

1566790

На правах рукописи

Ворончук Сергей Дмитриевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПО СЛОЮ ФЛЮСА.

Специальность 05.03.07. - Оборудование и технология
лазерной обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

С.В. Ворончук

Москва - 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Григорьянц А.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Чернышов Г.Г.
кандидат технических наук
Блинков В.В.

Ведущее предприятие:

ОАО "ВИЛС"

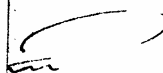
Защита диссертации состоится "22" июня 2000 г. в
___ часов на заседании диссертационного совета К 053.15.03 в
Московском государственном техническом университете им.
Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул.,

в 1 экз., заверенный печатью,
адресу.
Поместиться в библиотеке МГТУ им.

19-63

2001 . 1997 г.

1566790

 Гирш В.И.

5,200000

Объем 1 п. л. Заказ № 33

Актуальность проблемы. Повышение требований к сварным соединениям при производстве ответственных изделий аэрокосмической техники типа оболочковых конструкций, выполненных из алюминиевых сплавов, таких, как АМг6 и 1420, поставило ряд проблем, поскольку комплекс физико-химических свойств создает неблагоприятные условия для сварки и увеличивает вероятность образования ряда дефектов типа пор, горячих трещин и оксидных включений в металле шва и околошовной зоне, ведущих к большому проценту отбраковки изделий. При дуговой сварке возникающая значительная усадка, а также высокий коэффициент линейного расширения приводят к существенным остаточным деформациям, что увеличивает вероятность искажения габаритных размеров конструкции (закручивание, укорочение, местное вспучивание), снижая ее технологичность. Это отрицательно сказывается на эксплуатационных показателях, и в общем недопустимо при сварке изделий аэрокосмической техники.

Одним из путей решения ряда проблем сварки плавлением, наряду с развитием дуговых способов, является применение высококонцентрированного источника энергии – лазерного луча, позволяющего повысить технологические возможности сварки.

Из литературного анализа установлено, что высокая концентрация энергии при лазерной сварке позволяет резко интенсифицировать процесс и тем самым уменьшить количество вводимой энергии, это приводит к уменьшению вероятности образования вышеперечисленных дефектов. Однако, особенностью лазерной сварки соединений из алюминиевых сплавов является наличие критической плотности мощности излучения, т.е. скачкообразный переход к процессу глубокого проплавления с образованием парогазового канала минуя теплопроводностный режим. Это ведет, с одной стороны, к необходимости применения формирующих подкладок для устранения отрицательного действия парогазового канала и прожогов, вследствие высокой жидкотекучести. С другой – ограничивает возможность использования парка лазерного оборудования ниже 2,5 кВт, наиболее дешевого

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1566790

Ворончук С.Д. Разработка м

и распространенного в нашей стране, что делает необходимым повышать эффективность процесса лазерной сварки.

Рассмотрев и проанализировав возможности повышения эффективности процесса лазерной сварки, был выбран способ с использованием активных составляющих флюсов в комбинации с поглощающими покрытиями. Однако, до настоящего времени не разработаны флюсы для лазерной сварки алюминиевых сплавов и не проведена оценка их влияния на эффективность и свойства соединений.

На основании вышесказанного был сделан вывод об актуальности разработки флюсов для CO_2 лазерной сварки Al сплавов.

Цель работы. Повышение эффективности процесса лазерной сварки алюминиевых сплавов и улучшения свойств за счет применения флюса.

Методы исследования. Основной объем исследования был выполнен на CO_2 -лазерах "Негаус" и GTE-975 фирмы "Spectra Physics". Предварительные исследования проводили на установке "Квант-15". Модельные эксперименты по измерению отражательной и пропускательной способности компонентов флюса проводились с использованием лазера ИЛГН-704. Измерение падающего излучения осуществлялось с помощью измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н. Рентгеноконтроль осуществляли на установке РУП-150/300-10. Металлографические исследования выполнялись на оптических микроскопах МБИ-15 и Neophot-21. Склонность к образованию горячих трещин при сварке оценивалась по пробам ЛТП МВТУ им. Баумана (ГОСТ 26389-84 и ОСТ 26-2090-81). Природу образования трещин изучали на сканирующем электронном микроскопе "Jeol". Испытания механических свойств сварных соединений проводили по ГОСТ 6996-66.

Научная новизна. 1. Установлено, что основными критериями выбора состава флюса для лазерной сварки алюминиевых сплавов являются:

- высокий коэффициент поглощения излучения (выше чем у основного металла);

- высокая поверхностная активность взаимодействия с гидротированной оксидной пленкой;

- высокий коэффициент поверхностного натяжения (для поддерживающего эффекта при формировании шва);

- температура плавления флюса, которая должна быть ниже (на 20 °С) температуры плавления основного металла.

Эти эффекты в частности могут быть достигнуты сочетанием компонентов дисперсностью не более 40 мкм, в состав которых входит графит (2-20% - нижний предел ограничен снижением коэффициента поглощения, верхний - увеличением температуры) порошки металлов (не менее 5%), которые способствуют улучшению формирования шва и увеличивают коэффициент поглощения, и фториды щелочных и щелочноземельных металлов (остальное), которые способствуют увеличению коэффициента поглощения излучения, увеличивают поверхностную активность, обеспечивают высокий коэффициент поверхностного натяжения расплава флюса.

2. Установлено, что применение флюса для лазерной сварки алюминиевых сплавов приводит к перераспределению баланса энергии, это связано с увеличением поглощательной способности ($A > 0,5$) и удалением оксидной пленки. В результате:

- достигнуто увеличение полного к.п.д. процесса на 21%;

- снижена граница критической плотности мощности, характерная для лазерной сварки алюминиевых сплавов, т.е. обеспечено не скачкообразное, а плавное увеличение глубины проплавления с ростом вводимой энергии.

Практическая ценность. 1. Разработан состав флюса, позволяющий: 1) повысить эффективность процесса лазерной сварки; 2) снизить порообразование; 3) улучшить формирование шва; 4) повысить прочность и пластичность сварных швов.

2. Составлены технологические рекомендации лазерной сварки алюминиевых сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Li по слою активирующего флюса.

Апробация работы. Основные положения работы и результаты исследований докладывались на отраслевом семинаре "Современные тенденции развития лазерных систем для технологичес-

ких применений", Шатура 1998 г; на научно-техническом семинаре "Сварочные, лазерно-плазменные и вакуумно-технологические процессы и оборудование", Москва 1998 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Выполнена на 154 машинописных листах, содержит 40 рисунков, 8 таблиц, 110 наименований (в том числе 21 иностранных) используемых литературных источников и приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены проблемы сварки оболочковых конструкций аэрокосмической техники из сплавов АМг6 (система Al-Mg) и 1420 (система Al-Mg-Li) толщиной до 2,5 мм.

Показано, что разработанные к настоящему времени технологии дуговой сварки плавлением алюминиевых сплавов позволяют получать качественные сварные соединения. Однако расширение номенклатуры промышленных изделий, выполняемых из высокопрочных алюминиевых сплавов, приводит к усложнению и вместе с тем удорожанию технологии сварки, включающей подготовительные и послесварочные операции и, вместе с тем, не исключают появления ряда дефектов.

Из проведенного анализа существующих способов сварки конструкций из алюминиевых сплавов сделан вывод, что большинство проблем можно решить применением высококонцентрированного источника энергии, в частности лазерного луча. Лазерный луч, применяемый в качестве инструмента для сварки алюминиевых сплавов, позволяет получать швы с узкой зоной термического влияния, высоким коэффициентом формы шва и высокой производительностью.

Анализ отечественных и иностранных публикаций по лазерной сварке алюминия и его сплавов выделил ряд проблем, позволивших сделать вывод о необходимости поиска путей повышения эффективности процесса. Среди них можно выделить проблему, связанную с применением для сварки алюминиевых сплавов

менее дорогостоящих и наиболее распространенных CO_2 -лазеров мощностью до 2,5 кВт.

Одним из путей повышения эффективности процесса лазерной сварки алюминиевых сплавов является применение поглощающих покрытий. Основной положительный эффект заключается в увеличении таких параметров сварки, как глубина проплавления и/или скорость, без увеличения мощности, что повышает эффективность воздействия лазерного излучения на материал. Проведенный эксперимент на CO_2 -лазерной установке "Негаус" с использованием флюсов, разработанных для дуговой сварки и пайки алюминия и его сплавов позволил увеличить эффективность воздействия лазерного излучения. Однако эти флюсы в полной мере не учитывают специфику лазерного воздействия. Для получения оптимального состава флюса для лазерной сварки были поставлены следующие задачи исследования:

1. Выбор компонентов флюса для лазерной сварки;
2. Исследование принципиальной технологической схемы подачи флюса, подготовительных операций и режимов процесса лазерной сварки с исследуемым составом, обеспечивающих максимальную эффективность;
3. Исследование влияния флюса на свойства сварных соединений;
4. Разработка технологических рекомендаций по лазерной сварке алюминиевых сплавов с использованием разработанного флюса.

Вторая глава посвящена исследованию и выбору компонентов основы флюса для CO_2 -лазерной сварки алюминиевых сплавов.

Изучив механизм действия флюсов и поглощающих покрытий при сварке плавлением, пайке и лазерной термообработке алюминия и его сплавов были сформулированы требования к флюсу для лазерной ($\lambda=10,6$ мкм) сварки алюминиевых сплавов:

1. Способствовать снижению потерь концентрированного лазерного излучения на отражение и рассеивание;
2. Способствовать удалению оксидных пленок с поверхности металла шва и уменьшать количество дефектов в сварочном

шве (пор. включений), препятствуя их попаданию в сварочную ванну;

3. Обладать высоким значением поверхностного натяжения расплава флюса;

4. Обладать температурой плавления более низкой (на 20°C), чем основной металл;

5. Способствовать качественному формированию сварного шва (механические свойства, герметичность);

6. Не должен изменять своих свойств при хранении (минимальная гигроскопичность);

7. Способствовать снижению требований на сборку под сварку.

Данные требования обосновывают выбор компонентов флюса со следующими свойствами:

1. С высоким коэффициентом поглощательной способности, и низкими коэффициентами отражения и рассеивания излучения ($\lambda = 10,6$ мкм);

2. С высокой активностью взаимодействия с поверхностью деталей;

3. С высоким коэффициентом поверхностного натяжения;

4. Выбор состава с температурой плавления более низкой (на 20°C), чем основной металл.

Несмотря на все многообразие флюсов для сварки плавлением и пайки Al и его сплавов, их основу составляют галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, которые прозрачны или полупрозрачны в ИК-области. Например, кристаллические NaCl и KCl в высшей степени прозрачны для длины волны $\lambda=10,6$ мкм. Применение этих материалов в качестве компонентов может привести к снижению поглощения ИК-излучения флюсом. Для увеличения поглощательной способности при лазерной термообработке алюминиевых сплавов используют следующие материалы: коллоидный графит, фосфаты ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$ и т.д.), оксиды металлов (ZnO , Al_2O_3 , CuO , SiO_2 и т.д.), порошки металлов (Cu, W, Ti, Si и т.д.).

Общезвестно, что лазерное излучение, падающее на поверхность, частично отражается, поглощается, рассеивается и

проходит через материал. Поэтому оптические свойства отобранных химических веществ определялись по методике измерительной сферы (измерение коэффициентов отражения и рассеивания материала) и на просвет. Все исследуемые порошковые материалы имели размер частиц не более 40 мкм (просеивались через сито ГОСТ 6613-73). Проведенные исследования по оптическим характеристикам показали, что в качестве вероятных компонентов флюса предпочтительно использовать графит (С), порошки металлов (Cu, W, Ti, Si и т.д.) и фториды щелочных и щелочноземельных металлов.

Активность определялась термодинамическими расчетами и по показателю доли фтора во флюсе. Протекание процессов взаимодействия жидкого металла с атмосферой принято оценивать изобарно-термодинамическим потенциалом. Проведенный термодинамический анализ реакций компонентов флюса с алюминием и адсорбированной на его поверхности влагой показал, что во флюс необходимо вводить фтористые натрий, калий, литий, магний. Другим аспектом взаимодействия флюса с поверхностью деталей из алюминиевых сплавов является адсорбционное вытеснение ионов $(OH)^-$ ионами F^- . Можно предположить, что наиболее эффективными в этом процессе будут соли с большим содержанием фтора. Для проверки влияния мольной доли фтора во флюсе были выбраны два известных флюса АФ-4А и ТФА-5 с различной величиной в них мольной доли фтора. Без флюса и с применением выбранных флюсов был проведен эксперимент, который показал, что в качестве компонентов флюса, наиболее предпочтительными следует считать фтористые калий, литий и магний.

Стремление поверхности жидкости сократиться до минимальной площади происходит из-за неуравновешенности сил молекулярного притяжения. Уменьшение межфазного натяжения на границе металл-шлак может привести к увеличению провисания проплава и даже к прожогу, что нежелательно для сварных соединений, выполняемых без применения формирующих подкладок. Поэтому для получения флюса, обладающего поддерживающим эффектом, необходимо в его составе иметь компоненты с высоким поверхностным натяжением. У хлоридов величина поверхностного

натяжения ниже чем у фторидов.

Были проведены эксперименты для проверки влияния состава флюса на его поверхностные свойства. Критериями оценки коэффициента поверхностного натяжения являлась способность состава флюса формировать лицевую и корневую поверхности шва стыкового соединения, т.е. по геометрическим параметрам формы шва. Экспериментально подтверждено, что для улучшения формирования стыкового сварного соединения в состав флюса необходимо включать фториды щелочных и щелочноземельных металлов.

Температура плавления композиции исследуемого состава флюса зависит от исходных компонентов и их процентного содержания. К моменту образования сварочной ванны флюс должен находиться в жидком состоянии, т.е. температура его плавления должна быть ниже температуры плавления металла не менее, чем на 20 °C, что обеспечит хорошую смачиваемость кромок металла шва. Таким образом, для быстрого смачивания поверхности свариваемых кромок и удаления оксидных пленок температура плавления флюса должна быть не выше 620 °C.

На основании проведенных исследований был разработан флюс для CO₂-лазерной сварки алюминиевых сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Li. Состав флюса обеспечивает приемлемую температуру плавления (T_{пл}=619 °C), высокую активность, которая заключается в содержании доли фтора во флюсе ($X_f=44,5\%$) и хорошую формирующую способность шва.

Третья глава посвящена разработке основ технологии лазерной сварки, которая включает схему подачи флюса, подготовительные операции и режимы лазерной сварки. Исследования проводились на CO₂-лазерной установке фирмы "Spectra Physics" GTE-975.

При выборе способа подачи флюса с учетом количества подаваемого материала рассмотрены два следующих варианта: а) подача непосредственно в зону сварки одновременно с защитным газом; б) предварительное нанесение флюса на поверхность кромок. Основными критериями эффективности служила площадь

поперечного сечения шва и глубина проплавления.

В результате максимальная глубина проплавления в первом случае оказалась равной 1,4 мм при удельном расходе флюса 0,9 г/с. При этом общий расход флюса составил 36 г на погонный метр. Во втором – 2,7 мм при толщине слоя флюса 0,2 ± 0,01 мм, общий расход флюса составил 5 г на погонный метр. В то же время при сварке без флюса глубина проплавления составляла 0,3 мм. По результатам исследований наиболее эффективным оказался способ с предварительным нанесением флюса на поверхность кромок. По сравнению со сваркой без флюса, достигается повышение эффективности на 21%, а с подачей флюса непосредственно в зону сварки – на 16%. Эффективность оценивалась по величине полного к.п.д. процесса:

$$\eta_1 = (V_{св} F_{пр} S_{пл}) / P.$$

Здесь $V_{св}$ – скорость сварки; $F_{пр}$ – площадь поперечного сечения шва; P – мощность лазерного излучения; $S_{пл}$ – удельное объемное теплосодержание расплавленного металла шва.

Одним из главных условий, влияющих на качество сварного соединения, является сборка соединений под сварку. Были проведены исследования чувствительности сварных соединений при сварке с флюсом к технологическим отклонениям, неизбежно возникающим при проведении сборочных операций под сварку, т.е. допустимые величины зазоров и депланаций (смещений). Объектом испытаний явились стыковые сварные соединения размером 100х50х3 из алюминиевых сплавов АМг6 и 1420. Критерием качества служило временное сопротивление статическому разрушению.

В ходе экспериментов выявлена повышенная чувствительность механических свойств образцов к изменению величины моделируемого дефекта в виде зазора. Снижение статической прочности при увеличении величины зазора практически не наблюдалось на обоих сплавах в следующих случаях: а) при сварке без флюса зазор составлял до 3,3 % толщины детали; б) при сварке с применением исследуемого состава – до 13,2 %. Последующее увеличение зазора в том и другом случае на 3-6 % приводило к существенному снижению прочности соединения. Это

в первую очередь связано с ослаблением шва. Снижение статической прочности при увеличении зазора объясняется нарушением формирования соединения. Дальнейшее увеличение зазора приводило к несплавлению кромок.

В процессе проведения экспериментов с моделируемым дефектом в виде депланации кромок фокус находился на поверхности нижней пластины. Были получены следующие результаты: а) при сварке без флюса снижение механических свойств при уровне депланации до 13 % не наблюдалось, дальнейшее увеличение депланации приводит к резкому снижению статической прочности; б) при сварке с применением флюса исследуемого состава - при уровне депланации, не превышающим 30 % на обоих материалах, получено незначительное снижение статической прочности стыковых соединений. При сварке без флюса с увеличением депланации кромок происходило нарушение формирования шва, что и повлияло на прочностные свойства соединения.

Для разработки технологических рекомендаций по лазерной сварке по слою флюса необходимо исследовать влияние основных режимов сварки (мощности излучения (P), скорости сварки ($V_{св}$) и заглубления фокуса (Δf)) на геометрические параметры проплавления. В ходе проведения экспериментов установлено, что:

1. С увеличением мощности в диапазоне 1,6 кВт $\leq P < 2,4$ кВт при постоянной скорости сварки глубина проплавления возрастает. При сварке без флюса зависимость носит скачкообразный характер от значений 0,25–0,5 мм до 3 мм, в то время как применение флюса позволило плавно увеличивать глубину проплавления. Коэффициент формы шва при сварке без флюса изменялся в пределах 0,3–0,4 при теплопроводностном режиме, 1,0–1,2 в режиме глубокого проплавления. При сварке с исследуемым составом флюса коэффициент формы шва изменялся в пределах 1,0–1,2. В результате расширяется номенклатура изделий и снижаются технологические трудности сварки малых толщин, в частности отпадает необходимость подкладок.

2. С увеличением скорости в диапазоне 75 м/ч $\leq V_{св} < 125$ м/ч при постоянной мощности отмечено резкое снижение глу-

бины проплавления при сварке без флюса в диапазоне скоростей 75-100 м/ч. в то время как применение флюса позволило плавно снижать глубину проплавления.

3. Зависимости глубины проплавления от заглубления фокуса относительно поверхности пластины в диапазоне 0мм Δf -2мм при постоянных мощности и скорости сварки, при сварке с флюсом и без флюса имеют идентичный характер. Полученные данные показали максимум глубины проплавления (толщина 3 мм) при заглублении фокуса $\Delta f = -1$ мм. При отклонении от оптимального положения на 1-2 мм эффективность резко падает.

Анализ полученных результатов позволил сформулировать технологические рекомендации по выбору способа подачи флюса, подготовке образцов к сварке, подбору режимов для исследуемого способа лазерной сварки.

Четвертая глава посвящена исследованию свойств сварных соединений, полученных способом лазерной сварки по слою флюса исследуемого состава. На основании требований, предъявляемых к изделиям аэрокосмической отрасли при разработке данной технологии необходимо провести исследование влияния флюса на структуру и основные свойства сварных соединений.

Эксперименты по исследованию влияния флюса на изменение структуры и характер расположения и размер оксидных частиц в шве производился на сварных соединениях образцов из сплавов АМг6 и 1420 толщиной 3 мм. Наличие на поверхности алюминиевых сплавов АМг6 и 1420 относительно толстой оксидной пленки обуславливает повышенную склонность к образованию в литой зоне сварного шва оксидных включений и др. дефектов. Для проверки этого факта пластины с подготовленной по стандартной технологии поверхностью, выдерживались при комнатной температуре (20 °С) и при температуре 400 °С в течении 3 часов. Сварку производили без подкладок "на весу" на CO₂-лазерной установке "Негаус". После сварки производился анализ структуры и определялась протяженность оксидных включений в сварных швах.

Результаты рентгеноконтроля на установке РУП-150/300-10 позволили установить:

1. При сварке без флюса, с подготовкой образцов к сварке при температуре 20 °С, относительная протяженность оксидных включений составила: на АМг6 около 38%, на 1420 около 40% на 100 мм шва, а с предварительной выдержкой при температуре 400 °С качественное формирование шва на обоих сплавах отсутствовало, в виду образования оксидной пленки большой толщины.

2. Применение флюса обеспечивает получение швов без оксидных включений на образцах АМг6 и 1420, подготовленных по обоим вариантам.

Исследования структуры показали, что в швах наблюдается мелкодисперсная столбчато-дендритная структура. Выделение эвтектики и оплавление границ зерен в непосредственной близости от шва не наблюдалось.

Предварительное теоретическое рассмотрение вопроса порообразования в сварных соединениях показало, что одним из путей его снижения является применение лазерного луча при сварке алюминиевых сплавов. Снижению порообразования также способствует применение флюса с большей долей фтора, более эффективно взаимодействующего с водородом, находящимся на поверхности свариваемых кромок. Доказательство этих фактов было подтверждено серией экспериментов.

После сварки образцы подвергались рентгеноконтролю на установке РУП-150/300-10. Результаты показали, что при сварке без флюса относительная протяженность дефектов (несплавлений, пор) составила: на образцах из сплава АМг6 около 45% (в т.ч. пор около 7%), на 1420 около 50% (в т.ч. пор около 10%) на 100 мм шва. Применение флюса позволило снизить пористость на АМг6 до 0,7%, а на 1420 до 2% на 100 мм шва.

Результаты экспериментов по влиянию флюсов на склонность сварных соединений сплавов АМг6 и 1420 к образованию горячих трещин (по ГОСТ 26389-84) на технологических пробах (по методике ЛТП МВТУ им. Баумана) позволили сделать вывод, что применение флюса не снижает технологической прочности сплавов АМг6 и 1420.

Исследования коррозионной стойкости включали:

1. Исследования общей коррозионной стойкости сварных соединений при полном погружении в 3% раствор NaCl в течение 90 суток, коррозионная стойкость сварных соединений оценивалась по изменению механических свойств в результате коррозии;

2. Исследование коррозионной активности флюса на образцах сплавов АМг6 и 1420 с нанесенными флюсами при полном погружении в 3% раствор NaCl в течение 90 суток, коррозионная стойкость образцов оценивалась по характеру и глубине коррозионных поражений;

Перед коррозионными испытаниями сварные соединения подготавливались ^{по}трем вариантам :

1. Флюс после сварки не удалялся,
2. Флюс после сварки был смыт горячей (60-80 °С) проточной водой в течение двух минут,

3. Образцы после сварки были подвернуты травлению в 4-6%-ном растворе NaOH в течение 2 - 3 минут при температуре 60 °С и осветлению в 20%-ном растворе HNO₃ в течение 2 - 3 минут при 20 °С.

В процессе испытаний коррозионной активности сравнивали влияние флюсов АФ-4А, ФА-1Т и ТФА-5, разработанных для дуговой сварки алюминиевых сплавов, и флюса исследуемого состава. В результате было установлено, что флюсы АФ-4А и ФА-1Т, нанесенные на поверхность пластин из сплава АМг6 и 1420, вызывают появление коррозионных поражений. На пластинах с применением флюса ТФА-5, исследуемого состава и без флюса коррозионных поражений не обнаружено.

Комплекс испытаний механических свойств сварных соединений включал в себя определение предела прочности при статическом растяжении и угла загиба при статическом изгибе.

Анализ полученных результатов показал:

1. Отмечено повышение пластичности сварных швов, выполненных с применением исследуемого состава флюса.

2. Применение исследованных флюсов не приводит к заметному снижению механических свойств сварных соединений сплавов АМг6 и 1420 после испытаний в коррозионно активной сре-

де.

3. Склонности к межкристаллитной коррозии на шлифах, изготовленных из образцов после коррозионных испытаний, как при сварке без флюса, так и с флюсом исследуемого состава, не обнаружено

На основании проведенных исследований составлены технологические рекомендации по лазерной сварке с флюсом исследуемого состава алюминиевых сплавов систем Al-Mg, Al-Mg-Li.

Приложения включают сведения, носящие прикладной характер. Это прежде всего технологические рекомендации по лазерной сварке с флюсом исследуемого состава алюминиевых сплавов систем Al-Mg, Al-Mg-Li толщиной до 2,5 мм. Также представлены некоторые технические и эксплуатационные характеристики отечественного лазерного сварочного оборудования, справочные данные по фокусирующим системам. Кроме того, включены вопросы организации подготовительно-сборочных операций свариваемых изделий, хранения, приготовления и схема нанесения флюса, конструктивные схемы газовой защиты в инертных газах, методы контроля качества, требования к организации сварочного участка, заготовительному производству и т.п.

Общие выводы и результаты работы

1. Применение наиболее распространенных в промышленности технологических CO_2 -лазеров мощностью до 2,5 кВт для сварки алюминиевых сплавов ограничено из-за малой эффективности процесса, что связано с высокой отражательной способностью ($R \approx 0,90-0,9$) и наличием оксидной пленки. Одним из перспективных направлений расширения возможностей маломощных технологических лазеров является применение активирующих флюсов.

2. В состав разработанного флюса для CO_2 -лазерной сварки алюминиевых сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Li включены следующие компоненты дисперсностью не более 40 мкм, в состав которых входит графит (2-20% нижний предел ограничен сниже-

нием коэффициента поглощения, верхний увеличением температуры), порошки металлов (не менее 5%), которые способствуют улучшению формирования шва и увеличивают коэффициент поглощения, и фториды щелочных и щелочноземельных металлов (остальноф), которые способствуют увеличению коэффициента поглощения излучения, увеличивают поверхностную активность, обеспечивают высокий коэффициент поверхностного натяжения расплава флюса.

3. Разработанный флюс обладает высоким коэффициентом поглощательной способности ($A > 0,5$), высокой активностью, которая выражается в содержании фторидов щелочных и щелочноземельных металлов с долей фтора во флюсе ($X_f = 44,5\%$), приемлемой температурой плавления ($T_{пл} = 619^\circ \text{C}$), и хорошей формирующей способностью шва.

4. Применение флюса в виде шликерного покрытия толщиной 0,2 мм для сварки сплавов АМг6 и 1420 толщиной 3 мм обеспечивает:

- повышение эффективности процесса лазерной сварки (полного к.п.д. на 21%), это связано с увеличением коэффициента поглощательной способности ($A > 0,5$) и удалением оксидной пленки.

- отсутствие критической пороговой мощности, характерной для лазерной сварки соединений из алюминиевых сплавов. Это обеспечивает не скачкообразное, а плавное увеличение глубины проплавления с ростом вводимой энергии лазерного излучения.

- позволяет снизить уровень пористости по сравнению со сваркой без флюса с 7% до 0,7% на АМг6 и с 10% до 2% на 1420.

- позволяет повысить уровень отклонений сборки под сварку, при которых не происходит снижение статической прочности в случае, если величина зазора не превышает 13,2 % от толщины (при сварке без флюса она не превышала 3,3 %), а величина смещения кромок 30 % (при сварке без флюса она не превышала 13%). Указанные нормы допустимости дефектов обес-

печивают уровень 80% статической прочности стыковых соединений при условии, что эти соединения выполнены на оптимальных режимах лазерной сварки по слою флюса.

5. Результаты экспериментов по влиянию флюсов на склонность сварных соединений сплавов АМг6 и 1420 к образованию горячих трещин (по ГОСТ 26389-84) на технологических пробах (по методике ЛТП МВТУ им. Баумана) позволили сделать вывод, что применение флюса не снижает технологической прочности сплавов АМг6 и 1420.

6. Испытания коррозионной активности показали:

- применение исследованных флюсов не приводит к заметному снижению механических свойств сварных соединений сплавов АМг6 и 1420 после испытаний в коррозионно активной среде.

- склонности к межкристаллитной коррозии на шлифах, изготовленных из образцов после коррозионных испытаний, как при сварке без флюса, так и с флюсом исследуемого состава, не обнаружено.

7. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации, позволяющие в условиях опытно-промышленного производства организовать технологический процесс лазерной сварки по слою флюса вышеназванных сплавов толщиной до 2,5 мм.

Материалы диссертации отражены в следующих работах:

1. Федоров Б.М., Ворончук С.Д., Андреев О.Л. Лазерная сварка Al-Mg (АМг6) сплава // Лазерные технологии '93: Тез. докл. VI Международной конференции. -Шатура, 1998. -С.82-83.

2. Григорьянц А.Г., Федоров Б.М., Ворончук С.Д. Лазерная сварка алюминиевых сплавов с применением разрабатываемых флюсов // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Москва, 1998. -С. 217-218.