, снижающими склонность сплава Inconel 718 к горячим трещинам с воздействием ультразвука.

В работе [59] исследовали влияние ультразвука на микроструктуру и механические свойства сварных соединений с применением нового способа сварки - дуговой сварки неплавящимся электродом с импульсным воздействием ультразвука. Результаты показали, что происходило сжатие дуги при воздействии ультразвука, и глубина проплавления увеличилась (рисунок 1.17). Полученная микроструктура отличалась от полученной при сварке без УЗК. Изменения в микроструктуре шва повысили предел прочности на растяжение, как с импульсным, так и с непрерывным воздействием ультразвуковых колебаний.



a)



b)

Рисунок 1.17 – Форма дуги без УЗК (a) и с УЗК (b) [59]

Авторы [59] провели исследования по влиянию ультразвуковых колебаний

на силовое воздействие дуги и было обнаружено, что ультразвук был более эффективен при относительно малых значениях тока ( $I_{св.}=50-60$  А), увеличив давление дуги на 170%; с повышением силы тока до 70-80 А давление дуги практически не изменилось (менее 10%) (рисунок 1.18).

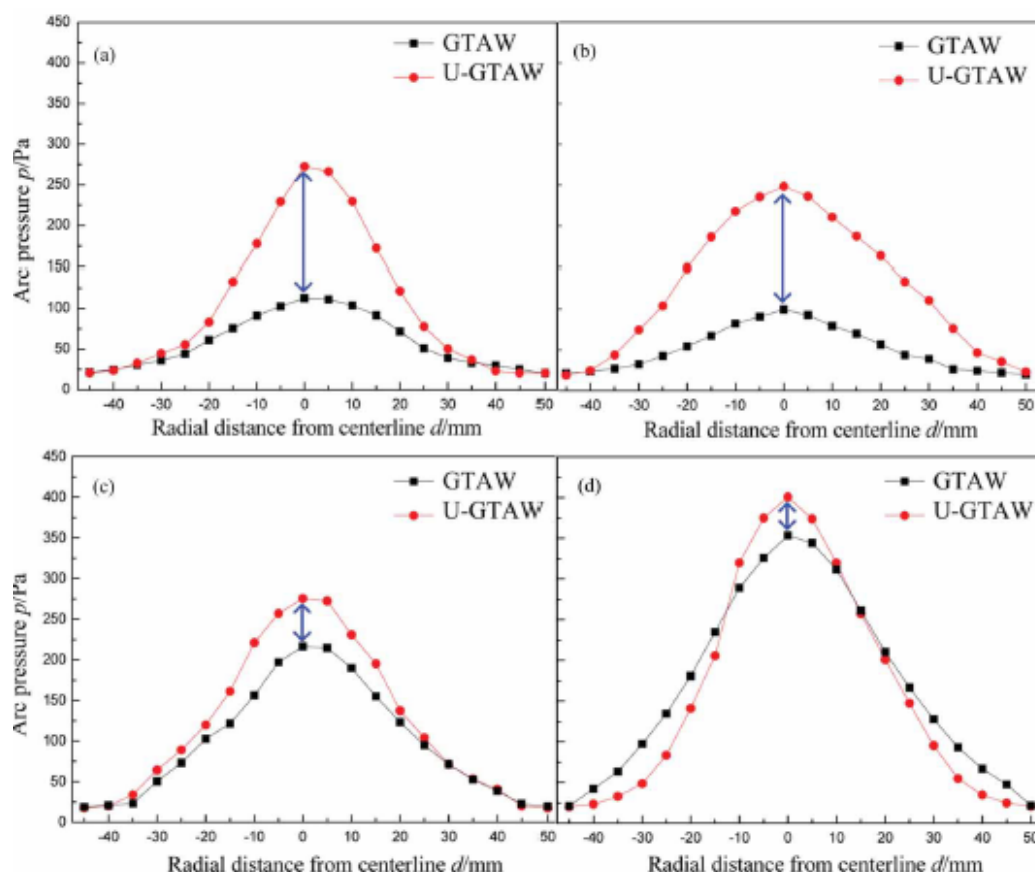


Рисунок 1.18 – Давление дуги при различной силе тока:

а) 50 А; б) 60 А; в) 70 А; г) 80 А

В работе [60] проведено исследование изменения свойств дуги с неплавящимся электродом с применением УЗК. Результаты показывают, что увеличение частоты ультразвука приводило к увеличению напряжения и силового воздействия дуги. Сжатие дуги привело к уменьшению ширины сварного шва. Также увеличение термосилового воздействия дуги способствовало увеличению глубины проплавления (рисунок 1.19).

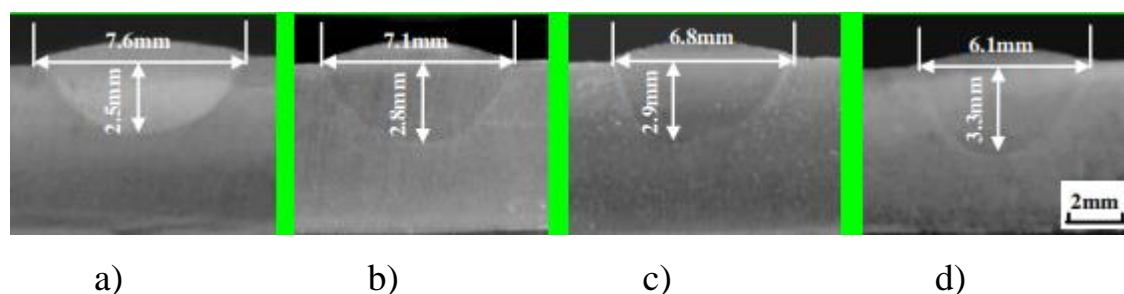


Рисунок 1.19 – Макрошлифы проплавлений при различной частоте ультразвука  $f_n$ :  
а) Без УЗК; б)  $f_n = 20$  kHz; в)  $f_n = 40$  kHz; г)  $f_n = 80$  kHz [60]

В работе [61] воздействовали УЗК на сварочную ванну с частотой 20 кГц и мощностью 1,6 кВт. Результаты показали, что при мощности ультразвука 1,2 кВт средний размер зерен уменьшался с 200 до 50 мкм. При этом максимальная прочность соединений составила  $\sigma_B = 228$  МПа, что на 18% больше по сравнению с соединениями, полученными без применения УЗК ( $\sigma_B = 193$  МПа).

Кроме того, при испытании на растяжение сварное соединение разрушилось в зоне основного металла, а не по шву, что указывает на измельчение зерна. При дальнейшем увеличении мощности ультразвука до 1,6 кВт образовались поры, что привело к снижению механических свойств.

Авторы [62] представили усовершенствованный процесс сварки с УЗК. По сравнению с обычной дугой, применение УЗК способствует контрагированию дуги (рисунок 1.20). На основе физического моделирования установлено, что наилучшее взаимодействие плазмы дуги и ультразвуковых колебаний достигается за счет оптимизации геометрических параметров акустического излучателя.

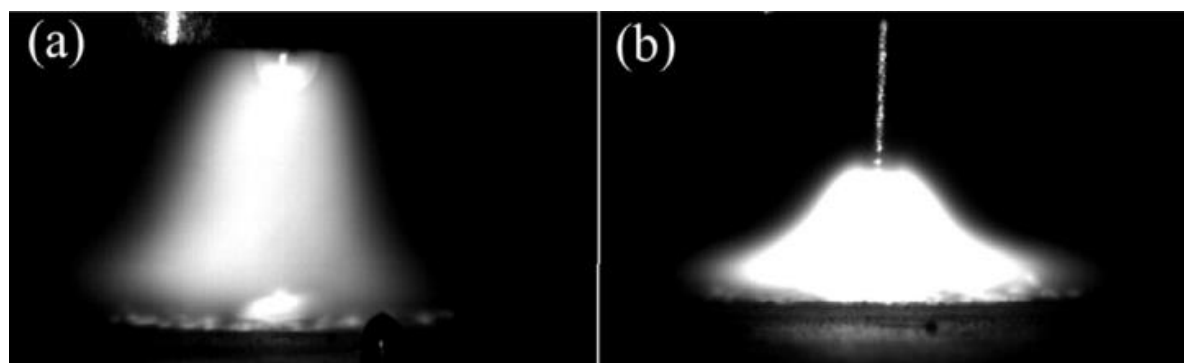


Рисунок 1.20 – Форма дуги без УЗК (а) и с УЗК (б) [62]

Результаты экспериментов показывают, что для получения наибольшего эффекта установка для дуговой сварки с УЗК должна работать в резонансном режиме с использованием излучателя со сферической поверхностью и большим радиусом кривизны.

В работе [63] исследовали влияние ультразвука при плазменно-дуговой сварке. Проведены эксперименты по сварке пластины встык с разомкнутой и замкнутой схемой управления при различных условиях сварки. Было обнаружено, что с УЗК плазменная дуга может полностью проплавить пластины из нержавеющей стали толщиной 8 мм за один проход при более высокой скорости сварки (рисунок 1.21).

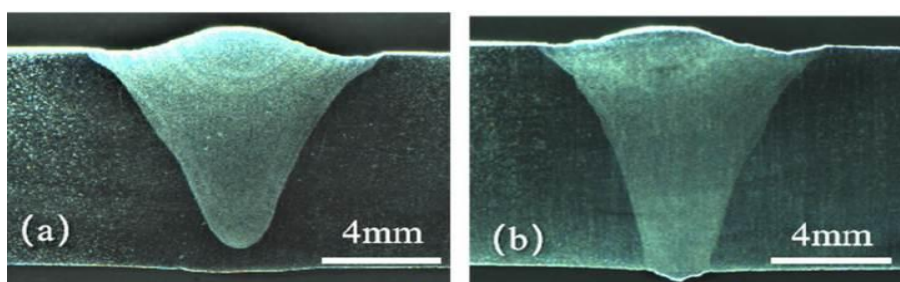


Рисунок 1.21 – Макрошлифы проплавлений: а) без УЗК; б) с УЗК [63]

За счет уменьшения тепловложения и сжатия плазменной дуги под действием ультразвуковых колебаний сварной шов уменьшился в ширине, а отношение глубины к ширине шва увеличилось. Эксперименты подтвердили эффективность применения ультразвука, так как было получено полное проплавление пластины из коррозионностойкой стали толщиной 8 мм за один проход на большей скорости по сравнению с обычной сваркой.

В качестве источника сварочного тепла дуга с УЗК может использоваться для обработки расплавленного металла в процессе дуговой сварки. Однако механизм взаимодействия между ультразвуком и плазмой дуги до сих пор неясен, что становится ключевым препятствием для применения этой технологии в производстве.

Чтобы проиллюстрировать характеристики дуги, авторы [64] обработали

изображения дуги, полученные с помощью высокоскоростной камеры. Стабильность дуги с УЗК значительно улучшается, её яркость увеличивается, высокотемпературная область столба дуги распространяется на анод, её форма существенно меняется. Результаты экспериментов [64] показывают, что применением УЗ колебаний можно изменять форму дуги (рисунок 1.22).

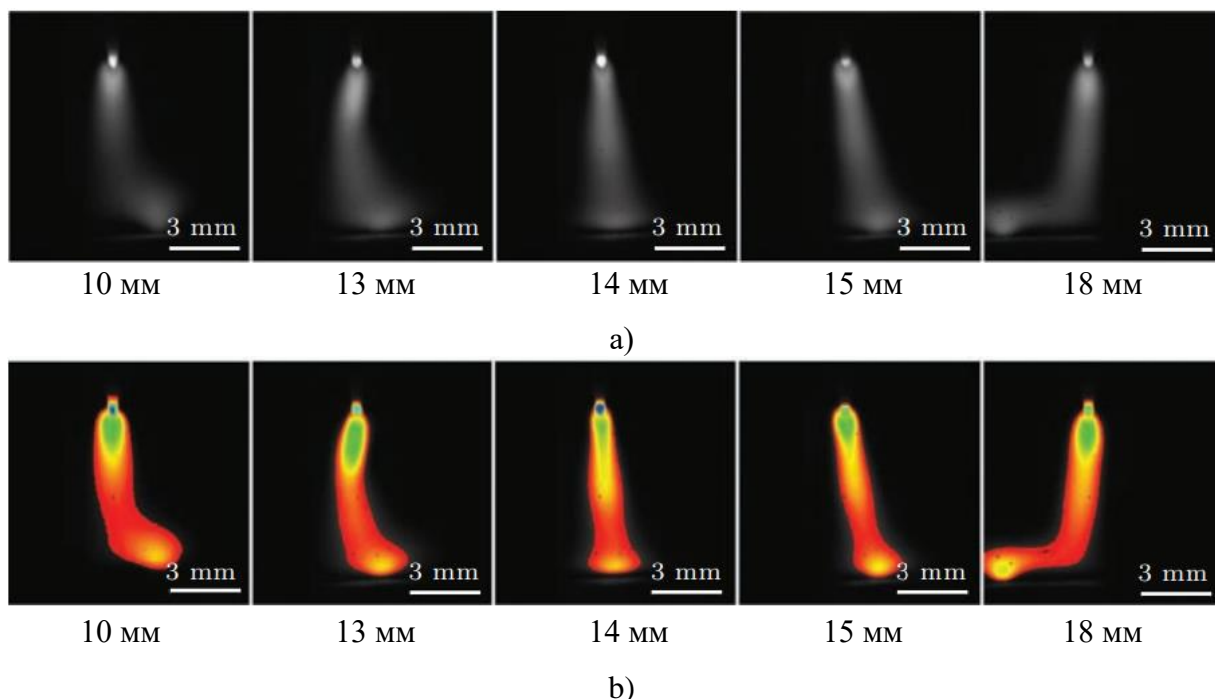


Рисунок 1.22 – Изображения дуги при разном расстоянии от поверхности заготовки до излучателя: (а) исходное изображение, (б) обработанное изображение [64]

Авторы [65] представили 3D-модель для анализа генерации, возбуждения и затухания ультразвуковых волн в слабоионизированной дуговой плазме. Система U-GTAW была разработана для проверки 3D-модели. В работе [65] показано, что ультразвуковые волны активируются комбинацией давления дуги и силы Лоренца от гармонического возмущения возбуждающего тока, создающего вблизи конца электрода в области дуги с высокой акустической мощностью, затем значительно затухающей и распространяется в области защитного газа (аргон). Большая часть акустической энергии поглощается и преобразуется в акустический поток импульса дуговой плазмы вблизи конца вольфрамового электрода. Ультразвуковая

частота имеет большое влияние на мощность акустического поля и может значительно способствовать концентрации и ускорению движения частиц в плазме дуги на частотах 20 и 30 кГц.

В работе [66] исследованы микроструктура и механические свойства сварных швов коррозионнстойкой стали, выполненных с воздействием ультразвука. По сравнению с традиционной сваркой глубина проплавления и отношение глубины к ширине при сварке с ультразвуком увеличились на 200% и 256%, соответственно. Микроструктура с УЗК состояла из аустенита (98,3%) и феррита (1,7%), а содержание феррита было выше, чем без УЗК (0,7%). Средний размер зерна в зоне сварного шва с воздействием ультразвука уменьшился на 33% по сравнению со сваркой без УЗК. Предел прочности и относительное удлинение с ультразвуком было в среднем 764,3 МПа и 66,3% соответственно, что выше, чем предел прочности (729,3 МПа) и относительное удлинение - 60,3% при сварке без УЗК. Благодаря сжатию дуги и перемешиванию металла сварочной ванны при воздействии УЗК повысилась эффективность процесса и увеличилась глубина проплавления сварки неплавящимся электродом. Измельчение зерен способствовало улучшению механических свойств соединений.

В работе [67] авторы предложили новый способ сварки неплавящимся электродом с ультразвуковыми колебаниями и магнитным полем (U-M-GTAW). Эта статья посвящена исследованию возможности использования гибрида стоячей волны ультразвука и аксиального магнитного поля для управления процессом сварки.



Рисунок 1.23 - Форма дуги при различной высоте излучателя [67]

Результаты показали, что дуга была сжата под действием стоячей ультразвуковой волны. Сжатие дуги было наиболее значительным при высоте 15 мм до поверхности заготовки (рисунок 1.23).

По сравнению с дугой без УЗК, дуга с УЗК в светлой и темной областях была сжата соответственно на 32% и 81,2%. Под действием аксиального магнитного поля дуга сжималась и периодически вращалась, однако степень сжатия дуги была не столь очевидной, как сжатие при воздействии ультразвуком со стоячей волной. В случае совместного воздействия стоячей волны ультразвука и аксиального магнитного поля форма дуги была явно сжатой и имела периодическое вращение, что полностью подтвердило возможность использования гибридного способа сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвука и аксиального магнитного поля (рисунок 1.24).



Рисунок 1.24 – Форма дуги при различных методах сварки [67]:

GTAW - дуговая сварка неплавящимся электродом без УЗК; U-GTAW – с ультразвуком; M-GTAW - с магнитным полем; U-M-GTAW – совместное воздействие магнитного поля и ультразвука

Авторами [68] разработан технологический вариант плазменно-дуговой сварки с ультразвуком. Вольфрамовый электрод, закрепленный в ультразвуковом преобразователе, непосредственно передает ультразвуковые колебания в дугу. Сварка пластин из нержавеющей стали показала, что ультразвуковые колебания повышают проплавляющую способность сжатой дуги, что дает возможность получить полное проплавление при более низком сварочном токе и более высокой скорости сварки. Результаты экспериментов показали, что взаимодействие ультразвуковых колебаний с плазменной дугой приводит к сжатию столба дуги и

увеличению её силового воздействия на сварочную ванну на 15-31% в условиях, используемых в данном исследовании (рисунок 1.25).

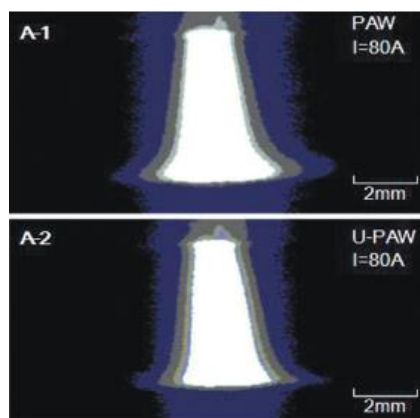


Рисунок 1.25 – Форма плазменной дуги с/без ультразвуковых колебаний [68]

Авторы [69] исследовали процесс импульсной сварки неплавящимся электродом с ультразвуком (PU-GTAW) на постоянном токе обратной полярности. Результаты показали, что на низких частотах 1-20 Гц форма дуги переходила от расширения к сжатию и повторному расширению с изменением частоты импульсов, что определяется как импульсная дуга. Когда частота импульсов превышала 20 Гц, форма дуги была более сжатой по сравнению с дугой без УЗК. Степень сжатия формы дуги при частоте импульсов 20 Гц была меньше, чем при частоте 50 Гц. Давление дуги с УЗК увеличилось на 10%, что способствовало увеличению глубины проплавления и ширины сварного шва. На рисунке 1.26 показано, что с увеличением мощности ультразвука происходило сжатие дуги и увеличивалось её давление.

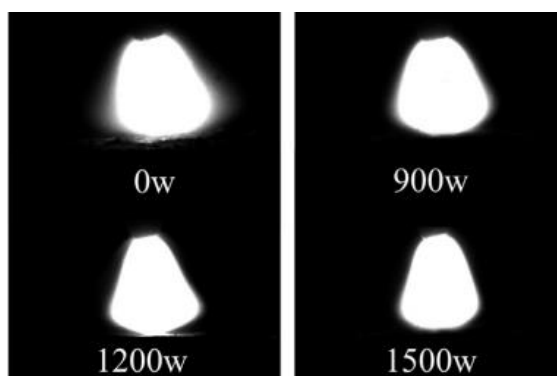


Рисунок 1.26 – Форма дуги в зависимости от мощности УЗК [69]

Сварка неплавящимся электродом в среде инертного газа с ультразвуком (U-TIG) представляет собой новый метод, который направлен на улучшение качества сварных швов. В работе [70] проанализирована микроструктура сварных соединений.

Результаты показали, что по сравнению с обычной сваркой крупные зерна в центре сварного шва исчезли, а в зоне сплавления зерна при сварке U-TIG стали более равномерными. В этой статье обсуждается механизм измельчения кристаллического зерна и снижение пористости при сварке U-TIG, что может быть связано с эффектом акустического потока и кавитации.

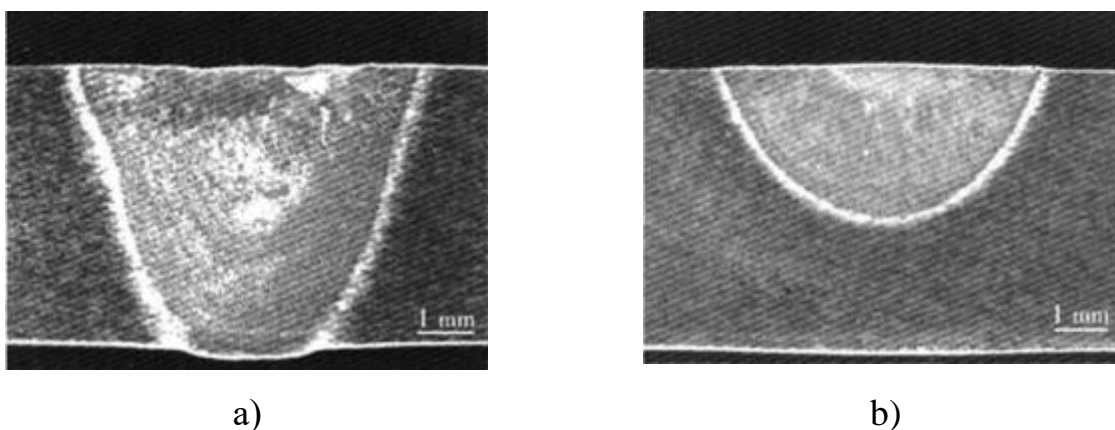


Рисунок 1.27 – Макрошлиф алюминиевого сплава 2014 при сварке на постоянном токе обратной полярности: а) с УЗК и б) без УЗК [70]

Также показано, что с применением УЗК отношение глубины сварного шва к ширине увеличилось на 167%.

В работе [71] изучалась форма дуги в импульсном и постоянном ультразвуковом поле. Результаты показывают, что по сравнению с дугой без УЗК при сварке в инертных газах форма дуги под действием импульсного ультразвукового поля зависит от частоты импульсов. От 1 до 20 Гц плазма дуги периодически расширяется и сжимается в одном импульсе. При частоте более 20 Гц плазма дуги сжимается по мере увеличения частоты импульсов. При высокой частоте импульсов дуга становится более устойчивой и поведение при сварке аналогично, как и с дугой при непрерывном ультразвуковом воздействии (рисунок 1.28).

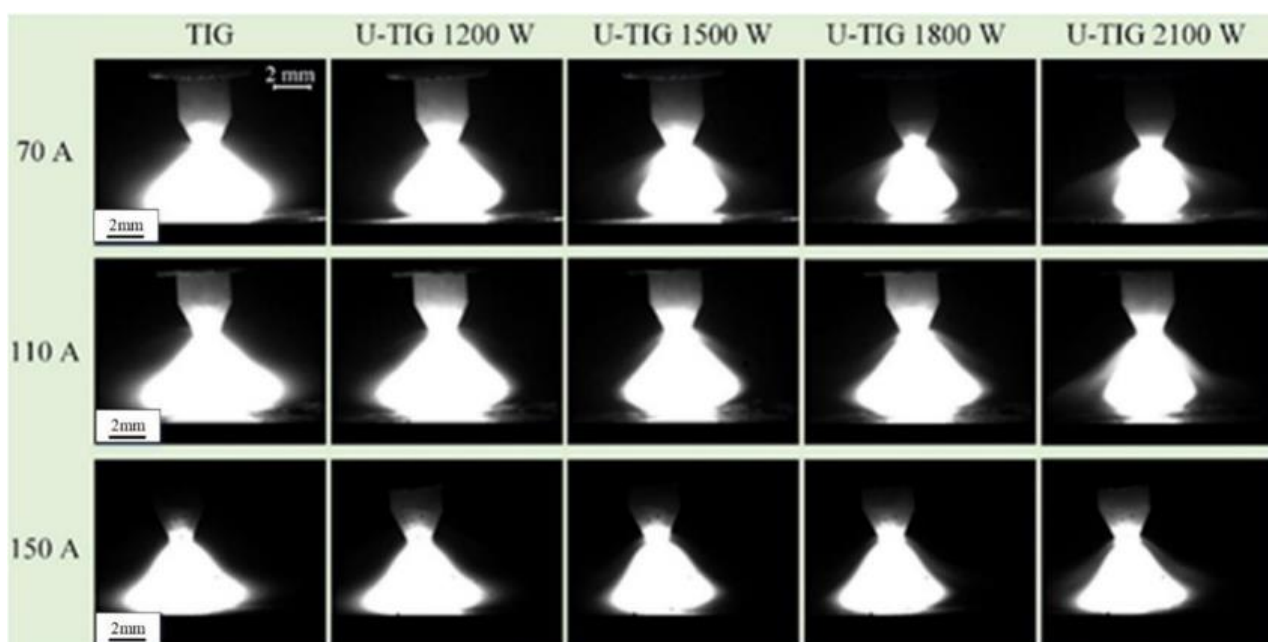


Рисунок 1.28 – Влияние мощности ультразвука на форму дуги при различных значениях силы тока [71]

При частоте 500 Гц коэффициент сжатия дуги с импульсным ультразвуковым воздействием достигает 38%, а с непрерывным воздействием УЗК при тех же параметрах составляет 30% по сравнению с дугой без УЗК, то есть с импульсным воздействием можно достичь эффекта, аналогичного, как и при сварке с непрерывным воздействием ультразвука высокой мощности, тем самым повысить эффективность использования ультразвуковой энергии.

В работе [72] исследовали формирование и микроструктуру титанового сплава. Результаты показали, что глубина проплавления и ширина сварного шва с воздействием ультразвука увеличились на 46% и 27%, соответственно, а также уменьшился размер зерен по сравнению с обычной сваркой. Среднее значение твердости в металле шва увеличилось на 10% с воздействием УЗК (рисунок 1.29).

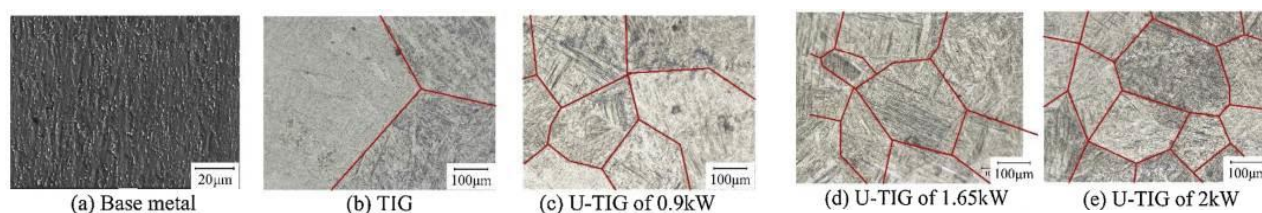


Рисунок 1.29 - Влияние мощности ультразвука на размер зерна:

а) основной металл; б) без УЗК; в) 900 Вт; д) 1650 Вт; е) 2000 Вт [72]

Основным недостатком способа является относительно малые критические значения силы тока, так как сварка проводилась на постоянном токе обратной полярности, что существенно снижает стойкость электрода.

Chao Chen, Chenglei Fan и др. [73] исследовали микроструктуру сплава Ti–6Al–4V при сварке неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний на дугу. Частота УЗ колебаний составляла 20 кГц, мощность УЗК - 1500 Вт, амплитуда 7,5 мкм.

С применением УЗК размер зерен в зоне шва уменьшился, максимальный размер зерна составил 70-80 мкм, что более чем в три раза меньше, чем при сварке без УЗК. Ультразвуковая кавитация была основной причиной значительного измельчения зерна сварного шва.

Применялись различные варианты воздействия ультразвука: на сварочную ванну, присадочную проволоку и дугу. Эксперименты показали, что при любых условиях с ультразвуком значительно улучшилось качество швов [74-77]. Измельчение микроструктуры металла шва и зоны термического влияния от столбчатого к равноосному росту были обнаружены в алюминиевых сплавах, когда ультразвук вводился в сварочную ванну, как сообщают Дай, Чен и др. [77, 78]. Ватанабе и др. в работе [79] исследовали дуговую сварку в защитных газах нержавеющей стали, когда ультразвук вводился в сварочную ванну через присадочную проволоку. При меньшей скорости сварки происходит более эффективное измельчение микроструктуры сварного соединения.

В работе [80] был предложен метод сварки неплавящимся электродом для улучшения свойств сварных соединений путем совместного воздействия ультразвука и магнитного поля на дугу (U-M-GTAW). С целью совершенствования процесса сварки неплавящимся электродом предложили воздействие акустического и магнитного полей на дугу [81]. Как известно, наиболее эффективным способом повышения качества является применение ультразвука [82-85]. Микроструктура и механические свойства швов коррозионностойкой стали AISI 304 при сварке с воздействием ультразвука и магнитного поля по

отдельности были сопоставлены и проанализированы для выяснения механизма изменения микроструктуры. Результаты показали, что мощность дуги U-GTAW была увеличена, а размер зерна в металле шва уменьшился на 25,7% по сравнению с обычной сваркой. Размер зоны термического влияния (ЗТВ) полученных соединений при M-GTAW значительно уменьшился, столбчатые дендриты существенно измельчились, а сварные соединения показали наименьшую прочность по сравнению со сваркой с воздействием ультразвука. Результаты исследований подтвердили эффективность совместного действия ультразвука и магнитного поля на дугу: размер зерна уменьшился ~12% и значительно улучшились механические свойства швов.

Авторами [86] был разработан процесс сварки с воздействием ультразвука на заготовку с целью улучшения микроструктуры и механических характеристик швов магниевого сплава AZ80. Результаты показывают, что ультразвук оказывает влияние на размер как выделенных фаз  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , так и зерен  $\alpha\text{-Mg}$ . При ультразвуковой обработке первичные зерна  $\alpha\text{-Mg}$  превращаются из крупных дендритов в мелкие равноосные зерна, а фазы  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  на границах  $\alpha\text{-Mg}$  измельчаются и становятся прерывистыми из-за эффектов кавитации и акустического течения, вызванных ультразвуковой вибрацией. Без УЗК образуются поры, в то время как с применением ультразвука мощностью 300 Вт количество пор уменьшается и при мощности 900 Вт поры отсутствуют.

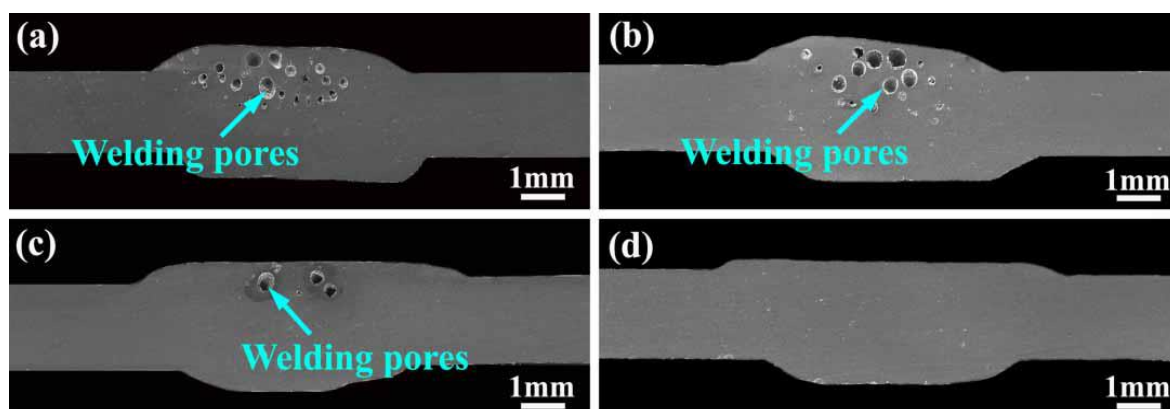


Рисунок 1.30 – Макрошлифы сварных соединений, выполненных при различной мощности УЗК: (a-d) 0; 300; 600; 900 Вт [86]

На рисунке 1.30 показано, что количество пор с повышением мощности ультразвука постепенно уменьшается. Это связано с тем, что эффекты акустического поля и эффект кавитации вызываются ультразвуковой вибрацией [87, 88], что приводит к высокоскоростному потоку в сварочной ванне и может сдерживать образование сварочных пор.

Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что прочность швов при сварке без ультразвука составила 160 МПа, а с УЗК при мощности 900 Вт повысилась до 261 МПа.

Авторы [89] исследовали влияние ультразвука на заготовку при сварке разнородных магниевых сплавов AZ31 и MB3. Амплитуда ультразвуковых колебаний составляла 20 мкм при частоте 20 кГц. При этом направление вибрации было перпендикулярно основному металлу. Было обнаружено, что при увеличении силы тока в шве появляется большое количество пор. Это явление авторы связывают с резким повышением температуры сварочной ванны и взаимодействием магния с окружающей средой.

Показано, что при мощности ультразвука 1,0 кВт количество пор существенно снижается, что свидетельствует о том, что при сварке с УЗК улучшаются прочностные характеристики швов магниевых сплавов. Улучшение макроструктур поперечного сечения объясняется эффектом кавитации. Кроме того, при увеличении мощности ультразвука до 1,0 кВт крупные зерна измельчались примерно на ~26 мкм. Однако при дальнейшем увеличении мощности ультразвуковых колебаний до 1,5 кВт механические свойства соединений снижались, несмотря на эффективное измельчение зерна, что объясняется крайне нестабильным процессом затвердевания соединений.

В статье [90] авторы из Цзилиньского университета исследовали влияние ультразвука и магнитного поля на микроструктуру и механические свойства сварных соединений коррозионностойкой стали 304. Воздействие ультразвука и магнитного поля производилось на дугу постоянного тока прямой полярности, мощность составляла 900 Вт при частоте УЗК 20 кГц.

При воздействии только магнитного поля увеличивается ширина шва. Поскольку предел прочности стали 304 превышает предел прочности сварного шва, все образцы при растяжении разрушаются по шву. Предел прочности и относительное удлинение при различных способах (рисунок 1.31).

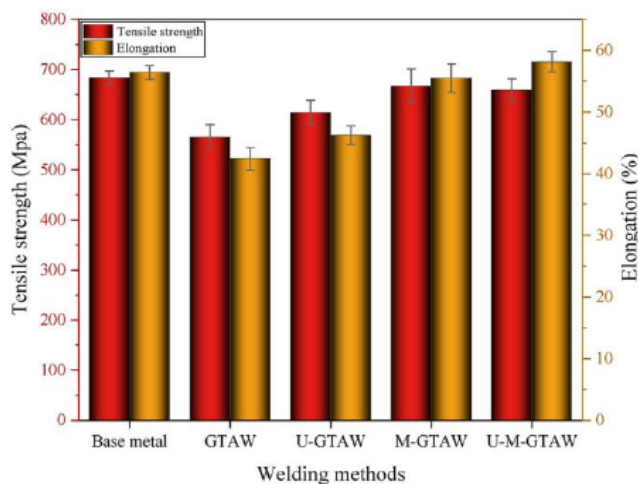


Рисунок 1.31 – Механические свойства стали 304 сварных соединений, выполненных при различных способах сварки [90]

При совместном воздействии ультразвука и магнитного поля происходило измельчение зерен, устранение некоторых дефектов микроструктуры, повышение прочности и пластичности. Предел прочности соединения U-M-GTAW достигал 96,4%, а относительное удлинение - 103,1% от показателя основного материала.

Эффект ультразвука в UM-GTAW проявляется в том, что он создает вертикальную нисходящую силу акустического излучения, ускоряющую столкновение частиц в дуге, создавая высокочастотную вибрацию, в то время как дуга сжимается, температура и давление дуги возрастают, что приводит к увеличению глубины проплавления. Ультразвук оказывает определенное перемешивающее воздействие на ванну расплава, измельчает зерно и увеличивает ширину равноосной кристаллической зоны в области шва.

Внешнее осевое магнитное поле может вызывать периодическое вращение дуги, что делает поверхность шва более однородной и препятствует образованию дефектов.

Wenlong L., Jin L. и др. [91] исследовали характеристики дуги и формирование швов с воздействием ультразвука и магнитного поля при сварке неплавящимся электродом. Показано, что при сварке GTAW получена наименьшая площадь проплавления сварного шва по сравнению с другими способами сварки. Энергия сварки при воздействии ультразвука увеличивается, что сказывается на геометрических характеристиках сварных соединений. По сравнению с обычной сваркой TIG ширина шва и проплавление при воздействии магнитного поля увеличиваются, при этом поверхность сварного шва более однородная, что вызвано периодическим вращением дуги. Ширина сварного шва при U-M-GTAW намного больше, чем при GTAW, а поверхность сварного шва более однородна. Небольшое уменьшение проплавления по сравнению с M-GTAW и увеличение ширины в нижней части шва может быть связано со сжатием дуги, в то время как её вращение вызывает меньшее нагревание в центре сварного шва и увеличение температуры по краям. Глубина проплавления шва при U-GTAW наибольшая и составляет 1,905 мм, что больше на 58,6% по сравнению с GTAW, а ширина сварного шва составляет 4,96 мм, что выше на 97,1%. Глубина проплавления при M-GTAW составляет 1,33 мм, а ширина шва - 3,63 мм, что больше на 11,5% и 44,5%, соответственно, по сравнению с GTAW. Для сварки U-M-GTAW глубина проплавления составляет 1,15 мм, что незначительно отличается от проплавлений, выполненных традиционной GTAW. Однако ширина шва составляет 5,63 мм, что больше на 120%.

Целью исследования [92] было установление взаимосвязи расстояния между сварочной горелкой и излучателем. Амплитуда ультразвуковых колебаний, возникающих в пластине, является макроскопическим проявлением колебаний её атомов. При распространении ультразвуковой волны через пластину из сплава Inconel 690 атомы среды совершают колебательное движение вокруг положений равновесия в ответ на акустическое возмущение. В качестве индикатора эффективности воздействия ультразвука было исследовано распределение акустического давления на различных участках пластины.

Различные значения амплитуды ультразвуковых колебаний оказывают разное влияние на сварочную ванну, поэтому положение со стабильной амплитудой может способствовать эффективному воздействию на сварочную ванну и улучшать микроструктуру сварных соединений.

Авторы [93] исследовали влияние ультразвука на микроструктуру сплава Inconel 690 при воздействии ультразвука на заготовку. Результаты показали, что воздействие ультразвуковых колебаний приводит к значительному изменению формы шва: глубина и ширина шва увеличиваются с 1,57 до 2,1 мм и с 10,2 до 11,0 мм, соответственно. Значительные изменения происходят в структуре сварного соединения. Процент зерен размером от 100 до 200 мкм в сварных соединениях без ультразвука составляет ~78%, а средний диаметр зерен - 145,6 мкм. В сварном соединении, полученном с ультразвуком, диаметр зерен составляет от 30 до 110 мкм (~ 69%), а средний размер зерна 60,4 мкм.

Механические испытания, проведенные на сварных соединениях при GTA и UA-GTA показали, что средние значения предела текучести составляют 320 МПа, предела прочности 591 МПа и относительного удлинения 25,1%. При сварке UA-GTA наблюдалось значительное повышение механических характеристик: на ~ 20,9 %, 13,7% и 25,8% в пределе текучести, пределе прочности на растяжение и относительном удлинении, соответственно, по сравнению с GTA. В месте разрушения образца видно комбинацию мелких и крупных углублений. Однако разрыв при UA-GTAW показывает немного более крупные углубления, чем при GTA. Более глубокие изломы при UA-GTAW указывают на длительные стадии пластической деформации, что способствует повышению пластичности.

Таким образом, при воздействии ультразвука обеспечивается повышение прочности и пластичности, что объясняется изменениями в микроструктуре шва.

В работе [94] исследовали влияние ультразвука на микроструктуру магниевого сплава MB3. Воздействие осуществлялось на заготовку с частотой 20 кГц и с различной мощностью 0...1,5 кВт. При сварке TIG наблюдалось укрупнение зерна в сварном соединении. Средний размер зерен зоны сварки

увеличился на ~64 мкм, что значительно снизило предел прочности сварного соединения. Эффективное измельчение зерна было достигнуто с воздействием ультразвука. Средний размер зерна уменьшился на 40,6 % (до 38 мкм), что положительно сказалось на механических характеристиках шва. Стоит отметить, что чрезмерная мощность ультразвука (более 1,2 кВт) незначительно влияет на дальнейшее измельчение микроструктуры, но приводит к появлению дефектов. Улучшение микроструктуры сварного шва в основном было связано с эффектами кавитации и акустического потока. Кавитационный пузырь быстро увеличивался в размерах и взрывался. Высокие давления, создаваемые взрывом кавитационных пузырьков, могли разбить исходные дендриты на части. При увеличении мощности ультразвука до 1,2 кВт максимальная прочность сварных соединений равнялась 239 МПа, что составляет 93% от прочности основного металла. Однако при дальнейшем увеличении мощности ультразвука до 1,5 кВт прочность на разрыв незначительно снизилась с 239 МПа до 234 МПа из-за нестабильного процесса затвердевания. Чрезмерная мощность ультразвука может привести к образованию пор и трещин в сварном шве.

Повышение давления, создаваемого ультразвуковыми колебаниями, увеличивает как мгновенную скорость, так и теплопроводность частиц в плазме [95]. Более того, высокочастотный импульсный ток еще больше увеличивает силу Лоренца и радиальную электромагнитную силу в дуге, что в некоторой степени усиливает явление сжатия дуги [96]. Эффект сжатия дугового разряда способствует повышению давления в дуге и, соответственно, увеличению проплавления [97,98]. В то же время, стабильность двойной дуги также повышается [99]. Кроме того, увеличение частоты ультразвуковых импульсов способствует улучшению катодной очистки [100]. Согласно современной научно-технической литературе, частота ультразвука и амплитуда импульсного тока являются основными факторами, влияющими на характеристики дуги. Хотя существуют различия в структуре схемы, форме сигнала, характеристик и диапазонах регулируемых параметров, можно сделать вывод о том, что оптимальный диапазон

ультразвуковых частот составляет более 20 кГц. Однако процесс сварки с УЗК недостаточно изучен, получены противоречивые данные по влиянию параметров высокочастотного тока на характеристики дуги.

Увеличение силового воздействия и плотности энергии дуги, вызванные сжатием дуги с ультразвуком, приводят к значительному понижению поверхности ванны расплава, что приводит к направленному вниз источнику тепла и внешней силе, а также к изменению распределения градиента температуры на поверхности и внутри сварочной ванны [98, 101]. Электромагнитное перемешивающее усилие дополнительно увеличивает скорость потока жидкости и увеличивает тепло в расплавленной ванне, обеспечивая улучшение микроструктуры шва [102, 103].

Совместное воздействие ультразвуковых колебаний и электромагнитного поля снижает вязкость, а газовые поры приобретают высокую скорость выхода и удаляются из сварочной ванны [104-106]. Аналогичным образом в литературе показано, что с увеличением частоты ультразвука ширина сварного шва уменьшается в определенном диапазоне. Амплитуда тока ультразвукового импульса и отношение пикового тока к базовому обычно отражают общую эффективность ультразвуковой энергии. Однако влияние ультразвукового импульсного тока на поведение расплавленной ванны и геометрию сварного шва все еще остается спорным и находится в стадии изучения.

Таким образом, применение сфокусированных ультразвуковых колебаний на дугу при сварке неплавящимся электродом является перспективным направлением исследований.

#### **1.4 Цель и задачи исследований**

Из проведенного обзора литературы следует, что целью работы является повышение производительности и качества сварки неплавящимся электродом на переменном токе с прямоугольной формой импульсов алюминия и сплава АМц на основе исследования взаимосвязей параметров ультразвуковых колебаний,

электрофизических, энергетических характеристик дуги и ее термосилового воздействия на свариваемый материал.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние ультразвукового поля на изменение формы столба дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ) с неплавящимся электродом.

2. Исследовать влияние мощности и положения сфокусированных ультразвуковых колебаний на электрофизические и энергетические характеристики дугового разряда переменного тока с ПФИ.

3. Выявить зависимости термосилового воздействия сварочной дуги на сварочную ванну от интенсивности высокочастотных акустических волн.

4. Определить влияние ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги переменного тока с ПФИ (величина катодной очистки, проплавливающая способность, структура и свойства сварных соединений).

5. Разработать пути и средства повышения производительности и качества формирования сварных швов при сварке неплавящимся электродом алюминия и сплава АМц на переменном токе с прямоугольной формой импульсов с воздействием ультразвуковых колебаний.

## 2 Материалы, оборудование и методики выполнения экспериментов

### 2.1 Материалы и оборудование, применяемые в исследованиях

В ходе исследований применяли вольфрамовые электроды с добавлением оксида лантана марки WL-20 по ISO 6848-2004. Рабочий участок электрода затачивали на полусферу.

Степень контрагирования сварочной дуги обеспечивали применением высокочастотных фокусированных колебаний с помощью разработанного устройства для сварки неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний (патент РФ на полезную модель №188681), обеспечивающего повышение проплавляющей способности дуги, а также стабилизацию процесса сварки. Данный эффект достигается правильным подбором параметров ультразвуковых колебаний и управлением степенью сжатия дугового разряда.

Устройство для сварки неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний содержит корпус 1 сварочной горелки (рисунок 2.1), пьезопреобразователь 2, состоящий из пьезоэлемента 3 и излучающей линзы 4, неплавящийся электрод 5 и защитное сопло 6. Пьезопреобразователь 2 размещен внутри защитного сопла 6 и жестко крепится к корпусу 1 сварочной горелки при помощи резьбового соединения, имеющегося на плосковогнутой фокусирующей линзе 4, на которой жестко закреплен в верхней ее части пьезоэлемент 3, причем линза имеет радиус кривизны  $\hat{R}$  20 мм и фокусное расстояние F 20 мм. Неплавящийся электрод 5 помещен внутрь корпуса 1 сварочной горелки, где при помощи цангового крепления неподвижно закреплен. Защитное сопло 6 плотно крепится на корпусе сварочной горелки при помощи резинового уплотнительного кольца для обеспечения герметичности устройства.

Предложенное устройство для сварки неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний работает следующим образом. Для осуществления процесса сварки с помощью источника питания ИП

возбуждается дуга с установленной длиной дуги  $l_d$ . Через некоторый промежуток времени (5-10 с) включается ультразвуковой генератор УГ и на пьезоэлемент 3 с внешним  $D_{п}$  20 мм и внутренним  $d_{п}$  10 мм диаметром, жестко прикрепленный к плосковогнутой фокусирующей линзе 4, высотой  $h_{л}$  20 мм и диаметром  $D_{л}$  25 мм подается напряжение высокой частоты ( $F_{УЗК} = 20$  кГц), вызывая механические колебания пьезоэлемента 3 за счет действия электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект), при этом плосковогнутая фокусирующая линза 4 начинает деформироваться с той же частотой, преобразуя механические колебания в акустические. Радиус кривизны  $\hat{R}$  линзы, равный 20 мм, и фокусное расстояние  $F$ , равное 20 мм, позволяют сфокусировать ультразвуковые колебания непосредственно в области сварочной дуги. Жесткое крепление пьезопреобразователя к корпусу сварочной горелки позволяет не допустить перегрева пьезоэлемента, что обеспечивает стабильный процесс сварки, а также продолжительную работу устройства (рисунок 2.1).

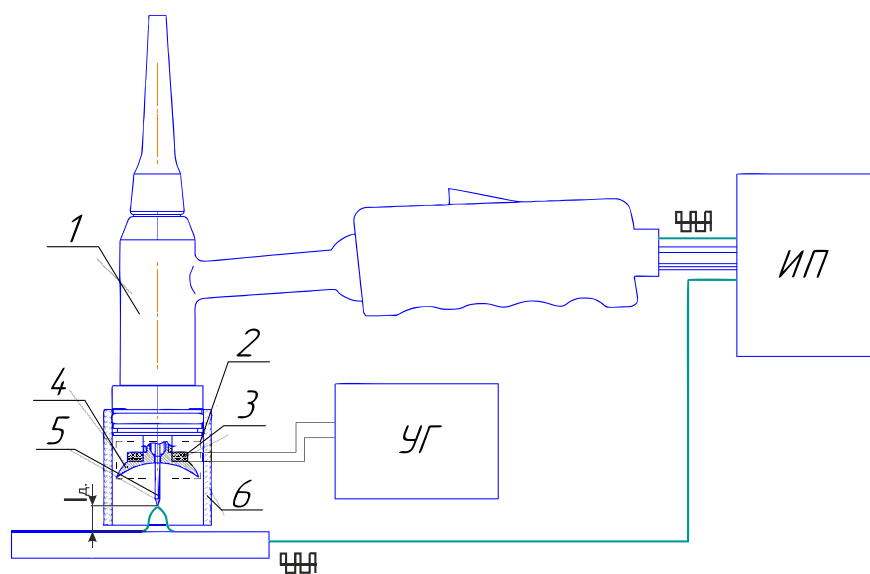


Рисунок 2.1 – Устройство для сварки неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний: 1 – сварочная горелка; 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – пьезокерамический элемент; 4 – плосковогнутая фокусирующая линза; 5 – неплавящийся электрод; 6 – защитное сопло;  $l_d$  – длина дуги

Для исследования электрофизических, энергетических свойств дугового разряда, а также проплавляющей способности дуги использовали источник питания для сварки неплавящимся электродом инверторного типа PROFARC ATIG 500PAC. Наличие микропроцессорного управления данной сварочной установки обеспечивает регулирование параметров процесса сварки в широких пределах (рисунок 2.2). Технические характеристики источника питания представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики PROFARC ATIG500PAC

Параметры сети питания	380 В, 3 фазы, 50 Гц
Номинальная потребляемая мощность	18,2 кВА
Номинальный входной ток	29.7 А
Постоянный ток	20-500 А
Ном. продолжительность включения (%)	60%
Напряжение холостого хода	76 В
КПД	77%
Коэффициент мощности	0,95
Класс изоляции главного трансформатора	Н
Класс изоляции выходного дросселя	В
Вес	70 кг

Защитной средой при сварке являлся аргон чистый газообразный высшего сорта (ТУ 2114-006-5761815).

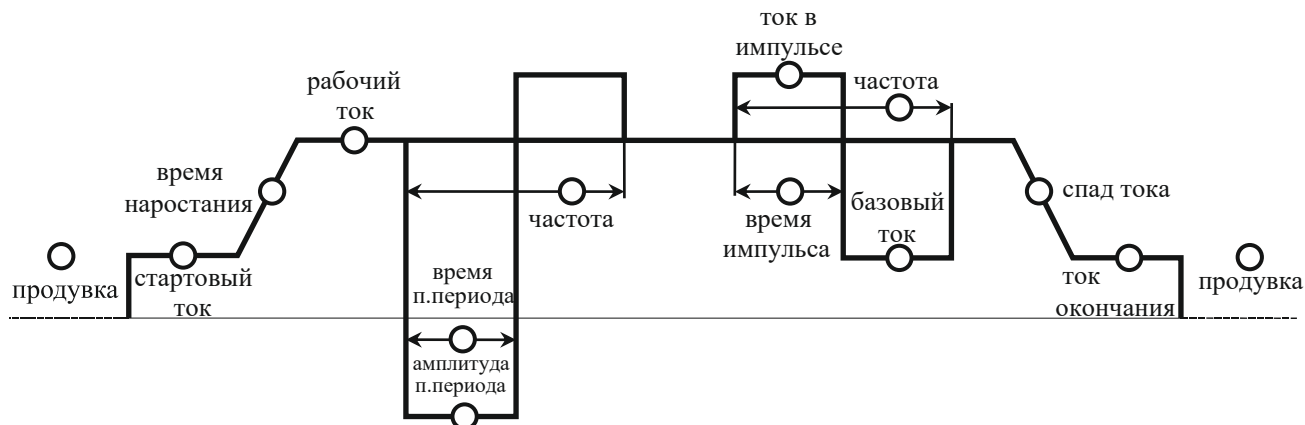


Рисунок 2.2 – Циклограмма работы установки PROFARC ATIG500PAC

## 2.2 Методика определения электрофизических и энергетических характеристик дуги

Статические вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ) определяли по известной методике [36], суть которой заключается в измерении напряжения дуги в импульсах прямой  $U_{\partial np}$  и обратной  $U_{\partial obr}$  полярности при различных значениях тока с последующим расчетом действующего значения напряжения  $U_{\partial}$  и графическим построением зависимостей  $U_{\partial np} = f(I_{\partial})$ ,  $U_{\partial obr} = f(I_{\partial})$ ,  $U_{\partial} = f(I_{\partial})$ ,  $U_{\partial np} = f(\tau_{обр.})$ ,  $U_{\partial obr} = f(\tau_{обр.})$ ,  $U_{\partial} = f(\tau_{обр.})$  и т.д. При этом величины тока дуги в импульсах прямой  $I_{\partial np}$  и обратной полярности  $I_{\partial obr}$  принимали равными.

Величина напряжения дуги на протяжении импульса как прямой, так и обратной полярности не всегда остается неизменной: при сравнительно больших значениях тока наблюдается некоторый рост её. В последнем случае напряжения дуги в импульсах оценивали средним значением.

Эффективность теплового воздействия УЗК на свариваемый металл оценивали эффективным  $\eta_u$ , термическим  $\eta_t$  и полным  $\eta_{np}$  КПД [35].

Величину теплового потока, вводимого дугой в свариваемый металл, необходимую для расчета этих коэффициентов, определяли посредством калориметрирования. С этой целью выполняли проплавления массивной

алюминиевой пластины. Температуру воды до и после проплавлений измеряли с точностью до  $0,1^{\circ}\text{C}$ ; ток и напряжение дуги, длительность импульсов прямой и обратной полярности регистрировали с помощью осциллографа FNIRSI 1014D. Скорость перемещения проплавляемой пластины под неподвижно закрепленной горелкой составляла 20 м/ч, установочная длина межэлектродного промежутка – 3 мм.

Последующий расчет эффективного КПД производился по формуле:

$$\eta_u = \frac{c_w G_w (T_k - T_n) + c_{Al} G_{Al} (T_k^a - T_n^a) + A(T_k - T_n) + Q_n}{\tau_{гор} I_{\partial} \left( U_{пр} \frac{\tau_{пр}}{\tau_{пр} + \tau_{обр}} + U_{обр} \frac{\tau_{обр}}{\tau_{пр} + \tau_{обр}} \right)}, \quad (2.1)$$

где  $\eta_u$  – эффективный КПД сварки;

$c_w$  – удельная теплоемкость воды;

$G_w$  – вес воды в калориметре;

$c_{Al}$  – удельная теплоемкость алюминия;

$G_{Al}$  – масса алюминиевого образца;

$T_n$  – температура воды до опыта;

$T_k$  – температура воды после опыта;

$T_n^a$  – температура образца до опыта;

$T_k^a$  – температура образца после опыта;

$A$  – постоянная калориметра;

$Q_n$  – потери тепла в окружающую среду;

$\tau_{гор}$  – время горения;

$I_{\partial}$  – действующее значение тока;

$U_{\partial пр}$  – напряжение горения дуги на прямой полярности;

$U_{\partial обр}$  – напряжение горения дуги на обратной полярности;

$\tau_{пр}$  – время горения дуги на прямой полярности;

$\tau_{обр}$  – время горения дуги на обратной полярности.

Постоянная калориметра равна  $A=0$  Дж/град, потери в окружающую

среду рассчитывались для каждой серии экспериментов и находились в диапазоне  $Q_n = 25 \div 32$  Дж/с.

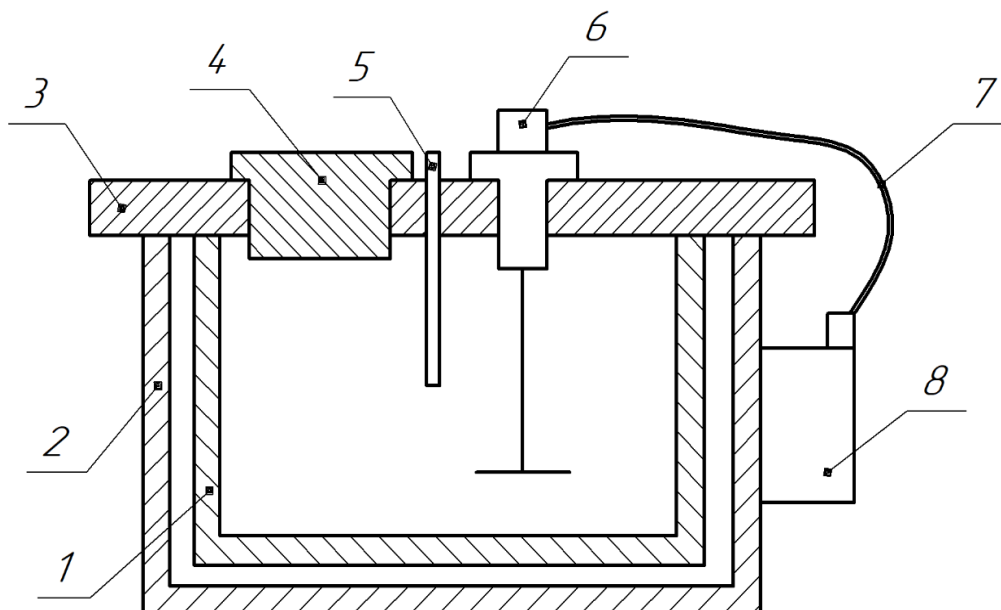


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема устройства калориметра:

- 1 – внутренняя стенка; 2 – наружная; 3 – верхняя часть; 4 – крышка;  
5 – термометр; 6 – электродвигатель смесителя; 7 – соединительный  
провод; 8 – блок управления

Расчет термического и полного КПД выполняли по известным формулам [109]:

$$\eta_T = \frac{F_{пр} V_{св} S_{пл}^\circ}{\eta_u q_{пол}} \quad (2.2)$$

$$S_{пл}^\circ = \lambda + c_{Al} \rho T_{пл} \quad (2.3)$$

где  $\eta_T$  – термический КПД процесса проплавления;

$F_{пр}$  – площадь проплавления;

$V_{св}$  – скорость сварки;

$S_{пл}^\circ$  – теплосодержание расплава алюминия;

$q_{пол}$  – полная мощность источника энергии;

$\lambda$  – скрытая теплота плавления;

$c_{Al}$  – удельная теплоемкость алюминия;

$\rho$  – плотность алюминия;

$T_{пл}$  – температура плавления алюминия;

Тогда полный КПД проплавления источника нагрева конкретного опыта (способа сварки) можно определить из выражения (2.4):

$$\eta_{пр} = \eta_u \eta_T \quad (2.4)$$

### **2.3 Методы исследования падения напряжений в приэлектродных областях**

При исследовании электрофизических свойств дугового разряда в большинстве случаев применяются методы, основанные на введении в дугу так называемого зонда – тонкой проволоки, преимущественно выполненной из вольфрама, и измерении его потенциала по отношению к любому из электродов разряда.

Считается, что данные методы, получившие широкое распространение в физике плазмы, не позволяют достичь высокой точности измерений при исследовании сварочной дуги, что обусловлено высокой концентрацией в ней свободных зарядов [65, 99]. При этом электроны, обладающие более высокой скоростью, быстрее проникнут через слой газа, разделяющий сравнительно холодный зонд и плазму, и сообщат ему отрицательный заряд. Величина этого заряда и, следовательно, потенциал зонда зависят от толщины слоя газа, концентрации зарядов и других факторов, которые не могут быть учтены при современных методах исследования. Повысить точность измерений зондовыми методами можно следующими способами:

- 1) применением зондов, размещенных в дуге неподвижно (стационарных) [43];
- 2) применением двойных и тройных зондов [100].

Большое количество методов зондирования дугового разряда основаны на использовании пересекающих дугу зондов – вращающихся либо движущихся поступательно [100-103], что обусловлено необходимостью ограничения времени пребывания зонда в плазме дуги для предотвращения его оплавления. Однако применение оптимального диаметра зондирующей проволоки и времени пребывания её в столбе дуги помогают сильно снизить ошибку, что делает этот метод применимым. В случае использования стационарного зонда [43] последний разогревается в плазме дуги до высоких температур, что способствует уменьшению отрицательного объемного заряда вблизи его поверхности и, следовательно, снижению ошибки измерения. Недостатком метода является возможность его применения только для исследования малоамперных дуг.

При использовании двух или более вращающихся зондов, одновременно проходящих через дугу, напряжение измеряется непосредственно между ними. В этом случае отрицательные потенциалы зондов, обусловленные диффузией электронов из плазмы, вычитаются, и ошибка измерения уменьшается, однако обработка данных при этом сильно усложнена [99].

В настоящих исследованиях использовали метод поперечного зондирования дуги одним зондом. Для этого была специально создана лабораторная установка, схема которой представлена на рисунке 2.4. Пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) 1 с закрепленным в нем неплавящимся электродом 5 жестко соединялся с держателем. Электрически изолированный зонд 6 из вольфрамовой проволоки диаметром 0,25 мм, закрепленный на штативе, устанавливали таким образом, чтобы расстояние между ним и электродом было 1,0 мм, длина дугового промежутка составляла 4 мм. После возбуждения сварочной дуги подпружиненный зонд проходил через дуговой разряд, при этом значение падения потенциала фиксировалось с помощью электронного регистратора для сбора данных ЛА-50 USB.

Сканирование дуги проводилось на расстоянии 3-4 мм от электрода с воздействием ультразвуковых колебаний (УЗК) и без них.

Для определения значения напряжения в анодной области к рабочему участку неплавящегося электрода вплотную подвели зонд, возбуждали дугу и с помощью осциллографа фиксировали максимальное значение  $U_a$ . При этом для каждого параметра выполняли не менее пяти измерений, после чего рассчитывали среднее арифметическое значение.

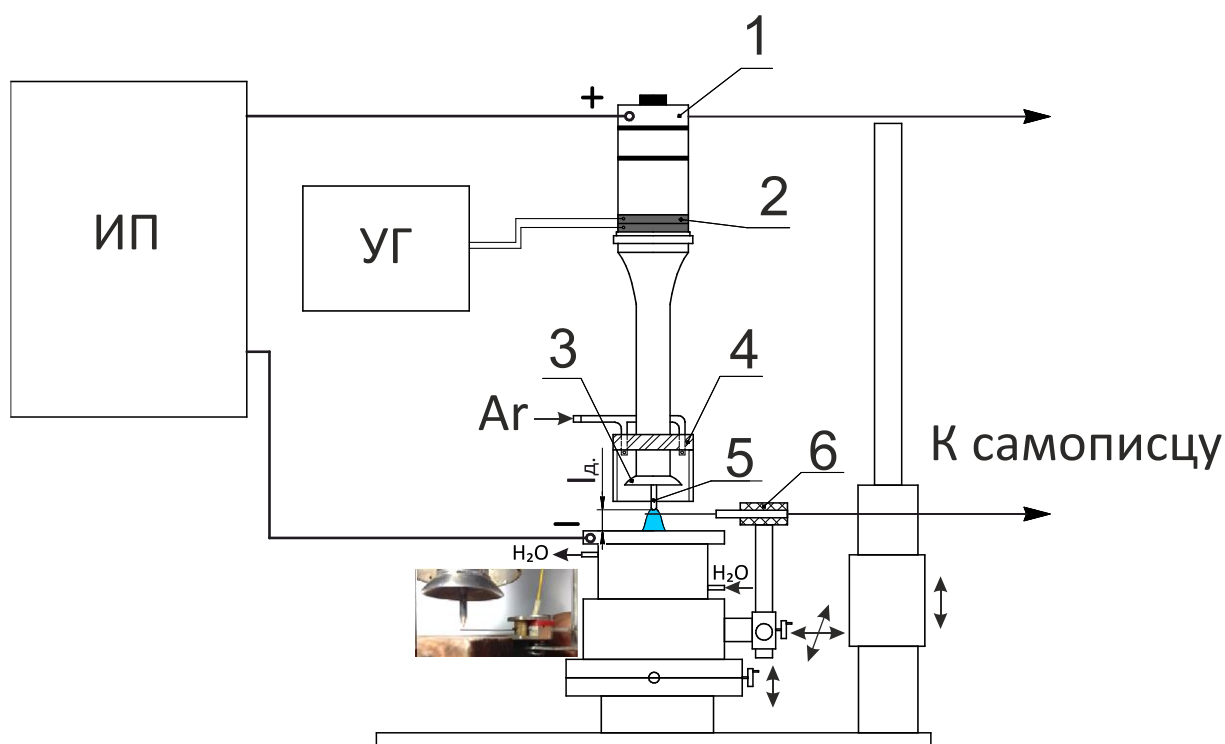


Рисунок 2.4 – Схема зондирования сварочной дуги: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – пьезоэлемент; 3 – фокусирующая линза; 4 - защитное сопло; 5 – неплавящийся электрод; 6 - сканирующий зонд; ИП – источник питания; УГ – ультразвуковой генератор

#### 2.4 Оценка проплавляющей способности дуги переменного тока с неплавящимся электродом

Проплавляющая способность дуги переменного тока с ПФИ оценивалась посредством проплавления пластин из алюминия и сплава АМц размерами 300×200 мм (присадочный материал не применялся). При этом

горелка оставалась неподвижной, а пластина перемещалась с помощью тележки с электроприводом. Установочную длину дуги изменяли в пределах 1÷5 мм (в большинстве опытов – 3 мм), ток дуги – 100÷300 А, скорость сварки – 12÷40 м/ч. Расход аргона составлял 10÷25 л/мин (в зависимости от величины тока дуги). Частота переменного тока в большинстве опытов составляла 50 Гц, длительности импульсов тока прямой  $\tau_{пр}$  и обратной  $\tau_{обр}$  полярностей изменяли в пределах: 0.5÷0.9 ( $\tau_{обр}/T$ ), 0.5÷0.9 ( $\tau_{пр}/T$ ). В необходимых случаях, оговариваемых в тексте, частоту тока изменяли в диапазоне от 20 до 100 Гц.

Толщину пластин  $\delta$  выбирали такой, чтобы глубина ожидаемого проплавления не превышала  $0,7\delta$  для исключения ее скачкообразного увеличения и вытекания сварочной ванны. Для уменьшения влияния краевого эффекта проплавления выполняли на расстоянии не менее 100 мм от продольного края пластин.

Перед проплавлением пластины подвергали общепринятой обработке, которая заключалась в обезжиривании техническим ацетоном с последующим химическим травлением, включающим следующие этапы:

- травление в растворе едкого натра (45÷55 г/л) и фтористого натра (45÷55 г/л) при температуре 60÷70°C в течение 1÷2 минут;
- промывка в горячей (не ниже 50°C) проточной воде, а затем в холодной проточной воде;
- осветление в растворе азотной кислоты (350÷425 г/л) в течение 1÷3 минут при комнатной температуре;
- промывка в горячей проточной воде с последующей естественной сушкой.

После выполнения проплавлений пластины разрезались поперек на расстоянии  $2/3$  длины от начала шва и изготавливались макро- и микрошлифы. Их травление осуществляли в реактиве ВАМИ, предназначенного для выявления макроструктуры, а также в реактивах Келлера и едкого натра (20%)

для выявления микроструктуры сварных швов и зон термического влияния у алюминия и его сплавов.

Исследование изготовленных образцов проводили с использованием оптической (оптический микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT) и электронной (сканирующий электронный микроскоп Versa 3D DualBeam) микроскопии.

Качество катодной очистки определяли визуальным осмотром поверхности проплавлений и прилегающего к ним металла, а также в процессе сварки посредством наблюдения за сварочной ванной при 2-х кратном увеличении. В последнем случае катодную очистку считали качественной, если на поверхности сварочной ванны не обнаруживалось участков окисных пленок.

## 2.5 Определение силового воздействия дугового разряда

Силовое воздействие дугового разряда на свариваемый металл в значительной степени определяет процессы, протекающие в сварочной ванне и проплавляющую способность дуги. Большинство причин, вызывающих ухудшение качества формирования швов (наличие несплавлений, «перетяжек», подрезов и пор, других дефектов), связаны с величиной критического значения  $I_{св.}$ , определяющего интенсивность вытеснения расплавленного металла на оси сварочной ванны. Хотя  $F_{\partial}$  является, в основном, функцией тока, на его величину, несомненно, оказывают влияние параметры заточки рабочего участка электрода, состав защитного газа, а также условия формирования процессов, протекающих при горении дуги [74, 77].

Интегральное силовое воздействие дуги на свариваемый металл, роль которого выполняла пластина из алюминиевого сплава, определяли весовым методом [110], схема которого представлена на рисунке 2.5.

Для определения силового воздействия дуги на сварочную ванну применялась методика взвешивания дугового разряда. Определение силового воздействия дуги состоит из двух этапов: измерение давления ультразвуковых

колебаний и измерение давления дугового разряда, а также их совместного действия.

Определение силового воздействия УЗК заключается в следующем: над чашей аналитических весов ВСЛ-60 с точностью измерения 0,0001 г закрепляли сварочную горелку так, чтобы расстояние от торца неплавящегося электрода до поверхности чаши составляло 3 мм, что соответствует длине дуги. Вылет электрода устанавливали таким, чтобы сфокусированная область ультразвуковых волн точно попадала в промежуток между торцом электрода 5 и поверхностью заготовки 6 (столб дуги). Ультразвуковой генератор настраивали на частоту 22,8 кГц.

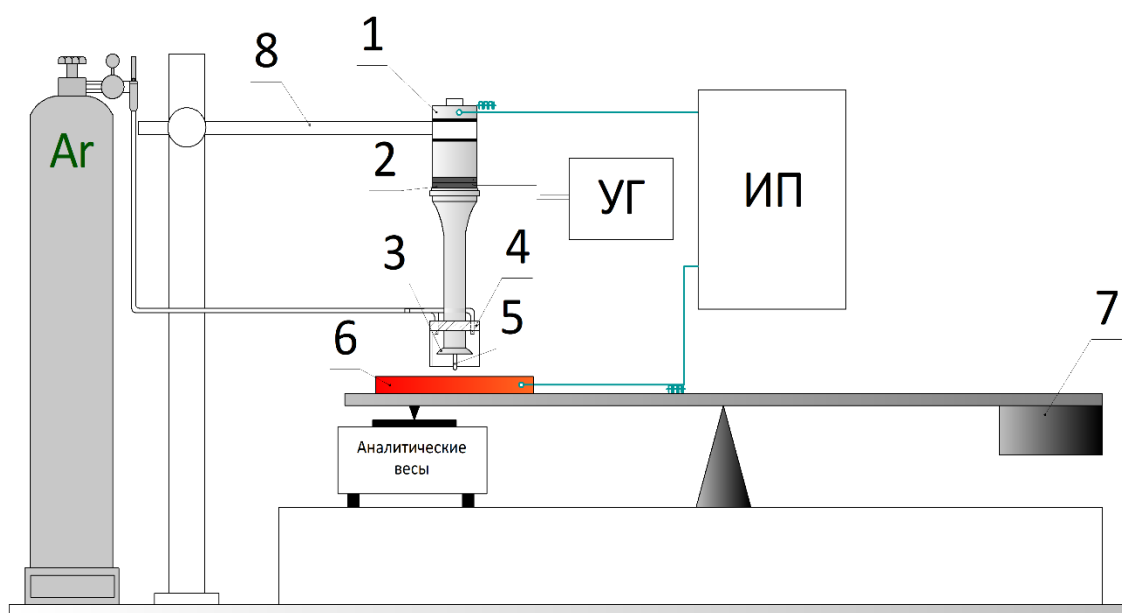


Рисунок 2.5 – Экспериментальная установка для определения силового воздействия сварочной дуги: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – пьезокерамика; 3 – фокусирующая линза; 4 – защитное сопло; 5 – неплавящийся электрод; 6 – пластина; 7 – противовес; 8 – кронштейн; УГ – ультразвуковой генератор; ИП – источник питания

Установка для определения величины давления сварочной дуги (рисунок 2.5) представляла собой рычаг - коромысло с опорой в середине.

Один его конец располагался на чаше аналитических весов ВСЛ-60, на другом конце устанавливали противовес 7 для уравнивания системы. На  $\frac{1}{4}$  длины коромысла жестко закрепляли алюминиевую пластину 6 размером 90x50x10 мм с токоподводом с высокой гибкостью для исключения ошибки измерений. Оценка влияния токоподвода проводилась отдельными измерениями.

Над пластиной располагалась ультразвуковой преобразователь. После возбуждения сварочной дуги, включались весы и через 5 секунд, для установления режима горения дуги, фиксировали данные давления. Затем, в дополнение, включали ультразвуковой генератор и уже фиксировали данные совместного действия ультразвуковых колебаний и сварочной дуги.

## **2.6 Методика визуализации формы дугового разряда**

Один из способов исследования влияния параметров ультразвуковых колебаний на технологические свойства дуги - изучение формы дугового разряда. Поведение электрической дуги при сварке с воздействием ультразвуковых колебаний обусловлено ее контрагированием, которое при определенных условиях может повышать технологические свойства дуги. Однако мощное излучение дугового разряда затрудняет фиксацию ее профиля при помощи фото- и скоростной видеосъемки.

Исследования проводили по методике, которая заключается в следующем: над пластиной располагали ультразвуковой преобразователь 1, длину дуги устанавливали в большинстве экспериментов - 3 мм, вылетом электрода 5 регулировали положение фокуса ультразвука в межэлектродном промежутке (рис. 2.6). Фиксацию изменения формы и размера дугового разряда при воздействии сфокусированных ультразвуковых колебаний проводили при помощи высокоскоростной камеры.

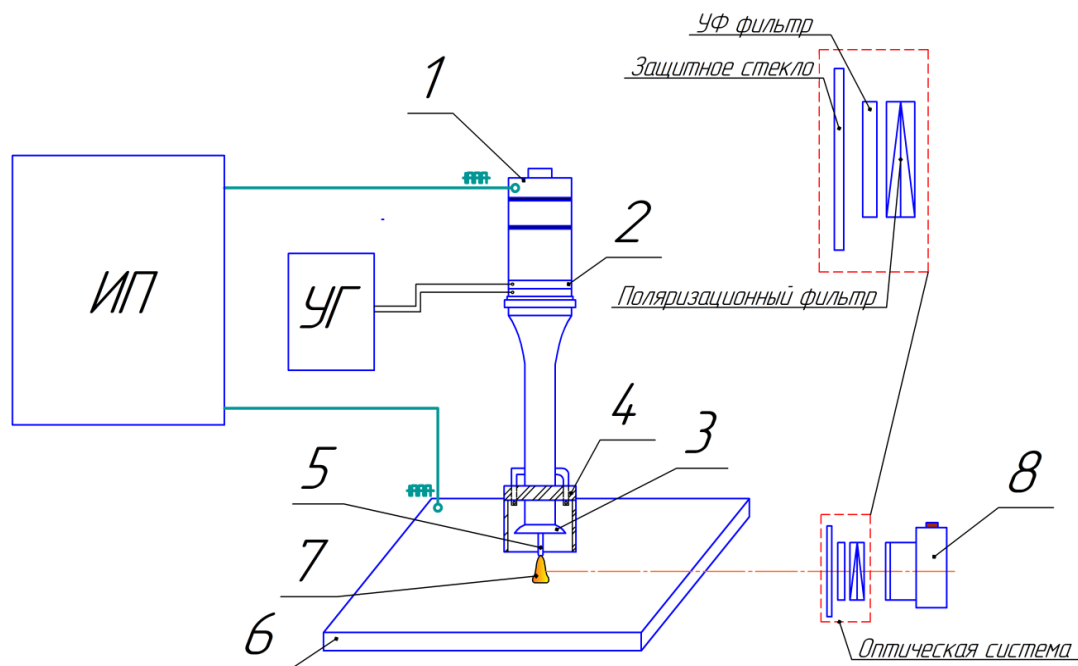


Рисунок 2.6 – Схема экспериментальной установки: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – пьезокерамика; 3 – фокусирующая линза; 4 – защитное сопло; 5 – неплавящийся электрод; 6 – пластина; 7 – дуга; 8 – высокоскоростная камера; УГ – ультразвуковой генератор; ИП – источник питания

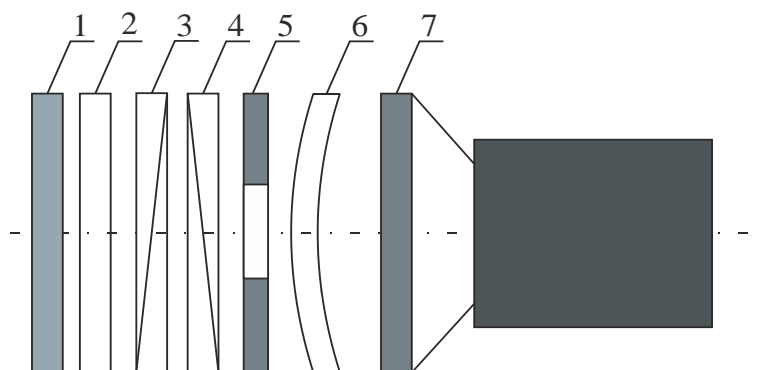


Рисунок 2.7 – Оптическая система для съемки ярких объектов:  
1 - серый фильтр; 2 - ультрафиолетовый фильтр; 3 – поляризатор;  
4 - анализатор; 5 - диафрагма; 6 - макролинза; 7 - цифровая видеокамера

Цифровую фото- и видеосъемку сварочной дуги выполняли на высокоскоростные камеры Nikon J1 с частотой 1/400 и 1/1400 кадров в секунду и Contrastech iSpeedy50MT13M-SE с частотой до 1/5000 кадров в секунду. В

качестве оптического фильтра использовалась система, представленная на рисунок 2.7.

Технические характеристики применяемой высокоскоростной камеры представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики высокоскоростной камеры Contrastech iSpeedy50MT13M-SE

	Параметр	Значение
Сенсор	Разрешение, пикс	1920 x 1080
	Тип затвора	Глобальный затвор
	Размер пикселя, мкм	14.6
	Скорость при макс. разрешении, к/с	5000
	Макс. скорость, к/с	50000
	Цветность	Монохромная
Стандарт EMVA	Динамический диапазон, дБ	60.0
	Чувствительность	ISO23000
Камера	Объем внутренней памяти, ГБ	40, 80, 160, 320
	Минимальное время экспозиции, нс	100
	Битность, бит	8/10/12
	Интерфейс	10 GigE, GigE
	Видеовыход	SDI, Ethernet
	Режим съемки по триггеру	Да
	Питание, В	24
Конструкция	Габаритные размеры (Д x Ш x В), мм	217x110x110
	Вес, кг	3.8

## 2.7 Методика определения интенсивности ультразвуковых колебаний

Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний выполняли с использованием лазерного доплеровского виброметра VibroFlex, лазерный луч направляли в несколько точек: 1) край фокусирующей линзы; 2) у

электрода; 3) центр фокусирующей линзы. Далее рассчитывалось среднее значение амплитуды ультразвуковых колебаний, схема измерения представлена на рисунке 2.10.

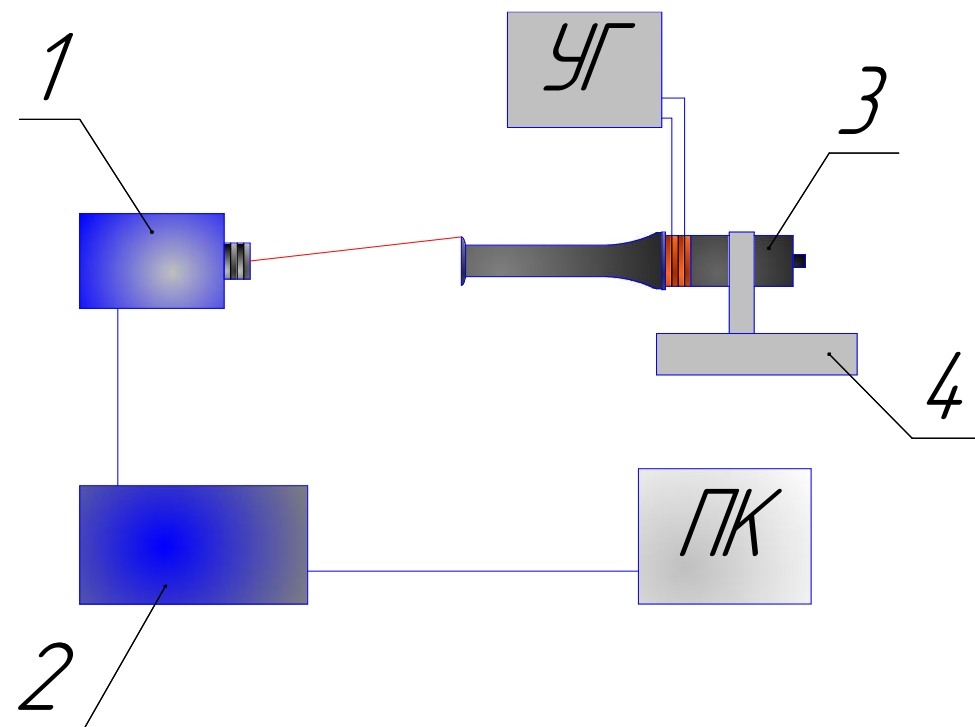


Рисунок 2.10 – Схема измерения амплитуды ультразвуковых колебаний: 1 – виброметр Vibroflex; 2 – коннектор; 3 – ультразвуковой преобразователь; 4 – штатив; УГ – ультразвуковой генератор; ПК – персональный компьютер

После определения значений амплитуды УЗ колебаний рассчитывали интенсивность ультразвука  $I_{узк.}$  по формуле:

$$I_{узк.} = \frac{\rho A^2 F^2 V}{2},$$

где  $\rho$  – плотность среды, г/см<sup>3</sup>;  $A$  – амплитуда УЗК, мкм;  $F$  – частота ультразвуковых колебаний, кГц;  $V$  – скорость звука (в аргоне), м/с.

## Выводы к главе 2

1. Степень контрагирования сварочной дуги обеспечивали применением высокочастотных фокусированных колебаний с помощью разработанного

устройства для сварки неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний (патент РФ на полезную модель №188681), обеспечивающего повышение проплавляющей способности дуги, а также стабилизацию процесса сварки. Данный эффект достигается правильным подбором параметров ультразвуковых колебаний и управлением степенью сжатия дугового разряда.

2. В работе применялись сертифицированные сварочные материалы, изготовленные по соответствующим ГОСТ и ТУ, использованы неплавящиеся электроды традиционных конструкций.

3. За основу приняты известные методики исследования электрофизических свойств, проплавляющей способности дуги, эффективности нагрева свариваемого металла, силового воздействия на сварочную ванну и др., адаптированные к условиям сварки неплавящимся электродом с воздействием на дуговой разряд ультразвуковых колебаний.

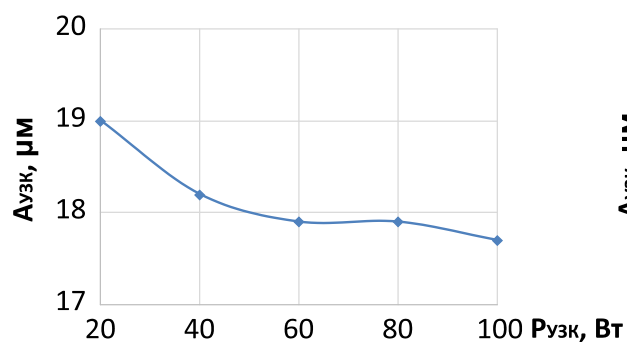
4. В исследованиях применялось оригинальное устройство для измерения напряжения в анодной области методом зондирования дугового разряда.

5. Исследование формы дугового разряда проводилось с помощью камер Nikon 1 J1 и Contrastech iSpeedy50MT13M-SE с частотой до 5000 кадров в секунду, что позволило получить высококачественные изображения. Для измерения амплитуды ультразвуковых колебаний применялся лазерный доплеровский виброметр VibroFlex.

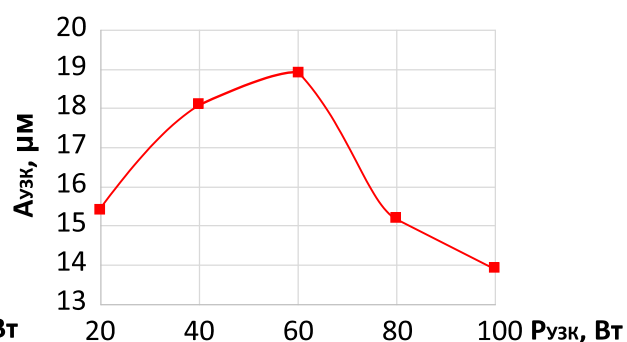
## Глава 3. Исследование влияния ультразвука на свойства дуги переменного тока

### 3.1 Влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на свойства дуги

Интенсивность ультразвука, излучаемого пьезоэлектрическим преобразователем, обычно невелика, поэтому, если в некотором ограниченном объеме требуется получить ультразвук более высоких интенсивностей, его фокусируют, используя излучатели с плосковогнутой излучающей поверхностью. Возможность фокусирования ультразвука в небольшой по размерам фокальной области создает условия для локального высокоэнергетического воздействия на определенные участки без каких-либо существенных влияний на окружающие элементы. Благодаря фокусированию ультразвука можно сформировать заданные характеристики направленности ультразвуковых колебаний и управлять ими. Как показывают результаты экспериментов, наибольшая амплитуда и интенсивность ультразвуковых колебаний при частоте 20,8 кГц наблюдается при мощности  $P_{УЗК} = 20$  Вт, а на частотах 22,8 и 25,2 кГц – при 60 Вт (рис. 3.1, рис. 3.2). По-видимому, для данных геометрических параметров фокусирующей линзы, применяемой в исследованиях, на этих режимах происходит выход УЗК на резонансный режим работы.



а)



б)

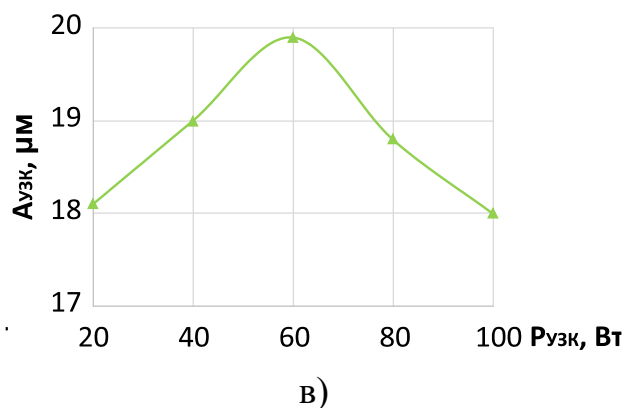


Рисунок 3.1 – Амплитуда ультразвуковых колебаний в зависимости от электрической мощности, потребляемой генератором:  
 а)  $F_{uzk}=20,8$  кГц; б)  $F_{uzk}=22,8$  кГц; в)  $F_{uzk}=25,2$  кГц

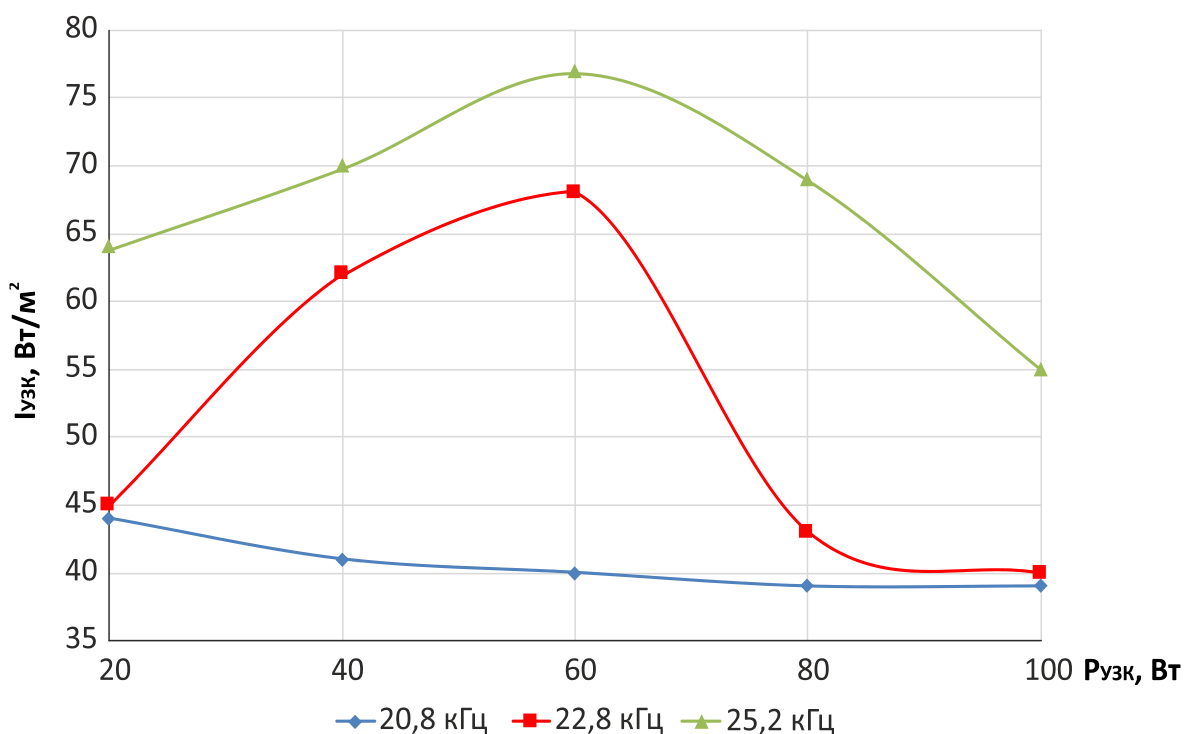


Рисунок 3.2 – Влияние мощности и частоты ультразвуковых колебаний на их интенсивность

С ростом интенсивности ультразвуковых колебаний происходит повышение напряжения дуги, следовательно, и мощности дуги на ~13% (рис. 3.3) по сравнению с дугой без УЗК ( $Q_{д.}=1900\div 1925$  Вт).

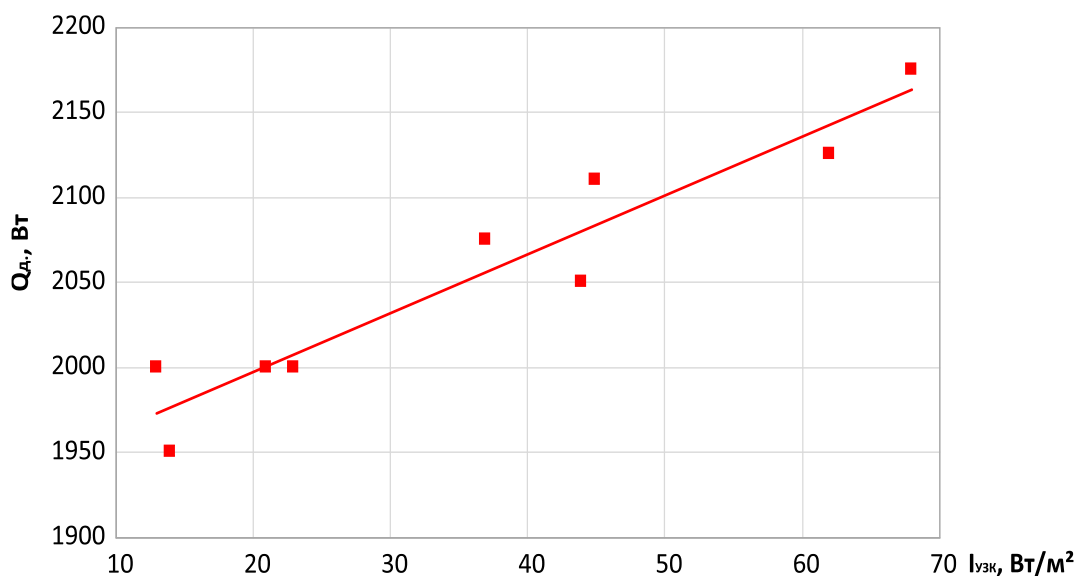


Рисунок 3.3 – Тепловая мощность дуги переменного тока:

$$F_{УЗК}=22,8 \text{ кГц}; I_{св.}=150 \text{ А}; V_{св.}=20 \text{ м/ч}; f=50 \text{ Гц}; \tau_{обр.}=3 \text{ мс}; L_{д.}=3 \text{ мм}; d_{э.}=4 \text{ мм}$$

При частоте ультразвуковых колебаний 25,2 кГц интенсивность УЗК выше, однако, как показали исследования (см. гл. 4), глубина проплавления по сравнению с  $F_{УЗК}=22,8$  кГц при этом практически не изменяется. Кроме того, при данной частоте наблюдались перегрев линзы и нестабильная её работа, поэтому для данной конструкции ультразвукового преобразователя оптимальной является частота 22,8 кГц.

### 3.2 Статические вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов

При обсуждении вопросов физики дуговых разрядов в основном рассматривались только дуги, работающие на постоянном токе и, соответственно, их статические вольт-амперные характеристики. Это дает возможность работать при стационарных условиях. Поэтому условия в различных частях разряда (катод, область катодного падения потенциала, столб дуги, область анодного падения потенциала и анод) не изменяются во времени и могут быть хорошо исследованы по отдельности. Однако исследование физических процессов дуги переменного тока является актуальным, как с научной, так и с практической точки зрения.

Измерение напряжения прямой и обратной полярности дуги с воздействием УЗК и без него при изменении силы сварочного тока и длительности обратной полярности показало, что при всех режимах сварки дуга с УЗК имеет большие значения напряжения на прямой  $U_{пр.}$  (рис. 3.4, а) и обратной  $U_{обр.}$  полярности (рис. 3.4, б), а так же действительного напряжения на дуге  $U_{д.}$  (рис. 3.4, в), что говорит об увеличении ее тепловой мощности по сравнению с дугой без УЗК.

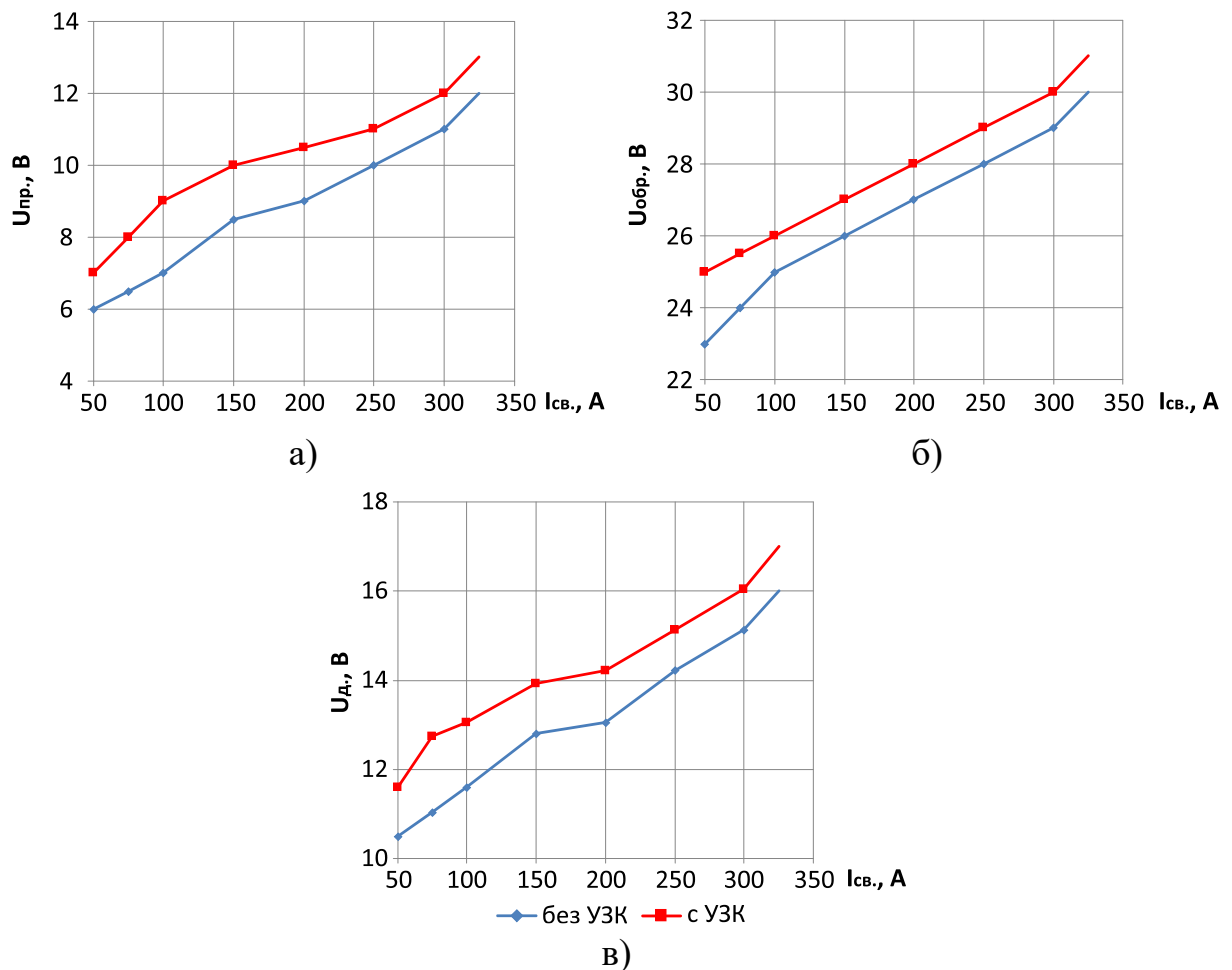


Рисунок 3.4 – Вольт-амперные характеристики дуги ПФИ:

- а) напряжение в импульсах прямой полярности; б) напряжение в импульсах обратной полярности; в) действительное напряжение на дуге

$$F_{УЗК} = 22,8 \text{ кГц}; P_{УЗК} = 60 \text{ Вт}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; f = 50 \text{ Гц}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

Вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с ПФИ имеют в исследованном диапазоне токов возрастающий характер; при любом значении

$I_{св.}$  при воздействии ультразвука напряжения ( $U_{пр.}$ ,  $U_{обр.}$ ,  $U_{д.}$ ) повышаются на 1 ... 2 В, что говорит об увеличении тепловой мощности дуги.

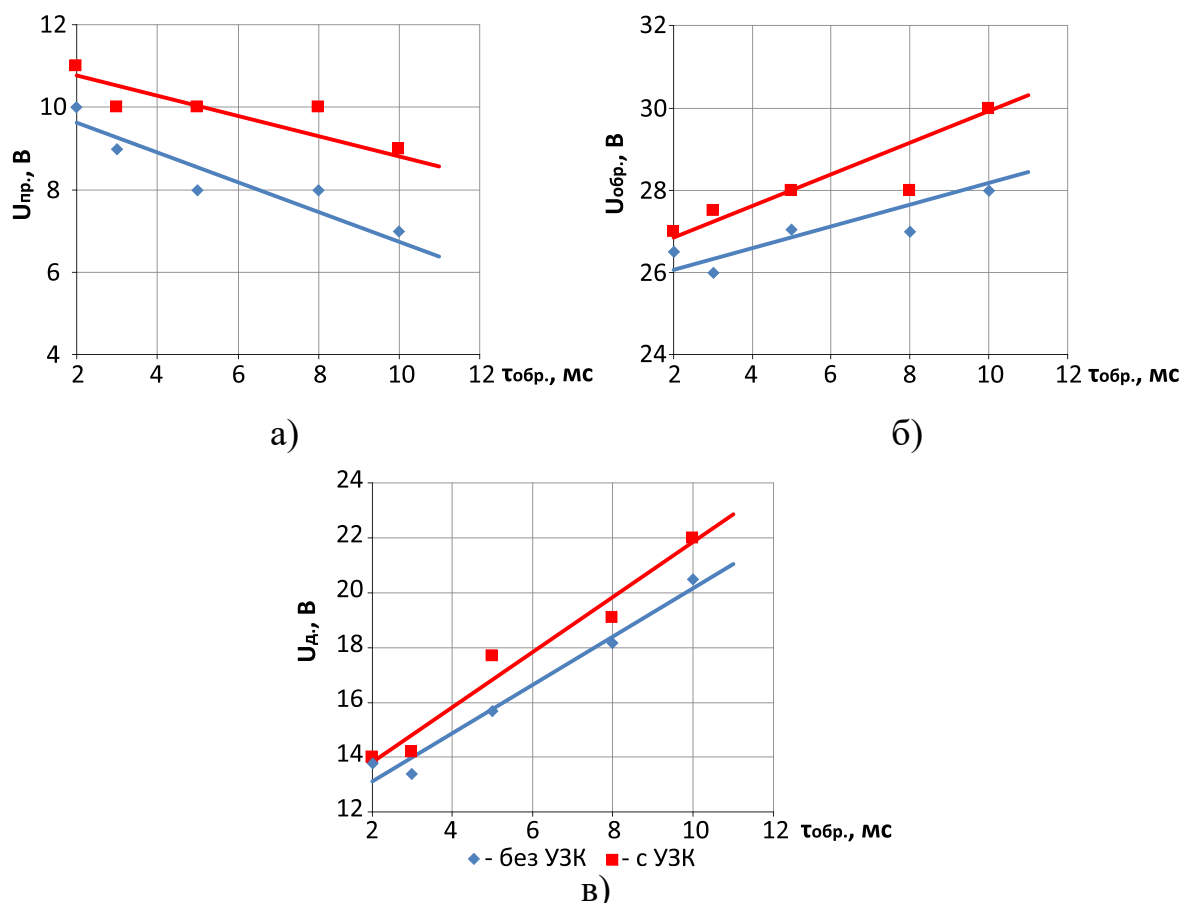


Рисунок 3.5 – Влияние длительности импульсов тока обратной полярности на напряжение дуги с ПФИ: а) напряжение в импульсах прямой полярности; б) напряжение в импульсах обратной полярности; в) действительное напряжение на дуге ( $F_{УЗК} = 22,8$  кГц;  $P_{УЗК} = 60$  Вт;  $I_{св.} = 150$  А;

$$f = 50 \text{ Гц}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм})$$

В плазме, находящейся в областях катодного и анодного падения потенциала из-за существенно более высоких в этих областях значений электрической напряженности поля, имеют более высокие значения преобразования энергии на единицу объема, чем в столбе дуги, особенно если плазма перед данным электродом сильно сжата. В этих областях имеет место также повышенная ионизация (а часто и возбуждения); здесь

происходит возникновение заряженных частиц, определяющих механизм дугового разряда.

Напряжение дуги ПФИ зависит не только от величины тока, но и от длительности импульсов обратной полярности  $\tau_{обр}$  (при неизменной частоте): с ростом  $\tau_{обр}$  напряжение  $U_{\delta}$  и, в меньшей мере,  $U_{обр}$  увеличивается, а  $U_{пр}$  – уменьшается, с воздействием ультразвуковых колебаний значения напряжения  $U_{пр}$ ,  $U_{обр}$  и  $U_{\delta}$  при всех значениях  $\tau_{обр}$  больше на 1 ... 2 В, чем у дуги без УЗК (рис. 3.5).

### **3.3 Форма дуги переменного тока при воздействии ультразвуковых колебаний**

Известно, что мощное акустическое поле, создаваемое между свариваемым материалом и плоским ультразвуковым излучателем, оказывает на сварочную дугу дополнительный сжимающий эффект, при котором у последней повышается тепловая эффективность. Однако мощность акустического поля может достигать ~2 кВт, что энергетически неэффективно, так как затраты электрической энергии на преобразование в ультразвуковые колебания больше, чем повышение мощности дуги посредством увеличения силы тока. Впрочем, остается открытым вопрос влияния сфокусированных в межэлектродном пространстве ультразвуковых колебаний малой мощности на изменение формы и размеров сварочной дуги.

Энергетический баланс области катодного падения потенциала значительно сложнее, чем энергетический баланс столба дуги. Сам катод нагревается за счет налетающих на него положительных ионов, которые нейтрализуются на нем и при этом отдают свою энергию ионизации. Будет ли кинетическая энергия ионов также отдана на катоде, зависит от того, останутся ли на поверхности катода нейтрализованные ионы, или будут от нее отражены; в последнем случае кинетическая энергия служит для нагревания плазмы, расположенной перед катодом. Катод адсорбирует

часть налетающих на него ионов и получает энергию из ближайших слоев плазмы вследствие теплопроводности. Отсюда становится ясным значение распределения температуры перед катодом.

Подведенная к катоду энергия служит для компенсации работы выхода эмитированных электронов, отвода тепла в более холодные части катода, теплового излучения.

В дугах с относительно большой силой тока ( $\geq 150$  А) необходимо учитывать влияние собственного осесимметричного магнитного поля, имеющегося в дуге. Если имеются сужения поперечного сечения дуги, в данной области давление существенно больше, чем в других областях плазмы. Вследствие этого возникают потоки плазмы, истекающие из этих мест и выравнивающие местные повышения давления.

Для дуг высокой интенсивности характерно истечение раскаленной плазмы от активного пятна в столб дуги. Так как по закону Ома для данной напряженности поля максимальная плотность достигается в том месте, где проводимость тока максимальна, то основная часть тока, протекающего через дугу, течет именно в этих раскаленных потоках, обладающих хорошей проводимостью. Благодаря этому в потоке плазмы поддерживается высокая температура, и образуются яркосветящегося ядра периферийные зоны столба дуги (ореол дуги).

В обычной сварочной дуге наибольшая яркость у электрода, в то время как с УЗК значительные изменения происходят в области столба и ореола дуги. По мере увеличения интенсивности ультразвука сжатие дуги усиливается, что свидетельствует о повышении давления и росте напряжения. Однако с ростом силы тока влияние ультразвука на дугу постепенно снижается, что связано с повышением естественной мощности дуги. При любых параметрах сварки дуга с УЗК имеет стабильное положение в пространстве.

Расстояние от поверхности заготовки до излучателя оказывает влияние на интенсивность ультразвуковых колебаний. При фокусном

расстоянии излучателя  $R=20$  мм область сфокусированных ультразвуковых колебаний будет находиться ближе к электроду, что соответствует области с наибольшей интенсивностью ультразвука, а по мере увеличения длины дуги интенсивность будет снижаться.

Дуга представляет собой плазму с высокой плотностью частиц, и столкновение между частицами относительно интенсивное. Под действием ультразвуковых колебаний скорость движения частиц в плазме увеличивается. Согласно результатам исследований Фурье по теплопроводности среды, если скорость движения частиц увеличивается, следовательно, температура дуги повышается.

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \vec{n} \quad (3.1)$$

Тепло дуги с большей вероятностью передается вдоль направления распространения ультразвуковых колебаний, а эффективность обмена энергией между ультразвуком и дугой улучшается. Таким образом, вышеуказанные причины приводят к изменению свойств дуги переменного тока с ПФИ.

Анализ результатов исследований многих ученых указывает на то, что столб дуги без воздействия УЗК имеет колоколообразную форму, характеризующуюся расширением активного пятна на изделии. Определение размеров дуги с неплавящимся электродом проводили согласно методике, описанной во 2-ой главе.

Воздействие ультразвуковых колебаний на дугу приводит к уменьшению размеров активных пятен с 1,8 до 1,1 мм (у электрода) и с 2,0 до 1,2 мм (на изделии) при силе тока 100 А; с 2,0 до 1,6 мм (у электрода) и с 3,4 до 3,0 мм (на изделии) при 150 А. При значении сварочного тока 200 А размер активного пятна у электрода не меняется (2,0 мм), а на изделии происходит его незначительное сжатие с 4,1 до 3,7 мм (рис. 3.6; 3.7).

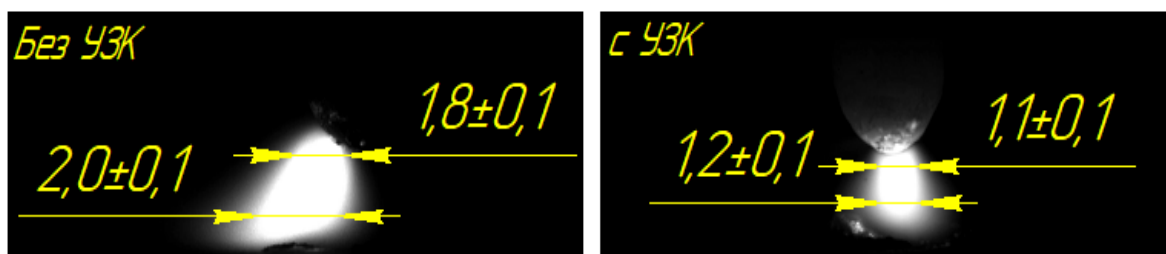


Рисунок 3.6 – Форма дуги переменного тока в импульсе прямой полярности:

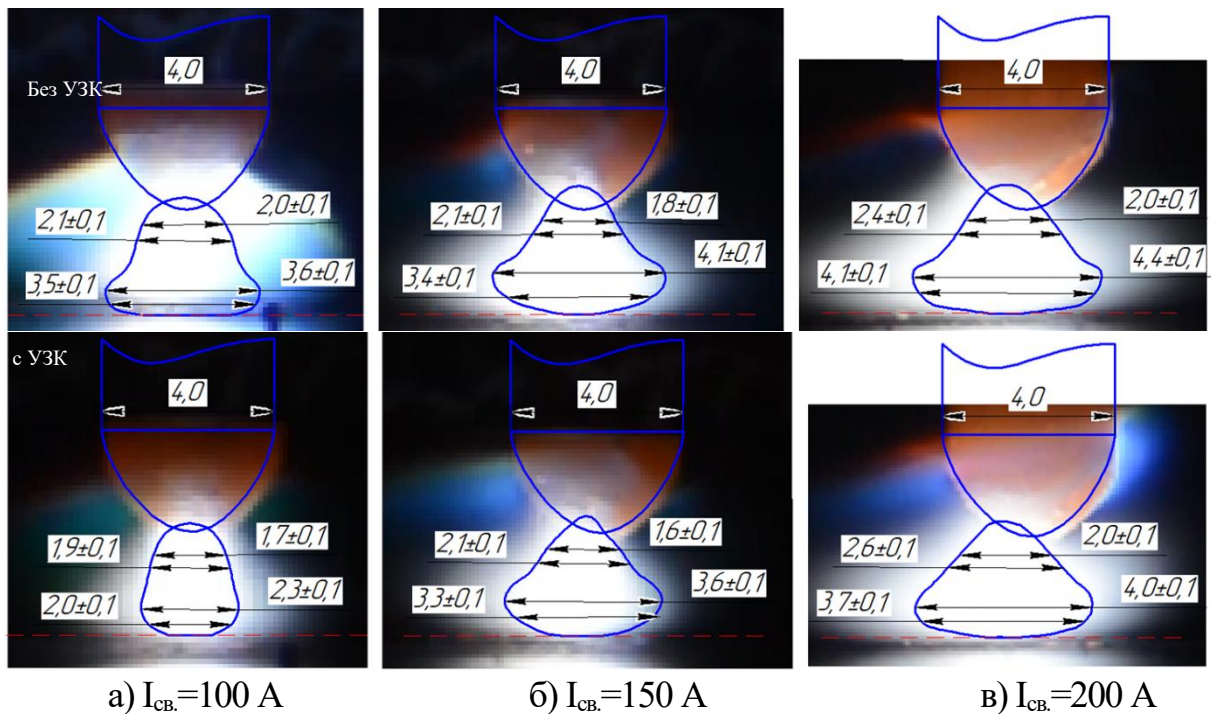
$$F_{\text{УЗК}} = 22,8 \text{ кГц}; P_{\text{УЗК}} = 60 \text{ Вт}; I_{\text{св.}} = 150 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; L_{\text{д.}} = 3 \text{ мм}; d_{\text{э.}} = 4 \text{ мм}$$

Таким образом, наибольший эффект влияния ультразвука был получен при значении силы тока 100 А, что объясняется значительным силовым воздействием ультразвука, превосходящим силовое воздействие дуги без воздействия ультразвука.

Проведенный анализ изменения формы дуги переменного тока при воздействии ультразвука показал, что дуга с УЗК более яркая, и можно предположить, что происходит увеличение скорости движения заряженных частиц, повышение температуры дуги и плотности частицы на единицу объема, приводящее к росту напряжения и, как следствие, увеличению её термосилового воздействия на сварочную ванну.

Значительное влияние на проплавляющую способность дуги оказывает сила тока, однако эффективность влияния ультразвука при повышении  $I_{\text{д.}}$  несколько снижается, что связано с увеличением мощности дуги.

Длительность импульсов тока обратной полярности является важным параметром, влияющим на технологические свойства дуги с ПФИ. С увеличением  $\tau_{\text{обр.}}$  без воздействия ультразвука уменьшается размер активного пятна на изделии и увеличивается у электрода (рис. 3.8), что связано с уменьшением времени существования анодного пятна на изделии и, соответственно, снижением тепловложения в него. Качество катодной очистки улучшается, однако повышается тепловая нагрузка на рабочий участок электрода, что сказывается на его стойкости.



а)  $I_{св.}=100$  А                      б)  $I_{св.}=150$  А                      в)  $I_{св.}=200$  А  
 Рисунок 3.7 – Профиль дуги при различных значениях сварочного тока:  
 $F_{узк.}=22,8$  кГц;  $P_{узк.}=60$  Вт;  $f=50$  Гц;  $\tau_{обр.}=3$  мс;  $L_{д.}=3$  мм; расход газа 18-20 л/мин

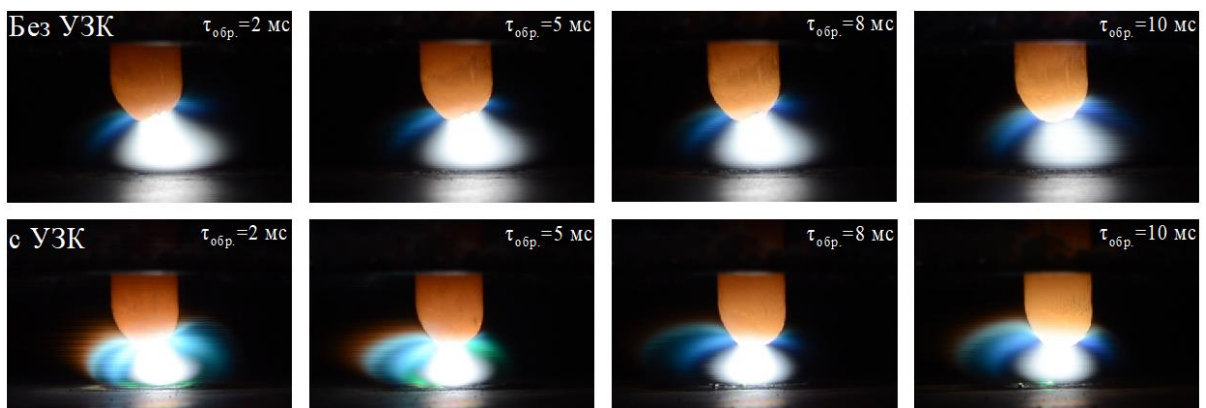
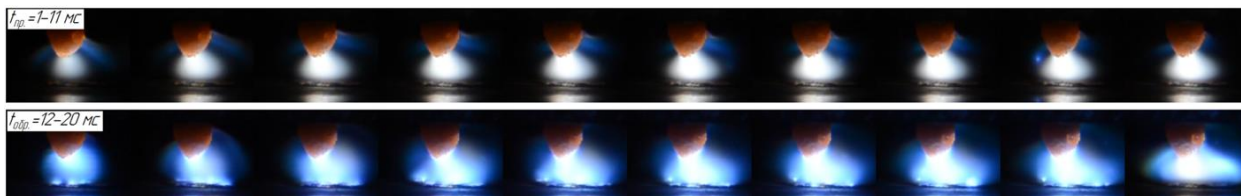


Рисунок 3.8 – Изменение формы столба дуги при различной длительности импульсов тока обратной полярности:  $F_{узк.}=22,8$  кГц;  $P_{узк.}=60$  Вт;  $I_{св.}=100$  А;  
 $f=50$  Гц;  $L_{д.}=3$  мм; расход газа 18-20 л/мин

При раскадровке одного из периодов существования дуги было обнаружено, что с воздействием ультразвука дуга становится ярче, что может также указывать на повышение температуры дуги. Как было отмечено ранее, при воздействии высокочастотных волн на дуговой разряд повышается его теплопроводность.

Из полученных результатов съемки профиля дуги во время сварки и раскадровки одного периода (рис. 3.9) ее существования видно, что дуга с ультразвуком сжимается и имеет более стабильное положение в пространстве (рис. 3.10).

Без УЗК



с УЗК

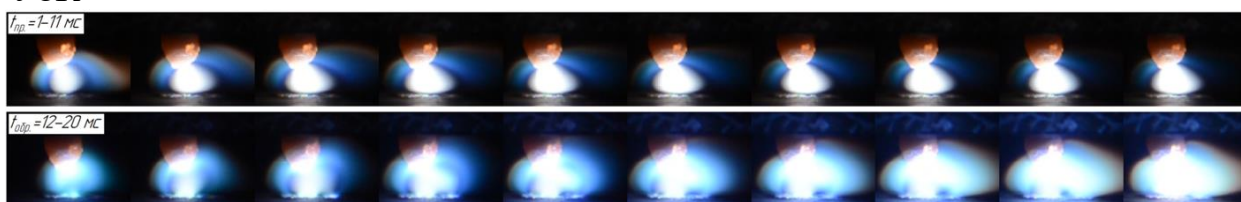


Рисунок 3.9 – Раскадровка горения дуги переменного тока в течение одного периода:  $F_{\text{узк}}=22,8$  кГц;  $P_{\text{узк}}=60$  Вт;  $I_{\text{св.}}=100$  А;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}} / \tau_{\text{пр.}}=40/60\%$

При этом наблюдается улучшение катодной очистки поверхности сварного шва, когда дуга по своим характеристикам близка к дуге постоянного тока прямой полярности, также увеличивается глубина проплавления на 30-40%. С увеличением  $\tau_{\text{обр.}}$  ширина катодной очистки увеличивается, однако глубина проплавления падает.

На рисунке 3.11 показаны изображения профиля дуги при различной мощности ультразвуковых колебаний ( $P_{\text{узк}}$ ). С воздействием ультразвука дуга сжимается при значениях электрической потребляемой мощности от 60 до 100 Вт, а ее пространственная устойчивость повышается. Однако дальнейшее увеличение мощности ультразвуковых колебаний  $P_{\text{узк}} \geq 140$  Вт приводит к тому, что происходит отклонение дуги от оси электрода, и блуждание её активного пятна на поверхности изделия, что служит причиной появления дефектов формирования шва (см. гл. 4).

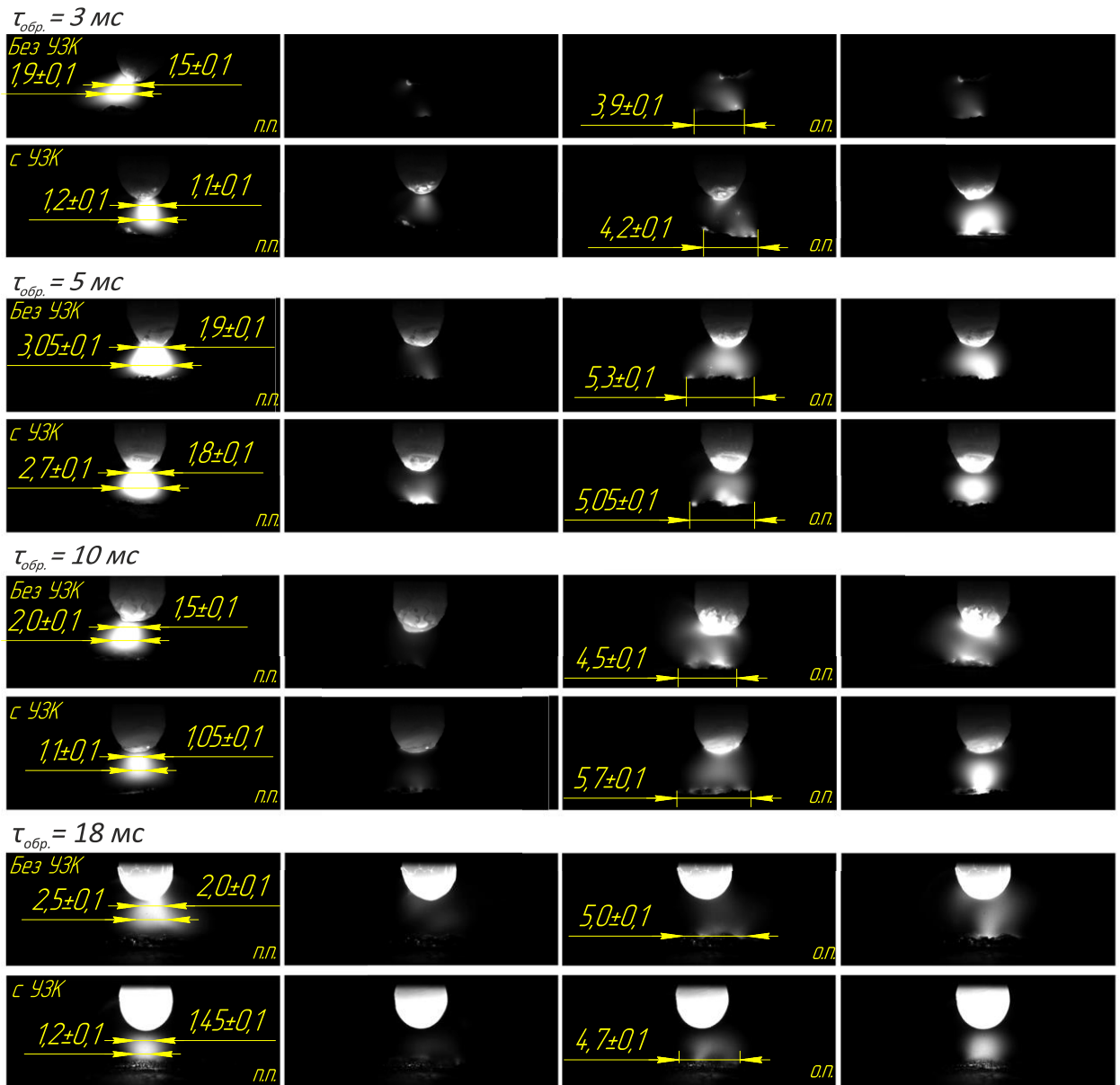


Рисунок 3.10 – Профиль дуги переменного тока в период прямой (п.п.) и обратной полярности (о.п.):  $F_{узк.} = 22,8 \text{ кГц}$ ;  $P_{узк.} = 60 \text{ Вт}$ ;  $I_{св.} = 100 \text{ А}$ ;  $f = 50 \text{ Гц}$

При обсуждении вопроса о влиянии материала изделия на дугу нельзя не упомянуть об окисной пленке или пятнах окислов на поверхности алюминия. Вследствие того, что раскаленные окислы металлов обладают особенно высокой электронной эмиссией, это объясняет часто наблюдаемые перемещения активного пятна по пластине.

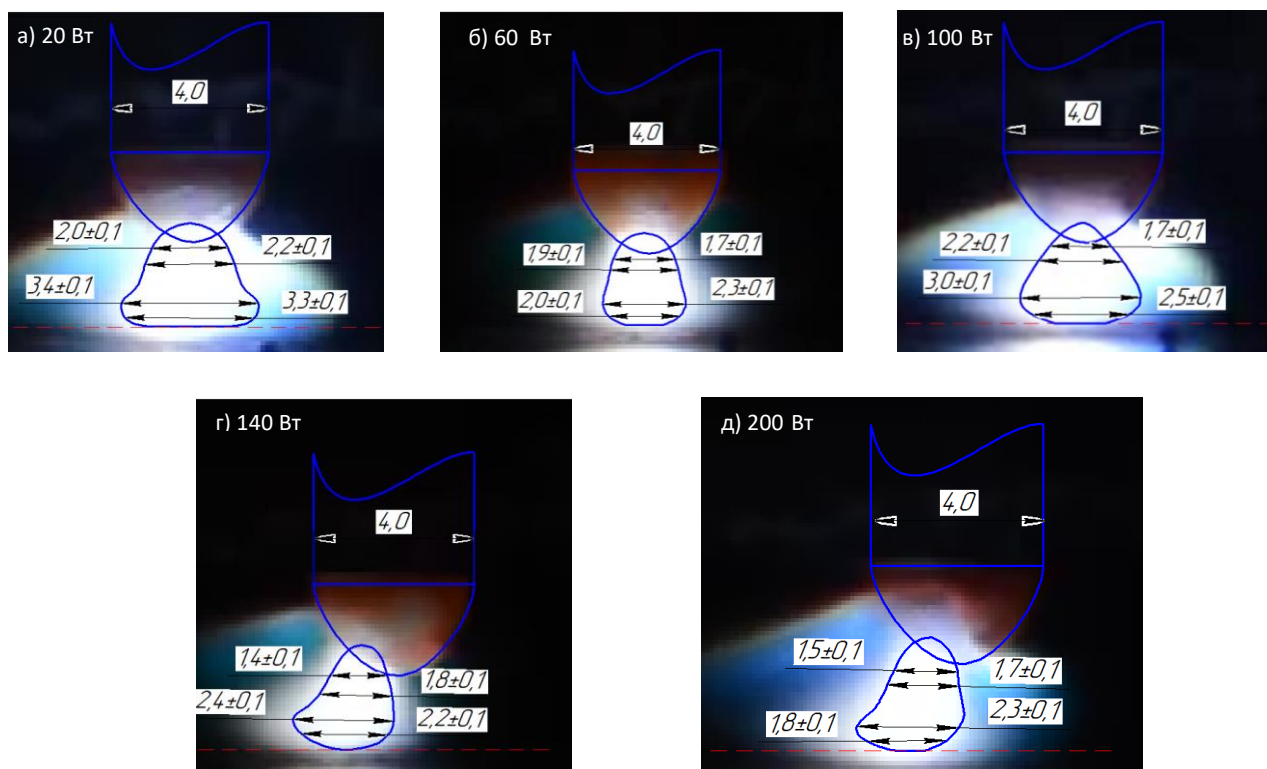


Рисунок 3.11 – Влияние мощности ультразвука на профиль дуги:

$$F_{\text{узк.}} = 22,8 \text{ кГц}; I_{\text{св.}} = 100 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; L_{\text{д.}} = 3 \text{ мм}; \text{расход газа } 18\text{-}20 \text{ л/мин}$$

Повышение длительности импульсов тока обратной полярности увеличивает размер активного пятна на поверхности изделия, что, по-видимому, является причиной роста ширины зоны катодной очистки  $V_k$ , при любых значениях  $\tau_{\text{обр.}}$  величина  $V_k$  при воздействии УЗК выше, чем без них.

### 3.4 Эластичность дуги переменного тока

По данным [111] известно, что с повышением яркости дугового разряда значительно увеличивается давление дуги; В. Rompe, W. Thouret и W. Welzel [112, 113] также обнаружили, что с повышением давления напряжение увеличилось. Одновременно было установлено и значительное усиление яркости дугового разряда.

Диаметр свободно горящей дуги уменьшается с ростом давления, тогда как ее температура увеличивается, и интенсивность непрерывного спектра по отношению к интенсивности линий существенно повышается.

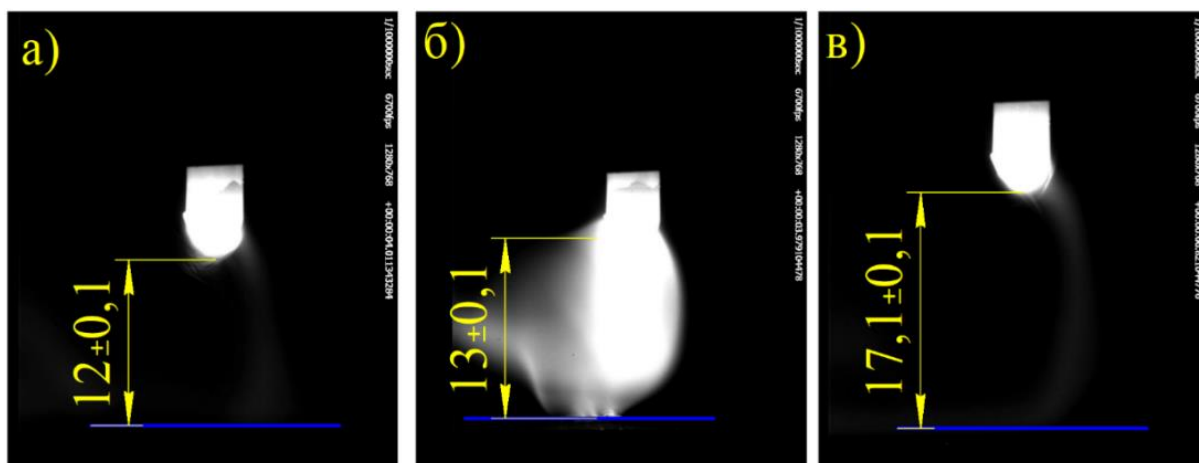


Рисунок 3.12 – Влияние ультразвука на разрывную длину дуги:

$$F_{\text{узк.}}=22,8 \text{ кГц}; P_{\text{узк.}}=60 \text{ Вт}; I_{\text{св.}}=80 \text{ А}; f=50 \text{ Гц}; \tau_{\text{обр.}}=3 \text{ мс}; d_{\text{э.}}=4 \text{ мм};$$

расход газа 18-20 л/мин; а) без УЗК; б) с УЗК; в) с УЗК - обрыв дуги

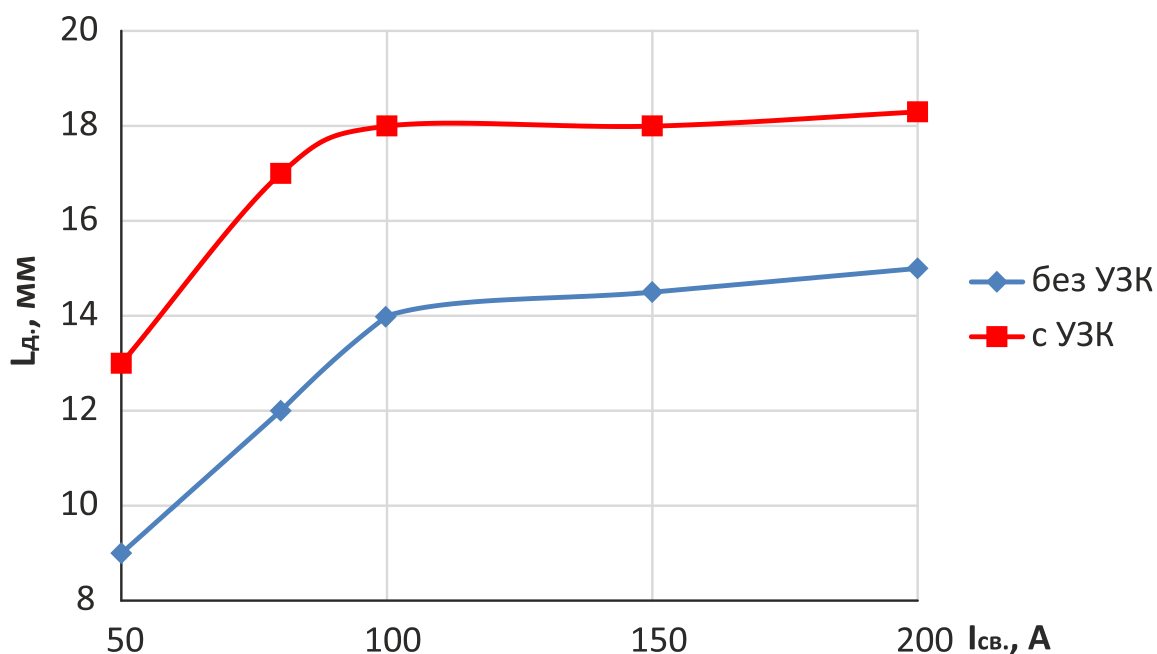


Рисунок 3.13 – Влияние ультразвука на разрывную длину дуги:

$$F_{\text{узк.}}=22,8 \text{ кГц}; P_{\text{узк.}}=60 \text{ Вт}; f=50 \text{ Гц}; \tau_{\text{обр.}}=3 \text{ мс}; d_{\text{э.}}=4 \text{ мм}$$

При сварке без УЗК с увеличением длины дуги ( $L_{\text{д.}}$ ) более 10 мм происходит нарушение горения дуги с последующим её обрывом, а с воздействием ультразвука дуга продолжает существовать ( $L_{\text{д.}}=17$  мм), рис. 3.12-3.13.

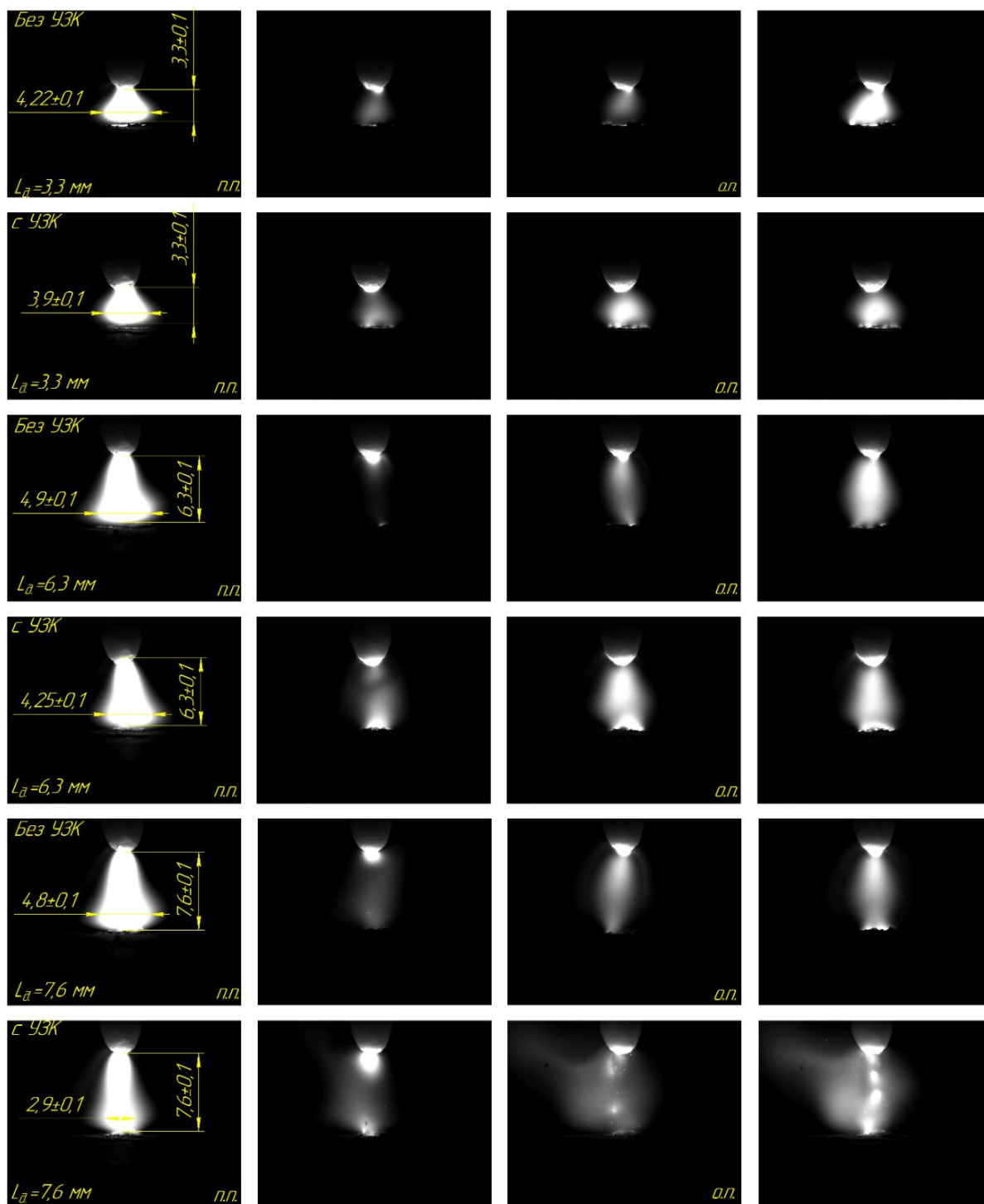


Рисунок 3.14 – Влияние ультразвуковых колебаний на эластичность дуги:

$$F_{\text{узк.}} = 22,8 \text{ кГц}; P_{\text{узк.}} = 60 \text{ Вт}; I_{\text{св.}} = 100 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; \tau_{\text{обр.}} = 3 \text{ мс}; L_{\text{д.}} = 3 \text{ мм}; d_{\text{э.}} = 4 \text{ мм}$$

В отличие от дуги постоянного тока, на переменном токе происходит смена полярности с заданной частотой и длительностью. Дуга переменного тока горит менее устойчиво, чем дуга постоянного тока, что связано с тем, что при смене

полярности ток снижается до нуля, и если степень ионизации будет крайне мала, то произойдет обрыв дуги.

Дуга горит стабильнее, чем меньше ее длина, а с увеличением междугового промежутка столб дуги становится все более подвижным и соответственно легче изменяется под воздействием внешних сил. Следовательно, стабильность обычной дуги понижается с увеличением длины дугового разряда.

Как показано на рисунке 3.14 дуга под воздействием ультразвука значительно сжимается, яркость дуги увеличивается. В обычной сварочной дуге яркость дуги наиболее высока вблизи электрода, в то время как температура всего столба дуги с УЗК значительно увеличивается, и внутри дуги появляется яркая область, перемещающаяся вверх и вниз с определенной частотой.

В момент смены полярности видны светящиеся активные пятна на электроде и изделии. В то же время столб дуги почти незаметен вследствие малого излучения. Известно, что температура во всех областях дуги и соответственно плотность излучения возрастает при повышении давления, это согласуется с общими наблюдениями, которые показывают, что при росте давления происходит общее сужение разряда. Таким образом, существенно увеличивается преобразование мощности в единице объема.

Было обнаружено, что дуга переменного тока с воздействием ультразвука горит иначе, чем без УЗК. При смене полярности яркость активных пятен повышается, что говорит о повышении температуры в межэлектродном пространстве. По-видимому, ультразвуковые колебания влияют также на атомы аргона, увеличивая скорость движения частиц, что приводит к росту температуры и повышению степени ионизации, что облегчает повторное возбуждение дуги и соответственно улучшает устойчивость дугового разряда. Эффективность влияния ультразвуковых колебаний на дугу становится более явным с увеличением длины дуги.

При распространении продольной волны в среде последовательно возникают области сжатия и разрежения. В стоячей волне в точках с максимальной амплитудой колебаний – в пучностях наблюдается область

сжатия, а в узлах – область разрежения (рисунок 3.15). Между ультразвуковым излучателем и пластиной имеется четыре области стоячей волны. Более яркие области соответствуют области сжатия, где акустическое давление выше и наоборот темные области – разрежения. Максимальное значение акустического давления наблюдается на расстоянии от излучателя до пластины 20 мм, и по мере увеличения расстояния до пластины давление будет несколько снижаться.

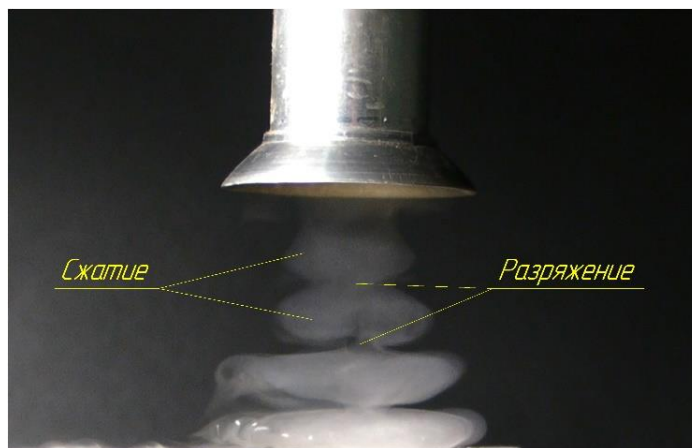


Рисунок 3.15 – Образование стоячей звуковой волны

С воздействием сфокусированных ультразвуковых колебаний при увеличении длины дуги образуется яркая область в плазме у электрода, что соответствует фокусному расстоянию  $R \approx 17$  мм. Однако в момент образования стоячей звуковой волны ( $R \approx 24$  мм) происходит образование несколько ярких областей дугового разряда.

Таким образом, дуга с ультразвуком отличается от обычной сварочной дуги тем, что меняется характер движения заряженных частиц. При образовании стоячей волны в областях разрежения обнаружены едва заметные части столба дуги, что говорит о более низкой температуре и давлении в данной области и, следовательно, для областей сжатия ультразвуковой волны характерны яркие области дуги с более высокими давлением и температурой.

### 3.5 Энергетические характеристики дуги переменного тока

Все параметры, определяющие эффективность сварочной дуги, целесообразно разделить на две группы. Первую из них составляют энергетические параметры, вторую – показатели, определяющие проплавляющую способность дуги. К параметрам первой группы относятся эффективный КПД нагрева  $\eta_u$ , термический КПД  $\eta_t$  и полный КПД проплавления  $\eta_{np}$ . Ко второй группе относятся параметры дуги и режима сварки, в той или иной мере определяющие результаты проплавлений: в основном это ток, напряжение дуги и скорость её перемещения. Последние часто объединяют в один более общий параметр – погонную энергию, для чего необходимо знание одного из параметров первой группы –  $\eta_u$ . Такое деление носит условный характер, поскольку, например, коэффициенты  $\eta_t$  и  $\eta_{np}$  определяют не только энергетику процесса дуговой сварки, но и результат проплавлений. С другой стороны, параметры второй группы (прежде всего ток дуги) влияют, иногда определяющим образом, на значения параметров первой группы.

Дуга ПФИ, помимо обычных параметров, характеризующих режим горения дуги (ток и напряжение), имеет специфические параметры: соотношение длительностей импульсов прямой  $\tau_{np}$  и обратной  $\tau_{обр}$  полярностей (или, при заданной частоте, длительность импульса любой полярности, например,  $\tau_{обр}$ ), амплитуда токов в импульсах прямой  $I_{д\ np}$  и обратной  $I_{д\ обр}$  полярностей и, наконец, частота тока  $f$ . По этой причине при исследовании дуги ПФИ основное влияние уделялось влиянию перечисленных специфических параметров на её энергетические и технологические характеристики.

Не все выделяемое дугой тепло используется при сварке для нагрева изделия. Часть тепла затрачивается на нагрев электрода и теряется в окружающем пространстве за счет конвекции и излучения.

Эффективная тепловая мощность  $q_{и}$  процесса нагрева изделия сварочной дугой есть количество тепла, введенное за единицу времени в металл изделия.

$$Q_{и} = \eta_{и} \cdot 0,24UI \quad (3.1)$$

где  $\eta_{и}$  – эффективный КПД.

По литературным данным [114] эффективный КПД дуги переменного тока с неплавящимся электродом находится в диапазоне 0,2...0,8. В связи с этим интересен вопрос изучения влияния ультразвуковых колебаний на эффективность процесса сварки неплавящимся электродом.

Эффективность нагрева дугой ПФИ при сварке алюминия оценивали эффективным КПД  $\eta_{и}$ , термическим КПД  $\eta_t$  и полным КПД  $\eta_{пр}$ . Для их определения был выполнен ряд экспериментов, методика которых описана в главе 2.

Влияние параметров дуги ПФИ на эффективный КПД  $\eta_{и}$  представлено на рис. 3.16. Видно, что с увеличением длительности импульса тока обратной полярности  $\tau_{обр}$  (при  $f=50$  Гц) значение  $\eta_{и}$  уменьшается как с УЗК, так и без них, и находится в пределах 0,4÷0,6 (при величине тока 150 А). Однако, с воздействием ультразвука эффективный КПД увеличивается, что обусловлено улучшением пространственной устойчивости дугового разряда.

По литературным данным, у дуги переменного синусоидального тока промышленной частоты эффективный КПД  $\eta_{и}$  при сварке составляет 0,3÷0,45 [115], то есть несколько ниже, чем в нашем случае. Объяснить этот факт можно тем, что дуга ПФИ с уменьшением  $\tau_{обр}$  по своим энергетическим характеристикам приближается к дуге постоянного тока прямой полярности, для которой величина  $\eta_{и}$  составляет 0,6÷0,7 [116], по другим данным – 0,63÷0,77 [117].

С увеличением  $\tau_{обр}$  эффективный КПД снижался, поскольку большое количество энергии при этом передается электроду. Полученные значения эффективного КПД дуги находились в диапазоне 0,4÷0,6. При всех значениях  $\tau_{обр}$  эффективный КПД  $\eta_{и}$  у дуги с воздействием ультразвуковых колебаний увеличивался на 5 ... 12%, чем без них.

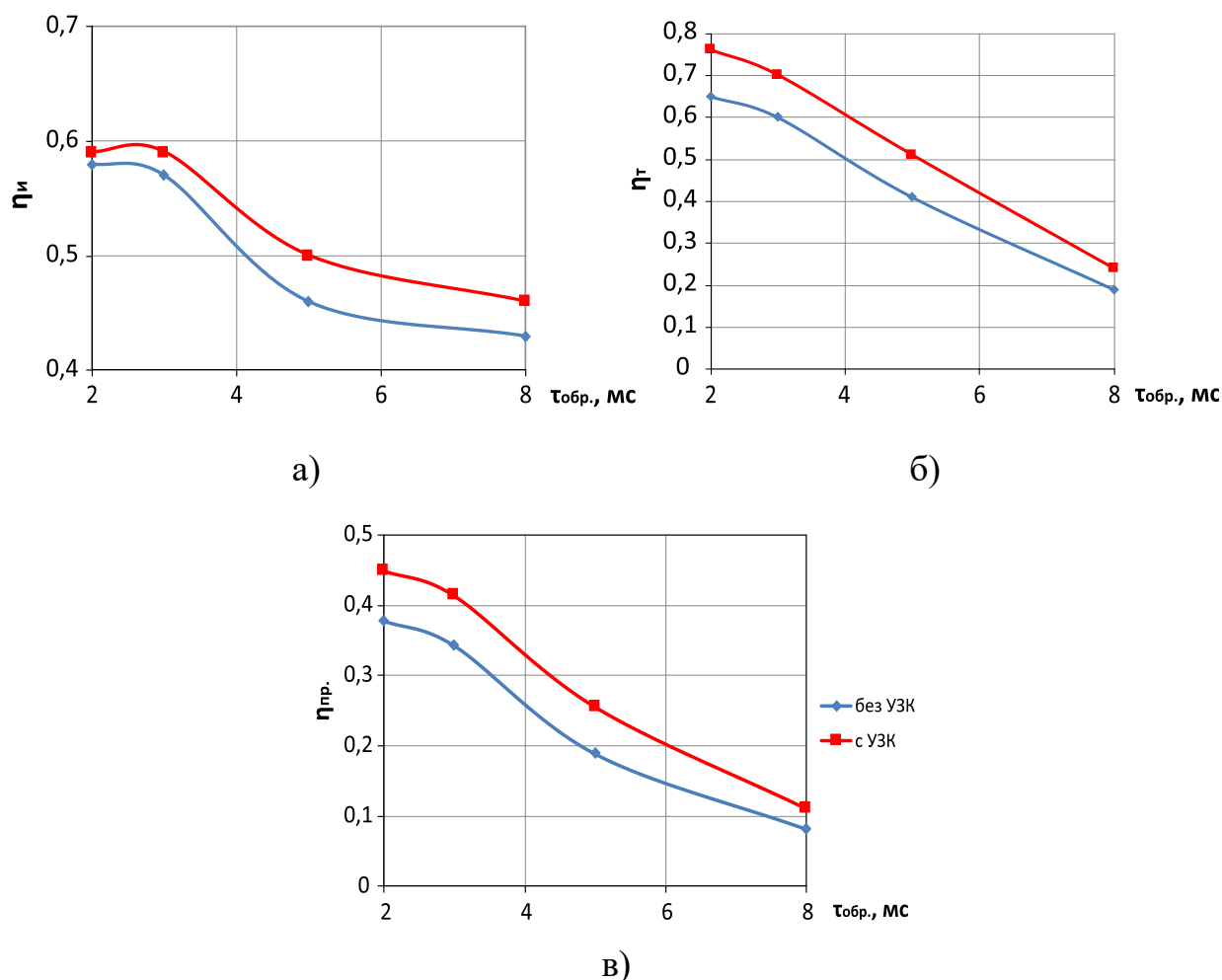


Рисунок 3.16 – Влияние длительности импульсов тока обратной полярности на эффективный (а), термический (б) и полный (в) КПД сварки:

$$F_{\text{узк.}} = 22,8 \text{ кГц}; P_{\text{узк.}} = 60 \text{ Вт}; I_{\text{св.}} = 100 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; L_{\text{д.}} = 3 \text{ мм}; d_{\text{э.}} = 4 \text{ мм}$$

Значительно снижается термический КПД сварки с увеличением длительности импульсов тока обратной полярности, что связано с уменьшением площади проплавления. В то же время, у дуги с воздействием ультразвука значения термического КПД увеличиваются на 5 ... 15% (в зависимости от длительности импульсов тока обратной полярности), чем в случае его отсутствия.

Полный тепловой КПД, характеризующий полную эффективность процесса проплавления металла дугой, находится в диапазоне 0,08 ... 0,45. При  $\tau_{\text{обр.}} = 2 \text{ мс}$  (при  $f = 50 \text{ Гц}$ ), что близко к дуге постоянного тока прямой

полярности, получены наибольшие значения  $\eta_{np}=0,38$  без УЗК. Следовательно, такая часть от эффективной тепловой мощности, вводимой дугой в изделие затрачивается на проплавление изделия. Остальная же часть тепловой мощности (62 %) представляет потери на перегрев металла в зоне проплавления и подогрев основного металла вне этой зоны. При тех же параметрах горения дуги с воздействием ультразвуковых колебаний полный КПД составляет 0,45, что свидетельствует о снижении потерь тепловой мощности дуги.

Существенно снижается полный КПД  $\eta_{np}=0,08$  при  $\tau_{обр.}=8$  мс, что близко к дуге синусоидального переменного тока; большая часть тепла уходит на электрод, и лишь малая часть вводится в изделие. По этой причине при сварке толстолистовых изделий необходимо задавать параметр с минимальными значениями  $\tau_{обр.}/T=0,1 \dots 0,2$ .

Наравне с параметрами горения дуги, параметры ультразвуковых колебаний имеют существенную практическую значимость - их изучение открывает возможности для оптимизации сварочного процесса, увеличения производительности и повышения качества сварных соединений. На рисунке 3.17 представлены графики зависимости эффективного (а), термического (б) и полного КПД сварки (в) от мощности ультразвука. При мощности ультразвука  $P_{узк}=60$  Вт достигается наибольшее значение эффективного КПД, а дальнейшее увеличение электрической мощности приводит к снижению энергетических характеристик процесса - это обусловлено, во-первых, снижением эффективности воздействия высокочастотного поля при мощности от 60 до 120 Вт, а во-вторых, нарушением пространственной устойчивости дуги при  $P_{узк}>140$  Вт, когда наблюдается отставание активного пятна дуги от оси электрода, что приводит к нарушению формирования сварного шва. В результате происходит значительное увеличение напряжения на дуге, а также возрастают потери тепла, что существенно снижает значение эффективного КПД дуги.

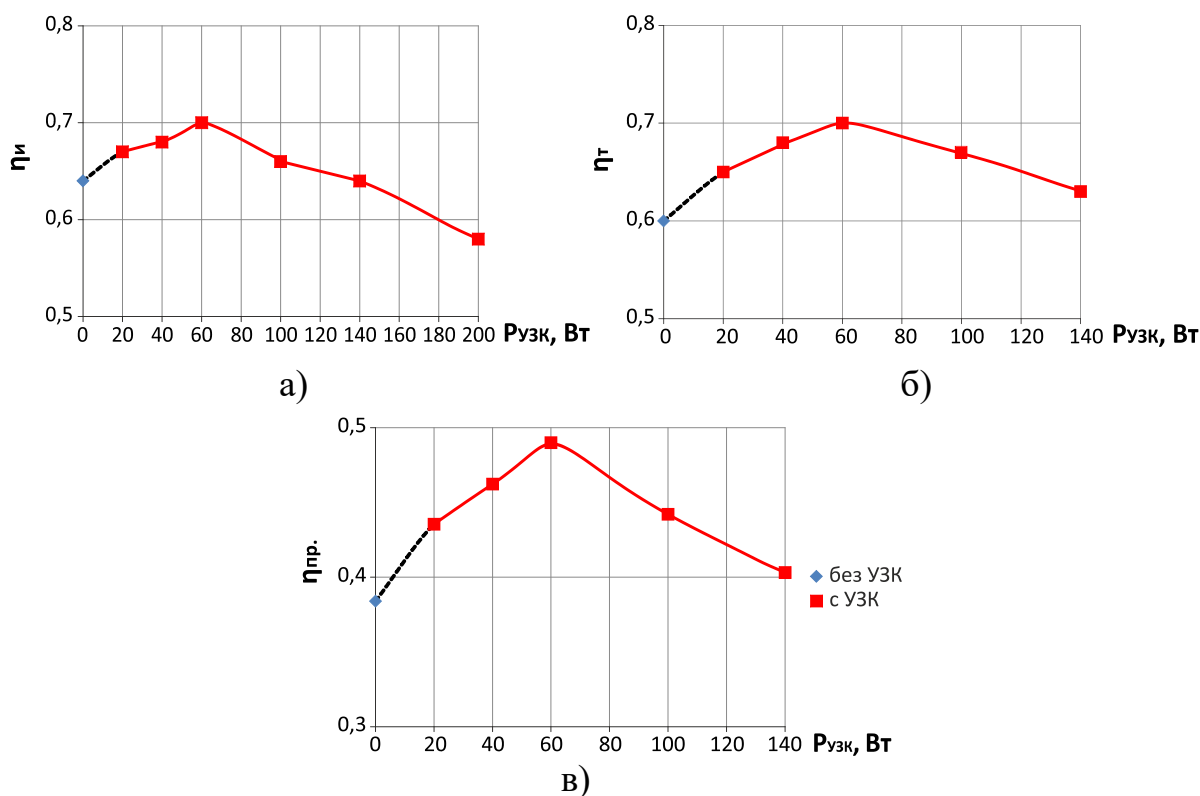


Рисунок 3.17 – Влияние мощности ультразвуковых колебаний на энергетические характеристики дуги переменного тока:

$$F_{uzk.} = 22,8 \text{ кГц}; I_{св.} = 100 \text{ А}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; f = 50 \text{ Гц}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

Оптимальная для данной конструкции ультразвукового преобразователя обеспечивает наибольшее значение глубины проплавления (см. гл. 4), а термический КПД составил  $\eta_i = 0,7$ , что свидетельствует о том, что 70% эффективной тепловой мощности  $q_{и}$ , вводимой дугой в изделие, расходуется на проплавление, что на 10% больше, чем при обычной сварке неплавящимся электродом.

В данном случае 42% тепла, развиваемого дугой, идет на проплавление основного металла. Остальное тепло (58%) теряется в дуговом промежутке и расходуется на перегрев металла в зоне проплавления и на подогрев вне этой зоны. Обобщая изложенные результаты, можно заметить, что с точки зрения эффективности нагрева свариваемого металла следует выбирать режим с минимальными значениями  $\tau_{обр.}$ , которым соответствуют максимальные значения  $\eta_{и}$ .

Несмотря на снижение эффективного КПД сварки при увеличении силы тока (рис. 3.18), глубина проплавления в большей степени определяется термическим КПД. Поэтому для повышения производительности целесообразно использовать максимально допустимые значения сварочного тока. При сварке с ультразвуковыми колебаниями эффективный КПД возрастает за счёт более высокой концентрации теплового потока, вводимого дугой в изделие.

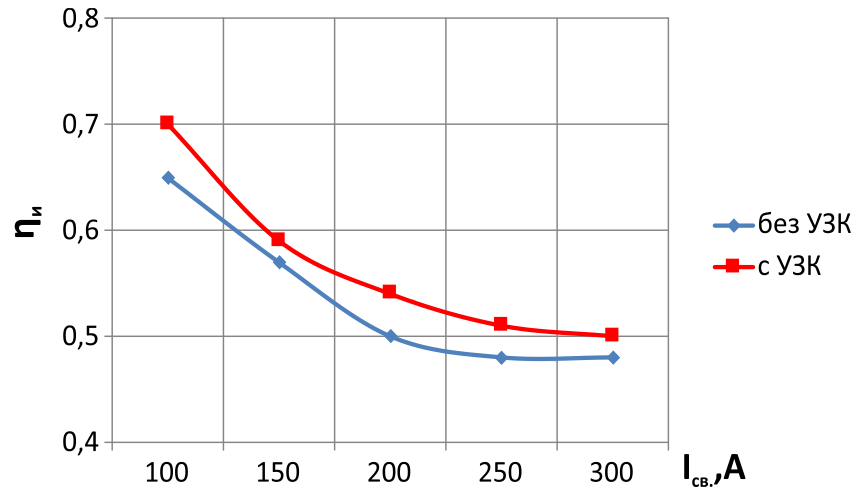


Рисунок 3.18 – Зависимость эффективного КПД  $\eta_{и}$  от силы тока дуги:

$$F_{узк.} = 22,8 \text{ кГц}; P_{узк.} = 60 \text{ Вт}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; f = 50 \text{ Гц}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

При воздействии ультразвуковых колебаний происходит контрагирование дугового разряда, что приводит к повышению концентрации заряженных частиц и увеличению напряжения на дуге, распределению источника тепла по пятну меньшей площади и, в итоге, к повышению удельного теплового потока в изделие (рис. 3.19).

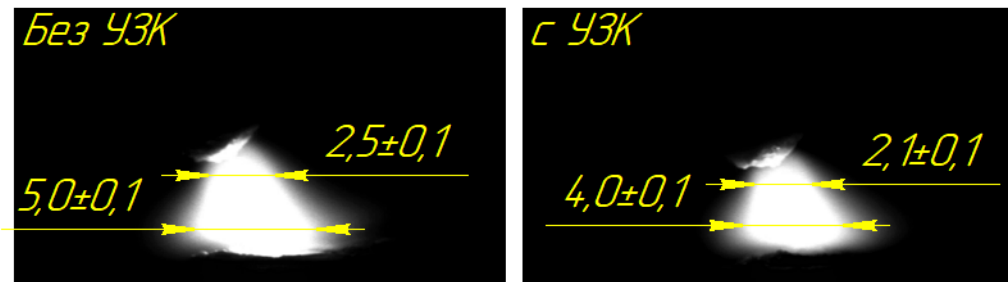


Рисунок 3.19 – Профиль дуги переменного тока с ПФИ:

$$F_{узк.} = 22,8 \text{ кГц}; P_{узк.} = 60 \text{ Вт}; I_{св.} = 300 \text{ А}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

Эффективный КПД  $\eta_u$  значительно зависит от величины тока дуги: с увеличением тока эффективный КПД уменьшается (рисунок 3.18). Так, при увеличении тока от 100 до 300 А  $\eta_u$  уменьшается практически в два раза.

Заметим, что литературные данные о зависимости  $\eta_u = f(I_{св})$  носят противоречивый характер. Так, например, в работах [113, 114] утверждается о положительном влиянии тока дуги на величину  $\eta_u$ , в то время как результаты работ [115, 117], а также наши данные, свидетельствуют об обратном.

Термический КПД  $\eta_t$  существенно увеличивается с ростом тока дуги (рис. 3.20), причем этот рост более значителен при токах свыше 200 А, по-видимому, из-за прогрессирующего углубления дуги в металл.

Влияние скорости перемещения дуги на полный  $\eta_{np}$  и термический  $\eta_t$  КПД не отличается от аналогичной зависимости для дуги переменного синусоидального тока промышленной частоты. С увеличением скорости сварки с 20 до 40 м/ч,  $\eta_t$  и  $\eta_{np}$  принимают максимальное значение с УЗК:  $\eta_t = 0,7 \div 0,78$ ;  $\eta_{np} = 0,41 \div 0,48$  и без УЗК:  $\eta_t = 0,6 \div 0,68$ ;  $\eta_{np} = 0,32 \div 0,42$  (рис. 3.21).

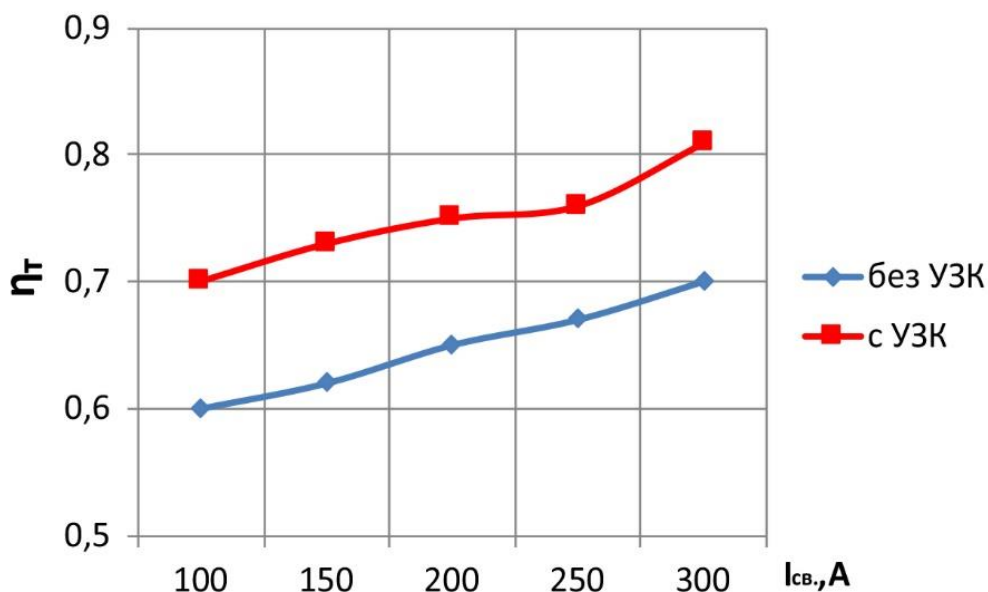


Рисунок 3.20 – Зависимость термического КПД  $\eta_t$  от силы тока дуги  
 ПФИ:  $F_{узк.} = 22,8$  кГц;  $P_{узк.} = 60$  Вт;  $\tau_{обр.} = 3$  мс;  $V_{св.} = 20$  м/ч;  $f = 50$  Гц;  $L_{д.} = 3$  мм;  
 $d_{э.} = 4$  мм; расход газа: 18-20 л/мин

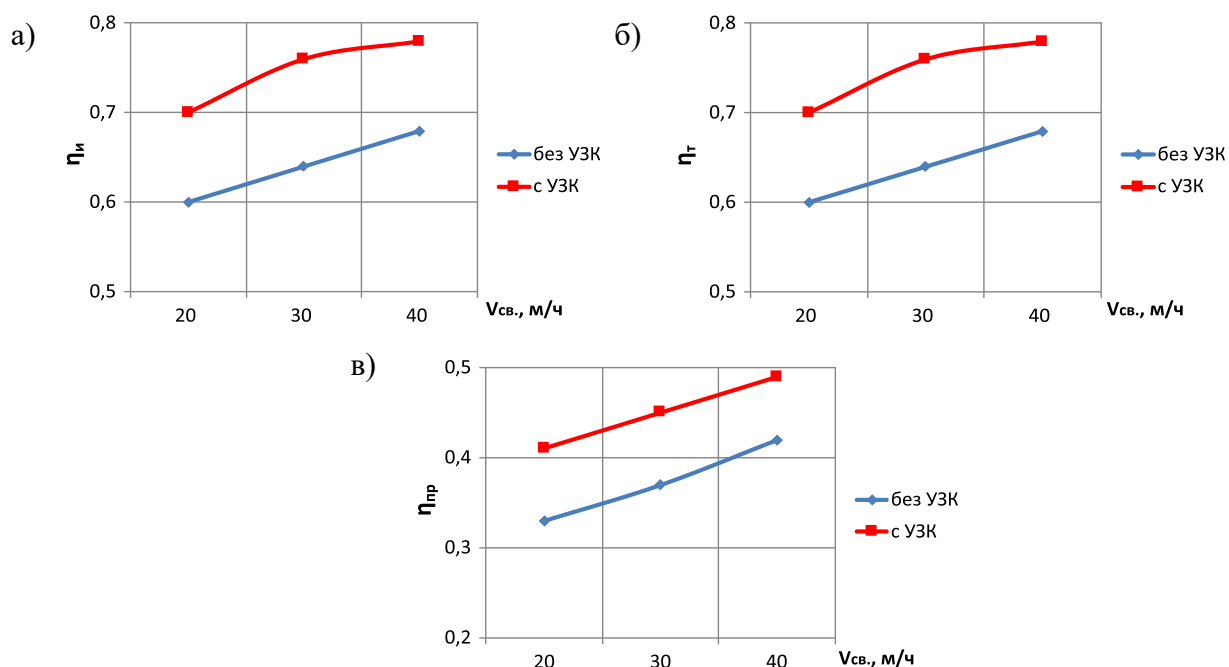
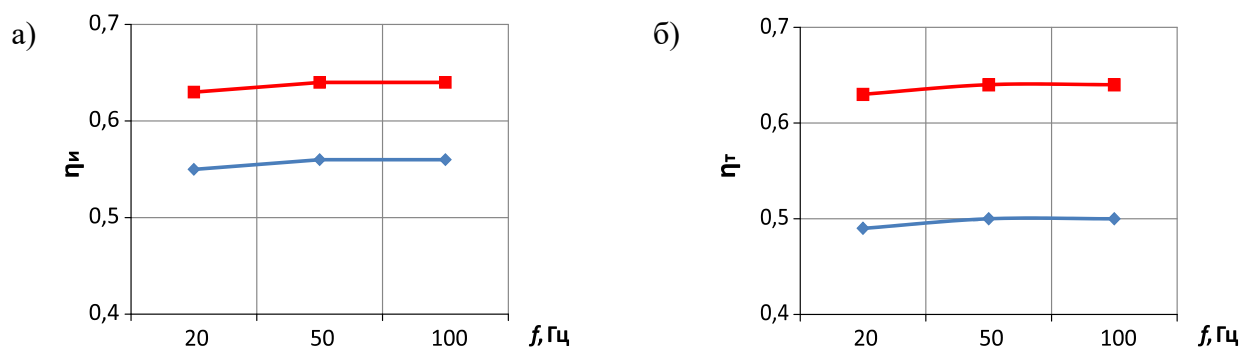


Рисунок 3.21 – Зависимость эффективного (а), термического (б) и полного (в) КПД сварки от скорости перемещения дуги:  $F_{узк.} = 22,8$  кГц;  $P_{узк.} = 60$  Вт;  $\tau_{обр.} = 3$  мс;  $I_{св.} = 100$  А;  $f = 50$  Гц;  $L_{д.} = 3$  мм;  $d_{э.} = 4$  мм; расход газа: 18-20 л/мин

Изменение частоты переменного тока дуги ПФИ с УЗК незначительно влияет на её энергетические характеристики (рисунок 3.22): наблюдаются лишь незначительные отклонения величин  $\eta_t$  и  $\eta_{пр}$  от средних значений. Что касается эффективного КПД  $\eta_{и}$ , то во всем диапазоне изменений частоты (от 20 до 100 Гц) его величина составила  $0,55 \div 0,58$  (при  $I_{св.} = 150$  А). Значительно увеличиваются энергетические характеристики дуги с воздействием ультразвуковых колебаний, эффективный КПД повышается до  $0,62 \div 0,63$ , что на 12% больше, чем при сварке без УЗК.



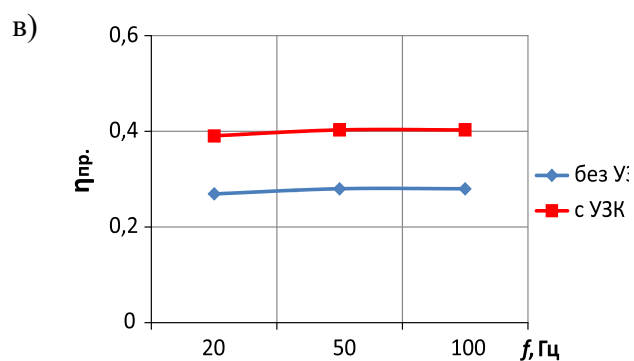


Рисунок 3.22 – Зависимость энергетических характеристик дуги от частоты переменного тока:  $F_{узк.} = 22,8$  кГц;  $P_{узк.} = 60$  Вт;  $I_{св.} = 150$  А;  $\tau_{обр.}/\tau_{пр.} = 15/85\%$ ;

$L_{д.} = 3$  мм;  $d_{э.} = 4$  мм; расход газа: 18-20 л/мин

Таким образом, с воздействием ультразвука процесс сварки более эффективный за счет концентрации теплового потока дуги в изделии. Оптимальным параметром является соотношение  $\tau_{обр.}/T = 0,1-0,15$ , при котором дуга с ПФИ близка к дуге постоянного тока прямой полярности и количество вводимого тепла в пластину больше по сравнению с дугой переменного тока синусоидальной формы, что позволяет получить шов с наибольшим проплавлением.

С целью исследования отдельного влияния длительности импульсов прямой и обратной полярности на эффективный КПД процесса, были проведены эксперименты, при которых фиксировали определенные значения  $\tau_{обр.}$  или  $\tau_{пр.}$  и синхронно изменяли соотношения  $\tau_{обр.}/\tau_{пр.}$  и частоту переменного тока (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Параметры проведения экспериментов

а)	$\tau_{обр.}, мс$	$\tau_{пр.}, мс$	$\tau_{обр.}/T$	$f, Гц$	$T, мс$	
	3		27	0,1	33,33	30
		17	0,15	50	20	
		12	0,2	66,66	15	
		7	0,3	100	10	
б)	$\tau_{пр.}, мс$	$\tau_{обр.}, мс$	$\tau_{обр.}/T$	$f, Гц$	$T, мс$	
	10		2,5	0,2	80	12,5
			6,66	0,4	60	16,66
			10	0,5	50	20

Как видно из рис. 3.23 с увеличением длительности импульсов тока прямой полярности с 5 до 27 мс эффективный КПД дуги возрастает на ~20%. При  $\tau_{пр.}=27$  мс получено наибольшее значение эффективного КПД  $\eta_u=0,72$  (без УЗК); с воздействием ультразвука  $\eta_u$  незначительно повышается до 0,76.

С повышением длительности импульсов тока обратной полярности эффективный КПД сначала резко снижается (при  $\tau_{пр.}=2,5$  мс  $\eta_u=0,55$  – без УЗК; 0,7 – с УЗК; при  $\tau_{пр.}=6$  мс  $\eta_u=0,4$  – без УЗК, 0,51 – с УЗК), а затем с повышением  $\tau_{обр.}$  с 6 до 10 мс практически не меняется.

Таким образом, с воздействием ультразвука процесс проплавления более эффективный за счет большей концентрации теплового потока дуги в изделии. Оптимальным параметром является соотношение  $\tau_{обр.}/T=0,1-0,15$ , при котором дуга с ПФИ близка к дуге постоянного тока прямой полярности и количество вводимого тепла в пластину больше по сравнению с дугой переменного тока синусоидальной формы, что позволяет получить шов с наибольшим проплавлением.

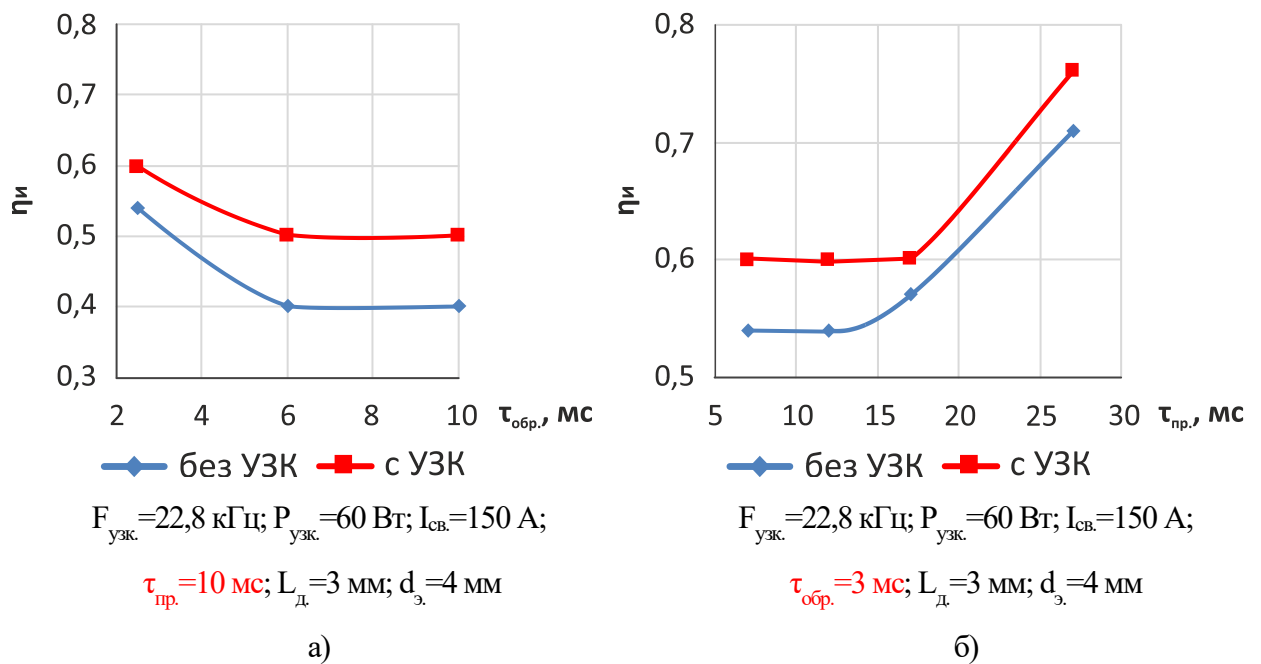


Рисунок 3.23 – Влияние длительности импульсов тока обратной (а) и прямой (б) полярности на эффективный КПД сварки

Учитывая вышесказанное, введение ультразвуковых колебаний в область столба дуги приводит к сжатию, которое вызывает изменение физических свойств дугового разряда, характера и глубины проплавления металла. Описание механизма взаимодействия плазмы с ультразвуковыми колебаниями носит исключительно теоретический характер.

Известно, что звуковая волна представляет собой движение механической вибрации, передаваемой от точки к точке в пространстве. В плазме акустическое поле изменяет состояние посредством столкновения между частицами. Ингард и др. [118; 119] провели углубленное исследование теории по распространению звука в плазме, используя упрощенное уравнение непрерывности нейтрального газа. Уравнение импульса и уравнение плотности энергии выводят уравнение волны давления.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 = \frac{(\lambda - 1)}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.2)$$

где  $p$  - акустическое давление,  $c$  - скорость звука,  $\lambda$  - удельная теплоемкость,  $t$  - время, а  $H$  - скорость преобразования энергии на единицу объема газа.

В обычной сварочной дуге температура электронов выше температуры нейтрального газа. В процессе происходит столкновение нейтральных частиц с электронами, которые неподвижны. Поскольку основная потеря энергии электронами вызвана упругими столкновениями с нейтральными частицами,  $H$  приблизительно равна скорости, с которой электроны получают энергию из внешнего электрического поля.

Также внешние силы будут воздействовать на акустическое поле, и конкретный механизм рассеивания зависит от давления газа и параметров плазмы. Для сварочной дуги электроны и ионы движутся в фазе друг с другом, а плотности электронов, ионов и нейтральных частиц одинаковы.

Повышение плотности нейтральных частиц  $n_n$ , и полная электронная плотность будет  $N_e + n_e = N_e + (N_e/N_n) n_n$ , следовательно, звуковая волна в плазме будет создавать пространственное распределение, и ее интенсивность

пропорциональна амплитуде ультразвука. Введем статическое давление газа  $p_0$  и плотность  $p$  в уравнение:

$$c^2 = \frac{\gamma p_0}{p_0} = \gamma k T_n / m_n \quad (3.3)$$

$$v_e^2 = \frac{3kT_e}{m_e}, \quad (3.4)$$

$T_n$  и  $T_e$  - температуры нейтральной частицы и электрона,  $k$  - постоянная Больцмана, а  $m_n$  - нейтральная масса.

$$p = c^2 m_n n_n = \left(\frac{\gamma n_n}{N_n}\right) p_0 \quad (3.5)$$

Длина звуковой волны определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{F_{УЗК}} \quad (3.6)$$

где  $c$  – скорость распространения волны;  $F_{УЗК}$  – частота ультразвука.

В момент резонанса ультразвук оказывает существенное влияние на среду (в аргоне длина волны  $\lambda \sim 16,1$  мм). Экспериментально установлено, что при частоте ультразвука 22,8 кГц на расстоянии  $\sim 17$  мм от фокусирующей линзы образуется фокальная область, где интенсивность ультразвука будет наибольшей, что при сварке подтверждается возникновением яркой области у электрода. С увеличением дугового промежутка при образовании стоячей волны в областях сжатия интенсивность ультразвука будет выше, чем в области разрежения, что повлияет на свойства дуги.

Таким образом, можно объяснить причину, по которой высота от излучателя УЗК влияет на форму дуги, а незначительные отклонения в полученных данных - без ультразвука и при существовании дуги с УЗК связано с различием свойств среды (температуры и давления).

### Выводы к главе 3

1. Установлено, что вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов имеют в исследованном диапазоне токов возрастающий характер: с ростом тока дуги  $I_{св.}$  напряжение  $U_{np}$ ,  $U_{обр}$ ,  $U_0$

увеличивается. При воздействии ультразвука напряжение на дуге при любых значениях тока на  $1\div 3$  В выше, чем без УЗК, что говорит об увеличении ее тепловой мощности.

2. С ростом  $\tau_{обр}$  напряжение  $U_d$  и  $U_{обр}$  увеличивается, а  $U_{np}$  – уменьшается, с воздействием ультразвуковых колебаний значения напряжения  $U_{np}$ ,  $U_{обр}$  и  $U_d$  больше на  $1\div 2$  В, чем без них при любых значениях  $\tau_{обр}$ .

3. С воздействием ультразвуковых колебаний дуга сжимается на 30-50%, что приводит к повышению плотности тока. Однако, с ростом силы тока эффективность влияния ультразвука незначительно снижается из-за увеличения тепловой мощности дуги.

4. Показано, что при значениях  $P_{узк}$  от 20 до 120 Вт дуга сжимается без нарушения её пространственной устойчивости. При мощности ультразвука более 140 Вт происходит ее отклонение от оси электрода, что приводит к нарушению формирования швов.

5. С увеличением  $\tau_{обр}$  эффективный КПД снижался, поскольку большое количество энергии при этом передается электроду. Полученные значения эффективного КПД дуги находились в диапазоне  $0,4\div 0,6$ . При всех значениях  $\tau_{обр}$  эффективный КПД  $\eta_u$  у дуги с воздействием ультразвуковых колебаний увеличивался на 5 ... 12%, что обусловлено повышением пространственной устойчивости и сжатием дугового разряда, и приводит к росту глубины проплавления при сварке алюминия и сплава АМц в 1,3-1,5 раза.

6. С воздействием ультразвука значения термического КПД увеличиваются на 5 ... 15% (в зависимости от длительности импульсов тока обратной полярности), что в итоге приводит к увеличению производительности на 30-40%.

## Глава 4 Технологические характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов (ПФИ)

### 4.1 Силовое воздействие дуги переменного тока с воздействием ультразвука

Известно, что проплавляющая способность дуги определяется не только тепловыми характеристиками, но и силовым воздействием на сварочную ванну. По этой причине при рассмотрении технологических характеристик дуги определенный интерес представляет величина силового воздействия на сварочную ванну и зависимость ее от параметров горения дуги и ультразвуковых колебаний. Для оценки интегрального давления дуги на свариваемый металл были поставлены эксперименты, методика которых изложена в главе 2.

Силовым воздействием дуги на расплавленный металл сварочной ванны можно управлять, изменяя не только вид защитного газа, конструкцию рабочего участка электрода, но и воздействуя на дугу сфокусированными ультразвуковыми колебаниями различной мощности, что приводит к значительному изменению давления дуги на жидкий металл сварочной ванны.

В ходе экспериментов электрическая мощность, потребляемая генератором, изменялась от 20 до 200 Вт. Расход газа равнялся 18 л/мин. Расстояние между торцом электрода и пластиной составляло  $l_0 = 3$  мм. Рабочий участок электрода затачивался на полусферу. Применение фокусирующей плосковогнутой линзы как излучателя ультразвуковых колебаний требует точного позиционирования пучка УЗК на поверхности пластины, поэтому расстояние от пластины до поверхности излучателя составило 20 мм, равное фокусному расстоянию. На рисунке 4.1 представлена зависимость силового воздействия дуги переменного тока от мощности ультразвука.

Установлено, что при мощности ультразвуковых колебаний  $P_{\text{узк.}} \sim 20$  Вт, давление  $p$  достигает значения  $29,3 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ , а увеличение мощности приводит практически к линейному росту давления и достигает максимального значения  $38,5 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$  при 100 Вт.

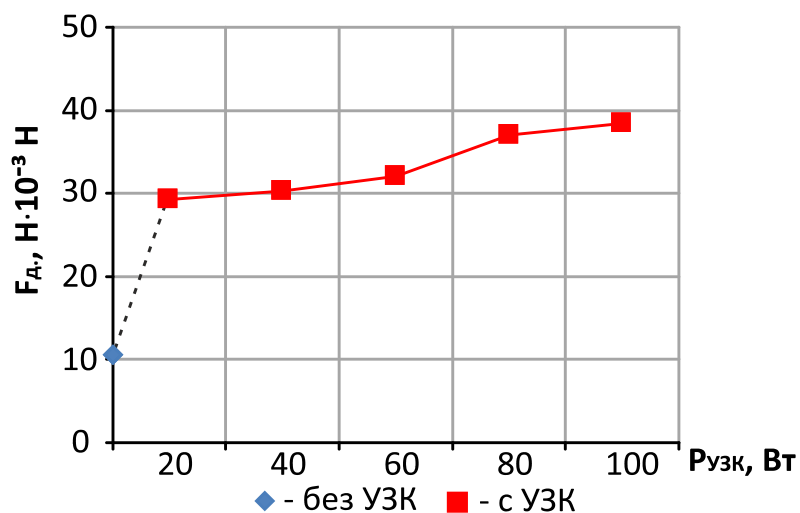


Рисунок 4.1 – Зависимость силового воздействия от мощности УЗК

$$F_{uzk} = 22,8 \text{ кГц}; f = 50 \text{ Гц}; I_{св.} = 150 \text{ А}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; L_d = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

Ранее было установлено, что наибольшая интенсивность УЗК получена при мощности ультразвука 60 Вт, по этой причине в большинстве экспериментов устанавливалось данное значение  $P_{uzk}$ . Увеличение мощности ультразвуковых колебаний с 20 до 100 Вт приводит к повышению давления высокочастотных волн на ~20%.

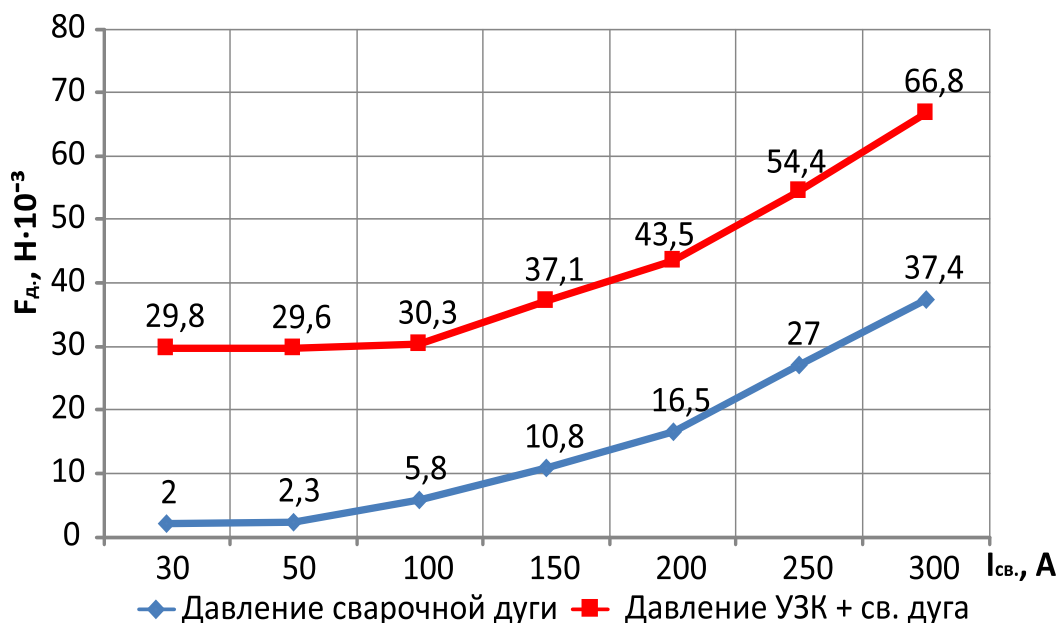


Рисунок 4.2 – Зависимость силового воздействия дуги от величины тока

$$F_{uzk} = 22,8 \text{ кГц}; f = 50 \text{ Гц}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

Измерение силового воздействия дуги (рис. 4.2) показало, что при силе

тока 30 А  $F_d$  на поверхность пластины без ультразвука  $\approx 2 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ . Существенно повышается значение силового действия дуги ( $37,4 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ ) при силе тока 300 А. Данное значение было максимальным для выбранного диаметра электрода, поэтому дальнейшее увеличение тока не дало бы точных значений.

При  $I_{св} = 30$  А при воздействии ультразвуковых колебаний давление значительно увеличилось до  $29,8 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ , а при  $I_{св} = 300$  А увеличивается в  $\sim 2$  раза  $66,8 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ . На рис. 4.3 представлено силовое воздействие по отдельности: давление сварочной дуги; давление ультразвуковых колебаний (без горения дуги) и при совместном воздействии дуги и акустического поля.

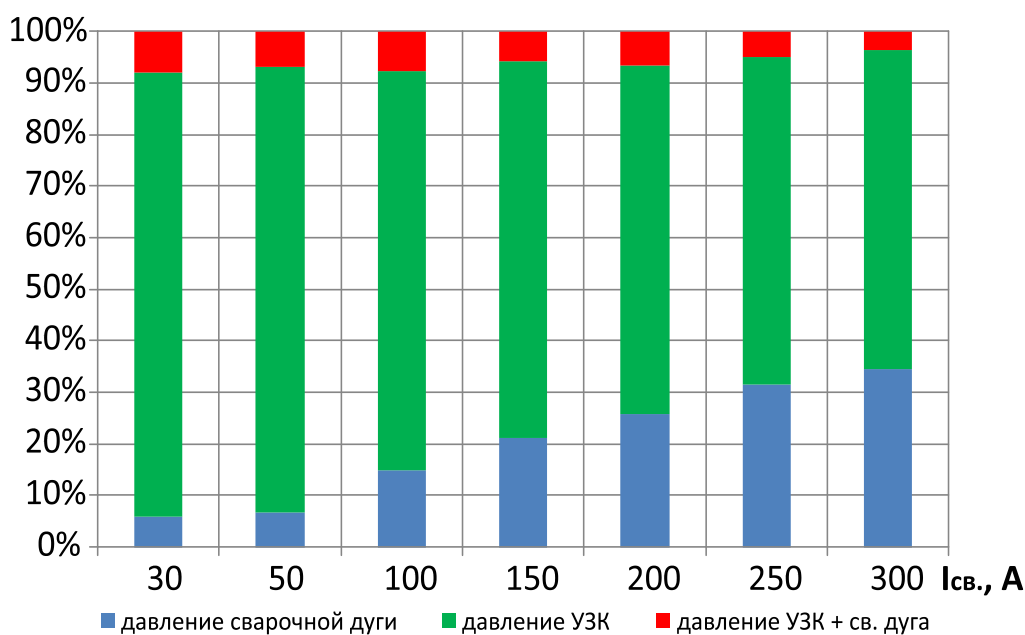


Рисунок 4.3 – Соотношение давлений от сварочной дуги, УЗК и их совместного действия к полному давлению дуги:  $F_{узк} = 22,8 \text{ кГц}$ ;  $P_{узк} = 60 \text{ Вт}$ ;

$$f = 50 \text{ Гц}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; d_{э} = 4 \text{ мм}$$

Было обнаружено, что при совместном воздействии дуги и ультразвука силовое воздействие всегда больше на 5-10%, чем их сумма по отдельности (рис. 4.3). Прирост давления дуги, по-видимому, является следствием ускорения частиц в дуговом разряде под действием ультразвуковых колебаний, при котором увеличивается теплопередача, а значит и термосиловое воздействие дуги.

При сварке на переменном токе с ПФИ силовое воздействие дуги зависит не только величины тока, но и от длительности импульсов тока обратной

полярности. Как видно, интегральное давление дуги на сварочную ванну  $F_d$  составляет несколько граммов (в исследованном диапазоне токов) и зависит как от величины тока дуги, так и от длительности импульса обратной полярности  $\tau_{обр}$ . С ростом  $\tau_{обр}$  силовое воздействие дуги  $F_d$  уменьшается, причем зависимость  $F_d = f(\tau_{обр})$  может быть выражена уравнением прямой:

$$F_d = a - b\tau_{обр}.$$

где величина  $a$  соответствует интегральному давлению дуги при  $\tau_{обр} = 0$  (то есть дуги постоянного тока прямой полярности), а коэффициент  $b$  представляет собой тангенс угла наклона прямой к оси  $\tau_{обр}$  и определяет скорость уменьшения  $F_d$  с ростом  $\tau_{обр}$ .

Измерение силового действия дуги при различной  $\tau_{обр}$  (рис. 4.4) показало, что при  $\tau_{обр}=2$  мс давление на поверхность пластины составляет  $11,6 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ , а при воздействии ультразвука оно увеличивается  $\sim 3$  раза. При  $\tau_{обр}=10$  мс силовое воздействие составило  $8,6 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ , при воздействии ультразвуковых колебаний оно увеличилось до  $25,22 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ .

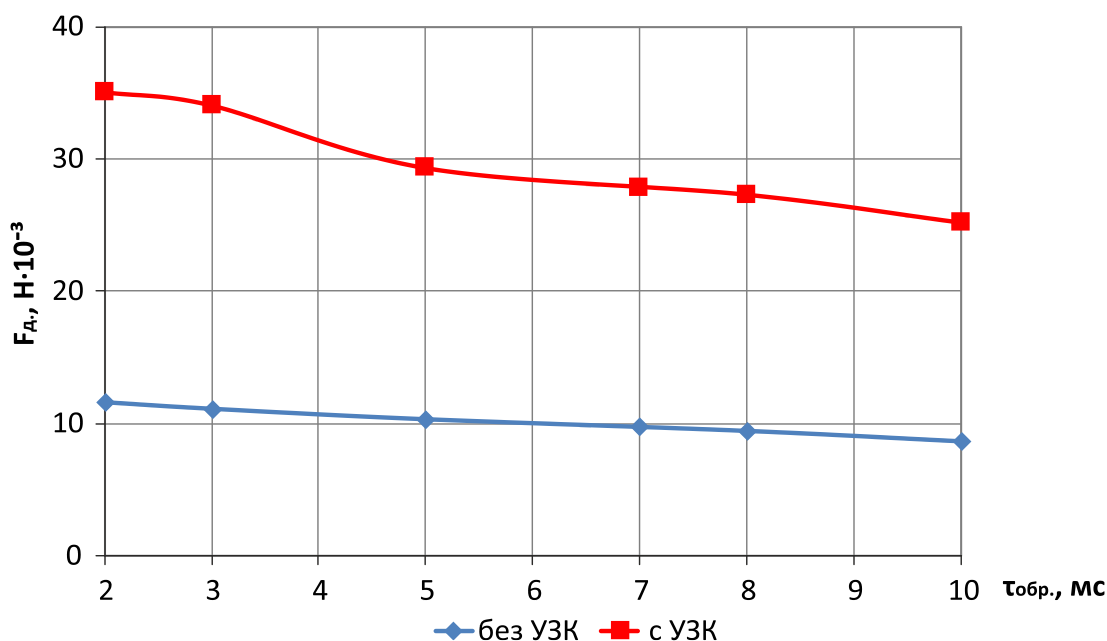


Рисунок 4.4 – Влияние УЗК на силовое воздействие дуги при различной длительности импульсов тока обратной полярности:  $F_{узк.} = 22,8 \text{ кГц}$ ;  $I_{св.} = 150 \text{ А}$ ;

$P_{узк.} = 60 \text{ Вт}$ ;  $f = 50 \text{ Гц}$ ;  $L_d = 3 \text{ мм}$ ;  $d_э = 4 \text{ мм}$ ; расход газа  $18 \text{ л/мин}$

По графику видно, что с увеличением  $\tau_{обр.}$  происходит уменьшение давления дуги на сварочную ванну, что является одной из причин снижения глубины проплавления при сварке алюминия и сплава АМц с ростом длительности импульсов тока обратной полярности, причем при воздействии УЗК уменьшение  $F_d$  с повышением  $\tau_{обр.}$  более значительно, чем без них.

Исследование влияния ультразвука на силовое воздействие дуги при различной частоте переменного тока показало, что как с УЗК, так и без них силовое воздействие  $F_d$  практически не меняется с увеличением частоты переменного тока (рис. 4.5). Однако с воздействием ультразвука давление дуги на сварочную ванну  $\approx$  в 2,8-3 раза выше, чем без УЗК при всех значениях  $f$ .

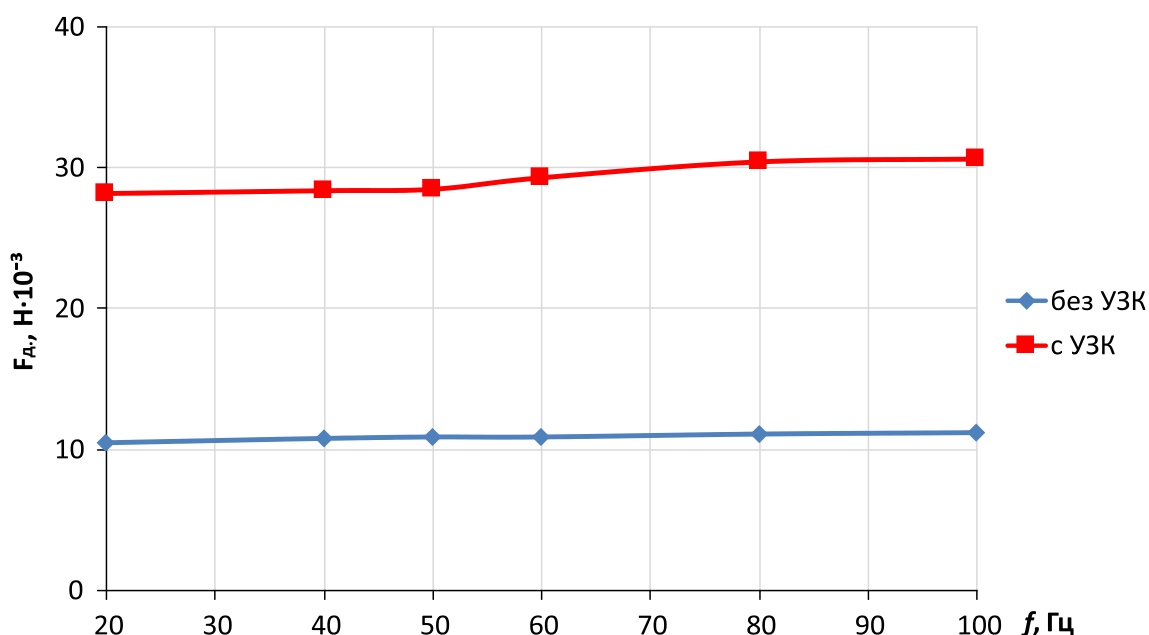


Рисунок 4.5 – Зависимость силового воздействия дуги от частоты переменного тока

$$F_{узк.} = 22,8 \text{ кГц}; P_{узк} = 60 \text{ Вт}; I_{св.} = 150 \text{ А}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; L_d = 3 \text{ мм}; d_э = 4 \text{ мм}$$

Эксперименты по исследованию влияния  $I_{обр.}$  на  $F_d$  показали, что с увеличением амплитуды импульсов тока обратной полярности силовое воздействие увеличивается. Без воздействия ультразвука при  $I_{обр.}/I_{пр.} = 75/150 \text{ А}$  давление дуги составило  $8,6 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ , а с воздействием УЗК  $F_d = 26,5 \text{ Н} \cdot 10^{-3}$ . При всех значения  $I_{обр.}$  давление дуги с УЗК больше  $\approx$  в 3 раза, чем без них (рис. 4.6).

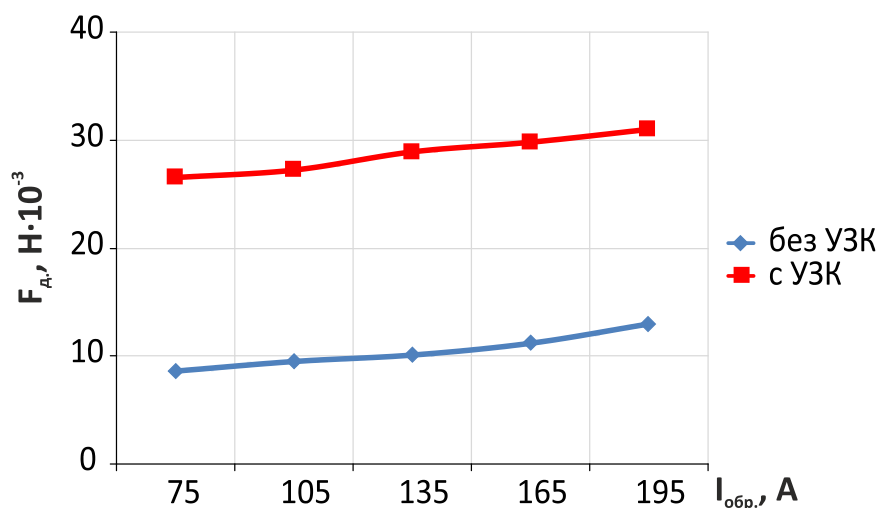


Рисунок 4.6 – Зависимость силового воздействия дуги от амплитуды импульсов тока обратной полярности  $F_{узн.} = 22,8$  кГц;  $P_{узн.} = 60$  Вт;  $I_{пр.} = 150$  А;

$f = 50$  Гц;  $\tau_{обр.} = 3$  мс;  $L_{д.} = 3$  мм;  $d_{э.} = 4$  мм; расход газа 18 л/мин

#### 4.2 Проплавливающая способность дуги переменного тока с неплавящимся электродом при воздействии на нее ультразвуковых колебаний

Специфические свойства алюминия, обусловившие широкое распространение его сплавов в качестве конструкционных материалов, в значительной мере определяют и проблемы их сварки. Легкая окисляемость алюминия в твердом и расплавленном состоянии обуславливает существенные затруднения при сварке, поскольку образующаяся тугоплавкая пленка окиси алюминия препятствует формированию шва и служит источником неметаллических включений в металле шва. Для удаления оксидной пленки сварка производится на переменном токе.

Дуга переменного тока с ПФИ, помимо обычных параметров, характеризующих режим горения дуги (сила тока и напряжение), имеет специфические параметры: длительность импульсов прямой  $\tau_{пр.}$  и обратной  $\tau_{обр.}$  полярностей, амплитуда токов в импульсах прямой  $I_{д. пр.}$  и обратной  $I_{д. обр.}$  полярностей, частота тока  $f$ . По этой причине при исследовании дуги ПФИ основное влияние уделялось влиянию перечисленных специфических параметров на её энергетические и технологические характеристики (глубина

проплавления, ширина, формирование, качество катодной очистки).

Зависимость глубины проплавления  $h$  от скорости перемещения дуги ПФИ  $V_{св}$  (скорости сварки) не отличается в целом от аналогичной зависимости для дуг переменного синусоидального и постоянного тока и имеет убывающий характер с увеличением скорости сварки (рис. 4.7).

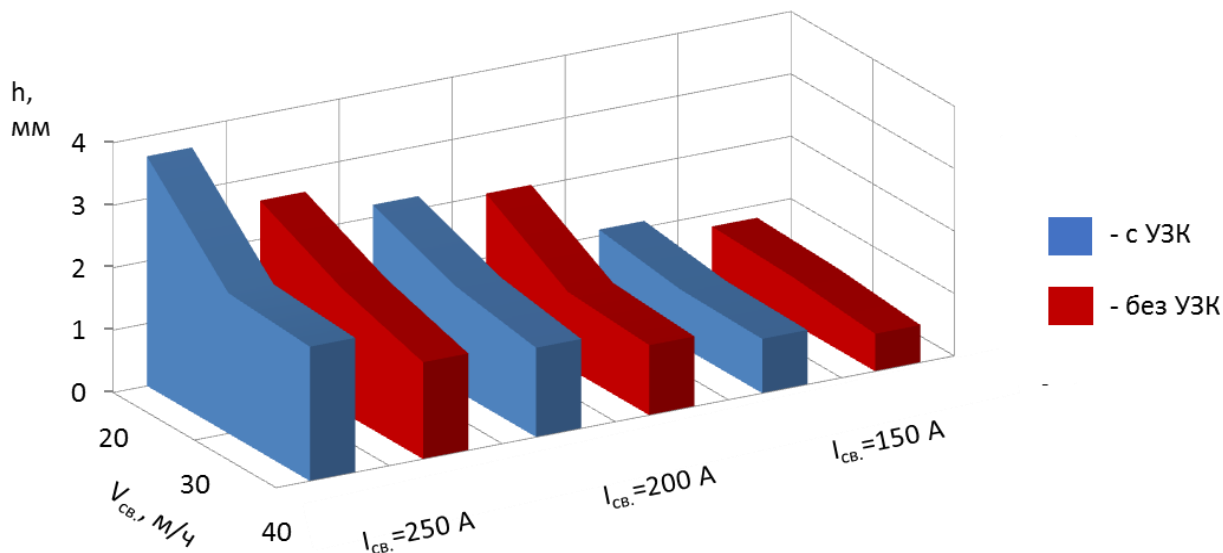


Рисунок 4.7 - Зависимость глубины проплавления от скорости сварки:

$$F_{узк.} = 22,8 \text{ кГц}; P_{узк.} = 60 \text{ Вт}; f = 50 \text{ Гц}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм};$$

расход газа 18-20 л/мин; материал АМц;  $\delta_{Al} = 10 \text{ мм}$

Следует отметить, что на проплавляющую способность дуги ПФИ влияет соотношение длительностей импульсов  $\tau_{пр.}$  и  $\tau_{обр.}$ . Так, при весьма малых значениях  $\tau_{обр.}$  отмечается как высокая стойкость электродов, так и хорошая проплавляющая способность дуги (рис. 4.9). Однако в большинстве случаев такие режимы неприемлемы по причине низкого качества катодной очистки свариваемой поверхности.

Когда изделие является катодом, происходит разрушение оксидной пленки  $Al_2O_3$  положительными ионами плазмы дуги [7, 8]. Без воздействия ультразвука требуемое качество катодной очистки наблюдается при относительной длительности импульсов тока обратной полярности  $\tau_{обр.}/(\tau_{пр.} + \tau_{обр.})$  не менее 0,15. Без УЗК при  $\tau_{обр.} \leq 0,15$  формирование шва и качество катодной очистки плохое

(рис. 4.8, а), в то время как с воздействием ультразвука оно существенно улучшается (рис. 4.8, б).

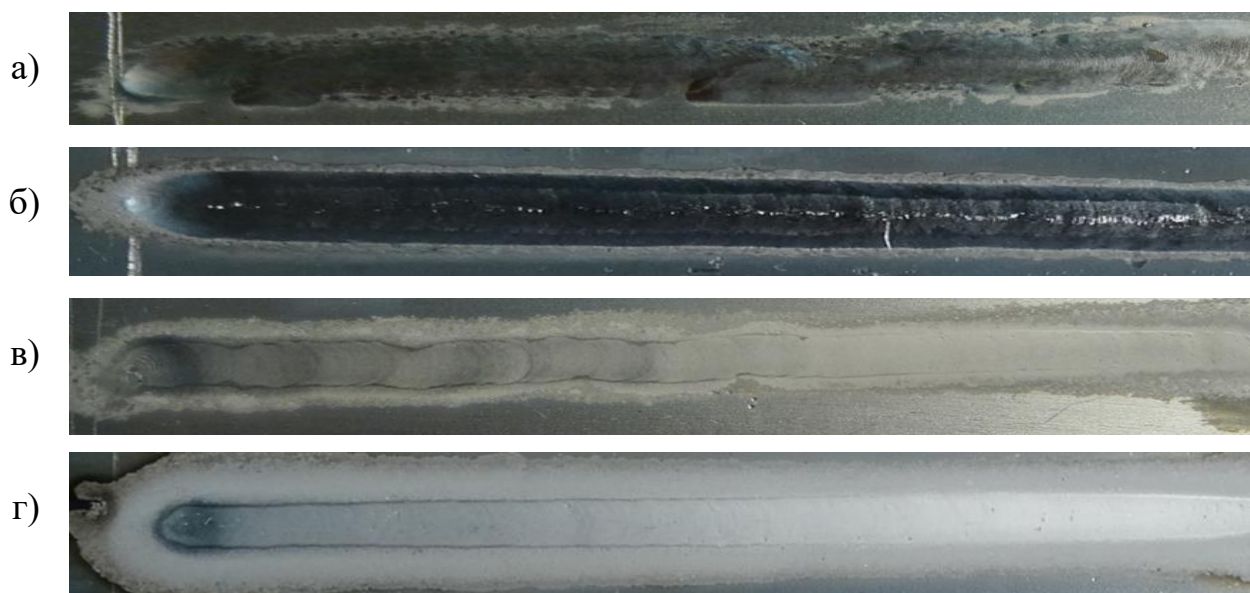


Рисунок 4.8 - Влияние ультразвука на качество катодной очистки:

$F_{УЗК}=22,8$  кГц;  $P_{УЗК}=60$  Вт;  $I_{св.}=150$  А; (а, б) -  $\tau_{обр.}=2$  мс; (в, г) -  $\tau_{обр.}=8$  мс;  $f=50$  Гц,  
 $d_{эл.}=4$  мм; а, в – без УЗК; б, г – с УЗК

Длительность обратной полярности также влияет на глубину проплавления  $h$  (рис. 4.9). Так, с ростом длительности импульсов обратной полярности с 2 до 8 мс (при частоте переменного тока 50 Гц) ширина шва снижается на 25%, а глубина проплавления более чем в 2 раза, как с УЗК, так и без УЗК. В случае использования ультразвука при любых значениях  $\tau_{обр.}$  глубина проплавления выше, чем без УЗК (при  $\tau_{обр.}=5-8$  мс более чем на 40%), качество формирования шва при этом также повышается.

Второй из специфических параметров дуги ПФИ – частота импульсов тока  $f$  на проплавляющую способность влияет незначительно (рис. 4.10). При изменении частоты от 20 до 100 Гц глубина ( $h$ ) и ширина ( $e$ ) проплавлений не изменяются или изменяются незначительно. С увеличением частоты прохождения импульсов переменного тока наблюдается незначительное уменьшение ширины шва как с УЗК, так и без УЗК. При использовании

ультразвуковых колебаний ширина шва и глубина проплавления выше этих показателей, чем при сварке без УЗК при различных значениях  $f$ .

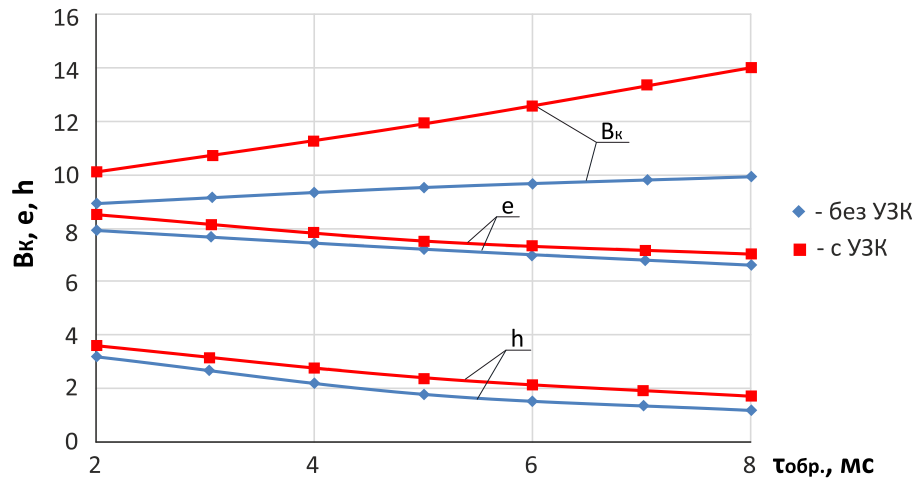


Рисунок 4.9 – Зависимость глубины проплавления ( $h$ ), ширины шва ( $e$ ) и ширины зоны катодной очистки ( $B_k$ ) от длительности импульса обратной полярности:

$$F_{\text{УЗК}}=22,8 \text{ кГц}; P_{\text{УЗК}}=60 \text{ Вт}; I_{\text{св.}}=150 \text{ А}; V_{\text{св.}}=20 \text{ м/ч}; f=50 \text{ Гц}, d_{\text{эл.}}=4 \text{ мм}$$

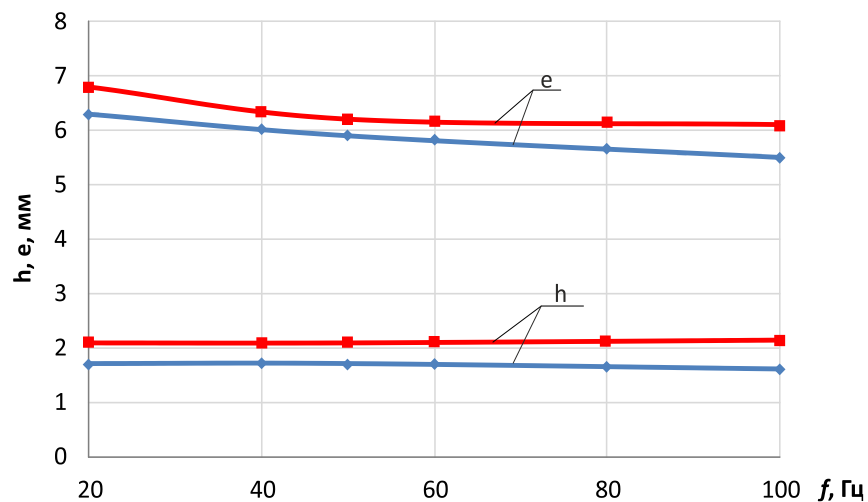


Рисунок 4.10 – Зависимость глубины ( $h$ ) и ширины ( $e$ ) проплавления при различной частоте переменного тока:  $F_{\text{УЗК}}=22,8 \text{ кГц}; P_{\text{УЗК}}=60 \text{ Вт}; I_{\text{св.}}=150 \text{ А};$

$$\tau_{\text{обр.}}=3 \text{ мс}; L_{\text{д.}}=3 \text{ мм}; d_{\text{э.}}=4 \text{ мм}; \text{расход газа } 18\text{-}20 \text{ л/мин}; \text{материал АМц}; \delta_{\text{Ал}}=4 \text{ мм}$$

Наименее исследованным параметром сварки является амплитуда импульсов тока обратной полярности  $I_{\text{обр.}}$ . Результаты экспериментов показали, что с увеличением амплитуды тока в импульсах обратной полярности более чем в 2,5 раза (с 75 до 195 А)

глубина проплавления и ширина шва повысились незначительно ( $e$  – с 4,5 до 5,1 мм;  $h$  – с 1,2 до 1,5 мм без УЗК;  $e$  – с 5,5 до 6,1 мм;  $h$  – с 1,8 до 2,6 мм – с УЗК), величина  $\tau_{обр.}$  составляла 3 мс при частоте тока 50 Гц), (рис. 4.11).

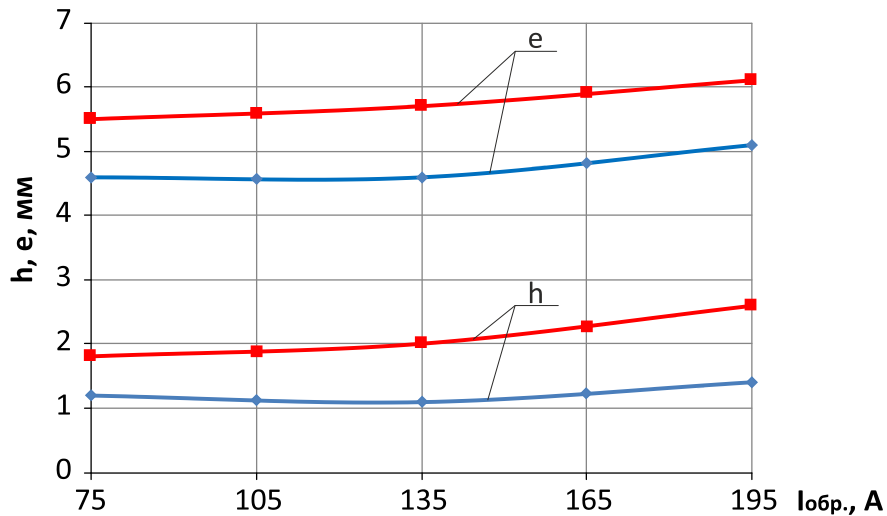


Рисунок 4.11 – Зависимость глубины ( $h$ ) и ширины ( $e$ ) проплавления при различной амплитуде импульсов тока обратной полярности:  $F_{узк.} = 22,8$  кГц;

$$P_{узк.} = 60 \text{ Вт}; I_{пр.} = 150 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; \tau_{обр.} = 3 \text{ мс}; L_{д.} = 3 \text{ мм}; d_{э.} = 4 \text{ мм}$$

Таким образом, с ростом длительности импульсов обратной полярности с 2 до 8 мс (при частоте переменного тока 50 Гц) ширина шва снижается ~ на 25%, а глубина проплавления более чем в 2 раза, как с УЗК, так и без УЗК. В случае использования ультразвука при любых значениях  $\tau_{обр.}$  глубина проплавления выше, чем без УЗК (при  $\tau_{обр.} = 8$  мс более чем на 40%), качество формирования шва при этом также повышается.

С увеличением частоты прохождения импульсов переменного тока наблюдается уменьшение ширины шва как с УЗК, так и без УЗК. При использовании ультразвуковых колебаний ширина шва и глубина проплавления выше этих показателей, чем при сварке без УЗК при различных значениях  $f$ .

### 4.3 Формирование швов при сварке неплавящимся электродом

Влияние сфокусированных ультразвуковых колебаний на качество

формирования сварных швов исследовали посредством проплавления пластин, методика проведения экспериментов описана в главе 2.

Критерием оценки качества формирования швов являлось отсутствие дефектов (подрезов глубиной  $>0,5$  мм, бугров и раковин и т.д.), (рисунок 4.12).

Как известно, в случае сварки неплавящимся электродом на постоянном токе прямой полярности сталей уже при силе тока 300 А и скорости сварки 25 м/ч образуется нарушение формирования шва и появляются дефекты в виде подрезов, бугров, раковин и т.д. Это является следствием чрезмерного силового воздействия дуги непосредственно под осью электрода, а также отставания активного пятна на изделии и, как следствие, отклонения дуги в хвостовую часть ванны.

На основе предположений, что дуга переменного тока с минимальными длительностями обратной полярности по своим свойствам приближена к дуге постоянного тока прямой полярности, были проведены эксперименты по наблюдению за формированием шва. Как видно из рис. 8, на высоких значениях тока (300 А) и скорости сварки (25 м/ч) при небольшой длительности  $\tau_{обр.}$  (3 мс) без применения УЗК наблюдается нарушение формирования шва. Воздействие на дугу ультразвуковых колебаний мощностью 20-100 способствует стабилизации активного пятна на поверхности алюминиевого сплава, отсутствию отклонения дуги от оси электрода и, в итоге, качественному формированию шва. Однако дальнейшее увеличение мощности ультразвуковых колебаний  $P_{УЗК} \geq 140$  Вт приводит к тому, что происходит отклонение дуги от оси электрода, и блуждание её активного пятна на поверхности изделия, что служит причиной появления дефектов (рис. 4.12).



без УЗК

$P_{УЗК}=60$  Вт

$P_{УЗК}=200$  Вт

Рисунок 4.12 – Формирование шва на критических режимах сварки:

$F_{узк.} = 22,8$  кГц;  $P_{узк.} = 60$  Вт;  $I_{св.} = 300$  А;  $f = 50$  Гц;  $\tau_{обр.} = 3$  мс;  $L_{д.} = 3$  мм;  $d_{э.} = 4$  мм;

расход газа 18-20 л/мин; материал: АМц;  $\delta_{Al} = 10$  мм

При воздействии ультразвука в область столба дуги при сварке улучшается формирование сварного шва. Для подтверждения этого факта проведен эксперимент, который заключается в следующем. Был выбран режим, при котором гарантировано будет нарушение формирования шва (рис. 4.12). С началом сварки без ультразвука наблюдалось нарушение формирования шва, имело место образование бугров, кратеров (4.12, а), после включения ультразвукового преобразователя наблюдалось качественное формирование шва (рис. 4.12, б). Так же сварку проводили в обратном порядке (сначала - дуга с УЗК).

Были проведены эксперименты по влиянию мощности ультразвука на формирование швов (рис. 4.13) и глубину проплавления (рис. 4.14). Наибольшее значение глубины проплавления получено при мощности ультразвука 60 Вт. При мощности ультразвука 100 Вт глубина проплавления увеличивается по сравнению со сваркой без УЗК, однако она меньше, чем при  $P_{\text{УЗК}}=60$  Вт.

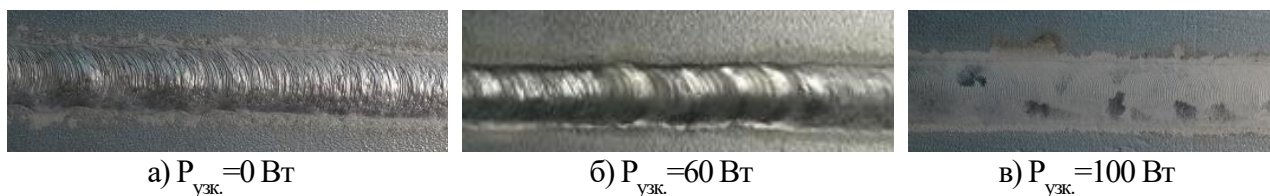


Рисунок 4.13 – Влияние мощности УЗК на формирование шва:

$F_{\text{узк.}}=22,8$  кГц;  $I_{\text{св.}}=250$  А;  $V_{\text{св.}}=20$  м/ч;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $L_{\text{д.}}=3$  мм;  $d_{\text{э.}}=4$  мм;

расход газа 18-20 л/мин; материал АМц;  $\delta_{\text{Ал}}=10$  мм

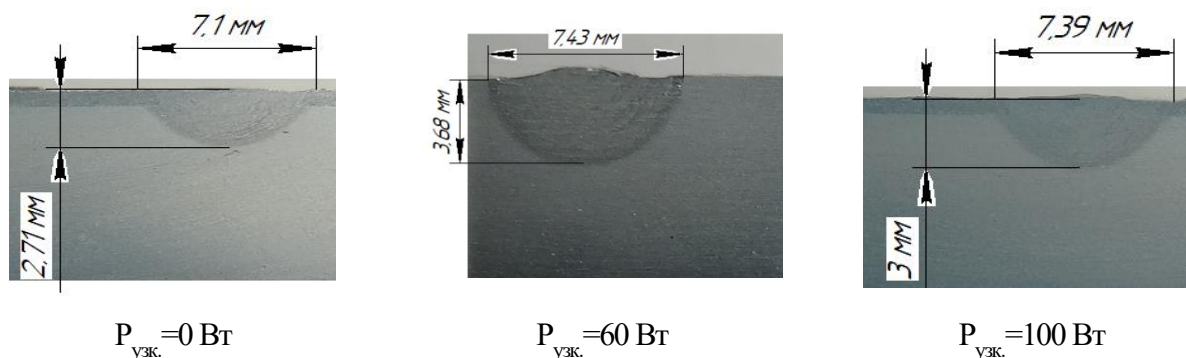


Рисунок 4.14 – Макрошлифы проплавлений:  $F_{\text{узк.}}=22,8$  кГц;  $I_{\text{св.}}=250$  А;

$V_{\text{св.}}=20$  м/ч;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $L_{\text{д.}}=3$  мм;  $d_{\text{э.}}=4$  мм; расход газа 18-20 л/мин;

материал - АМц;  $\delta_{\text{Ал}}=10$  мм

Наиболее распространенной проблемой при сварке алюминия и его сплавов является пористость шва. Главной причиной пористости считается водород, абсорбированный флюсами, покрытием электродов, поверхностью основного металла и электродной проволоки, содержащийся в окисной пленке и в защитном газе. Избыток газообразного водорода в шве объясняется его повышенной растворимостью в расплавленном алюминии и гораздо меньшей растворимостью в кристаллизующемся металле. Пористость снижает прочностные характеристики сварных соединений, причем с повышением прочности алюминиевых сплавов отрицательное влияние пористости увеличивается. Кроме того, пористость может снижать коррозионную стойкость соединений, способствуя развитию язвенной коррозии. При сварке неплавящимся электродом пористость швов значительно меньше, чем при сварке плавящимся электродом.

На рисунке 4.15 представлено проплавление пластины из технического алюминия марки А7. Видно, что без воздействия ультразвуковых колебаний образуется большое количество пор, в то время как с ультразвуком значительно улучшается формирование (поры и другие дефекты отсутствуют).



без УЗК

с УЗК

Рисунок 4.15 – Формирование шва при сварке А7:  $F_{\text{узк.}}=22,8$  кГц;  $P_{\text{узк.}}=60$  Вт;  $I_{\text{св.}}=250$  А;  $V_{\text{св.}}=20$  м/ч;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $L_{\text{д.}}=3$  мм;  $d_{\text{э.}}=4$  мм; расход газа 18-20 л/мин

Как было отмечено в главе 3 проплавляющая способность дуги зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, наибольшая глубина проплавления получена на частоте УЗК 22,8 и 25,2 кГц и электрической мощности потребляемой генератором  $P_{\text{узк.}}=60$  Вт.

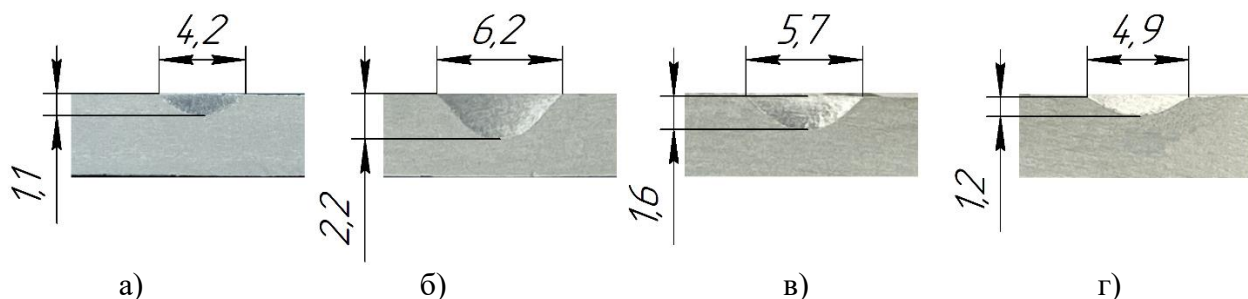


Рисунок 4.16 – Макрошлифы проплавлений, выполненных без УЗК (а); при мощности УЗК 20 (б), 60 (в) и 100 Вт (г);  $F_{\text{узк}}=20,8$  кГц;  $I_{\text{св.}}=150$  А;  $V_{\text{св.}}=20$  м/ч;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $L_{\text{д.}}=3$  мм;  $d_{\text{э.}}=4$  мм; расход газа 18-20 л/мин

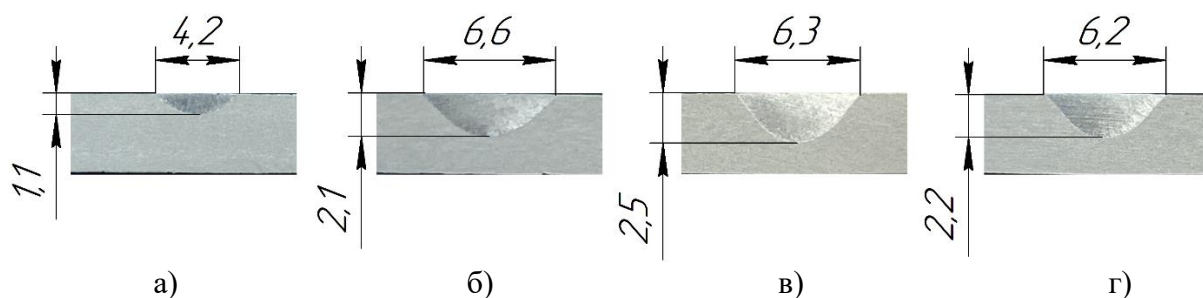


Рисунок 4.17 – Макрошлифы проплавлений, выполненных без УЗК (а); при мощности УЗК 20 (б), 60 (в) и 100 Вт (г);  $F_{\text{узк}}=22,8$  кГц;  $I_{\text{св.}}=150$  А;  $V_{\text{св.}}=20$  м/ч;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $L_{\text{д.}}=3$  мм;  $d_{\text{э.}}=4$  мм; расход газа 18-20 л/мин

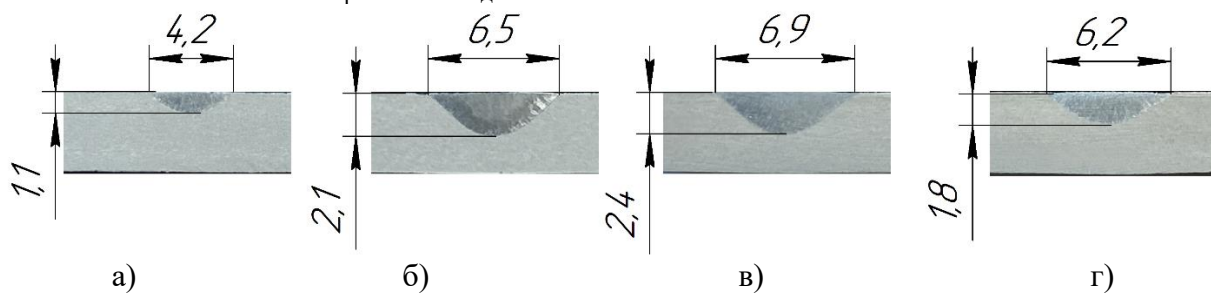


Рисунок 4.18 - Макрошлифы проплавлений, выполненных без УЗК (а); при мощности УЗК 20 (б), 60 (в) и 100 Вт (г);  $F_{\text{узк}}=25,2$  кГц;  $I_{\text{св.}}=150$  А;  $V_{\text{св.}}=20$  м/ч;  $f=50$  Гц;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $L_{\text{д.}}=3$  мм;  $d_{\text{э.}}=4$  мм; расход газа 18-20 л/мин

На рис. 4.16 – 4.18 представлены макрошлифы проплавлений, выполненных на различных частотах значениях мощности и частоты ультразвуковых колебаний. Как видно, при  $F_{\text{узк}}=20,8$  кГц максимальная глубина проплавления  $h_{\text{пр}}$  наблюдается при  $P_{\text{узк}}=20$  Вт, с увеличением мощности УЗК до 100 Вт  $h_{\text{пр}}$  снижается практически в 2 раза, а ширина шва уменьшилась  $\approx$  на 16% (рис. 4.16). На частотах УЗК 22,8 и 25,2 кГц наибольшая проплавляющая

способность дуги зафиксирована на мощности 60 Вт и составила 2,38 и 2,35 мм, соответственно, что на 15-25 % больше, чем при  $P_{УЗК} = 100$  Вт (рис. 4.16; 4.18).

Необходимо отметить, что параметры проплавлений, выполненных с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, значительно превосходят таковые без применения УЗК на любых режимах (в случае применения резонансных частот глубина проплавления повышается в 2,4 раза, ширина – до 1,5 раз).

#### **4.5 Стойкость неплавящихся электродов**

Как было отмечено выше, на проплавляющую способность дуги с ПФИ существенно влияет соотношение длительностей импульсов  $\tau_{пр.}$  и  $\tau_{обр.}$ . При малых значениях  $\tau_{обр.}$ , отмечается как высокая стойкость электродов, так и хорошая проплавляющая способность дуги. Однако, без воздействия ультразвука, швы получаются с плохим качеством катодной очистки. При относительно невысоком значении сварочного тока 100 А и длительности обратной полярности более 8 мс при частоте переменного тока 50 Гц, существенно снижается стойкость электрода, происходит нарушение геометрии рабочего участка. Последующее повышение длительности импульсов тока обратной полярности существенно снижает значение критического тока.

В ходе проведения экспериментов было обнаружено, что с воздействием ультразвуковых колебаний в момент обратной полярности у электрода образуется область разрежения, которая снижает температуру его рабочего участка. Проведенные эксперименты на постоянном токе обратной полярности по определению падения напряжения в анодной области показали, что с воздействием ультразвука значение  $U_a$  уменьшалось на 0,5 ... 0,7 В (рис. 4.19). По-видимому, снижение значения напряжения в области разрежения связано с уменьшением плотности заряженных частиц (при неизменном токе это соответствует уменьшению омического падения напряжения  $U=I \cdot R$ , где  $R$  растёт из-за снижения плотности заряженных носителей), что в итоге снижает температуру рабочего участка электрода.

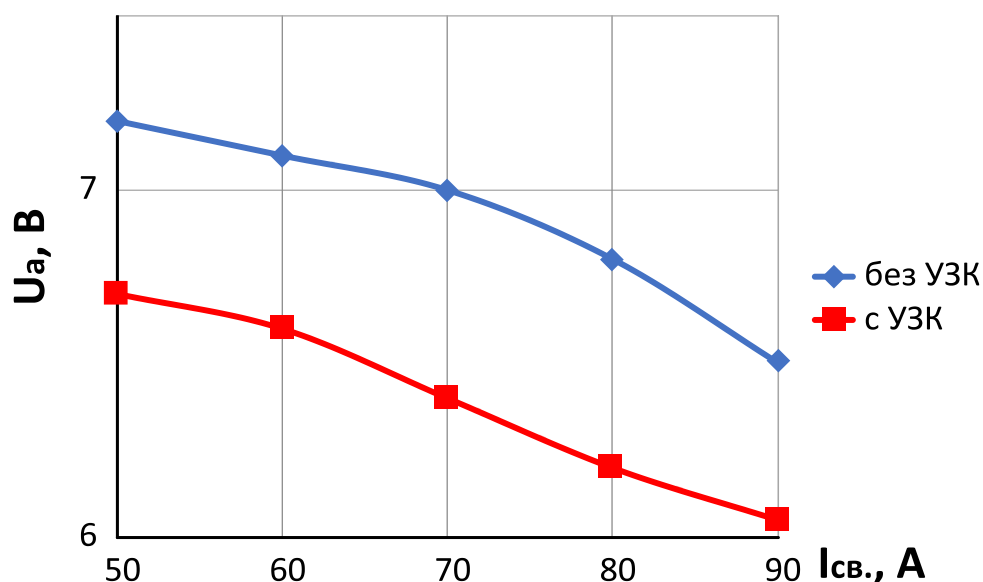


Рисунок 4.19 – Анодное падение потенциала дуги постоянного тока обратной полярности:  $F_{узк.} = 22,8$  кГц;  $P_{узк.} = 60$  Вт;  $d_{э.} = 4$  мм

При  $\tau_{обр.} = 18$  мс, что близко к дуге постоянного тока обратной полярности, без воздействия ультразвуковых колебаний происходит практически моментальное нарушение геометрии рабочего участка за 6-8 с. (рис. 4.21, стабильность горения дуги существенно ухудшается и в результате происходит отрыв кончика вольфрамового электрода. При тех же самых параметрах с воздействием УЗК наблюдается противоположная картина: стабильность дуги значительно улучшается, рабочий участок сохраняет свою форму (рис. 4.20).

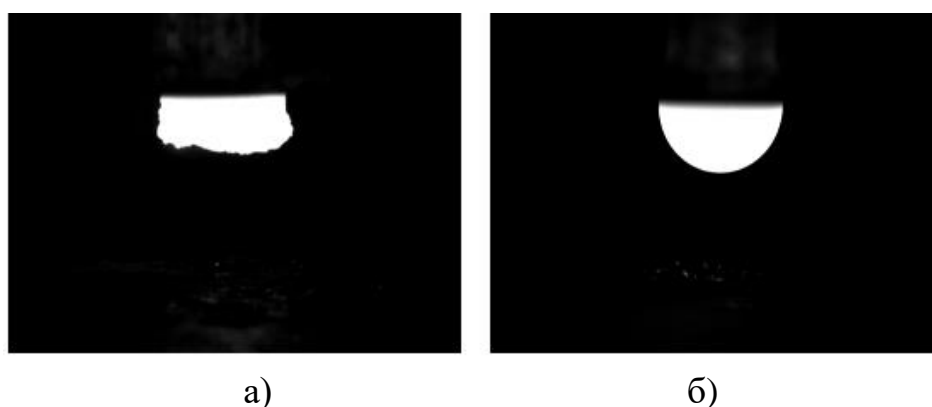


Рисунок 4.20 – Внешний вид рабочего участка электрода:

$F_{узк.} = 22,8$  кГц;  $P_{узк.} = 60$  Вт;  $I_{св.} = 100$  А;  $\tau_{обр.} = 18$  мс;  $f = 50$  Гц;  $d_{э.} = 4$  мм;

а – без УЗК, б – с УЗК

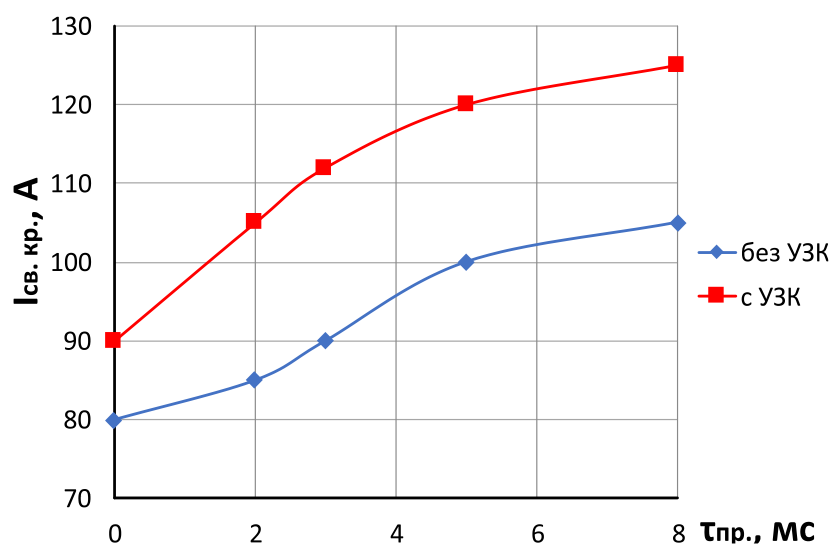


Рисунок 4.21 – Критический ток работы неплавящегося электрода в зависимости от длительности импульсов тока прямой полярности;

$$F_{\text{УЗК}}=22,8 \text{ кГц}; P_{\text{УЗК}}=60 \text{ Вт}; d_{\text{э.}}=4 \text{ мм}$$

При воздействии ультразвуковых колебаний непосредственно на столб дуги обратной полярности в ее анодной области наблюдается зона разрежения, которая снижает температуру рабочего участка неплавящегося электрода, увеличивая его стойкость, что позволяет повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

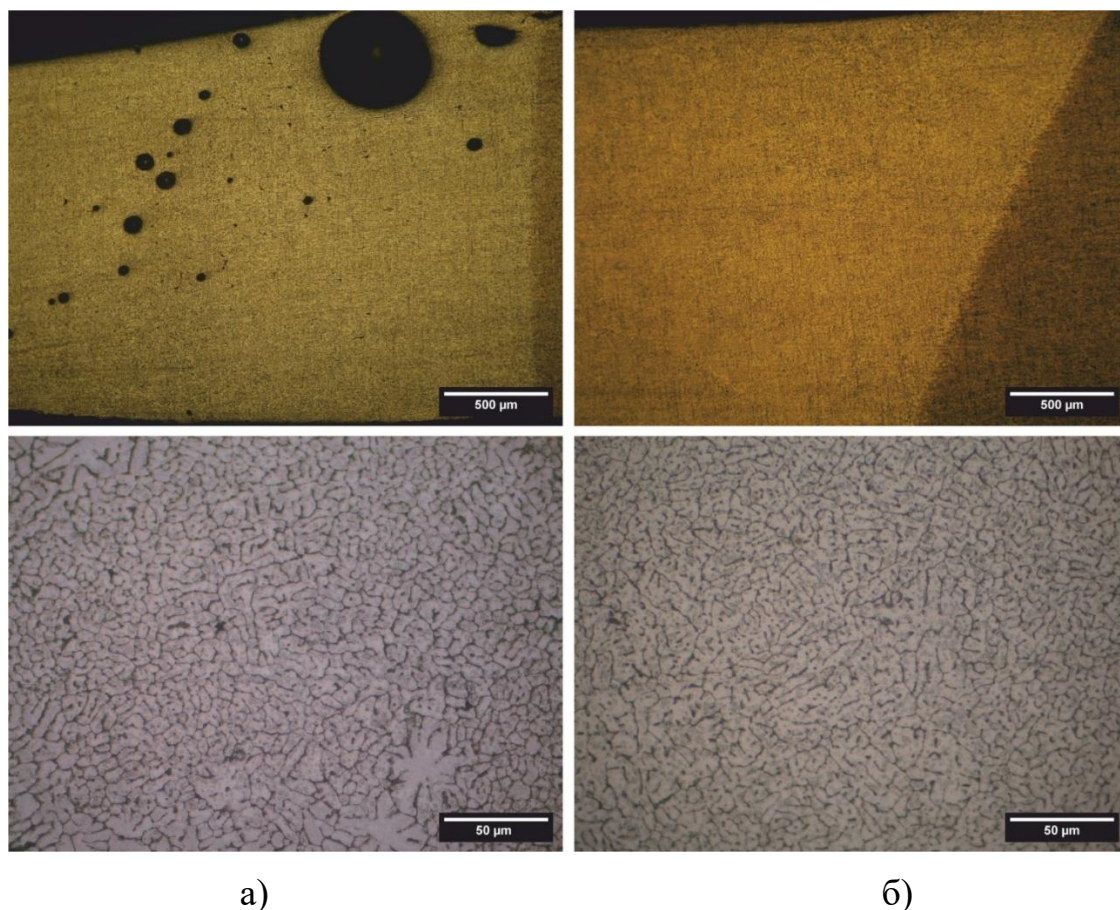
#### 4.6 Микроструктура и механические свойства сварных соединений

Одной из серьезных проблем сварки алюминиевых сплавов является обеспечение равнопрочности сварных соединений основному металлу. Также не менее сложной проблемой при сварке алюминиевых сплавов является пористость шва. Главной причиной пористости считается водород, абсорбированный флюсами, покрытием электродов, поверхностью основного металла и электродной проволоки, содержащийся в окисной пленке и в защитном газе. Избыток газообразного водорода в шве объясняется его повышенной растворимостью в расплавленном алюминии и гораздо меньшей растворимостью в кристаллизующемся металле. Пористость негативно сказывается на прочностных характеристиках сварных соединений, причем с

повышением прочности алюминиевых сплавов отрицательное влияние пористости увеличивается. Кроме того, пористость может снижать коррозионную стойкость соединений, способствуя развитию язвенной коррозии.

Для сильно нагруженных элементов конструкций алюминий не применяют, так как прочность его слишком мала.

Размер зерна зависит от температуры при сварке, ведущим к собирательной рекристаллизации. Максимальные температуры отдельных участков зоны термического влияния и длительность пребывания металла при этих температурах зависят от погонной энергии и интенсивности теплоотвода. Таким образом, изменяя процесс сварки можно в небольших пределах регулировать размер образующихся дендритов. Чем мельче структура основного металла на границе сплавления, тем больше число кристаллов имеет благоприятную ориентацию.



а)

б)

Рисунок 4.22 – Микроструктура сварных соединений алюминиевого сплава АМц: а) без УЗК; б) с УЗК

На рисунке 4.23 показан предел прочности сварных соединений, полученных без и с ультразвуком. По сравнению со сварными соединениями, полученными обычной сваркой, предел прочности увеличился на 20%. Разницу в результатах механических испытаний можно отнести к микроструктуре сварных швов. С воздействием ультразвука металл сварного шва имеет меньший размер зерна, по сравнению с традиционной сваркой (рис. 4.24, а). Эффект упрочнения мелкозернистой структурой улучшил прочность сварного соединения. Из-за образования пор в сварном соединении значительно снижались механические свойства.

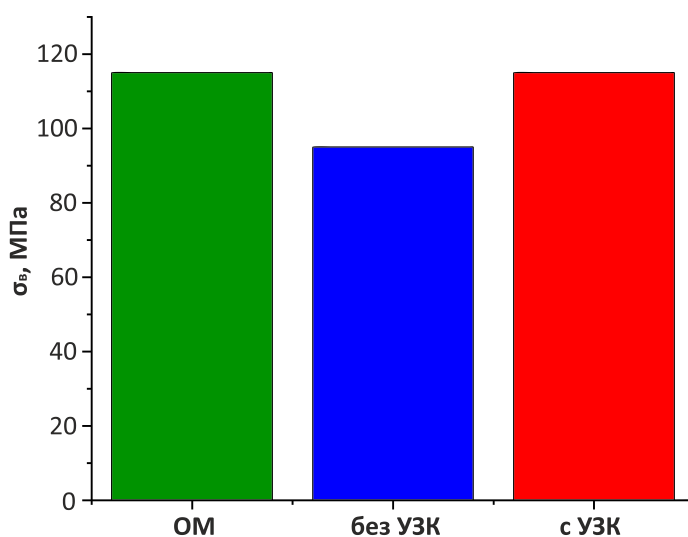
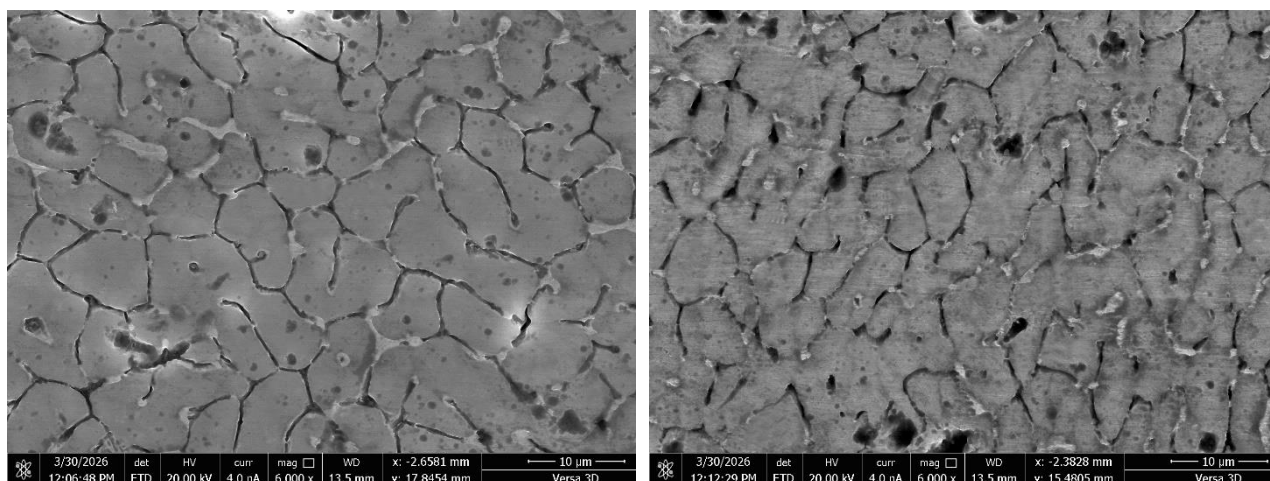


Рисунок 4.23 – Предел прочности получаемых сварных соединений из сплава АМц

Противоположная картина наблюдается при сварке с воздействием ультразвука, поры полностью отсутствуют (рис. 4.23, б). Объяснить данное явление можно с помощью следующей гипотезы: под воздействием ультразвука в расплавленном металле возникает кавитация. У алюминия водородные атомы в этих пузырьках соединяются в молекулы. Зародыши газовых пузырьков образуются и в полупериоде разрежения, так как при снижении давления в расплаве уменьшается растворимость газов. После этого пузырьки под влиянием колебательных движений коагулируют и, когда достигают определенных размеров, всплывают.



без УЗК

с УЗК

Рисунок 4.24 – Микроструктура металла шва алюминиевого сплава АМц

Изменение размеров зерна также связано с эффектом кавитации, который заключается в образовании ряда мелких разрывов или полостей в жидкости под действием растягивающих усилий, создаваемых звуковой волной в фазе разрежения с последующим их захлопыванием в фазе сжатия (рис. 4.24). Мгновенные значения давления в ударной волне доходят до нескольких сотен атмосфер.

Таким образом, при расширении и сжатии полости происходит своеобразная трансформация мощности, чем и объясняется кавитационное разрушение зерен в звуковом поле высокой интенсивности.

#### **4.7 Технологические рекомендации по аргодуговой сварке неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний**

Расширение технологических свойств дуги с неплавящимся электродом при воздействии сфокусированных ультразвуковых колебаний на дугу переменного тока с ПФИ позволило определить возможные области ее применения:

- 1) Однопроходная сварка листов из алюминия и сплава АМц толщиной до 10 мм без разделки кромок.
- 2) Двусторонняя сварка (по одному проходу с каждой стороны) позволяет

сваривать листы большой толщины.

При сварке на повышенных значениях погонной энергии необходимо учитывать размеры сварочной ванны и зоны термического влияния для обеспечения качественной газовой защиты всей зоны сварки.

По результатам исследований разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний, определены оптимальные значения параметров ультразвуковых колебаний; определены длительности импульсов тока прямой и обратной полярности, позволяющие обеспечить требуемые глубину проплавления и качество катодной очистки, что позволяет существенно увеличить производительность процесса сварки и повысить качество сварных соединений. Параметры режима сварки представлены в таблице 4.1.

Глубина проплавления при сварке в наибольшей степени зависит от сварочного тока, длительности импульсов тока обратной полярности и скорости сварки (рис. 4.25, рис. 4.26).

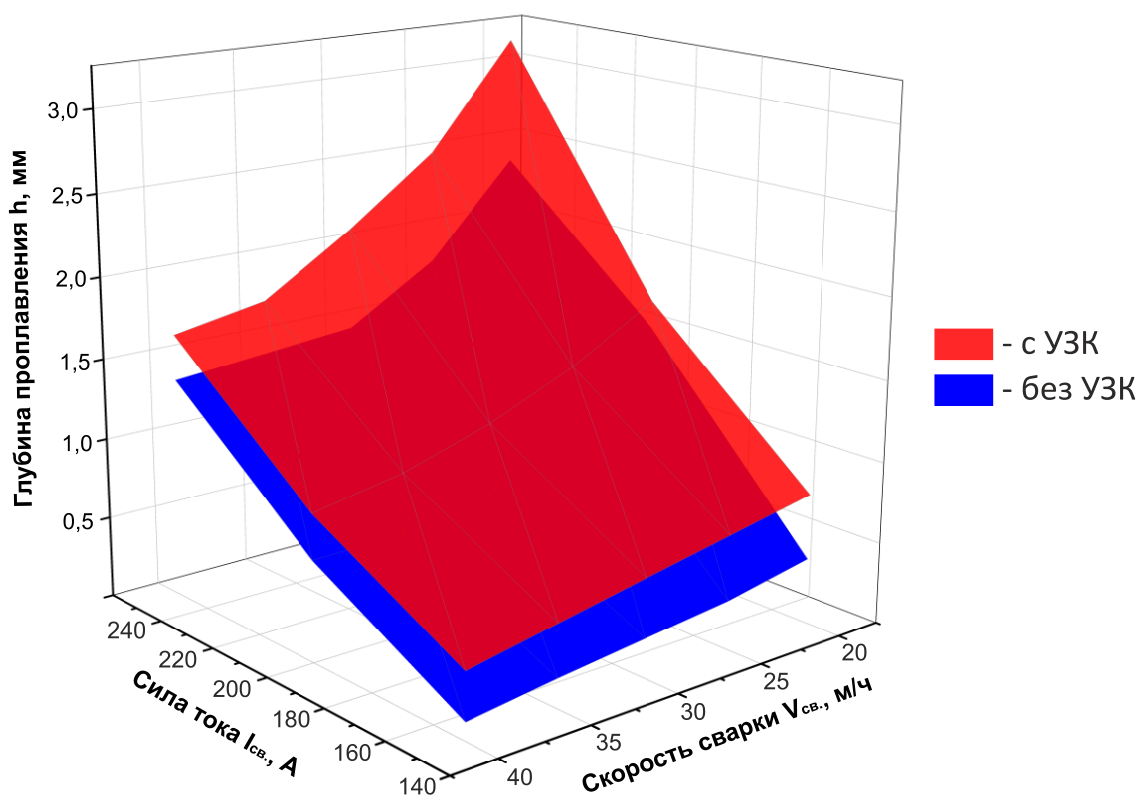


Рисунок 4.25 – Глубина проплавления в зависимости от скорости сварки и силы тока:  $F_{УЗК} = 22,8$  кГц;  $P_{УЗК} = 60$  Вт,  $f = 50$  Гц;  $\tau_{обр.} = 3$  мс

Видно, что с увеличением сварочного тока наблюдается устойчивый рост глубины проплавления ( $h$ ) во всём исследованном диапазоне параметров. Влияние длительности обратной полярности носит нелинейный характер: при увеличении глубина проплавления несколько снижается.

Сравнительный анализ поверхностей показывает, что сварка с УЗК обеспечивает наибольшую глубину проплавления по сравнению с технологией без УЗК во всём исследованном диапазоне параметров сварки.

Построенные поверхности позволяют существенно упростить выбор рациональных режимов сварки, которые обеспечивают требуемое качество формирования сварного шва и высокую производительность.

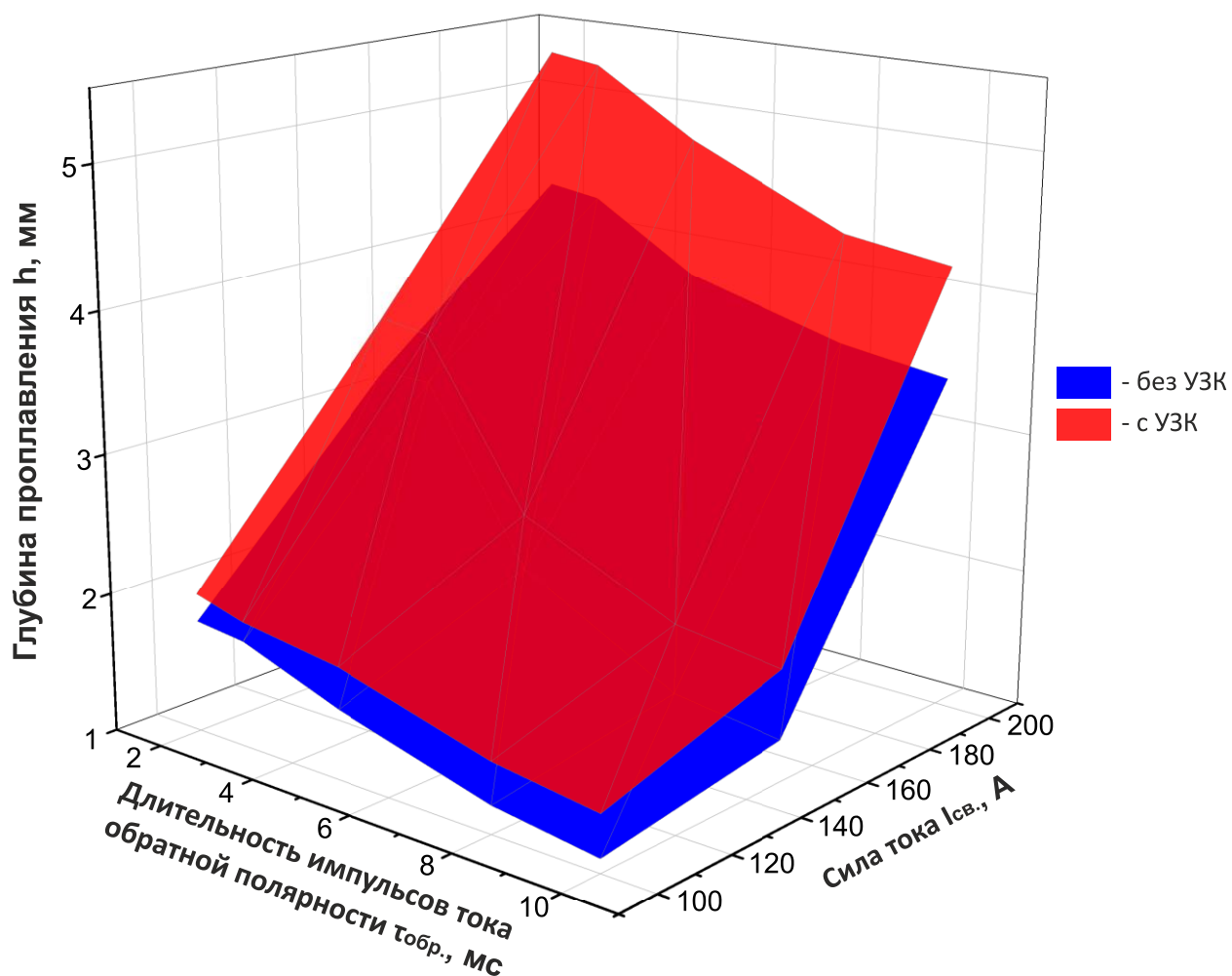


Рисунок 4.26 – Глубина проплавления в зависимости от длительности импульсов тока обратной полярности и силы тока:  $F_{УЗК}=22,8$  кГц;

$$P_{УЗК}=60 \text{ Вт}, f=50 \text{ Гц}; V_{св.}=20 \text{ м/ч}$$

В соответствии с нормативно технической документацией при сварке алюминия и его сплавов предъявляются требования к размерам сварного соединения по ГОСТ 14806-80.

Технологический процесс осуществляли следующим образом:

1. Подготовка разделки кромок в соответствии с требованиями ГОСТ 14806-80;
2. Травление в течение 1 мин в 20%-ном растворе едкого натра NaOH (температура раствора 50-70 °С);
3. Промывка в холодной воде (температура воды 20-25°С).
4. Осветление в течение 2...5 мин в 15%-ном водном растворе азотной кислоты HNO<sub>3</sub> (температура раствора 60-70°С).
5. Промывка в горячей воде (температура воды 50-60°С).
6. Промывка в холодной воде.
7. Сушка в течение 10-15 мин при температуре 100-110 °С.
8. Сборка с помощью прихваток;
9. Проверка положения фокуса ультразвуковых колебаний (~17 мм);
10. Выполнение сварки с воздействием УЗК;
11. Визуальный контроль сварного соединения.

Таблица 4.1 – Сравнение параметров сварных соединений, получаемых по существующим и предлагаемой технологиям

Параметры УЗК		I <sub>св.</sub> , А	V <sub>св.</sub> , м/ч	f, Гц	τ <sub>обр.</sub> , мс	τ <sub>пр.</sub> , мс	Расход газа, л/мин	Площадь проплавления и толщина заготовки
F <sub>узк</sub> , кГц	P <sub>узк</sub> , Вт							
-	-	100÷110	22-25	50	3	17	10-12	6-8 мм <sup>2</sup> / 3 мм
20	60	100÷110			3	17	10-12	9-11 мм <sup>2</sup> / 3 мм
-	-	150÷160			5	15	12-14	10-12 мм <sup>2</sup> / 3 мм
20	60	150÷160			5	15	12-14	16-18 мм <sup>2</sup> / 3 мм
20	60	150÷160			3	17	12-14	17-19 мм <sup>2</sup> / 3 мм
-	-	200÷210			5	15	14-16	14-16 мм <sup>2</sup> / 4 мм
20	60	200÷210			5	15	14-16	22-24 мм <sup>2</sup> / 4 мм
-	-	250÷260			3	17	16-18	18-22 мм <sup>2</sup> / 6 мм

Продолжение таблицы 4.1

20	60	250÷260	22-25	50	3	17	16-18	26-30 мм <sup>2</sup> / 6 мм
-	-	300÷310			3	17	20-25	Дефекты (подрезы, бугры и др.) /10 мм
20	20	300÷310			3	17	20-25	38-42 мм <sup>2</sup> / 10 мм
	60	300÷310			3	17	20-25	46-48 мм <sup>2</sup> / 10 мм
	100	300÷310			3	17	20-25	42-44 мм <sup>2</sup> / 10

Технические преимущества разработанной технологии заключаются в снижении расходов на вольфрамовые электроды, росту производительности и повышении качества сварки и механических характеристик сварного соединения.

Разработанная технология сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний была апробирована в условиях предприятия ООО ПТП «Поршень» при производстве дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха.

Клапаны дыхательных систем вентиляции воздуха предназначены для регулирования движения потока воздуха, защиты оборудования и поддержания требуемого давления в системах вентиляции.

Назначение:

- 1) предотвращение обратного потока воздуха;
- 2) регулирование расхода воздуха;

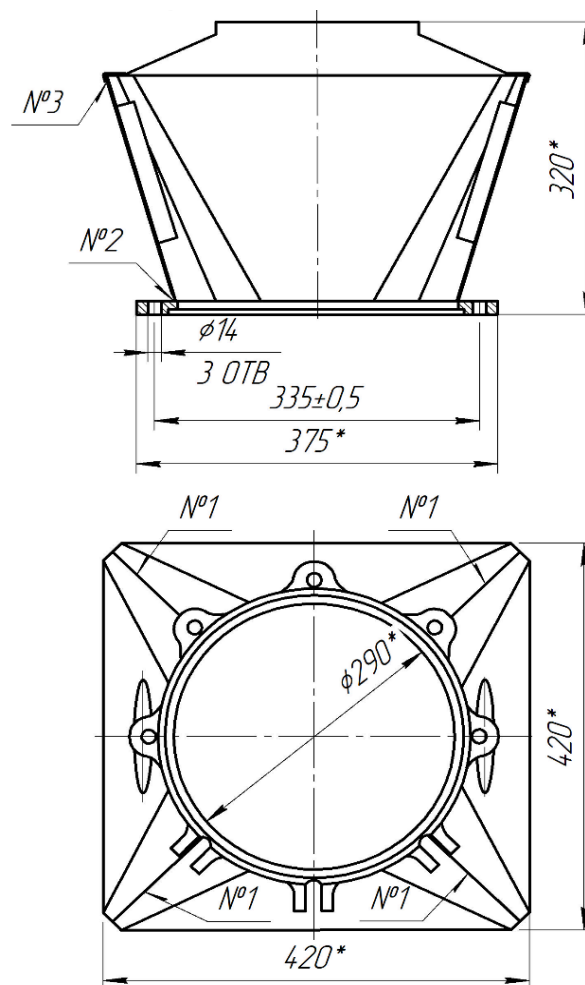


Рисунок 4.27 – Корпус клапана дыхательного

- 3) автоматическое открытие или закрытие воздуховода при изменении давления;
- 4) защита вентиляционного оборудования от перегрузок;
- 5) поддержание заданного давления в помещениях или технологических установках;
- б) удаление избыточного воздуха и предотвращение образования вакуума.

Таблица 4.2 - Таблица сварных швов.

№ шва	Обозначение
1	ГОСТ 14806-80-С2-РИН (с УЗК)
2	ГОСТ 14806-80-У2-РИНп
3	ГОСТ 14806-80-Н1-РИНп

При изготовлении корпуса клапана дыхательного из алюминиевого сплава АМц для стыковых соединений применена технология сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний, что позволило выполнить сварку за один проход без присадочного материала. В случае использования базовой технологии сварка выполняется за два прохода с присадочным материалом.

Подготовка кромок свариваемых деталей выполнялась в соответствии с требованиями ГОСТ 14806-80 для стыкового сварного соединения типа С2 (рисунок 4.28).

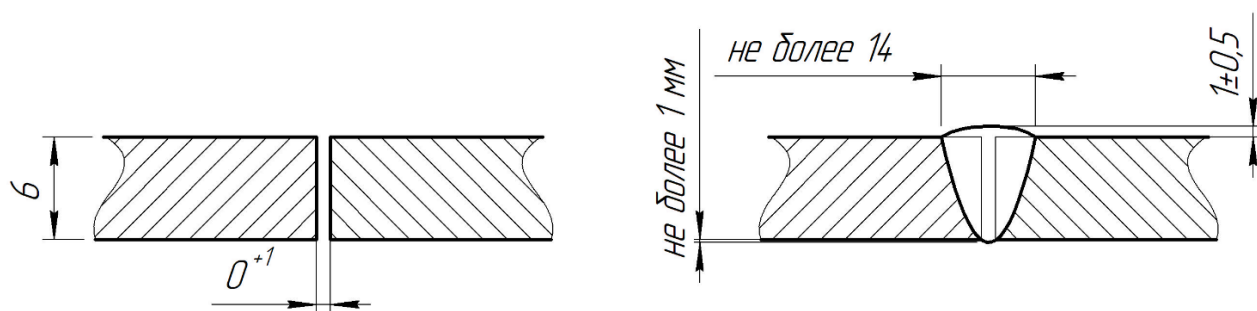


Рисунок 4.28 – Разделка кромок С2 по ГОСТ 14806-80

Полученные сварные соединения соответствуют требованиям ГОСТ 14806-80 по качеству формирования шва, отсутствуют недопустимые дефекты, что подтверждено результатами контрольных испытаний. Макрошлиф представлен на рисунке 4.29.

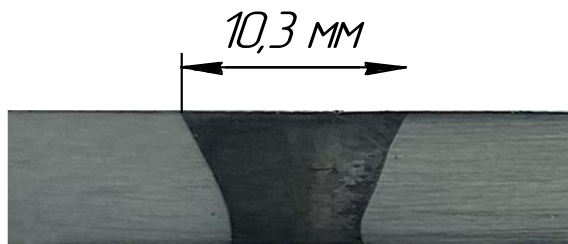


Рисунок 4.29 – Макрошлиф стыкового сварного соединения, выполненного с  
УЗК:  $F_{\text{узк.}}=22,8$  кГц;  $P_{\text{узк.}}=60$  Вт;  $I_{\text{св.}}=180$  А;  $\tau_{\text{обр.}}=3$  мс;  $f=50$  Гц;  $d_{\text{э.}}=4$  мм;  
материал АМц;  $S=6$  мм;  $\sigma_{\text{в.}}=130$  Мпа

Таким образом, применение разработанной технологии сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний в условиях предприятия ООО ПТП «Поршень» при производстве дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц (рис. 4.30) позволило увеличить производительность на 40%.



Рисунок 4.30 - Дыхательный клапан систем очистки  
и вентиляции воздуха

#### Выводы к главе 4

1. Установлено, что совместное действие сварочной дуги и ультразвуковых колебаний приводит к увеличению силового воздействия дуги на поверхность сварочной ванны в ~3-5 раза, что существенным образом влияет на форму и размеры шва.

2. Применение ультразвуковых колебаний способствует дополнительному механическому воздействию на окисную пленку, в результате чего даже при малых длительностях обратной полярности в периоде переменного тока (менее 15%) качество очистки окисной пленки остается хорошим.

3. С ростом длительности импульсов обратной полярности с 2 до 8 мс (при частоте переменного тока 50 Гц) ширина шва снижается на 25%, а глубина проплавления более чем в 2 раза, как с УЗК, так и без УЗК. В случае использования ультразвука при любых значениях  $\tau_{обр.}$  глубина проплавления выше, чем без УЗК (при  $\tau_{обр.}=5-8$  мс более чем на 40%), ширина зоны катодной очистки  $B_k$  при этом также повышается.

4. Параметры проплавлений, выполненных с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, значительно превосходят таковые без применения УЗК на любых режимах (в случае применения резонансных частот глубина проплавления повышается в 2,4 раза, ширина – до 1,5 раз).

5. Воздействие на дугу ультразвуковых колебаний мощностью 20-100 Вт способствует стабилизации активного пятна на поверхности алюминиевого сплава, отсутствию отклонения дуги от оси электрода и, в итоге, качественному формированию шва на высоких значениях тока (300 А) и скорости сварки (25 м/ч) при малых длительностях обратной полярности в периоде переменного тока (менее 15%). При  $P_{узк} \geq 140$  Вт происходило отклонение активного пятна от оси электрода, что являлось причиной нарушения формирования швов.

6. Впервые обнаружена зона разрежения в анодной приэлектродной области дуги при воздействии ультразвуковых колебаний на неё и соответствующее падение напряжения в этой области на 0,5-0,8 В, что приводит

к снижению температуры рабочего участка неплавящегося электрода. Это позволяет увеличить стойкость электрода на 20% и повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в диссертационной работе комплекс исследований позволил сформулировать основные выводы:

1. Установлено, что вольт-амперные характеристики дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов имеют в исследованном диапазоне токов возрастающий характер: с ростом тока дуги  $I_{св.}$  напряжение в импульсах прямой полярности  $U_{пр}$ , обратной полярности  $U_{обр}$  и действительное напряжение на дуге  $U_d$  увеличиваются. С ростом  $\tau_{обр}$  напряжения  $U_d$  и  $U_{обр}$  повышаются, а  $U_{пр}$  – уменьшается; с воздействием ультразвуковых колебаний значения напряжения  $U_{пр}$ ,  $U_{обр}$  и  $U_d$  больше на 1÷3 В, чем без них при любых значениях тока и  $\tau_{обр}$ , что говорит об увеличении тепловой мощности дуги.

2. С воздействием ультразвуковых колебаний дуга сжимается на 30-50%, что приводит к повышению плотности тока. Однако, с ростом силы тока эффективность влияния ультразвука незначительно снижается из-за увеличения тепловой мощности дуги. Показано, что при значениях  $P_{узк}$  от 20 до 120 Вт дуга сжимается без нарушения её пространственной устойчивости. При мощности ультразвука более 140 Вт происходит ее отклонение от оси электрода, что приводит к нарушению формирования швов.

3. Показано, что воздействие на дугу ультразвуковых колебаний приводит к ее сжатию и повышению пространственной устойчивости, что увеличивает эффективный коэффициент полезного действия  $\eta_i$  при сварке неплавящимся электродом на переменном токе с прямоугольной формой импульсов на 5-12%, способствуя росту глубины проплавления при сварке алюминия и сплава АМц в 1,3-1,5 раза.

4. Установлено, что совместное действие сварочной дуги и

ультразвуковых колебаний приводит к увеличению силового воздействия дуги на поверхность сварочной ванны в ~3-5 раза, что существенным образом влияет на форму и размеры шва. Параметры проплавлений, выполненных с воздействием на дугу ультразвуковых колебаний, значительно превосходят таковые без применения УЗК на любых режимах (в случае применения резонансных частот глубина проплавления повышается в 2,4 раза, ширина – до 1,5 раз).

5. Применение ультразвуковых колебаний способствует дополнительному механическому воздействию на окисную пленку на поверхности алюминия, в результате чего даже при малых длительностях обратной полярности в периоде переменного тока (менее 15%) качество очистки окисной пленки остается хорошим.

6. Выявлено, что применение ультразвуковых колебаний мощностью 20-140 Вт при сварке на высоких значениях тока ( $\geq 300\text{A}$ ) и скорости ( $\geq 20\text{ м/ч}$ ) стабилизирует положение активного пятна дуги на поверхности алюминия, препятствуя ее отклонению от оси электрода, что способствует увеличению производительности и улучшению качества формирования шва на малых значениях длительности импульсов обратной полярности в периоде переменного тока ( $\tau_{\text{обр}}/T \leq 0,15$ ).

7. Установлено, что при воздействии ультразвуковых колебаний непосредственно на столб дуги обратной полярности наблюдается увеличение стойкости электрода на 20%, что обусловлено появлением в ее анодной области зоны разрежения, которая снижает падение напряжения в ней на 0,5-0,8 В и уменьшает температуру рабочего участка неплавящегося электрода. Это позволяет повысить производительность сварки наряду с высоким качеством катодной очистки окисной пленки на поверхности алюминия.

8. На основе результатов исследований разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом на переменном токе алюминиевых сплавов в аргоне с воздействием на дугу ультразвуковых

колебаний, позволяющие повысить производительность процесса и качество получаемых сварных соединений.

9. Разработанная технология сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвуковых колебаний была апробирована в условиях предприятия ООО ПТП «Поршень» при производстве дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц, что позволило увеличить производительность на 40%.

### Список использованных источников

1. Порицкий П.В., Прилуцкий В.П., Замков В.Н. Влияние защитного газа на контракцию сварочной дуги с вольфрамовым катодом // Автоматическая сварка. – 2004. – № 6. – С. 3-10.
2. Бадьянов Б.Н., Давыдов В.А., Иванов В.А. Некоторые характеристики дуги, горящей в аргоне с добавкой галоидосодержащего газа // Автоматическая сварка. – 1974. – № 11. – С. 67.
3. Паршин С.Г. Влияние активирующих флюсов на формирование сварных швов при ручной аргонодуговой сварке // Сварочное производство. – 2000. – № 10. – С. 23-27.
4. Казаков Ю.В., Корягин К.Б., Потехин В.П. Влияние на проплавление активирующих флюсов при сварке сталей толщиной более 8 мм // Сварочное производство. – 1989. – № 9. – С. 38-41.
5. Паршин С.Г. Состав и выбор пастообразных флюсов для дуговой сварки энергетического оборудования // Промышленная энергетика. – 2000. – № 2. – С. 18-21.
6. Паршин С.Г. Механизм контрагирования дуги и состав активирующего флюса для стохастического режима аргонодуговой сварки теплоустойчивых сталей // Энергосбережение Поволжья. – 2001. – № 1. – С. 32-34.
7. Замков В.Н., Прилуцкий В.П. Теория и практика TIG-F сварки (A-TIG) (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2004. – № 9. – С. 12-15.
8. Nobuyuki Jamauchi, Tahaо Така, Manabu Oh-i. Development and application of high Current TIG process (Scholta welding process). The Sumitomo Search, 1981. – № 25. – P. 87-100.
9. Ковалев И.М., Кричевский Е.М., Львов В.Н. Влияние движения металла в сварочной ванне на устойчивость дуги и формирование шва // Сварочное производство. – 1974. – № 11. – С. 5-7.

10. Ковалев И.М. Некоторые особенности формирования сварных соединений при сварке с неплавящимся катодом // Сварочное производство. – 1972.– № 10. – С. 12-14.
11. Григоренко В.В., Киселев О.Н., Чернышев Г.Г. и др. Аргодуговая сварка труб на трубосварочном стане // Сварочное производство. – 1994. – № 5. – С. 29-31.
12. Размышляев А.Д., Миронова М.В., Влияние продольного магнитного поля на характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне // Автоматическая сварка. – 2008. – № 3. – С. 21-25.
13. Ковалев И.М. Пространственная устойчивость движущейся дуги с неплавящимся катодом // Сварочное производство. – 1972. – № 8.
14. Петров А.В. Автоматическая сварка тонколистой стали в среде аргона импульсной дугой // Автоматическая сварка. – 1962. – № 2. – С. 36-37.
15. Кузнецов В.Д. и др. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле // Автоматическая сварка. – 1972. – № 4. – С. 3-4.
16. Increasing the productivity of TIG welding of steels and aluminium alloys by adding ultrafine particles of activating fluxes / S.G. Parshin, S.S. Parshin, G. Buerkner // Welding International. – 2013. – Vol. 27. – P. 392-396.
17. Effect of activating flux and shielding gas on microstructure of TIG welds in austenitic stainless steel / A. R. Loureiro, B. F. O. Costa, A. C. Batista, A. Rodrigues // Science and Technology of Welding & Joining. – 2009. – Vol. 14. – P. 315-320.
18. Welding of 316L Austenitic Stainless Steel with Activated Tungsten Inert Gas Process. E. Ahmadi, A.R. Ebrahimi // Journal of Materials Engineering and Performance. – V. 24. – 2015. – P. 1065-1071.
19. Activated flux TIG welding of Inconel 718 super alloy in presence of tri-component flux. Hemant Kumar, Gulshad Nawaz Ahmad, and N. K. Singh // Materials and manufacturing processes. – 2018. – P. 180-188.
20. Kumar, S. A.; Sathiya, P. Experimental Investigation of the A-TIG Welding Process of Incoloy 800H. Mater. Manuf. Processes 2015, 30 (9), P. 1154-1159.

21. Modenesi, P. J.; ColenNeto, P.; Roberto Apolinário, E.; Batista Dias, K. Effect of Flux Density and the Presence of Additives in ATIG Welding of Austenitic Stainless Steel. *Weld. Int.* 2015, 29 (6). - P. 425-432.
22. Tathgir, S. Bhattacharya, A.; Bera, T. K. Influence of Current and Shielding Gas in TiO<sub>2</sub> Flux Activated TIG Welding on Different Graded Steels. *Mater. Manuf. Processes* 2015, 30(9). – P. 1115-1123.
23. Niagaj, J. The Use of Activating Fluxes for the Welding of High alloy Steels by A-TIG Method. *Weld. Int.* 2003, 17(4). P. 257-261.
24. Variable Polarity Arc Welding of Aluminum Thin Plate. Jungho Cho // *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers.* 2014. - V. 13. – P. 89-93.
25. Yarmuch, M. A. R., Patchett, B. M. "Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum", *Welding Journal.* - V. 86. – 2007. - P. 196-200.
26. Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum. Jungho Cho, Jung-Jae Lee, Seung-Hwan Bae // *Journal of Materials Processing Technology.* – V. 249. – 2017. - P. 89 – 95.
27. Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc. R. Si Narrafi, D. R. Kovacevic // *Welding research.* – 2010. - V. 89. – P. 11-21.
28. Numerical and experimental investigations of variable polarity gas tungsten arc welding. L. L. Wang & J. H. Wei, Z. M. Wang. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2018. - V. 95. – P. 2421–2428.
29. Keyhole welding of AA2219 aluminum alloy with double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding. Wang Yipeng, QiBojin, Cong Baoqiang Zhu Mingjie, Lin Sanbao // *Journal of Manufacturing Processes.* – V. 34. - 2018, P. 179-186.
30. Influence of Cold Metal Transfer Process and Its Heat Input on Weld Bead Geometry and Porosity of Aluminum-Copper Alloy Welds / Cong Baoqiang, Ouyang Ruijie, Qi Bojin, Ding Jialuo // *Rare Metal Materials and Engineering.* – V. 45 (3). – 2016. – P. 606-611.

31. Arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding. S. Qingjie; Q. Sun; L. Sanbao; Y. Chunli; F. Yangyang; Z. Guoqing // China Welding (English Edition). - V. 17 (4). - P. 52-57. - 2008.
32. High Power Ultrasonics in Pyrometallurgy / S.V. Komarov, M. Kuwabara, O.V. Abramov // ISIJ International. - 2005. – Vol. 15. – P. 1765-1782.
33. Ultrasonic generation by exciting electric arc: a tool for grain refinement in welding process / L. He // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89. – P. 13-15
34. Improving weld quality by arc-excited ultrasonic treatment / C. Zhang, M. Wu, J. Du, t, Tsinghua // Tsinghua Science and Technology. – 2001. – V. 6. – No. 5. – P. 475-478.
35. Experimental study of grain growth in aluminum melts under the influence of ultrasonic melt treatment / T.V. Atamanenko, D.G. Eskin // Mater. Sci. – 2007. – P. 987-990.
36. Characteristics of Periodic Ultrasonic Assisted TIG Welding for 2219 Aluminum Alloys / C. Xiaoyu, L. Sanbao, W. Xianneng, Y. Chunli, F. Chenglei // Materials. – 2019. – Vol. 12. – P. 70-81.
37. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding / Q.J. Sun // Welding Joining. – 2009. - Vol. 10. – P. 330-334.
38. The arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding / Q. Sun // China Welding. – 2008. – Vol. 17. – P. 100-104.
39. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding / Q. J. Sun, S. B. Lin, C. L. Yang & G. Q. Zhao // Science and Technology of Welding and Joining. – 2009. – Vol. 14. – P. 765-767.
40. TIG welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration / Y. Fan // Transactions of the China Welding Institution. – 2009. - Vol. 30. - P. 91–94.
41. Investigation and application of ultrasonic–TIG hybrid welding equipment / Q. Sun et al., // China Welding. - Inst. 02 (2010).
42. Characteristic of arc pressure in ultrasonic–TIG hybrid welding / Q. Sun et al. // Journal of Engineering Mechanics – 2011. - Vol. 47. - P. 65-69.

43. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6 / L.D. Wen // *Materials Letters*. – 2003. – Vol. 57. – P. 2447-2454.
44. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel H. Dong, L. Yanga, C. Dong, S. Kou / *Materials Science and Engineering A*. – 2012. - Vol. 534. – P. 424-435.
45. The Effect of Ultrasonic Vibration on The Mechanical Properties of Austenitic Stainless-Steel Weld / T. Watanabe, S. Ookawara, S. Seki, A. Yanagisawa, S. Konuma // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2003. – Vol. 21. – P. 249-255.
46. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration / T. Watanabe, M. Shiroki, A. Yanagisawa // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210. – P. 1646-1651.
47. Enhanced arc-acoustic interaction by stepped-plate radiator in ultrasonic wave-assisted GTAW / J. Wang, Q. Sun, J. Teng, P. Jin, T. Zhang, J. Feng // *Journal of Materials Processing Tech*. – 2018. – Vol. 262. – P. 19-31.
48. Research on Twin-arc TIG Welding with Ultrasonic Excitation and Its Effect to Weld / J. Wang, X. Hong // *Key Engineering Materials*. – 2011. - Vol. 450. – P. 300-303.
49. Microstructure and mechanical properties of Q235 steel welded joint in pulsed and un-pulsed ultrasonic assisted gas tungsten arc welding / C. Chen, C. Fan, X. Cai, S. Lin, C. Yang, Y. Zhuo // *Journal of Materials Processing Tech*. – 2020. – Vol. 275. – P. 120-126.
50. A new discovery of arc shape in pulsed ultrasonic wave assisted TIG welding Chao Chen, Chenglei Fan, Sanbao Lin, Lei Zhou, and Chunli Yang // *Physics of plasmas*. – Vol. 25. – 2018. – P. 80-85.
51. TIG welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration. Fan Y., Sun Q., Yang C., L. Sanbao, Fan C. // *Transactions of the china welding institution*. – 2009. – P. 91-94.
52. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al–

5Ti–1B master alloy on aluminium. Yanfeng H. K. Jun, Wang S., Baode S. // *Materials Science and Engineering A*. – Vol. 405. – 2005. – P. 306–312.

53. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process. S.B. Chen // *Journal of Manufacturing Processes* 16 (2014). - 109–122.

54. Arc pressure of ultrasonic assisted TIG welding Sun Q., Xie F., Wang B. Feng J. // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. - p. 65-69.

55. Ultrasonic-vibration assisted arc-welding of aluminum alloys. A. KRAJEWSKI, W. WŁOSIŃSKI, T. CHMIELEWSKI, P. KOŁODZIEJCZAK // *bulletin of the polish academy of technical sciences*. - Vol. 60, No. 4, 2012 P. 841-852.

56. H. Dong, L. Yang, C. Dong, and S. Kou, “Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel”, *Materials Science and Engineering A* V. 534. – P. 424-435. - 2012.

57. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of austenitic stainless steel sheet joints welded by gas tungsten arc (GTA) and ultrasonic-wave-assisted gas tungsten pulsed arc (U–GTPA). W. Xie, C. Yang // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2020. – P. 42-56.

58. Thavamani R, Balusamy V, Nampoothiri J, Subramanian R, Ravi Mitigation of hot cracking in Inconel 718 superalloy by ultrasonic vibration during gas tungsten arc welding. *Journal of Alloys Compounds*. – 2017. – V. 40. – P. 870–878.

59. Effect of pulsed ultrasonic on arc acoustic binding in pulsed ultrasonic wave-assisted pulsed gas tungsten arc welding. Jianfeng Wang, Qingjie Suna, Jinping Liu, Bin Wang, Jicai Feng // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2017. – V. 22(6). P. 465-471.

60. The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. B. J. Qi & M. X. Yang & B. Q. Cong & F. J. Liu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013 – V. 66. - P. 1545-1553.

61. Reinforcement of Mg/Ti joints using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding–brazing technology. C. Xu, G. Sheng, H. Wang, X. Yuan // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2014. – V. 19. - №8. – P. 703-707.

62. Effect of acoustic field parameters on arc acoustic binding during ultrasonic wave-assisted arc welding Weifeng Xie, Chenglei Fan, Chunli Yang, Sanbao Lin // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2016. – V. 29. – P. 476-484.

63. Influence of ultrasonic vibration on keyholing/penetrating capability in plasma arc welding with controlled pulse waveform. Shuoshuo Tian, Lin Wang, Chuan Song Wu, Manabu Tanaka // *Welding in the World*. – 2021. – V. 65. – P. 1107–1117.

64. Xie, W.F.; Fan, C.L.; Yang, C.L.; Lin, S.B.; Zhang, Y.Q. Characteristics of acoustic-controlled arc in ultrasonic wave-assisted arc // *Acta Physica Sinica*. - 2015. V. 64. P. 412–420.

65. Numerical analysis of ultrasonic waves in the gas tungsten arc welding (GTAW) with ultrasonic excitation of current. Daqing Wang Chen Hua Hao Lu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020 – 158. 119-128.

66. Microstructures and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Joints by Focused Ultrasound-Assisted TIG Welding. Yang, Qingfu; Xu, Wanghu Send mail to Xu W., Yifeng X., Weifeng X., Jinye Z. // *Metallography, Microstructure, and Analysis* V. 11, №1, p. 141 – 149. – 2022. doi:10.1007/s13632-022-00826-1

67. Feasibility analysis of standing wave ultrasonic - Axial magnetic field hybrid for controlling GTAW arc characteristics. Chao Chen, Wenlong Li, Wenbo Du, Jiuqing Liu, Huijing Zhang // *Journal of Manufacturing Processes* V. 80. – 2022. P. 187–195.

68. Ultrasonic Vibration Assisted Keyholing Plasma Arc Welding. BY C. S. WU, C. Y. ZHAO, C. ZHANG, AND Y. F. LI // *WELDING JOURNAL*. - 2017, VOL. 96 P. 279 – 286.

69. Arc characteristics and weld appearance in pulsed ultrasonic assisted GTAW process. Chao Chen, Chenglei Fan, Xiaoyu Cai, Zeng Liu, Sanbao Lin, Chunli Yang // *Results in Physics*. – V. 15. – 2019. – P. 102-108.

70. Microstructure and porosity analysis in ultrasonic assisted TIG welding of 2014 aluminum alloy. Yuan Heran, Lin Sanbao, Yang Churdi, Fan Chenglei and Wang Shuai // *China Welding (English Edition)*. - V. 20 (№1). – 2011. – P. 39-43.

71. Effect of pulsed powder ultrasound on plasma morphology and its changing mechanism. Zhang, H., Qing-Kai, F., Fan, C., Chao, C. // *International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology. – V. 116 (№3-4). - P. 1225-1232.

72. Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding. Chao C., Chenglei F., Xiaoyu C., Sanbao L., Zeng L., Qingkai F., Chunli Y. // Journal of Manufacturing Processes. V. 46. – 2019 – P. 241–247.

73. Ultrasonic irradiation induced the microstructure refinement and texture evolution of Ti–6Al–4V TIG weld seam. Chao Chen, Chenglei Fan, Xiaoyu Cai , Sanbao Lin and Chunli Yang // SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING. – V. 25, №1. – 2020. - P. 20 – 27.

74. Gao S, Wu CS, Padhy GK. Process and joint quality of ultrasonic vibration enhanced friction stir lap welding. Sci TechnolWeld Joi. 2018. 23:693–703.

75. Sun QJ, Lin SB, Yang CL, et al. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding. Sci TechnolWeld Joi. 2009;14:765–767.

76. Shi L, Wu S., Liu C. Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding. J Mater Process Tech. 2015; 222:91–102.

77. Chen Q., Lin S., Yang C., et al. Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum. Ultrason. Sonochem. – 2017. – V. 39. – P. 403–413.

78. Dai W.L. Effects of high-intensityultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6. Mater Lett. - 2003. – V. 57. – P. 2447–2454.

79. Watanabe T., Shiroki M., Yanagisawa A., et al. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration. // J. Mater Process Tech. 2010. – 210. - 1646–1651.

80. Ultrasonic-Magnetic field coaxial hybrid controlling the microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel GTAW joints. C. Chen, W. Li, X. Sun // Journal of Materials Processing Tech. – 2023. – V. 25. – P. 5807-5819. Jilin University, China

81. Tian Y, Shen J, Hu S, Wang Z, Gou J. Effects of ultrasonic vibration in the CMT process on welded joints of Al alloy. J Mater Process Tech 2018. V. 59.

82. Yang Q, Xu W, Xiao Y, Xie W, Xiong J, Zhang TJM, et al. Microstructures and mechanical properties of 304 stainless steel joints by focused ultrasound-assisted

TIG welding. *Metallogr Microstruc.* - 2022. - V. 11. - №1. - p. 141-149.

83. Dai X, Zhang H, Wang B, Ji A, Liu J, Feng J. Improving weld strength of arc-assisted ultrasonic seam welded Mg/Al joint with Sn interlayer. *Mater Design* 2016. – V. 98. – 262-271.

84. Wang YP, Li H, Li ZX, Zhang Y, Qin J, Chen GY, et al. Refining microstructure of medium-thick AA2219 aluminium alloy welded joint by ultrasonic frequency double-pulsed arc. *J Mater Res Technol* 2023;23. - 3048-61.

85. Microstructures and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Joints by Focused Ultrasound-Assisted TIG Welding. Qingfu Yang, Wanghui Xu, Yifeng Xiao, Weifeng Xie, Jinye Xiong, Tian Zhang1 *Metallography, Microstructure, and Analysis* (2022) 11:141–149.

86. Enhancement of AZ80 joints using ultrasonic vibration-assisted welding process. H. Li, J. Zhang , Yibo Xiong// *Science and Technology of Welding and Joining* – 2017. – V. 275. – P. 200-209. Harbin Institute of Technology, China

87. Shao ZW, Le QC, Zhang ZQ, et al. A new method of semi-continuous casting of AZ80 Mg alloy billets by a combination of electromagnetic and ultrasonic fields. *Mater Des.* 2011;32:4216–4224.

88. Nie KB, Wang XJ, Wu K, et al. Effect of ultrasonic vibration and solution heat treatment on microstructures and tensile properties of AZ91 alloy. *Mater Sci Eng A.* 2011;528:7484–7487.

89. Ultrasonic vibration assisted tungsten inert gas welding of dissimilar magnesium alloys. Fangzhou Y., Jie Z., Rongrong D. // *Journal of Materials Science & Technology.* - V. 34. – 2018. - P. 2240–2245.

90. Ultrasonic-Magnetic field coaxial hybrid controlling the microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel GTAW joints. C. Chen, W. Li, X. Sun // *Journal of Materials Processing Tech.* – 2023. – V. 25. – P. 5807-5819.

91. Investigation of arc characteristics and weld formation in ultrasonic magnetic coaxial hybrid GTAW. Wenlong L., Jin Liu, Zhang H., Chao C. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2023. – V. 128. – P. 1615–1628.

92. The Effect of the Distance between Ultrasonic Horn and Torch on the

Microstructure of Ultrasonic-Assisted Gas Tungsten Arc Welded Inconel 690 Alloy Joint. Yunhao Xia, Xiaoyu Cai, Bolun Dong, Sanbao Lin // Crystals. – 2023.

93. Ultrasonic vibration assisted gas tungsten arc welding of Inconel 690 alloy: Ultrasonic effect to refine grains and improve mechanical properties. Yunhao Xia, Bolun Dong, Xiaoyu Cai, Sanbao Lin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2024.

94. Effect of ultrasonic field parameters on interfacial characteristics and mechanical properties of Mg alloy welding joint. Chuan Xu, Xinjian Yuan // Materials Letters. – 2023

95. He L., Wu M., Li L., Hao H. Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process. Applied Physics Letters. – 2006.

96. Yang M, Zheng H, Li L. Arc shape characteristics with ultra-high-frequency pulsed arc welding. Appl Sci. - 2017. 7:45–53.

97. Qi B.J, Li W, Cong B.Q., Yang MX. The effect of hybrid ultrasonic pulse current parameters on VPTIG arc pressure and weld formation. Materials Science Forum, Trans Tech Publ. 2012:770–4.

98. Qi B, Yang M, Cong B, Liu F. The effect of arc behavior on weld geometry by high frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. Int J Adv Manuf Tech 2013;66:1545–53.

99. Wang JJ, Lin T. Twin-arc TIG welding with ultrasonic excitation. J Shanghai Jiaotong U 2011; 45 : 15–8.

100. Cong B, Qi B, Zhou X. TIG arc behavior of ultrafast-convert high-frequency variable-polarity square wave. Trans China Weld Inst 2009;30:87–90.

101. Yang M, Liu H, Qi B. The surface depression and temperatures in molten pool with pulsed arc welding. J Manuf Process 2019; 37: 130–8.

102. Yang M, Yang Z, Cong B, Wang Q, Qi B. Metal molten behavior with ultra-high frequency pulsed arc welding. J B Univ Aeronaut Astronaut 2015; 41: 589–93.

103. Yang M, Bojin QI, Cong B, Wei LI, Yang Z. Weld appearance behavior in welding pool of stainless steel by ultrahigh frequency pulse GTAW process. Trans China Weld Inst 2012; 33:31–4.

104. Yang M, Yang Z, Cong B, Qi B. How ultra-high frequency of pulsed gas tungsten arc welding affects weld porosity of Ti-6Al-4V alloy. *Int J Adv Manuf Tech* 2015; 76:955–60.
105. Wang L, Suo Y, Wu C, Wang D, Liang Z. Effect of pulse frequency on microstructure and mechanical properties of 2198 Al-Li alloy joints obtained by ultrahigh-frequency pulse AC CMT welding. *Mater* 2019;12:1–15.
106. Wang D, Chen Y, Li H, Liang Z. Effects of AC CMT welding coupled with high frequency pulse current on microstructure and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy joint. *Hot Work Technol* 2017;46:13–8.
107. В.С. Энгельшт, В. Ц. Гурович / Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 376 с.
108. Теоретические основы сварки / Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа. – 1970. – 592с.
109. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
110. Петров А.В. Давление дуги на сварочную ванну в среде защитного газа // Автоматическая сварка. – 1955. – № 4. – С.84-89.
111. Финкельнбург, В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельнбург, Г. Меккер ; пер. с нем. В. Б. Левина [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук В. А. Фабриканта. - Москва : Изд-во иностр. лит., 1961. - 370 с.
112. W. Welzel, R. Vompe. Theorie elektrischer Bogen und Funken, Leipzig, 1949.
113. B. Rompe, W. Thouret. *Z. Techn. Phys.* – V. 19 – 1938. – 352 с.
114. G. Cantin, J. A. Francis. Arc power and efficiency in gas tungsten arc welding of aluminium / *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2005. – V. 10 №2. – P. 200-210.
115. Bag, S., De, A. Probing Reliability of Transport Phenomena Based Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Autogeneous Fusion Welding Process. *Metall. & Material Transactions A*, Vol 41A, Sep. 2010, pp. 2337-2347.
116. Christensen, N., de Davies, L. V., Gjermundsen, D. Distribution of

Temperatures in Arc Welding. British Welding Journal, 1965, 12 (12), pp. 54 – 75

117. Gonzalez, J.J., Freton, P. & Masquere, M., Experimental quantification in thermal plasma medium of the heat flux transferred to an anode material. J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) 5602-5611.

118. Gentle K.W., Ingard U. Determination of neutral gas temperature in a plasma column from sound velocity measurements // Applied physics letters. - V5. – №5. – 1964. - P. 105-106.

119. Ingard U. Acoustic wave generation and amplification in a plasma. - Physical Review. – V. 145. - №1. 1966. – P. 41-46.

# **ПРИЛОЖЕНИЕ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2817683**

**Способ сварки неплавящимся электродом алюминия и его сплавов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолГТУ) (RU)*

Авторы: *Муругов Дмитрий Александрович (RU), Савинов Александр Васильевич (RU), Чудин Артем Алексеевич (RU), Полесский Олег Александрович (RU), Красиков Павел Павлович (RU), Лысак Владимир Ильич (RU)*

Заявка № **2023124823**

Приоритет изобретения **27 сентября 2023 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **18 апреля 2024 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **27 сентября 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ООО ПТП «Поршень»  
Долгополов Д.Д.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.



### АКТ

апробации технологии сварки неплавящимся электродом в аргоне с применением  
ультразвуковых колебаний дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха  
из сплава АМц

Настоящий акт составлен в том, что в производственных условиях ООО ПТП «Поршень» проведена сварка дыхательных клапанов систем очистки и вентиляции воздуха из сплава АМц неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний, разработанной на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).

Сварные соединения клапана не имели дефектов. Сварку клапанов из алюминиевого сплава АМц в объеме 3 шт. проводили с помощью устройства для сварки неплавящимся электродом с применением ультразвуковых колебаний, разработанной на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ). Процесс сварки протекал стабильно, без сбоев. На поверхности изделия не обнаружено дефектов. Геометрические параметры сварных соединений соответствуют требованиям ГОСТ 14806-80.

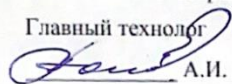
Для сварки соединений потребовался 1 проход без применения присадочного материала. После окончания испытаний установлено, что механические свойства полученных сварных соединений находятся на уровне свойств основного металла.

Заключение по результатам испытаний

Установлено, что производительность процесса сварки повысилась на 40%. Испытания показали целесообразность практического применения сварки неплавящимся электродом с воздействием ультразвука для повышения производительности. Разработанная технология может быть рекомендована для сварки изделий из алюминиевых сплавов АМц, АМг5 с целью повышения производительности и качества получаемых сварных соединений наряду с необходимыми механическими свойствами.


От ООО ПТП «Поршень»

Главный технолог

 А.И. Попов


От ВолГТУ

Научный руководитель темы

 д.т.н., проф. А.В. Савинов

Ответственный исполнитель



к.т.н., доцент П.П. Красиков



Исполнители:

к.т.н., доцент А.А. Чудин

м.н.с. Д.А. Муругов

*The  
A. F. Davis Silver Medal*

