

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Маликова Александра Геннадьевича**

**«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 (01.02.05) – «Механика жидкости газа и плазмы».

### **1. Актуальность темы диссертации.**

Диссертационная работа Маликова Александра Геннадьевича посвящена созданию научных основ технологии лазерной сварки термически упрочняемых алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов авиационного назначения. В выполненных исследованиях обосновываются условия, при которых достигаются максимальные значения статических механических характеристик: временная прочность, предел текучести, относительное удлинение при разрыве, близкие или равные по параметрам свариваемого материала. Устанавливаются закономерности изменения структуры и эволюции фазового состава, после воздействия лазерного излучения и последующей термомеханической постобработки зон неразъемных соединений из алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов.

На сегодняшний день, в авиа и ракетостроении, при создании сложных изделий из алюминиевых сплавов, применяется технология заклепочного соединения. Она характеризуется длительным производственным циклом, из-за высокой ручной нагрузки, необходимой для сверления отверстий и установки заклепок. Сам процесс формирования клепаного соединения, является малопродуктивным, сопровождается шумом и вибрацией, которые, вредно влияют на человека. С учетом данного обстоятельства, переход к технологии лазерной сварки, вместо технологии заклепочного соединения, является логически обоснованным, обеспечивает уменьшение конечного веса изготавливаемой конструкции и повышает производительность процесса, прежде всего, за счет высокой скорости сварки.

Однако, в процессе сварки в результате повторного расплавления и последующей кристаллизации металла шва из расплава, появляются зоны с ярко выраженной структурной неоднородностью, в которой резко снижаются механические и эксплуатационные характеристики изделия, достигающие уровня 50–80% от характеристик свариваемого материала. С учетом сказанного, **поиск путей снижения структурной неоднородности в зонах неразъемных соединений, а также изыскание способов повышения прочностных и эксплуатационных показателей сварных соединений, получаемых лазерной сваркой, является, безусловно, актуальным.**

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Научные положения, выводы, рекомендации, сформулированные в диссертации, вполне обоснованы автором и сомнений не вызывают. Представленная работа является завершенным и научно обоснованным трудом, в котором на основе экспериментальных исследований сформулированы логически выстроенные выводы и рекомендации.

## **3. Достоверность полученных в работе результатов**

Достоверность результатов экспериментов обоснована применением современных методов измерений, использованием единой методики при проведении исследований и подтверждается воспроизводимостью их результатов. Большой объем статистически обработанных данных, их анализ и логически выстроенные заключения, также подтверждают достоверность и универсальность полученных экспериментальных зависимостей. По материалам диссертации опубликовано 23 печатные работы, входящие в перечень ВАК. Результаты исследований доложены на всероссийских, в том числе международных и зарубежных конференциях.

## **4. Значимость результатов для науки и практики**

### **Научной новизной выполненных исследований являются:**

1. Результаты системных исследований, направленных на развитие научных основ технологии лазерной сварки современных термически упрочняемых алюминиевых сплавов, позволяющей получить прочностные свойства сварных соединений близких или равных исходным сплавам.

2. Научно обоснованные и экспериментально доказанные методы управляемого воздействия на структурно-фазовые превращения в лазерных сварных соединениях широкой гаммы алюминиево-литиевых сплавов различных систем и составов.

3. Комплекс экспериментально полученных и научно обоснованных способов управляющих воздействий, позволяющих, методами термической обработки неразъемных соединений, из упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов, снизить в них структурную неоднородность, а также обеспечить заданные механические свойства сварного шва, таких как, временное сопротивление, предел текучести, предельно высокое значение относительного удлинения, прежде всего, за счет изменения структурно-фазового состава.

4. Результаты малоцикловых испытаний лазерных сварных соединений при пульсирующем растяжении алюминиево-литиевых сплавов 1420 1441 и В-1461, до и после их термообработки, при различных амплитудах нагрузки, а также повышенных и пониженных температурах, доказывающие, что предельное число циклов до разрушения, у термообработанных сварных соединений, увеличивается в 3-4 раза, по сравнению с не термообработанными, что приближает установленные значения, к показателям исходного сплава.

Результаты комплексных исследований, выполненных в работе, доказывают принципиальную возможность внедрения, созданных технологий лазерной сварки, в авиа и ракетостроении. Они направлены на развитие научных основ лазерных высокоэнергетических технологий. Обеспечивают научно технологический задел, в предметной области исследований, близкий к мировому уровню.

### **5. Общая характеристика содержания диссертации**

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 190 наименований и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 390 страниц, включая 161 рисунок и 30 таблиц.

### **6. Основное содержание работы**

**Во введении** автор формулирует актуальность выбранной цели исследований, указывает на основные задачи, решаемые в диссертационной работе, отмечает научную новизну исследований, практическое значение работы, перечисляет основные положения, вынесенные на защиту, а также кратко пересказывает содержание диссертации по главам.

**В главе 1** проведен обзор литературы и показан анализ состояния проблемы, рассмотрены основные принципы лазерной сварки алюминиевых сплавов. Показано что получение высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов представляет собой актуальную научную задачу, решение которой представлено в диссертационной работе.

**В главе 2** показан выбор основных термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов для проведения экспериментов по созданию высокопрочных неразъемных лазерных сварных соединений. Эксперименты по получению лазерных сварных соединений выполнялись на автоматизированном лазерном технологическом комплексе Сибирь, включающем мощный СО<sub>2</sub> лазер, портално-координатную машину. Для исследования их структуры и свойств было использовано современное технологическое и аналитическое оборудование. В том числе и установку класса «мегасайенс», источник синхротронного излучения (ИЯФ СО РАН).

**В главе 3** проведена оптимизация параметров процесса лазерной сварки исследуемых алюминиевых сплавов: скорости сварки, мощности излучения, диаметра, глубины и места расположения фокусного пятна, а также расхода защитного нейтрального газа с целью получения сварных соединений без внешних дефектов. Найдены оптимальные энергетические условия получения сварных соединений. Установлено, что для медесодержащих алюминиевых сплавов, энергия на единицу объема сварного шва выше, чем для сплавов, содержащих магний, при этом значение погонной энергии, наоборот, выше. Показано, что показатели прочности сварных соединений, полученных при оптимальных условиях лазерной сварки, имеют невысокие значения, по сравнению с основным металлом. При

этом снижение показателей прочности, связано с резким изменением микроструктуры сварных соединений.

**В главе 4** выполнена оптимизация фазового состава для достижение оптимальных механических свойств лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов.

**В главе 5** проведены малоцикловые испытания термообработанных сварных соединений на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при температурах  $-60, +20, +85$  °С.

**В главе 6** рассмотрена эволюция структурно-фазового состава лазерных сварных соединений. Показано, что для сварного шва сплава Д16Т системы Al-4.4Cu-1.5Mg, основная фаза  $\alpha$ -Al дополнительная фаза  $\theta$ (Al<sub>2</sub>Cu) после оптимального ТО основные фазы  $\alpha$ -Al, S(Al<sub>2</sub>CuMg)+ $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu)). Для сварного шва сплава 1424 системы Al-4.9Mg-1.65Li, основная фаза  $\alpha$ -Al дополнительная фаза S<sub>1</sub>(Al<sub>2</sub>MgLi) после оптимального ТО основные фазы  $\alpha$ -Al,  $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li) дополнительная фаза S<sub>1</sub>(Al<sub>2</sub>MgLi). Для образца сварного шва сплава 1441 системы Al-1.7Cu-0.9Mg-2Li, основные фазы  $\alpha$ -Al T<sub>2</sub>(Al<sub>6</sub>CuLi<sub>3</sub>) дополнительная фаза S'(Al<sub>2</sub>MgCu) после оптимального ТО основные фазы  $\alpha$ -Al- $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li)+S'(Al<sub>2</sub>MgCu). Для образца сварного шва сплава В-1461 системы Al-2.7Cu-0.3Mg-1.8Li, основная фаза  $\alpha$ -Al. T<sub>1</sub>(Al<sub>2</sub>CuLi), T<sub>2</sub>(Al<sub>6</sub>CuLi<sub>3</sub>), после оптимального ТО основные фазы  $\alpha$ -Al, T<sub>1</sub>(Al<sub>2</sub>CuLi),  $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li), дополнительная фаза S'(Al<sub>2</sub>MgCu). Для образца сварного шва сплава В-1469 системы Al-3.9Cu-0.3Mg-1.2Li, основная фаза  $\alpha$ -Al и T<sub>1</sub>(Al<sub>2</sub>CuLi), после оптимального ТО основные фазы  $\alpha$ -Al,  $\theta'$  (Al<sub>2</sub>Cu).

**В главе 7** обобщены результаты исследований и показано влияние легирующих элементов Mg, Cu, Li на механику структурно-фазового состава и механические характеристики сварного шва. В результате реализован замкнутый цикл фазовых превращений в лазерных сварных соединениях алюминиевых сплавов. Прочностные характеристики сварных соединений, полученных в оптимальных условиях лазерной сварки, становятся близкие или равные исходным сплавам в состоянии поставки.

**В заключении** диссертации приводятся основные результаты и выводы.

#### **7. Личный вклад соискателя в диссертационную работу**

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.



## **8. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.**

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

## **9. Замечания по диссертации.**

1. Из содержания работы остается не выясненным вопрос, каким образом автору удастся регулировать качество неразъемных соединений при действии технологических возмущений в свариваемом изделии: изменении зазора, толщины свариваемого материала и т.п.? В этом случае будут меняться условия формирования неразъемного соединения, что может привести к появлению в зонах неразъемных соединений технологических дефектов.

2. Одной из основных проблем сварных соединений из алюминиевых сплавов является повышенное порообразование. Отмеченный недостаток связан с низкой дегазацией сварочной ванны, а в случае быстрого нагрева и быстрого охлаждения расплавленного металла, данный недостаток будет усиливаться. Из содержания работы не возможно выделить, как в этом случае обеспечить, требуемое качество неразъемных соединений?

3. В работе исследованы технологии сварки, не предусматривающие наличие присадочного материала. При его использовании увеличивается масса расплавленного металла, что приведет к усложнению микрометаллургических процессов, связанных с движением металла в сварочной ванне, а также будет способствовать увеличению количества дефектов в зоне неразъемного соединения. Из содержания работы не ясно, как в этом случае может быть обеспечена стабильность и качество сварных соединений?

4. Повышение концентрации источника нагрева обеспечивает узкую (кинжальную) форму проплавления. Однако, несмотря на быстрый нагрев, свариваемого изделия, и такое же быстрое охлаждение, в формируемом неразъемном соединении, будет присутствовать обедненное количество элементов, входящих в исходный свариваемый материал, из-за их выгорания, при действии высококонцентрированного источника нагрева. Как правило, это сопровождается ухудшением свойств неразъемных соединений, и как следствие – уменьшением, прежде всего, его прочностных свойств. В рассматриваемой работе нет ответов на вопрос, в какой степени можно снизить влияние этого негативного фактора? В работе не приводятся значения количественных изменений исходного химического состава изделия после сварки, что на наш взгляд затрудняет понимание эффективности, применяемых после сварочных обработок.

5. Лазерная сварка относится к специализированным технологиям сварки плавлением. Однако, в обзорной части, не приводится анализ методов сварки, до настоящего времени применяемых в производстве конструкций из алюминий-магниевого сплава, например, электродуговых способов плавящимся и неплавящимся электродом в среде защитных газов. Хорошо

известно их положительное влияние на качественные и прочностные характеристики неразъемных соединений, особенно для случая применения способов импульсных, адаптивных импульсных и их гибридных сочетаний с лазерными источниками нагрева. В результате импульсного периодического воздействия на расплав сварочной ванны, может обеспечиваться интенсивное перемешивание металла, что способствует модифицирующему влиянию источника нагрева на формируемый шов и, как следствие будет способствовать снижению структурной неоднородности в зонах неразъемных соединений.

Однако, отмеченные замечания не снижают достоинств представляемой работы, которая посвящена актуальному направлению получения высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Результаты исследований прошли необходимую апробацию.

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Полученные результаты имеют большое значение для создаваемых научных основ технологий лазерной сварки современных термически упрочняемых алюминиево-литиевых сплавов. Найденные теоретические, технические и технологические решения, позволяют получать прочностные свойства у сварных соединений, близкие или равные свойствам исходных сплавов.

Считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, соответствует паспорту специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы», а также п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней. Считаю, что автор диссертации, **Маликов Александр Геннадьевич** заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,  
Доктор технических наук

Ю.Н. Сараев

6 декабря 2021 г.

**Сведения о составителе отзыва:**

Главный научный сотрудник Лаборатории композиционных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук. Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4. Рабочий телефон: 8 -3822-492-942. Моб. Тел.:8-963-193-55-73.

E-mail:litsin@isp

Подпись Сараева Ю. Н.  
ученый секретарь ИФП  
к. ф.-м. н.

Н.Ю. Матолыгина

Председатель  
диссертационного совета  
Д 003035.02  
академику В.М. Фомину

## ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**Я, Сараев Юрий Николаевич**, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Маликова Александра Геннадьевича на тему: «Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – механика жидкости, газа и плазмы.

В соответствии с требованиями Федерального закона от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» даю согласие на обработку своих персональных данных операторам – ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (адрес оператора: ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (адрес оператора: г. Москва, ул. Тверская, д.11).

**Цель обработки персональных данных:** аттестация научных и научно-педагогических работников (присуждение ученых степеней) и формирование Федеральной информационной системы государственной научной аттестации (ФИС ГНА), а также хранение данных о результатах публичных защит диссертационных работ.

**Перечень персональных данных**, на обработку которых дается согласие: фамилия, имя, отчество, контактный телефон, сведения о трудовой деятельности и стаже, сведения об ученых степенях и ученых званиях, сведения об опубликованных работах.

Перечень действий с персональными данными, на совершение которых дается согласие: любое действие или совокупность действий как автоматизированным, так и неавтоматизированным способами, включая (без ограничения) сбор, запись, систематизацию, накопление, хранение, уточнение (обновление, изменение), использование, передачу третьим лицам для осуществления действий по обмену информацией (Минобрнауки России, оператору ФИС ГНА), обезличивание, уничтожение, блокирование персональных данных, создание информационных систем персональных данных, в порядке установленном законодательством РФ, а также осуществление любых иных действий, предусмотренных действующим законодательством Российской Федерации. Информация передается по защищенному каналу связи с использованием информационно-телекоммуникационных сетей, или иными, предусмотренными законодательством способами.

Данное согласие действует с момента подписания и до достижения целей обработки персональных данных или в течение срока хранения информации.

Согласие на обработку персональных данных может быть отозвано в любой момент по моему письменному заявлению.

Я подтверждаю, что, давая такое согласие, я действую по собственной воле и в своих интересах.

**О себе сообщаю:**

Ученая степень – доктор технических наук, технические науки, научная специальность 05.03.06 «Технологии и машины сварочного производства». Дата присуждения степени – 12.01.1996 года. Решение ВАК № 2д/27.

Ученое звание – доцент. Дата присуждения звания – 19.05.1986 года, номер аттестата ДЦ №090

Тел: 8-963-193- , E-mail: [litsin@ispms.ru](mailto:litsin@ispms.ru)

Главный научный сотрудник, Лаборатории композиционных материалов, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

**Адрес служебный:** просп. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, тел. +7 (3822) 49-18-81,

E-mail: [root@ispms.tomsk.ru](mailto:root@ispms.tomsk.ru); <https://www.ispms.ru>

По теме рассматриваемой диссертации имею более 200 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет: 50, в том числе:

1. **Ю.Н. Сараев**, В.М. Семенчук, А.С. Непомнящий, А.А. Григорьева. Физико-технические аспекты разработки адаптивных импульсно-дуговых методов сварки и наплавки плавящимся электродом // **Тяжелое машиностроение**. – 2021. – N 5-6. – С. 23-31.
2. **Сараев Ю.Н.**, Семенчук В.М., Лунев А.Г., Непомнящий А.С., Григорьева А.А. Интегрированная оценка тепломассопереноса процессов дуговой наплавки покрытыми электродами // **Сварочное производство**. – 2021. – N 7. – С. 10-19. (ВАК).
3. **Saraev Yu.N.**, Lunev A.G., Semenchuk V.M., Nepomnyashii A.S. Heat and mass transfer kinetics in arc welding process // **Russian physics journal**. – 2020. – V. 62. – N 9. – P. 1573-1579. (doi: 10.1007/s11182-020-01878-y).
4. **Saraev Yu.N.**, Nesteruk D.A., Semenchuk V.M., Nepomnyashchii A.S. Studying the Interconnection between the Heat Transfer Characteristics and Thermal Welding Cycles during MAG Welding // **AIP Conference Presiding** 2285, 040014 (2020).
5. **Saraev Yu.N.**, Semenchuk V.M., Nepomnyashchii A.S., Lunev A.G., Grigorieva A.A. Study of the influence of power source dynamic properties on the stability of heat and mass transfer at consumable electrode arc welding in a CO<sub>2</sub> // **AIP Conference Proceedings**. Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology. **2310**, 020288 (2020).
6. **Saraev Yu.N.**, Kamantsev I.S., Perovskaya M.V., Kuznetsov A.V., Semenchuk V.M., Nepomnyashchii A.S. To the estimation of welded joints fatigue fracture // **AIP Conference Proceedings**. Proceedings of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures 2315, 040031 (2020).



7. **Сараев Ю.Н.**, Каманцев И.С., Григорьева А.А., Кузнецов А.В., Семенчук В.М., Непомнящий А.С. Численная оценка усталостного разрушения сварных соединений, полученных дуговой сваркой с управляемыми и неуправляемым тепловложением и ударно-механической обработкой // **Динамика систем, механизмов и машин.** – 2020. – Т. 8. – N 4. – С. 162-170.
8. **Сараев Ю.Н.**, Лунев А.Г., Семенчук В.М., Непомнящий А.С. Кинетические особенности тепломассопереноса в условиях сварки и наплавки // **Известия высших учебных заведений. Физика.** – 2019. – Т. 62. – N 9 (741). – С. 34-40.
9. Ан И.К., Вольф Э.Л., **Сараев Ю.Н.** Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды // **Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).** – 2019. – Т. 21. – N 1. – С. 108-121.
10. **Saraev Y.N.**, Semenchuk V.M., Nepomnyashiy A.S., Trigub M.V., Vasnev N.A. The imaging of the welding processes with the use of CuBr-Laser // **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, AMPL 2019.** С. 113221U.
11. Paton B.E., Sidoruk V.S., Maksimov S.Yu., Saraev Yu.N. The history of the emergence and development of the theory of self-regulation of the arc during welding with consumable electrode. Critical analysis of existing ideas // **Welding International.** – 2018. – N 6 – pp. 3-14.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

«22» октября 2021 года

Ю.Н. Сараев

**Контактные данные:**

Почтовый адрес организации – места работы:

Индекс 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4.

Телефон: +7 (3822) 492942

E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

Подпись Сараева Юрия Николаевича заверяю:

Ученый секретарь Г

Н.Ю. Матолыгина