

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Маликова Александра Геннадьевича «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность диссертации.

Создание деталей и узлов из высокопрочных алюминиевых сплавов в аэрокосмической отрасли невозможно без применения неразъемных сварных соединений. Основными условиями, при которых термически упрочняемый алюминиевый сплав используют в создании сложных конструктивных элементов, является высокая производительность сварки, низкие деформации и свойства сварного соединения на уровне основного материала.

Технология лазерной сварки, благодаря высокой концентрации тепловой энергии, позволяет получать узкошовные сварные соединения в алюминиевых и алюминий-литиевых сплавах с бездефектной структурой, однако неблагоприятные структурно-фазовые превращения в литой зоне и зоне термического влияния снижают их механические характеристики на 20 – 50 %. В этой связи, научная разработка комплексной технологии на основе исследования термического цикла лазерной сварки и посттермомеханической обработки (закалка + старение и холодное прессование), призвана обеспечить прочностные свойства сварных соединений (предел текучести, относительное удлинение, временная прочность) близкие или равные исходному материалу в состоянии поставки. В свете сказанного представленная Маликовым А.Г. диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы.

Научная новизна.

1. Результаты исследований замкнутого цикла структурно-фазовых превращений в лазерных сварных соединениях алюминиевых сплавов системы: Al-Cu-Mg; Al-Mg-Li; Al-Cu-Mg-Li с применением синхротронного излучения высокого разрешения.

2. Оптимальные режимы сварки сплавов Д16Т, 1420, 1424, 1441, В-1461, В1469 излучением CO₂-лазера без внешних дефектов, трещин, пор, провисания корня шва.

3. Экспериментально установленный факт, что в лазерном сварном шве сплава системы Al-Cu-Mg-Li после закалки и искусственного старения преобладает упрочняющая фаза θ' (Al₂Cu), в отличие от исходного материала с преобладающей упрочняющей фазой T₁(Al₂CuLi).

4. Результаты малоцикловых испытаний лазерных сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, свидетельствующие о достижении временного сопротивления и предела текучести 93 и 104% соответственно от значений исходного сплава.

Достоверность полученных результатов.

Подтверждается использованием современных аналитических методов исследования структуры и свойств материалов, воспроизводимостью экспериментальных данных, соответствием результатов исследований данным, полученным другими специалистами.

Содержание.

В первой главе приведён обзор современного состояния и проблем создания сварных соединений в алюминиевых сплавах на лазерных технологических комплексах. Диссертантом отмечено, что математическое моделирование не позволяет прогнозировать результаты лазерной сварки по уровню прочности близкому к основному материалу. Также, не достаточно четко установлено влияние структурного состояния и фазового состава сварного шва на механические свойства лазерных сварных соединений.

Вторая глава посвящена выбору современных термически упрочняемых алюминиевых сплавов, их классификации и методам исследований. Лазерная сварка выполнялась на лазерном комплексе «Сибирь» ИТПМ СОРАН. Фазовый состав сплавов исследовали с помощью синхротронного излучения на установке класса «мегасайенс» (ИЯФ СО РАН).

В третьей главе проведены результаты исследования по формированию сварных швов и их характеристик. Металлографические исследования структуры зоны плавления и зоны термического влияния служили основой для оптимизации энергетических условий лазерной сварки изучаемых сплавов. Формирование микроструктуры на границе раздела жидкость – твердое тело оценивали по двум ключевым параметрам, градиенту температуры и скорости кристаллизации. Образцы качественных сварных соединений, полученных в оптимальных режимах были испытаны на механическую прочность (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение). Сделан вывод о необходимости постобработки лазерных сварных соединений из алюминиевых сплавов.

Четвертая глава посвящена оптимизации фазового состава и достижению оптимальных механических свойств благодаря посттермической обработки. Проведен структурный анализ лазерных сварных швов без и с последующей термической обработкой, а также после искусственного старения. В результате показано, что характерные изменения микроструктуры зоны сплавления и зоны термического влияния начинаются при температуре, превышающей 450 °С для всех исследуемых сплавов.

В пятой главе приведено описание испытаний образцов со сварным соединением сплавов В-1461,1441 и 1420 без ТО и после оптимального ТО на малоцикловую усталость. При испытании образцов из исходного сплава прирост деформации на первых циклах нагружения превышает соответствующие значения для сварного соединения в два с лишним раза. Это связано с тем, что в сварном соединении происходит локализация пластической деформации в сварном шве. При дальнейшем нагружении изменения деформации у исходного сплава и у сварного соединения близки, так же, как и предельное количество циклов до разрушения. При циклическом нагружении веерообразные плоские усталостные трещины, поверхность ко-

торых перпендикулярна приложенной нагрузке, образуются вблизи внешних границ шва. Поверхность излома за пределами усталостных трещин является результатом финального разрушения. Лазерные сварные соединения сплава 1441 после ТО выдерживают при тех же условиях в 4 раза большее количество циклов нагружения, чем соединения В-1461 (при $t_{test} = 20^{\circ}\text{C}$ предельное число циклов для 1441 около 27500, а у В-1461-8500).

Шестая глава посвящена изучению механики структурно-фазового состава лазерных сварных соединений. Исследована эволюция структурно-фазового состава лазерных сварных соединений сплава Д16Т системы Al-4,4Cu-1,5Mg до и после оптимальной термообработки. В процессе сварки в шве фазовый состав и распределение легирующих элементов существенно изменяется. В сварочном шве кроме S(Al₂CuMg) формируется стабильная некогерентная фаза θ (Al₃Si). Рост прочности при закалке связан с первыми стадиями процесса распада пересыщенных твердых растворов: с образованием зон ГП и с выделением промежуточных метастабильных θ'' - и S''-фаз (в сплавах Al-Cu-Mg.).

Седьмая глава посвящена обобщению результатов исследований и влиянию легирующих элементов Mg, Si, Li на механику структурно-фазового состава и механические характеристики сварного шва. Влияние процесса закалки существенным образом зависит от состава легирующих элементов, т.е. системы Al-Mg-Li Al-Cu-Li и Al-Cu-Mg. Самой неустойчивой при комнатной температуре структурой в алюминиевых сплавах, имеющих фазовые превращения в твердом состоянии (термически упрочняемых сплавах), является пересыщенный твердый раствор легирующих компонентов в алюминии, концентрация которых может в десятки раз превышать равновесную. Для достижения максимальной прочности термически упрочняемых сплавов необходимо за счет регламентированных нагревов получить некоторую промежуточную структуру, которая соответствует начальным стадиям распада пересыщенного твердого раствора.

Практическая значимость

Достигнутые диссертантом технологические и экспериментально-методические результаты имеют важное народно-хозяйственное значение в отраслях, широко применяющих алюминиевые сплавы. Высоко производительная сварка в труднодоступных местах в сочетании с локальной термической обработкой позволяет получать сварные швы, равнопрочные основному материалу. Основным потребителем представленной технологии являются предприятия, входящие в ПАО «Объединённая авиастроительная корпорация».

Замечания.

1. Экспериментальные исследования на синхротроне ИЯФ СО РАН лазерных сварных образцов изготовленных по разным методам показал, что в сварном шве происходит формирование тройной фазы Si(Al₂MgLi) в результате перитектической реакции, причем частицы этой фазы хаотически располагаются по твердому раствору, однако литий методом EDX-анализа при растровой электронной микроско-

пии не обнаруживается в силу малости сигнала характеристического рентгеновского излучения от легких элементов.

2. В автореферате не указаны методы математического моделирования посредством которых проводились исследования взаимосвязи термического воздействия лазерного излучения со свойствами сварного шва и прочностными характеристиками сварных соединений.

Заключение.

В целом диссертация Маликова Александра Геннадьевича «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерный сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов» актуальна, выполнена на высоком уровне, имеет научную и практическую значимость. Работа Маликова А.Г. соответствует требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, а её автор достоин присвоения ученой степени – доктора технических наук.

Начальник сектора отделения
«Динамика, прочность, надежность»
ФАУ «Центральный институт авиационного
моторостроения им. П.И. Баранова»,
доктор технических наук

Магеррамова Любовь Александровна

Старший научный сотрудник отделения
«Динамика, прочность, надежность»
ФАУ «Центральный институт авиационного
моторостроения им. П.И. Баранова»,
кандидат технических наук

Исаков Владимир Владимирович

Подписи Л.А. Магеррамовой и В.В. Исакова удостоверяю:

Учёный секретарь ФГУП «Центральный институт
авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»,
доктор экономических наук

Екатерина Викторовна

Федеральное автономное учреждение
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»
111116 г. Москва, ул. Авиамоторная, 2. Тел. (495)-362-40-25
vvisakov@ciam.ru www.ciam.ru