

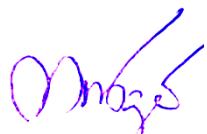
На правах рукописи

Хтет Аунг Лин

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ
СОВМЕЩЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НАГРЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

Мисюров Александр Иванович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Фролов Вадим Анатольевич
доктор технических наук,
Технологический институт Российского
университета транспорта (МИИТ),
директор, профессор

Грезев Николай Витальевич
кандидат технических наук,
ООО НТО «ИРЭ-Плюс», начальник,
сектор лазерной сварки отдела лазерных
технологий, доцент

Ведущая организация:

«ИПЛИТ РАН» г. Шатура.

Защита состоится «_____» 2018 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7(499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06,
доктор технических наук, доцент

В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Локальный термический нагрев материалов концентрированным лазерным излучением используется практически во всех отраслях промышленности. Мощные когерентные лазерные пучки при их фокусировке на поверхности материалов обеспечивают высокую концентрацию энергии в пятне нагрева. Это позволяет решить проблемы увеличения производительности, снижения себестоимости продукции, повышения ее качества при термообработке, легировании, наплавке, сварке, термической резке и т.д. В настоящее время в мире производится и продаётся лазерного оборудования для обработки материалов примерно на \$10 млрд. в год.

Прогресс в создании мощных потоков когерентной энергии идёт прежде всего по пути наращивания мощности излучения с соответствующим увеличением потребляемой электрической мощности. Это ведёт к техническому усложнению лазерного технологического оборудования, снижению его надёжности, технико-экономических показателей и, в конечном итоге, не позволяет в полной мере реализовать принципиальные возможности лазерной технологии. С улучшением технических характеристик лазеров растёт также стоимость лазерной энергии, что делает экономически не всегда целесообразным их применение. Ведущие мировые лазерные центры работают в направлении снижения затрат на лазерную энергию при одновременном увеличении производительности лазерных процессов.

Совместное использование тепловых источников создает возможность повышения производительности и эффективности процесса лазерной обработки не за счет наращивания дорогостоящей энергии лазерного излучения, а за счет более дешевой энергии второго источника тепла. Наряду с этим создается возможность изменения тепловой обстановки в обрабатываемом объекте, например, регулирования скорости охлаждения в диапазоне температур фазовых и структурных превращений, что существенно при лазерной термообработке, легировании и сварке закаливающихся сталей.

Таким образом, проблема повышения эффективности и расширения возможностей технологических лазеров является актуальной научной и практической задачей, позволяющей ускорить внедрение высокоэффективных технологий лазерной обработки в производство. В работе предлагается для нагрева материалов применение комбинации двух нагревателей, использующих различные методы генерации энергии. Это позволяет получить новое качество в виде расширения технологических возможностей лазерного оборудования и способов лазерной обработки. В связи с этим постановка данной работы является весьма актуальной.

Целью работы является повышение эффективности лазерного воздействия за счет совмещения источников тепла, определение областей рационального применения и установление технологических особенностей лазерной обработки совмещенными источниками тепла при проведении процессов термообработки, поверхностного легирования, наплавки и сварки.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование энергетической эффективности поглощения лазерного излучения при лазерной обработке совмещенными источниками тепла
2. Изучение формирования температурных полей при взаимодействии совмещенных источников тепла с поверхностью металла.
3. Установление влияния параметров лазерной обработки с использованием дополнительного источника на эффективность поглощения лазерного излучения и определение областей рационального применения.
4. Исследование технологических особенностей использования совмещенных источников тепла для операций термообработки, легирования, наплавка и сварки.
5. Выявление области применения светового луча для лазерной обработки сталей совмещенными источниками тепла.
6. Определение особенностей структурообразования при лазерной обработке с использованием дополнительного источника тепла сталей различного фазового состава.

Научная новизна работы

Научная новизна работы, выносимая на защиту, состоит в следующем:

1. Теоретически и экспериментально показано, что в зоне взаимодействия совмещенных источников максимальная температура поверхности достигается на расстоянии между ними, которое прямо пропорционально скорости движения источников и разнице квадратов диаметров пятна нагрева лазерного луча и дополнительного источника, обратно пропорционально коэффициенту температуропроводности, характеризующему теплофизические свойства, и не зависит от мощности дополнительного источника, что связано с увеличением поглощения лазерного излучения.
2. Экспериментально показано, что применение дополнительных источников тепла в широком диапазоне режимов повышает полный КПД процесса лазерной обработки в 1,5 - 3,4 раза. Эффект увеличения КПД зависит от вида дополнительного источника и выбранных режимов обработки.
3. Установлена взаимосвязь структурного и фазового состава металла сварного соединения с режимами лазерной обработки закаливающихся сталей с дополнительным источником тепла. Доказано, что изменение скорости охлаждения в интервале температур (800 – 500) $^{\circ}\text{C}$ связано с взаимным расположением тепловых источников. Выбором относительного положения между источниками тепла при сварке закаливающихся сталей можно управлять фазовым составом сварного соединения и получить, в зависимости от состава стали, гамму структур в шве и зоне термического влияния от мало пластичной закалочной структуры с содержанием мартенситной составляющей около 96 % до отпущеной бейнитно-трооститной, относительно пластичной, с содержанием троостита до 13%.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Установлена область использования дополнительных источников тепла, базирующихся на разных способах генерации энергии, для проведения процессов лазерной обработки. Светолучевой источник теплоты рекомендуется применять при лазерной термообработке без оплавления поверхности, при лазерной наплавке локальных участков малых размеров импульсно-периодическим излучением, а также для соединения изделий из среднелегированных и austenитных сталей толщиной до 2 мм. Сварку толстолистовых закаливающихся сталей без разделки кромок следует проводить двумя сфокусированными лазерными лучами. Использование сварочной дуги рекомендуется при лазерной сварке толстолистовых сталей с разделкой кромок и лазерном поверхностном легировании, особенно материалов с высоким коэффициентом отражения.

2. Определены технологические условия и разработаны рекомендации по использованию дополнительных источников тепла, базирующихся на разных способах генерации энергии, для процессов лазерной термообработки, поверхностного легирования, наплавки импульсно-периодическим излучением и сварки малых толщин.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач применяли экспериментальные и теоретические методы исследований. Теоретические задачи решались с применением научных основ технологии лазерной обработки материалов. Для расчетов использовали модель процесса лазерно-световой сварки, разработанную в СПбПУ совместно с МГТУ им. Н.Э.Баумана. Определение эффективного КПД процесса обработки проводили по стандартным методикам калориметрирования. При установлении количественного состава структурно-фазовых составляющих использовали методику, в основе которой лежит оценка статистических параметров распределения микротвердости в каждой из фаз. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе «Neophot» фирмы Carl Zeiss Jena при увеличении до 1000 раз. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3. Планирование экспериментов и статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программах Microsoft Excel и Matrixer.

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 «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (Москва, 2013, 2015, 2016, 2017 г.г.), на Всероссийской научно-технической

конференции «Студенческая весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2012, 2014 г.г.), на VII Международной научно-технической конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2012 г.), на Десятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017 г.).

Публикации.

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены 7 печатных научных работах, из них 3 статьи в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, объемом 4,7 п.л/ 1,8 п.л.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы из 166 наименований и содержит 169 страницы машинописного текста, в том числе 95 рисунка и 25 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен литературный анализ технологических особенностей лазерной обработки совмещенными источниками тепла. Этим вопросам посвящено достаточно большое количество работ Российских и зарубежных исследователей. Основной вклад внесен Стином В.М., Туричиным Г.А., Кривцуном И. В., Григорьянцем А.Г., Хаскиным В.Ю., Хамадааки М., Акихиро У. и др. В их работах показано, что повышение эффективности лазерной обработки совмещенными источниками тепла связано с возникновением синергетического эффекта, заключающегося в существенном увеличении объема расплавленного металла при совместном действии двух или нескольких источников тепла по сравнению с источниками тепла независимого действия.

Лазерная обработка совмещенными источниками начинает находить все большее применение в промышленности вследствие своей высокой технико-экономической эффективности. В качестве дополнительного источника тепла используют сварочную дугу, плазму, расфокусированное лазерное излучение, световые источники и некоторые другие.

Несмотря на большое количество работ, посвященных этому способу обработки, остаются невыясненными вопросы рациональной области его применения. Практически все известные работы посвящены сварке металлов. Гораздо меньше внимания уделяется применению данного технологического приема при термообработке, легировании и наплавке, хотя эффективный КПД этих способов лазерной обработки существенно ниже, чем при сварке. Так для

лазерной термообработки, легирования и наплавки, он составляет всего около 10-20%, тогда как при лазерной сварке в режиме развитого испарения он может достигать 80-90%.

Существующие противоречия рекомендаций по назначению режимов не позволяют проводить лазерную обработку совмещенными источниками с максимальной эффективностью. В частности, в литературе нет единого мнения об оптимальном взаимном положении лазерного и дополнительного источника, отсутствуют также рекомендации по выбору типа дополнительного источника тепла при проведении того или иного процесса лазерной обработки. Уделяется мало внимания структурообразованию при сварке совмещенными источниками тепла закаливающихся сталей. Высокие скорости охлаждения характерные для лазерной сварки могут привести к появлению закалочных структур и снижению свойств сварного соединения.

На основании анализа литературных данных сформулированы задачи исследования настоящей работы.

Во второй главе приведено описание материалов, оборудования и методик исследования процесса лазерной обработки с использованием дополнительных источников тепла. Для изучения основных технологических процессов лазерной обработки выбраны соответствующие материалы. При термообработке использовали сталь 45, для исследования легирования - алюминий-магниевый сплав АМг6, наплавку проводили порошками системы легирования Ni-Cr-B-Si, при сварке применяли закаливающуюся сталь типа 30ХГСА и нержавеющую сталь типа Х18Н9.

Эксперименты проводили на специально подготовленных стендах, оснащенных технологическими лазерами, дуговыми, лазерными и светолучевыми дополнительными источниками тепла, а также механизмом перемещения. Для генерации лазерного излучения использовали волоконный лазер ЛС-3,5, твердотельный Nd:YAG-лазер «Квант-15» и непрерывные CO₂-лазеры ТЛ-5М и ТЛ-3. Для создания дополнительного теплового источника применяли светолучевые установки, разработанные и запатентованные Научно-производственной фирмой НПЦ «МГМ-1» совместно с чешской фирмой «SVAR», излучение лазера ТЛ-3, а также сварочную дугу, получаемую от универсального инверторного источника МАГМА-315.

Определение эффективного КПД проводили по стандартной методике калориметрирования. Для проведения металлографических исследований использовали оптический микроскоп «Neophot» фирмы Carl Zeiss Jena при увеличении до 1000 раз. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ Р ИСО 22826-2012.

Теоретические задачи решали с применением научных основ технологии лазерной обработки материалов. Анализ температурных полей проводили с помощью прикладных научных положений и зависимостей, полученных на основе теории теплопроводности. Для расчетов использовали также модель процесса лазерно-световой сварки, разработанную в СПбПУ совместно с МГТУ им. Н.Э.Баумана. При изучении количественного состава структурно-фазовых

составляющих использовали методику, в основе которой лежит оценка статистических параметров распределения микротвердости в каждой из фаз. Для Анализа влияния технологических факторов на эффективность лазерной обработки проводили по регрессионным зависимостям, полученным в работе на основе моделирования. Планирование экспериментов и статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли в программах Microsoft Excel и Matrixer.

В третьей главе проведено исследование физических процессов, при взаимодействии совмещенных источников тепла с металлами.

Теоретическая оценка энергетической эффективности поглощения лазерного излучения показала, что для начала плавления поверхности необходимая мощность лазерного излучения снижается с увеличением мощности дополнительного источника тепла. За счет его применения можно повысить эффективность использования лазерного излучения при переходе к плавлению металла примерно до 75% (Рис. 1), что важно для процессов лазерного легирования и наплавки. В режиме развитого испарения, характерного для сварки металлов, эффективность лазерного воздействия повышается примерно до 35 %. Полученные данные справедливы для диапазона скоростей от 10 до 50 мм/с и мощности дополнительного светового источника тепла в диапазоне значений 0,76...3,00 кВт.

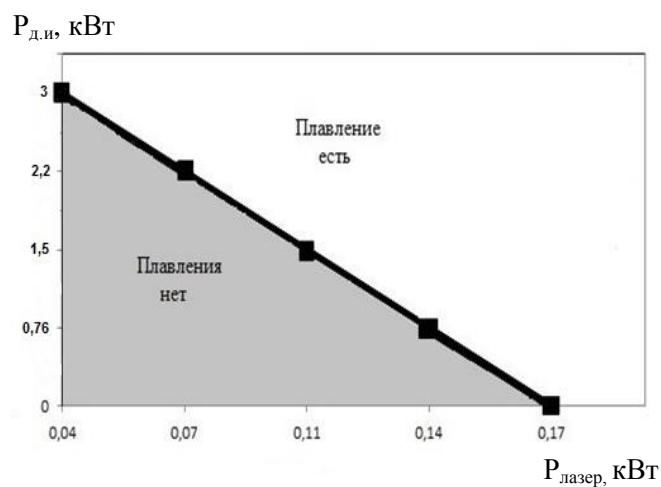


Рис. 1. Повышение эффективности лазерного воздействия от мощности дополнительного источника при переходе к плавлению металла

Таким образом, при проведении технологических операций лазерного легирования, лазерной наплавки и лазерной сварки возможно повышение эффективности за счет использования дополнительного источника тепла.

На основе расчетов установлено, что при проведении сварки совмещенными источниками с увеличением мощности дополнительного источника теплоты уменьшается мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления заданной толщины металла. Снижение мощности лазерного излучения существенно зависит также от взаимного положения

тепловых источников (Рис. 2). Для каждого режима сварки, параметров лазерного излучения и материала существует оптимальное значение рассогласования взаимного положения источников теплоты, при котором наблюдается максимальная эффективность. Это расстояние определяется скоростью сварки, диаметром пятна нагрева дополнительного источника и не зависит от его мощности. С увеличением диаметра пятна нагрева и скорости сварки для получения максимальной эффективности необходимо увеличивать расстояние между тепловыми источниками.

Диаметр пятна нагрева дополнительного источника, является важной характеристикой процесса. С его увеличением эффективность лазерного воздействия снижается. В соответствии с расчетными данными при использовании лазерного расфокусированного или светового источника тепла диаметр пятна нагрева должен находиться в диапазоне 2,5 – 5 мм.

При назначении режимов обработки совмещенными источниками следует учитывать, что увеличение скорости обработки ведет к снижению энергетической эффективности лазерного излучения.

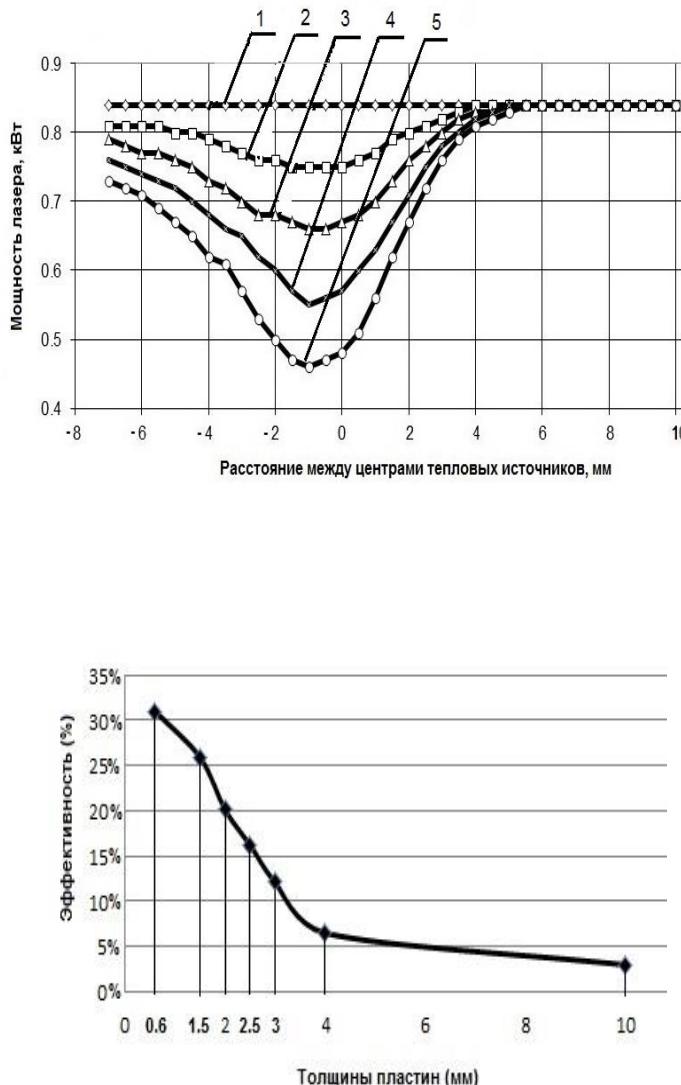


Рис. 3. Зависимость энергетической эффективности лазерного воздействия от толщины свариваемых пластин

Рис. 2. Влияние расстояния между центрами тепловых источников на мощность лазерного излучения, обеспечивающего полное проплавление. Сталь 30ХГСА

- 1 – без дополнительного источника;
- 2 – Мощность дополнительного источника = 0,76 кВт;
- 3 – Мощность дополнительного источника = 1,5 кВт;
- 4 – Мощность дополнительного источника = 2 кВт;
- 5 – Мощность дополнительного источника = 3 кВт

Увеличение толщины свариваемого металла приводит к снижению эффективности лазерного воздействия (Рис. 3). Это связано, прежде всего, с тем, что тепло от лазерно-светового источника поглощается в тонком поверхностном слое. Так при толщине 0,6 мм для стали 30ХГСА на скорости 10 мм/с эффективность процесса повышается на 32 %, а при толщине 10 мм — только на 3 %.

При увеличении толщины свариваемой пластины более 2 мм, энергетическая эффективность падает ниже 20 % и использование совмещенных лазерно-световых источников становится нецелесообразным. Таким образом, область их использования при сварке сталей это толщины менее 2 мм.

На эффективность процесса также влияют теплофизические свойства свариваемого материала. Расчеты показывают, что в широком диапазоне режимов сварки совмещенными источниками уменьшение теплопроводности приводит к повышению эффективности. Например, для стали X18H9, на скорости 10 мм/с энергетическая эффективность лазерного воздействия повышается на 64 %, а для 100 мм только на 2 %.

Теоретическая оценка энергетической эффективности экспериментальными исследованиями. Определение эффективного КПД лазерно-светового воздействия при поверхностной обработке и сварке сталей показало его возрастание.

Наибольшее его значение достигается, когда дополнительный световой источник диаметром 5 мм находится перед лазерным лучом на расстоянии 3 мм. На всех исследованных скоростях эффективный КПД при лазерно-световой сварке выше примерно в 1,6 раза, чем при лазерной сварке, термический КПД возрастает более чем в два раза, а полный КПД - более чем в 3,4 раза по сравнению с лазерной сваркой (Рис. 4).

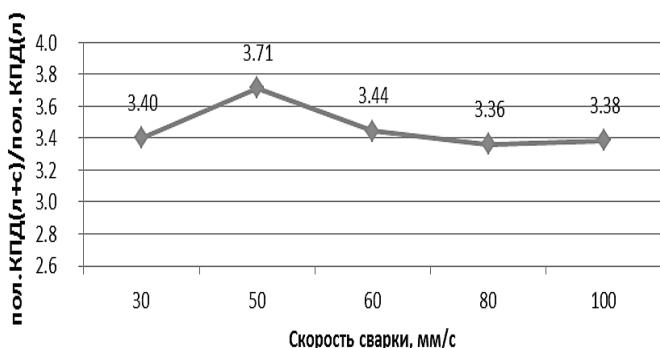


Рис. 4. Соотношение между значениями полного КПД при лазерной и лазерно-световой сварке.

Расчетное исследование формирования температурных полей при взаимодействии совмещенных источников тепла с поверхностью металла показала, что расстояние между центрами источников тепла, необходимое для достижения максимальной температуры, зависит от скорости, диаметров пятна нагрева и коэффициента температуропроводности и не зависит от мощности дополнительного теплового источника. Это расстояние можно определить по предлагаемой формуле:

$$L = \frac{(d_{n2}^2 - d_{n1}^2) \cdot v}{4 \cdot a} \quad (1)$$

где — d_{n1} — диаметр пятна нагрева первого источника; d_{n2} — диаметр пятна нагрева второго источника; v — скорость обработки; a — коэффициент температуропроводности.

Если диаметры основного и дополнительного источников тепла одинаковы, то для обеспечения максимальной эффективности их центры должны находиться в одной точке. При разных диаметрах, необходим сдвиг, который можно рассчитать по предлагаемой формуле (1). Следует учитывать, что чем больше коэффициент температуропроводности, тем меньше расстояние между тепловыми источниками.

Конечные свойства соединения при сварке закаливающихся сталей зависят от его структуры, на формирование которой определяющее влияние оказывают параметры сварочного термического цикла. Наиболее важным является скорость охлаждения при температурах наименьшей устойчивости аустенита. В принципе управление термическим циклом при лазерной сварке можно осуществить совмещением двух или более источников тепла. Установлено, что выбором взаимного положения источников тепла можно управлять скоростями охлаждения в обрабатываемых деталях, а, следовательно, и контролировать структурообразование. Это особенно важно для сварки закаливающихся сталей.

Расчетная оценка скорости охлаждения в интервале температур (800-500) °С при лазерной сварке с дополнительным источником закаливающейся стали 30ХГСА показала, что ее значение зависит от взаимного положения тепловых источников. Расстояние между источниками тепла, при котором наблюдается максимальная эффективность, обеспечивает достижение наиболее высоких скоростей охлаждения. Чем выше эффективность, тем выше скорость охлаждения. Обнаруженный эффект связан, по-видимому, с уменьшением объема жидкого металла в хвостовой части сварочной ванны (Рис. 5).

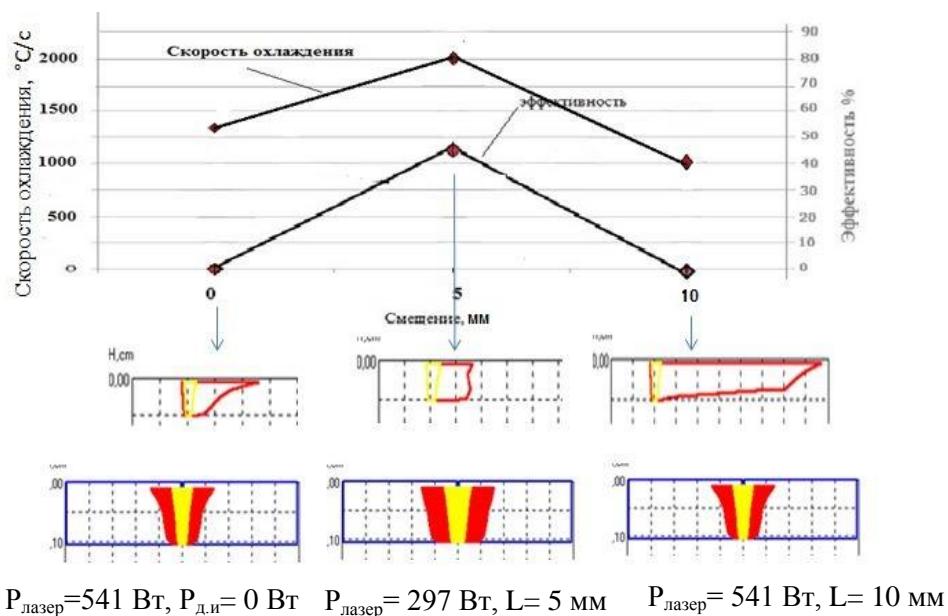


Рис. 5. Эффективность, скорость охлаждения и форма сварочной ванны в зависимости от положения дополнительного источника тепла. Сталь типа 30ХГСА; толщина = 1мм; V_{св.} = 33 мм/с; Р_{д.и} = 3 кВт; d_п = 5 мм

Таким образом, при лазерной сварке совмещенными источниками закаливающихся сталей на режимах, с максимальной проплавляющей способностью, скорость охлаждения максимальна. При этом увеличивается вероятность появления закалочных структур. Для получения сварного соединения из закаливающихся сталей с высокими пластическими свойствами нельзя использовать режимы с максимальной эффективностью.

Для высоколегированной стали типа X18H9 получены подобные результаты. Известно, что для аустенитных сталей высокие скорости охлаждения снижают вероятность выделения избыточных фаз в ЗТВ и режимы с максимальной эффективностью являются оптимальными.

В четвертой главе проведены исследования технологических особенностей использования совмещенных источников тепла для операций термообработки, легирования, наплавки и сварки.

При выборе дополнительного источника тепла при лазерной закалке следует учитывать, что одним из важных требований, часто предъявляемых к процессу, это отсутствие оплавления поверхности. С этих позиций использование дугового или плазменного источников тепла нежелательно, так как для обеспечения указанного требования следует снижать мощность дуги, что приводит к нестабильности ее горения и магнитному дутью. Наиболее подходящим в данном случае, является световой или расфокусированный лазерный луч. Световой луч, по сравнению с расфокусированным лазерным, наряду с бесконтактным подводом энергии, позволяет плавно регулировать температуру нагреваемой поверхности, создавая возможность локальной термообработки по программируемому термическому циклу.

Экспериментальные исследования технологических особенностей лазерной закалки с использованием дополнительного источника тепла позволили установить оптимальные режимы. Для получения закаленного слоя в стали 45 без оплавления поверхности, мощность лазерного источника должна быть 1 кВт, светового – 1 кВт, скорость обработки - 20 мм/с, лазерный луч должен иметь диаметр около 4,5 мм, световой источник - 5 мм. Максимальный эффективный КПД достигается при опережении световым источником лазерного на расстояние в пределах 2,5 - 3 мм. Глубина закаленного слоя, в этом случае, увеличивается на 30 %. Следует отметить, что сопоставление данных расчета расстояния между тепловыми источниками, при котором на поверхности достигается максимальная температура, с экспериментально определенным расстоянием с максимальным КПД, показывает их сходимость

При назначении режимов лазерной закалки с использованием дополнительного источника тепла следует учитывать, что применение совмещенных источников тепла может привести к снижению скорости охлаждения в интервале температур $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Из-за этого, возможно изменение фазового состава и свойств термобалансированной зоны. Исследование распределения твердости по глубине закаленной зоны, показало, что заметного изменения значений микротвердости при совмещении двух источников тепла на установленных режимах не наблюдается. Это свидетельствует о том, что

скорость охлаждения в интервале $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения превышает критическую скорость закалки. В зоне обработки формируется мартенситная структура с микротвердостью 7000 – 8000 МПа.

Технологические особенности легирования совмещенными тепловыми источниками были выявлены применительно к упрочнению поверхности алюминиевых сплавов частицами SiC. Трудности проведения процесса заключаются в том, что частицы SiC имеют малый удельный вес. При лазерном легировании, для создания условий проникновения упрочняющих частиц в жидкую ванну, необходимо повышение ее температуры выше температур растворения оксидной пленки. Этого достигают предварительным подогревом заготовок до температур порядка 300 $^{\circ}\text{C}$.

Теоретический анализ тепловых полей позволил установить, что использование совмещенных источников позволяет повысить температуру расплавленной ванны и увеличить время ее пребывания в жидком состоянии. Это способствует проникновению упрочняющих частиц в объем жидкой ванны. Таким образом, при проведении процесса легирования можно отказаться от подогрева обрабатываемого изделия.

Особенностью лазерной обработки алюминиевых сплавов является высокая отражающая способность поверхности. Поэтому применение светового источника или расфокусированного лазерного луча в качестве дополнительного нежелательно. Более предпочтительным является сварочная дуга, которая использовалась при проведении экспериментов.

Показано, что основным технологическим параметром, влияющим на температуру ванны и время пребывания ее в жидком состоянии, является расстояние между тепловыми источниками. Максимальная температура поверхности достигается при расположении дополнительного источника перед лазерным, на расстоянии 3 мм. После обработки на оптимальных режимах глубина слоя, легированного частицами SiC, составляет около 1,2 мм, а ширина дорожки - 1 мм, объемная доля частиц SiC - около 6 %, в нем отсутствуют поры и трещины. Такое покрытие обладает требуемыми трибологическими свойствами.

Таким образом, экспериментальные результаты, свидетельствуют о возможности использования дополнительного источника для повышения эффективности лазерного легирования, что позволяет отказаться от подогрева обрабатываемого изделия.

При лазерной наплавке применение импульсно-периодических режимов для уменьшения проплавление основы, перемешивания основного и присадочного металла, снижения перегрева подложки и повышения технологической прочности приводит к существенному возрастанию времени изготовления изделия. В среднем для этого требуется 40-50 часов. Использованием дополнительного источника тепла можно повысить эффективность процесса. Полученные экспериментальные и теоретические данные позволили рекомендовать режимы обработки с максимальной эффективностью.

Применение совмещенных источников тепла открывают возможности для повышения производительности. По литературным данным, наиболее часто для этих целей используют совмещение лазерного луча с плазмой. Однако, для деталей малых габаритов, плазменный источник тепла вызывает существенный перегрев и оплавление основного металла, нарушая равномерное формирование наплавленного слоя. Для этих целей лучше использовать световой дополнительный источник, позволяющий проводить наплавку по программируемому термическому циклу.

Теоретически и экспериментально показано, что при лазерной наплавке совмещенными источниками лазерный луч должен иметь диаметр около 1 мм, световой источник - 5 мм, опережать лазерный, расстояние между ними быть в пределах 2,5 - 3 мм, энергия в импульсе - 9,6 Дж, мощность светового источника - 1 кВт, скорость обработки 5 мм/с.

По сравнению с лазерной наплавкой, при сохранении высоты валика 0,8 мм, скорость процесса увеличивается в 5 раз. На рекомендованных режимах формируется валик, внешне не отличающийся от получаемого при лазерной наплавке. Литой металл имеет ярко выраженную дендритную структуру, содержащую мелкодисперсные карбиды и бориды.

Еще одной важной задачей является повышение эффективности лазерного воздействия при сварке. Выбор типа дополнительного источника тепла является сложной технологической задачей. Подавляющее большинство работ по сварке совмещенными источниками посвящено лазерно-дуговым методам. Конкуренцию лазерно-дуговому процессу составляет двухлучевая и лазерно-световая сварка. Как показано в литературе, использование двухлучевой лазерной сварки наиболее предпочтительно для толстолистовых закаливающихся сталей. Использование второго лазерного луча по сравнению с дугой позволяет стабилизировать размеры и уменьшить ширину зоны термического влияния.

Светолучевой источник теплоты имеет ряд преимуществ перед другими дополнительными источниками нагрева. Он отличается бесконтактным подводом энергии к изделию, отсутствием в зоне обработки ионизированной плазмы, электрических и магнитных полей, высокой регулируемостью и управляемостью процесса нагрева. Эти преимущества реализуются при сварке сталей толщиной до 2 мм.

Экспериментально-расчетным методом было установлено, что при сварке совмещенными источниками эффективность лазерного воздействия зависит от скорости сварки (v), расстояния между источниками (L), мощности дополнительного источника ($P_{д.и}$), диаметра пятна нагрева (d_n). Для сварки стали типа 30ХГСА получена регрессионная математическая модель расчета эффективности лазерного воздействия по предлагаемой формуле (2):

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & 1,35 - 2,68v - 30,5l - 2,4vl - 23,2l^2 + 0,38l^2v + 8P_{д.и} + \\ & 9,83P_{д.и}l + 4,4d_n - 6,46P_{д.и}d_n + 21,6d_nl - 9,18d_nlP_{д.и} \end{aligned} \quad (2)$$

Проверка значимости коэффициентов и адекватности модели показала полную корреляцию и высокую точность рассчитанных результатов.

Анализ полученного регрессионного уравнения позволяет проследить тенденции влияния параметров режима на эффективность лазерно-световой сварки. В частности, при больших скоростях сварки увеличение диаметра пятна приводит к возникновению экстремума при изменении расстояния между лазерным лучом и дополнительным источником тепла, что свидетельствует о существовании оптимальной величины рассогласования. Из уравнения также видно, что важнейшим фактором, влияющим на эффективность процесса, является расстояние между центрами тепловых источников.

При сварке закаливающихся сталей, наряду с высокой эффективностью процесса, необходимо обеспечить высокую технологическую прочность и пластические свойства сварного соединения. Этого можно достигнуть регулированием теплового режима. К известным способам регулирования теплового режима относятся изменение погонной энергии и применение предварительного или сопутствующего подогрева. Последние мероприятия используют наиболее часто. Однако, в ряде случаев наблюдается отрицательное влияние подогрева на механические свойства сварных соединений и их сопротивляемость трещинам. При температурах подогрева выше 200 °С в некоторых сталях происходит существенное укрупнение зерна, вызывающее снижение пластических свойств и ударной вязкости.

Благоприятную структуру с высокими пластическими свойствами в сварном соединении можно получить изменением параметров режима лазерной сварки с дополнительным источником. Экспериментально-расчетным методом крутого восхождения, по критерию минимальной твердости сварного шва, рассчитаны режимы лазерно-световой сварки для получения максимальных пластических свойств сварного соединения стали 30ХГСА толщиной 2 мм. Полученное расстояние между тепловыми источниками не обеспечивает в этом случае максимальную энергетическую эффективность процесса.

Металлографический анализ показал, что существует взаимосвязь между расстоянием между центрами тепловых источников и фазовым составом металла сварного соединения, определяющим его свойства. При взаимном расположении тепловых источников, когда лазерный луч находится за дополнительным, на поверхности достигается максимальная температура и наблюдается наивысшая проплавляющая способность, при этом обеспечивается максимальная скорость охлаждения в интервале температур (800 – 500) °С. В металле шва образуется малопластичная закалочная структура, которая представляет собой в основном мартенсит с высокой твердостью (Рис. 6,а). ЗТВ имеет также малопластичную бейнитную структуру. Такую же структуру имеет сварное соединение, полученное лазерной сваркой.

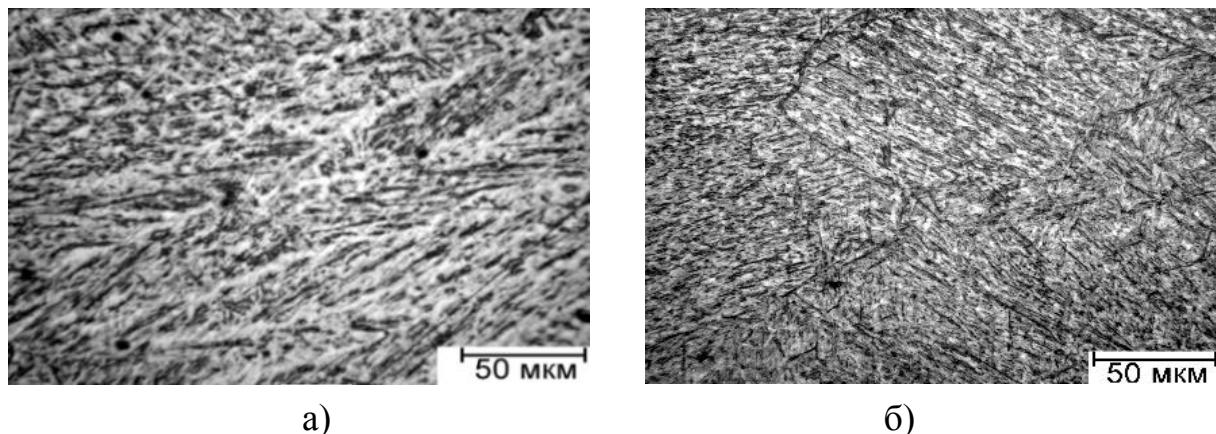


Рис. 6. Структура металла шва (а) после сварки с взаимным расположением тепловых источников, обеспечивающее максимальную эффективность (б) и после сварки с взаимным расположением тепловых источников, обеспечивающее минимальную скорость охлаждения.

Сварное соединение, полученное на режимах, которые обеспечивают максимальные пластические свойства, имеет иной фазовый состав. Дополнительный тепловой источник, в отличие от сварки с максимальной эффективностью, должен располагаться за лазерным лучом. Шов (Рис. 6, б) и ЗТВ состоят из бейнита и троостита. Образование в структуре шва и ЗТВ троосто-бейнита должно привести к повышению пластических свойств сварного соединения, а также снижению вероятности образования холодных трещин. Таким образом, регулированием относительного положения и расстояния между источниками тепла при сварке закаливающихся сталей можно управлять фазовым составом сварного соединения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Определена область использования светолучевого источника теплоты. Его рекомендуется применять при лазерной термообработке без оплавления поверхности, при лазерной наплавке локальных участков малых размеров импульсно-периодическим излучением, а также для соединения изделий из среднелегированных и аустенитных сталей толщиной до 2 мм.

2. Сварку толстолистовых закаливающихся сталей без разделки кромок следует проводить двумя сфокусированными лазерными лучами. Использование сварочной дуги рекомендуется при лазерной сварке толстолистовых сталей с разделкой кромок и лазерном поверхностном легировании, особенно материалов с высоким коэффициентом отражения.

3. Применение дополнительных источников тепла при лазерной термообработке, поверхностном легировании, наплавке и сварке, в широком диапазоне режимов, повышает полный КПД процессов лазерной обработки примерно в 1,5 - 3,4 раза. Увеличение КПД зависит от вида дополнительного

источника, выбранных режимов и технологического процесса лазерной обработки.

4. Установлена зависимость расстояния между совмещенными источниками тепла, при котором в зоне взаимодействия достигается максимальная температура поверхности, что связано с увеличением поглощения лазерного излучения. Оно прямо пропорционально скорости движения источников и разнице квадратов диаметров пятен нагрева лазерного луча и дополнительного источника, обратно пропорционально коэффициенту температуропроводности и не зависит от мощности дополнительного источника.

5. На основе анализа теоретических и экспериментальных результатов, даны рекомендации по расчету оптимального расстояния между центрами тепловых источников и выбору оптимальных режимов лазерной обработки совмещенными источниками тепла, на которых достигается максимальная энергетическая эффективность.

6. Положением дополнительного теплового источника относительно лазерного можно регулировать фазовый состав сварного соединения из закаливающихся сталей.

7. При расположении дополнительного теплового источника перед лазерным, когда на поверхности достигается максимальная температура, в металле шва образуется малопластичная закалочная структура, которая представляет собой в основном мартенсит (96%) с высокой твердостью. ЗТВ имеет также малопластичную бейнитную структуру (100%).

8. Расположение дополнительного источника за лазерным лучом позволяет получить минимальную скорость охлаждения в интервале температур аустенитного превращения, что приводит к возникновению отпущеных структур. Шов и ЗТВ в этом случае могут состоять из бейнита и троостита, что повышает пластические свойства сварного соединения.

9. Определены технологические условия и разработаны рекомендации по использованию дополнительных источников тепла, базирующихся на разных способах генерации энергии, для процессов лазерной термообработки, поверхностного легирования, наплавки импульсно-периодическим излучением и сварки малых толщин.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Мисюров А.И., Хтет Аунг Лин. Особенности сварки закаливающихся сталей лазерными источниками теплоты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. №5. С. 78-85. (1,4 п.л/ 0,7 п.л)

2. Хтет Аунг Лин., Мисюров А.И. Оценка области использования лазерной обработки совмешёнными тепловыми источниками // Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии: Сб. науч. Тр. Всероссийская научно-техническая конференция студентов. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Апрель 2012. С. 233-234. (0,1 п.л/ 0,05 п.л)

3. Мисюров А.И., Смирнова Н.А., Хтет Аунг Лин. Лазерная гибридная сварка тонколистовых закаливающихся сталей // Сборник: BEAM TECHNOLOGIES & LASER APPLICATION Proceedings of the VII International scientific and technical Conference. 18 – 21 September 2012. Saint-Petersburg. Russia. C. 247-253. (1,65 п.л/ 0,55 п.л)

4. Хтет Аунг Лин., Мисюров А.И. Технологические особенности гибридной лазерной сварки закаливающихся сталей // Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии: Сб. науч. Тр. Всероссийская научно-техническая конференция студентов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Апрель 2014, С. 509-519. (1,9 п.л/ 0,95 п.л)

5. Хтет Аунг Лин., Мисюров А.И. Технологические особенности гибридной лазерной сварки закаливающихся сталей // Молодежный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: Эл. науч. издание. Сер. Радиоэлектроника и лазерная техника, Июль 2014. №7 URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/725200.html>. (1,9 п.л/ 0,95 п.л)

6. Хтет Аунг Лин., Таксанц М.В., Мисюров А.И. Математическая модель эффективности использования лазерного излучения при гибридной обработке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Машиностроение. 2015. №3. С.70-77. (2,1 п.л/ 0,7 п.л)

7. Таксанц М.В., Мисюров А.И., Хтет Аунг Лин. Регрессионная модель расчета эффективности использования лазерного излучения при гибридной сварке//Технология машиностроения. 2015. №10. С.58-62. (1,2 п.л/ 0,4 п.л)