

УТВЕРЖДАЮ

директор ФГБУН Института
прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН,
математических наук,

А.Н. Шиплюк

«18» 06 2021г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по диссертации Маликова Александра Геннадьевича «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов» на соискание степени доктора технических наук, выполненной в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Маликов Александр Геннадьевич, 1982 года рождения, в 2003 г. был принят в лабораторию № 3 «Лазерные технологии» на должность лаборанта-исследователя, после окончания Новосибирского государственного технического университета в 2006 г. по специальности «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике», зачислен в аспирантуру ИТПМ СО РАН. С 2006 г. по 2009 г. работал в должности младшего научного сотрудника. В 2010 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Оптимизация процесса лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали» по специальности 01.02.05 (диплом ДКН № 135144, выданный 13 мая 2011 г.). В 2012 г. переведен на должность научного сотрудника, с 2016 г. – старший научный сотрудник, с 2018 г. – заведующий лабораторией в составе лаборатории №3 «Лазерные технологии» ИТПМ СО РАН.

Научный консультант: Оришич Анатолий Митрофанович, доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии Губернатора Новосибирской области 2015, лауреат премии имени Ю.И. Островского 2010; победитель V Национальный Конкурс Инновационных проектов Аэрокосмической отрасли 2020, заслуженный деятель науки Российской Федерации 2008 г; главный научный сотрудник в составе лаборатории № 3 «Лазерные технологии» ИТПМ СО РАН.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Диссертация посвящена решению комплексной научной проблемы, связанной с достижением максимальных статических механических характеристик неразъемных лазерных сварных соединений нового класса материалов - термически упрочняемых алюминиевых - литиевых (Al-Li) сплавов третьего поколения за счет управления микро, нано структурой и фазовым составом сварного шва в результате оптимизации процесса лазерного воздействия, последующей оптимизации пост термообработки в виде закалки и искусственного старения и впервые применяемого контроля эволюции структурно-фазового состава сварного шва алюминиевых сплавов, за счет применения современного независимого метода диагностики:

дифрактометрии синхротронного излучения в сочетании с комплексной оценкой физико-механических, технологических и функциональных свойств.

2. Актуальность темы.

Постоянное развитие аэрокосмической промышленности направлено на совершенствования весовой эффективности конечного изделия. Снижение веса и стоимости производства — наиболее сложная технологическая задача в области совместных разработок, как новых материалов, так и перспективных технологий соединения этих материалов, в изделиях авиационной и космической техники. В аэрокосмической промышленности применяются металлические сплавы, которые постоянно совершенствовались в течение прошлого века и в настоящее время составляют около 80% от массы современных самолетов. В настоящее время металлические сплавы сталкиваются с жесткой конкуренцией со стороны композитных (углеродно-волоконистых, стеклопластиков, органопластиков и др.) материалов, что побуждает производителей авиационных сплавов разрабатывать более эффективные сплавы для решения задач, стоящих перед развивающимся рынком аэрокосмической техники. Это приводит к развитию научного и технологического интереса в области, как производства новых видов сплавов, так и технологий их соединения.

Одной из актуальнейших проблем современного развития авиакосмической техники является замена технологии заклепочного соединения современных Al сплавов при создании сложных деталей, обладающих уникальными эксплуатационными характеристиками, работающих в условиях высоких термических и механических нагрузок, с применением новых высокопроизводительных, материалосберегающих технологий, обеспечивающих заданные механические характеристики. Технология заклепочного соединения характеризуется длительным производственным циклом из-за высокой ручной нагрузки, необходимой для сверления отверстий и установки заклепок, процесс сопровождается шумом и вибрацией. Автоматизация процесса не приводит к увеличению производительности. Кроме того, при использовании заклепочной технологии детали соединяются внахлест, что приводит к повышению материалоемкости и веса конструкции, а также к необходимости принимать специальные меры для герметизации изделий. Поскольку сборка конструктивных изделий с помощью клепки является значительным элементом затрат, рентабельные методы соединения с высокой степенью автоматизации представляют большой интерес для аэрокосмической отрасли. К таким технологиям относятся сварка. По оценкам экспертов из Всероссийского научно-исследовательского институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) замена заклепочных соединений на сварные с использованием алюминий-литиевых сплавов обеспечит снижение веса конструкции летательного объекта до 25 %. Компания Airbus называет это “мягкой революцией” в авиа и ракетостроении.

Разрабатываются новые методы соединения изделий из алюминий-литиевых сплавов на основе сварки плавлением (лазерная сварка, аргоно-дуговая сварка, электроннолучевая сварка) и сварки трением с перемешиванием. Каждая из технологий создания неразъемных соединений обладает своим достоинствами и недостатками. Основные научные результаты исследований показали, что существует проблема, состоявшая в том, что статически механические характеристики (временное сопротивление на разрыв, предел текучести и относительное удлинение) сварных соединений современных Al-Li термически упрочняемых сплавов авиационного назначения, оставались низкими

и составляла 50-80 % от значений исходного сплава. Причины столь значительного снижения прочностных характеристик сварных соединений, **не зависимо от метода сварки**, к моменту начала данной работы установлены не были. Предполагалось влияние выгорания легирующих материалов, формирование пор, горячих трещин и т.п. Полномасштабная оптимизация режимов лазерного воздействия не проводилась, что и обуславливало влияние данных эффектов. Жесткие требования получения высоких механических свойств сварных соединений, являются принципиальными важными для авиа и ракетостроения, что и обуславливало применение заклепок вместо сварки

Лазерная сварка, как высокоскоростной и легко управляемый процесс, позволяет выполнять сварку деталей сложных геометрических форм, оптимизированных с точки зрения механической жесткости, прочности, скорости производства и визуального качества. Использование лазерной сварки вместо технологии заклепочного соединения приведет к уменьшению конечного веса изготовленной конструкции из-за удаления ненужных перекрытий материала, заклепок и герметика между соединяемыми деталями, а также увеличит производительность процесса за счет высокой скорости сварки. Лазерная сварка, обладает рядом преимуществ. Высокая концентрация энергии и небольшая величина пятна нагрева позволяют получать швы с объемом сварочной ванны в несколько раз меньше, чем при дуговой сварке. Снижение объема расплава и получение швов с большим отношением глубины проплавления к ширине шва (примерно на порядок по сравнению с дуговой сваркой) позволяют уменьшить деформацию деталей примерно в 10 раз, что, в свою очередь, приводит к значительной экономии металла за счет уменьшения размеров допусков. Уменьшение ширины шва в 2–5 раз позволяет расширить ассортимент деталей, для которых из-за термовлияния или компактности существуют ограничения на размеры мест, где может быть расположен сварной шов. Высокая производительность достигается за счет скорости сварки, которая в несколько раз превышает скорости сварки трением с перемешиванием и дуговой сварки, и экономии времени на правку после сварки. Жесткий термический цикл с высокими скоростями нагрева и охлаждения дает возможность существенно сократить зону термического влияния. Так же лазерная сварка имеет преимущество перед электроннолучевой сваркой, выполняющейся в вакууме и требующей сложного оборудования при сварке длинных частей фюзеляжа. От сварки трением с перемешиванием лазерная сварка отличается более высокой скоростью процесса и технологичностью при изготовлении сложных конструкций. Кроме этого, лазерная сварка позволяет создавать Т-образные соединения в отличии от сварки трением с перемешиванием, что актуально при создании неразъемного соединения между стрингером и фюзеляжем самолета.

В последние десятилетия российские и зарубежные исследователи ведут активную работу по созданию высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов авиационного назначения. Значительный вклад в эту область исследований внесли следующие научные группы: МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва (Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И), ФГУП «ВИАМ» (Антипов В.В., Пантелеев М.Д., Скупов А.А.), ИЛиСТ г. Санкт-Петербург (Туричин Г.А.), ОАО «НИАТ» (Блинков В.В.), ИФПМ СО РАН (Колубаев Е.А. Сапаев Ю.Н.), Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT in Aachen, Germany (Dirk Dittrich, and et.); Institute of Materials Research, Helmholtz-Zentrum, Germany. (Kashaev N. and et.,) State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, China (Huijie Liu), Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology,

Beijing, China (Xinyi), Southwest Jiaotong University, Chengdu, China (Wu Shengchuan), School of Materials University of Manchester Manchester UK (Yingta Tian), Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, South Kensington Campus, London (Joseph Ahn), Институт электросварки им Е.О. Патона Украина (Шелягин В.И., Хаскин В.Ю.) и др.

На этапе проектирования конструкций самолета крайне важно знать механические свойства сварного соединения при растяжении, которые часто коррелируют с вязкостью разрушения и усталостной прочностью. Слабо установлено влияние структурно фазового состава сварного шва на механические свойства лазерных сварных соединений. Фазовый состав зоны плавления сварного шва зависит от исходного фазового состава материала, соотношения концентрации основных легирующих элементов Mg, Cu, Li, а также от использования присадочного материала в процессе сварки. Кроме этого, распределение упрочняющих фаз в твердом растворе и на границах дендрита в сварном шве может быть различно, и отличаться от основного сплава. Факт наличия упрочняющих фаз в сварном шве не позволяет выявить связь с изменением механических характеристиках, в первую очередь снижением прочности. Получение высокопрочных лазерных сварных соединений представляет собой актуальную научную задачу, решение которой представлены в диссертационной работе.

Основные цели работы:

Цель работы является **проведение фундаментальных исследований по созданию научных основ технологии лазерной сварки термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов авиационного назначения для достижения максимальных статических механических характеристик (временная прочность, предел текучести, относительное удлинение при разрыве) близких или равных параметрам исходным сплавам и установление закономерностей изменения структуры, эволюции фазового состава после воздействия лазерного излучения и последующей термомеханической постобработки.**

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование 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, 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. Разработка физических механизмов управление структурно-фазовым составом сварного шва для получение высокопрочных неразъемных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

5. Разработка методов постобработки сварного соединения на основе термообработки (закалка + искусственное старение) и холодного прессования с разными степенями пластической деформации для повышение механических характеристик

6. Проведение оптимизации термической обработки и комплексной оценки механических свойств лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

7. Раскрытие сути физических явлений при изучении основ формирования упрочняющих фаз в твердом растворе сварного шва при воздействии мощного лазерного излучения и последующей оптимальной термообработки термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

8. Проведение малоцикловых испытаний качественных сварных соединений на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при повышенных и пониженных температурах.

Комплексность задач работы обуславливается выполнением как фундаментальных исследований физики взаимодействия лазерного излучения с веществом, развитием нового научного направления – лазерная микро металлургия, изучением динамики фазовых, микро и нано структурных превращений в процессе формирования сварного шва и последующей термической обработки для разработки технологии лазерной сварки с максимальными механическими свойствами, так и использованием методов и подходов на основе применения независимых самых современных методов диагностики, включая и впервые применяемую методику для Al сплавов на основе синхротронного излучения для улучшения важных в практическом отношении механических и технологических свойств сварного шва и с целью создания эффективного метода соединения термически упрочняемых алюминиевых сплавов в изделиях перспективной техники авиационного и космического назначения.

3. Научная новизна работы.

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

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

3. Впервые показано, что, управляя параметрами пост термической обработки образцов со сварным соединением всех **исследованных** термически упрочняемых алюминиевых сплавов, возможно целенаправленно влиять на формирование заданных механических свойств сварного шва за счет изменения структурно-фазового состава.

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

5. Впервые по результатам экспериментальных исследований, на основе 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. Впервые четко экспериментально показано, что изменение прочности в следствие закалки при оптимальной температуре в области 560 °С лазерных сварных соединений сплава В-1469 физически обусловлено изменением микро и нано структуры. т.е. фактически растворением агломератов на границе зерен и гомогенизация твердого раствора, что обуславливает первые стадии процесса распада пересыщенных твердых растворов: с образованием зон Гинье-Престона и с выделением промежуточных метастабильной θ'' фазы.

6. Впервые для сварных швов сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li ($CCu/CMg \approx 13$ и $CCu/CLi \approx 3,25$) установлено оригинальное влияние большого относительного содержания CCu/CLi . Экспериментально установлено, что в отличие от исходного сплава с преобладающей упрочняющей фазой T_1 , в лазерном шве после оптимальной термической обработки в виде закалки и последующем искусственным старением преобладает упрочняющая фаза $\theta'(Al_2Cu)$.

7. Впервые проведены малоцикловые испытания лазерных сварных соединений до и после термообработки для алюминиево-литиевых сплавов 1420 1441 и В-1461 на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при повышенных и пониженных температурах. Установлено предельное число циклов до разрушения. Показано что для термообработанных сварных соединений количество циклов до разрушения увеличивается сплава в 3-4 раза и приближается к исходному сплаву.

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

Достигнуты значения.

- 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 системы 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 системы 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 системы 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 системы 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 системы 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.

9. **Достоверность результатов** обеспечена использованием комплекса современных аналитических методов исследования структуры материалов и оценки их свойств, воспроизводимостью экспериментальных данных, статистической

обработкой результатов измерений, соответствием результатов исследований данным, полученным другими группами специалистов. Для формирования неразъемных сварных соединений из термически упрочняемых алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов и исследования их структуры и свойств было использовано современное технологическое и аналитическое оборудование. Эксперименты по получению лазерных сварных соединений выполнялись на автоматизированном лазерном технологическом комплексе Сибирь. При выполнении аналитических исследований фазового состава лазерных сварных соединений использовали установку класса «мегасайенс» входящую в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения», экспериментальная станция "Дифрактометрия в «жестком» рентгеновском диапазоне" (ИЯФ СО РАН). Часть исследований выполнялись на базе оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН) и ЦКП «Наноструктуры» (ИФП СО РАН).

10. Научная и практическая значимость работы заключается в том, что полученные в работе результаты исследований расширяют представления о структурно-фазовых превращениях, происходящих при формировании сварных соединений с помощью лазерной сварки и последующей пост термообработки. Полученные в работе данные объясняют характер структурных преобразований, в результате высокоэнергетического лазерного воздействия и последующей оптимальной термообработки. Раскрывают связь фазового состава с механическими характеристиками лазерных сварных соединений. Развитие авиационной промышленности в России неразрывно связано с задачей снижения массы летательного аппарата. Разрабатываются новые сплавы повышенной прочности и пониженной плотности, например алюминий-литиевые. На сегодняшний момент при создании авиационной техники в России технология лазерной сварки в качестве технологической операции на авиационных заводах не внедрена. Внедрение данной технологии в авиа и ракетостроение может в значительной мере определять процесс развития авиационного и космического машиностроения в России и позволит обеспечить создание научно технологического задела, близкого к мировому уровню, направленного на реализацию новых конструктивных решений при соединении деталей в узлы в авиа- и ракетостроении; снижение материалоемкости и общего веса единицы изделия в авиа- и ракетостроении и получение дополнительных возможностей для одновременного повышения массогабаритных характеристик перевозимых ею объектов. Полученные результаты работы также актуальны в рамках развития государственной программы РФ «Развитие авиационной промышленности создание высоко конкурентной авиационной промышленности и закрепление ее позиции на мировом рынке в качестве третьего производителя по объемам выпуска авиационной техники. Основным потребителем представленной технологии являются предприятия входящие в ПАО «Объединённая авиастроительная корпорация».

11. Личный вклад автора.

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.

12. Положения, выносимые на защиту:

1. Созданные научные основы **процессов лазерной сварки и термической обработки**, позволяющие получать прочностные свойства лазерных сварных соединений современных термически упрочняемых алюминиевых сплавов близких или равных исходным сплавам.

2. Созданные физические основы управления фазовым составом для получения заданного структурно-фазового состояния твердого раствора сварного шва и, одновременно, изменение по замкнутому циклу фазового состава сплава вне шва, с целью достижения высоких механических характеристик (временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение) на основе комплексного подхода который включает лазерную микро-металлургию, т.е. оптимизацию взаимодействия с веществом высокоэнергетического непрерывного лазерного излучения в режиме кинжального проплавления, в сочетании с последующей оптимизацией термообработки и применением метода диагностики с использованием дифрактометрии синхротронного излучения совместно с высокоразрешающей просвечивающей микроскопией.

3. Совокупность режимов оптимального лазерного воздействия и пост термообработки в виде закалки и последующего искусственного старения для достижения максимальных прочностных характеристик лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов, а именно сплава Д16Т система Al-4.4Cu-1.5Mg, сплава 1420 системы Al-5.2Mg-2.1Li сплава 1424 системы Al-4.9Mg-1.65Li, сплава 1441 системы Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li, В-1461 системы Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li, сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li

4. Результаты исследований эволюция фазового состава с использованием синхротронного излучения лазерных сварных соединений в процессе сварки и после оптимальной термообработки термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов, а именно сплава Д16Т система Al-4.4Cu-1.5Mg, сплава 1420 системы Al-5.2Mg-2.1Li сплава 1424 системы Al-4.9Mg-1.65Li, сплава 1441 системы Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li, В-1461 системы Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li, сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li.

5. Результаты экспериментальных исследований механических свойств и структурного состава лазерных сварных соединений в исходном состоянии и после оптимальной термообработки в виде закалки и с последующим искусственным старением термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов, а именно сплава Д16Т система Al-4.4Cu-1.5Mg, сплава 1420 системы Al-5.2Mg-2.1Li сплава 1424 системы Al-4.9Mg-1.65Li, сплава 1441 системы Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li, В-1461 системы Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li, сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li.

6. Результаты оптимизации и значения максимальных статических механических характеристик неразъемных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов а именно сплава Д16Т система Al-4.4Cu-1.5Mg, сплава 1420 системы Al-5.2Mg-2.1Li сплава 1424 системы Al-4.9Mg-1.65Li, сплава 1441 системы Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li, В-1461 системы Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li, сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li.

7. Результаты изменения фазового состава и увеличение прочностных свойств лазерных сварных соединений сплава В-1469, физически обусловленные изменением микро и нано структуры. т.е. фактически растворением агломератов на границе зерен и гомогенизация твердого раствора, с образованием зон Гинье-Престона и с

выделением промежуточных метастабильной θ'' фазы в процессе закалки при температуре 560 °С и формирование при искусственном старении упрочняющая фаза θ' (Al₂Cu).

8. Результаты малоцикловых испытаний термообработанных лазерных сварных соединений сплавов 1420 системы Al-5.2Mg-2.1Li, 1441 системы Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li и В-1461 системы Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при температурах -60, +20, +85 °С.

13. Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на многочисленных российских 11 и международных научных конференциях – 16

14. Публикации.

Всего по теме диссертации опубликовано 50 печатных работ, 23 из них изданы в реферируемых журналах, рекомендованных для публикации ВАК РФ. Наиболее значимые из них:

Malikov A., Orishich A., Vitoshkin I., Bulina N., Karpov E., Gutakovskii A., Batsanov S., Ancharov A., Tabakaev R. Effect of the structure and the phase composition on the mechanical properties of Al–Cu–Li alloy laser welds // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 809. P. 140947(16). (WoS, Q1)

Malikov A.G., Karpov E.V., Orishich A.M. Effect of temperature on the fracture behaviour of heat-treated Al–Cu–Li alloy laser welds under low-cycle fatigue loading // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2020. V. 43 №. 6. P. 1250-1261. (WoS, Q2)

Malikov A., Orishich A., Vitoshkin I., Karpov E., Ancharov A. Effect of post-heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser welded Al-Cu-Mg alloy // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. V. 64. P. 620-632 (WoS, Q1)

Malikov A., Orishich A., Bulina N., Karpov E., Sharafutdinov M. Effect of post heat treatment on the phase composition and strength of laser welded joints of an Al–Mg–Li alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2019. V. 765. P. 138302 (8). (WoS, Q1)

Malikov A., Bulina N., Sharafutdinov M., Orishich A. Study of the structure and phase composition of laser welded joints of Al-Cu-Li alloy under different heat treatment conditions // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 104 №. 9-12. P. 4313-4324. (WoS, Q2)

Malikov A.G., Orishich A.M., Golyshev A.A., Karpov E.V. Manufacturing of high-strength laser welded joints of an industrial aluminum alloy of system Al-Cu-Li by means of post heat treatment // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 41. P. 101-110. (WoS, Q1)

Malikov A.G., Orishich A.M. Laser welding of the high-strength Al–Cu–Li alloy // *The International journal of advanced manufacturing technology*. 2018. Vol. 94. № 5-8. P. 2217-2227. (WoS, Q2)

Аннин Б.Д., Фомин В.М., Антипов В.В., Иода Е.Н., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Черепанов А.Н. Исследование технологии лазерной сварки алюминиевого сплава 1424 // *Доклады академии наук*. 2015. Т. 465. № 4. С. 419.

Аннин Б.Д., Фомин В.М., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Черепанов А.Н. Разработка технологии лазерной сварки алюминиевого сплава 1424 с высокой прочностью соединения // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 6 (334). С. 14-21.

Оришич А.М., Маликов А.Г., Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю., Чайка А.А. Оптимизация процессов лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2015. № 12. С. 26-31.

Оришич А.М., Маликов А.Г. Получение высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов авиационного назначения // Фотоника. 2019. Т. 13. № 4. С. 356-367.

Булина Н.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Клочков Г.Г. Исследование структурно-фазового состава сварных соединений листов алюминий-литиевого сплава В-1469, полученных лазерной сваркой, в зависимости от термообработки // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 31-39.

Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М. Влияние термомеханической обработки на механические и микроструктурные свойства лазерного сварного шва алюминийлитиевых сплавов, содержащих Mg и Cu // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. Т. 25. № 3. С. 394-400.

Malikov A.G., Orishich A.M., Karpov E.V., Vitoshkin I.E. Control of the mechanical properties and microstructure of laser welded joints of the aluminum alloy V-1461 after heat treatment // Materials physics and mechanics. 2020. V. 43. № 1. P.

Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Аннин Б.Д. Влияние термообработки на разрушение сварного соединения авиационного сплава системы Al-Cu-Li при различных температурах // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 1 (359). С. 91-101.

Аннин Б.Д., Фомин В.М., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М. Комплексное исследование лазерной сварки высокопрочного сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3 (42). С. 9-16.

Аннин Б.Д., Фомин В.М., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Влияние Mg и Cu на механические свойства высокопрочных лазерных сварных швов алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58. № 5 (345). с. 208-217.

Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Антипов В.В., Клочков Г.Г., Скупов А.А. Влияние термической обработки на структуру сварных соединений листов из сплава В-1469 системы Al-Cu-Li, полученных лазерной сваркой // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). с. 9-18.

Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М. Влияние предварительной пластической деформации на прочность лазерного сварного соединения алюминий-литиевого сплава 1420 // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 5. С. 19-24.

Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М. Исследование микроструктуры высокопрочных лазерных сварных соединений алюминий-литиевых сплавов авиационного назначения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 2. С. 50-62.

Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Аннин Б.Д. Влияние температуры на разрушение лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов авиационного назначения // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 5 (351). С. 191-199.

Оришич А.М., Маликов А.Г., Карпов Е.В., Павлов Н.А., Месенцова И.С. Влияние термической обработки на механические и микроструктурные свойства лазерного сварного шва алюминий-литиевого сплава системы Al-Mg-Li // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 3 (349). С. 203-212.

Учитывая вышеизложенное, постановили:

Диссертация Маликова Александра Геннадьевича «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук. Диссертация является законченной научной работой, содержащей новые результаты по актуальной теме. Опубликованные по теме диссертации научные работы отражают ее содержание.

Диссертация Маликова Александра Геннадьевича «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов» рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости газа и плазмы.

Заключение принято на заседании семинара «Теоретическая и прикладная механика» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

На заседании присутствовали: академик Фомин В.М., д.ф.-м.н. Оришич А.М., д.ф.-м.н. Козлов В.В., д.т.н. Лебига В.А, д.ф.-м.н. Бардаханов С. П., д.ф.-м.н. Косарев В.Ф., д.ф.-м.н. Корнилов В.И., д.ф.-м.н. Гапонов С.А., д.т.н. Шулятьев В. Б., к.ф.-м.н. Голышев А.А., д.т.н. Локотко А. В., к.ф.-м.н. Гуляев И.П., д.ф.-м.н. Ковалев О.Б., д.ф.-м.н. Маслов Н.А., д.ф.-м.н. Черепанов А.Н., д.т.н. Третьяков П.К., д.ф.-м.н. Киселев С.П., к.ф.-м.н. Литвиненко Ю. А., к.ф.-м.н. Павленко А. М., д.ф.-м.н. Хмель Т.А., к.х.н. Анчаров А.И. (ИХТТ СО РАН), к.ф.-м.н. Булина Н.В. (ИХТТ СО РАН), д.ф.-м.н. Карпов Е.В. (ИГиЛ СО РАН), д.х.н. Толочко Б.П. (ИХТТ СО РАН), к.ф.-м.н. Казанин И.В., к.ф.-м.н. Бузюркин А.Е., к.ф.-м.н. Краус Е.И., к.ф.-м.н. Купер К.Э. (ИЯФ СО РАН), д.ф.-м.н. Катасонов М.М., к.ф.-м.н. Кратова Ю.В., к.ф.-м.н. Бедарев И.А., и другие. Всего присутствовало 35 сотрудников с ученой степенью. Результаты голосования: «за» – 35 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 74 от 11.06.2021г.

Председатель семинара

Академик РАН

Секретарь семинара

к.ф.-м.н.

В.М. Фомин

Е.И. Головнёва