

На правах рукописи

УДК 621.791.947.72.03: 669.14.018.44.

Кривушина Ольга Анатольевна

Разработка и исследование процесса лазерного модифицирования
поверхности жаропрочных никелевых сплавов.

Специальность 05.03.07. - Оборудование и технология лазерной
обработки.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.



Москва 2000 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Крапошин В.С.;
кандидат технических наук,
доцент Тарасова Т.В.

Ведущее предприятие: Центральный институт авиационного
моторостроения им.П.И. Баранова.

Защита диссертации состоится «21» декабря 2000г. на
заседании диссертационного совета К 053.15.03 в Московском
Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по
адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв
высылать по указанному

просим

С диссертацией

Телефон

Автор

1570694

Ученый
специализированный
к.т.н., д.т.н.

Гирш

Подписано в
Заказ № 165



1570694

Кривушина О.А. Разработка

Общая характеристика работы.

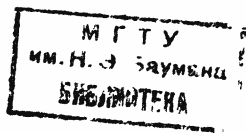
Актуальность работы. В настоящее время $\text{Cr} - \text{Ni}$ сплавы широко используются в различных отраслях промышленности. Никелевые сплавы отличаются высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Они применяются в газовых турбинах энергетических установок, двигателей самолетов, кораблей, для изготовления деталей ракетно-космической техники и нефтехимического оборудования. Около 70% массы авиационных газотурбинных двигателей составляют жаропрочные сплавы на никелевой и железоникелевой основе.

Повышение КПД газотурбинных двигателей требует постоянного увеличения рабочей температуры продуктов сгорания и, следовательно, повышения жаропрочности никелевых сплавов, из которых изготавливаются наиболее ответственные детали. Современный уровень свойств никелевых сплавов достигнут благодаря усложнению их системы легирования. Дальнейшее увеличение содержания легирующих элементов приводит к существенному удорожанию сплавов, а зачастую и к некомпенсированности фазового состава, выделению неблагоприятных фаз в ходе работы и снижению технологических служебных характеристик материала.

Одним из методов повышения эксплуатационных свойств жаропрочных никелевых сплавов (износостойкости, термостабильности, прочности, коррозионной стойкости и др.) является лазерное упрочнение поверхности материала. Наиболее широкое распространение в лазерном поверхностном упрочнении получили два процесса: лазерная термическая обработка (ЛТО) и лазерное легирование (ЛЛ).

Тепловое воздействие при ЛТО реализуется в широких пределах за счет изменения параметров лазерного излучения и режимов обработки. Это обеспечивает регулирование скоростей нагрева и охлаждения металла, малое время пребывания металла при высоких температурах, что позволяет получить требуемую структуру поверхностного участка и соответствующие свойства.

Технологические возможности ЛТО позволяют использовать этот процесс в качестве заключительной операции без последующей механической обработки. Причем лазерное термоупрочнение отдельных участков можно проводить после сборки конструкции или узла машины.



Несмотря на имеющийся научный задел, способы лазерной обработки распространены не достаточно широко. Это связано с обширной номенклатурой используемых инструментальных и конструкционных материалов (стали, твердые сплавы, порошки и т.д.) и их вариаций по химическому составу, приводящих к необходимости особенной корректировки режимов упрочнения, а так же с особенностями предшествующей термообработки и геометрией рабочей части деталей машин и инструмента.

Большое значение имеет также сложность и недостаточная изученность структурных и фазовых превращений, происходящих в упрочненных зонах различных материалов, что не позволяет считать этот вид обработки универсальным технологическим процессом.

В настоящее время не существует единой концепции о структурном механизме создания в поверхностных слоях упрочненного состояния металла в условиях высоких скоростей нагрева и охлаждения. Кроме того, до конца не выяснен механизм внедрения легирующего элемента в матрицу основного металла при лазерном нагреве.

Цель работы. Разработка технологического процесса лазерного модифицирования (термообработки и легирования) поверхности изделий из жаропрочных никелевых сплавов.

Научная новизна — установлено, что модифицирование поверхности жаропрочных никелевых сплавов достигается лишь при расплавлении поверхности сплава, так как жаропрочные никелевые сплавы не имеют полиморфных превращений в твердом состоянии, а легирование не возможно в твердом состоянии из-за невысокой подвижности легирующих элементов. При этом основной вклад в повышение микротвердости при лазерном модифицировании поверхности жаропрочных никелевых сплавов вносит механизм пересыщения γ -твердого раствора. Расплавление поверхности обеспечивается использованием непрерывных газовых лазеров ($\lambda=10,6$ мкм) с мощностью более 900 Вт и обязательным использованием поглощающего покрытия, или непрерывных твердотельных лазеров ($\lambda=1,06$ мкм) мощностью более 250 Вт без обязательного использования поглощающего покрытия.

Практическая ценность работы заключается в разработке рекомендаций, по технологии лазерной поверхностной обработки и лазерного легирования поверхности лопаток турбин, изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются при разработке технологического процесса лазерной термообработки поверхности лопаток из жаропрочных никелевых сплавов для завода «Салют».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на международном симпозиуме в Москве в 1998 году, всероссийской научно-технической конференции в г. Калуга 1998г. и международном семинаре фирмы «Снекма» в г. Москве 1999г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 4 печатных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, приложения и изложена на 151 странице.

Представленная работа содержит: 151 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 10 таблиц, 69 наименований использованных литературных источника.

Работа выполнена при научной консультации д.т.н., проф. Григорьянца А.Г., которому автор выражает глубокую признательность.

Основное содержание работы.

В первой главе рассмотрены особенности воздействия лазерного излучения на материалы, описываются возможности и преимущества лазерной термообработки и лазерного поверхностного легирования поверхности материалов.

Кратко рассмотрены особенности фазовых и структурных превращений при лазерном нагреве. Отмечается, что результаты лазерной обработки зависят не только от параметров лазерного излучения, но и от ряда металлургических факторов. К ним следует отнести: химический состав обрабатываемого сплава – содержание в нем легирующих элементов; исходную структуру обрабатываемого материала, степень ее стабильности, дисперсность, форму и размеры зерен; атмосферу, в которой производится лазерная обработка, способы повышения поглотительной способности обрабатываемой поверхности и связанные с ними химические и физические взаимодействия материала покрытия с обрабатываемым изделием; внутреннее напряжение, как существовавшее в материале до лазерной обработки, так и появившееся в процессе или в результате этой обработки.

Кроме того, рассматриваются область применения, основные свойства, структура и состав жаропрочных никелевых сплавов.

Современные жаропрочные сплавы – это многокомпонентные системы. Число легирующих элементов доходит до 15 – 17.

Жаропрочные сплавы на основе никеля применяются для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД), которые работают под нагрузкой при высоких температурах и, кроме того, подвержены термоциклированию и воздействию агрессивных сред.

По своей структуре жаропрочные сплавы должны отвечать следующим основным требованиям.

1. Обладать высокой фазовой и структурной стабильностью, которая может быть наиболее эффективно обеспечена при многокомпонентном легировании, особенно γ' - фазой.

2. Обладать высокой прочностью границ зерен, которая достигается избирательным микролегированием, а также применением вакуумной плавки и направленной кристаллизации.

В работе анализируются литературные данные, посвященные исследованию:

а) воздействия лазерного излучения на жаропрочные никелевые сплавы;

б) микроструктуры никелевых сплавов после лазерной обработки поверхности.

Одной из серьезных проблем ЛТО жаропрочных никелевых сплавов является образование трещин и пор в ЗЛВ. В работе авторов Соловьева Ю.А., Исакова В.В. и др. образование трещин объясняется нестационарным пульсирующим характером взаимодействия лазерного излучения с поверхностью жаропрочных никелевых сплавов.

Достаточно полно исследовался процесс образования трещин в околошовной зоне никелевых сплавов при сварке. Поскольку лазерное легирование и термообработка жаропрочных никелевых сплавов проводится с оплавлением поверхности, то процессы передачи тепла в ЗЛВ и в зоне шва при лазерной сварке очень похожи. В работах различных авторов отмечается, что при лазерной сварке жаропрочных никелевых сплавов в околошовной зоне не образуются холодные трещины.

Рекомендуемые способы борьбы с горячими трещинами:

1. Повышение чистоты основного металла по вредным примесям (переплавка, вакуумная плавка, рафинирование).
2. Дополнительное легирование металла шва элементами, способствующими образованию высокотемпературных вторичных фаз (Mo, W, Nb).
3. Уменьшение погонной энергии в ЗЛВ.

Проведенный анализ показал, что недостаточно изучены процессы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью никелевых сплавов, влияние параметров лазерного луча на структуру и свойства зоны лазерной обработки жаропрочных никелевых сплавов.

В работе решались следующие задачи:

1. Исследование влияния режимов обработки поверхности никелевых сплавов излучением непрерывного CO_2 – лазера и многоканального твердотельного лазера, а также предварительной термообработки на характеристики упрочненных зон.
2. Исследование микроструктуры ЗЛВ и уточнение механизмов повышения твердости после лазерного модифицирования поверхности никелевых сплавов.
3. Исследование температурной стабильности модифицированных лазером зон на поверхности никелевых сплавов.

4. Разработка рекомендаций по практической реализации процессов лазерного модифицирования никелевых сплавов.

5. Анализ существующих физико-математических моделей лазерного легирования поверхности цветных сплавов, при предварительном нанесении на поверхность обмазок, применительно к никелевым сплавам и выбор наиболее простой и адекватной модели для расчета глубины проникновения легирующего элемента в ЗЛВ никелевых сплавов.

Во второй главе описываются оборудование, исследуемые материалы, методики проведения экспериментов и методы обработки экспериментальных данных.

Образцы жаропрочных никелевых сплавов подвергались обработке на непрерывном многоканальном твердотельном лазере ($\lambda=1,06$ мкм) мощностью до 1,2 кВт (МТЛ - 1) и непрерывном CO_2 – лазере ($\lambda=1,06$ мкм) мощностью до 5 кВт (ТЛ - 5). В качестве объектов исследования были выбраны образцы никелевых сплавов различных классов: деформируемый ЭИ893 и литейные ЖС6К, ЖС6У. Сплавы ЭИ893 и ЖС6К – исходное состояние закалка 1160 °С с охлаждением на воздухе + трехступенчатое старение: 1000 °С, 4 часа + 900 °С, 8 часов + 850 °С, 15 часов, с охлаждением на воздухе; сплав ЖС6У исходное состояние – после литья и после отжига 1200 °С, 4 часа, с охлаждением на воздухе. Для увеличения поглощательной способности на предварительно обезжиренную поверхность сплавов при термообработке наносили поглощающее покрытие. При лазерном легировании в поглощающее покрытие вводились дополнительно легирующие порошки (SiC , TiC , WC , B , ZrO_2 с диаметром частиц меньше 50 мкм). После лазерного модифицирования проводились металлографические, электронографические, рентгенографические исследования областей лазерной обработки. Кроме того, исследовалась термостабильность зон лазерного модифицирования поверхности никелевых сплавов.

В третьей главе рассмотрены диффузионная и конвекционная модели процесса массопереноса легирующих элементов в зоне лазерного воздействия.

Уникальные возможности процессов, позволяющих с помощью лазерного излучения формировать сплавы с заданными физико-химическими свойствами на поверхности изделий, привлекают к себе пристальное внимание исследователей, работающих в области лазерных технологий. На практике технологию

необходимо знать глубину проникновения примеси в глубь основного материала и распределение температурных полей в зоне обработки, чтобы с достаточной долей вероятности знать структурные и фазовые превращения легированного сплава в зоне лазерной обработки. Такие расчеты по различным моделям достаточно обработаны для сталей. Для цветных сплавов такие расчеты не отработаны.

Плавнение материала основы лазерным излучением, введение в ванну расплава необходимой композиции легирующих компонентов, кристаллизация расплава и формирование в поверхностном слое сплава с заданными свойствами фактически является типичным металлургическим процессом, реализуемым в микрообъеме. Лазерные микрометаллургические процессы отличаются от традиционных сильной неравновесностью, сложной гидродинамикой, высокими скоростями охлаждения и целым рядом других особенностей. Определяющую роль в процессах лазерной микрометаллургии играют следующие факторы: пространственно-временные и энергетические характеристики теплового источника; теплофизические характеристики материала основы; способ введения легирующих компонентов (из газовой или жидкой фазы, из покрытий или обмазок и т.д.) и соответствующие ему условия при облучении (наличие и давление газовой среды, образование приповерхностной плазмы и т.п.); соответствие физико-химических свойств легирующего компонента и материала основы (взаимная растворимость, возможность образования химических соединений и т.п.).

Существенную роль в процессе легирования играют закономерности распределения легирующих элементов в материале, поэтому особое значение приобретает разработка методов математического моделирования физико-химических превращений и массопереноса в зоне воздействия лазерного излучения.

В работе рассматривается роль диффузионных процессов на внедрение легирующих элементов в жидкую ванну расплава. Отмечается, что для процесса лазерного легирования расчет коэффициента диффузии элемента по формуле:

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{\varepsilon}{kT} \right), \quad (1)$$

где D_0 – предельное значение коэффициента диффузии;

ε – энергия активации;

k – постоянная Больцмана;

T – температура.

дает величину порядка $10^{-15} - 10^{-20} \text{ см}^2$, что существенно ниже реальных значений. Это связано с тем, что если при обычном нагреве, воздействующим на молекулы вещества в целом, сильнее всего раскачиваются (и разрываются) наиболее слабые атомные связи, т.е. термические реакции идут по каналу с наименьшей энергией активации, то реакции, стимулированные лазерным излучением, могут идти по любому каналу, что приводит к разрыву самой прочной связи. В итоге активными становятся те группы атомов, которые при обычном нагреве никогда не вступают во взаимодействие. Кроме того, при лазерном нагреве предполагается действие специфического механизма диффузии, когда металл при легировании находится в состоянии перегретой жидкости. В этих условиях основная масса легирующих элементов распространяется в зоне воздействия лазерного излучения под действием гидродинамических сил и температурных градиентов, и в результате диффузии часть вводимого элемента как бы рассасывается по всему объему зоны

В работе Доронина И.В. коэффициент диффузии для случая лазерного легирования рассчитывается по формуле:

$$-\ln D = 9 + 43 \left(1 - \frac{T_{\text{диф}}}{T_{\text{пл}}} \right)^{2.8}, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии;

$T_{\text{диф}}$ – температура диффузии;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления легирующего элемента.

Оценки показывают, что ни при каких возможных условиях диффузии и термодиффузии нельзя получить изменение по глубине содержания легирующих элементов в зоне воздействия лазерного излучения, сравнимые хотя бы в какой-то степени с экспериментальными данными. Диффузия могла бы обеспечить лишь на несколько порядков меньшие глубины легирования, по сравнению с реально наблюдаемыми результатами.

Для более точного определения глубины проникновения легирующей примеси необходимо учитывать тот факт, что проникновение примеси в основной материал происходит по траектории, сильно отличающейся от прямой. Это обусловлено спецификой движения расплава в ЗЛВ. Учет конвекции

должен позволить увеличить точность оценки глубины проникновения примеси при лазерном легировании в глубину основного материала и не сильно усложнить процесс расчета.

Модель массопереноса в зоне легирования за счет конвекции качественно объясняет экспериментальные результаты поверхностного лазерного легирования.

Расчеты, проведенные автором для случая лазерного легирования жаропрочных никелевых сплавов по модели термокапиллярной конвекции, дают заниженные значения глубины проникновения легирующего элемента в ЗЛВ с экспериментальными данными на 15 – 20 %. Достоинством модели является простота расчетов и используемого математического аппарата.

В четвертой главе исследуются особенности структурообразования при лазерной термообработке и легировании жаропрочных никелевых сплавов: деформируемого ЭИ893, литых ЖС6К и ЖС6У. Обработка сплавов проводилась на твердотельном многоканальном лазере МТЛ. Исследуемые сплавы имели следующую исходную структуру: ЭИ893 - закалка + старение; ЖС6К - закалка + старение; ЖС6У литой и после гомогенизационного отжига. Кроме того, в работе исследуются параметры ЗЛВ (глубина и ширина), а также микротвердость ЗЛВ.

При лазерной обработке жаропрочных никелевых сплавов с оплавлением поверхности структура ЗЛВ представляет собой зону оплавления. Зона закалки из твердой фазы и переходная зона отсутствуют. Это объясняется тем, что никелевые сплавы не испытывают полиморфных превращений в твердой фазе. Переходная зона присутствует при лазерном легировании элементами с высоким коэффициентом диффузии (такими как бор).

В работе отмечается, что при лазерной термообработке с оплавлением поверхности конечная структура формируется на стадии охлаждения расплавленного металла. При этом наблюдается измельчение структуры ЗЛВ практически всех никелевых сплавов, как литейных, так и деформируемых.

При лазерном легировании механизмы упрочнения материала ЗЛВ более разнообразны, чем при лазерном термоупрочнении поверхности сплавов. Кроме механизмов, наблюдающихся при лазерной термообработке (измельчение и растворение γ' - фазы), при легировании также наблюдается искажение решетки твердого раствора из-за внедрения легирующего элемента.

Лазерная обработка всех исследуемых сплавов приводит к повышению средней микротвердости в ЗЛВ, но она не превышает средней микротвердости γ' - фазы.

Статистическая обработка экспериментальных данных дает возможность утверждать, что ширина ЗЛВ (b) достаточно точно описывается зависимостью:

$$b = k_b V, \quad (3)$$

а глубина ЗЛВ:

$$h = k_h V^{0.5}, \quad (4)$$

где V – скорость лазерной обработки.

В работе так же исследуется термическая стабильность поверхность жаропрочных никелевых сплавов после лазерного легирования. Исследования проводились для температур 700 °С, 850 °С и 900 °С (область рабочих температур). Автором делается вывод, что при лазерном легировании рассматриваемых жаропрочных сплавов карбидом титана термическая стабильность ЗЛВ выше, чем при лазерной обработке и при температуре 700°С и при температуре 850°С. Такой же результат дает и легирование карбидом кремния сплава ЖС6К и бором сплава ЖС6У (отожженный) (максимальная твердость), а легирование порошком ВКНА несколько занижает термостабильность ЗЛВ практически всех исследуемых сплавов.

Кроме того, исходное состояние сплава, как и мощность лазерного луча не оказывают влияние на уровень термической стабильности ЗЛВ после лазерного модифицирования поверхности жаропрочных никелевых сплавов при температуре выдержки 700°С.

В пятой главе исследуются вопросы структурообразования при лазерном модифицировании поверхности литейного жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. Обработка проводилась на непрерывном CO₂ - лазере. Исследуемый сплав имел исходную структуру после литья. Легирующие порошки: TiC, SiC, B, ВКНА. Кроме того, в главе исследуются параметры ЗЛВ (глубина и ширина), а также изменение микротвердости в ЗЛВ.

Проводится сравнение характеристик ЗЛВ со сплавом, обработанным излучением непрерывного твердотельного лазера и излагаются рекомендации по технологии лазерного модифицирования поверхности жаропрочных никелевых сплавов. Так же излагаются рекомендации по технологии лазерного легирования поверхности жаропрочных никелевых сплавов.

При лазерном модифицировании поверхности жаропрочных никелевых сплавов излучением непрерывного CO_2 – лазера механизмы упрочнения в ЗЛВ такие же, как при модифицировании поверхности излучением непрерывного твердотельного лазера (пересыщения твердого раствора, измельчение зерна, искривление решетки). Различия заключаются в количестве вложенной в материал (поглощенной) энергии. Коэффициент отражения никеля при обработке на непрерывном CO_2 – лазере ($\lambda=10,6$ мкм) равен 0,942, для твердотельного (ИАГ - Nd) лазера ($\lambda=1,06$ мкм) соответственно 0,741 при нормальных условиях.

В работе отмечается, что практически во всех случаях легирования жаропрочного сплава ЖС6У излучением непрерывного CO_2 -лазера микротвердость ЗЛВ не превышает микротвердости γ -твердого раствора исходного сплава (исключение составляет случай легирования бором с максимальной скоростью). Это отличается от случаев легирования твердотельным лазером, когда для литого сплава отмечается существенное увеличение микротвердости.

При лазерной обработке жаропрочных никелевых сплавов на непрерывном CO_2 – лазере при мощности лазерного излучения 2кВт и выше и скорости от 0,48 до 1,3 м/мин наблюдается интенсивное испарение материала в ЗЛВ. Такое явление отсутствует при обработке материала на твердотельном лазере.

Для непрерывного CO_2 –лазера размеры ЗЛВ имеют такой же характер зависимостей от скорости и мощности лазерного луча, как и для твердотельного лазера.

Большое влияние на параметры ЗЛВ никелевых сплавов оказывает так же расстояние от фокусирующей линзы до обрабатываемого образца. Увеличение этого расстояния приводит к увеличению диаметра лазерного луча, а, следовательно, к увеличению размеров ЗЛВ.

Исходя из материалов, представленных в диссертации, можно утверждать, что лазерное модифицирование поверхности жаропрочных никелевых сплавов может использоваться в технологии наряду с другими методами упрочнения поверхности. Причем, обработка может производиться на непрерывных твердотельных лазерах и на газовых лазерах малой мощности (1 – 2 кВт для газового лазера и 500 – 800 Вт – для твердотельного лазера). Лазерное модифицирование поверхности не только позволяет увеличить микротвердости материала в зоне обработки, но и

оказывает благоприятное влияние на термическую стабильность материала ЗЛВ при повышенных температурах.

Общие выводы и результаты работы.

1. Современный уровень свойств жаропрочных никелевых сплавов достигнут благодаря усложнению их системы легирования. Дальнейшее увеличение содержания легирующих элементов приводит к существенному удорожанию сплавов, а зачастую и к некомпенсированности фазового состава, выделению неблагоприятных фаз в ходе работы и снижению технологических служебных характеристик материала. Поэтому для увеличения жаропрочности никелевых сплавов используются различные методы упрочнения поверхности сплавов. Одним из наиболее перспективных методов термической обработки поверхности жаропрочных никелевых сплавов является лазерное модифицирование (лазерная термообработка и лазерное легирование).
2. Методы ЛТО обладают рядом достоинств, перед традиционными методами термообработки в случае:
 - обработки поверхности деталей сложной формы, коробление которых должны быть минимальны;
 - затруднения подвода тепла к обрабатываемой поверхности традиционными методами;
 - при малой поверхности обрабатываемой зоны.
3. Установлено, что модифицирование поверхности жаропрочных никелевых сплавов достигается лишь при расплавлении поверхности сплава, так как жаропрочные никелевые сплавы не имеют полиморфных превращений в твердом состоянии, а легирование не возможно в твердом состоянии из-за невысокой подвижности легирующих материалов.
4. Рентгенографический и фазовый анализ показали, что основной вклад в повышение микротвердости при лазерной термообработке поверхности жаропрочных никелевых сплавов вносит механизм пересыщения γ -твердого раствора. При лазерном легировании основную роль в повышении микротвердости ЗЛВ играет внедрение легирующего элемента.

Причем легирующий элемент распределяется равномерно по глубине ЗЛВ. Исследования также показали, что механизмы упрочнения поверхности жаропрочных исследованных никелевых сплавов одинаковы для случаев обработки излучением непрерывного твердотельного и непрерывного газового лазера.

5. Анализ моделей расчета глубины проникновения легирующего элемента в никелевый сплав ЖС6У при лазерном легировании показал, что при использовании конвективной модели массопереноса погрешность расчетов составляет 10 – 15 % от экспериментальных значений глубины проникновения легирующего элемента в никелевый сплав в зависимости от легирующего элемента. Основным достоинством этой модели является простота математического аппарата. Глубина проникновения легирующих элементов в никелевый сплав проводилась на рентгеновском анализаторе «Link ANALITICAL AN 1000».
6. Обнаружено, что лазерная термообработка и лазерное легирование порошками TiC, SiC, ZrO, B, ВКНА жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У, ЖС6К, ЭИ893 приводит к повышению средней микротвердости в ЗЛВ по сравнению с микротвердостью γ' - фазы необлученного сплава, но она не превышает средней микротвердости γ' - фазы необлученных сплавов. Так для сплава ЖС6К наибольший прирост микротвердости ЗЛВ наблюдается при лазерной термообработке и достигает значения 650 – 690, а микротвердость γ' - фазы - 824 – 894, микротвердость γ - фазы 592 – 657. Для сплава ЖС6У (литой) средняя микротвердость ЗЛВ при лазерной термообработке 550 -560, а микротвердость γ' - фазы - 572 – 592, γ - фазы 450 – 473. Наибольший прирост микротвердости наблюдается при легировании порошком TiC, около 27 % к микротвердости γ - фазы.
7. Выявлено, что ширина ЗЛВ (b) исследованных жаропрочных никелевых сплавов можно описать зависимостью $b = k_b V$, а глубина ЗЛВ: $h = k_h V^{0.5}$, где V – скорость лазерного луча, и для случаев обработки излучением непрерывного многоканального твердотельного лазера, и для случая использования излучения

непрерывного газового лазера. Погрешность расчетов составляет 5 – 7 %. Значения коэффициентов k_b и k_h определяются экспериментально для каждого исследованного сплава.

8. Установлено, что при лазерном легировании карбидом титана всех исследованных никелевых сплавов термическая стабильность ЗЛВ выше, чем при лазерной обработке и при температуре 700°C и при температуре 850°C. Такой же результат дает и легирование исследованных никелевых сплавов карбидом кремния и бором (максимальная твердость), а легирование порошком ВКНА занижает термостабильность ЗЛВ исследуемых никелевых сплавов на 10 – 15 % по сравнению с необлученным состоянием. Термическая стабильность ЗЛВ остается постоянной в течение всего времени нагрева.
9. Рекомендуемые режимы обработки поверхности исследованных никелевых сплавов:
 - для непрерывного многоканального твердотельного лазера: мощность 400 – 500 Вт, скорость луча – 0,8 – 1, 3 м/мин, диаметр луча от 3 мм, использование поглощающего покрытия не обязательно;
 - для непрерывного CO₂ – лазера: мощность 1 – 1.7 кВт, скорость луча – 0,8 – 1,3 м/мин, диаметр луча от 3 мм, использование поглощающего покрытия обязательно.
 - Рекомендуемая толщина наносимой обмазки при лазерном легировании жаропрочных никелевых сплавов составляет 150 – 200 мкм.

По теме диссертации опубликовано 2 статьи и тезисы 2-х докладов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. Лазерные методы термоупрочнения поверхности цветных сплавов. А.Н. Сафонов, Н.А. Смирнова, О.А. Кривушина и др.// Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошной среды. Труды

международного симпозиума. - М.: Из-во Московского авиационного института, 1998. - С. 65 – 68.

2. Сафонов А.Н., Смирнова Н.А., Кривушина О.А. Особенности поверхностной лазерной закалки деформируемых и литейных алюминиевых сплавов // Конверсионные технологии: сб. статей. – М, 1997. – С.16 – 18.
3. 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. Труды всероссийской научно-технической конференции.- Калуга, 1998. – С.72-73.
4. Сафонов А.Н., Смирнова Н.А., Кривушина О.А. Исследование особенностей поверхностной лазерной закалки алюминиевых сплавов// Материаловедение. – 1998. - №10. – С.28-31.