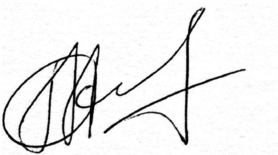


Холопов Андрей Андреевич

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ
МОЩНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА АЛЮМИНИЕВЫЕ
СПЛАВЫ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ИХ
ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.02.07 – Технологии и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2013

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

ШИГАНОВ Игорь Николаевич

Официальные оппоненты:

ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич доктор
технических наук, профессор,
ОАО «Российская самолетостроительная
корпорация «МиГ»,
начальник лаборатории

ПЕТРОВСКИЙ Виктор Николаевич кандидат
физико-математических наук, доцент,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»,
кафедра «Лазерная техника»

Ведущая организация:

ОАО «Национальный институт авиационных
технологий» (ОАО «НИАТ»), г. Москва

Защита диссертации состоится «26» 06 2013 г. в 14:30
на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мс
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 8-499-267-09-63.

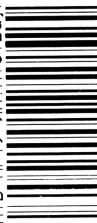
Автореферат разослан «24» 05 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Михайлов В.П.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2029749

Холопов А. А. Физико-техни

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Непрерывно возрастающие требования к алюминиевым конструкциям в различных отраслях промышленности обуславливают необходимость усовершенствования используемых материалов, а так же применение высокоэффективных методов их обработки.

Применение лазерного источника нагрева для обработки алюминиевых сплавов (термоупрочнение, сварка, резка) является одним из наиболее перспективных и производительных направлений в технологии обработки металлических материалов. Основные достоинства лазерной обработки заключаются в существенном снижении деформаций и напряжений на обрабатываемых деталях, а также в создании благоприятных структур, обеспечивающих высокие механические свойства.

До настоящего времени для обработки алюминиевых сплавов использовали преимущественно излучение CO_2 -лазеров. Основные трудности применения CO_2 -лазера как инструмента для обработки алюминиевых сплавов связаны с относительно низкой эффективностью воздействия его излучения по сравнению с обработкой сталей.

В начале XXI века широкое распространение получил новый класс мощных твердотельных лазеров – волоконный. Помимо более короткой длины волны излучения (1,07 мкм) этот тип лазеров обладает самым высоким коэффициентом полезного действия (КПД), который достигает 30%. При этом его излучение может передаваться к месту обработки по гибкому световоду, что позволяет существенно расширить технологические возможности лазерных процессов. Также применение волоконных лазеров снижает затраты при эксплуатации и обслуживании технологических комплексов в сравнении с CO_2 -лазерами. Однако до настоящего времени комплексного исследования физико-технологических процессов, сопровождающих лазерную обработку алюминиевых сплавов излучением волоконного лазера, не проводилось, что затрудняло оценку эффективности его применения. В связи с этим постановка данной работы является весьма актуальной.

Цель данной работы – выявление физических и технологических условий, обеспечивающих качественную и эффективную обработку алюминиевых сплавов излучением мощного волоконного лазера.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Экспериментальное определение и расчет эффективного и термического КПД при обработке алюминиевых сплавов излучением волоконного лазера в сравнении с обработкой излучением CO_2 -лазера.
2. Качественное и количественное сравнительное определение составляющих потерь энергии при обработке алюминиевых сплавов излучением волоконного и CO_2 лазеров.

3. Исследование взаимодействия излучения волоконного лазера с возникающим над поверхностью алюминиевых сплавов плазменным факелом.

4. Сравнительная оценка потерь на рефракцию в процессе обработки алюминиевых сплавов излучением волоконного и CO_2 лазеров.

5. Оптимизация параметров излучения волоконных лазеров и режимов обработки для реализации технологических процессов лазерного термоупрочнения, сварки и резки алюминиевых сплавов.

6. Оценка механических и металлургических свойств алюминиевых сплавов после обработки излучением волоконного лазера.

Научная новизна работы

1. Установлено, что в широком диапазоне режимов полный КПД процесса, определяющий эффективность взаимодействия концентрированного излучения волоконного лазера с длиной волны 1,07 мкм с поверхностью алюминиевых сплавов, в среднем на 30-37% выше, чем при обработке излучением CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм. За счет этого обработка алюминиевых сплавов излучением волоконного лазера, как с оплавлением, так и без него становится более эффективной и производительной.

2. Экспериментально и теоретически показано, что при воздействии луча волоконного лазера на поверхность алюминиевого сплава приповерхностная плазма имеет в 3-4 раза меньшие температуры и низкие значения ионизации, в отличие от обработки излучением CO_2 -лазера. За счет этого снижается вероятность оптического пробоя и экранизация излучения. Установлено, что потеря энергии в плазменном факеле при обработке алюминиевых сплавов не превышает 4%.

3. Расчетными и экспериментальными методами установлено, что благодаря сочетанию высокого коэффициента поглощения алюминием излучения с длиной волны 1,07 мкм с возможностью более острой фокусировки, критический порог плотности мощности для начала проплавления алюминиевых сплавов при воздействии излучения волоконного лазера на 30-50% меньше, чем при обработке излучением CO_2 -лазера, что существенно снижает энергетические затраты при технологических процессах обработки.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Определены технологические условия, при которых применение волоконных лазеров для обработки алюминиевых сплавов наиболее благоприятные.

2. Установлено, что применение для термической обработки алюминиевых сплавов излучения волоконного лазера позволяет более чем в 2 раза увеличить глубину упрочнения и почти в 10-12 раз увеличить производительность процесса в сравнении с обработкой излучением CO_2 -лазера.

3. Показано, что необходимая погонная энергия для получения качественных сварных соединений на алюминиевых сплавах излучением воло-

конного лазера в 2-2,5 раза меньше, чем в случае применения CO₂-лазера, что увеличивает производительность технологических процессов.

4. Применение волоконного лазера для резки алюминиевых сплавов толщиной до 3,0 мм позволяет повысить производительность на 50%, в сравнении с резкой излучением CO₂-лазера, при сохранении высокого качества реза.

5. Показано, что в связи с отсутствием оптического пробоя плазменного факела нет необходимости подавать в зону плавления дорогостоящий инертный газ гелий.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись экспериментальные и теоретические методы исследований. Для определения эффективного КПД процесса обработки использовали стандартные методики калориметрирования и измерения температурного поля. Измерение пространственных и энергетических параметров лазерного пучка осуществляли с применением калориметрических измерителей 5000W, F150A, фотоэлектрических измерителей PD300UV фирмы Ophir, анализатора луча UFF100 фирмы Prometec. Для оптической диагностики пароплазменного факела был использован лазерный модуль KLM-A980-5-5 фирмы ФТИ-Оптроник. Отражательную способность поверхности материала определяли стандартными методиками замера и определения коэффициента зеркального и дифракционного отражения с помощью интегрирующей сферы. Испытания механических свойств сварных соединений проводили по ГОСТ 6996-66. Планирование экспериментов и статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программах MicrosoftExcel и Matrixer.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (уравнения баланса энергии, теплопереноса и т.д.), проверена по известным критериям изучаемых процессов и подтверждена экспериментальными данными, обработанными с помощью методов статистического анализа.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Лазерная техника и технология» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российско-Французской конференции молодых ученых (Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана, апрель 2009), VIII Международной конференции молодых специалистов «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике» (Королев, июнь 2010), Международной конференции «Инновации-XXI» (Жуковский, июль 2010), 7-ой Международной конференции "Лучевые технологии и применение лазеров" (Санкт-Петербург, сентябрь 2012)

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 5 печатных работ, из них 3 статьи в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 главы, общих выводов, списка литературы из 129 наименований; содержит 156 страниц машинописного текста, 58 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе литературных данных приведен обзор области применения алюминиевых сплавов и основных технологий их обработки лазерным излучением. Обработкой алюминиевых сплавов лазерным излучением занимались отечественные ученые Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Лопота В.А., Туричин Г.В., а также зарубежные ученые Д.Рэди, У.Дьюли, М.Пастор и др.. Рассмотрены особенности поверхностного лазерного термоупрочнения алюминиевых сплавов, отмечено, что значительное изменение микроструктуры и микротвердости в зоне лазерного воздействия поверхностного слоя возможно только при быстром охлаждении из жидкого состояния. Рассмотрены способы повышения поглотительной способности обрабатываемых поверхностей. Отмечено существенное различие глубины зоны лазерного воздействия при применении твердотельного и CO_2 лазеров. Указано на необходимость применения поглощающих покрытий для увеличения эффективности термообработки CO_2 -лазером.

Анализ отечественных и иностранных публикаций по лазерной сварке алюминиевых сплавов выявил ряд трудностей, среди которых выделяется пороговый характер проплавления, заключающийся в том, что расплавление металла начинается только при определенном уровне плотности мощности (около $1 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$). Указано на высокое значение пространственных оптических параметров лазерного пучка на эффективность и качество лазерной резки сплавов на основе алюминия. Общим требованием для различных технологий лазерной обработки алюминиевых сплавов отмечена необходимость увеличения поглотительной способности путем применения коротковолнового излучения.

Приведены конструктивные особенности и краткое описание принципа работы мощных волоконных лазеров. Показаны эксплуатационные и технологические преимущества применения волоконных лазеров. Кратко описаны основные особенности сфокусированного пучка волоконного лазера и даны теоретические предпосылки его применения для обработки алюминиевых сплавов.

На основании анализа литературных данных сформулированы задачи исследования настоящей работы.

Во второй главе приведено описание материалов, оборудования и методик исследования воздействия волоконного лазера на алюминиевые сплавы. В качестве основного материала для исследований был выбран наиболее распространенный алюминиевый сплав АМг6 (система Al-Mg). Кроме того исследовалась сварка следующих деформируемых сплавов: 01570 (Al-Mg-Sc), 1424 (Al-Mg-Li), B1461 (Al-Cu-Li), а также термообработка литейного сплава АК9 (Al-Cu-Si). Приведен их химический состав и механические свойства. Толщина исследуемых материалов составляла 1,5-5,0 мм.

Обработку образцов проводили с использованием излучения волоконного лазера и различных непрерывных CO₂-лазеров. Экспериментальная установка представляла собой универсальный роботизированный комплекс на базе иттербиевого волоконного лазера ЛС-4К фирмы "ИРЭ-Полюс" и промышленного робота IRB2400 фирмы ABB. Для фокусировки излучения технологические технологические головки для резки YK52-150 и сварки YW50-300 фирмы Precitec.

Для сравнительной оценки отличий во взаимодействии с алюминиевыми сплавами лазерного излучения длиной волны 1,07 мкм и 10,6 мкм помимо изучения литературных данных были проведены серии экспериментов с применением технологических комплексов на основе CO₂ лазеров. Использовали технологический быстропрокачной лазер ТЛ-5М и щелевой (slab) лазер DC 025 фирмы RofinSinar. США.

Регистрация энергетических параметров лазерного пучка проводилась с применением калориметрических 5000W, F150A и фотоэлектрических PD300UV измерителей производства фирмы Ophir. Распределение мощности по сечению коллимированного пучка определяли по методу сканирования отверстия. Для измерения плотности интенсивности излучения в фокусе и каустики сфокусированного пучка был применен прибором UFF100 фирмы Prometec.

В качестве источника пробного излучения для определения коэффициента пропускания плазменного факела использовали одномодовый лазерный модуль KLM-A980-5-5 фирмы ФТИ-Оптроник.

Испытания сварных соединений на механические свойства производили на машине ИР 5047-50 производства ОАО «Точприбор» в соответствии ГОСТ 6996-66. Измерение твердости проводили по методу Виккерса на микротвердомере HVS-1000. Для выявления макроструктуры использовали травление в NaOH с последующим осветлением азотной кислотой. Металлографические исследования выполняли на оптическом микроскопе «Биомед ММР-2» при увеличении от 40 до 1250 крат с системой цифровой обработки изображений на основе цифровой камеры с оптическим

разрешением 1200 dpi. Цифровую обработку полученных изображений делали при помощи AdobePhotoshop.

Для статистического анализа результатов экспериментов использовали программа“Matrixer”.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному анализу физических процессов протекающих при обработке алюминиевых сплавов излучением волоконного лазера.

Экспериментально и теоретически определена энергетическая эффективность процесса глубокого проплавления алюминиевого сплава АМгб излучением волоконного и СО₂ лазеров в зависимости от режимов обработки. Эффективный КПД процесса представляет собой отношение эффективной тепловой мощности (энергии поглощенной материалом в единицу времени) к мощности лазерного источника:

$$\eta_{эф} = \frac{q}{q_0}$$

Эффективную тепловую мощность источника определяли по двум методикам:

Калориметрическим методом с помощью уравнения теплового баланса при погружении обработанного образцам в воду по формуле:

$$q = \frac{Q_k + Q_s + Q_n + Q_{\phi}}{t_n} = \frac{(M_w C_w + M_{ks} C_{ks})(T_m - T_0) + M_{об} C_{об}(T_m - T_0) + M_n(L_n + L_{исп})}{t_n - \frac{A}{C \cdot H} (t_n^2 + 2t_n t_n) 1000}$$

где Q – теплота, поглощенная образцом; Q_к – теплота, поглощенная калориметром; Q_с– теплота, определяющая полный запас тепловой энергии внутреннего состояния образца до и после опыта (энтальпия); Q_п – теплота, расходуемая на парообразование; Q_а – тепловые потери вследствие теплообмена образца с окружающей средой во время нагрева и переноса образца в калориметр; M_в, M_{кs} – масса воды в калориметре и калориметрического сосуда соответственно; C_в, C_{кs} – их удельные массовые теплоемкости; T₀– температура воды до опыта; T_м– температура воды после опыта; M_{об}– масса образца; C_{об}– удельная массовая теплоемкость металла образца; T_в – температура окружающего воздуха; M_п– масса испарившейся воды; L_н – теплота, необходимая для нагрева 1 кг воды от 20 до 100 °С; L_{исп} – удельная теплота испарения; A – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи образца; C – объемная теплоемкость образца; H – толщина образца

И методом измерения температурного поля исходя из аналитической зависимости, полученной Н.Н.Рыкалиным из уравнения теплопроводности, для определения максимальной температуры в точке на определенном расстоянии от границы проплавления при воздействии на образец мощным линейным быстродвижущимся источником:

$$q = \frac{T \cdot V \cdot c_y \cdot \delta \cdot 2y_0}{0,484(1 - \frac{by_0^2}{2a})}$$

где T – максимальная температура, V – скорость перемещения источника, c_y – объемная теплоемкость образца, δ – толщина образца, y_0 – расстояние от шва до точки измерения температуры, b – коэффициент температуропроводности, a – коэффициент температуропроводности.

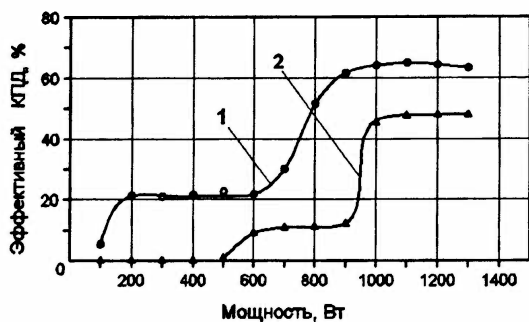
Сравнение результатов, полученных этими методами показало высокую их сходимость, а следовательно и достоверность полученных значений.

Термический КПД рассчитывался по формуле:

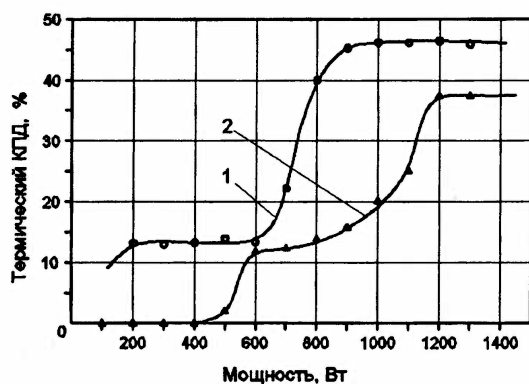
$$\eta_{\text{т}} = \frac{V \cdot F \cdot S}{q}$$

где $V \cdot F \cdot S$ – условное теплосодержание проплавленного за единицу времени основного металла; V – скорость проплавления при исследуемом режиме, м/с; F – площадь поперечного сечения проплавления, м²; S – удельное объемное теплосодержание расплавленного металла (литая зона), включающее в себя скрытую теплоту плавления, Дж/м³; q – эффективная тепловая мощность источника, Вт.

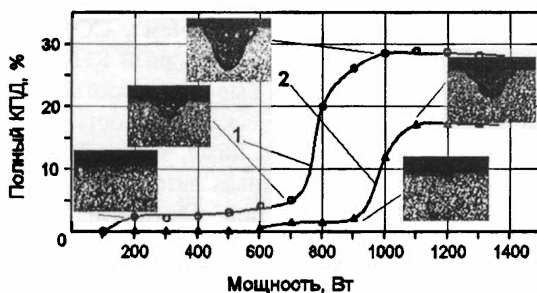
Полученные результаты показали повышение эффективности применения излучения волоконного лазера по сравнению с СО₂-лазером для алюминиевых сплавов во всем диапазоне исследуемых режимов. Известной отличительной особенностью лазерной обработки алюминиевых сплавов является пороговый характер начала плавления, который заключается в том, что интенсивное плавление металла с образованием парогазового канала начинается только при определенном уровне плотности мощности, называемой критической плотностью мощности (КПМ). Установлено, что эффективный КПД проплавления волоконного лазера на плотностях мощности, не превышающих КПМ, достигает 20%, что в 2 раза выше, чем у СО₂-лазера (рис. 1, а). Показано, что в закритической области эффективный КПД при воздействии излучения волоконного лазера на 30-32% выше, чем соответствующие значения для СО₂-лазера. Показано, что критическая плотность мощности, для обработки волоконным лазером на 50%-70% ниже, чем для СО₂-лазера. Например, при обработке излучением волоконным лазером сплава АМгб эффективное проплавление начинается уже при плотности мощности $0,4 \times 10^6$ Вт/см², тогда как для плавления этого сплава излучением СО₂-лазера необходимая плотность мощности составляет $(0,9-1,0) \times 10^6$ Вт/см². Термический КПД процесса обработки излучением волоконного лазера достигает 47%, в то время как для СО₂-лазера он составляет только 35% (рис. 1, б). Полный КПД процесса при обработке излучением волоконного лазера достигает значений 27-28%, что на 30-37% выше подобных значений, получаемых при обработке излучением СО₂-лазера (рис. 1, в).



а



б



в

Рис. 1. Зависимость эффективного (а), термического (б) и полного (в) КПД проплавления сплава АМг6 от мощности лазерного источника на скорости $V=2$ м/мин при обработке излучением:
1 – волоконного лазера, 2 – CO₂-лазера

Проведен анализ физико - технических процессов, обеспечивающих повышение эффективности обработки при применении волоконного лазера. На основании уравнения теплового баланса нагрева металла лазерным излучением выявлены основные факторы, влияющие на энергетические потери при передаче энергии излучения алюминиевым сплавам. К таким факторам относятся:

1. Длина волны излучения лазера
2. Потери на плазменном факеле
3. Качественные характеристики лазерного пучка

Показано, что существенное отличие значения длин волн излучения волоконного и CO_2 -лазера непосредственно влияет на поглощение излучения на режимах обработки без образования парогазового канала. Экспериментально установлено, что на плотностях мощности, не превышающих КПМ коэффициент отражения от сплава АМгб излучения волоконного лазера на 15%-20% меньше, коэффициента отражения при облучении CO_2 -лазером (рис. 2). В значительной степени за счет этого снижается на 30-50% порога начала проплавления алюминиевых сплавов при воздействии излучения волоконного лазера в сравнении с излучением CO_2 -лазера.

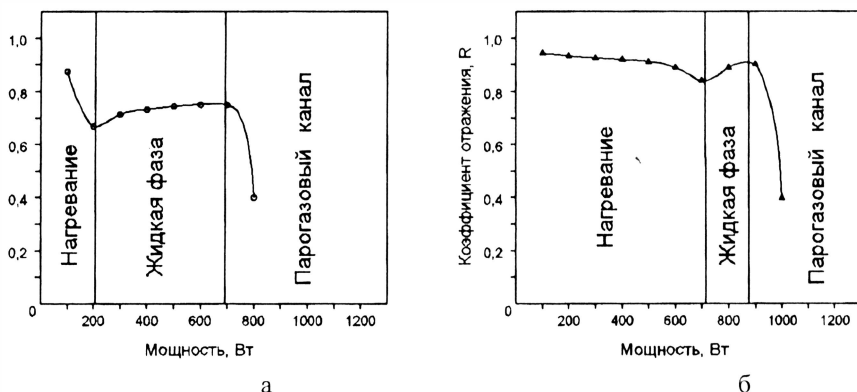


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от поверхности сплава АМгб от мощности лазерного источника на скорости $V=2$ м/мин при обработке излучением:

а – волоконного лазера, б – CO_2 -лазера

Теоретически и экспериментально исследован паро-плазменный факел, образующийся при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью и формировании парогазового канала. Показано, что температура факела не превышает 6000К, что в 3-4 раза меньше чем при обработке CO_2 -лазером, а возникающая плазма находится в слабо ионизированном состоянии, что снижает вероятность оптического пробоя и экранизацию излучения. Негативное

влияние на передачу излучения в зону обработки оказывает наличие конденсированной фазы в верхней части паро-плазменного факела.

Проведено измерение коэффициента пропускания диагностического излучения в верхней части факела. Для этой цели использовали диодный лазер с длиной волны 980 нм мощностью 5 мВт. Установлено, что интегральное ослабление интенсивности пучка пробного излучения составляет не более 4% и практически не зависит от используемого защитного газа (рис. 3).

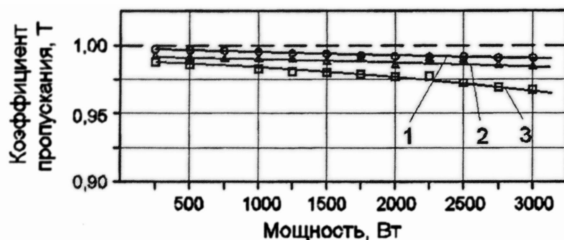


Рис.3. Зависимость коэффициента пропускания плазменного факела от мощности излучения волоконного лазера и рода защитного газа при скорости перемещения подложки 2,5 м/мин:
1 – гелий; 2 – аргон; 3 – воздух

Таким образом, показано, что при воздействии излучения волоконного лазера с длиной волны 1,07 мкм на алюминиевый сплав, поглощение этого излучения плазмой и его рефракция не оказывают существенного влияния на снижение эффективности нагрева металла.

Приведены результаты исследований особенностей пространственной структуры пучка волоконного лазера. Установлено, что распределение интенсивности излучения по сечению сфокусированного пучка значительно изменяется в пределах глубины фокусировки. Отмечено, что высокое качество излучения волоконного лазера создает особые требования к качеству и чистоте оптической системы фокусировки.

В четвертой главе исследовались технологические особенности применения волоконного лазера для термообработки, сварки и резки алюминиевых сплавов.

Исследованы особенности упрочнения поверхности литейного сплава АК9 излучением волоконного лазера. Установлено, что глубина зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) при обработке излучением волоконного лазера в 1,5-2 раза выше, чем при обработке излучением CO_2 -лазера той же мощности. Кроме того применение волоконного лазера приводит к увеличению дисперсности структуры и повышению твердости ЗЛВ. Общая эффективность процесса термообработки при использовании волоконного лазера в 10-12 раз выше, чем для CO_2 -лазера.

Показано, что эффективным методом повышения поглощательной способности лазерного излучения и КПД проплавления при обработке алюминиевых сплавов является применение флюсов сложного состава, наносимых на поверхности материала перед обработкой. Кроме того, применение флюсов позволяет повысить уровень механических свойств сварных соединений и снизить требования к сборке под сварку.

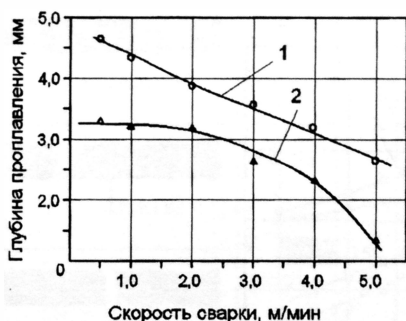


Рис.4. Влияние скорости сварки на глубину проплавления сплава АМгб при мощности 2,5 кВт излучения: 1 – волоконного лазера, 2 – СО₂-лазера

Исследование процесса сварки позволило выявить следующие особенности. В связи с отсутствием оптического пробоя плазменного факела нет необходимости подавать в зону плавления дорогостоящий инертный газ гелий. Для защиты шва от окисления рекомендована подача в зону плавления аргона. Установлено, что при одинаковых режимах и условиях фокусировки источников глубина проплавления излучением волоконного лазера на 20-25% выше, чем при сварке излучением СО₂-лазера (рис. 4). Сварка тонколистовых конструкций лучом волоконного лазера характеризуется снижением на 10-20% ширины

сварного шва, по отношению к швам, полученным излучением СО₂-лазера, что благоприятно сказывается на остаточных деформациях и напряжениях в шве и околошовной зоны. Уменьшение объема расплавленного металла связано с меньшей мощностью волоконного источника, необходимой для проплавления заданной толщины.

Технологической особенностью сварки алюминиевых сплавов излучением волоконного лазера является попадание отраженного излучения в оптический тракт, что может привести к его повреждению. Показано, что эффективным способом борьбы с обратным отражением является наклон технологической головки относительно нормали к обрабатываемой поверхности. Установлено, что оптимальным является наклон головки на 10- 12 градусов в направлении обработки. При таком наклоне отражение снижается в 3 раза при уменьшении эффективности не более чем на 5% (рис 5.). Положительное влияние на снижение величины обратного отражения оказывает применение присадочной проволоки. Установлено, что применение присадки снижает отраженное излучение на 100...150 %. Для улучшения стабильности проплавления, а также для повышения надежности и прочности сварных соединений из алюминиевых сплавов и снижения требований к сборке предложено ис-

пользовать присадочную проволоку диаметром 1,0-1,2 мм. Также присадочная проволока позволяет снизить требования к сборке под сварку.

Исследовали два способа подачи присадочной проволоки в зону лазерной обработки – перед и за лучом. Установлено, что при подаче проволоки «в хвост» сварочной ванны эффективность проплавления и качество формирования сварного шва выше, чем при подаче присадки перед лучом.

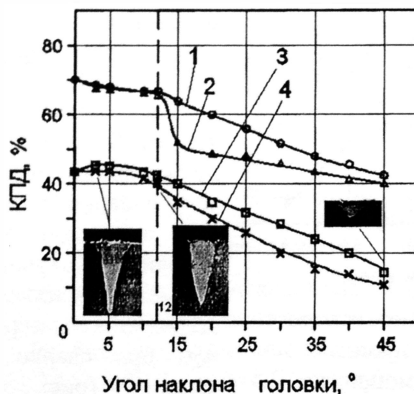


Рис.5. Зависимость эффективного и термического КПД от угла наклона технологической головки:

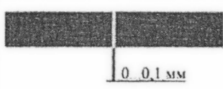
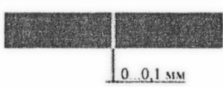
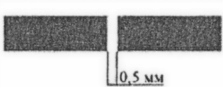
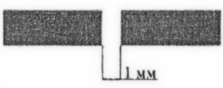
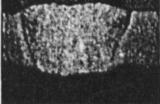
- 1 – эффективный КПД, наклон в сторону движения головки;
- 2 – эффективный КПД, наклон против движения головки;
- 3 – термический КПД, наклон в сторону движения головки;
- 4 – термический КПД, наклон против движения головки

Важным технологическим фактором является снижение требований по сборке стыков под сварку. В частности, увеличение зазора с 0,1 мм до 1,0 мм при сварке с присадкой пластин толщиной 2 мм из сплава АМгб снижает прочность соединения не более 5% (табл. 1). Проведен обобщающий анализ свариваемости некоторых групп деформируемых алюминиевых сплавов с использованием присадочной проволоки и без нее. Применение присадки при сварке сплавов АМгб и 1424 позволяет повысить прочность соединения на 17-18%. Исследование микроструктуры показало, что присадка благоприятно влияет на увеличение дисперсности зерен в шве. Практически на всех режимах не наблюдается структурных изменений в зоне термического влияния. Происходит резкий переход от структуры литой зоны к структуре основного материала, что особенно важно для термоупрочненных сплавов.

Проведен сравнительный анализ особенностей газолазерной резки излучением волоконного лазера и СО₂-лазера. Для выявления особенностей использования излучения волоконного лазера для резки алюминиевых сплавов

Таблица 1.

Зависимость прочности сварного соединения пластин, толщиной 2 мм из сплава АМгб от наличия присадочного материала и величины зазора:

Зазор, мм	Наличие присадки	$\sigma_{ср}$, МПа		$\sigma_{в ш}$ $\sigma_{в осн}$	α , °		Место разрушения	Макроструктура шва
		Исх. мат.	Св. шов		Исх. мат.	Св. шов		
 0,01 мм	НЕТ	357	281	0,79	53	85	шов	
 0,01 мм	ЕСТЬ		300	0,84		75	ОШЗ	
 0,5 мм	ЕСТЬ		290	0,81		59	ОШЗ	
 1 мм	ЕСТЬ		286	0,80		55	ОШЗ	

оценивалась производительность и качественные показатели реза. Исследования проводились на пластинах из сплава АМгб толщиной 2, 3 и 5 мм. Производительность резки определялась экспериментальным подбором технологического окна, соответствующего области качественной резке для каждого типа лазеров. Для оценки качества реза определялись шероховатость, ширина реза и протяженность зоны термического влияния. Отработка режимов проводилась с использованием итербиевого волоконного лазера с максимальной мощностью 4 кВт, и СО₂ лазера мощностью до 2,5 кВт.

Более предпочтительно применение резки излучением волоконного лазера алюминиевых сплавов толщиной до 3,0 мм. При этом производительность резки алюминиевых сплавов толщиной до 3-х мм при применении волоконного лазера в 1,5-2 раза превышает производительность СО₂-лазера. Характерные окна технологических параметров лазерной резки представлены на рис. 6.

Экспериментально показано, что при резке излучением волоконного лазера алюминиевого сплава толщиной более 3,0 мм наблюдается менее эффективное удаление расплава на выходе из реза, вызванное большим поглощением кромками реза. Это приводит к необходимости повышения давления

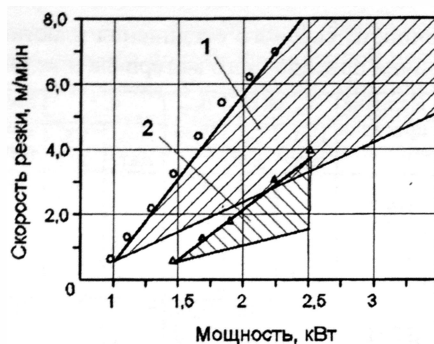


Рис. 6. Область технологических параметров, обеспечивающих качественную резку сплава АМг6, толщиной 3 мм:
1 — волоконного лазера, 2 — СО₂-лазера.

и расхода рабочего газа. Также очевидно, что для резки одной и той же толщины материала на одинаковой скорости необходимая мощность волоконного лазера в 1,5 раза меньше, чем мощность СО₂ лазера.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Произведен сравнительный анализ эффективности обработки алюминиевых сплавов излучением волоконного и СО₂ лазера. Полный КПД процесса при обработке излучением волоконного лазера в среднем на 30-37% выше, чем при обработке излучением СО₂-лазера.

2. Установлено, что критический порог мощности, необходимой для начала проплавления алюминиевых сплавов при воздействии излучения волоконного лазера на 30-50% меньше, чем при обработке излучением СО₂-лазера, что повышает эффективность обработки.

3. Возникающий при плотностях мощности от 10^5 до 10^7 Вт/см² слабо ионизированный плазменный факел не оказывает влияние на излучение волоконного лазера. Однако более низкая температура плазмы, образующейся при обработке излучением волоконных лазеров, относительно температуры плазмы от излучения СО₂-лазера, способствует конденсации металлического пара в большей степени и, соответственно росту поглощения излучения конденсированными частицами.

4. Измерением коэффициента пропускания лазерного излучения в верхней части факела установлено, что ослабление излучения составляет не более 4% и практически не зависит от используемого защитного газа.

5. В качестве метода борьбы с попадающим в оптический тракт обратным отражением при технологических операциях предложено использо-

вать наклон технологической головки. Оптимальный наклон составляет 12° в сторону движения головки.

6. При термической обработке алюминиевых сплавов требуемые энергетические параметры лазерного излучения волоконного лазера на 50-100% ниже, чем при использовании CO_2 лазера.

7. Для обеспечения стабильности проплавления, а также для повышения надежности и прочности сварных соединений из алюминиевых сплавов, а также снижения требований к сборке предложено использовать присадочную проволоку диаметром 1,0-1,2 мм. Применение присадки при сварке сплавов АМгб и 1424 позволяет повысить прочность соединения на 17-18%. Увеличение зазора с 0,1 мм до 1,0 мм при сварке с присадкой пластин из сплава АМгб снижает прочность соединения не более, чем на 5%.

8. Оценка качества резки алюминиевых сплавов волоконным лазером, показала, что показатели шероховатости находятся на уровне, показателей, получаемых излучением CO_2 лазера при резке материала толщиной не более 3,0 мм.

9. По комплексу проведенных исследований установлено, что волоконный лазер является более эффективным инструментом для лазерной обработки алюминиевых сплавов, чем CO_2 -лазер.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Технологические особенности сварки алюминиевых сплавов с присадочной проволокой излучением волоконного лазера // Машиностроительные технологии: Сборник тезисов докладов всероссийской научно-технической конференции. Москва, 2008. С. 163-164.

2. Kholopov A.A. Laser welding of aluminum alloys with filler wire // Bauman Russian-French colloquium of young scientist: Collection of conference proceedings. Moscow, 2009. С. 45-48.

3. Холопов А.А. Технологические особенности лазерной сварки авиационных алюминиевых сплавов // Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике, Инновации в авиастроении: Сборник тезисов VIII Международной конференции молодых специалистов, Королев, 2010. С. 73-75.

4. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Технологические особенности сварки мощным лазерным излучением деформируемых алюминиевых сплавов авиационного назначения // Инновации-XXI: Сборник тезисов Международной конференции. Жуковский, 2010. С. 114.

5. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. 2010. №3. С. 6-10.

6. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Йода Е.Н. Технологические особенности лазерной сварки алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2010. № 10. С. 32-37.

7. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Повышение эффективности лазерной обработки алюминиевых сплавов // Технология машиностроения. 2011, №11. С.48-51.

8. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Технологические особенности применения мощных волоконных лазеров для обработки алюминиевых сплавов //Лучевые технологии и применение лазеров: Сборник тезисов 7-ой Международной конференции. Санкт-Петербург, 2012. С. 344.

9. Шиганов И.Н., ШаховС.В., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Машиностроение: Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. №5. 2012. С. 34-50.