

На правах рукописи
УДК 621.785.5: 621.9.048.7

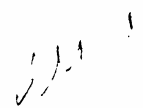
СМИРНОВА Наталия Анатольевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА
Специальность 05.03.07 – Оборудование и технология лазерной обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2000



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
А.Н. Сафонов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.С. Крапошин

кандидат технических наук, профессор
В.С. Гаврилюк

Ведущее предприятие: Институт проблем лазерных и
информационных технологий РАН

Защита диссертации состоится "21" декабря 2000 года на заседании диссертационного совета К 053.15.03 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке диссертационного совета ТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 267.

Автореферат разослан "1"

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, И

1540400

Подписано к печати 13.

Заказ № 166-Т



1570700

Смирнова Н.А. Разработка

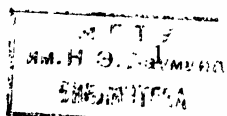
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышение технического уровня и эффективности производства требуют создания принципиально новой техники и технологии с использованием высокоэффективных методов поверхностного упрочнения деталей машин.

К числу новых процессов поверхностного упрочнения относится лазерная термическая обработка (ЛТО) и лазерное легирование. Эффективность лазерной поверхностной обработки обусловлена высокой плотностью потока энергии, локальностью воздействия и возможностью бесконтактной передачи энергии в зону обработки. В результате ЛТО и лазерного легирования металлы и сплавы приобретают в локальных объемах высокие физико-механические свойства, недостижимые при традиционных методах упрочнения. ЛТО и лазерное легирование наиболее широко используются для деталей, работающих в условиях трения скольжения, абразивного и эрозионного изнашивания. В настоящее время показана принципиальная возможность и сформулированы технологические основы лазерной термической обработки и легирования поверхности большинства сталей. Однако в целом ряде отраслей промышленности, таких как авиационное, автомобильное и сельскохозяйственное машиностроение широко применяют алюминиевые сплавы. В связи с этим научный и практический интерес представляет использование лазерных технологий для термической обработки и легирования поверхности сплавов на основе алюминия.

В опубликованных работах по ЛТО и лазерному легированию основное внимание уделяется исследованию влияния лазерного излучения на фазовый, структурный состав и микротвердость зон лазерного воздействия (ЗЛВ) в алюминиевых сплавах различного химического состава. Отмечено, что при лазерной обработке возможно как повышение микротвердости зоны лазерного воздействия, так и разупрочнение. Отмечено, что лазерное легирование различными компонентами значительно повышает твердость поверхности алюминиевых сплавов и положительно влияет на напряженное состояние ЗЛВ. Показано положительное влияние ЛТО и лазерного легирования на триботехнические характеристики и коррозионную стойкость упрочненных поверхностей.

Вместе с тем реализация высоких потенциальных возможностей новых процессов сдерживается отсутствием научных представлений о за-



кономерностях формирования структуры ЗЛВ, механизмах упрочнения при ЛТО и легировании различных алюминиевых сплавов и влиянии исходного состояния на упрочнение. Основная масса работ отражает частные случаи модификации лазерным излучением поверхности конкретных марок алюминиевых сплавов, что существенно затрудняет систематизацию полученных экспериментальных данных. Недостаточно исследованы микроструктура легированных зон, процессы старения и теплостойкость зоны упрочнения в различных алюминиевых сплавах. Отсутствуют исследования влияния ЛТО и лазерного легирования на усталостную прочность алюминиевых сплавов.

Вследствие этого невозможно дать практические рекомендации по выбору режимов обработки и в полной мере реализовать преимущества ЛТО и лазерного легирования. Решение этой проблемы является весьма актуальной задачей.

Цель данной работы – разработка практических рекомендаций по выбору режимов лазерной термической обработки и лазерного легирования для упрочнения рабочих поверхностей деталей двигателей внутреннего сгорания, изготовленных из деформируемых и литейных алюминиевых сплавов.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

- 1) установление основных механизмов упрочнения, закономерностей формирования структуры и изменения свойств алюминиевых сплавов в зависимости от исходного состава, структурного состояния, скорости нагрева и охлаждения при обработке лазерным излучением;
- 2) установление закономерностей изменения структуры и свойств алюминиевых сплавов при поверхностном лазерном легировании;
- 3) разработка на этой основе рекомендаций по практическому использованию технологии лазерной термической обработки и лазерного легирования промышленных изделий.

Научная новизна работы заключается в

- 1) анализе механизмов упрочнения при ЛТО деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, которые состоят в значительном измельчении структуры, пересыщении твердого раствора и возможности дальнейшего дисперсионного твердения при естественном и искусственном старении;
- 2) применении расчетно-экспериментальной методики для установления связи между режимами ЛТО, скоростью охлаждения ванны расплава и дендритным параметром структуры, которая состоит в измерении денд-

ритного параметра структуры, и расчете скорости охлаждения расплава в зависимости от режимов ЛТО: скорости обработки (скорости перемещения образца) и мощности излучения;

3) в установлении основных закономерностей влияния исходной структуры алюминиевых сплавов на эффективность упрочнения, которые состоят в неодинаковой степени растворения в твердом растворе при скоростном нагреве различных по размеру упрочняющих образований, свойственных основным структурным состояниям алюминиевых сплавов – отожженному, искусственно и естественно состаренному;

4) анализе влияния параметров лазерной обработки на геометрические параметры и микротвердость ЗЛВ, которые проявляются вследствие изменения энерговклада лазерного излучения при варьировании параметров обработки. Увеличение энерговклада излучения приводит к увеличению объема ванны расплава и росту геометрических размеров ЗЛВ. При этом растет время пребывания расплава при сверхкритических температурах и в результате более полного растворения избыточных фаз возможно получение более пересыщенных твердых растворов;

5) анализе механизмов упрочнения при лазерном легировании алюминиевых сплавов, которые состоят в значительном измельчении структуры и пересыщении твердого раствора, как легирующими элементами сплава, так и легирующими элементами, вводимыми при лазерном легировании, а также в образовании в зоне лазерного легирования упрочняющих фаз, не свойственных системе компонентов сплава;

6) обосновании причин повышения теплостойкости алюминиевых сплавов после лазерной термической обработки и лазерного легирования, состоящих в положительном влиянии пересыщенного твердого раствора и мелкодисперсных упрочняющих фаз, формируемых при лазерной обработке.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Обоснована необходимость применения поглощающих покрытий с целью эффективного использования излучения твердотельных лазеров с длиной волны 1,06 мкм, обусловленная высокой отражательной способностью алюминиевых сплавов.

2. Даны практические рекомендации по выбору режимов ЛТО и лазерного легирования из слоя легирующей пасты и инъекцией порошка, и выбору поглощающих покрытий и связующих веществ, применение которых дает возможность получить наибольший упрочняющий эффект при

формировании зон лазерного упрочнения глубиной более 1 мм с мелкодисперсной структурой и минимальной пористостью. Выполнение рекомендаций дает возможность получения мелкодисперсной структуры упрочненного слоя с интерметаллидами, либо без них.

3. Показана возможность формирования протяженных зон лазерного упрочнения (глубиной более 1 мм) с минимальной пористостью при лазерной термической обработке и лазерном легировании из слоя легирующей пасты излучением твердотельного лазера мощностью до 1 кВт.

4. Разработаны режимы ЛТО и легирования, увеличивающие усталостную выносливость на растяжение–сжатие алюминиевых сплавов на 5 % и 15 % соответственно, по сравнению с исходным состоянием после заковки и искусственного старения.

5. Даны практические рекомендации по выбору режимов обработки излучением твердотельных и CO₂-лазеров деталей двигателей внутреннего сгорания из деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, способствующих повышению термостабильности обработанных поверхностей.

6. Разработаны способы лазерной обработки боковых поверхностей шлицевых канавок, состоящие в обработке плоскостей канавок таким образом, чтобы обеспечить сохранение геометрии острой кромки; при этом угол расхождения луча оптимизируют таким образом, чтобы обеспечить наиболее полное проникновение лазерного пучка в обрабатываемую канавку.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Лазерная техника и технология» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Международной конференции «Лазерная техника и технология» (Вильнюс, октябрь 1991), Всероссийской научно-технической конференции «Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства» (Калуга, декабрь 1998), V Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (Москва, февраль 1999).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ, получен патент.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 121 наименования; содержит 135 страниц машинописного текста, 85 рисунков и 7 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность профессору, доктору технических наук А.Г. Григорьянцу за научные консультации при выполнении и оформлении работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе литературных данных приведен анализ состояния разработки процессов лазерного упрочнения и легирования поверхности алюминиевых сплавов. Рассмотрены особенности фазовых и структурных превращений в алюминиевых сплавах в условиях скоростного нагрева и охлаждения, отмечено формирование дендритной микроструктуры, образование пересыщенных твердых растворов и метастабильных фаз при быстром охлаждении из жидкого состояния. Рассмотрены особенности микроструктуры алюминиевых сплавов после закалки из жидкого состояния.

Дан анализ причин упрочнения при ЛТО, отмечено повышение микротвердости ЗЛВ силуминов и разупрочнение дуралюминов, формирование структуры поверхностных слоев алюминиевых сплавов при лазерном легировании, рассмотрены свойства алюминиевых сплавов, упрочненных поверхностной ЛТО и лазерным легированием. Даны примеры ЛТО и лазерного легирования алюминиевых сплавов и промышленных деталей. Указано положительное влияние ЛТО и лазерного легирования на износостойкость, коррозионную стойкость поверхности и напряженное состояние зоны упрочнения.

Показано изменение свойств при старении и жаропрочности. Рассмотрены технологические особенности лазерной термической обработки и лазерного легирования поверхности алюминиевых сплавов, способы повышения поглотительной способности металлических поверхностей, введения легирующих компонентов в зону воздействия лазерного луча, влияние лазерного легирования различными компонентами на структуру и микротвердость зон лазерного легирования алюминиевых сплавов. Отмечено, что лазерное легирование значительно повышает твердость поверхности алюминиевых сплавов.

Практически все работы посвящены решению частных задач – исследованию лазерной обработки конкретного сплава или группы сплавов и не содержат широкого обобщения результатов на всю гамму используемых в промышленности алюминиевых сплавов.

На основе анализа литературных источников показано, что недостаточно исследованы закономерности формирования структуры ЗЛВ, не полностью раскрыты механизмы упрочнения при ЛТО различных алюминиевых сплавов и не установлено влияние исходного состояния на упрочнение ЗЛВ. Недостаточно исследованы микроструктура легированных зон, процессы старения и теплоустойчивость ЗЛВ в различных алюминиевых сплавах. Отсутствуют исследования влияния ЛТО на усталостную прочность алюминиевых сплавов.

На основании анализа литературных данных сформулированы цель настоящей работы и направления исследований.

Во второй главе приведено описание материалов, оборудования и методик исследования структуры ЗЛВ и механических свойств упрочненных слоев. Исследовали эффективность лазерного упрочнения и легирования различных материалов: технического алюминия А0; деформируемых алюминиевых сплавов АМг6, Д16, Д19, В96, АК4; литейных алюминиевых сплавов АК9, АК5М7, АК12ММгН, АК12М2МгН, АК21М2Н, МВТУ-6 в различных исходных структурных состояниях после отжига, закалки, естественного и искусственного старения.

Обработку образцов и деталей машин проводили с использованием излучения различных непрерывных СО₂-лазеров, твердотельного лазера и твердотельных импульсных лазерных технологических установок. Для увеличения поглощения энергии лазерного излучения использовали поглощающие покрытия на основе ZnO, желтой и белой гуаши, грунтовки ВМЛ-0143 в смеси с ZnO, ФС-1М, МЦС-510, ВМЛ.

В качестве легирующих материалов для лазерного легирования использовали порошки ПГ-ХН80СРЗ, хрома, никеля, бора, карбидов кремния и карбидов титана. Исследовали два метода лазерного легирования: из легирующей пасты, предварительно нанесенной на обрабатываемую поверхность, и легирование инъекцией легирующего порошка в расплавленный металл на поверхности.

Исследования структуры зон лазерного воздействия и лазерного легирования включали металлографические исследования на оптическом и растровом электронном микроскопах.

Для исследований фазового состава применяли рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Анализ распределения легирующих элементов по глубине упрочненного слоя проводи-

ли на микрорентгеноспектральных анализаторах «Camebax-micro» и «Link Analytical» AN-10000.

Измерение твердости поверхности ЗЛВ образцов и промышленных деталей проводили на приборе ТП-7р-1 по методу Виккерса. Микротвердость на поперечных микрошлифах измеряли на приборе ПМТ-3.

Испытания на малоцикловую усталость при схеме нагружения растяжение–сжатие проводили на испытательной машине УММ-01. Испытывали стандартные образцы, обработанные излучением лазера по специально разработанной схеме по концентратору напряжений.

Для исследования стабильности упрочняющего эффекта в ЗЛВ при нагреве использовали специальную методику измерения твердости поверхности ЗЛВ при температурных испытаниях.

В третьей главе приведены результаты исследований особенностей структуры, формирующейся под воздействием непрерывного лазерного излучения, в зависимости от химического состава, исходного состояния сплава и параметров ЛТО.

Проведен анализ механизмов упрочнения при ЛТО алюминиевых сплавов, которые состоят в значительном измельчении структуры, пересыщении твердого раствора, образовании квазиэвтектики при высоких скоростях охлаждения (более 10^6 К/с) и возможности дальнейшего дисперсионного твердения при естественном и искусственном старении.

Исследования силюминов показали, что при ЛТО с оплавлением происходит измельчение кристаллов кремния в 18-40 раз. Это является одной из причин упрочнения ЛТО сплавов, состав которых близок к эвтектическому. Дисперсионно твердеющие алюминиевые сплавы, состав которых далек от эвтектического, после закалки и старения при последующей ЛТО разупрочняются, так как прирост твердости вследствие измельчения структуры и пересыщения твердого раствора при лазерной закалке этих сплавов не превышает ее снижения вследствие исчезновения метастабильных фаз и метастабильных сегрегаций.

Отмечено, что упрочнение технического алюминия и деформируемых сплавов, не упрочняемых термообработкой, возможно только вследствие измельчения зерна и увеличения дефектности кристаллического строения. Пересыщенные твердые растворы в таких материалах не образуются либо их образование не приводит к существенному упрочнению: прирост твердости невелик и большой перспективы ЛТО этих материалов не имеет.

Приведены результаты исследований строения зон лазерного воздействия. Расчетно-экспериментальным методом установлена закономерная связь между режимами ЛТО (скоростью обработки и мощностью излучения), скоростью охлаждения ванны расплава и дендритным параметром структуры, которая состоит в том, что увеличение скорости обработки приводит к увеличению скорости охлаждения расплава, а рост мощности излучения, подводимой к поверхности, наоборот, уменьшает скорость охлаждения. В результате увеличение скорости обработки приводит к закономерному уменьшению значения дендритного параметра и, следовательно, к измельчению структуры сплава, а увеличение мощности излучения, напротив, приводит к увеличению размеров зерен: значение дендритного параметра растет.

Установлены закономерности влияния параметров лазерной обработки на геометрические параметры и микротвердость ЗЛВ, которые проявляются вследствие изменения энерговклада лазерного излучения при варьировании параметров обработки. Увеличение энерговклада излучения приводит к увеличению объема ванны расплава, росту геометрических размеров ЗЛВ и уменьшению скорости охлаждения: как следствие, закономерно увеличиваются размеры зерна кристаллизовавшегося расплава. Одновременно растет и время пребывания расплава при сверхкритических температурах: в результате более полного растворения избыточных фаз возможно получение более пересыщенных твердых растворов.

Рассмотрено влияние исходного состояния на микротвердость ЗЛВ силуминов. Установлено, что упрочняющий эффект ЛТО максимален для естественно-состаренного сплава и минимален для сплава после отжига. Это можно объяснить тем, что сравнительно крупные стабильные фазы, характерные для отожженного состояния, из-за кратковременности нагрева не успевают полностью раствориться в твердом растворе и обогатить его легирующими элементами; в результате формируется ЗЛВ небольших размеров со структурой незначительно пересыщенного твердого раствора с крупными частицами упрочняющих фаз. Растворение метастабильных упрочняющих фаз, свойственных искусственно состаренному состоянию сплава, происходит полнее и формируется структура более пересыщенного твердого раствора. Кроме того, при лазерном плавлении выделяется внутренняя энергия напряженного состояния границы раздела твердый раствор – метастабильная фаза, что способствует получению бо-

лее глубоких ЗЛВ. Исходная структура пересыщенного твердого раствора с метастабильными сегрегациями, полученная после естественного старения, способствует гомогенизации твердого раствора и получению максимальной степени его пересыщения; в ЗЛВ формируется более однородная структура с большей микротвердостью.

Исследовано влияние легированности исходной структуры на микротвердость ЗЛВ алюминиевых сплавов, которое проявляется как в увеличении степени пересыщения твердого раствора (в основном имеет место для доэвтектических и эвтектических сплавов), так и в сильном измельчении кристаллов эвтектического и избыточного кремния (для эвтектических и заэвтектических сплавов). В низколегированном доэвтектическом сплаве АК9 прирост твердости в результате ЛТО составил 16 %, в легированном эвтектическом сплаве АК12ММgН – 28 %, а в высоколегированном заэвтектическом сплаве АК21М2Н – 53 %.

Проведена оценка влияния поглощающих покрытий на размеры и микротвердость ЗЛВ при обработке излучением CO₂-лазеров и твердотельных лазеров. Установлены типы поглощающих покрытий, применение которых дает возможность получения наибольшего упрочняющего эффекта при формировании достаточно протяженных зон лазерного влияния (глубиной более 1 мм) с минимальной пористостью.

В четвертой главе приведены результаты исследований лазерного легирования различными материалами алюминиевых сплавов после закалки и искусственного старения.

Отмечено, что актуальной задачей упрочнения поверхности является лазерное легирование поверхности деформируемых алюминиевых сплавов, упрочненных обычной закалкой и старением, которые в отличие от литейных алюминиевых сплавов не упрочняются при лазерном воздействии без введения легирующих добавок.

Исследовали два способа подачи легирующего материала в зону лазерной обработки. Первый способ состоял в оплавлении нанесенного на поверхность алюминиевых сплавов слоя порошковой пасты, приготовленной на основе легирующего материала с использованием различных связующих веществ. При втором способе подачи легирующего материала использовали инъекцию в зону оплавления легирующего порошка. Лазерное легирование излучением твердотельного лазера осуществляли только при оплавлении слоя порошковой пасты.

Анализ результатов металлографических исследований, рентгено-структурного и рентгеноспектрального анализов показывает, что упрочнение при лазерном легировании алюминиевых сплавов обусловлено значительным измельчением структуры и пересыщением твердого раствора, как легирующими элементами сплава, так и легирующими элементами, вводимыми при лазерном легировании. Кроме того, в зоне лазерного легирования могут образовываться упрочняющие фазы, не свойственные системе компонентов сплава, что дает возможность упрочнения материалов, лазерная термическая обработка которых неэффективна.

При полном растворении легирующих элементов в твердом растворе микротвердость повышается примерно в 1,5 раза. С образованием интерметаллидов в легированной зоне микротвердость увеличивается в 2–5 раз, однако, сильно возрастает неравномерность ее распределения по глубине зоны лазерного легирования, что может служить причиной хрупкого разрушения упрочненного слоя.

Проведен анализ влияния состава связующего вещества на шероховатость, степень искажения геометрии поверхности и пористость упрочненной зоны. На этой основе даны практические рекомендации по выбору оптимального состава связующего вещества при лазерном легировании из слоя легирующей пасты, дающего возможность получения наиболее однородной мелкодисперсной структуры с минимальной пористостью.

Даны практические рекомендации по выбору оптимального состава поглощающего покрытия при лазерном легировании инъекцией порошка для получения мелкодисперсной структуры упрочненного слоя. Установлены наиболее полно отвечающие этим требованиям поглощающие покрытия, дающие возможность получить мелкодисперсную структуру пересыщенного твердого раствора с интерметаллидами, либо без них.

Установлено, что увеличение расхода порошка при лазерном легировании инъекцией и увеличение толщины слоя легирующей пасты уменьшают энергозатраты на поверхность обрабатываемого сплава и тем самым уменьшают размеры упрочненной зоны. Одновременно растет концентрация легирующих элементов в зоне лазерного легирования и повышается ее микротвердость. Анализ этих закономерностей дал возможность установить оптимальный расход порошка при лазерном легировании инъекцией и оптимальную толщину слоя легирующей пасты.

Показана возможность формирования протяженных зон лазерного упрочнения (глубиной более 1 мм) с минимальной пористостью при ле-

гировании из слоя легирующей пасты твердотельным лазером при малой мощности излучения.

Установлено увеличение глубины легированной зоны в 1,5–2 раза по сравнению с ЗЛВ без легирования вследствие увеличения поглощательной способности обрабатываемой поверхности при легировании порошками бора, карбидов кремния и карбидов титана.

В пятой главе приведены результаты исследований таких свойств зон лазерного упрочнения и легирования алюминиевых сплавов, как температурная стабильность упрочнения и усталостная прочность при растяжении–сжатии.

В процессе эксплуатации некоторые детали из алюминиевых сплавов подвергаются длительному воздействию повышенных температур, поэтому оценка термостабильности упрочняющего эффекта лазерной обработки важна для таких деталей. На основе анализа кинетических кривых изменения твердости при нагреве показана возможность дополнительного упрочнения алюминиевых сплавов после лазерной обработки. Отмечено значительное повышение твердости при старении после ЛТО и лазерного легирования, что свидетельствует о высокой степени пересыщения твердого раствора.

Дополнительный упрочняющий эффект у дуралюминов выше, чем у силуминов, что соответствует большему упрочнению первых сплавов вследствие дисперсионного твердения. Однако силумины обладают более высокой теплостойкостью из-за присутствия в структуре сильно измельченного при ЛТО кремния: разупрочнение ЗЛВ в силуминах наступает при температурах, больших 250 °С. Максимальное повышение твердости ЗЛВ по сравнению с исходной твердостью у дуралюминов достигается после выдержки при температуре 200 °С (в 1,7–2,3 раза), а у силуминов – при 250 °С (в 1,5–1,6 раз).

Установлено положительное влияние на теплостойкость алюминиевых сплавов структуры пересыщенного твердого раствора с мелкодисперсными упрочняющими фазами, формируемой при лазерном легировании. Теплостойкость после лазерного легирования железом, никелем и сплавом ПГ-ХН80СРЗ остается на более высоком уровне по сравнению с лазерной обработкой без легирования. Наибольшей теплостойкостью при температуре до 250 °С обладают алюминиевые сплавы, легированные порошком ПГ-ХН80СРЗ. Лазерное легирование дает возможность увеличить их устойчивость при нагреве в 2,5–3 раза.

Приведены результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов алюминиевого сплава АК9 на машине УММ-01 при схеме нагружения растяжение–сжатие. Усталостная выносливость алюминиевых сплавов может быть повышена на 5 % лазерной термической обработкой или на 15 % лазерным легированием по сравнению с исходным состоянием после закалки и искусственного старения.

В шестой главе на основании анализа зависимости размеров, микротвердости и химического состава упрочненного слоя от параметров лазерной термической обработки и лазерного легирования, проведенного в главах 3 и 4, даны практические рекомендации по выбору оптимальных режимов обработки излучением твердотельного и CO₂–лазеров поверхностей деталей двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов.

Установлено, что для повышения термостабильности поверхности деталей из алюминиевых сплавов лазерным легированием оптимальными легирующими порошками являются порошки сплава ПГ-ХН80СРЗ, а также порошки карбидов титана и кремния.

Разработаны способы лазерной обработки боковых поверхностей шлицевых канавок, состоящие в обработке плоских поверхностей канавок расфокусированным лучом лазера. Лазерную обработку по первому способу следует проводить таким образом, чтобы обеспечить сохранение геометрии острой кромки канавки; для этого луч лазера направляют под углом к обрабатываемой поверхности.

Второй способ предполагает оптимизацию угла расхождения луча таким образом, чтобы обеспечить наиболее полное проникновение лазерного пучка в обрабатываемую канавку, при этом глубина упрочненной зоны возрастает на 22–44 %, а ее ширина – на 7–14 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности формирования структуры ЗЛВ и раскрыты механизмы упрочнения при ЛТО деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, которые состоят в значительном измельчении структуры, пересыщении твердого раствора и возможности дальнейшего дисперсионного твердения при естественном и искусственном старении.

2. Расчетно-экспериментальным методом установлена закономерная связь между режимами ЛТО, скоростью охлаждения ванны расплава и дендритным параметром структуры, которая состоит в том, что при уменьшении мощности излучения или увеличении скорости обработки

растет скорость охлаждения расплава и закономерно уменьшаются значения дендритного параметра.

3. Установлены закономерности влияния параметров лазерной обработки на геометрические параметры и микротвердость ЗЛВ, которые проявляются вследствие изменения энерговклада лазерного излучения при варьировании параметров обработки. Увеличение энерговклада излучения приводит к увеличению объема ванны расплава, росту геометрических размеров ЗЛВ и закономерному увеличению размеров зерен кристаллизовавшегося расплава. Одновременно растет и время пребывания расплава при сверхкритических температурах: в результате более полного растворения избыточных фаз возможно получение более пересыщенных твердых растворов.

4. Установлены основные закономерности изменения исходной структуры алюминиевых сплавов при ЛТО и вскрыто ее влияние на эффективность упрочнения. Эти закономерности состоят в том, что сравнительно крупные стабильные фазы, характерные для отожженного состояния, из-за кратковременности нагрева не успевают полностью раствориться в твердом растворе.

Растворение метастабильных упрочняющих фаз, свойственных искусственно состаренному состоянию сплава, происходит полнее и формируется структура более пересыщенного твердого раствора. Кроме того, при лазерном плавлении, по-видимому, выделяется внутренняя энергия напряженного состояния границы раздела твердый раствор–метастабильная фаза, что способствует получению более глубоких ЗЛВ.

Исходная структура пересыщенного твердого раствора с метастабильными сегрегациями, полученная после естественного старения, способствует гомогенизации твердого раствора и получению максимальной степени его пересыщения; в ЗЛВ формируется более однородная структура с большей микротвердостью.

5. Обоснована необходимость применения поглощающих покрытий с целью эффективного использования излучения как CO_2 -лазеров с длиной волны 10,6 мкм, так и твердотельных лазеров с длиной волны 1,06 мкм, обусловленная высокой отражательной способностью алюминиевых сплавов.

Даны практические рекомендации по выбору режимов ЛТО излучением CO_2 -лазеров и твердотельного лазера и выбору поглощающих покрытий, применение которых дает возможность получить наибольший

упрочняющий эффект при формировании зон лазерного упрочнения глубиной более 1 мм с мелкодисперсной структурой и минимальной пористостью.

6. Установлены закономерности формирования структуры зон лазерного легирования и раскрыты механизмы упрочнения, которые состоят в значительном измельчении структуры и пересыщении твердого раствора, как легирующими элементами сплава, так и легирующими элементами, вводимыми при лазерном легировании, а также в образовании в зоне лазерного легирования упрочняющих фаз, не свойственных системе компонентов сплава.

7. При полном растворении легирующих элементов в твердом растворе микротвердость повышается примерно в 1,5 раза. С образованием интерметаллидов в легированной зоне микротвердость увеличивается в 2–5 раз, однако, сильно возрастает неравномерность ее распределения по глубине зоны лазерного легирования, что может служить причиной хрупкого разрушения упрочненного слоя.

8. Проведен анализ двух способов лазерного легирования алюминиевых сплавов: оплавлением легирующих порошковых паст и инъекцией легирующих порошков. Установлены закономерности изменения структуры легированных слоев для различных поглощающих покрытий, связующих веществ и порошков различного химического состава.

9. На основании анализа пористости упрочненной зоны, степени измельчения структуры и искажения геометрии поверхности даны практические рекомендации по выбору оптимального состава связующего вещества для лазерного легирования из слоя легирующей пасты и поглощающего покрытия при лазерном легировании инъекцией порошка. Выполнение рекомендаций дает возможность получения мелкодисперсной структуры упрочненного слоя с интерметаллидами, либо без них.

10. Даны практические рекомендации по выбору режимов обработки излучением CO_2 -лазеров. Установлено, что эффект лазерного легирования наилучшим образом проявляется при большей мощности излучения и меньшей скорости обработки по сравнению с ЛТО; это соответствует большому энергоскладу лазерного излучения, т.к. часть энергии лазерного излучения расходуется на плавление легирующей пасты или порошка.

11. Показана возможность формирования протяженных зон лазерного упрочнения (глубиной более 1 мм) с минимальной пористостью при ле-

гировании из слоя легирующей пасты твердотельным лазером мощностью до 1 кВт.

12. Научно обоснованы причины повышения теплостойкости алюминиевых сплавов после лазерной термической обработки и лазерного легирования, состоящие в положительном влиянии пересыщенного твердого раствора и мелкодисперсных упрочняющих фаз, формируемых при лазерной обработке.

13. Усталостная выносливость алюминиевых сплавов может быть повышена на 5 % лазерной термической обработкой или на 15 % лазерным легированием по сравнению с исходным состоянием после закалки и искусственного старения.

14. На основании анализа зависимости размеров, микротвердости и химического состава упрочненного слоя от параметров ЛТО и лазерного легирования даны практические рекомендации по выбору оптимальных режимов обработки излучением твердотельного и CO_2 -лазеров деталей двигателей внутреннего сгорания из деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, способствующих повышению термостабильности обработанных поверхностей.

15. Разработаны способы лазерной обработки боковых поверхностей шлицевых канавок, состоящие в обработке их плоскостей таким образом, чтобы обеспечить сохранение геометрии острой кромки; при этом угол расхождения луча оптимизируют так, чтобы обеспечить наиболее полное проникновение лазерного пучка в обрабатываемую канавку, при этом глубина упрочненной зоны возрастает на 22–44 %, а ее ширина – на 7–14 %.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Макушева Н.А. Упрочнение алюминиевого поршневого сплава АЛ25 непрерывным CO_2 -лазером // Металловедение и термическая обработка металлов.–1983.–№ 8.–С. 61–63.

2. Упрочнение поверхности сплавов лазерным излучением / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов, Н.А. Макушева и др. // Поверхность, физика, химия, механика.–1983.–№ 9.–С. 124–131.

3. Лазерное упрочнение поверхности деталей двигателей внутреннего сгорания / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов, Н.А. Макушева и др. // Технология и организация производства.–1984.–№ 2.–С. 50–52.

4. Исследование микроструктуры алюминиевых и медных сплавов после обработки непрерывным CO_2 -лазером / А.Н. Сафонов, А.Г. Григорьянц, Н.А. Макушева и др. // Электронная обработка материалов.—1984.—№ 8.—С. 26–29.

5. Влияние лазерной обработки на структуру литейного алюминиевого сплава МВТУ–6 / А.Н. Сафонов, В.И. Силаева, Н.А. Смирнова и др. // Сб. науч. тр. Иркутского Политехнич. ин-та.—Иркутск, 1987.—С. 63–66.

6. Упрочнение сплава АЛ30 в результате термической обработки и поверхностного легирования с помощью непрерывного излучения лазера / А.Г. Григорьянц, Н.А. Смирнова, А.Н. Сафонов и др. // Электронная обработка материалов.—1989.—№ 5.—С. 21–25.

7. Смирнова Н.А., Сафонов А.Н. Лазерное упрочнение алюминиевых сплавов // Лазерная технология: Сб. тезисов докл. (Вильнюс).—1991.—№ 10.—С. 29–30.

8. Сафонов А.Н., Смирнова Н.А. Стабильность упрочнения алюминиевых сплавов, обработанных лазерным излучением // Металловедение и термическая обработка металлов.—1994.—№ 6.—С. 32–34.

9. Пат. 2050240 РФ, МКИ⁶ В23К26/00. Способ лазерной обработки боковых поверхностей шлицевых канавок / А.Н. Сафонов, Н.А. Смирнова, Г.Ю. Микутьшин и др. // Открытия. Изобретения.—1995.—№ 35.

10. Сафонов А.Н., Смирнова Н.А., Кривушина О.А. Особенности поверхностной лазерной заковки деформированных и литейных алюминиевых сплавов // Производственные технологии (Программа «Конверсия и высокие технологии. 1997–2000 годы»): Сб. науч.-техн. статей.—Липецк, 1997.—С. 16–18.

11. Сафонов А.Н., Смирнова Н.А., Кривушина О.А. Исследование особенностей поверхностной лазерной заковки алюминиевых сплавов // Материаловедение.—1998.—№ 10.—С. 28–31.

12. Сафонов А.Н., Смирнова Н.А., Кривушина О.А. Лазерная обработка поверхности алюминиевых сплавов // Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства: Тр. Всеросс. науч.-техн. конф.—Калуга, 1998.—С. 72–73.

13. Разработка методов лазерного модифицирования поверхности сплавов / А.Н. Сафонов, Н.А. Смирнова, О.А. Кривушина и др. // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Тр. V междунар. симпозиума.—М., 1999.—С. 65–68.