

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

диссертационного совета Д 003.035.02 при Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по диссертационной работе Маликова Александра Геннадьевича на тему «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Маликова Александра Геннадьевича посвящена решению одной из актуальных проблем высокотемпературной неравновесной газодинамики, связанной с разработкой научных основ создания неразъемных соединений методом лазерной сварки современных высокопрочных алюминиевых сплавов авиационного назначения, что позволяет отказаться от используемых в настоящее время заклепочных соединений. К моменту начала данной работы прочность сварных соединений составляла 50–80 % от значений исходного сплава, что абсолютно не приемлемо для применения данной технологии в авиа- и ракетостроении.

В диссертации решались следующие задачи:

1. Обоснование научно-технологических принципов оптимального взаимодействия высокоэнергетического лазерного излучения с современными термически упрочняемыми алюминиевыми и алюминиево-литиевыми сплавами систем Al-Cu-Mg, Al-Mg-Li, Al-Cu-Mg-Li, Al-Cu-Li;
  2. Исследование возможностей эффективного управления характеристиками лазерного излучения и определение способов оптимального ввода лазерного луча в зону сварки с целью оптимизации термического цикла сварки и получения бездефектной структуры сварных соединений;
  3. Всестороннее исследование эволюции фазового состава сварного шва на основе современных методов высокоразрешающей электронной микроскопии и впервые – с использованием синхротронного излучения;
  4. Выявление физических механизмов управления структурно-фазовым составом сварного шва, ответственных за получение высокопрочных неразъемных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов;
  5. Разработка методов постобработки сварного соединения с целью повышения его механических характеристик как на основе термообработки (закалка + искусственное старение), так и холодного прессования с разными степенями пластической деформации;
  6. Выполнение оптимизации термической обработки и комплексной оценки механических свойств лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов;
  7. Установление механизма физических явлений при формировании упрочняющих фаз в твердом растворе сварного шва при воздействии мощного лазерного излучения и последующей оптимальной термообработки термически упрочняемых алюминиевых сплавов;
  8. Проведение малоцикловых механических испытаний высокопрочных сварных соединений на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при повышенных и пониженных температурах.
- Наиболее существенные научные результаты диссертации, которые получены

впервые, состоят в следующем:

1. Созданы научные основы технологии лазерной сварки современных термически упрочняемых алюминиевых сплавов, которые позволили получить прочностные свойства сварных соединений близких или равных исходным сплавам.

2. На основе комплексного подхода, включающего оптимизацию процесса лазерной сварки и последующую оптимизацию термической обработки (закалку и искусственное старение), реализован замкнутый цикл фазовых превращений в лазерных сварных соединениях алюминиевых сплавов: Д16Т (система Al-4.4Cu-1.5Mg); 1420 (система Al-5.2Mg-2.1Li); 1424 (система Al-4.9Mg-1.65Li); 1441 (система Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li); В-1461 (система Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li); В-1469 (система Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li).

3. Показано, что, управляя параметрами посттермической обработки образцов со сварным соединением всех исследованных термически упрочняемых алюминиевых сплавов, можно целенаправленно влиять на формирование заданных механических свойств сварного шва за счет изменения структурно-фазового состава.

4. Для исследования эволюции фазового состава сварного шва в исходном состоянии и после оптимальной термообработки термически упрочняемых алюминиевых и алюминево-литиевых сплавов марки Д16Т, 1424, 1441, В-1461, В-1469 применено синхротронное излучение с использованием установки класса «мегасайенс» ИЯФ СО РАН, что позволило с высоким разрешением измерить распределение фазового состава поперек шва на всех этапах исследований.

4. Существенно расширены возможности исследования с высоким разрешением эволюции фазового состава сварного шва в исходном состоянии и после оптимальной термообработки термически упрочняемых алюминиевых и алюминево-литиевых сплавов марки Д16Т, 1424, 1441, В-1461, В-1469 за счет применения синхротронного излучения с использованием установки класса «мегасайенс» ИЯФ СО РАН.

5. На основе результатов экспериментальной оптимизации процесса закалки и закалки с последующим искусственным старением построены 3D-карты механических свойств образцов со сварным соединением (временного сопротивления, предела текучести, предельного относительного удлинения) в зависимости от температуры и времени старения всех исследуемых сплавов.

6. Экспериментально показано, что изменение прочности лазерных сварных соединений сплава В-1469 вследствие закалки при оптимальной температуре 560<sup>0</sup>С обусловлено изменением микро и нано структуры, т.е. фактически растворением агломератов на границе зерен и гомогенизации твердого раствора, что обуславливает первые стадии процесса распада пересыщенных твердых растворов: с образованием зон Гинье-Престона и с выделением промежуточных метастабильной  $\theta''$  фазы.

6. Для сварных швов сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li ( $C_{Cu}/C_{Mg} \approx 13$  и  $C_{Cu}/C_{Li} \approx 3,25$ ) установлено оригинальное влияние большого относительного содержания  $C_{Cu}/C_{Li}$ . Экспериментально оказано, что в отличие от исходного сплава с преобладающей упрочняющей фазой  $\Gamma_1$ , в лазерном шве после оптимальной термической обработки в виде закалки и последующего искусственного старения преобладает упрочняющая фаза  $\theta'(Al_2Cu)$ .

7. На основе малоцикловых механических испытаний лазерных сварных соединений до и после термообработки алюминиево-литиевых сплавов 1420, 1441 и В-1461 на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, как при повышенных, так и пониженных температурах установлено предельное число циклов до разрушения. Показано, что для термообработанных сварных соединений количество циклов до разрушения увеличивается в 3–4 раза и приближается к исходному сплаву.

8. Оптимальное лазерное воздействие и последующая термообработка позволили достичь значений прочностных характеристик сварных соединений близких или равных исходному сплаву.

В результате выполнения работы созданы научные основы получения неразъемных соединений Al-Li сплавов с прочностью, близкой к прочности исходных сплавов и достигнуты следующие конкретные результаты:

- Для лазерных сварных соединений сплава Д16Т (система Al-4.4Cu-1.5Mg) временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сварного шва составляет 99%, 98% и 95 %, соответственно от значений исходного сплава.

- Для лазерных сварных соединений сплава 1420 (система Al-5.5Mg-2Li) временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сварного шва составляет 100%, 132% и 21 %, соответственно от значений исходного сплава.

- Для лазерных сварных соединений сплава 1424 (система Al-4.9Mg-1.65Li) временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сварного шва составляет 98%, 98% и 92 %, соответственно от значений исходного сплава.

- Для сварных соединений сплава 1441 (система Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li) временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сварного шва составляет 98%, 104% и 64 %, соответственно от значений исходного сплава.

- Для сварных соединений сплава В-1461 (система Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li) временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сварного шва составляет 93%, 94 % и 86 %, соответственно от значений исходного сплава.

- Для сварных соединений сплава В-1469 (система Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li) временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сварного шва составляет 95%, 94 % и 38 %, соответственно от значений исходного сплава.

Рассмотрев содержание диссертации и автореферата, комиссия пришла к выводу, что тема диссертации, а также ее содержание, соответствуют научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. По теме диссертации опубликовано 50 работ, в том числе 23 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов. В данных публикациях в должной мере отражены основные научные результаты работы. Главные положения и результаты работы докладывались на 7 российских и 19 международных конференциях. Представленные соискателем ученой степени материалы диссертации в полной мере опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях, и требования к публикациям, предусмотренные пунктами 11,13 «Положения о присуждении ученой степени», соблюдены. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо в соавторстве с другими специалистами при его непосредственном участии. Диссертантом поставлена цель работы, сформулированы задачи, основные положения и выводы. В соавторстве

проведены исследования структурно-фазового состава и механических свойств. Основные закономерности эволюции фазового состава и получения высокопрочных лазерных сварных соединений получены автором в соавторстве. Представление материалов диссертации согласовано с соавторами. Материалы других авторов, использованные в диссертации Маликова А.Г., во всех случаях содержат ссылку на источник и удовлетворяют требованиям пункта 14 «Положения о присуждении ученых степеней». Комиссия не обнаружила в диссертации научных работ, выполненных соискателем в соавторстве, на которые не были бы даны ссылки на соавторов.

Экспертная комиссия рекомендует принять к защите диссертационную работу Маликова А.Г. «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Председатель комиссии

Д.ф.-м.н.

Корнилов В.И.

Члены комиссии

Д.ф.-м.н.,

Косарев В.Ф.

Д.ф.-м.н.,

Бойко В.М.

02.09.2021 г.