

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Сварка дугой переменного тока деформируемых алюминиевых сплавов»

Обучающийся

А.И. Рычин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент Г.М. Короткова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

ст. преподаватель Д.Э. Советкин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Технологические свойства дуги переменного тока при сварке деформируемых алюминиевых сплавов	6
1.1 Свойства деформируемых алюминиевых сплавов	6
1.2 Особенности сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом	11
1.3 Технологические возможности современных установок и инверторов для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов.....	19
1.4 Показатели технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы.....	25
2 Технологические возможности источников питания переменного тока прямоугольной формы влияющие на свойства дуги.....	27
2.1 Влияние основных электрических параметров при сварке дугой переменного тока прямоугольной формы на свойства дуги	27
2.2 Основные неэлектрические параметры при сварке дугой переменного тока прямоугольной формы	35
3 Методика проведения исследований показателей технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы	39
3.1 Выбор материала и установок для сварки переменным током прямоугольной формы.....	39
3.2 Технология автоматической сварки образцов неплавящимся электродом свободной дугой	42
3.3 Методика исследования структуры соединения.....	44
4 Исследования технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы при сварке деформируемых алюминиевых сплавов .	50
4.1 Определение условий устойчивости процесса сварки на переменном токе прямоугольной формы	50

4.2 Исследование проплавляющей способности дуги на переменном токе прямоугольной формы.....	52
4.3 Исследование катодной очистки при сварке на переменном токе прямоугольной формы.....	54
4.4 Влияние параметров режима сварки на структуру сварного соединения при сварке на переменном токе прямоугольной формы.....	56
Заключение	68
Список используемой литературы и используемых источников.....	71

Введение

Развитие сварочных технологий для алюминиевых сплавов является важным направлением в современной материаловедении и инженерии. Алюминий и его сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как легкость, устойчивость к коррозии и высокая прочность. Однако сложности, связанные с их сваркой, требуют постоянного поиска новых решений и подходов.

Актуальность исследования обусловлена растущим спросом на легкие и прочные конструкции, где деформируемые алюминиевые сплавы выступают ключевым материалом. Традиционные методы сварки, такие как MIG и TIG на постоянном токе, не обеспечивают необходимой стабильности процесса и воспроизводимости результатов, особенно при работе с тонкостенными и высоколегированными сплавами алюминия. В этой связи методы сварки переменным током, в частности с использованием дуги прямоугольной формы, открывают новые возможности за счёт управления тепловложением, минимизации дефектов и повышения производительности.

Современные инверторные установки (СПРИ, ИСВУ-315, TIG-250P AC и др.) позволяют гибко настраивать параметры тока, однако их потенциал для сварки алюминия изучен недостаточно, что подтверждается ограниченным числом исследований в данной области.

Ключевая проблема заключается в отсутствии систематизированных данных о взаимосвязи электрофизических характеристик дуги переменного тока прямоугольной формы с технологическими свойствами процесса: стабильностью горения, проплавляющей способностью, геометрией шва и механическими характеристиками соединения. Недостаточная проработка этих аспектов ограничивает внедрение прогрессивных методов в

промышленность, несмотря на их технические преимущества и современных инверторных установок.

Сочетание актуальности темы, научной новизны и прикладной направленности работы определяют её значимость для развития сварочных технологий в контексте импортозамещения и цифровизации промышленности.

Особое внимание в данном исследовании уделяется сварке переменным током, которая позволяет более эффективно управлять процессом тепловложения и минимизировать негативное влияние оксидных пленок. Это особенно важно при работе с деформируемыми алюминиевыми сплавами, которые часто используются в ответственных конструкциях, где качество сварного соединения играет ключевую роль.

Кроме того, использование современных инверторных установок открывает новые горизонты для оптимизации сварочных процессов. Их гибкость в настройке параметров тока позволяет адаптировать технологию под конкретные задачи, что делает их незаменимыми в условиях современного производства. Однако для полного раскрытия их потенциала необходимы дополнительные исследования, направленные на изучение влияния различных режимов сварки на качество соединений.

Данная работа направлена на решение важной научно-технической задачи, которая имеет большое значение для развития современных сварочных технологий. Результаты исследования могут быть использованы не только в промышленности, но и в образовательных целях, способствуя подготовке квалифицированных специалистов в области сварочного производства.

Целью магистерской диссертации является расширение технологических возможностей сварки деформируемых алюминиевых сплавов за счёт оптимизации параметров дуги переменного тока прямоугольной формы.

1 Технологические свойства дуги переменного тока при сварке деформируемых алюминиевых сплавов

1.1 Свойства деформируемых алюминиевых сплавов

«Алюминий – самый распространённый в земной коре металл, его запасы составляют 8,8%. Алюминий является одноморфным металлом с плотноупакованной гранцентрированной кубической решёткой» [2, 10, 24] ($\alpha = 4,04 \text{ \AA}$), имеет ионный радиус $\tau_i = 0,57 \text{ \AA}$, что обуславливает ограниченную растворимость в нём всех известных элементов, например, при температуре кристаллизации чистого алюминия ($660,4 \text{ }^\circ\text{C}$) и парциальном давлении водорода над металлом 760 мм ртутного столба растворимость водорода в алюминии составляет всего $0,039 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ (рисунок 1) [19].

«Технически чистый алюминий имеет низкие прочностные характеристики ($\sigma_b = 49 - 68 \text{ МПа}$, модуль упругости $E = 70000 \text{ МПа}$) и высокие пластические свойства ($\delta = 28\%$), поэтому в качестве конструкционного материала применяется в значительно меньших объёмах, чем его сплавы различного легирования» [2].

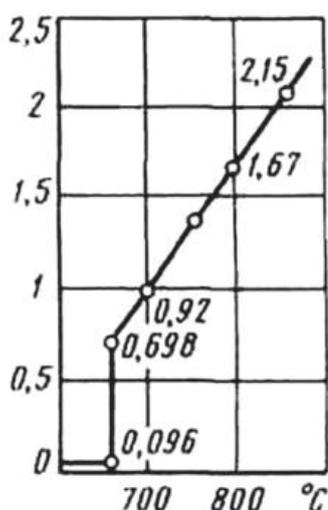


Рисунок 1 – Растворимость водорода в алюминии

«В зависимости от содержания легирующих элементов, характера пластической обработки металла все алюминиевые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные. В качестве примера такого подразделения на рисунке 2 приведена бинарная диаграмма состояния наиболее распространённых сплавов системы Al-Mg. Деформируемые алюминиевые сплавы содержат легирующие элементы в количествах до предела их растворимости в α -растворе алюминия (рисунок 2), например, структура алюминиево-магниевых сплавов характеризуется зёрнами α -алюминия, по границам которых могут быть выделения бета-фазы – Al_3Mg_2 (до 3%)» [2].

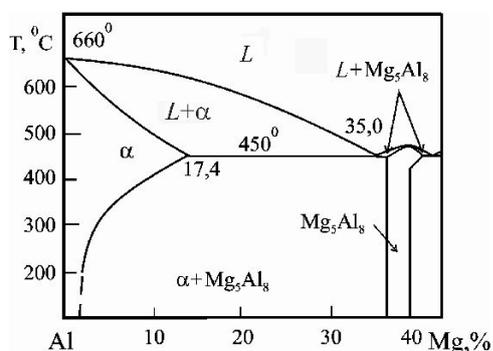


Рисунок 2 – Бинарная диаграмма состояния системы Al-Mg

«Для сварных конструкций главным образом применяются деформируемые алюминиевые сплавы (ГОСТ 4784-74), которые можно подразделить на термически не упрочняемые (низкой и средней прочности) и термически упрочняемые (средней и высокой прочности) (таблица 1-4). К термически неупрочняемым можно отнести технический алюминий, сплавы системы Al-Mn, алюминиево-магниевые сплавы системы Al-Mg» [2].

Таблица 1 – Химический состав сплавов системы Al-Mg, %

Марка сплава	Основные легирующие компоненты, %		
	Mg	Mn	Si, Ti
АМг3	3,2...3,8	0,2...0,6	0,5...0,8Si
АМг6	5,8...6,8	0,5...0,8	0,02...0,1Ti

Таблица 2 – Химический состав сплавов системы Al-Cu-Mg, %

Марка сплава	Cu	Mg	Mn	Fe	Si
				менее	
Д16	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	0,5	0,5
Примечание. 0,005...0,0002Be, 0,8...1,4Ni					

Таблица 3 – «Химический состав сплавов системы Al-Cu-Mn, %» [31]

Марка сплава	Cu	Mn	Ti	Zr	V	Mg	Fe	Si	Cd
1201	5,8... 6,8	0,2... 0,4	0,02... 0,1	0,1... 0,25	0,05... 0,15	0,02	0,3	0,2	0,1...0,2

Таблица 4 – «Химический состав сплавов системы Al-Cu-Mn, %» [31]

Сплав В92	Zn	Mg	Mn	Zr	Примеси, менее		
					Cu	Fe	Si
	2,9...3,6	3,9...4,6	0,6...1,0	0,1...0,2	0,05	0,3	0,2

«Несмотря на значительно большую стоимость по сравнению с углеродистыми и низколегированными конструкционными сталями, объём применения алюминиевых сплавов в производстве сварных конструкций непрерывно повышается. Это можно объяснить такими эксплуатационными свойствами алюминия и его сплавов, как высокая коррозионная стойкость в целом ряде агрессивных жидких и газовых сред (в том числе, в морской воде), немагнитность и высокие электро- и теплопроводность, низкие температуры (вплоть до криогенных) перехода алюминиевых сплавов из вязкого в хрупкое состояние» [2, 20, 38].

«Малая плотность и высокие прочностные свойства термически упрочняемых алюминиевых сплавов обуславливают их более высокую удельную прочность по сравнению с конструкционными сталями, что позволяет снижать металлоёмкость, например, строительных конструкций, при замене сталей алюминиевыми сплавами» [2, 20]. Кроме того, преимуществом алюминиевых сплавов по сравнению с конструкционными сталями является их технологичность при производстве полуфабрикатов прессованием, штамповкой и прокатной.

«Недостатком алюминиевых сплавов по сравнению с конструкционными низкоуглеродистыми и низколегированными сталями является необходимость применения более сложных технологических приёмов как в процессе подготовки деталей под сварку, так и в процессе сварки. Поэтому, учитывая относительно высокую стоимость алюминиевых сплавов и их более низкую по сравнению с конструкционными сталями технологическую свариваемость, эффективность применения алюминиевого сплава в качестве основного металла должна определяться главным образом с учётом условий эксплуатации данной сварной конструкции.

Для ответственных сварных конструкций наиболее широкое применение нашли термически неупрочняемые алюминиево-магниевые сплавы АМг5В и АМг6 и термически упрочняемый сплав 1915 средней прочности. Физико-механические свойства сплавов сварных соединений восстанавливаются после низкотемпературного старения» [22].

«При выборе алюминиевого сплава для данной сварной конструкции одна из важных характеристик – коэффициент конструктивной прочности, выражающий отношение конструктивной прочности, определяемой по результатам испытаний сварных сосудов-моделей, к пределу прочности основного металла» [2]. Это применимо главным образом для тонколистового материала (2-5 мм).

Менее надёжным способом определения коэффициента конструктивной прочности является отношение временного сопротивления при растяжении стандартных сварных образцов к временному сопротивлению при растяжении образцов аналогичного размера из основного металла.

В таблице 5 приведены результаты испытаний сосудов-моделей из алюминиевых сплавов толщиной 2...4 мм, выполненных аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом с подачей, рекомендуемой для данного сплава присадочной проволоки. Получены результаты испытаний сварного сосуда из сплава 01420 после упрочняющей термообработки. Низкая

конструктивная прочность алюминиевых сплавов, упрочняемых в результате старения за счёт выделения по границам зёрен α_{Al} мелкодисперсной фазы θ (Al_2Cu), например, Д16, Д20, М40 (таблица 5), объясняется тем, что в условиях дуговых видов сварки мгновенные скорости охлаждения металла околошовной зоны значительно меньше критических скоростей образования упрочняющей фазы при температурах минимального времени её выделения (рисунок 3).

Таблица 5 – Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов различных систем легирования [10]

Система сплава	Марка сплава	Основной металл		Сварное соединение			Система упрочнения	Склонность сплава к коррозионному растрескиванию
		σ_i , МПа	σ_T , МПа	σ_b , МПа	σ_K , МПа	$K = \frac{\sigma_K}{\sigma_b}$		
Al-Mg	АМг6М	310	145	290	246	0,75	-	Не склонен
	АМг6Н	370	285	335	-		Нагартовка 20%	Мало склонен
Al-Cu-Mg	М40	380	275	255	325	0,62	Старение	Не склонен
	Д16	385	256	-	165	0,43	θ (Al_2Cu)	
Al-Cu-Mn	Д20	395	312	-	230	0,58	Фаза θ ($Al_2Mg_3Zn_3$) после старения	Не склонен
	1201							

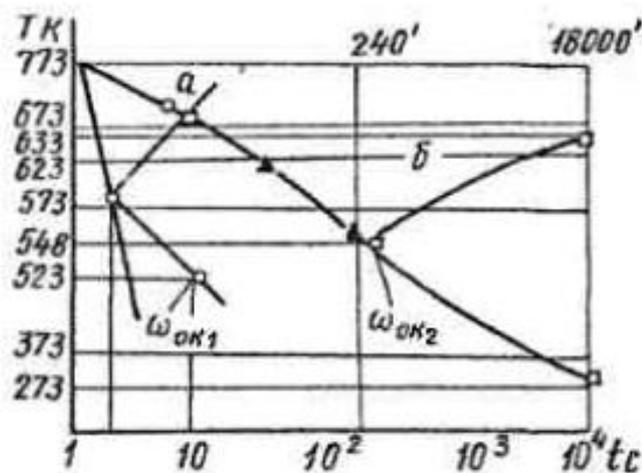


Рисунок 3 – Характер выделения интерметаллидов при изотермической обработке

На этом рисунке представлены кривые выделения интерметаллидов при изотермической обработке, где « α -фаза θ (Al_2Cu) сплав Д16; β – фаза T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$) – сплав 1915 $\omega_{0к1}$ – критическая скорость непрерывного охлаждения от температуры нагрева выше температуры закалки сплава Д16; $\omega_{0к2}$ – то же для сплава 1915)» [22].

Применение более концентрированных сварочных источников тепла, обеспечивающих мгновенные скорости охлаждения металла околошовной зоны подобных сплавов выше критических (~ 200 град/с), позволит значительно расширить область использования для сварных конструкций высокопрочных алюминиевых сплавов, упрочняемых за счёт θ фазы.

1.2 Особенности сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом

«Технологическая свариваемость алюминиевых сплавов определяется физико-химическими свойствами алюминия, являющегося основой сплава: 90...95% в деформируемых алюминиевых сплавах (таблица 1-4), физико-химическими свойствами основных легирующих элементов, модификаторов и постоянных примесей – железа, кремния, водорода, содержание которых зависит от системы легирования сплава.

Эксплуатационные свойства конструкций из алюминиевых сплавов, особенно средней и высокой прочности, определяются развитием структурной и механической неоднородности в металле различных участков сварного соединения в результате воздействия термомодеформационного сварочного цикла.

Тугоплавкие оксидные плёнки, образующиеся практически мгновенно на поверхности металла после очистки, создают одно из основных затруднений при сварке алюминия и его сплавов. Например, при сварке технического алюминия на поверхности деталей после химической обработки

мгновенно образуется оксидная плёнка Al_2O_3 толщиной $1 \cdot 10^{-7}$ м, имеющая предел прочности 20 МПа и плотность $4 \cdot 10^3$ кг/м³.

Тугоплавкая оксидная плёнка алюминия ($T_{пл} = 2323$ К) прочно удерживается на поверхности металла вплоть до температур, превышающих температуру плавления алюминия» [22]. Защитные свойства оксидной плёнки алюминия при контакте металла с окислительными средами объясняются правилом Пиллинга-Бедвортса:

$$\eta_{Al} = \frac{v_{MmOn}}{m v_{MI}}, \quad (1)$$

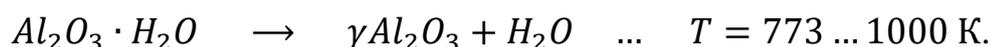
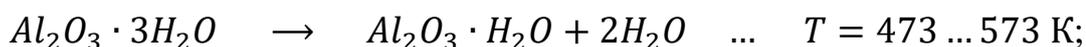
где m – число атомов металла в его окисле;

v_{MmOn} – объём моля окисла Al_2O_3 ;

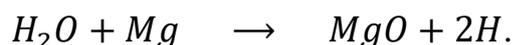
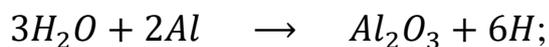
v_{MI} – грамм атома металла.

Из-за высокой адсорбционной способности и наличия влаги в окружающей среде оксидные плёнки постепенно превращаются в комплексные соединения типа $Al_2O_3 \cdot H_2O$ и $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$.

В процессе нагрева до температур (473...1000) К происходит разложение комплексных соединений по схеме:



В результате взаимодействия алюминия с образующимися парами воды, а при сварке алюминиево-магниевого сплава и магния в сварочной ванне повышается концентрация водорода:



«В зависимости от состава алюминиевых сплавов может изменяться и состав оксидных плёнок в том случае, если легирующий элемент имеет сопоставимое с алюминием сродство к кислороду, либо является более поверхностно активным, чем алюминий. К таким элементам относятся магний, цирконий, титан и бериллий. Из перечисленных элементов наиболее

существенное влияние оказывает магний. При содержании магния в сплаве свыше 1,5% оксидная плёнка состоит практически из чистого магнезита [32], так как $\eta_{Mg} < 1$ (правило Пиллинга-Бедвортса), то магнезитовая плёнка менее плотная и обладает большей адсорбционной способностью, чем окись алюминия» [1]. Этим можно объяснить более высокую склонность к порообразованию в шве при сварке алюминиево-магниевых сплавов, чем при сварке алюминия.

Введение малых добавок активного бериллия в состав алюминиево-магниевых сплавов значительно снижает окисление магния, так как $\eta_{Be} > 1$, и BeO образуется в поверхностном слое оксидной плёнки.

При всех способах сварки плавлением алюминиевых сплавов необходима предварительная обработка поверхностей деталей и электродной проволоки, обычно щелочная, после которой вновь «образующаяся оксидная плёнка будет иметь толщину не более $200 \cdot 10^{-10}$ м. Необходимо также ограничивать время от химической обработки до выполнения сварки подготовленных деталей» [22].

«В процессе сварки алюминиевых сплавов решающее влияние на формирование и свойства металла шва оказывают эффективность защиты расплавленного металла, разрушение и оттеснение оксидных плёнок с зеркала ванны. Эта задача решается путём реализации электротермического эффекта, в частности, катодного распыления оксидной плёнки при электродуговой и плазменной сварке в среде инертных газов на постоянном токе обратной полярности либо переменном токе, за счёт высокой концентрации ввода термической энергии при гелиево-дуговой сварке на постоянном токе прямой полярности, либо при электронно-лучевой сварке в вакууме» [22].

«Достаточно широкое применение нашёл комбинированный способ разрушения оксидных плёнок за счёт активных флюсов, построенных на базе хлористых и фтористых соединений щелочных и щелочноземельных» [22]

металлов, с реализацией катодного распыления, например, при автоматической сварке под слоем флюса или при электрошлаковой сварке.

«Технологическая прочность металла шва сварных соединений из алюминиевых сплавов определяется теми же факторами, что и при сварке других конструкционных материалов и, прежде всего, достаточным уровнем деформационной способности в соответствии с темпом нарастания растягивающих деформаций в период эффективной кристаллизации [19], либо по терминологии Прохорова Н.Н. в период температурного интервала хрупкости. Однако из-за значительной разницы теплофизических свойств алюминия и его сплавов по сравнению с конструкционными сталями (таблица б) влияние металлургического и особенно силового факторов на технологическую прочность металла шва алюминиевых сплавов существенно отличается от влияния этих факторов на технологическую прочность швов сварных соединений конструкционных сталей. Поэтому достаточно надёжные методики определения стойкости шва и околошовной зоны против образования трещин» [22], успешно применяемые при оценке технологической свариваемости сталей, не дают положительных результатов при сварке алюминиевых сплавов, особенно сложнолегированных, упрочняемых термической обработкой. Помимо горячих трещин подобные сплавы склонны и к замедленному разрушению – образованию холодных трещин как в шве, так и в околошовной зоне. Кроме того, под влиянием сварочных напряжений, либо напряжений от внешней нагрузки некоторые конструкционные алюминиевые сплавы склонны к коррозионному растрескиванию.

Таблица 6 – Состав сварочных проволок из алюминия и его сплавов

Марка	Процент по массе	Процент по массе						Прочие, не более, % по массе
	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Be	Zr	
Св АМг3	3,2... 3,8	0,3... 0,6	-	0,5... 0,8	-	0,002... 0,005	-	0,85
Св АМг6	5,8... 6,8	0,5... 0,8	-	-	-	0,002... 0,005	-	1,20
Св 1201	6,6... 6,8	0,2... 0,4	0,05... 0,16	-	0,1...0,2	0,0001... 0,0008	0,1... 0,25	0,3
Примечание. Основа Al – 99...100%								

Как в отечественной, так и зарубежной практике [14, 20] преимущественное применение для сварных конструкций нашли термически неупрочняемые сплавы, главным образом алюминиево-магниевые, либо термически упрочняемые сплавы систем: Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg (таблица 5).

«В зависимости от типоразмеров сварных соединений (в соответствии с ГОСТ 14806-69 на форму, размеры шва и элементы разделки кромок деталей применительно к дуговым видам сварки в инертных защитных газах) изменяются доля участия добавочного металла в шве и химический состав металла сварочной ванны. В связи с этим на технологическую прочность металла шва и на его эксплуатационные свойства решающее влияние может оказывать состав электродной (присадочной) проволоки (таблица 6).

Исходя из общих положений образования и развития кристаллизационных трещин в литом металле в зависимости от его химического состава (рисунок 4) [34] выбор электродной проволоки выполняется по допустимым концентрациям легирующих элементов и примесей, прежде всего кремния и железа, при которых гарантируются удовлетворительная технологическая прочность металла шва и его эксплуатационные свойства. Например, при сварке сплавов системы Al-Zn-Mg, исходя из условия удовлетворительной технологической прочности» [1], отношение цинка к магнию ограничивается в пределах 0,7, а из условия

удовлетворительной работоспособности – стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением – суммарное содержание цинка и магния как в основном металле, так и металле шва ограничивается в пределах 6%.

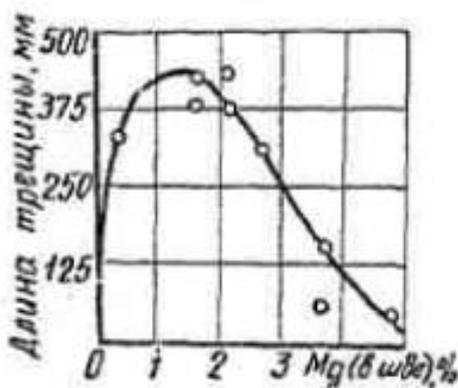


Рисунок 4 – Зависимость длины трещины от %-го легирования Mg

«Одной из основных причин кристаллизационных трещин в сварных швах алюминиевых сплавов с низким содержанием магния может быть алюминиево-кремниевая эвтектика с $T_{пл} = 850$ К, образующаяся при ничтожно малых количествах свободного кремния» [22, 24].

В качестве универсального способа связывания кремния в комплексные соединения, например типа Al-Fe-Si, при литье и сварке подобных алюминиевых сплавов должно выдерживаться отношение $\% \text{Fe} / \% \text{Si} > 1$.

В алюминиевых сплавах, «содержащих свыше 5% магния, выделение свободного кремния мало вероятно, так как образуется интерметаллид типа Mg_2Si .

Положительное влияние на технологическую прочность металла шва при сварке практически всех деформируемых алюминиевых сплавов оказывают модифицирующие элементы – цирконий и титан» [22].

«Значительные затруднения при сварке конструкций из алюминия и его сплавов возникают из-за таких технологических свойств алюминия, как

высокие значения теплопроводности, удельной объёмной теплоёмкости, коэффициента термического расширения и эффекта скрытой теплоты плавления (40% от теплосодержания при температуре плавления алюминия)» [2].

«Несмотря на относительно низкую температуру плавления алюминия и его сплавов при сварке этих материалов необходимы мощные, достаточно сосредоточенные источники тепла» [5, 22, 39].

При толщине материала свыше $(1,0...1,2 \cdot 10^{-2})$ м даже в условиях дуговой сварки необходим предварительный подогрев до $(373...423)$ К. «С повышением температуры нагрева свариваемых деталей происходит резкое снижение прочностных свойств металла (рисунок 5) [33], поэтому необходимы специальные приспособления, исключаящие разрушение» [22] в ослабленных нагревом участках под действием деформации свариваемого металла.

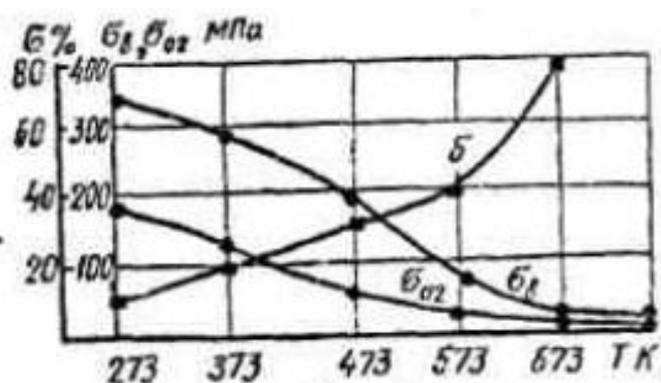


Рисунок 5 – Зависимость прочности от температуры нагрева

При сварке тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов наиболее существенные затруднения возникают из-за потери устойчивости материала под влиянием временных сжимающих напряжений [8]. Как следствие этого, происходит коробление кромок, подъём их с формирующей подкладки, что в свою очередь может вызвать прожоги, уменьшение рабочего

сечения шва, а значительные остаточные деформации из плоскости искажают форму конструкции в недопустимых пределах, что увеличивает трудоёмкость их производства из-за необходимости последующей правки обычно термомеханическим способом.

Для снижения коробления в производстве нашёл применение предварительный обратный выгиб свариваемых кромок и технологическая оснастка, обеспечивающая равномерное плотное поджатие кромок и формирующей подкладке.

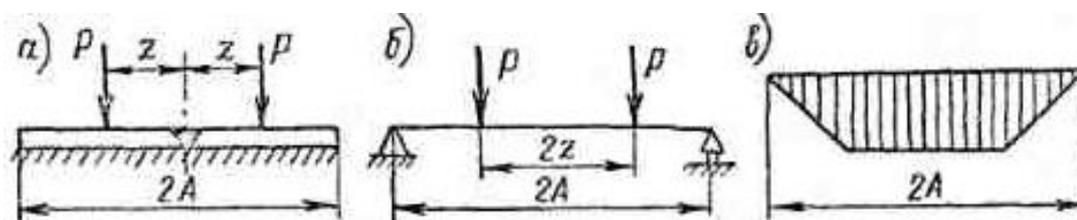


Рисунок 6 – Схема расчёта усилия прижима кромок к подкладке

На рисунке 6 приведена схема, поясняющая расчетное определение необходимого для плотного прижима кромок к подкладке усилия P (а – расположение прижимов; б – схема, принятая для определения усилия прижима, необходимого для предотвращения потери устойчивости кромок в процессе сварки; в – эпюра моментов):

$$P = \frac{s \cdot \sigma_T}{6(A - Z)}, \quad (2)$$

где s – толщина металла, мм;

σ_T – предел текучести алюминиевого сплава при температуре начала восстановления его упругих свойств ~ 573 К, например, для сплава АМгб при этой температуре $\sigma_T = 80$ МПа;

A – половина ширины сжатой области кромок в результате сварочного нагрева, м;

Z – расстояние от оси шва до прижима, обычно не менее $1,5 \cdot 10^{-2}$ м.

На работоспособность сварных конструкций из алюминиевых сплавов значительное влияние оказывает формирование «проплава», или обратного валика, в котором, как правило, образуются такие опасные дефекты, как шлаковые включения, поры и трещины. Для устранения подобных технологических концентраторов напряжений применяются специальная разделка кромок, подкладки с глубокой фасонной канавкой и при «аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом тонколистовых соединений, активные флюсы-пасты, наносимые на поверхность кромок с обратной стороны шва» [30].

1.3 Технологические возможности современных установок и инверторов для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов

«Алюминий и его сплавы играют важную роль в современной промышленности. Это обусловлено тем, что большинство промышленных сплавов алюминия обладают уникальным сочетанием высоких технологических свойств (большая удельная прочность) и физических характеристик (малая плотность, высокая теплопроводность, которая в 3...3,5 раза выше, чем у стали)» [3, с. 230].

Применение алюминия и его сплавов широко распространено как в различных частях мира, так и в промышленности (рисунок 7).

Анализ работ авторов [3, 16, 23, 28, 29, 32] показал, что в каждой из них рекомендации по сварке алюминиевых сплавов отличаются друг от друга. Так, Бродский А.Я. рассматривает способы сварки стыковых соединений толщиной стенки от 1 до 5 мм и от 1,5 до 32 мм в зависимости от способа соединения (встык, внахлестку, угловые) и рекомендует использовать сварку на переменном токе синусоидальной формы неплавящимся электродом в защитной среде аргона [3]. Рабкин Д.М. в своих работах для сварки

алюминиевых сплавов толщиной от 1,5 до 14 мм рекомендует применять переменный ток синусоидальной формы неплавящимся электродом. В своих работах Рабкин Д.М. высказал идею регулирования теплового баланса в прямую и обратную полярность переменного тока [23]. Для сварки алюминиевых сплавов толщиной от 10 до 20 мм рекомендует использовать сварку по флюсу и формулирует рекомендации по применению этого способа.

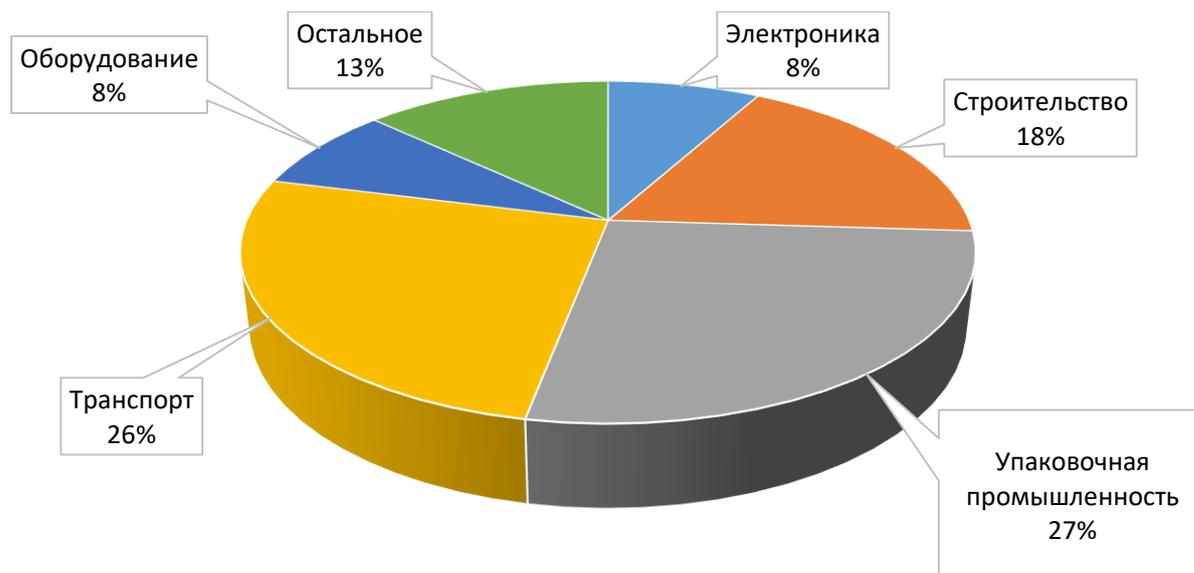


Рисунок 7 – Применение алюминия и его сплавов в промышленности

Возникшая потребность в сварке алюминия толщиной до 40 мм потребовала создания новых способов сварки алюминиевых сплавов указанных толщин за один проход. В 1965 году под руководством В.И. Столбова разрабатывается и выпускается серия источников питания трёхфазной дугой. Столбов В.И. разрабатывает рекомендации по сварке алюминиевых сплавов толщиной до 40 мм за один проход трёхфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона на переменном токе синусоидальной формы [32].

Смирнов И.В. в своей работе [29] разрабатывает рекомендации по сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом на переменном токе

синусоидальной формы в аргоне толщиной от 0,8 до 60 мм в зависимости от типа сварного соединения: стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные. Особое внимание автор уделяет стыковым соединениям, таким как С1, С7, С18, С21, С25.

Развитие авиационной промышленности привело к росту использования алюминиевых сплавов малых толщин (от 0,2 до 4 мм). Известно, что при сварке алюминиевых сплавов малых толщин возникает проблема деформации сварных соединений. В связи с этим авторами работ разработан способ сварки неплавящимся электродом дугой переменного тока прямоугольной формы [13]. Применение этого способа позволило повысить проплавленную способность дуги переменного тока и снизить коробление кромок.

В 2004 году Лапин И.Е., изучив технологические свойства дуги переменного тока прямоугольной формы неплавящимся электродом в инертных газах, рекомендует для сварки толщин до 1,5 мм использовать этот способ [16].

Изучив материалы по рекомендации алюминиевых сплавов до 60 мм пришли к выводу, что необходимо весь ряд встречающихся толщин преобразовать в определённое количество диапазонов. Границы диапазонов, так же, как и градация толщин внутри каждого диапазона, выбраны условно, но с учётом ГОСТа на прокат и рекомендаций по построению вариационных рядов. По результатам преобразования строится график диапазонов толщин и соотносится с необходимой величиной сварочного тока и номенклатурой источников питания на рынке сварочного оборудования.

Зная отрасли промышленности, которые используют алюминиевые сплавы изучаются информационные источники N , в которых есть данные по режимам сварки конкретных толщин S . Изучив спрос и режимы сварки конкретных толщин запишем диапазоны с учетом ГОСТа на прокат (таблица 7).

Таблица 7 – Диапазоны толщин алюминиевых сплавов

Обозначение диапазонов	Градация толщин по диапазонам, мм
1	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8
2	1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0;
3	2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5;
4	7,0; 8,0; 9,0; 10,0
5	12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30
6	40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140

По результатам преобразования построим график, характеризующий спрос алюминиевых сплавов $N = f(S)$ (рисунок 8).

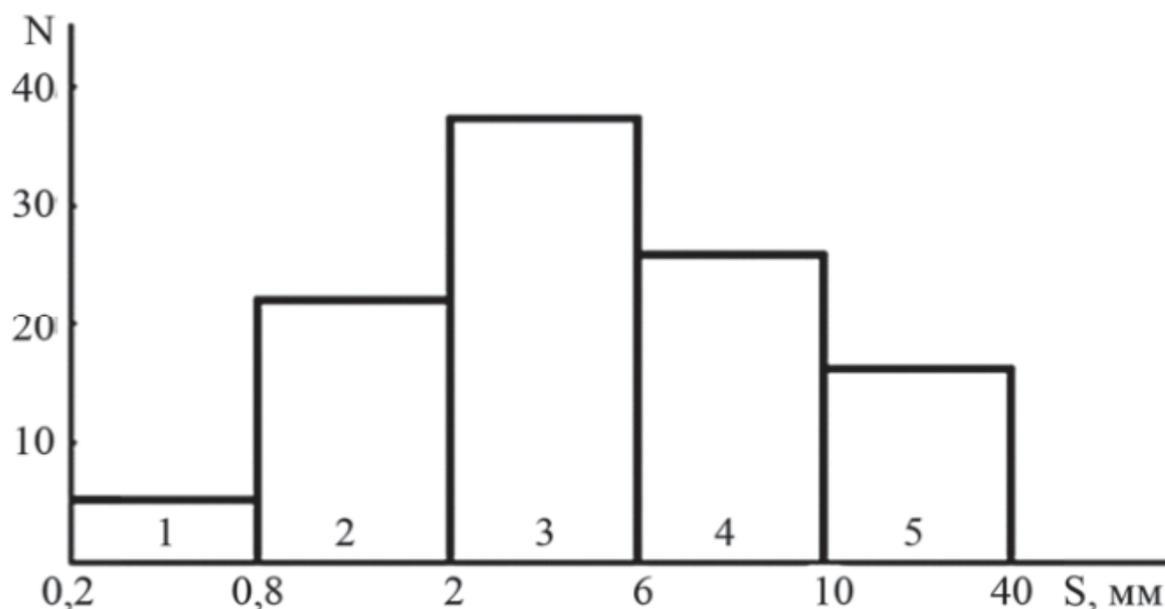


Рисунок 8 – График частоты спроса по толщине алюминиевого сплава

Каждому диапазону толщин, приведенному в таблице 7, соответствует свой диапазон тока дуги (рисунок 9). Величина тока дуги определяет область технологических возможностей дугового разряда: его проплавляющую способность, пространственную устойчивость, устойчивость при смене полярности тока дуги и т.д.

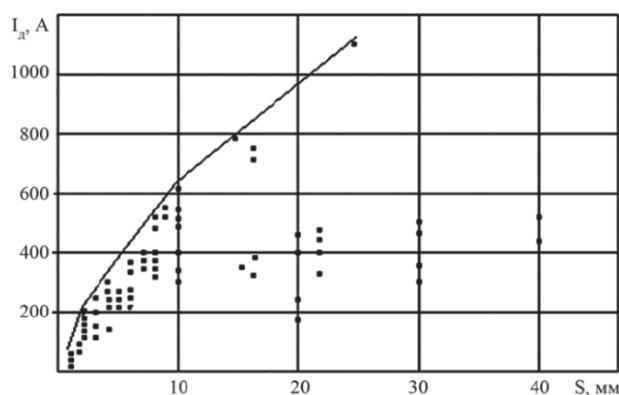


Рисунок 9 – Верхняя граница по току для непрерывной сварки однофазной дугой неплавящимся электродом в среде аргона

Приведённая на рисунке 9 верхняя граница токов позволяет определить ориентировочно пределы регулирования сварочного тока для каждого диапазона толщин, который «обслуживает» источник питания соответствующей мощности.

Разработаем таблицу, которая позволит определить для каждого диапазона толщин номинальный ток и выбрать соответствующий источник питания (таблица 8).

Таблица 8 – Верхние границы номинального тока по диапазонам толщин

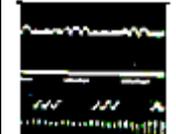
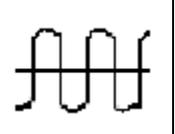
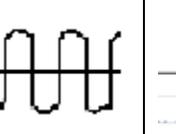
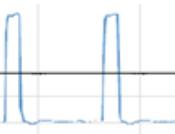
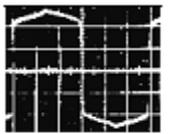
Диапазон	1	2	3	4	5	6
Толщина, мм	0,8	2,0	6,0	10,0	30,0	40,0
Ток, А	40	125	315	500	800	1000

Появление на рынке сварочного оборудования источников переменного тока прямоугольной формы для сварки неплавящимся электродом, таких как ТИР-300, TIG-200P AC/DC, Minarc TIG-180 существенно расширило технологические возможности дуги.

Появилась возможность регулировать тепловложения дуги в прямую и обратную полярность. Так, инвертор TIG-200P AC/DC фирмы Brima позволяет отдельно регулировать при частоте 50 Гц длительность прямой и обратной

полярности (таблица 9, рисунок 10).

Таблица 9 – Технические характеристики инверторов и установок

Параметры	Тип				
	СПРИ	ИСВУ-160	ТИР-300	TIG-200P AC/DC	ТСГП-200
Номинальный сварочный ток, А	200	160	300	200	200
Частота f , Гц	8-100	50			
$t_{пр}, t_{обр}, c$	0,01-0,8	0,01		0,004-0,016	0,01
$i_d = f(t)$ $u_d = f(t)$					

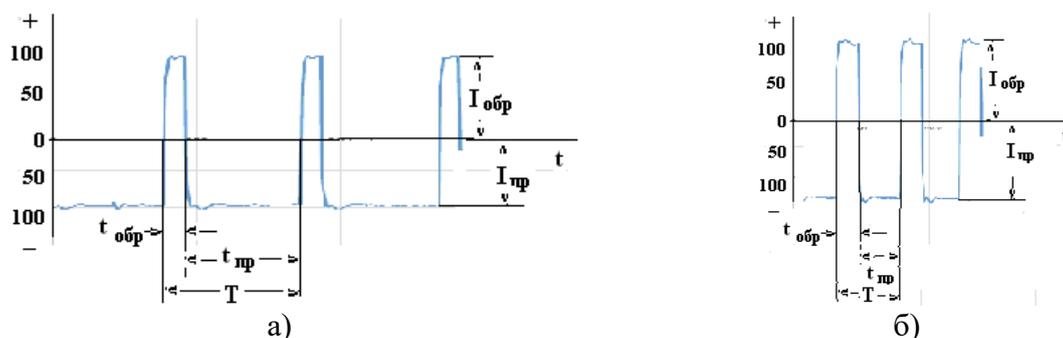


Рисунок 10 – Осциллограмма $i=f(t)$:

а) $I_{пр} = I_{обр} = 100$ А, $t_{обр}/t_{пр} = 17,6/82,34$; б) $I_{пр} = I_{обр} = 100$ А, $t_{обр}/t_{пр} = 30/70$

Из таблицы 9 следует, что наибольшее количество источников питания не превышает 200 А, за исключением ТИР-300, у которого $t_{пр} = t_{обр} = 0,01$ с. Поэтому рекомендации по сварке алюминиевых сплавов толщиной от 0,8 до 4 мм ориентируемся на TIG-200P AC/DC, который работает на частоте 50 Гц, в пределах которых регулируется длительность тепловложения в прямую и обратную полярность за счёт изменения длительности прохождения тока (рисунок 10) и станции питания СПРИ с регулируемой частотой сварочного тока 8-100 Гц.

1.4 Показатели технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы

«Под технологическими (служебными) свойствами сварочной дуги понимается совокупность её теплового, механического и физико-химического воздействия на электроды, определяющая интенсивность плавления электрода, формирование и качество шва. Технологические свойства сварочной дуги определяются в основном её физическими свойствами.

Технологические свойства сварочной дуги включают:

- зажигание дуги и установление процесса сварки;
- воздействие дуги на электроды (плавление электрода, проплавливающее действие дуги и формирование шва);
- перенос электродного металла;
- пространственную устойчивость дуги;
- эластичность дуги;
- саморегулирование и синергетические свойства дуги;
- реакцию дуги на импульсные воздействия.

Знание этих свойств необходимо для управления сварочной дугой» [20].

В данной работе из всего разнообразия показателей [17] рассматриваются следующие:

- 1) стабильность процесса сварки дугой переменного тока прямоугольной формы;
- 2) проплавливающая способность дуги;
- 3) катодная очистка;
- 4) качество сварного соединения при симметричном и асимметричном режимах сварки.

Учитывая технологические возможности современных установок и инверторов переменного тока прямоугольной формы, в которых максимальная величина тока не превышает 200 А, определяем диапазон толщин, которые

можно сваривать на современных инверторах и установках. Поэтому исследования ведутся на толщинах, не превышающих 4 мм с регулированием $t_{пр}$ и $t_{обр}$. На больших толщинах провести эксперименты не удаётся, поскольку оборудование на большие токи не выпускается.

Изучив свойства деформируемых алюминиевых сплавов и особенности получения неразъёмных соединений, для достижения поставленной цели, провели дополнительно анализ рекомендаций по сварке толщиной 0,8 до 40 мм различными способами и современных источников питания с широким диапазоном регулируемых параметров [16, 23, 24, 29, 30, 32-34].

В соответствии с поставленной целью сформулируем задачи выпускной квалификационной работы:

1. Исследовать стабильность процесса сварки дугой переменного тока прямоугольной формы и определить диапазон регулируемых параметров при сварочном токе до 250 А.
2. Исследовать влияние частоты переменного тока прямоугольной формы при симметричном режиме на проплавливающую способность дуги.
3. Определить влияние величины энергии обратной полярности дуги на размер зоны катодной очистки.
4. Исследовать влияние частоты переменного тока прямоугольной формы симметричного и асимметричного режима сварки на структуру шва.
5. Спроектировать технологический процесс сварки свободной дугой переменного тока прямоугольной формы сплава АМг6 неплавящимся электродом толщиной 2 мм в защитной среде.

2 Технологические возможности источников питания переменного тока прямоугольной формы влияющие на свойства дуги

2.1 Влияние основных электрических параметров при сварке дугой переменного тока прямоугольной формы на свойства дуги

В настоящее время на рынке сварочного оборудования появилось большое количество инверторов и установок переменного тока прямоугольной формы таких как, TIG-200P AC/DC, TIG-250PAC, СПРИ, для которых текущее значение тока можно выразить следующим образом:

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^n I_m \sin(k\omega t + \psi_{i_n}), \quad (3)$$

где i – текущее значение переменного тока;

I_0 – постоянная составляющая тока;

I_m – максимальное амплитудное значение несинусоидального переменного тока гармоник;

ω – угловая частота;

t – длительность;

ψ – начальная фаза;

n – количество гармоник.

Появление современных ИП переменного тока прямоугольной формы привело к большому количеству параметров, которые регулируются: f , $\partial U_{и}/\partial I$, di/dt , $I_{а пр.}$, $I_{а обр.}$, $U_{а пр.}$, $U_{а обр.}$, $U_{зажиг.}$, $P_{пр.}$, $P_{обр.}$, $t_{пр.}$, $t_{обр.}$.

Увеличение количества регулируемых параметров существенно расширяет технологические возможности процесса сварки алюминиевых сплавов.

Обозначения регулируемых параметров приведены на динамических характеристиках дуги $i_{д.}=f(t)$, $u_{д.}=(t)$, di/dt , которые показаны на рисунке 11.

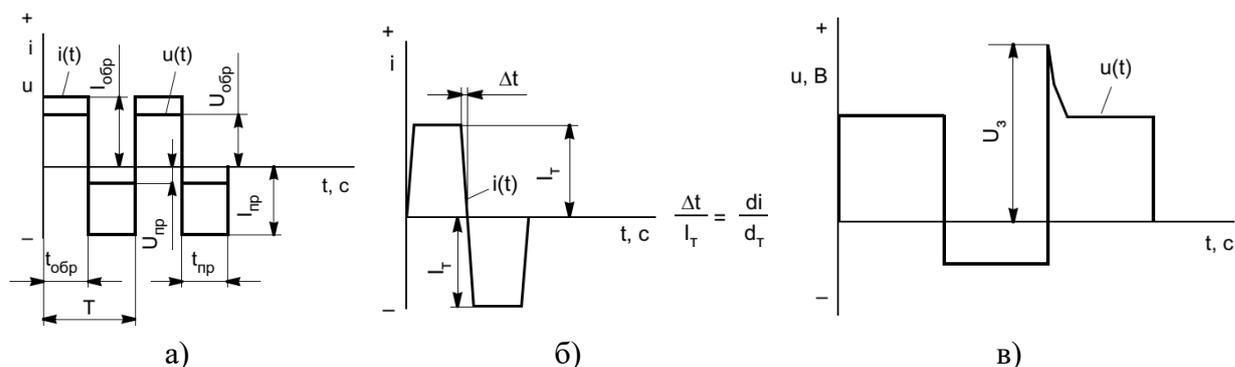


Рисунок 11 – Обозначения параметров переменного тока прямоугольной формы

Сводные данные технических характеристик современных источников питания для сварки алюминиевых сплавов приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики источников питания для сварки алюминиевых сплавов

Наименование параметров	Наименование источников питания			
	СПРИ	TIG-200P AC/DC	TIG-250PAC	США
Напряжение сети, в	380	220	220	220
Напряжение х.х., В	50	56	56	-
Количество фаз	3	2		2
Частота сети, Гц	8-100	50/60	50/60	66,6
Номинальный сварочный ток, А	200	200	250	150
di/dt , кА/с	210-600	100	100	-
Диапазон рег. тока	45-250	10-200	15-250	40-150
Кратность рег. тока	5,5	10	20-25	3,7
КПД, %	58	85	85	-
$\cos \varphi$	-	0,93	0,93	-
Габариты, мм	845x1010x1070	500x350x365	490x230x385	-
Масса, кг	435	25	23	-

Автор работы Varhorst S. [36] доказал, что при сварке на переменном токе прямоугольной формы, регулируя амплитуду тока обратной полярности при сварке алюминиевых сплавов, появляется возможность регулировать ширину зоны катодной очистки, увеличив её в 2 раза (рисунок 12, 13).

Эксперимент проведён при постоянной частоте и постоянной амплитуде прямой и обратной полярности тока (таблица 11).

Таблица 11 – Параметры режимов сварки при $I_{обр.}^* = \text{var}$

№ точки	$I_{обр.}^*$, А	$I_{прям.}$, А	$t_{обр.}$, мс	$t_{прям.}$, мс	f , Гц	a , мм
1	150	150	8	8	66,6	17,5
2	115					15,5
3	90					11,5
4	65					7,5
5	40					8,5

$I_{обр.}^*$, $I_{прям.}$ – амплитудные значения тока
 a – размеры зоны катодной очистки
 $I_{прям.} = \text{const}$; $t_{обр.} = t_{прям.}$; $f = \text{const}$
 $Q_{Ar} = 5-7$ л/мин; $S = 3$ мм

Автор работы [36] доказал, что с увеличением тока обратной полярности $I_{обр.}^*$ увеличивается ширина зоны очистки a . С увеличением $I_{обр.}^*$ в 5 раз ширина зоны очистки a увеличилась в 2 раза.

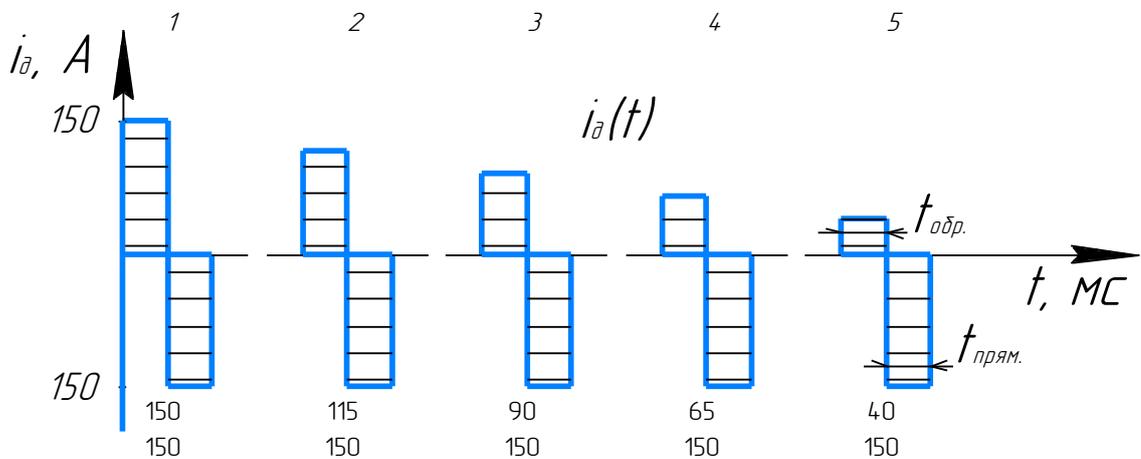


Рисунок 12 – График изменения тока дуги $i_d = f(t)$

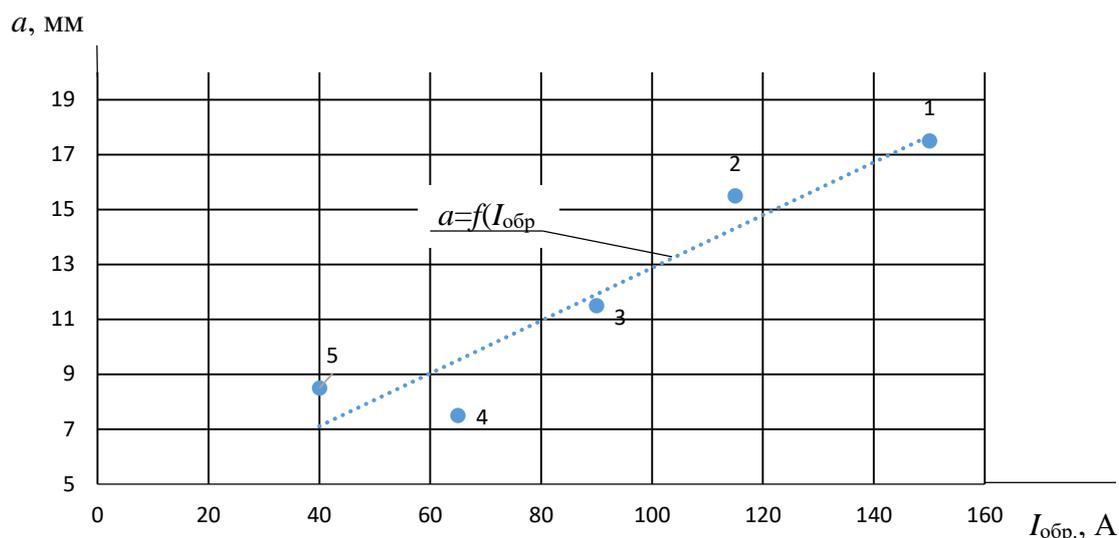


Рисунок 13 – Зависимость размеров зоны катодной очистки от величины $I_{обр.}$.

Продолжая работы по исследованию влияния параметров режима переменного тока прямоугольной формы на ширину зону катодной очистки автор работы [36] пришёл к выводу, что регулируя длительность обратной полярности (рисунок 6) сохраняя ток прямой и обратной полярности постоянными также удаётся влиять и на размеры зоны очистки (рисунок 14). Однако, это влияние по данным автора [36] не существенно.

Таблица 12 – Параметры режимов сварки при $t_{прям.} = var$

№ точки	$I_{обр.}^*, A$	$I_{прям.}, A$	$t_{обр.}, мс$	$t_{прям.}, мс$	$a, мм$
1	150	150	8	2,25	13,25
2				3,5	14
3				4,75	13,5
4				6	13,75
5				7,75	15,5

$I_{обр.}^*, I_{прям.}$ – амплитудные значения тока
 a – размеры зоны катодной очистки
 $I_{обр.}^* = I_{прям.} = const; t_{обр.} = const; t_{прям.} = var; f = var$
 $Q_{Ar} = 5-7$ л/мин; $d_w = 2,38$ мм; $S = 3$ мм

Автор работы [36] доказал, что с увеличением времени обратной полярности $t_{обр.}$ увеличивается ширина зоны очистки a . С увеличением $t_{обр.}$ в 1,3 раза ширина зоны очистки a увеличилась в 1,17 раз.

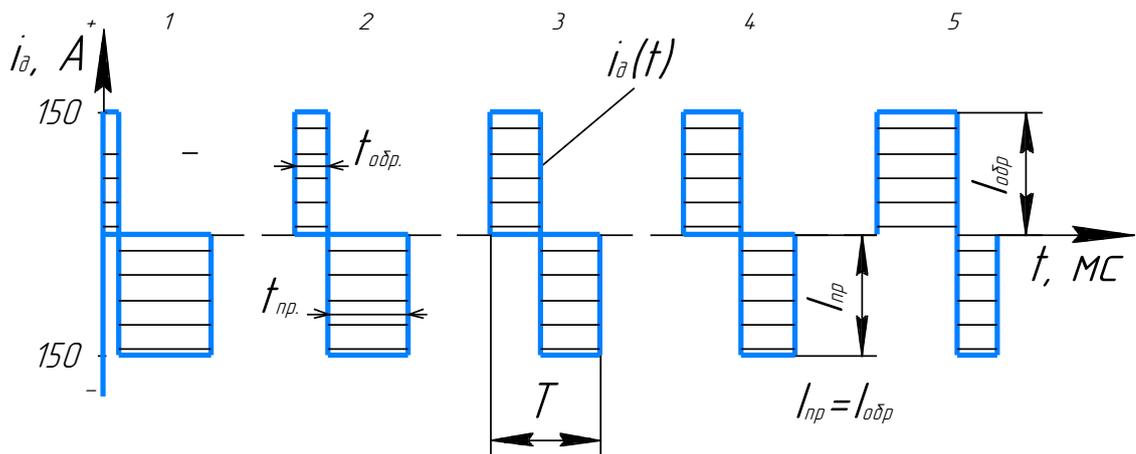


Рисунок 14 – График тока дуги $i_d = f(t)$

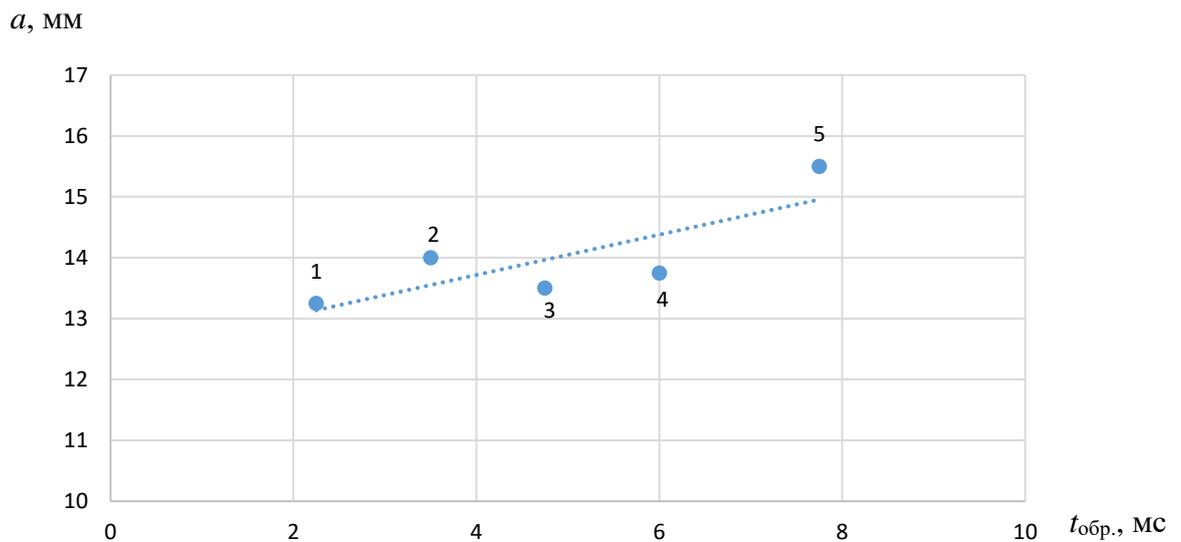
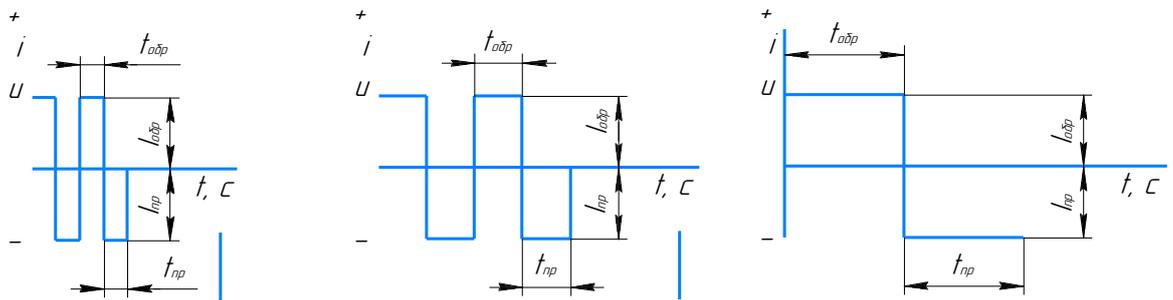


Рисунок 15 – Зависимость $a = f(t_{обр.})$

Таким образом автор работы [36] предлагает использовать возможность регулирования энергии обратной полярности переменного тока за счёт регулирования $t_{обр.}$, $I_{пр.}$, $I_{обр.}$ для катодного травления алюминиевых труб. Автор рассматривает технику катодного травления как отдельную операцию при подготовке поверхности алюминиевых труб под сварку.

На рынке сварочного оборудования в это же время появляются специальные источники переменного тока прямоугольной формы СПРИ, которые позволяют отдельно регулировать амплитуду прямой и обратной полярности, длительность тока прямой и обратной полярности отдельно и частоту тока [11].

Обозначения регулируемых параметров установки СПРИ $i_d = f(t)$, di/dt , $u_d = f(t)$ приведены на рисунках 16-18.

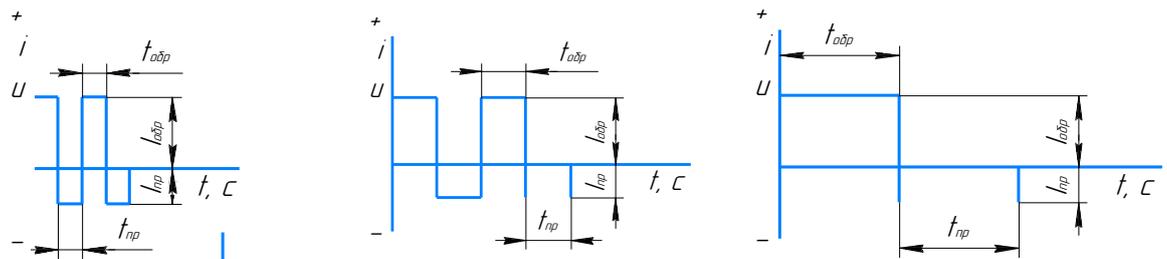


а) $f = 100$ Гц, $I_{пр.} = I_{обр.}$

б) $f = 50$ Гц, $I_{пр.} = I_{обр.}$

в) $f = 8$ Гц, $I_{пр.} = I_{обр.}$

Рисунок 16 – Обозначение параметров симметричного режима при $f = \text{var}$



а) $f = 100$ Гц, $I_{пр.} \neq I_{обр.}$

б) $f = 50$ Гц, $I_{пр.} \neq I_{обр.}$

в) $f = 8$ Гц, $I_{пр.} \neq I_{обр.}$

Рисунок 17 – Обозначение параметров асимметричного режима

при $f = \text{var}$ и $I_{пр.} = \text{var}$, $I_{обр.} = \text{var}$

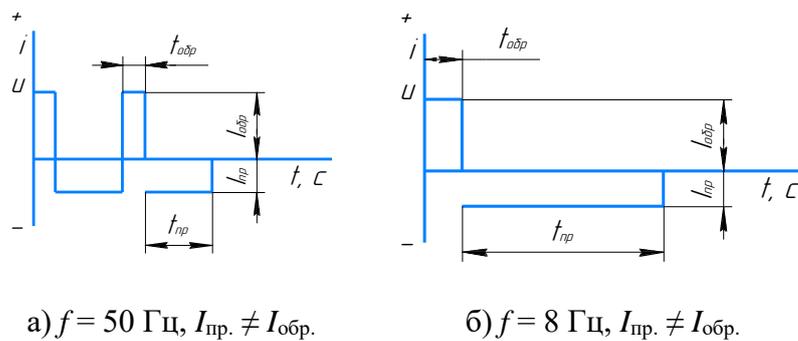


Рисунок 18 – Обозначение параметров асимметричного режима
при $f = \text{var}$ и $I_{пр.} = \text{var}$, $I_{обр.} = \text{var}$

Регулируя частоту переменного тока в диапазоне от 8 до 50 Гц авторы работы [11] установили, что при сварке сварных соединений из сплава АМгб изменяется структура шва и зона проплавления.

«Возможность автономного регулирования прямой и обратной полярности, как по длительности, так и по амплитуде тока обуславливает дополнительные резервы воздействия на процесс кристаллизации металла сварочной ванны и зоны термического влияния. При сварке дугой с асимметричной кривой тока прямоугольной формы, когда амплитуды тока и длительности в прямую и обратную полярности различны (рисунок 17, 18), наблюдаются структуры швов, отличные от структур, образующихся при сварке на синусоидальном токе.

Авторы работы [11] установили, что при сварке с асимметричной кривой тока при $W_{обр.} > 0,3W_{пр.}$ разрушение оксидной пленки имеет мелкодисперсный характер.

Повышение эффективности катодного распыления при асимметричной кривой тока прямоугольной формы положительно сказывается и на чистоте металла шва» [31].

Таким образом, широкая линейка параметров режима сварки ($f = \text{var}$, $t_{пр.} = \text{var}$, $t_{обр.} = \text{var}$, $I_{пр.} = \text{var}$, $I_{обр.} = \text{var}$) алюминиевых сплавов позволяет увеличить не только проплавляющую способность дуги переменного тока, но и

регулировать зону термического влияния при сварке, регулировать зону катодного распыления, а также влиять на размеры зерна в зоне шва.

Разработанные фирмой BRIMA инверторы типа TIG-200P AC/DC и TIG-250P AC обладают оригинальными свойствами. Инвертор на частоте 50 Гц имеет возможность регулировать отдельно прямую и обратную полярность до 250 А. Кроме этого, инвертор обеспечивает четыре режима работы, в которых отдельно в пределах 0,02 секунды ($f = 50 \text{ Гц} = \text{const}$) регулируются $t_{\text{пр.}}$, $t_{\text{обр.}}$, а $I_{\text{пр.}} = I_{\text{обр.}}$. Осциллограммы и формы тока приведены на рисунках 19, 20, 21.

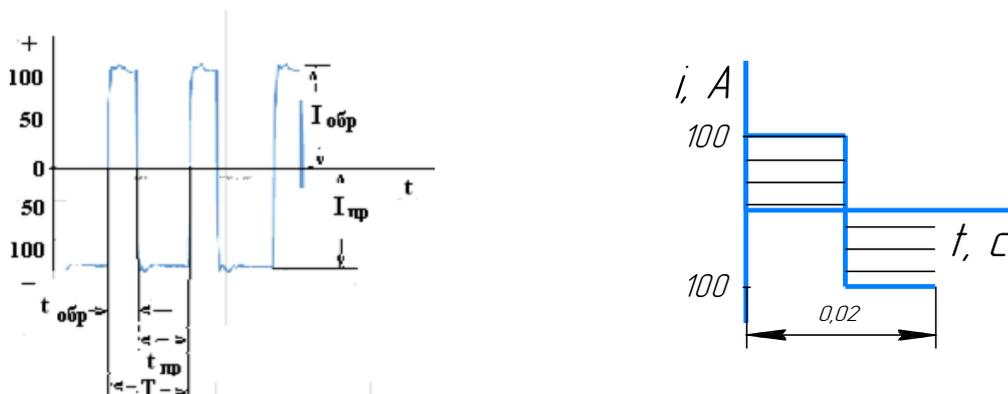


Рисунок 19 – Осциллограмма и форма тока инвертора TIG-200P AC/DC при

$$I_{\text{пр.}} = I_{\text{обр.}} = 100 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}, t_{\text{прям.}} = 47,8 \%; t_{\text{обр.}} = 52\%$$

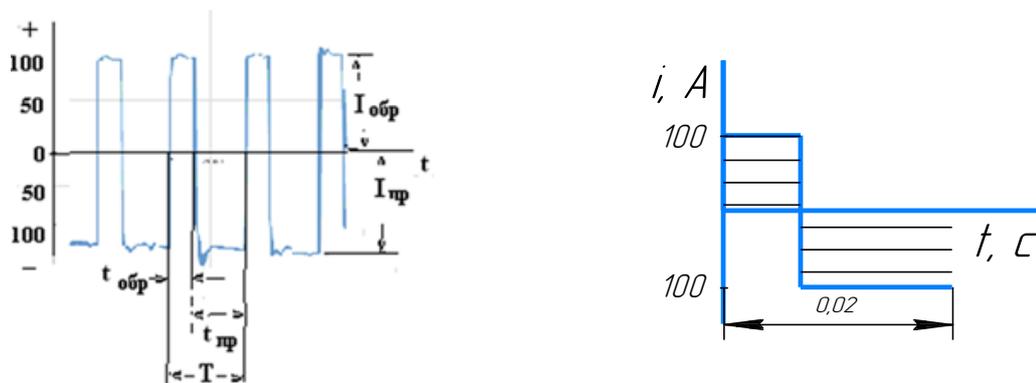


Рисунок 20 – Осциллограмма и форма тока инвертора TIG-200P AC/DC при

$$I_{\text{пр.}} = I_{\text{обр.}} = 100 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; t_{\text{прям.}} = 66,6\%; t_{\text{обр.}} = 33,3\%$$

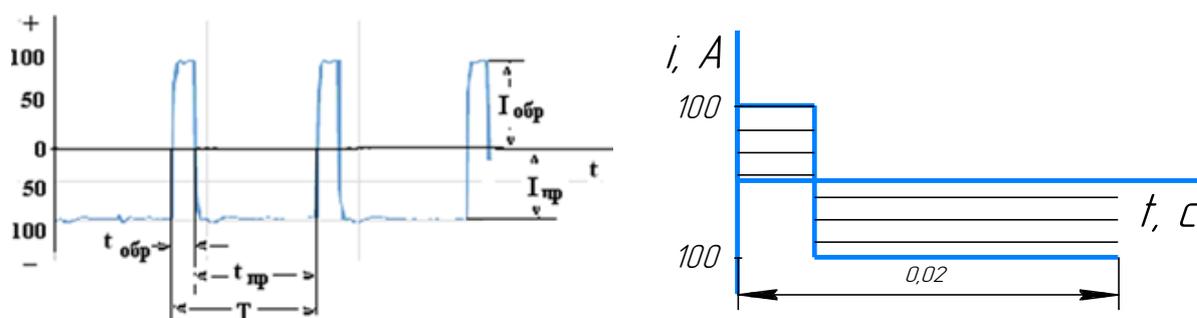


Рисунок 21 – Осциллограмма и форма тока инвертора TIG-200P AC/DC при
 $I_{пр.} = I_{обр.} = 100 \text{ А}; f = 50 \text{ Гц}; t_{прям.} = 82,35\%; t_{обр.} = 17,6\%$

Исследуя технологические возможности инвертора TIG-200P AC/DC можно сделать выводы, что инвертор позволяет:

- увеличить проплавливающую способность прямоугольной формы;
- регулировать зону катодной очистки за счёт увеличения энергии обратной полярности.

Для оценки технологических возможностей источников питания переменного тока прямоугольной формы необходимы дополнительные исследования.

Таким образом, современные установки и инверторы с крутопадающими ВАХ регулируя автономно электрические и неэлектрические параметры $t_{пр.}$, $t_{обр.}$, $I_{пр.}$ и $I_{обр.}$ открывают широкие возможности влияния на такие показатели технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы, как проплавливающая способность, зона катодной очистки, а также качество шва.

2.2 Основные неэлектрические параметры при сварке дугой переменного тока прямоугольной формы

Для сварки свободной дугой алюминиевых сплавов в последние годы широко применяются источники питания прямоугольной формы.

Проектирование горелок для сварки свободной дугой привело к росту неэлектрических параметров, которые необходимо контролировать. К ним относятся:

- $l_{д\text{ откр.}}$ – длина открытой дуги;
- d_c – диаметр сопла;
- d_w – диаметр вольфрамового электрода;
- Q – расход защитного газа (рисунок 22).

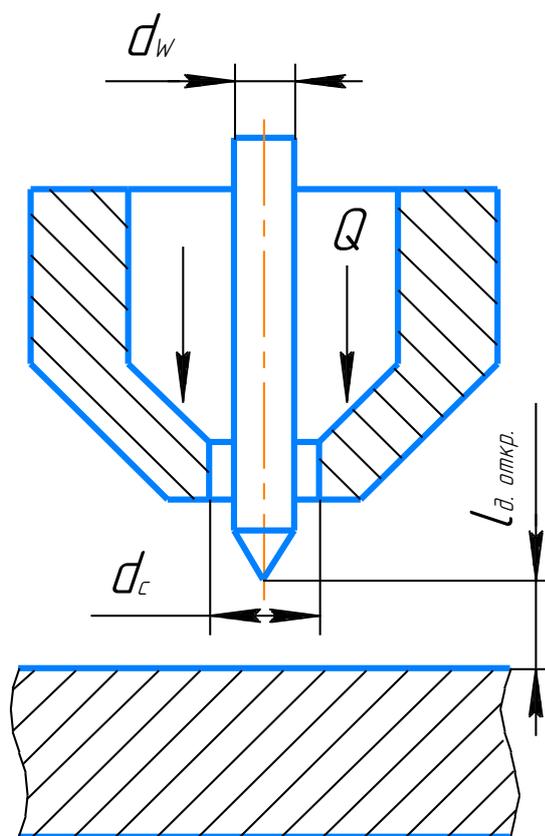


Рисунок 22 – Обозначение неэлектрических параметров свободной дуги

Источник питания переменного тока прямоугольной формы и горелка образуют энергетическую систему «Источник питания - дуга», в которой в качестве источника питания могут быть использованы: СПРИ-1, TIG-200P AC/DC и TIG-250PAC. На рисунке 23 обозначены отдельные электрические

параметры при сварке сжатой дугой, которые также применяются при сварке сплавов АМгб.

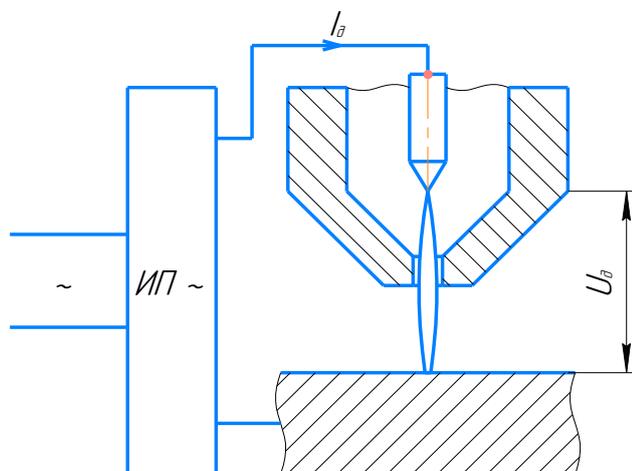


Рисунок 23 – Схема энергетической системы «ИП - дуга»

Полное представление об электрических параметрах дуги прямоугольной формы даёт осциллограмма тока и напряжения: $I_{a \text{ пр.}}$, $I_{a \text{ обр.}}$, $t_{\text{пр.}}$, $t_{\text{обр.}}$, $U_{a \text{ пр.}}$, $U_{a \text{ обр.}}$, $P_{\text{пр.}}$, $P_{\text{обр.}}$, f , di/dt , $i_{\text{д.}}=f(t)$, $u_{\text{д.}}(t)$.

Количество параметров режима сварки возросло многократно. Влияние каждого из них необходимо определять в процессе исследований. При проведении экспериментов по сварке (или наплавке) определяется: площадь проплавления F , зона очистки a , величина зерна сварного соединения ЗТВ и шва, а также другие параметры (рисунок 24).

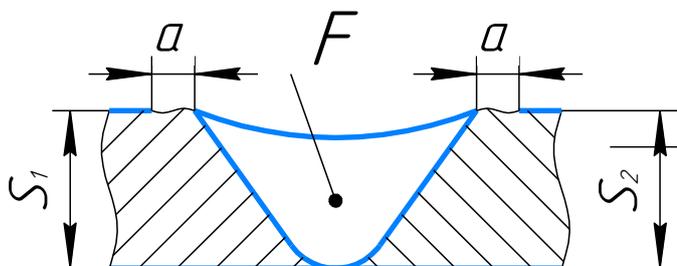


Рисунок 24 – Обозначение параметров стыкового сварного соединения

Таким образом, к регулируемым электрическим параметрам добавляются ещё пять неэлектрических параметра, которые необходимо контролировать и регулировать.

Заключение по разделу

Широкий диапазон автономного регулирования электрических параметров при сварке свободной дугой повлечёт за собой необходимость исследования влияния всех регулируемых параметров на такие показатели технологических свойств сварочной дуги переменного тока, как стабильность процесса сварки, проплавливающая способность дуги, качество шва, а также катодная очистка.

Для этого необходимо спроектировать технологический процесс сварки свободной дугой переменного тока прямоугольной формы сплава АМгб толщиной не более 4 мм в защитной среде.

Отсюда следует, исследование влияния технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы на свойства дуги показало, что увеличение количества электрических и неэлектрических параметров открывают высокие возможности на такие показатели технологических свойств как размеры катодной очистки и качества сварных соединений.

Однако, выпускаемое оборудование резко отличается по количеству и качеству автономно регулируемых параметров. Поэтому, необходимо провести исследования, связанные с такими показателями как стабильность процесса сварки, проплавливающая способность дуги, размеры катодной очистки и качество сварных соединений.

3 Методика проведения исследований показателей технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы

«Планирование экспериментов предполагает постановку цели и задачи работы, выбирает набор параметров оптимизации и факторов процесса» [7]. Методы планирования лабораторных экспериментов иллюстрируются примерами конкретных исследований. В данной работе «объектом исследования является свободная дуга при сварке неплавящимся электродом в защитной среде газа переменным током» [15] прямоугольной формы алюминиевых сплавов системы Al-Mg.

Использование современных инверторов и установок увеличило количество регулируемых энергетических параметров дуги переменного тока прямоугольной формы до двенадцати, неэлектрических – до пяти. Учитывая химический состав деформируемых алюминиевых сплавов, в которых количество легирующих элементов регулируется до восьми. Всё это свидетельствует о сложности исследуемого объекта.

«Основной характеристикой объекта исследования является его сложность. Она определяется количеством разнообразия, или, как говорят в кибернетике, число различных состояний, в каждом из которых объект может находиться. В этом смысле можно говорить о простых объектах и больших системах» [4].

В связи с этим необходимо разработать методики проведения экспериментов в зависимости от исследуемых показателей.

3.1 Выбор материала и установок для сварки переменным током прямоугольной формы

Для проведения исследований показателей технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы выбран сплав АМг6 системы

Al-Mg толщиной менее 4 мм, который является одним из самых перспективных при разработке свариваемых сплавов.

В качестве источников питания выбран инвертор TIG-200P AC/DC фирмы BRIMA и установка СПРИ ПАО «Электромеханика» с крутопадающими ВАХ. Технические характеристики указанных источников питания дуги переменного тока прямоугольной формы приведены в таблицах 13-14, а схема измерения электрических и неэлектрических параметров приведена на рисунке 25.

Таблица 13 – Технические характеристики сварочного инвертора TIG-200P AC/DC фирмы BRIMA

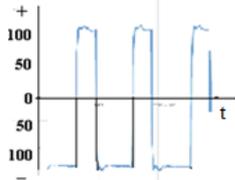
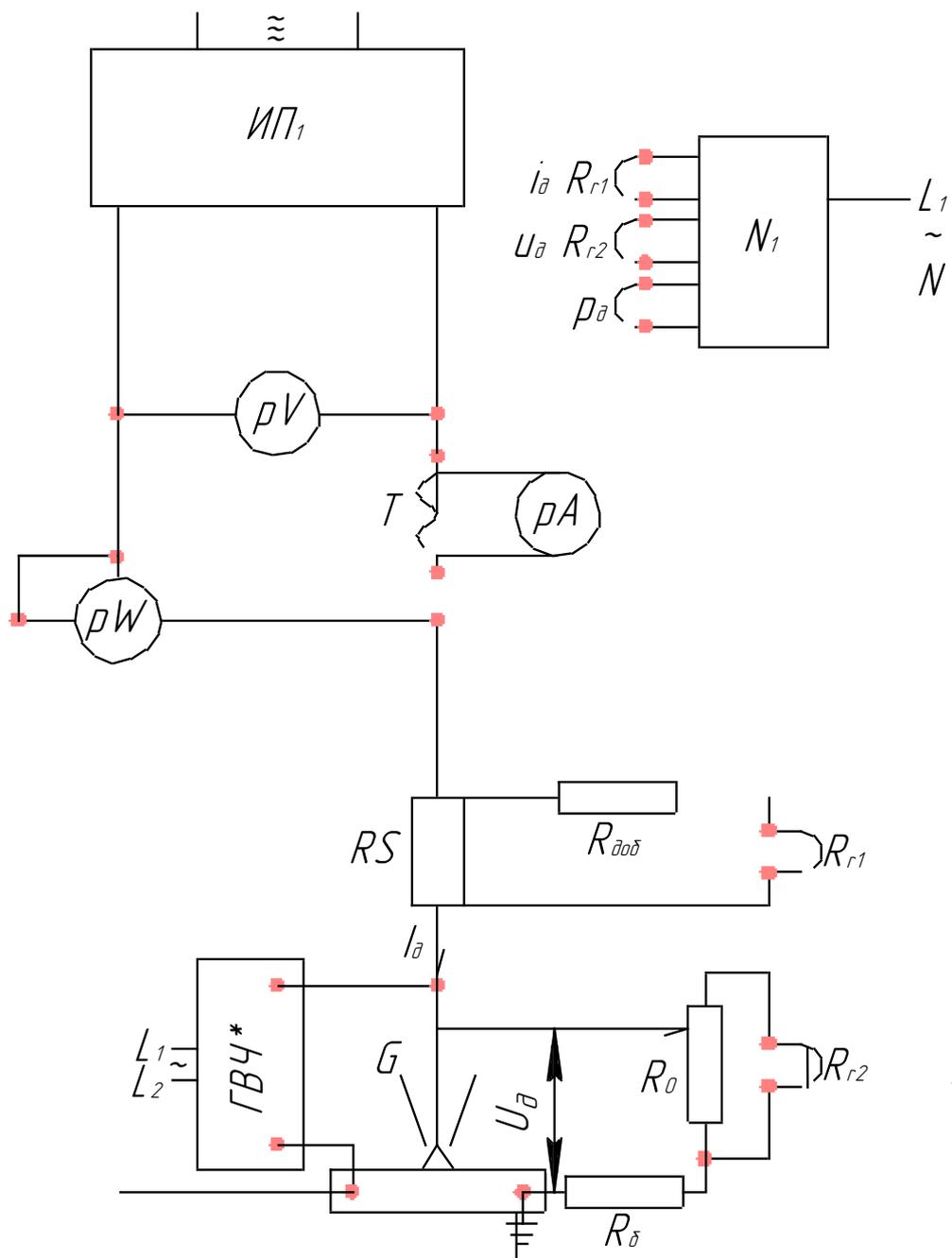
Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Напряжение сети	В	220
Потребляемая мощность	кВА	5,9
Максимальный сварочный ток	А	200
Период нагрузки	%	60
Напряжение холостого хода	В	56
Частота питающей сети	Гц	50/60
Кэффициент мощности		0,93
Габариты	мм	500x350x365
Масса	кг	25
Осциллограмма тока		

Таблица 14 – Технические характеристики установки СПРИ ПАО «Электромеханика»

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Напряжение сети	В	380
Напряжение х.х.	В	50
Количество фаз		3
Частота сети	Гц	8-100
Номинальный сварочный ток	А	200
di/dt	кА/с	210-600
Диапазон рег. тока		45-250
Кратность рег. тока		5,5
КПД	%	58
Габариты	мм	845x1010x1070
Масса	кг	435



$ИП_1$ – источник питания; pV – вольтметр; pW – ваттметр; pA – амперметр;
 N_1 – осциллограф С1-55, МПО-2; ГВЧ – генератор высокой частоты, работающей при смене полярности

Рисунок 25 – Схема измерения параметров режима сварки

В качестве горелки выбрана модель ТВi АТ 420S, внешний вид которой представлен на рисунке 26, а характеристики приведены в таблице 15.



Рисунок 26 – Горелка TWi AT 420S

Таблица 15 – Технические характеристики горелки TWi AT 420S

Тип охлаждения	Водяное
Длина кабеля, м	4
Защитный газ	Ar
Максимальный сварочный ток TIG, А	400
Переменный сварочный ток AC	280
Постоянный сварочный ток DC	400

3.2 Технология автоматической сварки образцов неплавящимся электродом свободной дугой

Для сварки образцов использован типовой технологический процесс автоматической сварки неплавящимся электродом свободной дугой в защитной среде аргона. Для осуществления технологического процесса используем сварочный стенд типа ЛС-1 с прижимными устройствами (рисунок 27).



Рисунок 27 – Сварочный стенд ЛС-1

Для проведения исследований при наплавке используются образцы размерами 300x100 мм с толщиной 4 мм из сплава АМгб. Для сварки образцов с полным проплавлением используются пластины размером 150x100 мм с толщиной 2 мм (3 мм).

Регулирование скорости сварки осуществляется с помощью блока питания ВС-100-5К.

Технологический процесс включает в себя следующие операции:

- 1) подготовка образцов (гильотина НД-3312Б);
- 2) очистка образцов из алюминиевого сплава АМгб от оксидной плёнки (ванны);
- 3) ориентировочные режимы для четырёх показателей (таблица 16);

Таблица 16 – Ориентировочные параметры режимов сварки W-AMг6

Показатель	Диапазон тока		Диапазон времени		Частота	Диапазон мощности	Энергия
	$I_{обр.}^*$, А	$I_{прям.}$, А	$t_{обр.}$, мс	$t_{прям.}$, мс	f , Гц	P , Вт	$W_{обр.}$, Вт·с
Стабильность режима	75-225		0,02		50	-	-
Проплавающая способность дуги	-	-	0,013-0,1		10-75	400-2500	-
Катодная очистка	-	-	-	-	-	-	6-105
Качество шва: а) симметричный режим б) асимметричный режим	75-225		0,1-0,02		10-50	-	-
	$I_{пр.} \neq I_{обр.}$		$t_{пр.} \neq t_{обр.}$				

4) сварка образцов (лабораторный стенд ЛС-1, горелка для сварки неплавящимся электродом ТВi AT 420S, источник питания СПРИ и TIG-200P AC/DC, блок регулирования скорости ВС-100, защитный газ Ar в баллонах, аппаратура контроля параметров (I_d , u_d) и регистрации динамических характеристик ($i_d(t)$, $u_d(t)$, $p_d(t)$);

5) контроль качества сварного соединения (микроскоп МИ-6) [3, 37].

3.3 Методика исследования структуры соединения

«Структура сплавов Al-Mg (рисунок 28в) представляет собой α -твердый раствор с включением интерметаллической β -фазы (Mg_5Al_8), количество и размер которой зависят от содержания магния. Сплавы с относительно малыми добавками магния (до 3,5 %) характеризуются довольно крупнозернистой микроструктурой. Дальнейшее повышение магния (до 7,5 %) измельчает микрочерна (рисунок 28б), структура становится однородной и мелкозернистой. С повышением магния количество β -фазы возрастает, размер её при этом уменьшается» [26].

Все исследования проводятся на сплаве AMг6, процентное содержание магния, в котором составляет (5,8-6,8) %.

В работе [26, 35] приведены структуры сплава с тонкими (нитевидными) выделениями β -фазы по границам зёрен (рисунок 29а) и с бисерным расположением выделения Mg_5Al_8 по границам зёрен (рисунок 29б).

Известно, что чем мельче зерно и тоньше границы зёрен, тем выше прочностные свойства сплава системы Al-Mg.

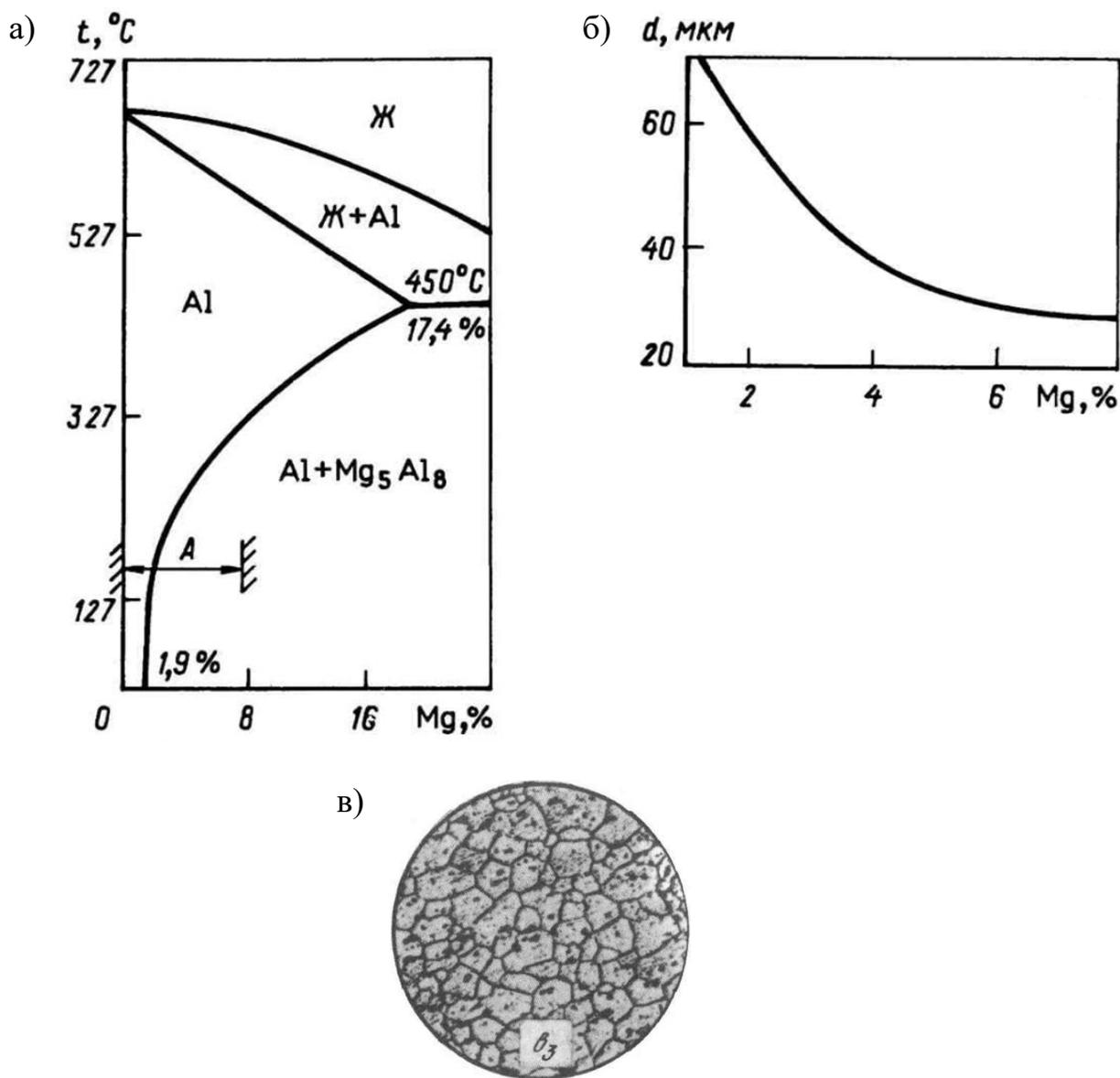


Рисунок 28 – Часть диаграммы состояния системы Al-Mg (а), размер микрзерна (б) и структура сплава $Al_{6,5}Mg \times 150$ (в) [26, 35]

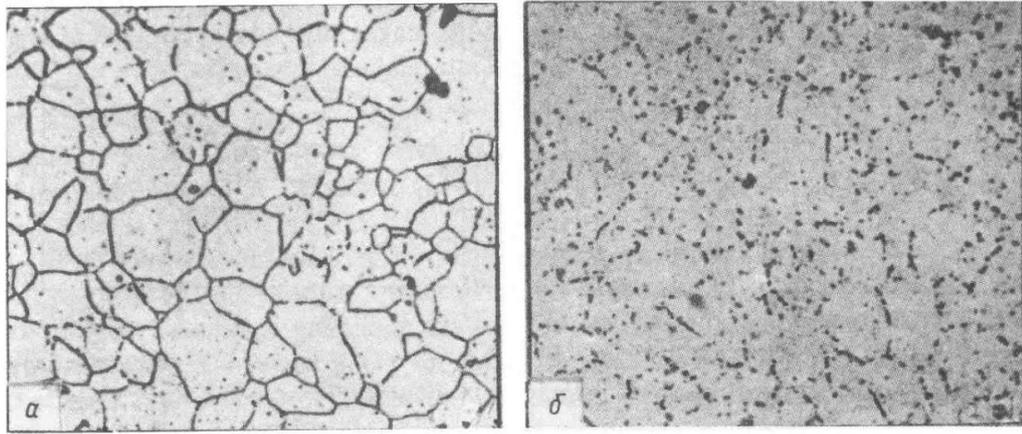


Рисунок 29 – Микроструктура сплава Al5,6Mg с нитевидным выделением второй фазы (а) и с бисерным расположением фазы (б) $\times 410$

Применение для сварки сплава системы Al-Mg переменного тока прямоугольной формы с регулируемыми параметрами открывает новые технологические возможности, которые в настоящее время мало изучены. Поэтому в работе проводятся исследования по изучению структуры шва при максимальной проплавляющей способности дуги переменного тока прямоугольной формы.

Для этого, производится сварка образцов между собой с использованием следующего оборудования: лабораторный стенд ЛС-1 с ручным прижимом образцов, установка СПРИ, горелка для сварки свободной дугой, газ Ar.

В таблице 17 приведены режимы сварки AMг6 переменным током прямоугольной формы на установке СПРИ, производства ПАО «Электромеханика».

Таблица 17 – Режимы сварки AMг6 на установке СПРИ

	f , Гц	$I_{пр.}$, А	$I_{обр.}$, А	$t_{пр.}$, с	$t_{обр.}$, с	$U_{пр.}$, В	$U_{обр.}$, В	$v_{св.}$, м/ч	$v_{пр.}$, м/ч	$Q_{газа.}$, л/мин	di/dt , кА	$l_{дуги}$, мм	d_w , мм
1	10	150		0,1	0,1	4	17,5	15,5	-	6-7	600	-	-
2	25			0,02	0,02	5	18						
3	50			0,01	0,01	5	20						
4	10	148	75	0,046	0,004	-		18	-	-	2	3	
5	50	164	184	0,032	0,01			12,4					

На рисунке 30 представлен сваренный образец.



Рисунок 30 – Образец сваренный

После сварки вырезаются образцы размерами 30x14x4 мм с использованием отрезной фрезы. Затем производится шлифование на кругах с наждачной бумагой, начиная от крупнозернистого листа (в соответствии с международным стандартом ISO-6344 – от P80 до P120; размер зерна – 100-250 мкм) и заканчивая мелкозернистым (в соответствии с международным стандартом ISO-6344 – от P1000 до P2500; размер зерна – 3-20 мкм).

Подготовленный образец показан на рисунке 31.



Рисунок 31 – Подготовленный образец для исследований

Перед подготовкой сварных соединений для проведения исследования нарезается труба из Ст3 с диаметром 40 мм с толщиной стенки 1 мм и длиной 15 мм (рисунок 32). Для резки используется УШМ Калибр МШУ 125/955Е и диска отрезного по металлу А60 S BF (125x0.8x22.2 мм) Luga-Abrasiv.

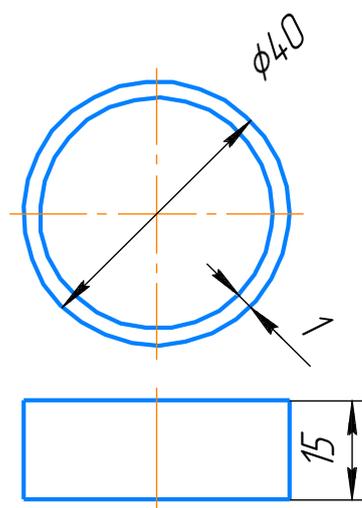
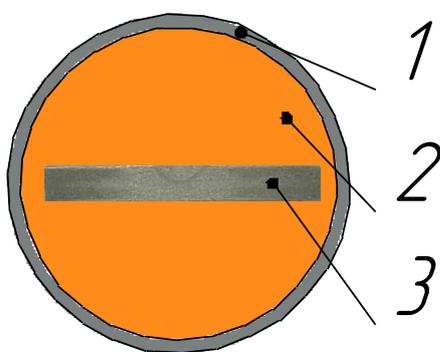


Рисунок 32 – Эскиз трубы для подготовки шлифования

Дальше производится сборка подготовленного образца и заливка эпоксидной смолой. Шлифование на кругах с наждачной бумагой с мелким зерном, затем на кругах, покрытых сукном, до проявления очертаний макроструктуры шва АМГб (рисунок 33).



1 – труба из Ст3; 2 – эпоксидная смола; 3 – шиф сварного образца

Рисунок 33 – Внешний вид сварного соединения перед шлифованием

Сравнение структуры шва полученной на переменном токе прямоугольной формы сравнивается со структурой, полученной при той же мощности от источника питания переменного тока синусоидальной формы типа ИПД-300.

Заклучение по разделу

В результате проведённой работы для исследований технологических показателей дуги переменного тока прямоугольной формы при определении показателя проплавляющей способности дуги использована методика Рыкалина [25]. Однако, учитывая свойства деформируемых алюминиевых сплавов Al-Mg и размеры экспериментальных образцов использовался калориметр, объёмом 10 л.

Для определения условий устойчивости процесса сварки на переменном токе прямоугольной формы выбрана форма регистрации динамических характеристик тока и напряжения при наплавке образцов длиной не менее 300 мм из сплава АМгб.

Исследование катодной очистки проводится при наплавке образцов 300x100 мм с толщиной 4 мм из сплава АМгб в диапазоне изменения энергии обратной полярности $W_{обр}$ от 12 до 125 Вт·с.

Влияние параметров режима сварки на структуру стыкового сварного соединения проводится на образцах размером 150x100x2 мм из сплава АМгб с присадочной проволокой.

В результате исследований проплавляющей способности установили, что её максимальная величина находится в диапазоне частот от 10 до 50 Гц при «регулировании мощности дуги от 500 до 2250 Вт. Учитывая особенность дуги переменного тока прямоугольной формы с регулируемыми параметрами по частоте, длительности прямой и обратной полярностей» [31] и величины амплитудных значений разработана методика исследования структуры сварного соединений из сплава АМгб. Исследования проводились при «сварке неплавящимся электродом в защитной среде аргона с полным проплавлением образцов. Для чего, разработана технология автоматической сварки образцов неплавящимся электродом свободной дугой» [31].

4 Исследования технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы при сварке деформируемых алюминиевых сплавов

4.1 Определение условий устойчивости процесса сварки на переменном токе прямоугольной формы

Один из показателей технологических свойств сварочной дуги – это стабильность процесса сварки. При любом режиме работы система «источник - дуга - ванна» должна работать устойчиво [3, 36, 40].

Исследование технологических возможностей источников питания прямоугольной формы показал, что обладая крутопадающими ВАХ они отличаются друг от друга по скорости перехода тока через нуль di/dt (рисунок 11б, таблица 10). Известно, что максимальную скорость перехода обеспечивает установка СПРИ ПАО «Электромеханика», которая работает при $di/dt < 600$ кА/с. Снижение di/dt до 100 кА/с приводит к необходимости при смене полярности переменного тока прямоугольной формы вводить дополнительный источник энергии высокой частоты (ГВЧ), как показано на рисунке 25.

Для определения условий устойчивости процесса сварки на переменном токе прямоугольной формы проводится наплавка образцов размерами 300x100 мм с толщиной 4 мм из сплава АМгб.

Для оценки устойчивости процесса сварки регистрируются динамические характеристики дуги $i_d = f(t)$, $u_d = f(t)$ в диапазоне тока от 75 до 250 А и частоты от 10 до 75 Гц. Динамические характеристики напряжение и тока дуги при сварке сплава АМгб представлены на рисунке 34а.

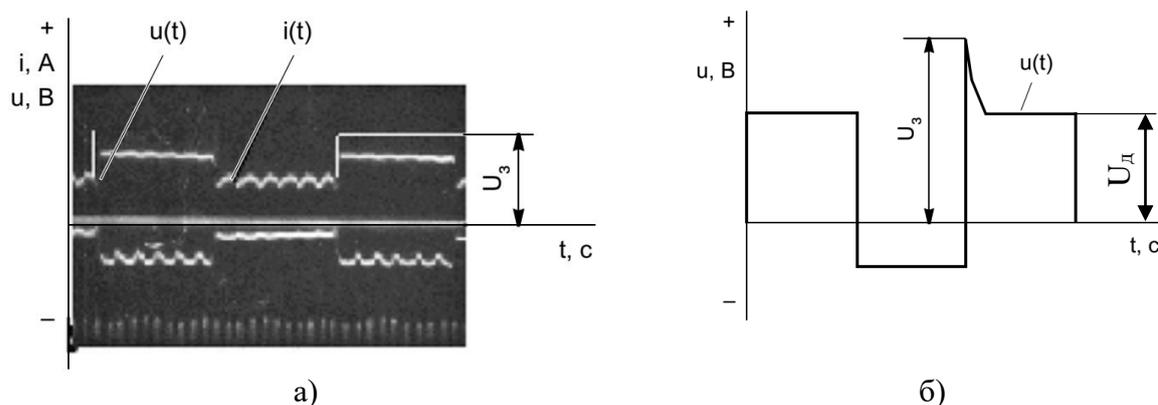
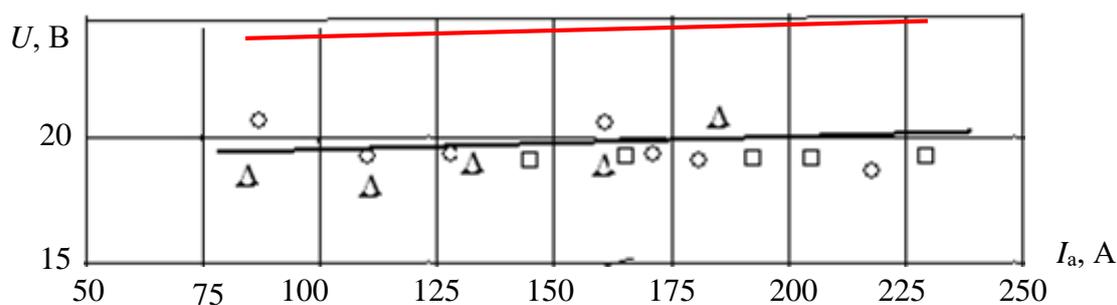


Рисунок 34 – Динамические характеристики $u_d = f(t)$ и $i_d = f(t)$ (а) и обозначения параметров U_d и U_3 (б)

Авторами работ [3, 23, 24] установлено, что напряжение зажигания дуги при «смене полярности тока U_3 с прямой на обратную может служить параметром характеризующем устойчивость процесса сварки. Авторами установлено, что чем меньше разница между величиной напряжения зажигания U_3 и напряжением дуги U_d при смене полярности с прямой на обратную» [9], тем выше устойчивость процесса.

В работе Бродского А.Я. [3] установлено, что сбои в процессе сварки в течении 0,01 секунды не допускаются, так как это приводит к обрыву дуги. Полученные при наплавке осциллограммы $u_d = f(t)$ показали, что напряжение зажигания $U_3 \approx U_d$ при смене прямой полярности на обратную.

Результаты экспериментов показали, что пик напряжения повторного возбуждения дуги U_3 в «диапазоне регулирования сварочного тока от 75 до 250 А и частоты от 10 до 75 Гц не превышает 24 В. Это является показателем стабильности горения дуги переменного тока» [31], так как напряжение зажигания соизмеримо с величиной U_d на обратной полярности $U_{обр}$, которое меньше 24 В и не требует дополнительных источников энергии (рисунок 34б, 35).



$U_{обр}$ - ○ – при $f = 50$ Гц; $U_{обр}$ - △ – при $f = 25$ Гц; $U_{обр}$ - □ – при $f = 10$ Гц

Рисунок 35 – Зависимость напряжения дуги $U_{обр.} = f(I_a)$

4.2 Исследование проплавляющей способности дуги на переменном токе прямоугольной формы

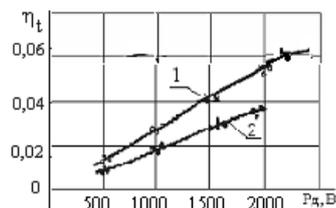
«Проплавляющая способность дуги» [31] на переменном токе прямоугольной формы один из важных показателей технологических свойств, которые определяют производительность процесса сварки.

Определение проплавляющей способности дуги на переменном токе прямоугольной формы производится по методике калориметрирования, предложенной Н.Н. Рыкалиным [25].

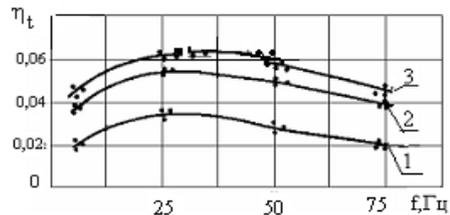
Возможность управления формированием сварочной ванны определены при сравнительных исследованиях проплавляющей способности дуги переменного тока синусоидальной ($K_a=1,41$) и прямоугольной ($K_a=1,0$) формы для симметричного режима при регулировании I_m и f . Критерием оценки проплавляющей способности дуги при разных формах тока принят термический КПД η_t при равенстве вводимой в металл погонной энергии $q_{и}/v_{св}$. Для сравнения использовались источник питания переменного тока синусоидальной формы типа ИПД-300 и СПРИ ПАО «Электромеханика».

«Определение термического КПД дуги при сварке от источника питания с прямоугольной формой тока когда $t_{пр} = t_{обр}$, $I_{пр} = I_{обр}$ показало, что η_t

возрастает на 20...28 % по сравнению со сваркой от источника с синусоидальной кривой тока» [31] (рисунок 36). Сварка проводилась на образцах в симметричном режиме при $f=50$ Гц [13].



а) 1 – $K_a=1,0$; 2 – $K_a=1,41$; $K_a=I_d/I_m$



б) 1 – $P_d = 1000$ Вт; 2 – $P_d = 1700$ Вт;
3 – $P_d = 2000$ Вт

Рисунок 36 – Влияние формы тока на термический КПД дуги

«Повышение проплавляющей способности переменного тока прямоугольной формы обусловлено воздействием на сварочную ванну мощного газодинамического потока, которое связано с» [31] резким изменением давления дуги при смене полярности тока, на которую указал А.С. Киселев [9], работая на токах до 20 А, и подтвердил И.Е. Лапин [16], используя более мощные источники питания.

«Исследуя влияние частоты тока при симметричном режиме на проплавляющую способность дуги, установили, что термический КПД η_t имеет максимальную величину» [31] в диапазоне частот от 25 до 50 Гц и на 25 % выше по сравнению с другими частотами (рисунок 36б). Дополнительные возможности повышения проплавляющей способности дуги переменного тока прямоугольной формы заложены в асимметричном цикле тока.

Повышение проплавляющей способности дуги переменного тока «прямоугольной формы» [31] позволяет решать вопросы, связанные с производительностью сварки Al сплавов.

4.3 Исследование катодной очистки при сварке на переменном токе прямоугольной формы

Появление на рынке сварочного оборудования инверторов с регулированием длительности прямой и обратной полярности расширило технологические возможности дуги переменного тока прямоугольной формы.

Известна работа Varhorst S. [36], в которой автор доказал, что с увеличением тока обратной полярности $I_{обр.}$ растёт зона катодной очистки a от оксидной пленки. По данным автора [36] с увеличением тока обратной полярности $I_{обр.}$ в 5 раз, ширина зоны очистки a увеличивается в 2 раза при сварке на переменном токе прямоугольной формы неплавящимся электродом. Эксперимент автором проведён на частоте 60 Гц при постоянной амплитуде тока прямой полярности ($I_{пр.} = 150$ А).

Регулирование «энергетических характеристик обратной полуволны тока прямоугольной формы позволяют влиять на эффективность катодного распыления при установленном горении дуги» [31].

Для определения влияния параметров энергии обратной полярности на эффективность катодной очистки при сварке алюминиевых сплавов проведена серия экспериментов.

«Для определения влияния асимметрии режима на эффективность разрушения оксидной пленки произведены наплавки на образцы сплава» [31] АМг6 в зависимости от энергии дуги обратной полярности $W_{обр.}$ при постоянной энергии дуги прямой полярности ($W_{пр.} \approx 80$ Дж). В качестве источника питания использована установка СПРИ ПАО «Электромеханика» с отдельным регулированием параметров прямой и обратной полярности тока, а также частоты сварочного тока.

«На рисунке 37 представлена зависимость ширины зоны катодного распыления $e+2a$ от энергии дуги обратной полярности $W_{обр.}$. Исследования показали, что, изменяя энергию обратной полуволны тока, можно

регулировать ширину зоны катодной очистки. При этом необходимо отметить изменение не только ширины зоны катодного распыления, но и характера воздействия его на поверхность металла в зоне очистки. При изучении поверхности зоны катодного распыления установлено, что при сварке с асимметричной кривой тока, когда $W_{обр.} > 0,3W_{пр.}$ разрушение оксидной пленки имеет мелкодисперсный характер. Рост эффективности катодного распыления при асимметричной кривой тока прямоугольной формы положительно сказывается на чистоте металла шва» [31].

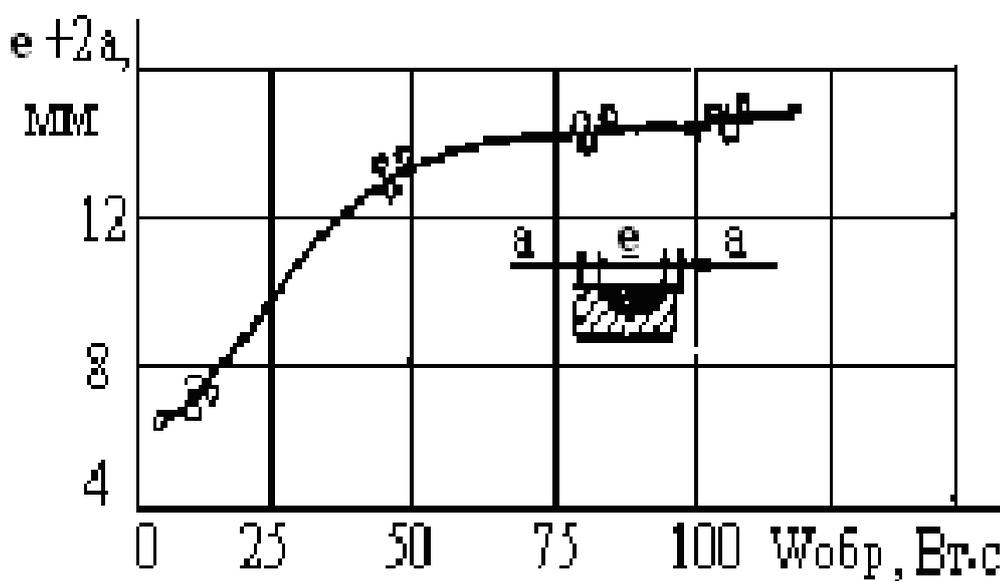


Рисунок 37 – «Влияние энергии обратной полярности дуги $W_{обр.}$ на зону очистки» [31]

«При сварке дугой с асимметрией по току и времени определены соотношения между мощностью прямой и обратной полярности тока, которые эффективно разрушают оксидную плёнку. Изменение энергетических характеристик в обратной полуволне тока прямоугольной формы позволяют влиять на эффективность катодного распыления при устойчивом горении дуги» [31].

4.4 Влияние параметров режима сварки на структуру сварного соединения при сварке на переменном токе прямоугольной формы

Современные источники питания переменного тока прямоугольной формы позволяют регулировать частоту переменного тока прямоугольной формы.

Кроме этого, источники автономно регулируют как длительность прямой и обратной полярности, так и амплитуду тока. Однако воздействие этих параметров на структуру сварного соединения изучено мало.

Учитывая результаты определения проплавляющей способности дуги переменного тока прямоугольной формы, исследуем воздействие дуги на структуру шва и зону сплавления при сварке сплава АМгб в двух режимах: симметричном ($I_{пр}=I_{обр}$, $t_{пр}=t_{обр}$) и асимметричном ($I_{пр}\neq I_{обр}$, $t_{пр}\neq t_{обр}$), изменяя величину тока и частоту.

Первую серию экспериментов проведём на симметричном режиме при наплавке образцов сплава АМгб размером 150x100x2 мм при длине дуги 3 мм, на скорости сварки 15,5 м/ч для трёх частот: $f = 50, 25, 10$ Гц.

Динамические характеристики дуги переменного тока $i=f(t)$, $u=f(t)$, $p=f(t)$ при сварке неплавящимся электродом $d = 3$ мм в среде Ar с расходом 6-7 л/мин свободной дугой приведены на рисунке 38.

Критерием оценки структуры сплава системы Al-Mg при разных частотах сварочного тока принято равенство вводимой в металл энергии $P/v_{св}$, где P – мощность дуги. Для этого определим характер изменения $p = f(t)$ (рисунок 38б, 38г, 38е).

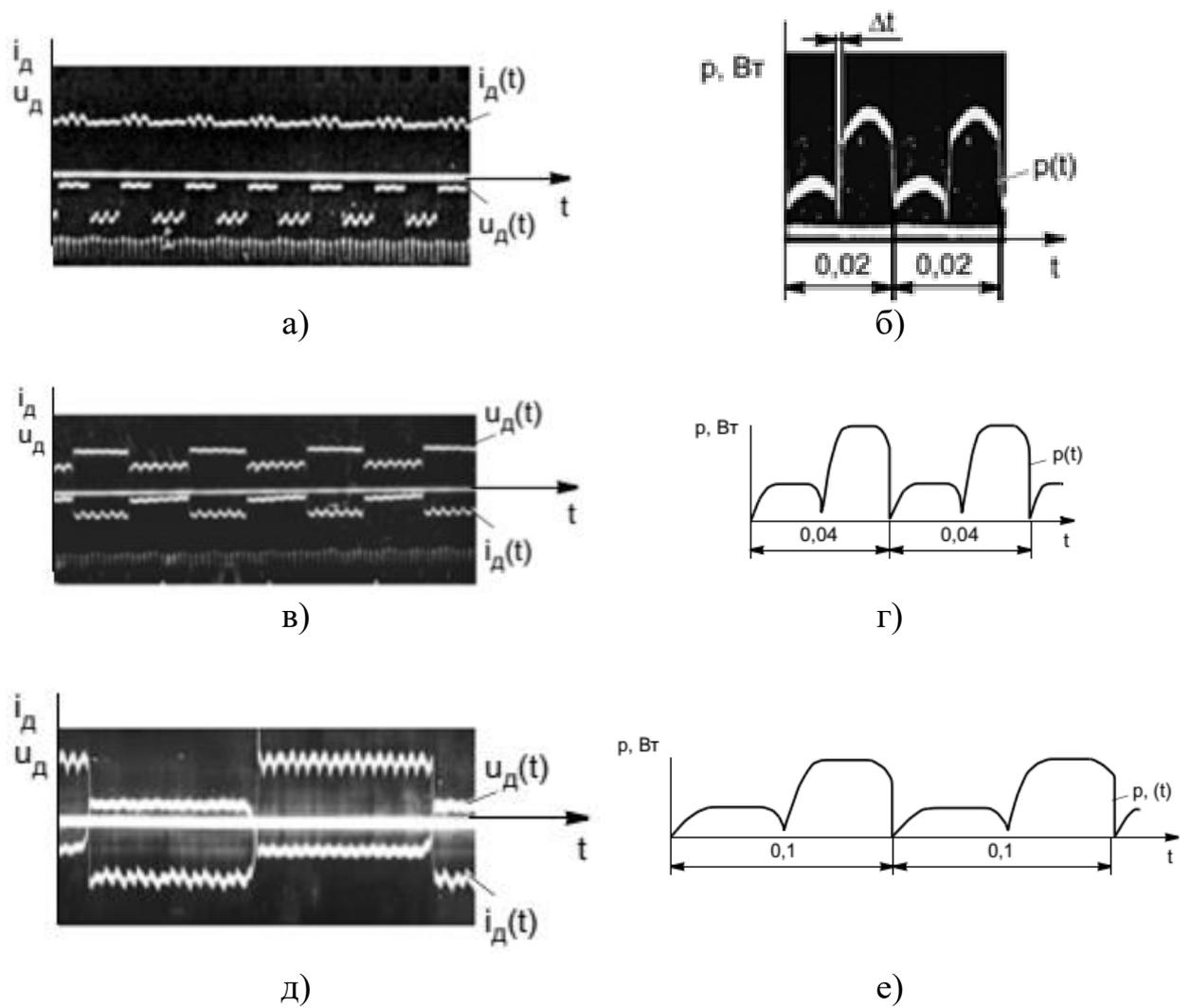
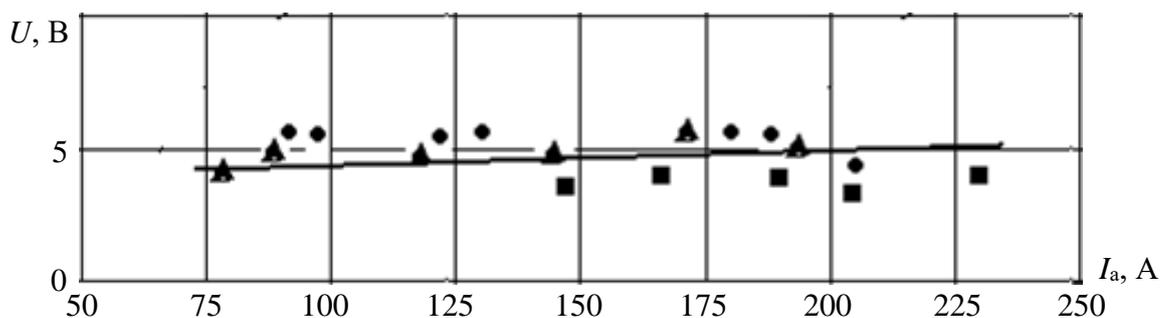


Рисунок 38 – Динамические характеристики дуги переменного тока при сварке: а, б – $f=50$ Гц; в, г – $f=25$ Гц; д, е – $f=10$ Гц

Исследуя динамические характеристики сварочной дуги в диапазоне частот с наибольшей проплавляющей способностью, установили, что напряжения в прямой и обратной полярности резко отличаются по величине. О результатах исследования можно судить по данным приведенным на рисунке 39.



$U_{обр}$ - ● – при $f = 50$ Гц; $U_{обр}$ - ▲ – при $f = 25$ Гц; $U_{обр}$ - ■ – при $f = 10$ Гц

Рисунок 39 – Зависимость напряжения дуги $U_{пр.} = f(I_a)$

Построив зависимости $U_{пр.} = f(I_a)$ и $U_{обр.} = f(I_a)$ для $f = (10-50)$ Гц, определим величину $U_{обр.} = (17,4-22,5)$ В и $U_{пр.} = (2,8-5,2)$ В. Резкое различие напряжения прямой и обратной полярности дуги формирует пульсирующий характер мощности дуги во времени $p = f(t)$. Осциллографирование и расчёты позволяют оценить пульсирующий характер $p = f(t)$ (рисунок 38б, 38г, 38е), который неизбежно создаст колебания температуры дуги во времени [12, 13] и повлияет на структуру шва и зоны сплавления. Известно, что сварочная дуга переменного тока, преобразуя электрическую энергию в тепловую, характеризуется тепловой мощностью дуги, которую условно принимают равной тепловому эквиваленту электрической энергии.

«Регулируя частоту сварочного тока, появляется возможность влиять на распределение мощности в зоне прямой и обратной полярности $p = f(t)$, увеличивая мощность обратной полярности в (3,6-4,4) раза по сравнению с мощностью прямой полярностью» [31] (рисунок 40). Зависимости $i = f(t)$, $u = f(t)$, $p = f(t)$ режима наплавки при соотношении $P_{обр.} / P_{пр.} = 4$ приведены на рисунках 38а, 38б. Для того, чтобы оценить воздействие распределения мощности дуги во времени при регулирование частоты в диапазоне от 10 до 50 Гц, проводим серию экспериментов по оценке влияния на структуру шва и зоны сплавления.

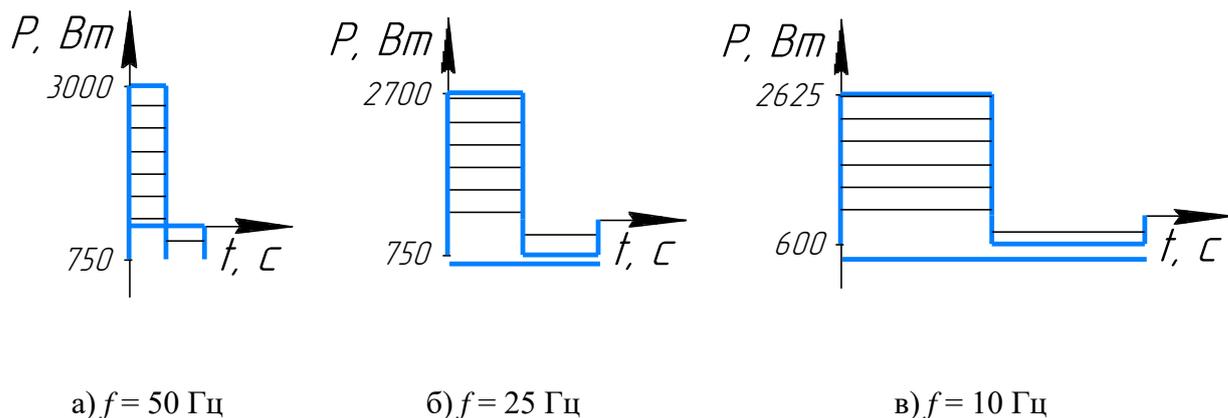
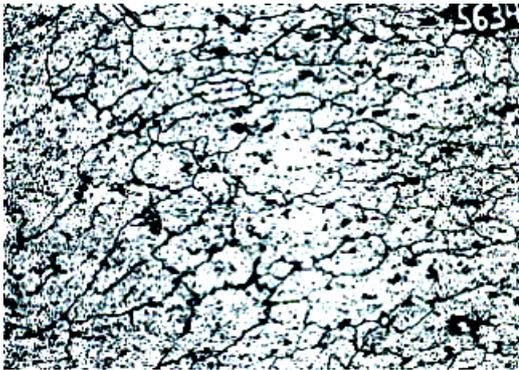
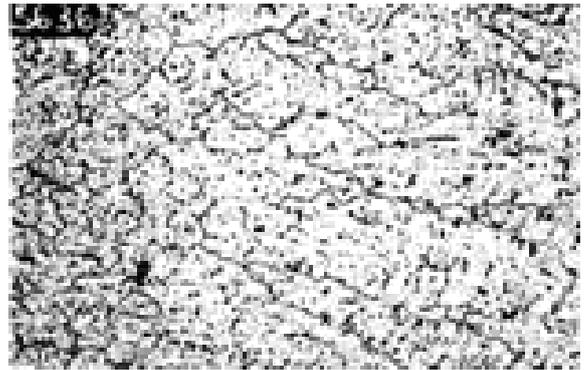


Рисунок 40 – Графики распределения мощности на период переменного тока

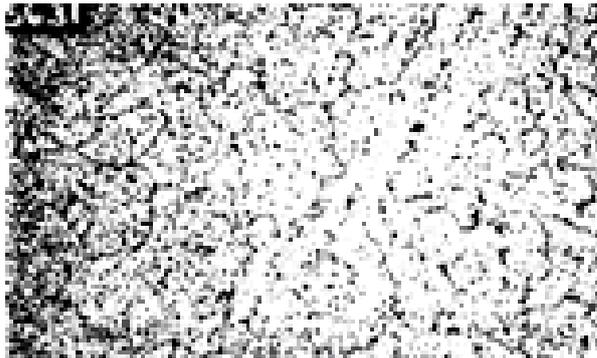
В этой серии экспериментов используется симметричный цикл ($I_{пр} = I_{обр}$) при условии, когда $l_d = 3$ мм = const, $Q_{Ar} = (6-7)$ л/мин = const, $v_{св} = 15,5$ м/ч, соотношение $P_{обр.} / P_{пр.} = 4$ (рисунок 38а, 38б). Контроль структуры сварки предполагает изготовление микро- и макрошлифов. Исследования показали, что микроструктура при сварке на переменном токе прямоугольной формы при $f = 50$ Гц мелкозернистая, как в зоне шва, так и зоны сплавления (рисунок 41а, 41б, 41в х200).



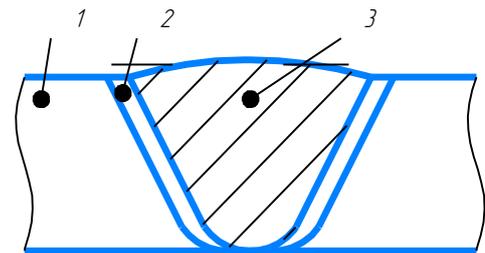
а) Основной металл



б) Зона сплавления



в) Шов



1 – основной металл; 2 – ЗТВ; 3 – шов

г) Условное обозначение

Рисунок 41 – Микроструктура при сварке сплава АМгб на частоте $f = 50$ Гц; $I_{пр.} = I_{обр.} = 150$ А; $t_{пр.} = t_{обр.} = 0,01$ с; $U_{пр.} = 5,0$ В; $U_{обр.} = 20$ В

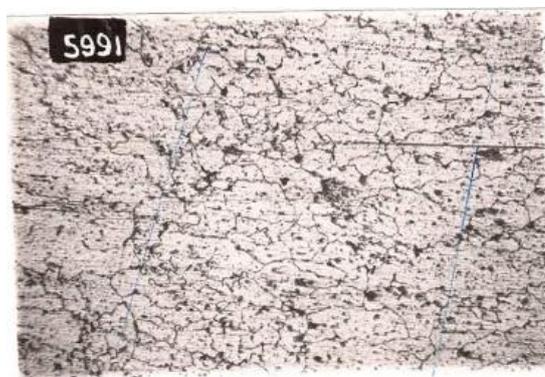
«Границы зерен размыты (рисунок 41б, 41в). По данным автора работы [9] в металле шва наблюдается бисерное расположение Mg_5Al_8 по границам зерен, что повышает коррозионную стойкость сплава. Установлено, что ширина зоны термического влияния уменьшается при использовании прямоугольной формы тока» [31].

Критерием оценки структуры сплава системы Al-Mg при разных частотах сварочного тока также принято равенство вводимой в металл энергии $P/v_{св}$, используя симметричный цикл ($I_{пр.}=I_{обр.}$) при $f = 25$ Гц. Динамические характеристики режима наплавки с соотношением $P_{обр.} / P_{пр.} = 3,6$ приведены на рисунках 38в, 38г.

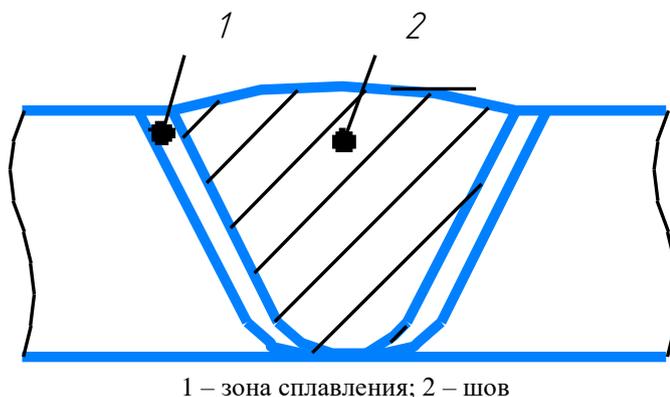
Анализ микроструктуры при сварке на переменном токе прямоугольной формы показал, что при $f = 25$ Гц также получена мелкозернистая структура шва (рисунок 42б x200) и зоны сплавления (рисунок 42а x200).



а) Зона сплавления



б) Шов

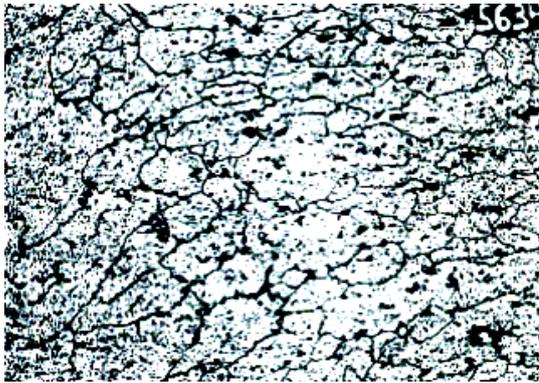


1 – зона сплавления; 2 – шов

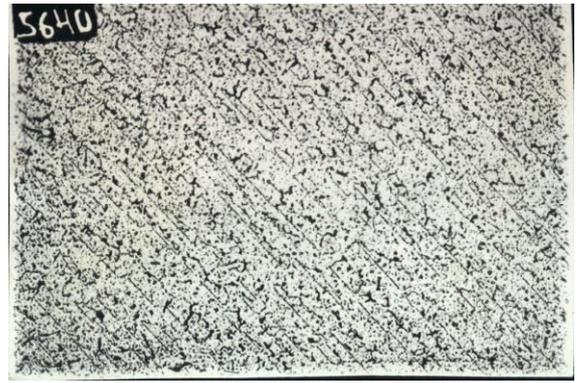
в) Условное обозначение

Рисунок 42 – Микроструктура при сварке сплава АМгб на частоте $f = 25$ Гц: $I_{пр.} = I_{обр.} = 150$ А; $t_{пр.} = t_{обр.} = 0,02$ с; $U_{пр.} = 5,0$ В; $U_{обр.} = 18,0$ В

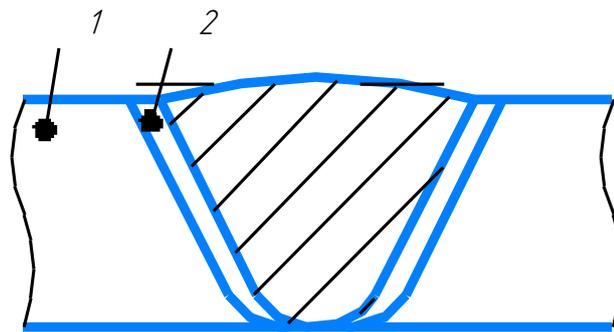
Уменьшение частоты переменного тока прямоугольной формы до $f = 10$ Гц также изменяет структуру в зоне сплавления (рисунок 43). Динамические характеристики режима наплавки с соотношением $P_{обр.} / P_{пр.} = 4,4$ показаны на рисунках 38в, 38г.



а) Основной металл



б) Зона сплавления



1 – основной металл; 2 – зона сплавления

в) Условное обозначение

Рисунок 43 – Микроструктура при сварке сплава АМгб на частоте $f = 10$ Гц; $I_{пр.} = I_{обр.} = 150$ А; $t_{пр.} = t_{обр.} = 0,1$ с; $U_{пр.} = 4,0$ В; $U_{обр.} = 17,5$ В

Исследование структуры зоны сплавления и шва при сварке переменным током прямоугольной формы показало, что форма сварочного тока и его частота сварочного тока оказывают влияние на структуру как в зоне сплавления, так и шва.

Дополнительно проведём серию экспериментов при сварке в асимметричном режиме, когда $I_{пр} \neq I_{обр}$ и $t_{пр} \neq t_{обр}$ и выявляем новые возможности дуги переменного тока прямоугольной формы. «Возможность автономного регулирования прямой и обратной полярности, как по длительности, так и по амплитуде тока открывает дополнительные резервы воздействия на процесс кристаллизации металла сварочной ванны и зоны сплавления» [31].

Исследуя влияние асимметричности цикла на эффективность воздействия на структуру шва при сварке сплава АМгб произведена сварка образцов толщиной 2 мм и 3 мм свободной дугой. Исследования показали, что «при сварке дугой с асимметричным циклом, когда амплитуды тока и длительности прямой и обратной полярности различны, наблюдаются структуры зоны сплавления и швов, отличные от структур, образующихся при сварке на синусоидальном токе» [13, 31]. Так, при частоте $f = 10$ Гц (рисунок 45б) и 25 Гц (рисунок 44б) границы зерна в зоне сплавления значительно тоньше, поэтому труднее выявляются. «Состав границ зерен отличен от состава границ транскристаллитной структуры. Интенсивные выпадения интерметаллидов и вторичной фазы меньше» [31].

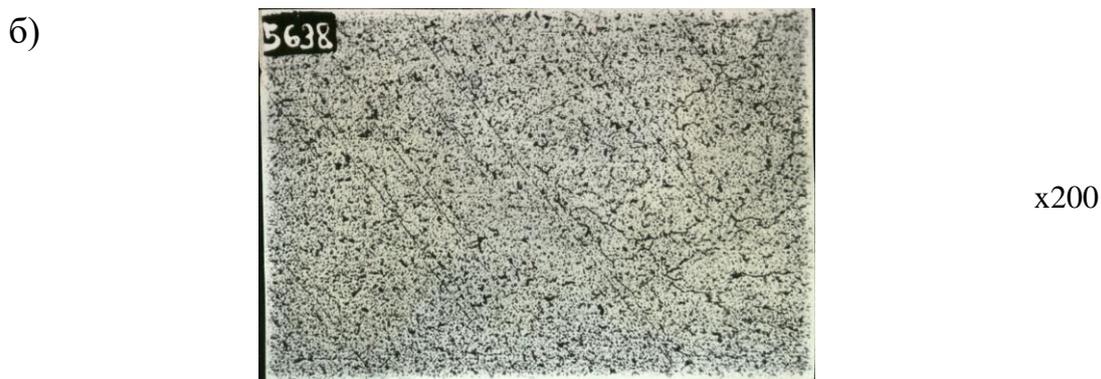
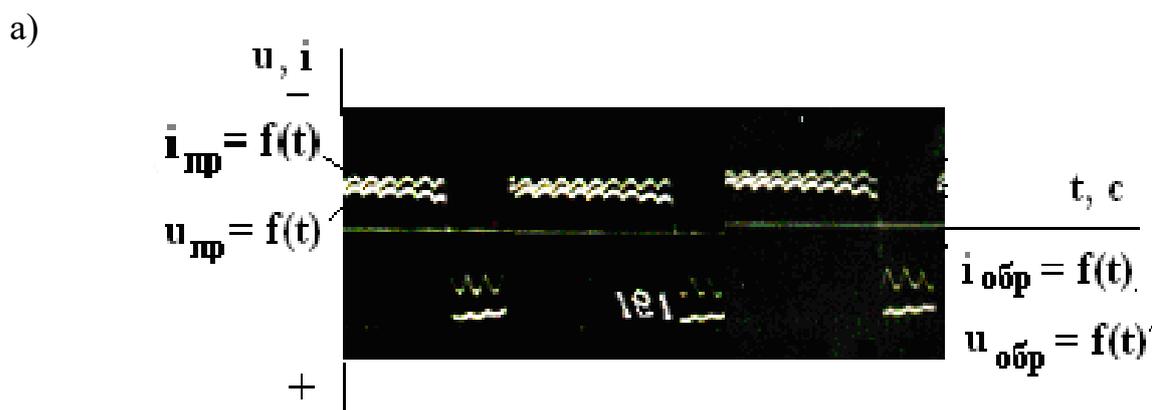


Рисунок 44 – Осциллограмма тока, напряжения (а) и микроструктура зоны сплавления (б): $I_{пр} = 164$ А, $I_{обр} = 184$ А, $t_{пр} = 0,032$ с, $t_{обр} = 0,01$ с, $f = 25$ Гц, $v_{св} = 12,4$ м/ч, $v_{пр} = 33,2$ м/ч

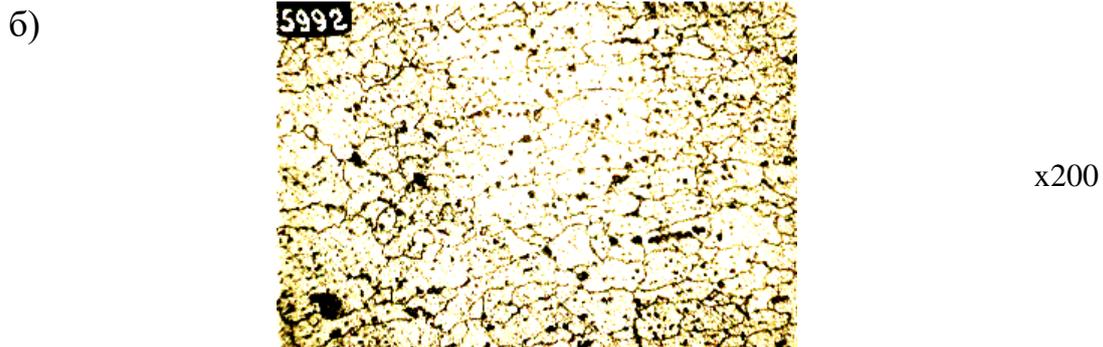
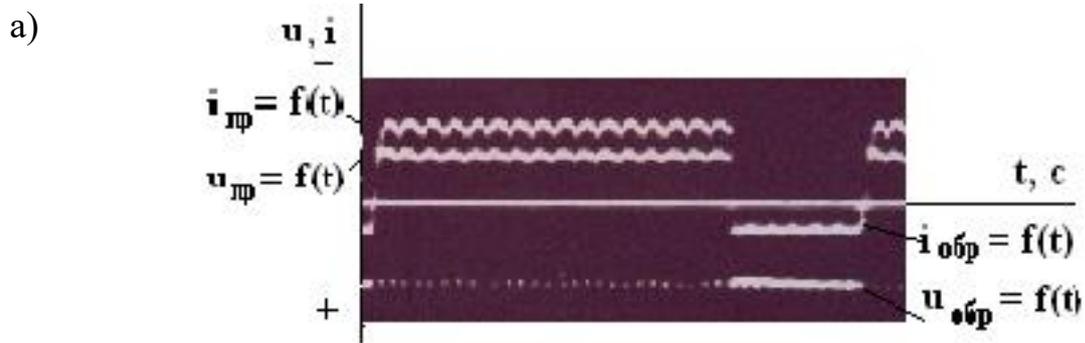


Рисунок 45 – Осциллограмма тока, напряжения (а) и микроструктура зоны сплавления (б): $I_{пр} = 148 \text{ А}$, $I_{обр} = 75 \text{ А}$, $t_{пр} = 0,046 \text{ с}$, $t_{обр} = 0,004 \text{ с}$,
 $f = 10 \text{ Гц}$, $v_{св} = 18 \text{ м/ч}$, $v_{пр} = 35 \text{ м/ч}$

Регулирование частоты переменного тока прямоугольной формы и распределения мощности в прямой и обратной полярности влияет на структуру зоны сплавления и шва, что оказывает влияние на качество сварного соединения.



Рисунок 46 – Макроструктура сварного соединения сплава АМгб ($S = 2,0 \text{ мм}$): $I_{пр} = 135 \text{ А}$, $I_{обр} = 35 \text{ А}$, $t_{пр} = 0,056 \text{ с}$, $t_{обр} = 0,01 \text{ с}$,
 $f = 15 \text{ Гц}$, $v_{св} = 18 \text{ м/ч}$, $v_{пр} = 48 \text{ м/ч}$

Появление значительной пульсации давления дуги нарушает естественный процесс кристаллизации. В результате возможно измельчение зерна и общей морфологии структуры металла шва (рисунок 46) асимметричным циклом при $P_d = 1352$ ВА.

Заключение по разделу

В результате проведённых исследований технологических свойств дуги переменного тока прямоугольной формы установили, что дуга устойчива, если скорость перехода через нуль находится в диапазоне от 300 до 600 кА/с и не требует никаких дополнительных источников энергии. Снижение скорости перехода через нуль до 100 кА/с требует введение дополнительных источников энергии, работающих с установленной частотой (как правило, ГВЧ). Установлено, что во всём диапазоне изменения амплитудного тока прямой и обратной полярности напряжение повторного возбуждения дуги при смене полярности (зажигания) $U_z \approx U_d$, что свидетельствует об устойчивости дугового разряда дуги переменного тока прямоугольной формы в диапазоне от 20 до 250 А.

Исследуя проплавляющую способность дуги переменного тока прямоугольной формы в указанном диапазоне тока установили, что максимальная проплавляющая способность дуги достигает от 10 до 50 Гц. Поэтому дальнейшее исследования показателей технологических свойств дуги проводились в указанном диапазоне частот.

Исследования, проведённые автором Varhorst S. [34], который регулируя амплитуду тока обратной полярности при сварке алюминиевых сплавов обнаружил возможность регулирования ширины зоны катодной очистки.

Современные инверторы с бесконечным количеством регулируемых параметров позволили обнаружить возможность управления величиной зоны очистки за счёт:

- 1) отдельного регулирования амплитуды прямой и обратной

полярности, т.е. регулирование энергии, введённой в металл в прямую и обратную полярность;

2) отдельного регулирования длительности прямой и обратной полярности в диапазоне от 10 до 50 Гц, что также позволяет регулировать энергию прямой и обратной полярности.

Авторы работы [25] установили, что сплавы системы Al-Mg представляют собой α -твёрдый раствор с включением интерметаллической β -фазы (Mg_5Al_8), количество и размер которых зависит от содержания магния. Авторы доказали, что сплавы с добавками магния (до 3,5 %) характеризуются довольно крупнозернистой микроструктурой. Дальнейшее повышение магния (до 7,5 %) измельчает микрочастицы, структура становится однородной и мелкозернистой. С повышением магния количество β -фазы возрастает, размер её при этом уменьшается (рисунок 29). Полученные результаты авторов работы позволили предположить, что размеры зерна и β -фазы можно регулировать за счёт таких параметров как энергия прямой и обратной полярности, вводимой в металл. Известно, что энергия прямой и обратной полярности можно регулировать за счёт частоты, длительности прямой и обратной полярности, а также тока.

Для этого проводится серия экспериментов при максимально проплавающей способности дуги, используя симметричный режим сварки, когда ток $I_{пр.} = I_{обр.}$ и длительность $t_{пр.} = t_{обр.}$ для частоты 10-50 Гц.

В результате проведённых исследований по разработанной методике для симметричных режимах определили границы зёрен в зоне сплавления и структуру шва (рисунки 41-43). Исследования структуры в зоне сплавления и шва показали, что частота тока оказывает влияние на структуру как в зоне сплавления, так и шва. Во всех случаях обнаружено, что границы зёрен значительно тоньше чем границы зёрен в основном металле, а в зоне шва во всех случаях обнаружено бисерное расположение β -фазы (Mg_5Al_8) по границам зёрен. Полученные результаты свидетельствуют о том, что размеры

зёрен уменьшились, а структура их расположения в шве приобрела бисерное расположение β -фазы. Другими словами, за счёт энергетических параметров дуги удаётся влиять на структуру шва и прочностные характеристики.

«Возможность автономного регулирования прямой и обратной полярности, как по длительности, так и по амплитуде тока открывает дополнительные резервы воздействия на процесс кристаллизации металла сварочной ванны и зоны сплавления» [31]. При сварке дугой, когда $I_{пр} \neq I_{обр}$ и $t_{пр} \neq t_{обр}$ появляются дополнительные возможности дуги переменного тока прямоугольной формы (асимметричный режим сварки).

Проведя исследования на частоте 10-50 Гц в асимметричном режиме обнаружили, что границы зёрна в зоне сплавления значительно тоньше. Интенсивные выпадения интерметаллидов и вторичной фазы меньше, т.е. регулирование частоты в диапазоне от 10 до 50 Гц и распределение мощности в прямой и обратной полярности влияет на структуру зоны сплавления и шва.

Проведённый расчёт мощности прямой и обратной полярности позволил определить характер распределения мощности в прямой и обратной полярности дуги переменного тока, обнаружив её пульсирующий характер (рисунки 38б, 38г, 38е). Можно предположить, что появление пульсации мощности приводит к пульсации давления дуги, что нарушает естественный процесс кристаллизации (рисунок 46).

Заключение

Растущий спрос на прочные конструкции, где деформируемые алюминиевые сплавы выступают ключевым материалом обуславливает актуальность проведения исследований в данной работе.

Традиционные методы сварки, такие как MIG и TIG на постоянном токе, не обеспечивают необходимой устойчивости процесса и воспроизводимости результатов.

В этой связи методы сварки переменным током, в частности использования дуги прямоугольной формы, открывают новые возможности за счёт управления тепловложением.

Данная работа направлена на решение важной научно-технической задачи, которая имеет большое значение для развития современных сварочных технологий. Результаты исследования могут быть использованы не только в промышленности, но и в образовательных целях, способствуя подготовке квалифицированных специалистов в области сварочного производства.

Целью данной работы является расширение технологических возможностей сварки деформируемых алюминиевых сплавов за счёт оптимизации энергетических параметров дуги переменного тока прямоугольной формы.

Анализ свойств деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg показал, что структура сплавов Al-Mg представляет собой α -твёрдый раствор с включением интерметаллической β -фазы (Mg_5Al_8), количество и размер которой зависят от содержания магния.

Исследования, проведённые Николаевым Г.А., Фридляндером И.Н., Арбузовым Ю.П. и Althof F.C. позволили получить структуры сплавов системы Al-Mg с тонкими (нитевидными) выделениями β -фазы по границам зёрен и с бисерным расположением выделения интерметаллидов Mg_5Al_8 по границам зёрен за счёт содержания магния в сплаве системы Al-Mg и таким

способом влиять на прочностные характеристики деформируемых алюминиевых сплавов.

Изучение особенностей сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом свободной дугой и другими способами показало, что на свойства свариваемых деформируемых алюминиевых сплавов можно влиять за счёт энергетических характеристик дуги, обеспечивающих концентрации источника тепла.

Появление на рынке сварочного оборудования серии инверторов и установок переменного тока прямоугольной формы значительно расширило технологические возможности дуги.

Технологические (служебные) свойства сварочной дуги определяются совокупностью её теплового, механического и физико-химического воздействия на сплав, а также формирование и качество шва.

Применение современных источников питания переменного тока прямоугольной формы расширило количество параметров, влияющих на технологические возможности дуги. В данной работе проведены исследования показателей технологических свойств переменного тока, оказывающих наибольшее влияние на формирование сварного соединения: устойчивость процесса сварки, проплавливающая способность дуги, катодная очистка, а также качество сварного соединения при симметричном и асимметричном режимах сварки на переменном токе прямоугольной формы.

Для проведения исследований показателей технологических свойств переменного тока прямоугольной формы специально разработаны методики, с помощью которых определены оптимальные параметры режима сварки алюминиевого сплава АМг6 толщиной 2-3 мм свободной дугой. Отдельные эксперименты проведены при наплавке.

В результате проведённых исследований определены условия устойчивого горения дуги при $di/dt < 600$ кА/с без дополнительного источника

энергии. Установлено, что $U_3 \leq 22,5$ В, а $U_d \approx 21$ В, т.е. $U_3 \approx U_d$. Это свидетельствует об устойчивости процесса.

Установлен факт, что проплавляющая способность дуги возросла на 28% по сравнению с использованием переменного тока синусоидальной формы.

Исследования показали, что максимальную проплавляющую способность дуги переменного тока прямоугольной формы можно получить регулируя частоту сварочного тока от 10 до 50 Гц.

Учитывая этот факт в работ определено влияние параметров режима сварки на структуру сварного соединения как на симметричном, так и на ассиметричном режимах сварки.

Регулируя частоту тока от 10 до 50 Гц удаётся получить бисерное расположение β -фаз как на симметричном, так и ассиметричном режимах сварки.

Металлографические исследования показали, что в ассиметричном режиме сварки при частоте 10 и 25 Гц границы зерна в зоне сплавления значительно тоньше, интенсивное выпадение интерметаллидов меньше. Широкий диапазон регулирования электрических и неэлектрических параметров дуги позволил управлять отдельно тепловложением в прямую и обратную полярность, влиять на зону катодной очистки и качество сварки.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Барауля А.В. Сварка корпуса катера из алюминиевого сплава [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/4527>
2. Белявцев К.А. Технология сборки и сварки тормозного устройства лонгборда [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/8075>
3. Бродский А. Я. Аргодуговая сварка вольфрамовым электродом. – М.: Машгиз, 1956. – 398 с.
4. Введение в планирование эксперимента. Адлер Ю.П. Издательство «Металлургия», 1968 г., 155 с.
5. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 608 с.
6. Ельцов А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов дуговой сварки алюминиевых сплавов комбинированными импульсами тока – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва 2004. – 24 с.
7. Ельцов, В.В Системный подход в научных исследованиях: учебное пособие. / В.В. Ельцов. – Тольятти: ТГУ, 2023.
8. Квасов Ф. И., Фридляндер И. Н. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. М.: Metallurgy, 1972. – 551 с.
9. Киселев, А.С. Управление технологическими свойствами дуги переменного прямоугольного тока при сварке алюминиевых сплавов малых толщин неплавящимся электродом [Текст] / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Томск. Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 1998. - 185 с.

10. Колачев, Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] - М. : изд-во МИСИС, 1999. - 413 с.
11. Короткова Г.М., Славин Г.А., Филиппов М.А. Исследование процесса сварки дуги переменного тока прямоугольной формы [Текст] // Сварочное производство. – 1971. – № 10. – с. 4-6.
12. Короткова, Г.М. Исследование теплового состояния сварочной дуги при сварке неплавящимся электродом переменным током прямоугольной формы [Текст] // Сварочное производство. - 2017 . - № 8. – С.9-12
13. Короткова, Г.М. Источники питания для сварки алюминиевых сплавов : монография / Г.М. Короткова [Текст]. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 312с.
14. Кох Б.А. Основы термодинамики металлургических процессов сварки. – Ленинград: Судостроение, 1975. – 240 с.
15. Кузнецов Д.С. Исследование параметров процесса сварки из алюминиевых сплавов однофазной сжатой дугой точками [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/9911>
16. Лапин, И.Е. Повышение технологических свойств дуги при сварке неплавящимся электродом в инертных газах [Текст] / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Волгоград, 2004 г. - 373 с.
17. Ленивкин В.А. Технологические свойства дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюгерев, Х.Н. Сагиров / под редакцией Н.Г. Дюгерова. – 2-е изд., доп. – М., 2011. – 368 с.
18. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры. – Тольятти: ТГУ, 2024. – 39 с.
19. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. – 264 с.

20. Нильсен Х. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение) / Х. Нильсен, В. Хуфнагель, Г. Ганулис ; пер. с нем. под ред. М. Е. Дрица, Л. Х. Райтбарга - 13-е изд., переработ. и доп. – Москва : Металлургия, 1979. – 678 с.
21. Положение о выпускной квалификационной работе. – Тольятти: ТГУ, 2024. – 32 с.
22. Пономарев, И.С. Повышение механических и специальных свойств сварных швов алюминиевых сплавов методом микроплазменного окисидирования [Электронный ресурс]. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/38996>
23. Рабкин Д. М., Игнатьев В. Г., Довбищенко И. В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1982. – 95 с.
24. Рабкин Д.М., Игнатьев В.Г., Довбищенко И.В. Состояние и перспективы применения алюминиевых сплавов в сварных конструкциях. – Киев: Наукова думка, 1975. – 47 с.
25. Рыкалин, Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке : [учеб. Пособие для машиностроительных вузов] / Н.Н. Рыкалин. – Москва : Машгиз, 1951. – 296 с.
26. Свариваемые алюминиевые сплавы. Николаев Г.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. – М.: Металлургия, 1990, 296 с.
27. Сварочная горелка ТВі АТ 420S [Электронный ресурс]. URL: <https://techelement.ru/catalog/tbi-at-420s-item16602>
28. Славин Г. А., Короткова Г. М., Филиппов М. А. Автоматическая сварка дугой переменного тока прямоугольной формы [Текст] // Авиационная промышленность. – 1972. – №12. – с. 21-25.
29. Смирнов И. В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие для вузов / И. В. Смирнов – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 268 с.: ил. – Текст : непосредственный.

30. Соснин Н.А., Щипков М.Д. Исследование сварки сжатой дугой тонколистовых соединений из сплава АМг6 // Автоматическая сварка. 1977, №12, с. 19-20.
31. Степанов Е.Д. Исследование формирования шва при сварке алюминиевого сплава переменным током прямоугольной формы. – 2015.
32. Столбов В. И. Сварка и резка алюминиевых сплавов трехфазной дугой [Текст] / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Тольятти, 1963. – 348 с.
33. Столбов В.И. Допустимая величина отклонения электрода от оси стыка при сварке сплава АМг6 трехфазной дугой / В.И. Столбов, В.А. Иевлев, А.Е. Шакола, В.С. Михайлов // Сварочное производство. 1981, №10, с. 16-18.
34. Столбов В.И., Осянкин Г.В. Сидоров В.П. Сборка под сварку продольного шва тонкостенных труб. Технология производства сварных и паяных конструкций. Выпуск 1, Саратов, 1973, с. 3-7.
35. Althof F.C. // Luftfahrt – fortschung. – 1938. – Bd. 15. – S. 60.
36. Barhorst S., The cathodic etching technique for automated aluminum tube welding. / Weld. J. – 1985. – Vol. 64 № 5. – P. 28-31.
37. Chen, Y., Li, H., & Wu, L. Alternating Current Tungsten Inert Gas Welding of Aluminum Alloys: A Review. Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 267. – P. 1-12.
38. Kumar, R., & Balasubramanian, V. Effect of AC Pulse Parameters on Weld Bead Geometry and Mechanical Properties of AA6061 Aluminum Alloy Welds. Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 32. – P. 208-218.
39. Lancaster, J. F. The Physics of Welding: Arc Processes and Weld Pool Behavior. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press. – 2016. – 450 p.
40. Murphy, A. B. AC Arc Welding of Aluminum: Cathodic Cleaning and Arc Stability. Welding Journal. – 2017. – Vol. 96 (5). – P. 167-178.