

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Производство диагностика и ремонт сварных конструкций и деталей газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Исследование процесса формирования усадочного кратера в месте окончания заварки дефектов изделий из алюминиевых сплавов \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ А.В. Карелов  
(ИО. Фамилия) (личная подпись)

Научный руководитель \_\_\_\_\_ В.В. Ельцов  
(ИО. Фамилия) (личная подпись)

Консультанты  
\_\_\_\_\_ В.Г. Виткалов  
(ИО. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент В.В. Ельцов.  
(ученая степень, звание, ио. Фамилия) (личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ д.т.н., доцент В.В. Ельцов.  
(ученая степень, звание, ио. Фамилия) (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018

Тольятти 2018

## Содержание

Введение .....	4
1. Анализ процесса кристаллизации металла при формировании сварочного кратера.....	6
1.1 Анализ способов ремонтной сварки для восстановления изделий из легких сплавов.....	6
1.2 Виды дефектов сварного шва и причины их образования при формировании сварочного кратера.....	12
1.3 Характеристика существующих способов устранения сварочного кратера.....	15
1.4 Формулировка задач.....	19
2 . Исследование процесса формирования сварочного кратера в момент окончания сварки изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой.....	20
2.1 Исследование причин и механизма возникновения усадочного кратера в месте окончания заварки.....	20
2.2 Разработка математической модели теплового воздействия трехфазной дуги на поверхность металла при формировании сварочного кратера.....	23
2.3 Расчетная модель конфигурации сварочного кратера.....	26
3. Экспериментальное определение влияния тепловых и силовых характеристик трехфазной сварочной дуги на формирование усадочного кратера.	28
3.1 Разработка методики проведения экспериментов по исследованию формирования усадочного кратера.....	28
3.1.1 Проведение фотометрических экспериментов по определению размеров кратера.....	29
3.2 Исследование механизма формирования усадочного кратера при линейном спаде тока дуги.....	33
3.3 Исследование механизма формирования усадочного кратера при различных характеристиках кривой спада тока дуги.....	36
4. Разработка оборудования и технологии для формирования усадочного	

кратера с минимально допустимыми параметрами при устранении дефектов на поверхности изделий из алюминиевых сплавов.....	45
4.1 Разработка сварочного оборудования и устройств для программируемого изменения параметров режима сварки.....	45
4.2 Отработка технологических параметров режима горения трехфазной дуги в момент окончания сварки для различных толщин материала.....	55
4.2.1 Технологическое использование эффекта дифференцирования теплового потока трехфазной дуги при заварке кратера.....	56
4.3 Технология формирования усадочного кратера с минимально допустимыми параметрами. ....	58
5. Разработка бизнес-плана для привлечения инвестора в проект «Установка для сварки изделий из легких сплавов с программируемым изменением мощности трехфазной дуги».....	61
Заключение. ....	75
Список используемой литературы.....	76

## Введение

Потребление изделий из сплавов алюминия имеет устойчивую тенденцию к росту, за последние тридцать лет оно выросло в несколько раз. Соответственно увеличивается и роль сварки в изготовлении таких изделий и в восстановительном ремонте [1].

Вместе с тем, процесс сварки и восстановления геометрических параметров изделий из алюминиевых сплавов электродуговой наплавкой осложнен целым рядом факторов, связанных как со свойствами сплавов алюминия, так и особенностями горения сварочной дуги при сварке и наплавке [2, 3].

Основным затруднением при восстановлении поверхностей и сварке изделий из алюминия, является момент выключения сварочной дуги и формирование усадочного кратера на поверхности наплавленного слоя. Величина (глубина) и форма усадочной раковины зависит от объёма расплавленного металла, скорости его охлаждения и направленности роста кристаллитов. Вследствие высокой теплопроводности сплавов алюминия и необходимости применения для наплавки мощных и высококонцентрированных источников энергии (аргонодуговой сварки неплавящимся электродом) величина усадочного кратера может достигать 80 % от толщины слоя (в случае расплавления металла без применения присадки). Даже применение присадочного материала не исключает появления усадочной раковины на поверхности наплавленного слоя, хотя и значительно меньшей по размерам. Наличие усадочного кратера, кроме того, что занижаются размеры наплавленного слоя в локальном месте, чревато появлением в наплавленном слое дефектов в виде микротрещин (даже если кратер будет впоследствии заварен) или концентраторов напряжений в виде оксидных включений.

Решение проблемы устранения сварочного кратера в производстве сварных конструкций связано с применением выводных планок. Однако такой способ невозможно применять при сварке или наплавке кольцевых и круговых швов, и при заварке локального дефекта на поверхности изделия.

В ряде случаев применяется так называемый «механизм заварки кратера» основанный на уменьшении сварочного тока по линейному закону в момент окончания сварки. Такой механизм, как правило, реализуется при автоматической сварке, поскольку устройства заварки кратера встроены в специализированные источники питания для автоматической сварки. Кроме того, установлено [4], что при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом линейный спад тока не в полной мере обеспечивает линейный спад температуры сварочной ванны, а значит скорости ее кристаллизации. Другими словами, линейный спад тока сварки в момент ее окончания не позволяет регулировать скорость кристаллизации металла в сварочном кратере, и изменять (управлять) ростом кристаллитов, формирующих усадочную раковину, а значит, не может устранить образование усадочной раковины и предотвратить появление дефектов в ней

Для того чтобы предотвратить появление усадочной раковины, необходимо управлять кристаллизацией металла сварочной ванны путем регулирования тепловложения в зону сварки (в месте окончания сварки), или скоростью отвода тепла из этой зоны. Наиболее удобным инструментом для этого является сама сварочная дуга, при изменении сварочного тока изменяется и тепловая мощность сварочной дуги, а значит и тепловая ситуация в зоне сварки. Для того чтобы обеспечить изменения тепловой ситуации в сварочной ванне, благоприятно влияющей на формирование усадочного кратера с минимальными размерами, необходимо изменять тепловую мощность сварочной дуги в момент окончания сварки по какому-то определенному закону, который необходимо выявить.

Поэтому целью работы является **повышение качества сварных соединений за счет минимизации усадочного кратера путем регулирования тепловых процессов в зоне окончания сварки**

## **1. Анализ процесса кристаллизации металла при формировании сварочного кратера.**

Сварка и наплавка изделий из алюминиевых сплавов выполняется в двух направлениях: 1 - устранение дефектов литья, осуществляемая в литейных цехах, 2 - заварка дефектов или наплавка изношенных изделий, полученных в процессе работы или при механической обработке поверхности. Изделия, изготовленные из легких сплавов более дорогостоящие, чем стальные, поэтому ремонту подвергаются именно алюминиевые литые детали. Работы многих авторов, связанных с ремонтной сваркой изделий из сплавов алюминия, можно разделить на три группы: во-первых, это анализ технологических процессов, устранения дефектов изделий с использованием общего или сопутствующего подогрева, во-вторых, - технологии и оборудование для заварки дефектов «в холодную», т.е. без использования подогрева, и в – третьих, работы связанные с исследованием физических, механических, эксплуатационных свойств сварных соединений в зоне ремонта.

### **1.1. Анализ способов ремонтной сварки для восстановления изделий из легких сплавов.**

Аналитические исследования по проблеме ремонтной сварки и наплавки изделий из легких сплавов, и особенно при ремонтной сварке, показали, что уделено мало внимания формированию качественного сварного соединения в зоне окончания сварки. Больше известно в литературных источниках [5,6] о конкретных технологических приемах при ремонте и наплавке, а также о металлургических процессах и свойствах сварных соединений после ремонта.

Ниже приведен литературный обзор конкретных способов ремонтной сварки и наплавки изделий из сплавов магния и алюминия с точки зрения технологической прочности (склонности к образованию горячих трещин) получаемых сварных соединений и эффективности способов ремонта.

Старейший способ заварки дефектов магниевых отливок предусматривает осуществление заварки газовой горелкой с использованием фторидных флюсов и присадочного материала основного состава. Газовое пламя имеет широкие технологические возможности, но при этом возникают трудности удаления флюсов после сварки, а также снижается коррозионная стойкость наплавленного слоя. Магниевого сплавы отличаются низкой температурой возгорания, поэтому при реализации этого способа существует опасность возгорания ремонтируемого изделия. [7].

Исправление дефектов отливок из сплавов МЛ-5, МЛ-9, МЛ-10 в работах [8,29] рекомендуется производить аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом на переменном токе с использованием общего или местного предварительного подогрева.

«Для подварки применяют присадочный металл того же состава, что и основной металл в виде пресованных прутков диаметром 3...8 мм. Перед заваркой дефектный участок разделяют пневмошарошкой и производят зачистку от окислов и литейной корки поверхности изделия на расстояние 15...20 мм от границы разделки. После этого со стороны корня шва устанавливают гладкие стальные или медные подкладки, или лист асбеста и изделие подогревают до температуры 250...380°С. Нагрев обычно осуществляют в печах или пламенем газовой горелки. Такой технологический процесс используется на заводах, производящих магниевое литье (ЛНПО им.В.Я.Климова г.С-Петербург, УМПО «РИЦА» г.Уфа, КМПО «АРФА» г.Казань). Однако получить стабильно высокое качество ремонта отливок при этом способе не удастся из-за несплавления кромок в корне шва и трещин в усадочном кратере. Кроме того, предварительный подогрев не всегда возможно использовать, например, при ремонте механически обработанного изделия» [29, с.54].

В статье [9] исследователи определяли влияние температуры общего предварительного (в печи) и сопутствующего (газовыми горелками) подогрева на скорость возникновения деформаций в зоне сварки и, соответственно, на образование трещин при заварке дефектов литья из литейных магниевых спла-

вов. Была установлена взаимосвязь между темпом развития растягивающих напряжений в зоне ремонта и скоростью снижения температуры, прилегающих к зоне сварки участков отливки. Взаимосвязь заключается в том, что при отсутствии сопутствующего подогрева в зоне ремонта могут образоваться горячие трещины на участке сплавления.

Было отмечено, что предварительный и сопутствующий подогрев сопряжен с дополнительными затратами по энергии и материальным ресурсам. Кроме того, для термо и механически обработанных деталей применять предварительный подогрев весьма рискованно из-за нарушения приобретенных термообработкой свойств или соответствующей формы и размеров.

Известно достаточно большое количество способов устранения дефектов изделий из алюминия и магния без использования предварительного подогрева. Например, процесс вварки технологической вставки [10]. Дефектный участок вырезают механическим путем, по периметру вырезанного участка делают скос кромок по углом  $30^\circ$ , затем устанавливают с натягом в образовавшееся отверстие заранее подготовленную вставку, которая тоже имеет скос кромок.

Вварку вставки ведут двумя швами по периметру вставки с одной стороны, затем изделие переворачивают, осуществляют зачистку корня шва и выполняют сварные т швы с обратной стороны. Такой технологический процесс позволяет уменьшить величину усадочных напряжений за счет уменьшения объема расплавленного металла. Однако, так можно сделать только в случае свободного доступа к завариваемому участку с двух сторон. При этом для разделки дефектного участка и изготовления вставки требуется достаточно точное металлообрабатывающее оборудование, например фрезерный или токарный станок. Кроме того, сварка двухстороннего шва также не оказывает благоприятного воздействия на металл в зоне термического влияния, где из-за двукратного воздействия термического цикла могут образоваться горячие трещины.

Еще есть способ устранять дефекты микроплазменной сваркой [11] (Рис.1.1).



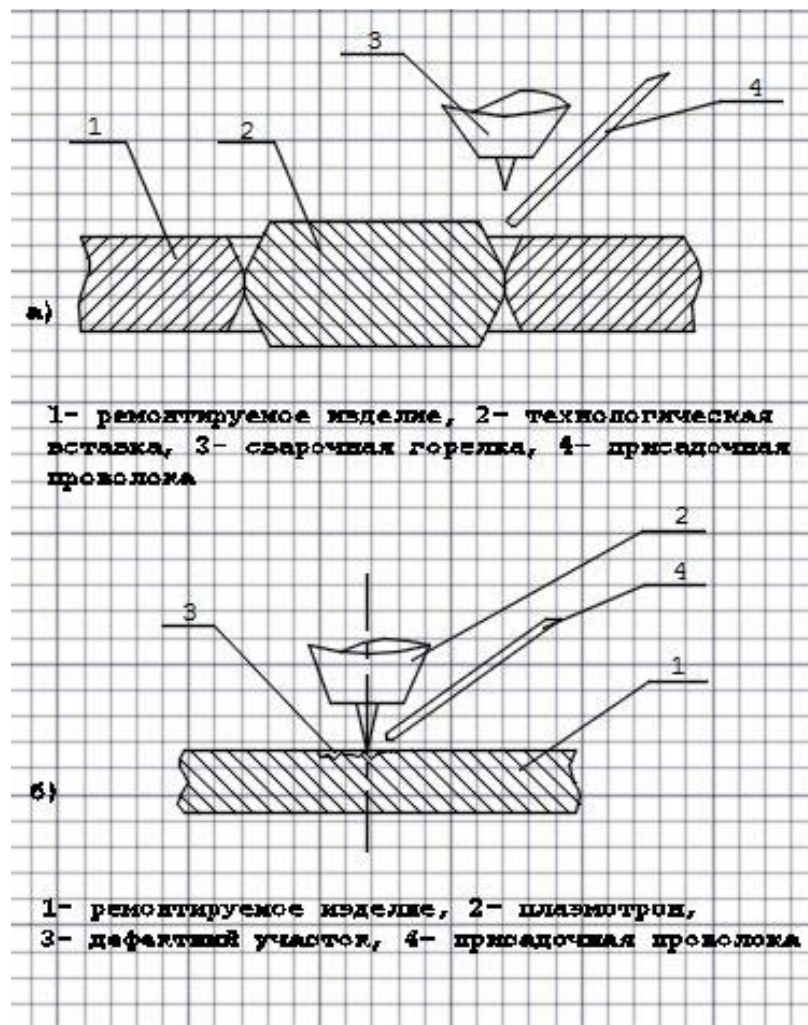


Рисунок 1.1- Ремонт микроплазменной сваркой

Этот способ позволяет существенно снизить коробление изделий при заварке, но только в случае устранения микродефектов на поверхности изделия. Для заварки сквозных дефектов или разделок большого объема такой способ малоэффективен из-за невысокого коэффициента наплавки и малой мощности источника тепла.

Предлагается способ ремонтной сварки изделий из легких сплавов [12] при котором дефектный металл вырезается, с образованием в месте дефекта полости в виде чаши. Дно такой «чаши» усиливают наплавкой для предотвращения сквозного проплава основного металла. После окончательной заварки производят мехобработку усиления самого шва и произведенной ранее наплавки. Такой способ ремонта позволяет значительно снизить трещинообразование за счет гарантированного сплавления кромок в корне шва. Недостатка-

ми такого технологического процесса являются, во-первых, необходимость точного определения местоположения технологической наплавки, во-вторых, необходим доступ к дефектному участку со всех сторон, в третьих, скорость охлаждения наплавленного металла не регулируется, что приводит к образованию в нем трещин.

В японских патентах [13,14] предложены способы заварки магнелиевых отливок без использования подогрева на искусственно охлаждаемой технологической подкладке.

«Техпроцесс осуществляют следующим образом: производят вырубку дефектного металла на требуемую глубину, заваривают с помощью аргодуговой сварки плавящимся или неплавящимся электродом на переменном токе. Одновременно со сваркой с обратной стороны дефектного участка производят струйное охлаждение водой, углекислотой или жидким азотом. Применение принудительного охлаждения позволяет уменьшить объем сварочной ванны и величину зоны термического влияния, что снижает вероятность образования горячих трещин. Также уменьшается величина усадочной силы зависящая от объема расплавленного металла. Этому способу присущи и явные недостатки, а именно: необходимость двухстороннего доступа к дефектному участку, невозможность устранения сквозных дефектов, весьма сложная зависимость между параметрами режима сварки, температурой изделия и расходом охладителя, толщиной ремонтируемого участка и объемом сварочной ванны» [29,с.56].

В технической литературе описан способ дуговой заварки отверстий на изделиях из алюминиевых сплавов без применения общего подогрева [15] когда заварку дефектов проводят валиками начиная от краев отверстия с постепенным приближением к центру. В процессе сварки выполняют ступенчатое снижение сварочного тока от номинального значения (при сварке первых двух, трех валиков), до минимально возможного значения тока (когда еще возможно стабильное горение дуги) при накладке последних валиков. Недостатком указанного способа ремонта является возникновение горячих трещин в шве, т.к. здесь регулируется только поддержание стабильной температуры сварного шва

и ЗТВ, а не учитывается скорость охлаждения наплавленного металла после окончания сварки, т.к. именно в этот момент времени деформационные процессы в ТИХ определяют технологическую прочность сварного соединения.

Сотрудниками кафедры «ОТСП» Тольяттинского политехнического института (сейчас ТГУ) предлагалось для устранения дефектов магниевого литья применять аргонодуговую сварку трехфазной дугой неплавящимися электродами. Были проведены исследования влияние технологических подкладок на формирование корня шва т.к. зачастую, трещины развиваются в местах несплавления кромок, исследовалась мощность и проплавливающая способность трехфазной дуги, горящей с неплавящихся электродов в среде аргона [16,17].

Учитывая высокую проплавливающую способность трехфазной дуги, авторы работы [18,19] предложили способ исправления дефектов без разделки кромок на технологической подкладке с выемкой.

Это позволило практически полностью исключить несплавление кромок в корне шва и создать в зоне ремонта осесимметричное температурное поле, которое более благоприятно сказывается на технологической прочности сварных соединений, чем асимметричное, возникающее при заварке отверстий. Этот способ позволяет с минимальным трещинообразованием заваривать дефекты на тонкостенных изделиях, но его эффективность ограничена необходимостью проведения большого объема работ по удалению проплава, требованием доступа к дефектному участку с обеих сторон и толщиной ремонтируемого участка.

«Использовались широкие технологические возможности трехфазной дуги для предотвращения образования горячих трещин, а именно, использовали межэлектродную «независимую» дугу в качестве источника тепла для подогрева кристаллизующейся сварочной ванны. Этот эффект использовался при заварке сквозного отверстия на гладкой технологической подкладке швами очень малой длины. Сразу после наложения каждого микрошва он прогревался «независимой» дугой, что позволило снижать скорость его охлаждения и как следствие – уменьшение вероятности образования трещин. Основной проблемой

этого способа является наложение заключительного валика. Дело в том, что микрошов в месте окончания заварки дает несплавление кромок в корне, поэтому приходится расплавлять достаточно большой объем металла, а воздействие «независимой» дуги на большой объем кристаллизующегося металла малоэффективно, с точки зрения снижения скорости охлаждения металла, особенно в области ТИХ. Поэтому горячие трещины возникают, как правило, именно в месте окончания заварки» [29 с.58].

Аналитические исследования известных способов ремонтной сварки и наплавки изделий из легких сплавов позволяют говорить о том, что хорошее качество сварки удастся достичь лишь при условии использования общего или сопутствующего подогрева изделия. Также можно использовать какой –либо новый способ, который позволяет получить термдеформационную ситуацию в зоне ремонта близкую к режиму общего подогрева всего изделия. Необходимо создать такую ситуацию, когда темп нарастания деформаций не превышает деформационную способность свариваемого материала. В основном способы ремонтной сварки без подогрева не могут обеспечить необходимый тепловой режим в зоне ремонта дефектного участка, поэтому качество заварок дефектов изделий остается весьма низким.

## **1.2. Виды дефектов сварного шва и причины их образования при формировании сварочного кратера**

- Трещины – это вид дефектов сварного соединения, приводящий к разрушению его и выходу из строя всей конструкции. Чем больше в сплаве легирующих компонентов, или чем прочнее изначально сам сплав, тем большей склонностью к трещинообразованию отличаются сварные соединения, полученные электродуговой сваркой. Так же на склонность к трещинообразованию существенное влияние оказывает литейная усадка сплава и коэффициент термической дилатации. Чем больше эти величины для сплава, тем с большей вероятностью появятся трещины в сварных соединениях. [24].

Причиной образования трещин при сварке являются растягивающие напряжения, которые по уровню могут превышать предел текучести, и даже предел прочности сплава. Эти напряжения вызывают появление деформаций металла сварного соединения, скорость нарастания которой, может превышать деформационную способность материала. Именно неравномерность распределения температур при сварке в отдельных зонах сварного соединения вызывает появление растягивающих напряжений. При охлаждении металла шва растягивающие напряжения возникают в зоне, подверженной максимальной температуре. В высоколегированных сплавах по границам зерен образуются эвтектики, которые в момент кристаллизации зерен остаются жидкими, имеют низкую прочность и при приложении растягивающих напряжений легко разрушаются.

Возможность возникновения трещин помимо химического состава сплава определяется также другими факторами, задающими величину и темп развития деформации в определенные промежутки времени. Величина и темп развития деформации металла на различных этапах нагрева и охлаждения зависят от режима сварки, условий охлаждения и жесткости закрепления.

«Увеличение интервала кристаллизации ведет к увеличению склонности сплава к трещинообразованию. Обычно для предупреждения образования трещин при сварке алюминиевых сплавов проводят металлургические и технологические мероприятия. Возможности технологических мероприятий весьма ограничены, это — либо подогрев перед сваркой, который может быть рекомендован не во всех случаях, либо регулирование режимов сварки и режимов охлаждения, либо изменение жесткости закрепления свариваемого узла. Наибольший эффект достигается металлургическими методами, главный из которых — правильный выбор присадочного материала» [24, с.49].

- Поры – это дефекты сварных соединений, которые могут появляться, как в сварном шве так и в по линии сплавления металла шва и основного металла. Причины и механизм образования пористости изучались многими учеными, как в России, так и за рубежом. Как правило, пористость возникает вслед-

ствие попадания в металл шва адсорбированной на поверхности изделия или присадки влаги или органических загрязнений.

«Избыток газообразного водорода в металле объясняется повышением растворимости газов, особенно водорода, в жидком алюминии и скачкообразным уменьшением растворимости его в кристаллизующемся металле. Температура сварочной ванны в головной ее части достигает 1600—1700 °С, а температура переносимой в столбе дуги капли еще выше. Установлено, что наивысшая растворимость водорода в алюминии имеет место при температуре 2050° С и достигает 20,9 см<sup>3</sup> на 100 г металла, т. е. объем растворенного водорода чрезвычайно велик» [24, с. 51].

По мере охлаждения сварочной ванны атомарный водород стремится выделиться, но, объединяясь с другими атомами водорода, он восстанавливается в молекулы, и поэтому образуются газовые поры, которые выделяются по линии сплавления или в центре шва. Эти пузыри всплывают, пока вязкость металла невысокая, а затем при кристаллизации металла «вмораживаются» в металл шва. Газовые поры после кристаллизации металла остаются в нем в виде цепочки пустот, обычно сферической формы [25,26].

Кроме газовой пористости, имеющей сферическую форму, различают усадочную пористость, не имеющую определенной формы и располагающуюся по границам зерен.

Иногда в сварных соединениях из легких сплавов в ЗТВ также наблюдается пористость. Она появляется при сварке деталей малой толщины.

«Исследования показали, что причиной возникновения негерметичности в околошовной зоне является междендридная водородная микропористость, в некоторых случаях — сквозная. При нагреве сварочной дугой в околошовной зоне частично оплавляются границы зерен. Диффундирующий из основного металла к этим границам водород вытесняет расплавленную эвтектику, в результате чего в околошовной зоне образуется пористость, имеющая вид разветвленных каналов. Пористость такого типа опасна, так как часто не выявляет-

ся непосредственно после сварки при контроле сварных швов, а открывается при эксплуатации сварных узлов [27, с.132].

Причиной появления пористости может быть также водород, растворенный в самом материале при изготовлении отливок, паковок или при прокате листов, труб, швеллеров и др.

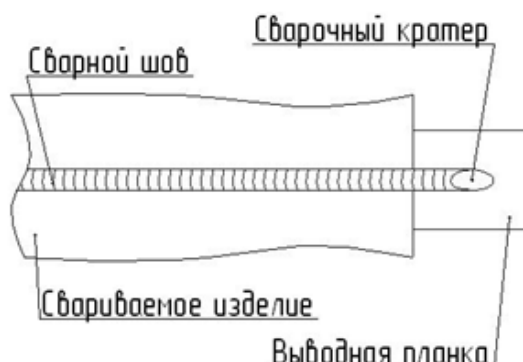
При высокой температуре или вследствие действия напряжений постоянного характера, атомы водорода диффундируют в пределах кристаллической решетки, и образуют внутри кристалла целые молекулы водорода. Возникновение скопления молекул внутри кристаллической решетки приводит, как к образованию пористости, так и холодных трещин, приводящих к разрушению сварного соединения.

### **1.3. Характеристика существующих способов заварки кратера в сварных соединениях.**

Рассмотрим основные способы заварки кратера, существующие в настоящее время;

Применение выводных планок [28,29].

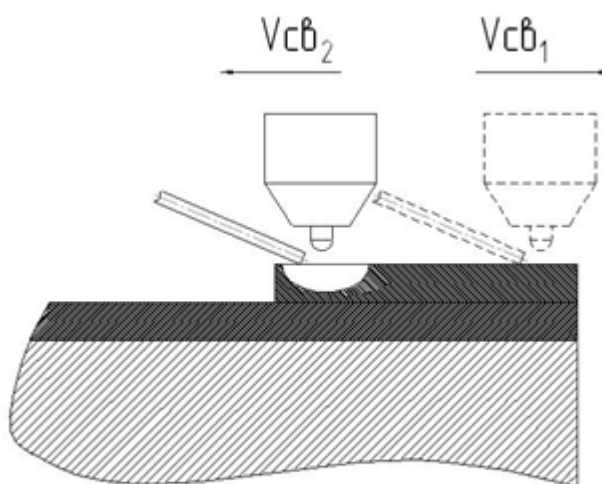
Способ наиболее распространенный в условиях современного производства – вывод усадочного кратера на, так называемую, выводную планку. Способ целесообразно применять при сварке стыковых прямолинейных швов. (Рис.1.4) . Кратер выводится за пределы сварного соединения и просто обрубается. Способ сопряжен с повышенными затратами на материал, а при сварке кольцевых швов или заварки точечных дефектов его невозможно применять.



**Рисунок 1.4 - Схема сварки с применением выводных планок**

Изменение направления движения сварочной горелки в месте окончания сварки на противоположное без прекращения подачи присадочной проволоки (Рис 1.5)

В технической литературе [29] по сварке алюминия даются следующие рекомендации: в месте окончания сварного соединения изменять направление движения сварочной горелки на противоположное без прекращения подачи присадочной проволоки. При этом на сварном шве образуется некоторое повышенное усиление и при обрыве дуги металл сварного соединения не утоняется. Но это не исключает образования трещин в месте обрыва дуги, которые являются концентраторами напряжений и, в конечном итоге, снижают механическую прочность всего шва.



**Рисунок 1.5 - Схема сварки с изменением направления движения горелки**

Сварка на охлаждаемой подложке [30].

При применении этого способа, (Рис 1.6) тепло отводится от сварочной ванны вниз, за счет этого уменьшается глубина сварочной ванны, соответственно уменьшаются размеры усадочной раковины. Но этот способ весьма ограничен по своему применению – наплавка пластин или листов алюминия, т.е. деталь должна быть плоской.



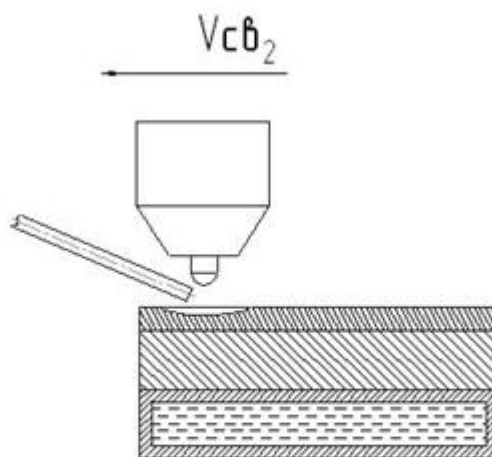


Рисунок 1.6 - Схема сварки на охлаждаемой подкладке

Линейный спад тока в момент окончания сварки.

Данный способ (Рис.1.7) позволяет минимизировать размеры усадочного кратера до некоторых пределов и ограничивает появление трещин, но, тем не менее, не исключает их появления, а зачастую просто является не эффективным. Доказано [31], что линейный спад тока не приводит к линейному спаду температуры, а напротив, в начале спада приводит к ее нарастанию, и, как следствие, неконтролируемая кристаллизация металла сварочной ванны.

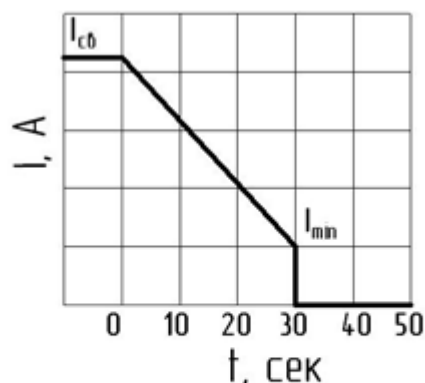


Рисунок 1.7 - Линейный спад тока в момент окончания сварки

Обрыв дуги, возбуждение дуги на минимальном токе [32].

В момент окончания сварки сварочная дуга выключается, без прекращения подачи защитного газа, после того как сварочная ванна закристаллизовалась – сварочная дуга возбуждается вновь, на минимальном токе при котором поддерживается устойчивый и стабильный дуговой разряд (Рис.1.8). Этот спо-

соб позволяет предотвратить трещинообразование, но усадочная раковина остается.

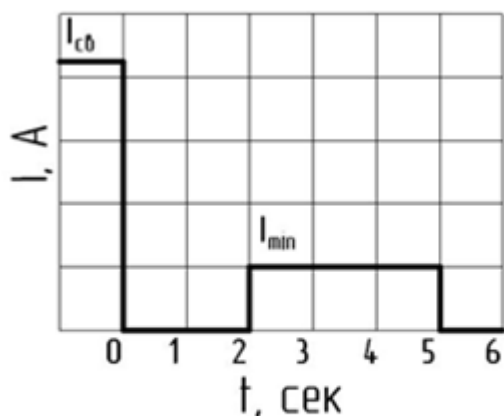


Рисунок 1.8 - Цикловой характер изменения тока при заварке кратера

Линейный спад и подъем сварочного тока [33]

В конце сварки уменьшать сварочный ток до минимального значения, при этом прекратить подачу присадочного материала, выдержать паузу в 1 – 3 секунды, после чего снова наращивать ток до номинального значения, затем вновь подавать присадочный материал. В завершении процесса дуга обрывается (Рис. 1.9). Этот способ также позволяет добиться некоторого положительного эффекта, но не решает проблему полностью. То есть можно сказать, что образовавшийся, после линейного спада, усадочный кратер с нарастанием тока переплавляется и заполняется присадочной проволокой. Но после обрыва дуги – жидкий металл вновь бесконтрольно кристаллизуется, таким образом, вновь образуется сварочный кратер, но меньших размеров.

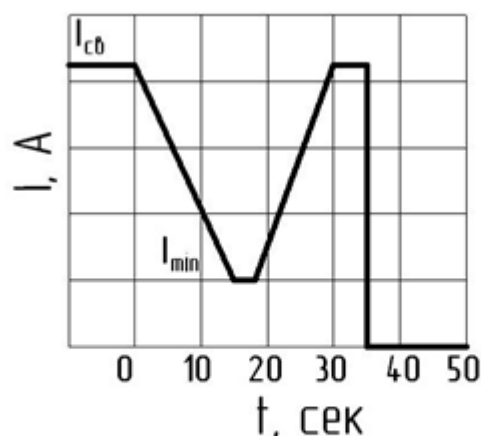


Рисунок 1.9 – Линейный спад и подъем сварочного тока в момент окончания сварки

Одновременное увеличение скорости сварки и длины дуги

Авторы [34] рекомендуют в момент окончания сварки увеличивать скорость сварки и длину дуги, таким образом, уменьшается глубина проплава и размеры сварочной ванны, т.е. уменьшается объем жидкого металла, за счет этого в момент обрыва дуги уменьшаются размеры усадочного кратера. Этот способ невозможно применять при заварке точечных дефектов.

#### 1.4 Задачи исследований

1. Исследование механизма возникновения усадочного кратера при сварке изделий из Al сплавов трехфазной дугой.
2. Исследование влияние формы кривой спада тока сварки на форму и размеры сварочного кратера
2. Разработка технологических рекомендаций для сварки изделий из алюминиевых сплавов с программируемым изменением мощности трехфазной дуги.

## **2 . Исследование процесса формирования сварочного кратера в момент окончания сварки изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой.**

### **2.1 Исследование причин и механизма возникновения усадочного кратера в месте окончания заварки.**

Усадочный кратер - дефект в виде полости или впадины, образованный при усадке металла шва в условиях отсутствия питания жидким металлом. Усадкой называется уменьшение объема и линейных размеров металла в процессе кристаллизации, а также охлаждения с температуры плавления до температуры окружающей среды. Усадка является одним из важнейших литейных свойств сплавов.

Общее уменьшение объема сплава в процессе усадки дают три составляющие - наружная усадка, усадочная раковина и пористость. Наружная усадка - изменение наружных размеров и объема. Усадочная раковина – полость в металле, образующаяся вследствие некомпенсированной объемной усадки при затвердевании [20].

Незаваренные кратеры образуются в случае резкого обрыва дуги в конце сварки. Они уменьшают сечение шва и могут явиться очагами образования трещин.

При воздействии термического цикла сварки возникает температурное поле [21], характеризующееся в поперечном сечении линией максимальных температур, причем. Температура убывает по мере удаления от центральной полосы к периферийным по экспоненциальному закону.

Все сварное соединение получает при нагреве некоторое удлинение, причем, из-за разности температур в высокотемпературной области возникают напряжения сжатия, а в остальной – напряжения растяжения. Величина напряжений сжатия в средней высоконагретой области настолько велика, что образуются пластические деформации сжатия и формируется зона пластических деформаций.

В результате этих деформаций в месте окончания сварки, при охлаждении образуется усадочная раковина или кратер.

В случае заварки точечного дефекта механизм образования усадочной раковины можно охарактеризовать следующим образом (Рис. 1.2) [22]

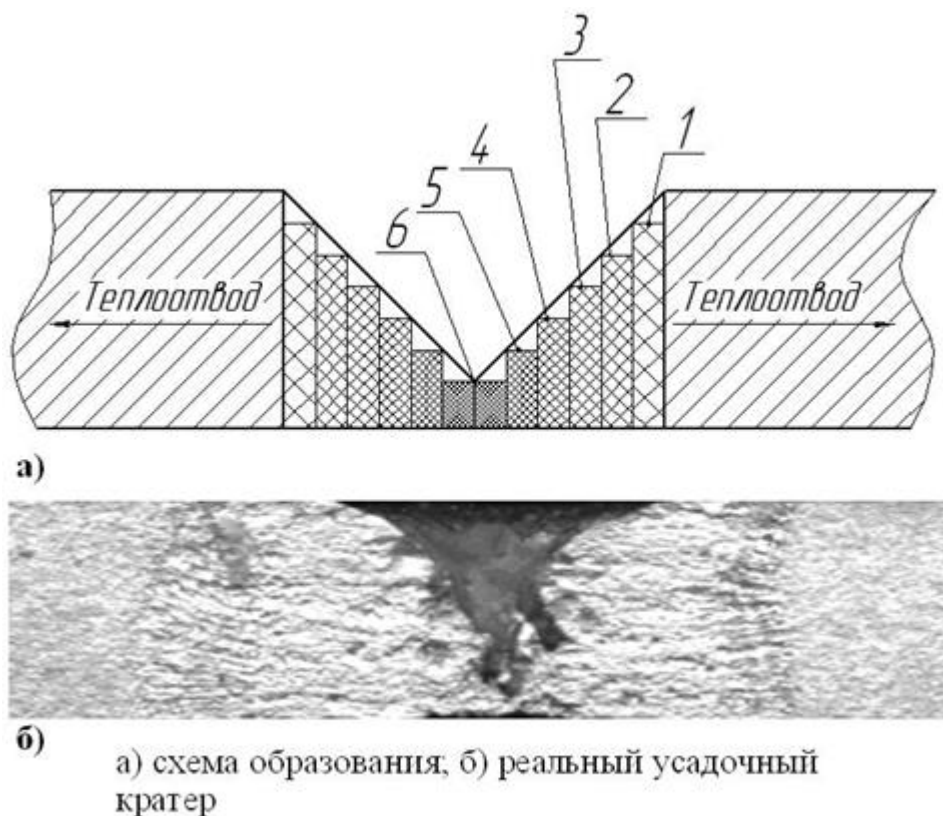


Рисунок 1.2 - Механизм образования усадочной раковины:

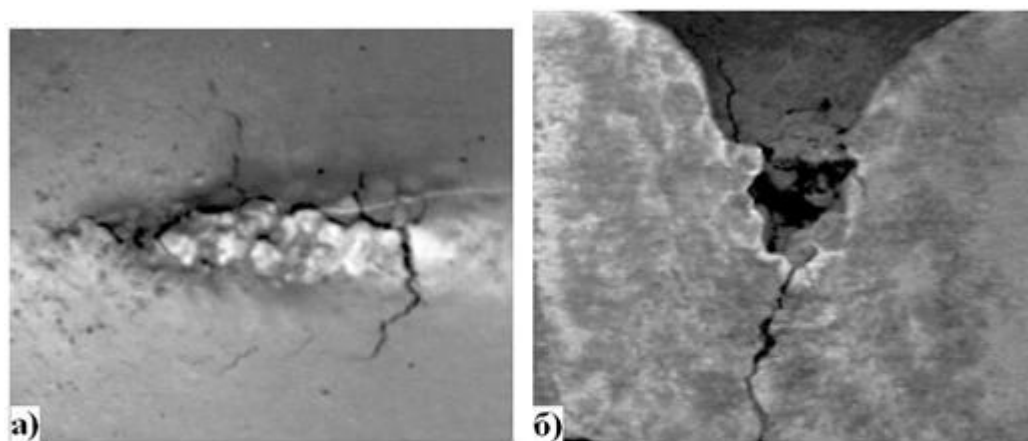
Усадочная раковина образуется вследствие того, что при выключении сварочной дуги и прекращении теплоподвода в зону сварки, тепло отводится от сварочной ванны в бока, вследствие этого оттуда же (с боков) начинается кристаллизация жидкого металла, в связи с тем, что объем возникающей твердой фазы меньше затрачиваемого объема жидкости, образуется усадочная раковина. Уровень жидкости постепенно понижается с уровня 1 до уровня 6 (рис. 1.2 а). Чем больше объем жидкости в момент окончания сварки – тем глубже происходит усадка металла. При изменении скоростей отвода теплоты в разных направления, поверхность усадочной раковины может искажаться и приобретать сложную геометрическую форму.

Кристаллиты в сварочной ванне начинают расти на оплавленной поверхности зерен основного металла. Они растут по направлению максимального

теплоотовода от жидкого металла перпендикулярно касательной к фронту затвердевания.

Зона максимального теплоотовода при кристаллизации жидкого металла провоцирует максимальное переохлаждение на этом участке. и, поэтому в этой зоне будет наблюдаться максимальная скорость роста кристаллитов. Скорость кристаллизации по мере перемещения его вершины по фронту затвердевания возрастает от минимального до максимального значения. При этом, изменение скорости роста кристаллитов (фронта кристаллизации) происходит неравномерно. Это связано с дискретным выделением скрытой теплоты кристаллизации, которая раньше была затрачена на расплавление металла и разрыв молекулярных связей. Скрытая теплота в момент ее выделения уменьшает переохлаждение металла перед фронтом кристаллизации и приводит к тому, что рост кристаллита практически прекращается. Затем, в процессе дальнейшего охлаждения сварочной ванны за счет теплопроводности и конвективных потоков, переохлаждение снова увеличивается, и кристаллит начинает расти, причем с ускорением..

Усадочный кратер (рис. 1.3) можно охарактеризовать его геометрическими размерами (длиной, шириной, глубиной) и наличием в нем дефектов, чаще всего это трещины, поры, включения окисной пленки.



а - вид сверху; б - вид в разрезе

Рисунок 1.3 - Внешний вид сварочного кратера при сварке без применения присадочной проволоки

## **2.2. Разработка математической модели теплового воздействия трехфазной дуги на поверхность металла при формировании сварочного кратера.**

Для разработки адекватной математической модели необходимо выбрать подходящую модель нагреваемого тела и источника тепла.

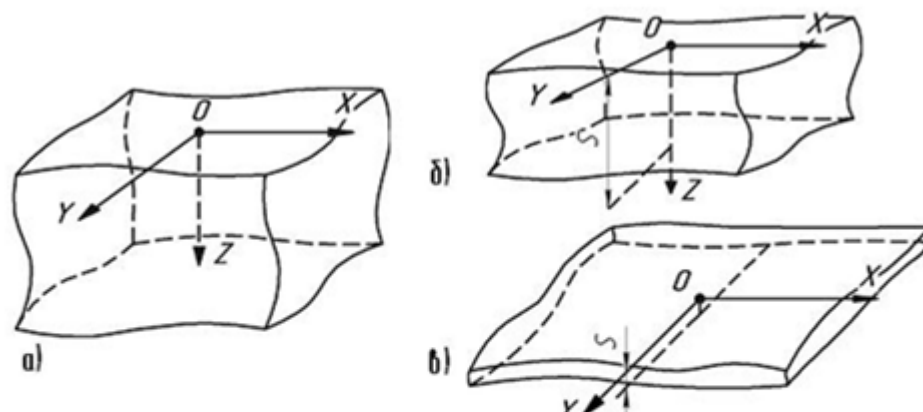
Все многообразие форм изделий приводится к одной из трех схем [35,36]:

- полубесконечное тело или массивное изделие, занимающее область  $z \geq 0$  с плоской нагреваемой поверхностью  $z = 0$  (рис. 2.1а). Этой схеме соответствует массивное изделие, размеры которого значительно развиты в трех пространственных направлениях  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$ . Поток тепла в таком теле пространственный. Массивное тело, у которого размер по оси  $Oz$  ограничен конечной величиной, называется плоским слоем (рис. 2.1б); распределение температуры по оси  $Oz$  в таком теле остается неравномерным;

- пластина – плоский слой малой толщины  $\delta$ , неограниченно простирающийся в направлениях  $Ox$  и  $Oy$  (Рис. 2.1в), предполагается, что температура по толщине пластины полностью выровнена, т.е. что поток тепла в таком изделии плоский;

Указанные допущения относительно формы и размеров тела позволяют отказаться от учета граничных условий.

Наибольший практический интерес, с точки зрения сварочных и наплавочных работ, представляет определение температурного поля в полубесконечном теле или плоском слое, т.к. при наплавке слоя на поверхность изделия температура по его толщине будет величиной переменной, а размеры наплавляемых и свариваемых изделий, как правило, таковы, что необходимо учитывать отражение теплового потока от его нижней границы.



а - полубесконечное тело; б - плоский слой; в - бесконечная пластина

Рисунок 2.1 - Схемы тел, нагреваемых источником тепла

Для расчета тепловых полей при сварке, тепловое действие электрической дуги моделируется, как правило, источником тепла, интенсивность которого распределена по нормально-круговому закону. Результаты расчетов по этой модели нашли применение в практике, но большая погрешность в зоне высоких температур заставила искать новые варианты решения этой задачи.

Схематизация теплового действия дуги посредством одного нормально-кругового источника не соответствует механизму передачи энергии двумя потоками различной сосредоточенности, за исключением случая, когда интенсивность более мощного потока тепла распределена по нормально-круговому закону, а центры областей, через которые потоки вводятся в свариваемый металл, совпадают или близки друг к другу. Если же разнести в пространстве центры тепловых потоков, то создаваемое ими температурное поле уже нельзя будет получить на основе источника с центральной симметрией. При увеличении скорости сварки активное пятно дуги на детали отстает от высокотемпературной светящейся газовой области [37]. В тоже время при высокой скорости сварки граница хвостовой части сварочной ванны имеет вогнутую форму, которую невозможно объяснить действием нормально-кругового источника, поэтому рассчитанные для данного случая по такой модели температурные поля будут в значительной степени отличаться от реальных.



В работе [38] приведена модель воздействия сварочной дуги, (Рис.2.1) предложенная авторами Потехиным В.П., Ельцовым В.В., Столбовым В.И. Расчет температурного поля для такой модели ведется по следующей формуле:

$$T(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{\pi^3} \lambda} * \left\{ \begin{aligned} & \mu * \sqrt{K_{T1}} * e^{-\frac{v \left[ x - \frac{v}{4aK_{T1}} \right]}{2a}} * I(m_1, n_1, p_1) + \\ & + (1 - \mu) * \sqrt{K_{T2}} * \frac{1}{2} * e^{-\frac{v \left[ x + L - \frac{v}{4aK_{T2}} \right]}{2a}} * \left[ I(m_2, n_2, p_2) + I(m_3, n_3, p_3) \right] \end{aligned} \right.$$

(1.1)

Где: Q - мощность дуги

$\lambda$ , a – теплофизические коэффициенты

$\mu$  - доля мощности, вводимая в изделие нагретым газом,

$K_{T1}$ ,  $K_{T2}$ - коэффициенты сосредоточенности тепловых потоков от газа и тока соответственно,

V – скорость сварки,

L – расстояние между осями источников тепла QГ и QT

Если учесть, что в момент окончания сварки и заварки кратера, сварочная горелка останавливается, то есть, скорость сварки становится равная нулю, и источники тепла действуют на одной оси (рис 2.2), то формула 1.1 приобретает следующий вид

$$T(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{\pi^3} \lambda} \mu \sqrt{K_{T1}} I(m_1, n_1, p_1) + (1 - \mu) \sqrt{K_{T2}} \frac{1}{2} \left[ I(m_2, n_2, p_2) + I(m_3, n_3, p_3) \right]$$

(1.2)

Используя это выражение можно рассчитать и построить линии изотерм плавления во время кристаллизации металла в конце сварки при различных условиях кристаллизации. Также можно получить расчетную конфигурацию усадочной раковины.

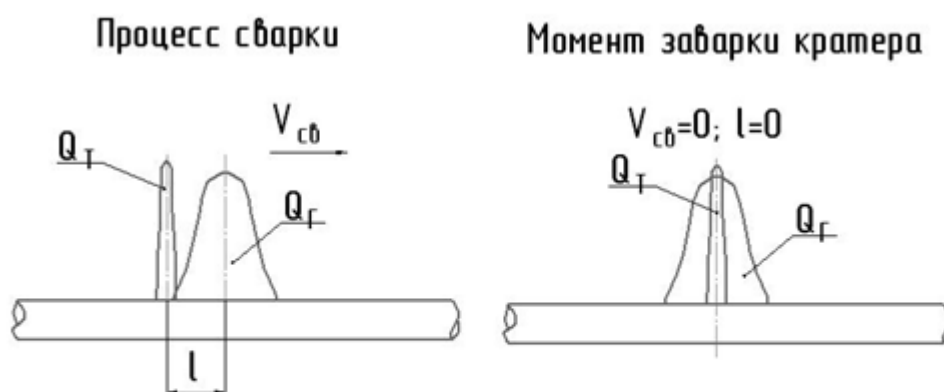


Рисунок 2.2 - Математическая модель воздействия дуги на поверхность сварочной ванны

### 2.3 Расчетная модель конфигурации сварочного кратера.

Расчет геометрической формы усадочного кратера авторы работы [39] проводили, основываясь на разности плотности твердого и жидкого металла, и на разности их объемов, то есть при кристаллизации металла сварочной ванны меняется ее плотность и объем, в то время как масса металла остается неизменной (Рис. 2.3).

При формировании сварочного кратера, согласно имеющимся сведениям, его глубина  $h_k$  и радиус  $r_k$  являются функциями времени:

$$h_k(t) = f h_k(t)$$

$$r_k(t) = f r_k(t)$$

Эта система определяет параметрически форму кратера  $r_k = f(h_k)$ .

Определение величины объема расплава  $v_l(t, h)$ , ограниченного симметричной относительно оси OZ изотермой плавления  $r = f(z, t)$  и плоскостью  $z = h$  в момент времени  $t$ , описывается в работе [39] следующим уравнением

$$V_l(t, h, z_{\max}) = \pi \int_h^{z_{\max}} f(z, t)^2 dz$$

Авторы этой работы рассчитали конфигурацию сварочного кратера по предложенной выше математической модели в зависимости от изменения мощности сварочной дуги и размеры образующейся в итоге усадочной раковины (Рис 2.3)

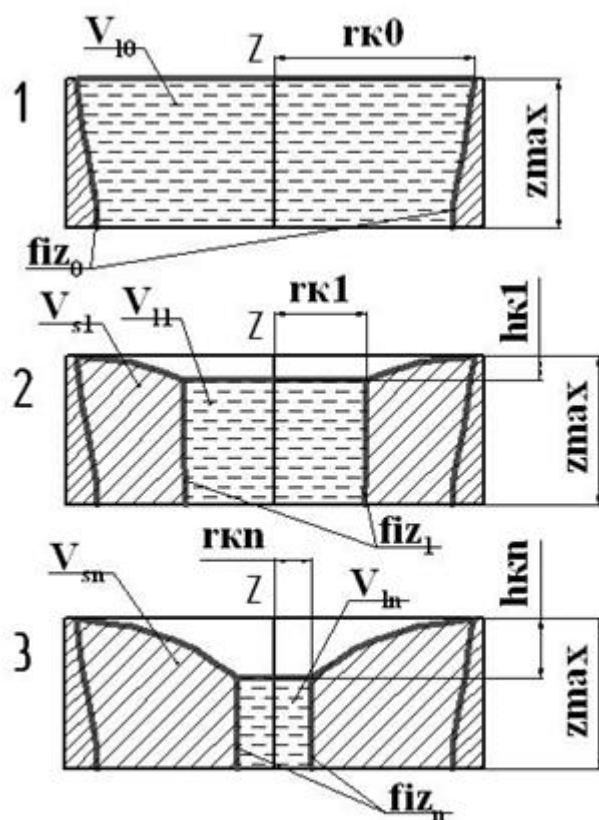


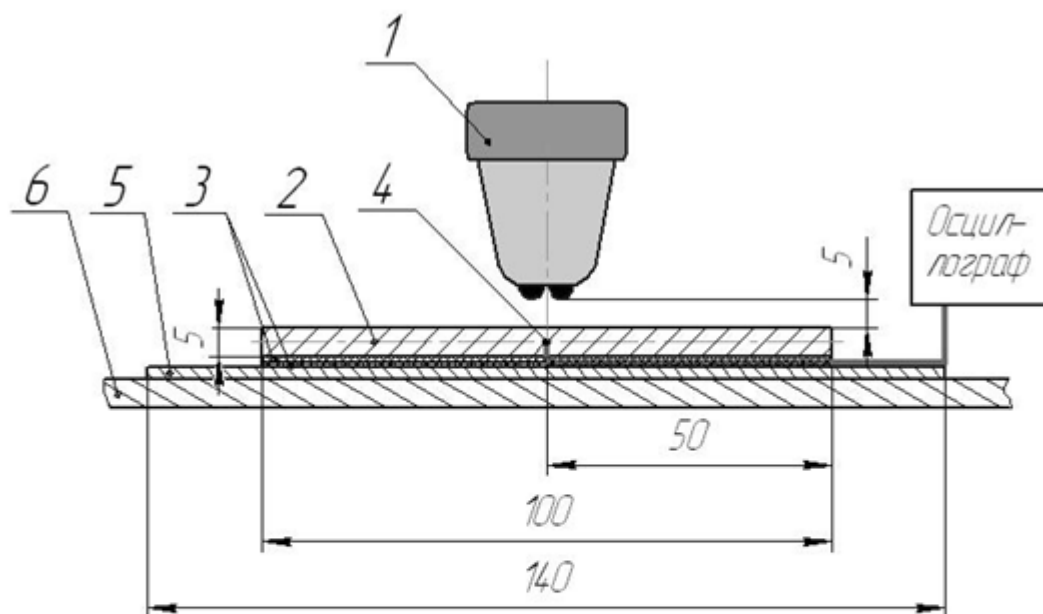
Рисунок 2.3 - Кинетика формирования  
усадочного кратера

Такая модель весьма наглядно демонстрирует механизм формирования усадочного кратера в зависимости от объема расплавленного металла и мощности сварочной дуги, вводимой в изделие в месте окончания сварки. Основываясь на такой модели, в дальнейшем были проведены эксперименты на реальных изделиях с целью подтверждения механизма формирования кратера. Анализ конфигурации и размеров полученных кратеров на натуральных образцах проводили с помощью фото-кино съемки и металлографических исследований.

### **3. Экспериментальное определение влияния тепловых и силовых характеристик трехфазной сварочной дуги на формирование усадочного кратера.**

#### **3. 1. Разработка методики проведения экспериментов по исследованию формирования усадочного кратера**

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем: Исследуемый образец (пластина из сплава АМгб размерами 300\*100\*5 мм) с зачеканенной термопарой закрепляли на сварочном столе. Двухэлектродную сварочную горелку устанавливали неподвижно соосно с «горячим спаем» термопары (хромель-алюмель) (Рис.3.1). Зажигали дугу и расплавляли металл с образованием сварочной ванны определенного диаметра и полным проваром металла. Сила тока основной дуги составляла 140...150А. Затем, с помощью программируемого блока управления током источника питания обеспечивали спад тока во времени по заданной закономерности. Изменение тока основной дуги трехфазного факела осуществлялось за счет изменения угла открытия тиристорov, включенных встречно-параллельно в цепь средней фазы трехфазного источника питания. Сигналы на управляющие электроды тиристорov подавались от компьютера через автоматический цифровой преобразователь [40]. При проведении экспериментов фиксировалась форма кривой изменения тока сварки во времени, измерялась температура металла сварочной ванны в процессе ее кристаллизации с помощью цифрового пишущего осциллографа марки PSC 100/8031 компании Velleman instruments, и одновременно осуществлялась киносъемка формирования усадочного кратера с помощью цифровой видеокамеры Sony Handycam. Результаты экспериментов по определению термических циклов и формы поверхности сварочного кратера представляли в виде графиков зависимостей температуры центральной точки сварочного кратера от времени, диаметра расплава от времени или глубины усадочной раковины от времени при различных характеристиках кривой спада тока сварки.



- 1 - двухэлектродная горелка; 2 - образец из сплава АМг-6;  
 3 - электроизоляционная прокладка; 4 - термопара;  
 5 - латунная подложка; 6 - сварочный стол

Рисунок 3.1 - Схема проведения экспериментов по исследованию сварочного кратера

### 3.1.1 Проведение фотометрических экспериментов по определению размеров кратера

Первым объектом для исследований стал обрыв сварочной дуги, с последующим подогревом межэлектродной дугой и без него. Эксперимент записывался цифровой видеокамерой, которая устанавливалась на штативе под углом  $15^\circ$  к сварочному столу. С помощью раскадровки видео-файла был построен график усадки (зависимость глубины сварочного кратера от времени).

Эксперимент показал следующее, после выключения сварочной дуги, температура сварочной ванны резко понижалась в течение первых десяти секунд, причем, если продолжала действовать межэлектродная дуга, то скорость спада температуры ванны в этот промежуток времени была в два раза меньше. Дальнейшее воздействие межэлектродной дуги существенного изменения скорости охлаждения металла ванны не вызывала. Такое наблюдение позволило окончательно убедиться в том, что именно в момент кристаллизации сварочной ванны необходимо строго контролировать скорость охлаждения металла путем

управления тепловыми потоками, соблюдая определенный баланс между поступающей в металл от дуги тепловой энергии и теплоотводом. Образовавшийся при обрыве дуги сварочный кратер (Рис.3.2) имел форму перевернутого острого конуса и распространялся почти на всю толщину свариваемого металла. Понятно, что такого рода дефект в сварных соединениях недопустим.

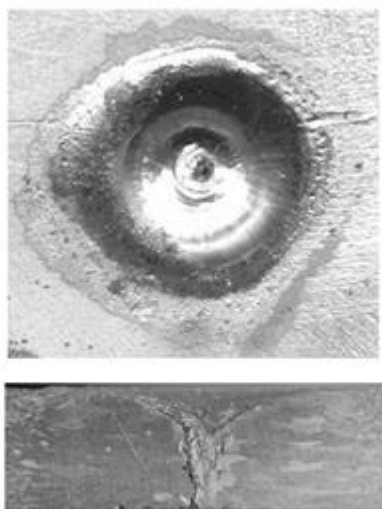


Рисунок 3.2 - Форма поверхности усадочного кратера, образующегося при обрыве дуги

Дальнейшее направление исследований заключалось в определении влияния линейного спада тока сварки в момент ее окончания на характер изменения температуры, формы поверхности и размеров сварочного кратера.

Расчеты по математической модели показали, что линейный спад мощности от номинального до нуля позволяют получить глубину усадки не более 20 %, при этом время спада мощности на глубину усадки не влияет.

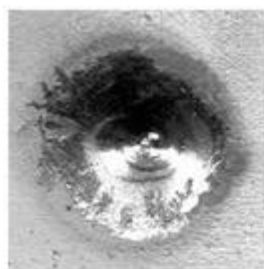
Следующая серия экспериментов была направлена на то, чтобы проверить это, но с одним отличием, спад мощности до нуля в реальном процессе довольно затруднительно осуществить, поскольку стабильность горения дуги переменного тока на токах менее 30 Ампер довольно низкая, поэтому в реальном эксперименте спад тока осуществлялся до 40 Ампер, после чего дуга выключалась.

Как показали результаты исследований, кривые термических циклов при линейном спаде тока сварки от номинального до нуля при различном времени

спада (10, 30, 60 секунд.) имеют схожий характер. (Рис. 3.3. а,б,в.) Степень усадки металла сварочной ванны (глубина кратера) и форма сварочного кратера с увеличением времени спада тока претерпевают существенные изменения. Так, например, при увеличении времени спада тока от нуля до 10 секунд глубина кратера изменяется от 90% до 60% от толщины металла. При увеличении времени спада тока до 30 секунд степень усадки составляет уже 36% от толщины металла (рис. 3.3. а). Однако, дальнейшее увеличение времени спада тока до 60 секунд и более существенного изменения по глубине сварочного кратера не вызывает. Как видно, (Рис. 3.3.) увеличение времени спада тока в два раза (от 30 до 60 секунд) уменьшает глубину кратера лишь на 6%. Более того, длительное воздействие сварочной дуги на поверхность металла в месте окончания сварки увеличивает вероятность появления макро и микротрещин в сварочном кратере вследствие перегрева металла (Рис. 3.3. в).

Такое существенное отличие от расчетной модели можно опять же объяснить изменением свойств металла с изменением температуры нагрева, а также тем, что плавный спад тока происходил до 30 Ампер, а не до нуля, как было заложено в расчетной модели. Дело в том, что при значениях сварочного тока в дуге переменного тока ниже 30...40 Ампер она теряет стабильность горения и может самопроизвольно обрываться. Для стабилизации горения дуги на околонулевых значениях сварочного тока требуется создавать дополнительные условия для стабильности повторных возбуждений фазных дуг. Это можно добиться за счет применения инверторных источников питания, обеспечивающих прямоугольную форму импульсов прямой и обратной полуволны переменного тока. Поэтому в дальнейшей работе будут сформулированы принципы построения инверторного источника питания трехфазной дуги и разработано техническое задание на проектирование такого оборудования, обеспечивающего заданные характеристики сварочной дуги.

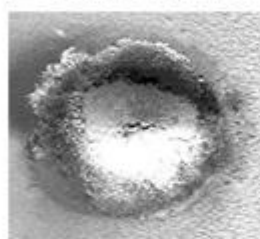
а)



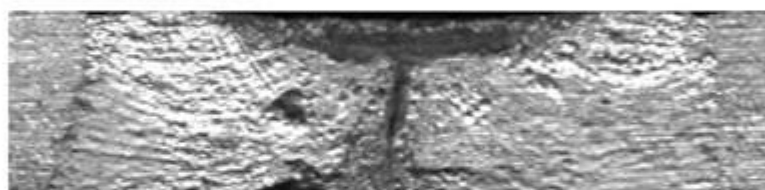
Усадка 60 %



б)



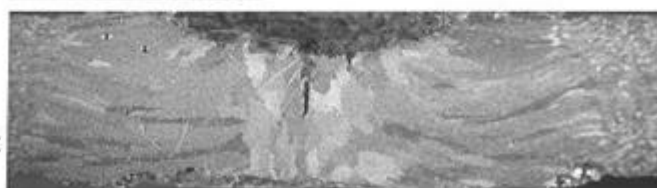
Усадка 36 %



в)



Усадка 30 %



а - время спада 10 секунд; б - 30 секунд; в - 60 секунд  
Рисунок 3.3 - Форма поверхности усадочного кратера при реализации линейного спада тока сварки в момент ее окончания



### 3.2 Исследование механизма формирования усадочного кратера при линейном спаде тока дуги

Для оценки особенностей формирования усадочного кратера при линейном спаде тока со временем спада 10 секунд проводили видеосъемку процесса кристаллизации сварочной ванны и покадровую обработку изменения размеров усадочной раковины с момента начала спада тока до полного выключения дуги (Рис.3.4).

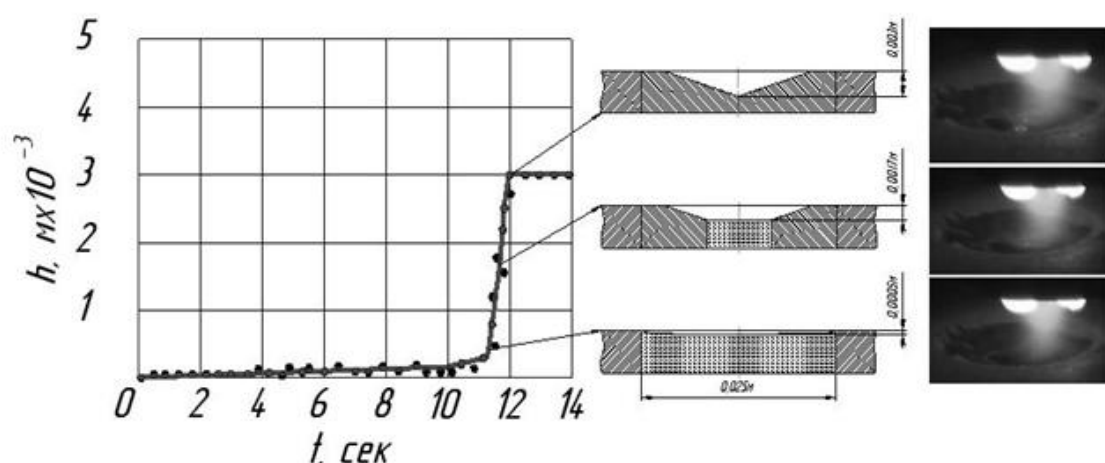


Рисунок 3.4 - Формирование усадочного кратера при линейном спаде тока дуги в момент окончания сварки от номинального до нуля в течение 10 секунд

В результате было обнаружено, что момент начала кристаллизации сварочной ванны отстает по времени от начала спада тока сварки на 10 секунд. При обрыве дуги это время составляло 2 секунды. Процесс кристаллизации металла занял 2 секунды (при обрыве дуги – 1 секунда), а глубина усадочного кратера составила 3 мм (при обрыве дуги – 4 мм). Очевидно, что уменьшение мощности дуги по линейному закону в момент окончания сварки, в отличие от мгновенного выключения дуги, позволяет изменить направление тепловых потоков в пределах диаметра пятна нагрева дуги, а соответственно и направление роста кристаллитов центральной части сварочной ванны. Поэтому глубина сварочного кратера становится меньше, а поверхность формируется в виде полусферы. Положительным фактором применения линейного спада тока в отличие от обрыва дуги является формирование поверхности сварочного кратера со

сферической поверхностью, а не в виде перевернутого острого конуса. В то же время, глубина усадочного кратера остается довольно большой и составляет более 30 % от толщины металла.

Для тридцатисекундного спада тока также проводили видеосъемку процесса, и последующую покадровую обработку видеофайла (Рис. 3.5), с тем, чтобы оценить влияние увеличения времени спада тока на процесс формирования усадочного кратера. Критерием оценки стал диаметр сварочной ванны, так как оценивать ее глубину стало довольно затруднительно.

В результате было установлено, что в течении 20 секунд с момента начала спада тока диаметр сварочной ванны не уменьшался, а на против увеличивался, с 15 мм до 16 мм, затем в течении 8 секунд резко уменьшался практически по линейному закону. Сварочная ванна закристаллизовалась за 2 секунды до выключения основной дуги. Усадка при этом составила менее 2 мм. Можно предположить, что в течение первых 20 секунд происходило перенаправление роста кристаллитов со встречного на сферическое, вследствие непрерывного подвода тепла в сварочную ванну до полной ее кристаллизации, отсюда уменьшение размеров усадочного кратера и изменение его конфигурации.

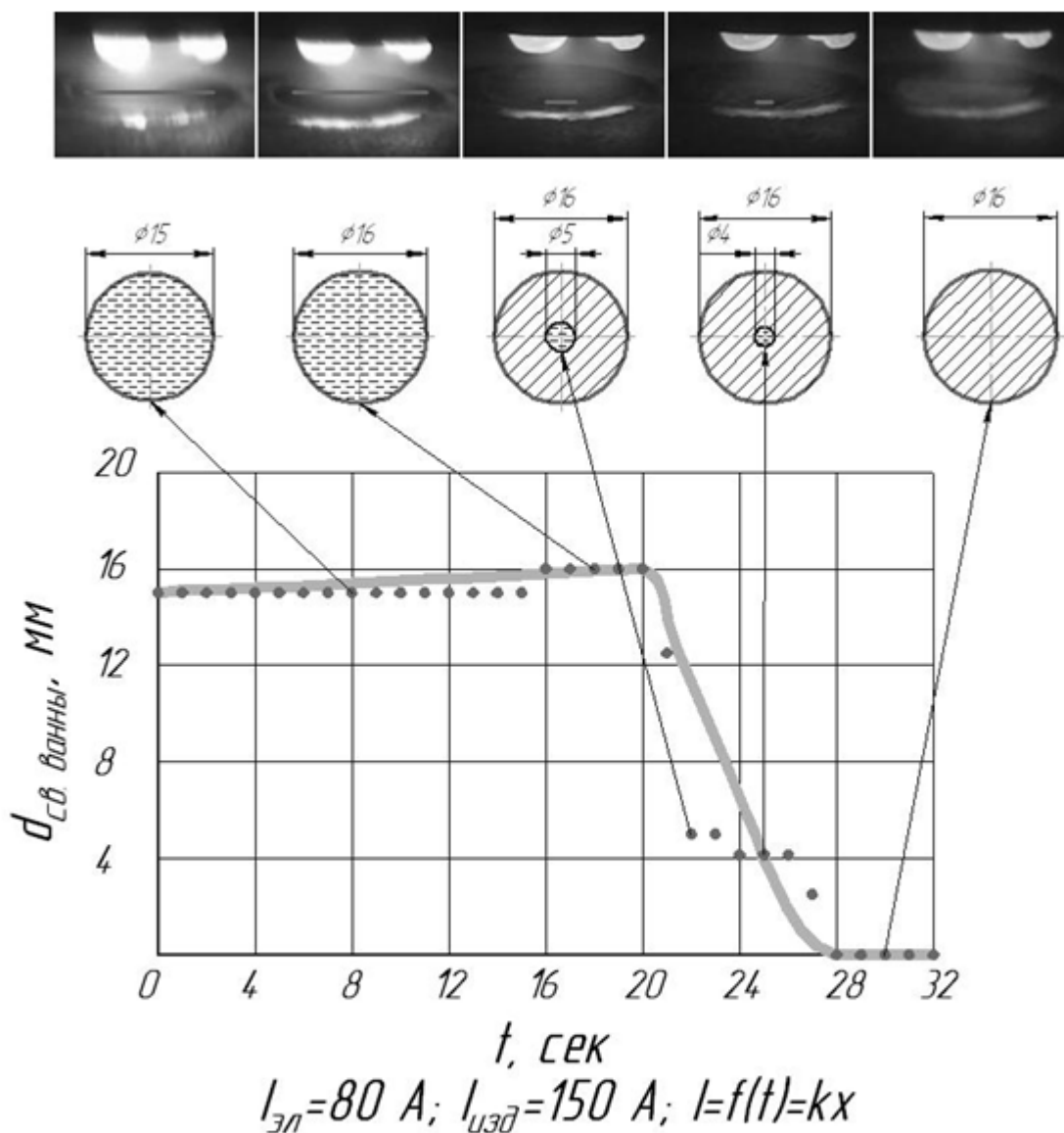


Рисунок 3.5 - Формирование усадочного кратера при линейном спаде тока дуги в момент окончания сварки от номинального до нуля в течение 30 секунд

На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что на формирование сварочного кратера существенное влияние оказывает характер изменения сварочного тока (мощности дуги) в момент окончания сварки, а также, то, что линейный характер изменения мощности дуги не позволяет в полной мере обеспечить минимизацию его размеров. Поскольку известно, что объемная усадка большинства алюминиевых сплавов составляет в среднем около 3...6% [41], то очевидно требуется отыскать такую форму кривой спада тока, которая бы обеспечивала получение глубины усадочной рако-

вины порядка указанной величины при сохранении сферической или даже плоской формы поверхности.

### 3.3 Исследование механизма формирования усадочного кратера при различных характеристиках кривой спада тока дуги

С целью выявления оптимальной, с точки зрения минимизации размеров усадочной раковины, кривой спада тока сварки, проводили эксперименты, задавая различные формы и характеристики кривых. При этом фиксировались термические циклы, велась видео съемка процесса и металлографический анализ сечения полученных сварочных кратеров. Было обнаружено, что пилообразная кривая (Рис 3.6) хотя и позволяет получить сварочный кратер без трещин, но размеры его достаточно велики, и составляют до 55% от толщины металла. Отсутствие трещин на поверхности можно объяснить повторным расплавлением поверхности кратера (где могли бы образоваться трещины) при воздействии второго по счету пика кривой тока сварки и замедленным охлаждением металла сварочной ванны от воздействия третьего по счету пика выделяемой дугой мощности. Большое значение размеров кратера можно объяснить тем, что спад тока после третьего пика мощности осуществлялся от 100 Ампер до нуля практически по линейному закону, который, как уже известно, не позволяет получать малые размеры усадочной раковины.

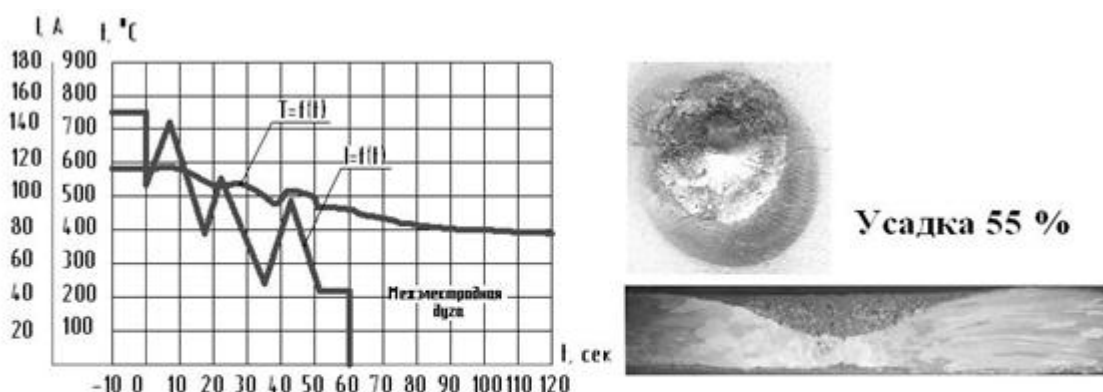


Рисунок 3.6 - Термический цикл, форма и размеры усадочного кратера при реализации пилообразной формы кривой спада тока сварки

Реализация другого типа (ступенчатой) кривой изменения мощности дуги в момент окончания сварки от номинального значения до нуля позволила снизить размеры кратера до 20% от толщины металла (Рис. 3.7)

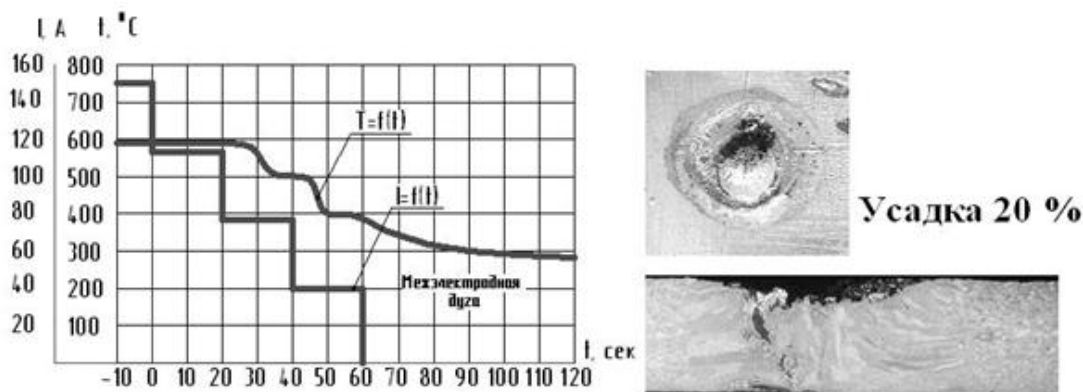


Рисунок 3.7 - Термический цикл, форма и размеры усадочного кратера при реализации ступенчатой формы кривой спада тока сварки

Наличие поверхностных трещин в кратере связано, очевидно, с тем, что при кристаллизации металла сварочной ванны в интервале температур от 600 до 400 °С, судя по кривой термического цикла, наблюдалась высокая скорость охлаждения металла. Малая величина усадки (20% от толщины металла) связана с изменением направления роста кристаллитов в центральной части сварочной ванны от встречного до направления снизу вверх, что явно прослеживается при металлографическом анализе образцов усадочного кратера. Очевидно, что ступенчатое уменьшение мощности дуги создает условия для дискретной кристаллизации металла сварочной ванны, начиная от корневой части и заканчивая поверхностным слоем.

Далее производили эксперимент с обратноступенчатым спадом тока дуги, который позволил получить глубину усадки 25 % (Рис. 3.8).

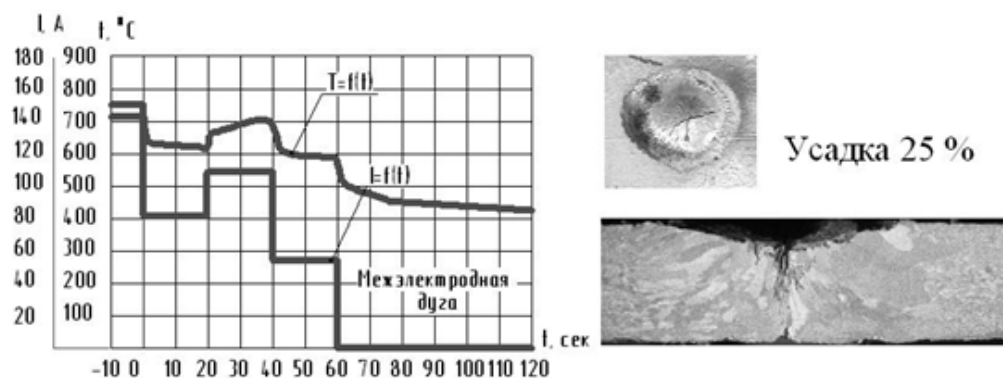


Рисунок 3.8 - Термический цикл, форм и размеры усадочного кратера при реализации обратно ступенчатой формы кривой спада тока сварки

Судя по характеру термического цикла, температура в зоне сварки в центральной ее точке не опускалась ниже температуры плавления металла, а после выключения дуги резко пошла на спад, это объясняет наличие на поверхности довольно глубоких трещин. Однако резкие спады и подъемы сварочного тока позволяют перенаправить фронт роста кристаллитов со встречного на вертикальное в центральной части сварочной ванны, это обуславливает небольшую глубину сварочного кратера.

Далее исследовалась кривая, которая позволяет предотвратить трещинообразования при заварке дефектов на сплавах из магния [42] (Рис. 3.9)

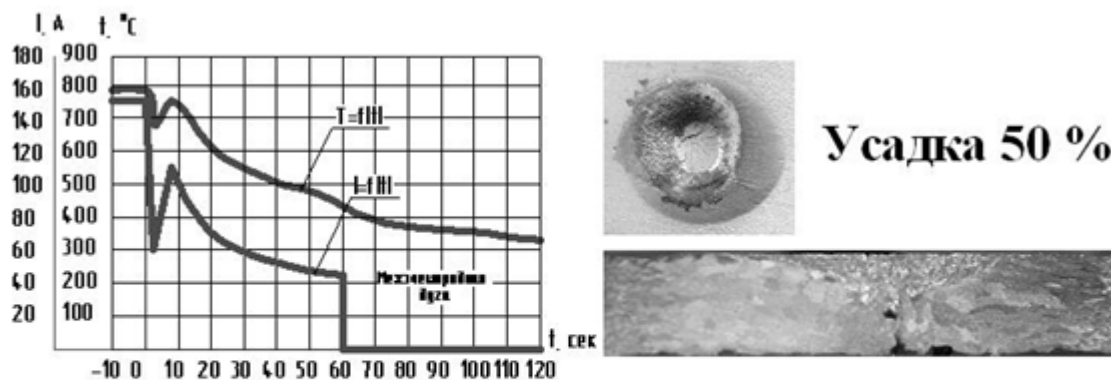


Рисунок 3.9 - Термический цикл, форма и размеры усадочного кратера при реализации комбинированной кривой спада тока сварки

Данная форма кривой спада тока позволила получить сварочный кратер с величиной усадки 50 %, на поверхности кратера и в разрезе наблюдается наличие трещин, которое можно объяснить высокой скоростью охлаждения металла



в интервале температур от 600 до 400 градусов Цельсия, которая составила 4.5 C°/сек.

Затем проводили эксперимент с параболической формой кривой спада тока (Рис. 3.10). Такое снижение мощности позволило получить усадку величиной 40 %. На поверхности также наблюдается скопление трещин.

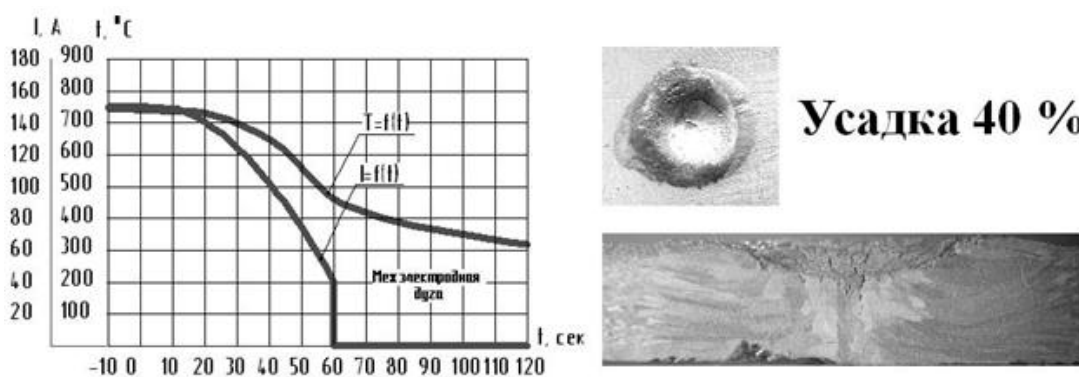


Рисунок 3.10 - Термический цикл, форма и размеры усадочного кратера при реализации параболической формы кривой спада тока сварки

Очевидно, что такая скорость снижения мощности на начальном этапе заварки кратера слишком мала, а на завершающей стадии напротив слишком высока.

Дальнейший путь исследования характера кривых спада тока намечался с учетом того, что в момент окончания сварки для обеспечения начала кристаллизации металла в первый момент времени необходимо резко уменьшить выделяемую мощность дуги, а затем для получения поверхности кратера со сферической или плоской формой скорость уменьшения мощности дуги снизить. Похожими характеристиками обладает кривая  $y=k(x+b)^{-1}+c$ . Полученные результаты при реализации такой формы кривой спада тока (Рис. 3.11) показали, что размеры и форма поверхности усадочного кратера весьма близки к оптимальным параметрам.

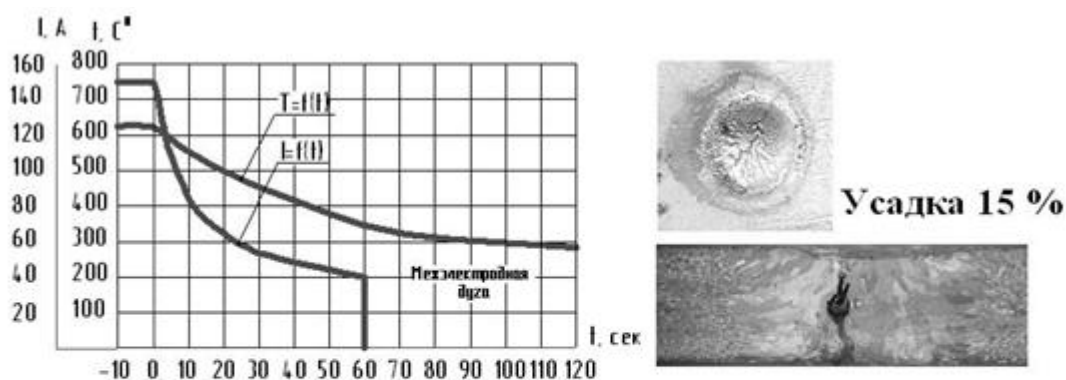


Рисунок 3.11 - Термический цикл, форма и размеры усадочного кратера при реализации кривой спада тока, описываемой функцией  $y=k(x+b)^{-1}+c$ .

В тоже время, анализируя характер кривой термического цикла, можно отметить, что темп снижения температуры в интервале кристаллизации 600 - 400 °С составляет в среднем около 5 °С/сек. Такая скорость охлаждения металла в области эффективного интервала кристаллизации для алюминиевых сплавов является достаточно высокой с точки зрения сохранения технологической прочности сварных соединений, и очевидно, вследствие этого на поверхности кратера образовались трещины.

Идя дальше по намеченному пути исследования характеристик кривых спада тока, провели эксперименты с комбинированной кривой, состоящей из линейного участка, обеспечивающего в момент окончания сварки мгновенный спад мощности до определенного значения, (в данном случае на 30%) а затем участок кривой типа  $y=k(x+b)^{-1}+c$ . (рис. 3.12). Величина линейного участка спада тока не зависит от теплофизических параметров изделия, а соответственно от абсолютного значения мощности дуги и составляет около 30% от общей выделяемой дугой тепловой мощности.



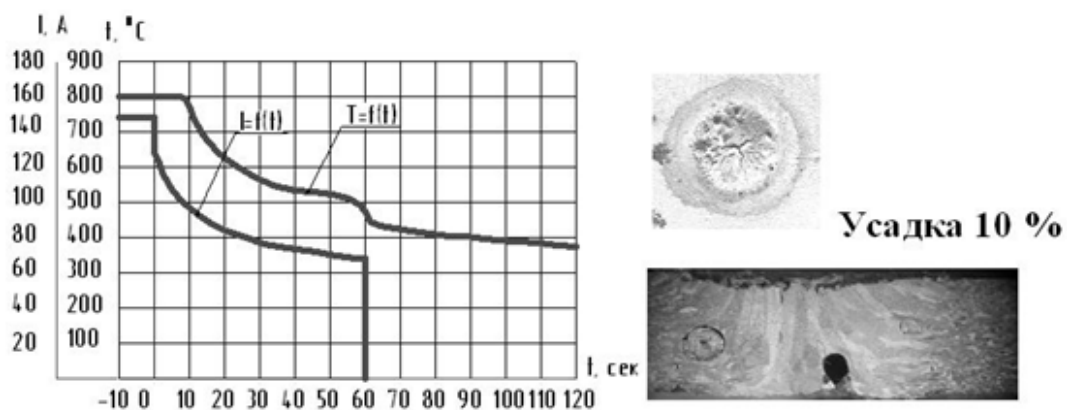


Рисунок 3.12 - Термический цикл, форма и размеры усадочного кратера при реализации кривой спада тока по интегральной кривой, включающей линейную часть и функцию  $y=k(x+b)^{-1}+c$

Полученные результаты говорят о том, что из всех исследованных кривых спада тока минимальные размеры усадочной раковины наблюдаются именно при реализации комбинированной кривой. Металлографический анализ образцов показал, что кристаллиты центральной части сварочной ванны растут в вертикальном направлении снизу вверх, что и обеспечивает фактически плоскую поверхность кратера. Микро и макроскопические трещины на поверхности сварочного кратера не распространяются вглубь металла, а поэтому технологическая прочность соединения не нарушается.

Для оценки кинетики формирования усадочной раковины при реализации кривой спада тока  $y=k(x+b)^{-1}+c$  и комбинированной кривой проводили покадровую обработку размеров сварочной ванны в процессе ее кристаллизации. В результате было установлено, что при реализации кривой  $y=k(x+b)^{-1}+c$  момент начала кристаллизации сварочной ванны отстает от момента начала спада тока почти на 16 секунд. Общее время затвердевания сварочной ванны составило около 10 секунд, причем диаметр жидкой фазы при кристаллизации уменьшался по линейному закону (Рис.3.13). Существенным отличием от линейного спада тока здесь является тот факт, что время кристаллизации сварочной ванны за счет воздействия сварочной дуги увеличивается практически в пять раз. Именно эффект теплового воздействия дуги на поверхность кристаллизующегося металла создает условия для управления тепловыми потоками в металле

сварного соединения. Общим недостатком для обоих случаев является большой промежуток времени между началом спада тока и началом кристаллизации сварочной ванны. Это говорит о том, что металл сварочной ванны перегрет, а плавный спад тока дуги не позволяет резко снизить температуру металла.

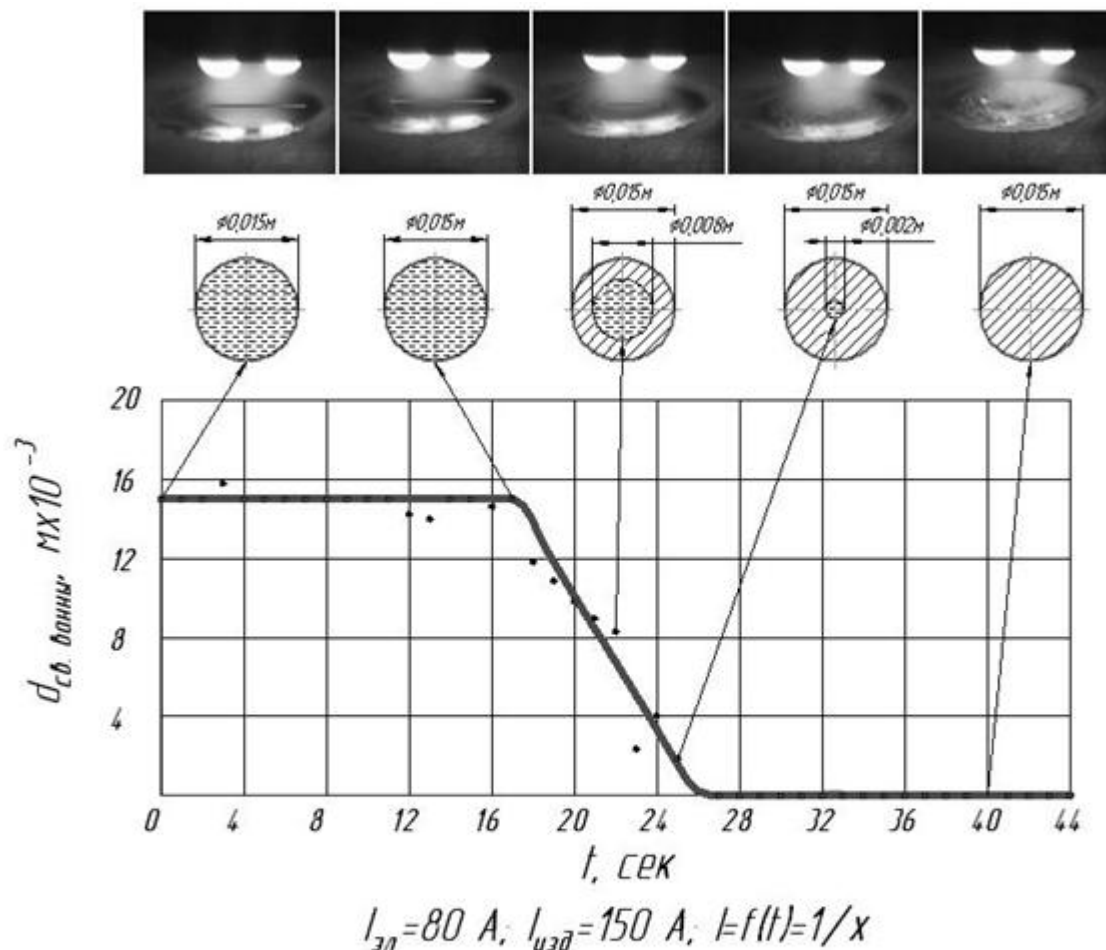


Рисунок 3.13 - Кинетика затвердевания сварочной ванны при реализации формы кривой спада тока сварки в виде  $y = k(x+b)^{-1} + c$

Этого недостатка лишена комбинированная кривая, реализация которой в момент окончания сварки позволяет практически сразу обеспечить начало кристаллизации расплавленного металла (как при обрыве дуги), но в тоже время замедлить время кристаллизации до 16 секунд (рис. 3.14). Как видно из рисунка, сразу после начала кристаллизации сварочная ванна резко уменьшается в размерах, а затем в течение примерно 10 секунд ее диаметр уменьшается незначительно. Очевидно, что в это время направление роста кристаллитов меняется

от радиального на осевое, что и обеспечивает получение плоской формы поверхности кратера.

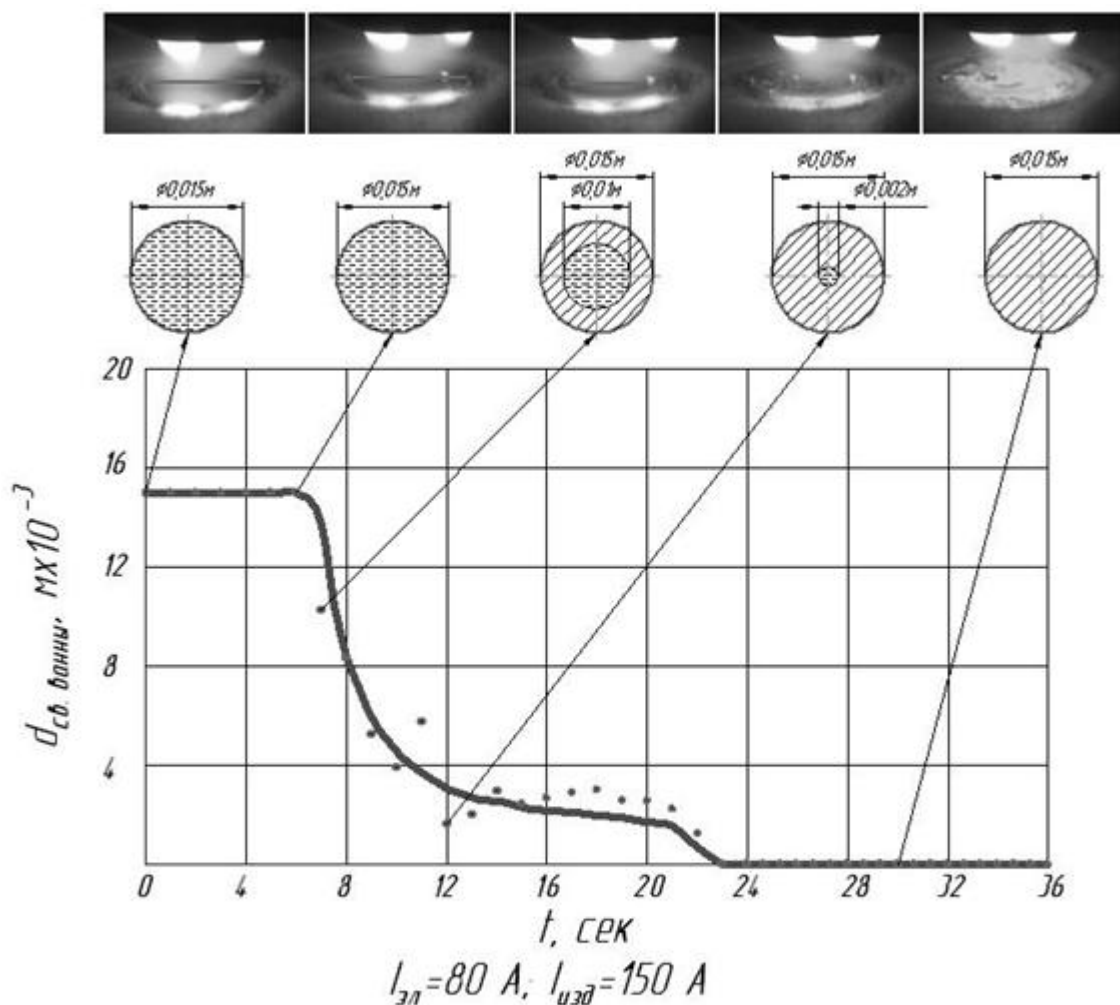


Рисунок 3.14 - Кинетика затвердевания сварочной ванны при реализации кривой спада тока сварки  $y=k(x+b)^{-1}+c$

С целью проверки работоспособности выявленной закономерности изменения тока сварки в момент ее окончания для различных объемов жидкого металла проводили эксперименты по определению форм и размеров усадочной раковины в случае увеличения объема сварочной ванны за счет подачи присадочной проволоки (Рис.3.15). Судя по полученным результатам, реализация комбинированной кривой спада тока с подачей присадочной проволоки при заварке кратера позволяет практически полностью исключить появление усадочной раковины. Формирование усадочного кратера в месте окончания сварки

практически не зависит от объема кристаллизирующейся сварочной ванны, по крайней мере, в рамках двукратного увеличения объема металла сварочной ванны.

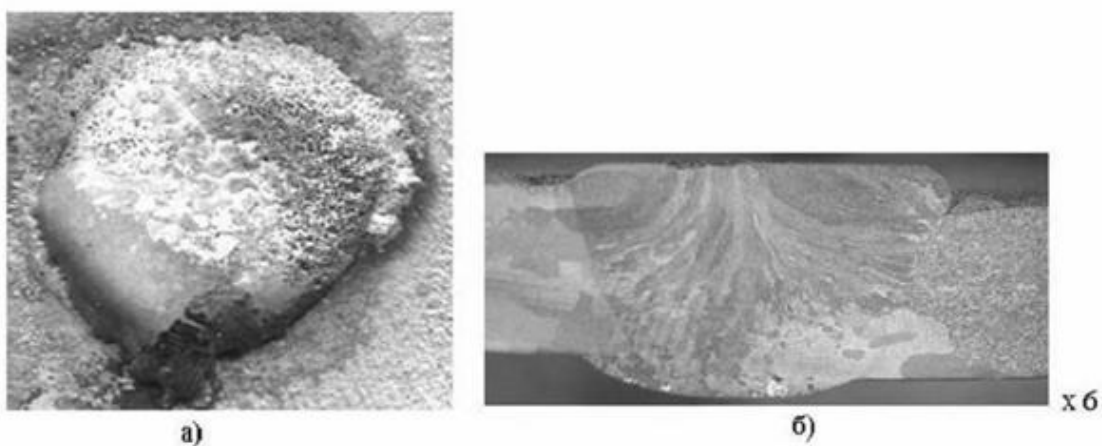


Рисунок 3.15 - Внешний вид и сечение сварочного кратера при реализации кривой спада тока вида  $y=k(x+b)^{-1}+c$ , выполненного с подачей присадочной проволоки

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчетов по математической модели, отклонения глубины усадочного кратера, полученные экспериментальным путем не превышают 10 % от расчетных.

#### **4. Технология и оборудование для формирования усадочного кратера с минимально допустимыми параметрами при устранении дефектов на поверхности изделий из алюминиевых сплавов.**

##### **4.1 Разработка сварочного оборудования и устройств для программируемого изменения параметров режима сварки.**

Для того чтобы реализовать выявленные зависимости спада сварочного тока в момент окончания процесса сварки необходимо разработать оборудование, которое позволит это сделать

В обычный комплект оборудования для ремонтной сварки и наплавки изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой входят [29]:

- источник питания трехфазной дуги с контрольно-измерительными приборами;
- двухэлектродная горелка для ручной или автоматической сварки;
- дистанционный ручной или ножной пульты управления;
- стенд механизированной наплавки с электроприводом для подачи присадочной проволоки;
- реостат балластный, а также дополнительная оснастка в виде стальных или медных технологических подкладок, зажимных приспособлений, гибких токоподводящих шин со скользящими контактами.

Наиболее важной частью комплекта оборудования, обеспечивающей выполнение технологических параметров процесса сварки и наплавки, является источник питания трехфазной дуги.

Конструкция сварочных трансформаторов применяемых в этих источниках совместно с блоком управления сварочным током позволяет плавно регулировать ток сварки отдельно в каждом электроде в диапазоне от 100 до 600А.

Наряду с перечисленными источниками питания трехфазной дуги создан источник типа УДГТ-801, в котором регулирование сварочного тока и подавление постоянной составляющей осуществляется тиристорным блоком (Рис. 4.1). Падающая внешняя вольт–амперная характеристика создана двумя однофазны-

ми трансформаторами с увеличенными магнитными потоками рассеяния, первичные и вторичные обмотки которых соединены по схеме открытого треугольника. Для возбуждения трехфазной дуги в начале сварочного процесса применяют осциллятор, а для его устойчивого горения во время сварки специальный стабилизатор дуги. Тиристорный регулятор обеспечивает плавное изменение сварочного тока в каждом электроде отдельно в диапазоне от 100 до 800 А.

Однако сварочные трансформаторы, применяемые в источнике питания УДГТ-801, не обеспечивают синусоидальную форму кривых сварочного тока в электродах из-за включенных в цепь электродов тиристорных регуляторов тока.

В работах Б.Е. Патона, А.В. Петрова, О.Н. Братковой и других показано, что искажения формы кривой сварочного тока снижает устойчивость горения и коэффициент мощности одной дуги знакопеременного тока. Поэтому искажение формы кривых линейных токов в электродах так же снижает стабильность горения и проплавляющую способность трехфазной дуги. Это в свою очередь отрицательно сказывается на качестве сварных соединений.

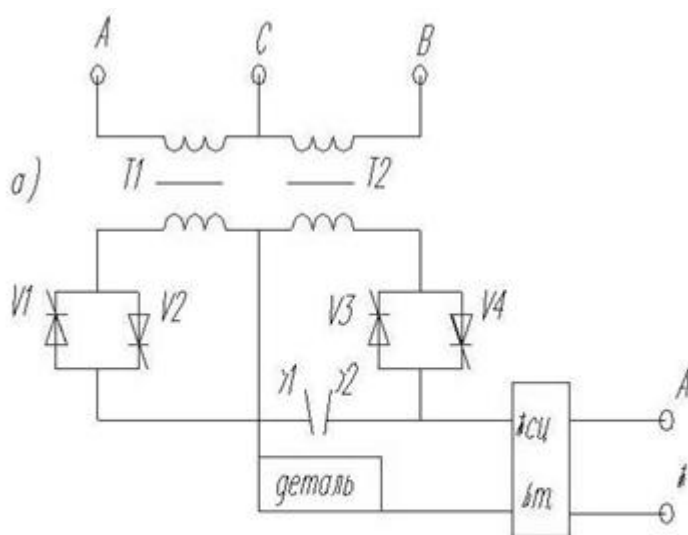


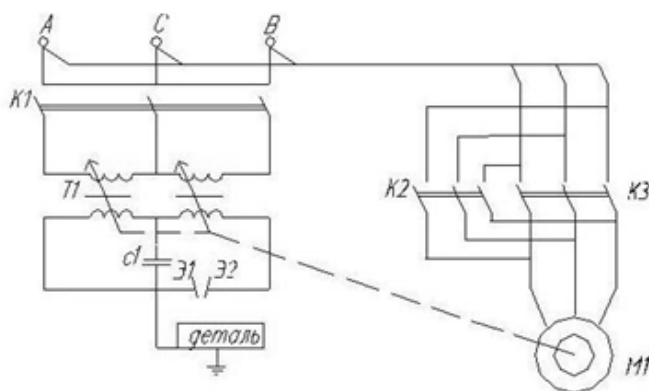
Рисунок 4.1 - Схема источника питания трехфазной дуги УДГТ-801

В работах ученых кафедры «ОТСП» Тольяттинского государственного университета - Коротковой Г.М., Шаповалова В.А. Столбова В.И. Цепенева Р.А. и др был спроектирован новый источник питания серии УДГТ-312. Кон-

струкция источника питания позволяет регулировать ток за счет подвижных обмоток трансформатора. Авторы использовали трансформатор, представляющий собой кольцевой витой магнитопровод со средним стержнем с возможностью поворота вокруг оси и размещенными на нем двумя первичными обмотками и двумя вторичными обмотками. Первичная обмотка 2 и вторичная обмотка 5 неподвижно закреплены на кольцевом магнитопроводе и расположены диаметрально противоположно. Две другие обмотки трансформатора 3 и 4, жестко связаны с корпусом ИП, расположены так же диаметрально противоположно и обеспечивают свободное движение магнитопровода в них. Обмотки 2, 3 и 4, 5 соединены по схеме открытого треугольника (Рис. 4.2).

Оценка использования такого трансформатора показала, что синусоидальную форму сварочного тока обеспечивают трансформаторы с подвижными обмотками. Кроме того, трехфазный трансформатор с витым кольцевым магнитопроводом по сравнению с трехфазным трансформатором, у которого шихтованный магнитопровод меньше вес в 1,11 раза, потери мощности в стали в 1,23 раза. Основным недостатком данного ИП является наличие подвижных обмоток в трансформаторе. Во-первых, к подвижным обмоткам подсоединены кабели, в которых в последствии может нарушиться изоляция в результате трения; во-вторых, регулирование тока за счет разведения обмоток не позволяет снижать ток до нуля (из-за ограничения возможности разведения обмоток); в-третьих, при регулировании тока за счет подвижных обмоток изменяется ток во всех фазах одновременно, а именно: ток в межэлектродной дуге и ток между электродами и изделием. В результате чего, может нарушаться стабильность горения дуги, т.е., когда обмотки трансформатора разведены на максимальное расстояние, ток в межэлектродной дуге имеет минимальное значение, и возможно прерывания горения дуги. И, кроме того, еще один недостаток – увеличенные габариты из-за наличия подвижных обмоток.

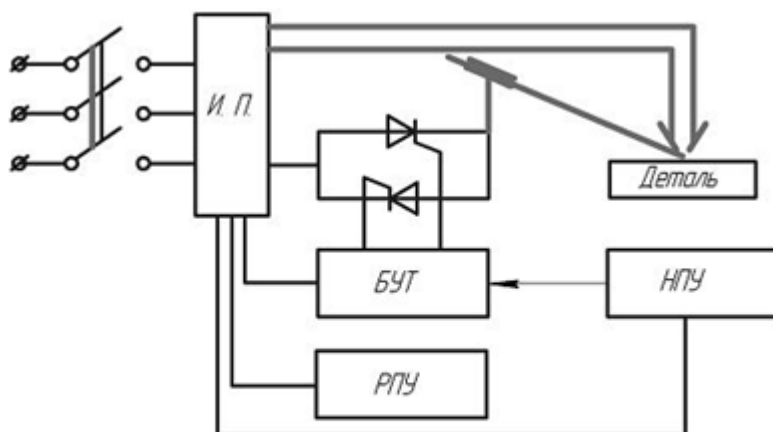




**Рисунок 4.2 - Схема источника питания трехфазной дуги с кольцевым магнитопроводом и подвижными вторичными обмотками**

Кроме прочих перечисленных недостатков вышеописанных источников питания трехфазной сварочной дуги у них есть один общий недостаток не позволяющий использовать это оборудование для разрабатываемой технологии, а именно: невозможность изменять сварочный ток в момент окончания сварки по заранее запрограммированной зависимости.

В работе [43] описывается также разработанный в Тольяттинском политехническом институте источник питания трехфазной сварочной дуги, в котором током в фазе «изделие» управляют два тиристора, включенных в среднюю фазу встречно-параллельно (рис. 4.3).



**Рисунок 4.3 - Схема источника питания с тиристорным блоком управления**

В блок управления тиристорами был встроен контроллер «электроника МС2702», который позволял изменять сварочный ток в основной дуге во времени по заданному закону. Были разработаны и введены в память контроллера



несколько «жестких» программ спада тока сварки, обеспечивающие заданные скорости охлаждения металла зоны термического влияния при заварке отверстий на изделиях из магниевых сплавов.

В целом ряде случаев такое оборудование позволяет решать задачи формирования качественного сварного соединения, особенно, с точки зрения повышения технологической прочности участка шва в месте окончания сварки, или при заварке локальных дефектов изделий. Однако, «жесткость программ» для управления током сварки существенно ограничивает технологические возможности такого уникального способа сварки, как сварка трехфазной дугой неплавящимися электродами в аргоне.

С целью расширения технологических возможностей установки, предложено модернизировать ее, оснастив компьютерным блоком управления [44], связанным с управляющим элементом источника питания посредством автоматического цифрового преобразователя управляющих сигналов. Компьютерный блок управления представляет собой обычный системный блок компьютера PC, Pentium 4 с монитором и «мышкой». Программное обеспечение для управления тепловой мощностью трехфазной дуги позволяет с помощью курсора на экране монитора задавать зависимость мощности сигнала управления от времени в виде любой произвольной кривой. Согласно этой кривой будет изменяться и ток основной дуги, а соответственно, и тепловая мощность, выделяемая трехфазной дугой.

Особенно существенным элементом модернизации является тот факт, что кроме запрограммированного изменения мощности трехфазной дуги, можно добиться ее изменения в режиме реального времени, т.е. непосредственно в процессе выполнения сварки самим сварщиком. Для этого есть возможность на сварочную горелку для ручной дуговой сварки, или на ножной пульт управления (педаль) установить «джойстик», связанный с компьютерным блоком управления.

Для проведения экспериментов по исследованию возможностей управления тепловой мощностью трехфазной дуги был разработан и изготовлен лабо-

раторный источник питания, в котором реализована возможность программируемого спада тока на стадии завершения сварочного процесса.

Силовая схема состоит из трёхфазного трансформатора с асимметричной схемой включения обмоток, и тиристорного регулятора тока, включенного в цепь средней фазы. Регулирование действующего значения тока дуги происходит за счет изменения времени нахождения в открытом состоянии каждого из тиристоров в течение сетевого полупериода. Особенностью разработанного источника является то, что система управления тиристорным блоком может иметь связь с персональным компьютером через один из интерфейсов. Разработанное программное обеспечение для ПК позволяет задавать график спада тока практически любой формы и затем передавать эту информацию системе управления тиристорным блоком. Упрощенная блок-схема системы управления представлена на рис. 4.4.

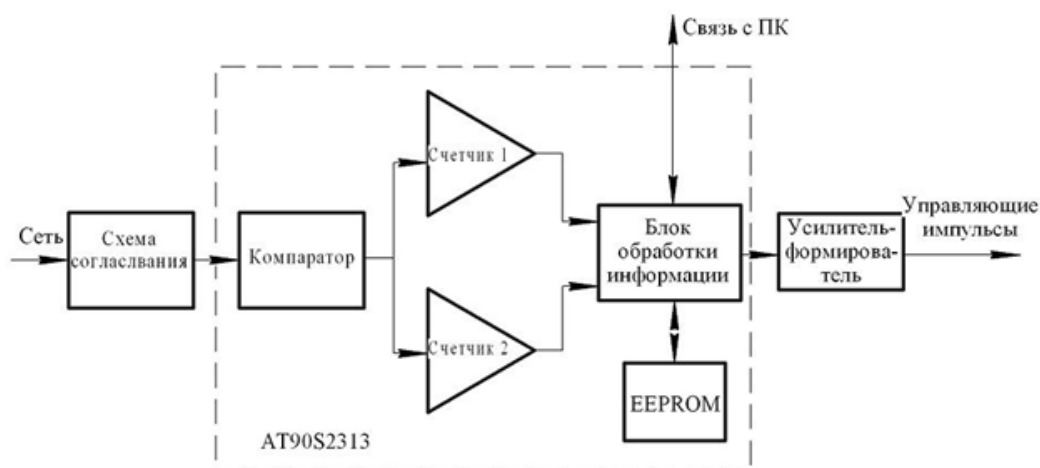


Рисунок 4.4 - Блок-схема системы управления тиристорным блоком в источнике питания трехфазной дуги

Система управления тиристорным блоком включает в себя блок формирования управляющих сигналов и усилитель-формирователь импульсов. Блок формирования управляющих сигналов выполнен на базе программируемого микроконтроллера семейства AVR AT90S2313.

Схема работает следующим образом.

Нуль орган, основным элементом которого является встроенный в микроконтроллер компаратор, отслеживает переходы сетевого напряжения через ноль

и запускает два программно задействованных счетчика импульсов. Один из них срабатывает при положительном перепаде напряжения на входе компаратора, а другой – при отрицательном. Оба счетчика отсчитывают время, соответствующее углам отпирания каждого из тиристорov регулятора на каждом сетевом полупериоде, после чего на соответствующих выходах микроконтроллера появляются управляющие импульсы. Далее эти импульсы усиливаются усилителем-формирователем и поступают на управляющие входы каждого из тиристорov. Все значения углов открывания тиристорov хранятся в EEPROM.

Помимо вышеописанных задач микроконтроллер также выполняет функцию связи системы управления и персонального компьютера через интерфейс USB. Таким образом, система управления тиристорным блоком может работать в двух режимах:

1. Рабочий режим;
2. Режим настройки, при котором осуществляется связь с компьютером;

При работе в рабочем режиме управление осуществляется тремя клавишами:

- 1) «СТАРТ» - начало режима сварки;
- 2) «СПАД» - режим спада тока по заданному закону;
- 3) «СТОП» - возврат на нулевой цикл;

Режимы работы индицируются светодиодами.

Программное обеспечение системы управления состоит из двух частей: программы управления микроконтроллера и программы для электронно-вычислительной машины (ЭВМ), предоставляющей функции ввода значений, задающих режим работы блока управления пользователем, и механизм передачи соответствующих параметров микроконтроллеру. Такая система управления позволяет подбирать режим работы устройства таким образом, чтобы получать наиболее качественное сварное соединение.

Программа управления микроконтроллером осуществляет управление силовыми ключевыми элементами по заранее заданной программе, а так же поз-

воляет корректировать выполняемую программу непосредственно в процессе работы (режим On-Line).

Регулирование происходит изменением угла открытия тиристорov относительно опорного напряжения. Сложностью при таком методе регулирования является определение фазового сдвига между управляющим и регулируемым напряжением. Этот фазовый сдвиг так же задаётся заранее с ЭВМ. Для сварки изделий из алюминия существует необходимость снижения действующего значения положительной полуволны тока по отношению к отрицательной полуволне, («постоянная составляющая» сварочного тока) эта разница так же может задаваться и реализоваться блоком управления, либо заранее подобранной по значению максимального сварочного тока батареей конденсаторов.

Программа ЭВМ позволяет графически задавать кривую изменения действующего значения тока, аппроксимируя их исходя из жёстко задаваемых углов открытия силовых ключевых элементов и характера нагрузки при помощи математических вычислений. Так же программа позволяет задавать непосредственно зависимость углов открытия силовых элементов от времени. Другим способом расчета зависимости тока дуги от задаваемых значений является задание наперёд сформированной тарировочной зависимости.

Для передачи данных между ЭВМ и блоком управления использован современный интерфейс USB. Это обусловлено тем, что порт USB в настоящее время является наиболее распространённым портом для персональных компьютеров. Реализация работы порта USB так же ложится на программу микроконтроллера.

Настройка микроконтроллера заключается в перезаписи значений энергонезависимой памяти, EEPROM, характеризующих его режим работы. Это время завершения сварочного процесса, углы открытия для рабочего режима, зависимость изменения угла открытия от времени для режима завершения работы.

Пригодность сварочного инструмента для выполнения заданных функций можно оценить, только лишь проверив его работоспособность. В нашем случае, для оценки работоспособности трехфазного источника питания и двухэлек-

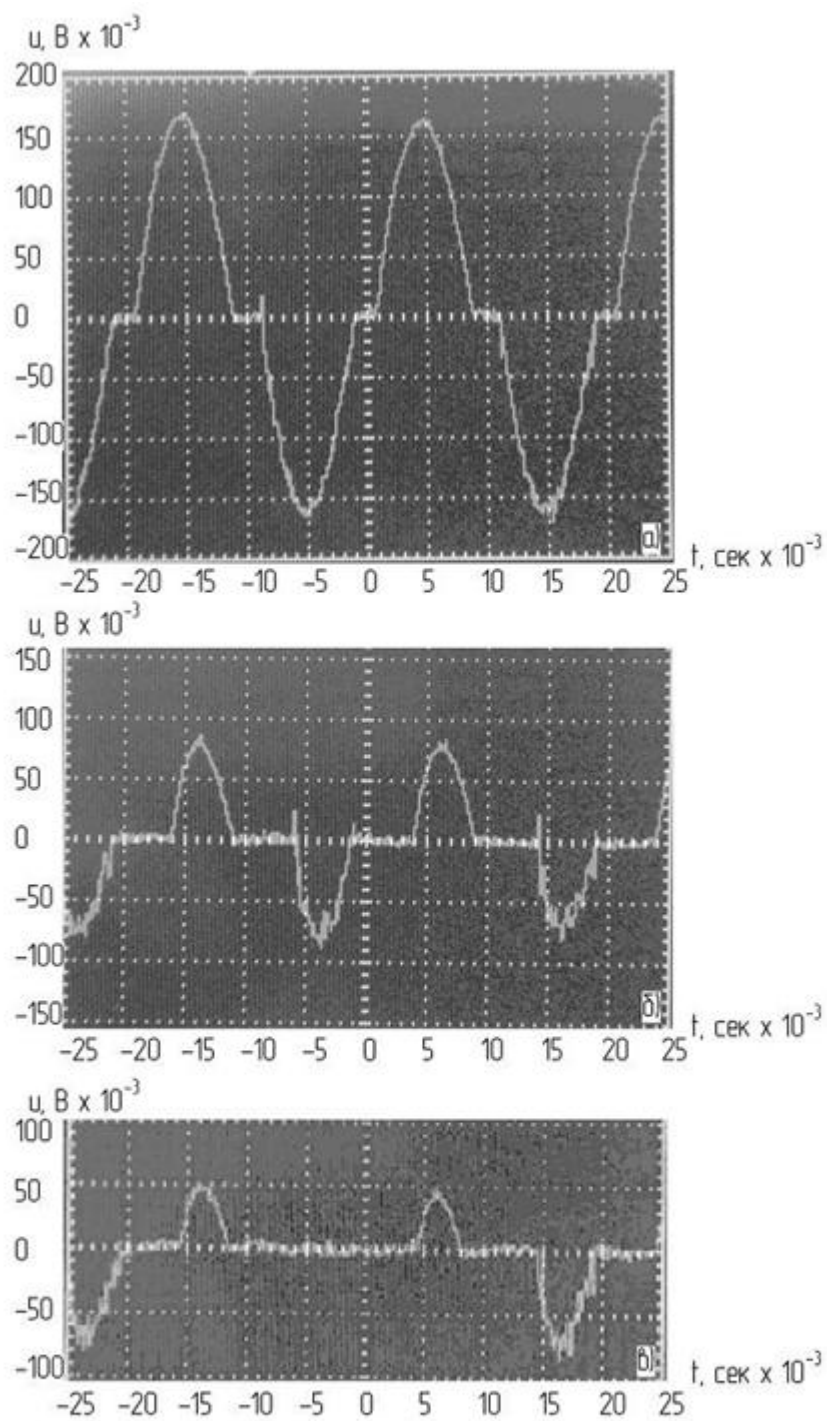
трехфазной сварочной горелки, как инструмента для управления тепловой мощностью трехфазной дуги, проводили осциллографирование формы кривой сварочного тока фазных дуг трехфазного факела на различных стадиях управления током сварки. В частности, исследовались следующие режимы:

- номинальный сварочный ток в электродах и изделии, (115 А)
- ток через изделие равен нулю, ток в электродах – номинальный,
- ток в электродах номинальный, а через изделие протекает ток силой 15 Ампер.

Как показали исследования характеристик трехфазной дуги, при малых значениях тока (15А) наблюдается значительное отклонение формы сварочного тока в фазах «а - с» и «в - с» от синусоидальной. При этом, стабильность горения межэлектродной дуги «а - в» не нарушается, даже при значении силы тока основной дуги равной 15 А. В тоже время отмечаются срывы повторных возбуждений основных дуг обратной полярности (нарушается стабильность их горения), причем, тем больше срывов, чем меньше значение тока (Рис. 4.5). На основании проведенных исследований сделали вывод о том, что межэлектродная дуга не может обеспечить 100% стабильность повторных возбуждений основных дуг на токах менее 15 А, а значит, при малых значениях тока обеспечить гарантированное управление тепловой мощностью трехфазной дуги с высокой степенью точности весьма затруднительно. Таким образом, можно отметить, что разработанное программное обеспечение и блок управления сварочным током в существующих источниках питания трехфазной дуги, хотя и дают существенный положительный эффект, по сравнению с однофазными источниками питания, но все же не в полной мере реализуют свои возможности.

В качестве предложения для проведения дальнейших исследований в области надежного управления тепловой мощностью трехфазной дуги на стадии завершения сварочного процесса необходимо разработать принципиально новую конструкцию источника питания трехфазной дуги (инвертор), которая бы обеспечивала безусловную стабильность горения основных дуг на токах близких к нулевым значениям.

Для реализации этого проекта в данной работе предложен бизнес-план, в котором отражены маркетинговые и финансовые стороны проекта.



а - 115А; б- 30А; в - 15А

Рисунок 4.5 - Осциллограммы сварочного тока в фазе "изделие" приразличной величине тока

## 4.2 Обработка оптимальных параметров режима горения трехфазной дуги в момент окончания сварки для различных толщин материала.

Для того чтобы эффективно применять разрабатываемую технологию для сварки металлов различных толщин, необходимо рассчитать оптимальные параметры сварки и коэффициенты разработанной кривой ( $y=k(x+b)^{-1}+c$ ). Рассчитать параметры режима и коэффициенты можно с помощью разработанной математической модели, адекватность которой была проверена, а следовательно все коэффициенты и режимы рассчитанные по ней можно считать верными.

Для удобства расчета формулу кривой спада тока

$$y=k(x+b)^{-1}+c \quad (4.1)$$

преобразили в следующую форму

$$I=k(t+b)^{-1}+c \quad (4.2)$$

где  $I$  – действующий ток в фазе «изделие», А;

$t$  – текущее время спада тока, сек;

$k, b, c$  – расчетные коэффициенты

Расчет ведется для полного проплавления металла.

Таблица 4.1 Режимы сварки трехфазной дугой.

№ п/п	Толщина металла, мм	Номинальный сварочный ток, А	Коэффициенты уравнения кривой спада тока $I=k(t+b)^{-1}+c$			Время спада, сек
			k	b	C	
1.	2 – 4	80	600	10	45	40
2.	4 – 6	150	1000	12	50	60
3.	6 – 8	270	1500	13	53	60
4.	8 – 10	335	2700	14	55	70
6.	10 – 12	430	3730	15	57	90
7.	12 – 14	530	4670	16	60	90

Полученные коэффициенты закладываются в программируемый блок управления источника питания, сварщику остается выбрать номер программы в соответствии с толщиной свариваемого материала.

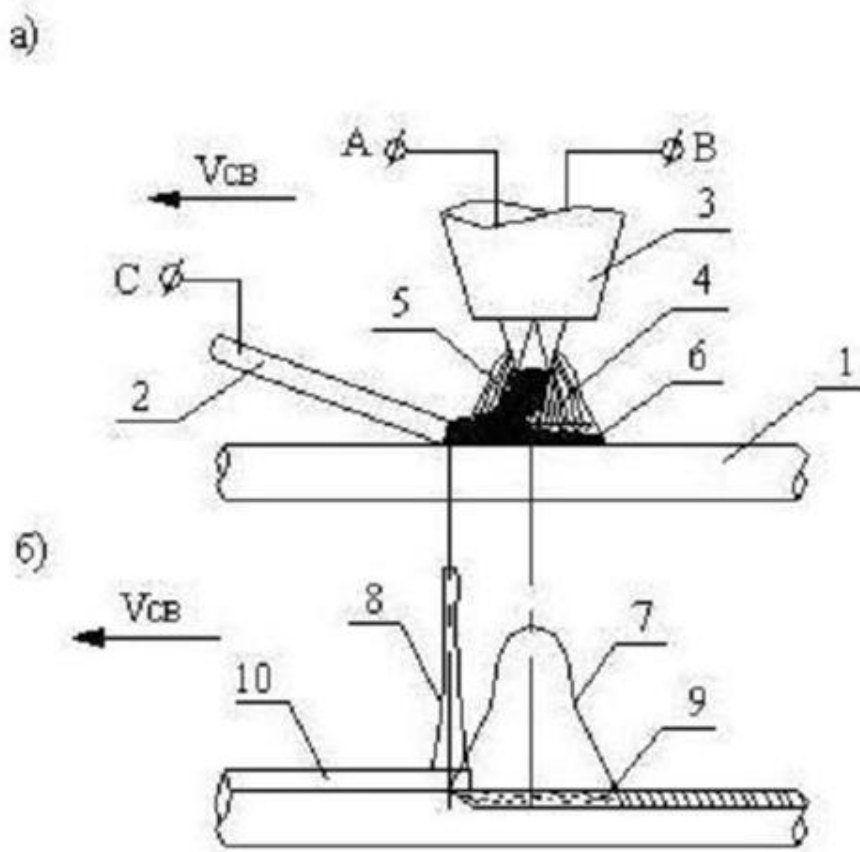
#### **4.2.1 Технологическое использование эффекта дифференцирования теплового потока трехфазной дуги при заварке кратера.**

Авторами Ельцовым В.В., Столбовым В.И., Потехиным В.П., сварочная дуга описывается как симбиоз из двух составляющих, газокинетической и электродинамической, обе они одинаковы по мощности, но на порядок разные по степени сосредоточенности. Также доказывается тот факт, что их действие при движении сварочной горелки не соосно, а именно поток нагретых дугой газов остается соосным сварочной горелке до весьма высоких скоростей сварки, а активное пятно отстает на некоторое расстояние. В момент окончания сварки, когда сварочная горелка останавливается для заварки усадочной раковины, обе эти составляющие действуют соосно, увеличивая степень прогиба зеркала сварочной ванны. Установлено, что зеркало сварочной ванны прогибается в основном под действием активного пятна, очевидно, что если нейтрализовать действие активного пятна сварочной дуги, то можно добиться формирования сварочного кратера с минимальными размерами. В работе [29] автор предлагает искусственно разделять действие сварочной дуги, с целью уменьшения проплавления основного металла при проведении наплавочных работ.

Осуществляется это с помощью подключения подаваемой присадочной проволоки к фазе изделия. Автор описывают этот процесс следующим образом:

1. Первым по направлению скорости наплавки движется сосредоточенный источник тепла, а за ним на расстоянии ( $L$ ) распределенный источник тепла.
2. Воздействие активного пятна на металл сварочной ванны исключается, а количество теплоты, выделяемое им, расходуется на плавление присадочного материала.
3. Заглубление активного пятна отрицательно и соответствует по величине диаметру присадки.
4. Газокинетическая составляющая теплового потока, воздействует на основной металл через прослойку жидкого присадочного металла.





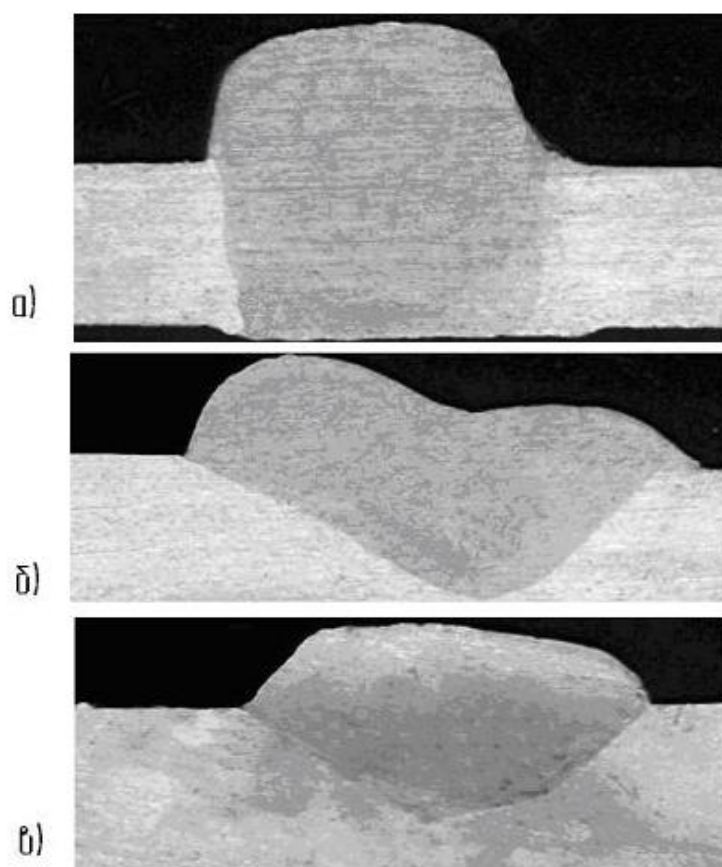
а - схема процесса; б - расчетная схема

Рисунок 4.6 - Наплавка трехфазной дугой с дифференцированным тепловложением

Авторы данного способа утверждают, что при наплавке по такой технологии глубина проплавления основного металла снижается почти в два раза, чем при наплавке по классической технологии. Следовательно, если в момент окончания сварки нейтрализовать активное пятно сварочной дуги по такой технологии – то можно добиться положительного эффекта в плане формирования усадочного кратера.

Была проведена серия экспериментов, которая подтвердила это предположение. Эксперименты проводились следующим образом: образец из алюминиевого сплава АМг6 размерами 300\*100\*5 мм, подвергался обработке неподвижной трехфазной сварочной дугой, до образования расплава определенного диаметра, после чего, в зону сварки подавалась присадочная проволока, подключенная к фазе «изделие», в этот же момент включался спад тока по заранее запрограммированной разработанной кривой.

Исследования показали, что, не смотря на увеличение объема расплавленного металла в сварочной ванне, усадочная раковина отсутствует (Рис.4.7).



а - сквозное проплавление; б - нормальное проплавление;  
в - частичное проплавление металла

Рисунок 4.7 - Вид усадочного кратера в разрезе при заварке дефекта с дифференцированным тепловложением

Таким образом, можно сделать вывод, что использование эффекта дифференцирования теплового потока в комплексе со спадом тока по разработанной кривой, позволяет практически полностью исключить такое явление как усадочный кратер.

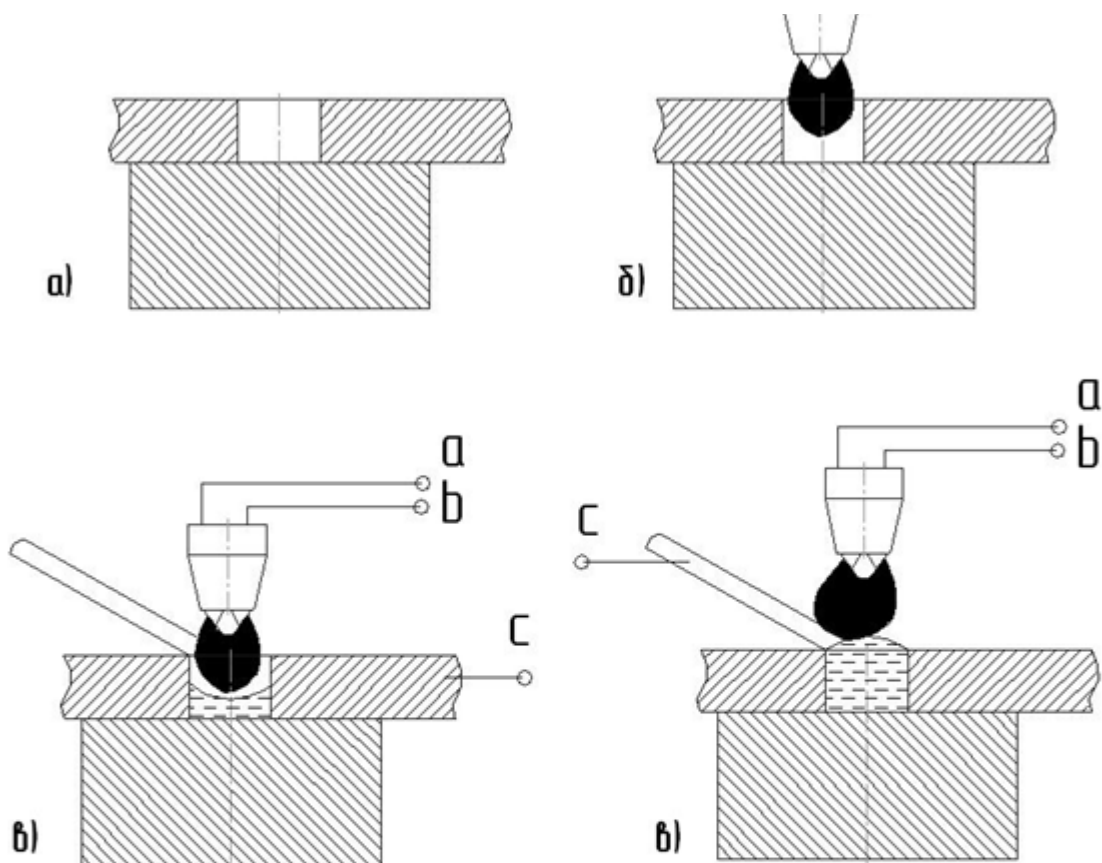
#### **4.3 Технология формирования усадочного кратера с минимально допустимыми параметрами**

Большая доля конструкций из алюминиевых сплавов изготавливается методом литья, при котором неизбежно появление дефектов в виде пор, шлаковых включений и несплавлений. Существующая технология ремонта предусматривает разделку дефекта механическим путем и последующую заварку аргонодуговой сваркой с формированием проплава на медной пластине, заварка пред-

варительно разделанных дефектов производится либо без подогрева, либо с общим подогревом изделия в печи до температуры 420...430 градусов Цельсия в течении 3...4 часов и медленном остывании после заварки, что обеспечивает сравнительно высокую эффективность ремонта.

Заварка дефектов без подогрева менее эффективна из-за образования горячих трещин в корне или кратере шва. Для того чтобы повысить качество и производительность ремонтных работ необходимо разработать новую технологию.

При наличии точечного дефекта на поверхности изделия, провести сквозную разделку, устранив тем самым дефектный участок. В качестве подкладки для заварки использовать гладкую пластину из меди или стали (рис. 4.8а). Для хорошего сплавления кромок с обратной стороны шва применять дополнительный подогрев снизу, способствующий растеканию металла у края разделки. В качестве источника тепла использовать предварительно разогретые подкладки. Подкладки разогревать независимой (межэлектродной дугой) дугой после их установки под разделанный дефект (рис. 4.8б). После подогрева подкладки и кромок, включать среднюю фазу и с помощью зависимых дуг осуществлять расплавление присадочного металла (рис. 4.8в). В качестве присадочного материала использовать прутки из основного металла. Благодаря такой технологии заварки внутри изделия создается такая же тепловая ситуация, как и при общем подогреве изделия, поэтому качество ремонта повышается. После заполнения присадочным металлом разделанного дефекта и создания на поверхности некоторого усиления (2...5 мм), присадочную проволоку подключить к средней (рис. 4.8г) фазе и запустить спад тока по характеристике  $I=k(t+b)^{-1}+c$ .



а - установка изделия на технологическую подкладку;  
 б - предварительный подогрев двухэлектродной горелкой  
 в - заварка разделанного дефекта с применением присадки  
 г - заварка сварочного кратера

**Рисунок 4.8 - Технология заварки дефектов изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой**

Для заварки дефекта на изделиях с толщиной стенки 4...6 мм, использовать следующие режимы сварки трехфазной дугой:

Ток в электродах:  $I_1 = I_2 = 80 \text{ A}$ ;

Номинальный ток в изделии:  $I = 150 \text{ A}$ ;

Расход аргона:  $Q = 5...6 \text{ л/мин}$ ;

Коэффициенты кривой спада тока:  $k = 1000$ ;  $b = 12$ ;  $c = 50$ .

Таким образом, используя разработанную технологию можно обеспечить высокую производительность и высокое качество ремонта точечных дефектов изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой.

## **5. Бизнес план для привлечения инвестора в проект «Установка для сварки изделий из легких сплавов с программируемым изменением мощности трехфазной дуги»**

### РЕЗЮМЕ

Прогресс и совершенствование технологий диктует необходимость предъявления повышенных требований к конструкционным материалам и изделиям. Одним из наиболее перспективных материалов в настоящее время является алюминий и сплавы на его основе. Это обуславливается рядом уникальных свойств таких сплавов, а именно легкий вес, высокая прочность и коррозионная стойкость, а также тем, что алюминий занимает первое место среди металлов по содержанию в земной коре. Сварка в изготовлении изделий из сплавов алюминия играет одну из первостепенных ролей. Но при сварке изделий из алюминия возникает ряд затруднений:

- наличие на поверхности металла тугоплавкой окисной пленки (температура плавления окисной пленки -  $2036^{\circ}\text{C}$ , температура плавления алюминия -  $660^{\circ}\text{C}$ );
- высокая теплопроводность алюминия, которая вызывает необходимость использовать мощный высококонцентрированный источник тепла при сварке;
- высокая склонность к разрушению в процессе сварки (т.е. высокая вероятность возникновения трещин и пор в металле шва в процессе сварки и после ее окончания);
- высокая склонность к короблению (изменению геометрических размеров изделия).

В настоящее время подавляющее большинство производителей используют оборудование для сварки однофазной дугой переменного тока вольфрамовым электродом в среде инертных газов (аргон, гелий), которое отличается невысокой производительностью и не всегда может обеспечить высокое качество продукции.

Некоторые производители используют оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки, которое отличается высокой стоимостью (порядка одного миллиона рублей), большими габаритами и требующего обслуживания

высококвалифицированного персонала, что влечет за собой существенное увеличение себестоимости производимой предприятием продукции.

Большинство проблем, сопряженных со сваркой изделий из легких сплавов, можно решить с помощью способа сварки трехфазной дугой, который был изобретен в 50-х годах 20 века. Данный способ отличается высокой стабильностью процесса сварки, поскольку в дуговом факеле в каждый момент времени горит 2 сварочных дуги, наличие межэлектродной дуги W-W, постоянно поддерживает дуговой промежуток в ионизированном состоянии, кроме этого вносит дополнительное количество тепла в свариваемое изделие. Однако данное оборудование отличалось большой громоздкостью, и невозможностью использовать все технологические преимущества этого способа вследствие малой гибкости управления технологическими параметрами режима сварки.

Современная электронная промышленность шагнула далеко вперед. Существующая база электронных элементов (тиристоры, транзисторы, и т.д.) существенно уменьшила свои габариты и расширила свои технологические возможности. Сейчас с помощью этих элементов имеется возможность глубокого регулирования параметров процесса сварки, а значит и получение сварного шва с заранее заданными свойствами. Это позволяет нам решить все проблемы, существующие в настоящее время при сварке легких сплавов, и существенно снизить процент брака сварных соединений, а следовательно, повысить качество изделий из легких сплавов, а также и производительность технологического процесса сварки.

Внедрение оборудования для сварки изделий из легких сплавов трехфазной дугой в производство позволит:

- получить сварное соединение и наплавленный слой металла с заранее заданными свойствами;
- повысить производительность и снизить трудоемкость технологического процесса;
- повысить качество свариваемых изделий;

- сваривать кольцевые и круговые швы без затруднений по заданной программе;
- существенно снизить энергозатраты предприятий;
- позволит подключать одну установку к двум сварочным постам для сварки однофазной дугой (при необходимости сварки или наплавки черных или цветных металлов);
- расширить диапазон свариваемых толщин материала, что в конечном итоге приведет к рентабельности данной продукции, ее конкурентоспособности и занятию определенной ниши на рынке сварочного оборудования.

Мы предлагаем оборудование и технологию, позволяющие получать сварное соединение или наплавленный слой металла высокого качества с наименьшими финансовыми затратами. Это достигается за счет высокой стабильности процесса, высокой производительности, более интенсивного распыления окисной пленки с поверхности алюминия, возможности управлять кристаллизационными процессами на любом этапе сварки, а также за счет применения высоких компьютерных технологий в производстве.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

В настоящем проекте предлагается установка для сварки и наплавки изделий из алюминия, позволяющая получать сварные соединения и наплавленный слой повышенного качества и повысить производительность процесса сварки почти в 2 раза, без удорожания технологии и повышенных затрат на оборудование.

Главной целью является обеспечение прибыльности предприятия путем производства и реализации установок для сварки и наплавки изделий из легких сплавов, обладающей преимуществами по сравнению с имеющимися российскими и зарубежными аналогами.

Задачи:

- разработка, создание и внедрение в производство установок для сварки и наплавки изделий из легких сплавов, обладающих значительными преимуществами по сравнению с российскими и зарубежными аналогами, отвечающих требованиям современных стандартов и потенциальных заказчиков продукции;
- защита интеллектуальной собственности, путем патентования разработанного оборудования, товарного знака и технологий для сварки трехфазной дугой;
- выход на отечественный и мировой рынки сварочного оборудования;
- удовлетворение спроса на установки для сварки и наплавки изделий из легких сплавов, путем подготовки, организации, запуска и освоения производства и организацией сбыта нового высокотехнологичного продукта.

### МАРКЕТИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### а) Рынок сварочного оборудования:

Мировой рынок сварочной техники и услуг к началу 21 века составил 40 миллиардов долларов, 30 % из которых составляет доля сварочного оборудования. В 2013 году этот рынок в России составил 650 млн долларов. [45]. При этом доля импорта в общем парке сварочного оборудования в стране составляет более 80%. При этом доля оборудования для дуговой сварки в защитных газах составит 50...55%. Из каких составляющих формируется этот рынок. У многих производителей оборудование устарело не только физически, но и морально, а современные рыночные условия диктуют необходимость периодического обновления оборудования и совершенствования технологии производства, для того чтобы предприятие оставалось конкурентоспособным. Мировой опыт показывает, что после длительного экономического и производственного спада следует их неизбежный подъем. Развитие всех отраслей промышленности, повышение потребления энергоресурсов заставляет наращивать производственные мощности и повышает спрос на оборудование, в том числе и сварочное. Постоянное повышение доли рынка легких сплавов также положительно влияет на спрос сварочного оборудования для этой отрасли промышленности. Кроме всего прочего, на рынке сварочного оборудования уже давно не существовало аль-



тернативы однофазным установкам для аргонодуговой сварки, также не предлагалось современной альтернативы этой технологии. Способ сварки трехфазной дугой хорошо зарекомендовал себя на предприятиях отечественной промышленности, но реальных разработок в области оборудования и технологии уже давно никто не проводил.

б) Основные конкуренты:

На сегодняшний день выпуском и поставками сварочного оборудования для аргонодуговой сварки легких сплавов занимается множество компаний, крупнейшие из них концерны ESAB, TELWIN, KEMPPI, LORCH, EWM, а также отечественные производители сварочного оборудования, крупнейшим из которых является ЗАО НПФ «ИТС». Но, ни одна компания не занимается разработкой и выпуском оборудования для сварки трехфазной дугой.

Анализ оборудования, выпускаемого данными компаниями, позволяет сделать вывод о том, что их продукция отличается друг от друга лишь дизайном и интерфейсом управления, но их технические характеристики и технологические возможности остаются одинаковыми. По сути, все оборудование для аргонодуговой сварки, производимое этими компаниями, похоже друг на друга «как две капли воды», стоит в одной ценовой категории и достигло потолка в своем техническом развитии.

в) Сравнительные технические характеристики:

Анализ современного оборудования показал, что оно подразделяется на мощностные категории в зависимости от цели потенциального потребителя. Для того чтобы охватить больший сегмент рынка в данном проекте планируется первоначально запустить в серийное производство линейку из трех моделей.

Таблица 1 Сравнительные характеристики для оборудования малой мощности

Параметры	Наш продукт (150 Ампер)	УДГТ-151 У2 (установка для сварки трехфаз- ной дугой предыдущего по- коления)	TIG AC/DC-150 А (существующее на рынке оборудова- ние: Telwin, ESAB, Kemppi, EWM, Lorch, Tetric)
Удельная мощность дуги (условный коэффициент)	1.73	1.73	1,0
Род тока сварки	Переменный трехфазный высокочастотный	Переменный трехфазный 50 Гц	Переменный од- нофазный высоко- частотный
Количество дуг в факеле	3	3	1
Пределы регулирования сварочного тока (А)	0 - 150	20 - 150	10 - 150
Программирование па- раметров	Жесткие про- граммы + режим On-Line	нет	Жесткие програм- мы
Стабильность процесса сварки в нижнем диапа- зоне сварочного тока	высокая	низкая	низкая
Максимальная потребля- емая мощность	2,8 КВА	2,8 КВА	5,75 КВА
Габариты (мм)	380x180x320	480x340x400	340x115x235
Вес установки (кг)	5-8	60	4
Ориентировочная стои- мость (руб.)	80-100 тыс.	—	90 тыс.

Таблица 2. Сравнительные характеристики для оборудования средней мощности

Параметры	Наш продукт (250 Ампер)	УДГТ-313 У2 (установка для сварки трехфаз- ной дугой предыдущего по- коления)	TIG AC/DC-250 А (существующее на рынке оборудова- ние: Telwin, ESAB, Kemppi, EWM, Lorch, Tetric)
Удельная мощность дуги (условный коэффициент)	1.73	1.73	1,0
Род тока сварки	Переменный трехфазный высокочастотный	Переменный трехфазный 50 Гц	Переменный од- нофазный высоко- частотный
Количество дуг в факеле	3	3	1
Пределы регулирования сварочного тока (А)	0 - 250	20 - 250	10 -250
Программирование па- раметров	Жесткие про- граммы + режим On-Line	нет	Жесткие програм- мы
Стабильность процесса сварки в нижнем диапа- зоне сварочного тока	высокая	низкая	низкая
Максимальная потребля- емая мощность	4,0 КВА	4,0 КВА	7,6 КВА
Габариты (мм)	550x250x450	1200x800x1090	505x250x430
Вес установки (кг)	30-40	300	30
Ориентировочная стои- мость (руб.)	180-200 тыс.	—	220 тыс.

Таблица 3. Сравнительные характеристики для оборудования высокой мощности

Параметры	Наш продукт (400 Ампер)	УДГТ-413 У2 (установка для сварки трехфазной дугой предыдущего поколения)	TIG AC/DC-400 А (существующее на рынке оборудование: Telwin, ESAB, Kemppi, EWM, Lorch, Tetric)
Удельная мощность дуги (условный коэффициент)	1.73	1.73	1,0
Род тока сварки	Переменный трехфазный высокочастотный	Переменный трехфазный 50 Гц	Переменный однофазный высокочастотный
Количество дуг в факеле	3	3	1
Пределы регулирования сварочного тока (А)	0 - 400	20 - 400	10 -400
Программирование параметров	Жесткие программы + режим On-Line	нет	Жесткие программы
Стабильность процесса сварки в нижнем диапазоне сварочного тока	высокая	низкая	низкая
Максимальная потребляемая мощность	6,4 КВА	6,4 КВА	10,8 КВА
Габариты (мм)	550x250x450	1330x850x1090	505x250x430
Вес установки (кг)	40-50	450	45
Ориентировочная стоимость (руб.)	200-220 тыс.	—	240 тыс.

Предлагаемое в данном проекте оборудование превосходит существующие аналоги по всем параметрам, при этом имеет более низкую стоимость. Исходя из этого можно сделать вывод, что наша продукция имеет неоспоримые преимущества и будет с успехом конкурировать на рынке.

#### г) Рынок сбыта

Потенциальными потребителями нашей продукции могут быть предприятия следующих отраслей промышленности:

- Авиа-космическая промышленность (производство и ремонт гражданских самолетов и вертолетов, корпусов ракет и спутников);
- Автомобильная промышленность (производство и ремонт корпусных деталей ходовой части автомобиля и кузовных деталей);
- Судостроительная и судоремонтная промышленность (производство и ремонт корпусов кораблей, катеров и яхт, судов на подводных крыльях и воздушной подушке, корпусных деталей в машинном отделении);
- Metallургическая промышленность (литейное производство корпусов короб передач, блоков цилиндров, кузовных деталей и прочих заготовок);
- Нефтехимическая промышленность (производство и ремонт перегонных трубопроводов, емкостей для хранения химикатов, систем охлаждения);
- Военно-Промышленный Комплекс (производство боевых кораблей, самолетов, вертолетов, ракетополетителей);
- Ювелирная промышленность (производство и ремонт изделий из драгоценных материалов);
- Стоматологическая отрасль (изготовление зубных мостов, протезов).

Проведенный анализ потенциальных потребителей помог оценить потенциальный спрос и позволил нам спрогнозировать минимальную общую годовую потребность предприятий в приобретении разрабатываемых нами установок, которая составляет 1600 штук.

#### РЕСУРСЫ

##### а) Имеющиеся ресурсы:

Предлагаемый проект может разрабатываться в стенах «Тольяттинского государственного университета». Для его реализации в нашем распоряжении имеются лабораторные и производственные площади, необходимые для мелко-

серийного запуска разрабатываемого оборудования в производство, что позволит значительно сэкономить на оплате электро-, тепло- и водоснабжении, а также на аренде площадей. Также имеется материально-техническая база для осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, что существенно снижает затраты на разработку предлагаемого в проекте оборудования. В «ТГУ» сконцентрировано большое количество высококвалифицированных специалистов, к услугам или консультациям которых мы всегда можем обратиться по техническим, экономическим, юридическим вопросам, вопросам защиты интеллектуальной собственности, вопросам маркетинга и PR-а. Нами также создана база российских и зарубежных потенциальных заказчиков нашей продукции, включающая в себя более тысячи предприятий. Имеющиеся у нас данные ресурсы позволяют нам в кратчайшие сроки осуществить разработку, грамотно и сильно защитить свою интеллектуальную собственность, уменьшить требуемые финансовые вложения для реализации проекта, а также быстро вывести продукт на рынок при условии наличия инвестиций.

б) Требуемые ресурсы:

Для полномасштабной реализации проекта требуются финансовые инвестиции. Общий бюджет данного проекта составляет 5 миллионов рублей, из которых 2,7 миллиона уходит на разработку инновационного продукта, защиту интеллектуальной собственности и позиционирование товара на рынке, а 2,3 миллиона необходимы для организации сборочного цеха (следует отметить, что изначально мелкосерийный выпуск разработанной продукции будет осуществляться на производственных площадях «ТГУ» и не будет требовать покупки дорогостоящего оборудования).

Таблица 4 Структура финансовых расходов на реализацию проекта

Наименование (разработка продукта)	Сумма, руб.
Материалы и оснастка	900 000
Текущие расходы: - работа сторонних исполнителей - сотовая связь и ГСМ - офисные расходы	100 000
Заработная плата	1 000 000
Защита интеллектуальной собственности	300 000
Маркетинг и реклама	400 000
<b>ИТОГО № 1:</b>	<b>2 700 000 руб.</b>
Наименование (организация цеха)	Сумма, руб.
Верстак слесарный (3 шт.)	60 000
Слесарный и электроинструмент	200 000
Станок намоточный	180 000
Станок сверлильный	50 000
Шкаф сушильный	70 000
Стенд испытательный	150 000
Источник питания постоянного тока	60 000
Контрольно-измерительные приборы	220 000
Электрическое оснащение цеха	160 000
Вентиляционная система	240 000
Краскопульт	10 000
Ноутбуки (3 шт.)	100 000
Программное обеспечение	100 000
Отчисления за производственные площади	700 000
<b>ИТОГО № 2:</b>	<b>2 300 000 руб.</b>

**ИТОГО: 5 000 000 руб.**

## *ПЛАНИРУЕМАЯ ПРИБЫЛЬ*

### а) Планируемый объем выпуска продукции

Исходя из проведенных маркетинговых исследований, а также с учетом развития нашего производства и повышения динамики продвижения нашего продукта на рынке был спланирован объем выпуска продукции

Таблица 5 Планируемый объем выпуска продукции

Календарный год	2019	2020	2021	2022
Объем выпуска продукции, шт.	10	400	600	1000

### б) Планируемая прибыль

Планируемая прибыль была рассчитана вычетом из отпускной цены товара ее себестоимости с НДС

Таблица 6 Планируемая прибыль

Календарный год	2010	2011	2012	2013
Чистая прибыль предприятия, руб.	1 000 000	40 000 000	60 000 000	100 000 000

## *РЕКЛАМА И ПРОДВИЖЕНИЕ ПРОДУКЦИИ*

Продвижение продукта на рынок будет осуществляться следующими методами:

- демонстрация оборудования на специализированных выставках, как в РФ, так и зарубежом с раздачей рекламных проспектов и буклетов;
- публикации в популярных технических и производственных журналах;
- рассылка коммерческих предложений и презентация товара непосредственно на предприятиях;
- работа с дистрибьюторами сварочного оборудования;



- реклама продукции в сети интернет при помощи создания своего веб-сайта, а также размещения рекламы на тематических информационных веб-сайтах и веб-сайтах дистрибьюторов сварочного оборудования.

### ОЦЕНКА РИСКОВ

Рассмотрим основные возможные риски:

а) Риск создания подобной разработки другими производителями сварочного оборудования.

Его вероятность невелика, т.к. в настоящее время численность специалистов помимо нашей команды в области сварки трехфазной дугой в России составляет не более 30 человек, большинство из них преклонного возраста и работает в «ТГУ». Зарубежом такого рода специалистов нет вообще. Поэтому разработкой современного оборудования для сварки изделий из легких сплавов трехфазной дугой кроме нашей команды никто не занимается.

б) Риск кражи и утраты интеллектуальной собственности.

Безусловно, такой риск существует, поэтому, чтобы свести его к минимуму будут проведены все необходимые процедуры защиты интеллектуальной собственности с привлечением высококвалифицированных специалистов в области патентования. Нами будут запатентованы товарный знак, промышленный образец, схемотехнические решения, а также инновационные технологии сварки и наплавки.

### ВЫВОДЫ

Успешной реализации данного проекта помогут осуществиться следующие факторы:

- сложившаяся экономическая ситуация в мире, при которой предприятия ищут возможности для снижения производственных затрат за счет внедрения инновационных технологий и оборудования;

- возрастающая потребность перехода российских и мировых производственных компаний на более интенсивное использование легких сплавов (алюминий, магний);
- правительство РФ поддерживает инновационные проекты и предприятия, занимающихся производством инновационного оборудования (софинансирует разработку и организацию производства инновационных продуктов, «218 постановление Правительства РФ»)
- в мире не существует аналогов разрабатываемому нами оборудованию;
- серийное производство разработанного оборудования не потребует покупки дорогостоящего оборудования и привлечения высокооплачиваемой рабочей силы.

Проведенные маркетинговые исследования показали общемировой объем потенциальных потребителей нашей продукции, в котором только фирм по производству летательных аппаратов авиации общего назначения (гражданские самолеты и вертолеты, а также гидропланы, экранопланы и автожиры) более 18 тысяч и более 3,5 тысяч судостроительных верфей (корабли, яхты, катера) без учета авиа- и судоремонтных предприятий. Исходя из всего вышесказанного, реализация данного проекта позволит инвесторам не только вернуть вложенные средства в кратчайшие сроки, но и позволит иметь стабильно высокий доход на долгосрочной основе.

## Заключение

1. Существующие способы заварки сварочного кратера не в полной мере обеспечивают получение качественного сварного соединения, вследствие образования усадочной раковины больших размеров и наличия в ней трещин.
2. Установлено, что для получения сварочного кратера с минимальными размерами и отсутствия в нем трещин, необходимо изменить направление теплоотода и соответственно фронта кристаллизации с радиального на осевое.
3. Установлено и экспериментально подтверждено, что осевое направление роста кристаллитов в сварочном кратере можно обеспечить, изменяя мощность трехфазной дуги в момент окончания сварки по зависимости  $y=k/(x+b)+c$ .
4. Разработана технология заварки кратера, включающая реализацию предложенной зависимости изменения мощности, в момент окончания сварки, и подключение присадочной проволоки к средней фазе трехфазного источника питания.

## Список используемой литературы

1. Бернадский, В.Н. Сварочное производство и рынок сварочной техники в современной экономике [Текст]. /В.Н. Бернадский, О.К. Маковецкая//Автоматическая сварка. – 2007 - №1. – С. 19 – 22.
2. Рязанцев, В.И. Аргодуговая заварка дефектов литья из магниевых сплавов [Текст]. /В.И. Рязанцев, Ю.Л. Скорняков, В.В. Тихонов//Сварочное производство – 1974 - №4 – С.35-41.
3. Ельцов, В.В. Проблемы восстановления эксплуатационных свойств деталей машин из легких сплавов[Текст]. /В.В. Ельцов.//Инженер-технологический. – 2002 - №2. – С. 14 – 15.
4. Ardentov, V.V. Investigation of formation regularities of weld pool crater during arc welding of titanium alloys with nonconsumable electrode./V.V. Ardentov, I.V. Suzdalev, B.M. Berezovsky//Titanium: Science and Technology. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. [Oberusel, Sept. 10-14, 1984]. – 1984 – vol.2 – p. 839-843.
5. Musthy, M. TIG Welding STB 5101 magnesium alloy.// Metall constr.- 1985- №6- p.213-231.
6. Riparazione mediante saldatura di seti di magnesio per applikationi aironantichi «Alluminio» -1979 -№4, - p. 175-177.
7. Никифоров, Г.Д. Условия возникновения пор при сварке алюминия и его сплавов [Текст]. /Г.Д.Никифоров, А.Г. Махортова// Сварочное производство –1961- №3 - С. 8...11.
8. Никифоров, Г.Д. О мерах борьбы с пористостью при сварке [Текст]. /Г.Л. Никифоров, С.А. Силантьев, Г.Е. Каипов// Сварочное производство – 1963 - № 1 - С.13-16.
9. Макаров, В.И., Сварка магниевых сплавов [Текст]. /В.И. Макаров, Ю.Н. Скачков; М. : Машиностроение - 1972 - 120 С.
10. Магниевые сплавы. Справочник,Т.2 // Под .ред.М,Б,Альтмана -М. : Металлургия - 1978 - 295 С.

11. Щербак, В.В., Исправление микродефектов литья алюминиевых сплавов [Текст]. /В.В. Щербак, Б.И. Шнайдер//Автоматическая сварка –1974 - №5 - С.34-36.
12. А.С.№ №804835. Способ заварки дефектов. [Текст] / Г.И. Чепурнов. Опубл. – БИ- №6 - 1981.
13. Заявка 60-152371 (Япония), Способ дуговой заварки отверстий [Текст]. /Мацуи Хитоси. Реф.:Отд.вып.63 – 1986 - №9 - (9.63.272).
14. Заявка 60-33881 (Япония). Ремонт отливок из магниевых сплавов с помощью сварки [Текст] . /ТанакаК., Фуруканэ К., Реф. : Отд.вып.63 - 1986 - №4- (4.63.741).
15. Заявка 57-58992 (Япония). Способ ремонтной сварки. /Кавагути Сэйити, Наяма Сатосуко. Реф.: Отд. вып. 63, 1984, №5 (5.63.448).
16. Столбов, В.И., Ремонт отливок из магниевых сплавов с помощью трехфазной дуги [Текст]. /В.И. Столбов, В.В. Ельцов// Сварочное производство – 1984 - №2 - С.40-41.
17. Столбов, В.И.. Особенности технологии ремонта отливок из магниевых сплавов [Текст]. /В.И. Столбов, В.В. Ельцов, Ю.Ф. Зотов// Сборник докладов 2-ой Всесоюзной конференции «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». - Киев.:1985 - С.152...154.
18. Столбов, В.И., Влияние технологических подкладок на формирование корня шва при ремонтной сварке отливок из сплава МЛ10 [Текст]. /В.И. Столбов, В.В. Ельцов//Сварочное производство – 1982 - №4 - С.34-36
19. Ельцов, В.В., Особенности ремонтной сварки изделий из магниевых сплавов трехфазной дугой в повторно-кратковременном режиме [Текст]. /В.В. Ельцов, И.А. Олейник, В.Ф. Матягин// Сварочное производство- 1989 - №6 - С.10-12.
20. Оботуров, В.И., Некоторые особенности образования и разрушения окисных пленок при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов [Текст]. /В.И. Оботуров, Ю.Н. Толкачев// Сварочное производство – 1974 - № 11 – С.26...29.

21. Никитин, А.В. Влияние скорости охлаждения сварных пластин на свойства соединения сплава АМгб [Текст]. /А.В. Никитин, Д.М. Рабкин// Автоматическая сварка. – 1964г. - №8 – С. 21 – 25.
22. Раямяки, П.Н. Определение основных характеристик температурного поля для оценки типа затвердевания металла шва при сварке плавлением. [Текст] /П.Н Раямяки, В.Л. Кархин, П.Н. Хомич//Сварочное производство. – 2007 - №2. – С. 3 – 7.
23. Березовский, Б.М. Давление дуги. Дефекты сварных швов, перенос электродного металла [Текст]. /Б.М. Березовский. //Том 3- Издательство ЮУрГУ – Челябинск – 2003г. – С. 485.
24. Киселев, С.Н. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов[Текст] . / С.Н. Киселев, В.А. Хаванаов, В.В. Роцин, В.И. Таран – М.: Машиностроение - 1972. – 175 С.
25. Руссо, В.Л. Дуговая сварка в инертных газах [Текст]. /В.Л. Руссо; Л.:Судостроение. – 1984 –118 С.
26. Patent JP58199840 Japan, C22C21/10. Al-Zn-Mg Alloy for welded structure with low crater crack sensitivity./Sugiyama, Sadahiko; Sumitomo light metal IND LTR. - JP 1982000084363; filing date 05/19/1982; publication date 11/21/1983.
27. Новожилов, Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах [Текст]. /Н.М. Новожилов; М. :Машиностроение – 1979 – С. 230.
28. Суздаев, И.В. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры кратера сварочной ванны и толщину жидкой прослойки под дугой [Текст]. /И.В. Суздаев, Б.М. Березовский, В.К. Прохоров //Сварочное производство. – 1988г. - №8 – С. 35-36.
29. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка изделий из сплавов магния и алюминия трехфазной дугой. [Текст] /В.В. Ельцов; Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук – ТГУ,Тольятти - 2002. – С. 495.

30. Ищенко, А.Я. Влияние состава защитных газов на технологические характеристики дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом [Текст]. /А.Я. Ищенко, В.П. Будник, А.Г. Покляцкий, А.А. Гринюк// Автоматическая сварка. – 2000 - №2 – С. 19-25.
31. Ельцов, В.В. Формирование усадочного кратера при реализации линейного спада тока в момент окончания сварки [Текст]. / В.В. Ельцов, О.А. Дитенков, А.С. Зеленков, П.С. Харитонов // Проведение научных исследований в области машиностроения. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Часть 1. Тольятти, 2009. – С. 180-184.
32. Dennis Klingman. Learning to use new GTAW Technology.//American Welding Society. Welding Journal. – Copyright 2001 - №4
33. Tony Anderson. Special Equipment Improves Aluminum Weld Quality. – 2001 – №11.
34. А. с. 1311886 СССР, МКИ В23К9/00. Способ регулирования процесса дуговой сварки [Текст] ./Б.М. Березовский, И.В. Суздаев// № 3535543/31-27; заявл. 10.01.1983г.; опубл. 23.05.1987г., Бюл. №19//Открытия. Изобретения. – 1987г. - №19.
35. Дилигенский, Н.В. Математические модели подвижных тепловых полей концентрированных источников энергии [Текст]. /Н.В. Дилигенский, В.З.Чертков, Ю.В. Михеев//В кн – Управление распределенными системами с подвижным воздействием. – М. : Наука – 1979 –187 с.
36. Рабинович, И.Я. Расчет тепловой мощности трехфазной дуги при сварке неплавящимися электродами в аргоне [Текст]. /И.Я. Рабинович, И.В. Вавуло// Сварочное производство. – 1975 – №2. – С. 5-9.
37. Ельцов, В.В. Особенности воздействия сварочной дуги на поверхность металла при наплавке изделий из алюминиевых сплавов [Текст]. /В.В. Ельцов //Технология машиностроения. – 2002 - №2. – С. 65-69.
38. Столбов, В.И. Сварочная ванна: Монография [Текст]. /В.И. Столбов//Тольятти. : ТГУ – 2007 –147с.

39. Ельцов, В.В. Влияние разделения теплового потока трехфазной сварочной дуги на форму и размеры сварочной ванны [Текст]. / В.В. Ельцов, А.С. Зеленков, О.А. Дитенков, П.С. Харитонов // Проведение научных исследований в области машиностроения. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Часть 1. Тольятти, 2009. – С. 184-187.
40. Ельцов, В.В. Анализ источников питания для сварки изделий из легких сплавов [Текст]. / В.В. Ельцов, П.С. Харитонов, О.А. Дитенков, А.С. Зеленков // Проведение научных исследований в области машиностроения. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Часть 1.- ТГУ.Тольятти - 2009. – С. 141-143.
41. Борисоглебский, Ю.В. Металлургия алюминия [Текст]. / Ю.В. Борисоглебский, Г.В. Галевский, и др.// Новосибирск. : Наука. Сибирская издательская фирма РАН - 1999 – 437 С.
42. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка изделий из сплавов магния и алюминия трехфазной дугой [Текст]. /В.В. Ельцов//Ремонт, восстановление и модернизация. – 2005 - № 9 – С. 6-12.
43. Столбов, В.И. Источник питания трехфазной дуги с программируемым изменением тока [Текст]. /В.И. Столбов, В.В. Ельцов, И.А. Олейник, В.Ф. Матягин// Сварочное производство –1990 - №11- С.24-26.
44. Ельцов, В.В. Изменение мощности трехфазной дуги в режиме on-line [Текст]. / В.В. Ельцов, О.А. Дитенков, П.А. Сазонов, В.В. Кочкин // Сварочное производство - 2010 - № 3. – С. 26- 30.
45. Росстат РФ опубликовал данные о рынке сварочного оборудования [Электронный ресурс] : [офиц. Сайт]. – 2018 – URL: <http://center-svarki21.ru/novosti/rosstat-rf-opublikoval-dannyye-o-rynke>. Свободный. – Загл. с экрана.