

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 629.7.02:621.791.725

МАКСИМЕНКО
Александр Васильевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
НАПЛАВКОЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Минск, 2011

Работа выполнена в УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины».

Научные руководители: **Бокуть Борис Васильевич**,
академик АН БССР, доктор
физико-математических наук, профессор;

Мышковец Виктор Николаевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой радиофизики и
электроники УО «Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины»

Официальные оппоненты: **Девойно Олег Георгиевич**, доктор технических
наук, профессор, главный научный сотрудник
НИИЛ плазменных и лазерных технологий НИЧ
БНТУ;

Кукин Святослав Феоктистович, кандидат
технических наук, начальник лаборатории
лазерных и ультразвуковых технологий РУП
«Минский тракторный завод»

Оппонирующая организация: ГНУ «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 21 октября в 14⁰⁰ часов на заседании совета Д 02.05.03 по
защите диссертаций при Белорусском национальном техническом университете
по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202 тел.
ученого секретаря: 292 24 04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского
национального технического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

Девойно О. Г.

© Максименко А. В., 2011
© БНТУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление деталей для возобновления их работоспособности актуально во многих отраслях промышленности, в том числе и авиационной. Около 70% из общего числа восстанавливаемых деталей авиационной техники, изготовленных из высокопрочных легированных сталей и алюминиевых сплавов, составляют детали с поверхностными дефектами в виде износа, трещин, коррозионных и механических повреждений. Для восстановления таких деталей с сохранением эксплуатационных характеристик необходимо наносить покрытия с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основного металла. Наплавленный слой не должен содержать горячих и холодных трещин, пор, непроваров, раковин и других дефектов.

Известные в современном производстве газотермические и лазерные (с применением излучения непрерывных лазеров) методы нанесения покрытий не всегда могут быть использованы, потому что характерные для них фазовые и структурные превращения в наплаваемых металлах приводят к разупрочнению материала основы, высокому уровню остаточных напряжений и трещинообразованию в покрытиях. Кроме этого, для получения покрытий со свойствами, близкими к свойствам основы, необходимо проводить дополнительную термическую обработку всей детали, которая может привести к изменению ее геометрических размеров, выходящих за поле допуска.

Задачи такого рода могут быть решены импульсной лазерной наплавкой при использовании пучков специальной геометрии с изменяемой во времени интенсивностью излучения и присадочных материалов в виде проволоки.

В научных работах представлены только отдельные результаты, констатирующие возможности нанесения покрытий присадочными материалами в виде проволоки при воздействии импульсного лазерного излучения. Данные о технологии восстановления методом импульсной лазерной наплавки поверхностей деталей авиационной техники, изготовленных из высокопрочных легированных сталей и алюминиевых сплавов с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы, отсутствуют. В этой связи исследование и разработка технологии нанесения покрытий, в которой оптимизированы режимы и условия воздействия, а также установлена зависимость физико-механических и эксплуатационных свойств наплаваемых металлов от параметров процесса, является актуальной задачей, а ее решение представляет как научный, так и практический интерес.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники и в научной лаборатории «Новые материалы и технологии» физического факультета УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины». Выбор темы диссертационной работы сделан с учетом необходимости разработки и создания технологии восстановления поверхностей деталей авиационной техники. Направление исследований соответствует п. 7.1 («Взаимодействие лазерного излучения с различными средами и объектами, развитие физических основ создания новых лазерных технологий и техники ...») перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 годы, утвержденного постановлением Совета министров Республики Беларусь № 512 от 17 мая 2005 г.

Научные исследования по теме диссертации проводились при выполнении научных программ, проектов и договоров: ГНТП «Лазер», задание 3.05 «Разработка оптической формирующей системы и технологий перфорации отверстий и резки материалов» (1999–2000 гг., № ГР 19993187); ГПОФНИ «Когерентность», «Исследование процессов и выявление физических особенностей формирования сварных соединений при лазерном плавлении металлов малых толщин» (2001–2005 гг., № ГР 20041575); ГКПНИ «Фотоника», задание 1.05 «Изучение кинетики процессов, протекающих при импульсном воздействии лазерного излучения и разработка технологических методов их управления путем оптимизации параметров обработки» (2006–2010 гг., № ГР 20061757); хозяйственных договоров с РУПП «558-й Авиационный ремонтный завод» на проведение НИР: «Разработка технологии и ремонта деталей методом лазерной сварки» (09.02.2001–20.12.2001 гг., № ГР 20011484); «Разработка технологии ремонта, предоставление опытных образцов и ремонт деталей методом лазерной сварки» (02.09.2002–31.10.2002 гг., № ГР 20023328); «Разработка технологий ремонта деталей с использованием лазерной установки ЛТ – 200» (2002–2009 гг., № ГР 2003188); хозяйственного договора с войсковой частью № 63604 на проведение НИР «Разработка технологии восстановления и ремонта деталей, технологической оснастки, штампов и пресс-форм методом импульсной лазерной сварки» (2007–2011 гг., № ГР 20081216).

Цель и задачи исследования

Цель диссертации – разработка технологии восстановления поверхностей деталей авиационной техники, изготовленных из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов методом импульсной лазерной наплавки покрытий с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать специальное оборудование для импульсного лазерного нанесения покрытий на поверхности образцов из конструкционных материалов и сплавов, используемых в авиационной технике;
- провести моделирование процесса импульсной лазерной наплавки присадочным материалом в виде проволоки на основу из легированной высокопрочной стали с учетом зависимости их теплофизических свойств от температуры;
- установить закономерности зависимости глубины плавления, размеров зоны термического влияния, скорости нагрева и охлаждения на участке рекристаллизации в основе от временных и энергетических параметров лазерного излучения;
- экспериментально исследовать влияние длительности, энергии и формы импульсов лазерного излучения, распределения энергии по сечению пучка на размерные параметры и дефектность наносимых покрытий из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов;
- исследовать влияние технологических режимов процесса импульсной лазерной наплавки при послойном нанесении на микротвердость и триботехнические характеристики покрытий из высокопрочных сталей;
- разработать и внедрить технологию импульсной лазерной наплавки покрытий на поверхности деталей авиационной техники, изготовленных из легированных высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы.

Объектом исследований являются физико-механические и триботехнические характеристики покрытий на поверхностях деталей авиационной техники формируемые методом импульсной лазерной наплавки.

Предметом исследований является процесс формирования покрытий методом импульсной лазерной наплавки на поверхности деталей авиационной техники.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты моделирования процесса импульсной лазерной наплавки на поверхность образца из легированной высокопрочной стали с учетом зависимости теплофизических свойств, как основного, так и присадочного материалов от температуры, позволяющие установить влияние энергии,

длительности и формы импульсов излучения на характер распределения температурных полей в основном и наплавляемом металле.

2. Закономерности зависимости глубины плавления, размеров зоны термического влияния, скорости нагрева и охлаждения на участке рекристаллизации в основе от временных и энергетических параметров лазерного излучения, позволившие определить область оптимальных технологических режимов наплавки легированных высокопрочных сталей.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния длительности, энергии и формы импульсов лазерного излучения, распределения энергии по сечению пучка на размерные параметры и дефектность наносимых слоев из легированных высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов, которые позволили определить характеристики излучения, обеспечивающие минимальное количество дефектов и максимальное значение коэффициента формы валика наплавки.

4. Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и триботехнических характеристик наплавляемых слоев из высокопрочной стали, позволившие установить закономерности распределения микротвердости и интенсивности изнашивания в условиях послойного нанесения, на основе которых разработана технология формирования покрытий со свойствами, равноценными свойствам основного металла.

Личный вклад соискателя

Соискателем теоретически обоснованы закономерности распределения тепловых полей в металлах и определены исходные режимы для импульсной лазерной наплавки. Автором проведены экспериментальные исследования по определению влияния пространственно-энергетических и временных параметров лазерного излучения, а также условий воздействия на формирование покрытий на поверхности деталей, изготовленных из конструкционных материалов. Автором разработаны технология и производственные инструкции по восстановлению поверхностей деталей авиационной техники. Соискатель принял участие в обработке результатов, их обобщении и трактовке, написании статей и отчетов научно-исследовательских работ.

Постановка целей и задач исследований, анализ полученных результатов проводились совместно с научными руководителями академиком АН БССР Б.В. Бокутем и канд. физ.-мат. наук В.Н. Мышковцом. Соавторы работ участвовали в разработке теоретической модели и расчетах температурных режимов лазерной наплавки (Е.А. Баевич, В.В. Грищенко), в проведении экспериментальных исследований процесса лазерной наплавки (А.Т. Малащенко, Г.Л. Покаташкин), разработке производственных инструкций и внедрении результатов исследований в производство (С.Н. Юркевич).

Апробация результатов диссертации

Основные результаты исследований представлялись на следующих научных конференциях и семинарах: Международная научно-практическая конференция «Лазерная физика и спектроскопия» (Гродно, 1999 г.); Научно-практическая конференция «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин» (Полоцк, 1999 г.); Международная научно-практическая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2002 г.); Международная научно-практическая конференция «Электрофизические и электрохимические методы обработки» (Санкт-Петербург, 2003 г.); 5-я Международная практическая конференция-выставка «Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций» (Санкт-Петербург, 2003 г.); 6-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2005 г.); 9-й и 10-й Международные симпозиумы «Технологии – оборудование-качество» (Минск, 2006, 2007 гг.); Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2010 г.).

Опубликованность результатов

По результатам исследований опубликовано 25 печатных работ, в том числе 8 статей (2,8 а. л.) – в изданиях, входящих в перечень изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, 13 статей в сборниках материалов научных конференций и сборниках докладов, 4 патента.

Структура и объем диссертации

Общий объем диссертационной работы составляет 140 страниц. Работа содержит 49 рисунков на 40 страницах, 7 таблиц на 8 страницах, приложение на 7 страницах, библиографический список из 155 наименований (включая собственные публикации соискателя) на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведен перечень научных тем, программ и договоров, в рамках которых выполнялись исследования, сформулирована цель работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, выделен личный вклад соискателя в полученные результаты, указаны сведения об апробации и публикации результатов, дана характеристика структуры и объема диссертации.

В первой главе рассмотрены особенности тепловых расчетов для материалов, нагреваемых лазерным излучением, приведены литературные данные о влиянии параметров лазерного излучения и условий воздействия на структурно-фазовые превращения и физико-механические свойства наплавляемых покрытий.

Определено, что моделирование теплофизических процессов в материалах при лазерном воздействии может быть реализовано посредством решения нелинейных уравнений теплопроводности. Аналитические решения таких уравнений используются для проведения расчетов, в которых не требуется получения результатов с высокой точностью. Для решения более сложных задач при изучении нелинейных многопараметрических процессов, характерных для импульсной лазерной наплавки, наиболее приемлемыми являются численные методы.

На основе анализа различных методов формирования покрытий на поверхности деталей из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы, обоснована возможность и целесообразность нанесения таких покрытий методом импульсной лазерной наплавки с использованием присадочного материала в виде проволоки.

Анализ результатов научных исследований по проблемам импульсной лазерной наплавки показал отсутствие данных о влиянии пространственно-энергетических и временных параметров лазерного излучения и условий обработки на формирование покрытий с физико-механическими свойствами, близкими к свойствам основы из конструкционных материалов, исследованных в настоящей работе.

В ходе проведенного анализа выявлены основные направления исследований, требующие дальнейшей разработки, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе описаны объекты исследований, оборудование для лазерной наплавки, методики определения температурных полей и физико-механических свойств металлов, измерения энергетических и временных параметров лазерного излучения, статистической обработки результатов исследований.

Объектом исследования являлись физико-механические и триботехнические характеристики покрытий из низко- и среднелегированных высокопрочных конструкционных сталей 30ХГСА, 30ХГСН2А, а также из алюминиевых сплавов АК-6, АК-8, формируемые методом импульсной лазерной наплавки.

Покрытия наносили с помощью спроектированного и изготовленного специального оборудования, позволяющего осуществлять формирование слоев под воздействием импульсного лазерного излучения ($\lambda = 1,064$ мкм) с изменяемой формой, энергией до 40 Дж и длительностью импульсов от 0,25 до $20 \cdot 10^{-3}$ с, а также пучками излучения с распределением энергии по сечению в виде кольца.

Для определения температурных полей при моделировании процесса импульсной лазерной наплавки использовали программу ANSYS. Контроль и измерения пространственно-энергетических и временных параметров лазерного излучения проводили с использованием измерителей ИМО-2 и ИКТ-1, автоматизированной системы регистрации оптического сигнала излучения «Квант» на основе ПЗС–матрицы и комплекта сертифицированных оптических фильтров.

Для изучения структуры, микротвердости и пористости наплавляемых покрытий изготавливали шлифы. Исследования микроструктуры металлов проводили на световом микроскопе «Unimet» при увеличении $50\times$ и $100\times$ в испытательном центре ГНУ ИПМ (г. Минск). Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3 и «Micromet-II» при нагрузке $P = 0,981 \text{ Н}$ (100г). Определение элементного состава металлов проводили на сканирующем электронном микроскопе с микрорентгеноспектральным анализатором AN 10000 с использованием программы количественного анализа ZAF4-FLS. Трибологические испытания наплавляемых образцов выполняли на установке УСК-1.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли средствами математического пакета Mathcad.

В третьей главе приведены результаты теоретических расчетов по установлению закономерностей зависимости глубины плавления, размеров зоны термического влияния (ЗТВ), скорости нагрева и охлаждения основы на участке рекристаллизации от длительности, энергии и формы импульсов лазерного излучения. Расчеты проводились на основе разработанной модели процесса импульсной лазерной наплавки присадочным материалом в виде проволоки на поверхность образца из высокопрочной стали с учетом зависимости их теплофизических свойств от температуры.

Распределение плотности мощности лазерного излучения по сечению пучка при моделировании считалось однородным. Изменение во времени представлялось в виде импульсов треугольной формы с линейно возрастающим передним и крутым задним фронтом, линейно убывающим задним и крутым передним фронтом, а также в виде прямоугольной формы с равномерным распределением мощности в течение времени действия.

Для определения температурных полей в основе и наплавляемом металле (сталь 30ХГСН2А) решалось нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных численным методом при использовании программы ANSYS. Расчеты выполнялись с учетом начальных и граничных условий, которые соответствовали параметрам образца и наплавляемого металла. Нелинейность уравнения теплопроводности определялась известными эмпирическими зависимостями теплофизических

свойств (удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности и плотности) материала от температуры:

– удельная теплоемкость рассчитывалась по формуле

$$c(t) = c_0(t) + \frac{m_i \cdot L_i}{\delta T_i} \exp\left(-a_i^2 \left[\frac{T_i - T}{\delta T_i}\right]^2\right),$$

где $c_0(T) = c_0 + 0,16(T - 323)$; m_i, a_i – константы, характеризующие специфику превращений аустенита в дочерние фазы; L_i – теплота эвтектоидного превращения тех же фаз; δT_i – температурные интервалы превращения аустенита в дочерние фазы;

– коэффициент теплопроводности определялся согласно формуле

$$\lambda(T) = \lambda_0 + a_1 \cdot \left(\frac{T}{100}\right) - \frac{a_2}{\operatorname{cha}_3\left(\frac{T - T_0}{100}\right)},$$

где $\lambda_0 = 48,1 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$; $a_1 = 0$; $a_2 = 26,9 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$; $a_3 = 0,285 \text{град}^{-1}$; $t_0 = 935^\circ\text{C}$;

– плотность стали определялась по формуле

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{1 + 3 \cdot \alpha(T)(T - T_0)},$$

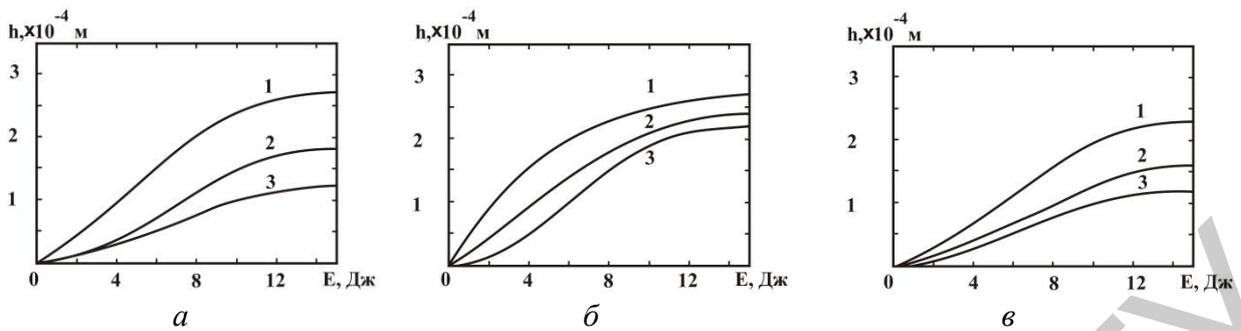
где $\rho_0 = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – массовая плотность исследуемой стали при комнатной температуре; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного расширения стали.

Энергетические (2–12 Дж) и временные ($\tau = (4–8) \cdot 10^{-3}$ с) параметры импульсов излучения и диаметр присадочного материала – $(0,5) \cdot 10^{-3}$ м задавались в соответствии с данными, полученными в ходе предварительных экспериментальных исследований процесса наплавки.

При выборе режимов формирования покрытий с физико-механическими свойствами, близкими к свойствам основы, важнейшей задачей является минимизация теплового воздействия лазерного излучения в ходе наплавки. Оценить такое воздействие можно такими параметрами, как глубина плавления основы, размеры ЗТВ, а также скорость нагрева и охлаждения исходного металла на участке рекристаллизации.

По результатам теоретических исследований распределения температуры в основе была установлена зависимость глубины плавления (рисунок 1) от энергии и длительности лазерных импульсов треугольной и прямоугольной формы.

На рисунке видно, что глубина плавления основы квазилинейно увеличивается от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $2,7 \cdot 10^{-4}$ м при увеличении энергии импульсов от 2 до 12 Дж. Увеличение длительности импульсов в указанном диапазоне энергий обуславливает уменьшение глубины плавления вследствие уменьшения плотности мощности излучения в зоне воздействия.



a – треугольный импульс с линейно возрастающим передним фронтом;
б – треугольный импульс с линейно убывающим задним фронтом;
в – прямоугольный импульс; 1 – $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ с; 2 – $\tau = 6 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – $\tau = 8 \cdot 10^{-3}$ с
Рисунок 1 – Зависимость глубины плавления основы от энергии лазерного излучения

Анализ результатов показал, что для плавления основы на заданную глубину при одинаковых значениях длительности импульсов для треугольного импульса с линейным убыванием теплового потока необходимо затратить энергии меньше (на 20 – 30 %), чем для других исследуемых форм импульсов.

В ходе проведенных исследований определены зависимости размеров ЗТВ в основе от плотности мощности импульсов нагрева. Установлено, что при варьировании значений плотности мощности лазерного излучения в интервале от 2 до $10 \cdot 10^9$ Вт/м² глубина ЗТВ изменяется от 1 до $2,7 \cdot 10^{-4}$ м.

В данных исследованиях металл основы (высокопрочная сталь 30ХГСН2А) является термоупрочняемым и применяется в закаленном состоянии. В ходе нанесения покрытий на поверхности деталей, изготовленных из этих материалов, нагрев исходного металла до температуры отпуска (540 °С – 600 °С) на участке рекристаллизации в ЗТВ приводит к тому, что в результате фазовых и структурных превращений происходит его разупрочнение.

Экспериментальные исследования показали, что при однослойном нанесении покрытия с использованием импульса лазерного излучения треугольной формы с убывающим задним фронтом ($q = 7,6 \cdot 10^9$ Вт/м²), длительностью $6 \cdot 10^{-3}$ с и $15 \cdot 10^{-3}$ с на участке рекристаллизации в основе снижение микротвердости не происходит. При длительности импульса излучения $\tau = 20 \cdot 10^{-3}$ с микротвердость в ЗТВ уменьшается до 4200 МПа относительно микротвердости основы (5100 МПа). Расчеты параметров термического цикла в этом случае показали, что при длительности импульса с линейно убывающим задним фронтом $\tau = 20 \cdot 10^{-3}$ с максимальная скорость нагрева составляет 16300 °С/с, а скорость охлаждения – 11190 °С/с. Время пребывания исходного металла при температуре, соответствующей температуре отпуска, составляет $22,6 \cdot 10^{-3}$ с.

На основании этого был сделан вывод о том, что для нанесения покрытий присадочным материалом в виде проволоки на поверхность основы из легированной высокопрочной стали без снижения микротвердости исходного металла на участке рекристаллизации время пребывания его при температуре, соответствующей температуре отпуска, должно быть меньше $22,6 \cdot 10^{-3}$ с. Для выполнения данного условия длительность импульса лазерного излучения не должна превышать $20 \cdot 10^{-3}$ с.

Верификация результатов, полученных в ходе моделирования, проводилась при использовании метода, позволяющего определить достигаемую внутри материала температуру после окончания действия импульса лазерного излучения, основанного на регистрации границ фазовых и структурных превращений, наблюдаемых в микрошлифах. Установлено, что суммарная погрешность расчета глубины плавления и размеров ЗТВ в основе при импульсном лазерном воздействии составляет 10–15 %.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния временных и пространственно-энергетических параметров импульсного лазерного излучения и условий воздействия на физико-механические свойства и триботехнические характеристики наплавляемых конструкционных материалов.

На физико-механические свойства наплавляемых металлов существенное влияние оказывает пористость, так как она снижает прочность покрытий и может являться причиной возникновения усталостных трещин. Поэтому необходимо обеспечить условия для ее снижения, особенно для деталей, работающих при циклических нагрузках.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что изменение потока энергии лазерного излучения во времени влияет на процесс образования пор в наплавляемых металлах. Показано, что при нанесении покрытий из легированных высокопрочных сталей в аргоновой среде в условиях формирования глубины плавления, при которой обеспечивается прочное соединение, с использованием импульсов лазерного излучения треугольной и прямоугольной формы показатель пористости в наплавленном металле не превышает 5 % (для импульса треугольной формы с крутым передним и убывающим задним фронтом). При использовании импульсов другой формы показатель пористости в наплавляемых металлах превышает данную величину.

Выявлено, что поры в покрытиях – газové и локализованы в приповерхностном слое, что может быть обусловлено кипением металла в этом слое и высокой скоростью кристаллизации расплавленного металла, при которой не происходит более полного удаления газовых пузырьков из расплава.

На основании этого был сделан вывод, что для формирования покрытий с минимальным показателем пористости следует использовать импульс лазерного излучения треугольной формы с максимальной плотностью потока в

начале его развития и постепенным уменьшением его величины при завершении.

Экспериментальные исследования влияния энергии, длительности и формы импульсов лазерного излучения на формирование покрытий из алюминиевых сплавов АК-6 и АК-8 показали, что при использовании импульса излучения треугольной формы с крутым передним и убывающим задним фронтом в наплавляемых покрытиях наблюдаются радиальные и продольные микротрещины. Показатель пористости в покрытиях больше 60 %.

В ходе исследований была определена оптимальная форма импульса лазерного излучения с энергетическими и временными параметрами, при использовании которого снижается количество пор и микротрещин в покрытиях из алюминиевых сплавов. Данный импульс имеет сложную форму (рисунок 2). В его развитии выделяются три этапа, в течение которых излучение характеризуется различными значениями плотности мощности q .

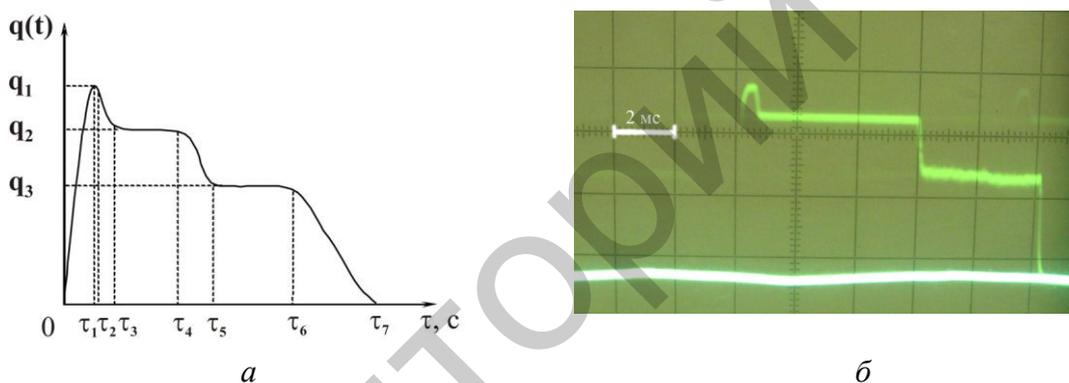


Рисунок 2 – Зависимость плотности мощности лазерного импульса от времени (а) и осциллограмма оптимальной формы импульса для наплавки алюминиевых сплавов (б)

В процессе нанесения покрытия с использованием импульса данной формы при максимальном значении q_1 (рисунок 2) происходит нагрев поверхностей присадочного материала и основы до температуры, соответствующей температуре (2050 °С) испарения оксидной плёнки. При этом снижается отражающая способность обрабатываемых поверхностей в зоне воздействия лазерного излучения и увеличивается количество поглощенной энергии. Область развития импульса плотностью мощности q_2 (рисунок 2) обеспечивает плавление основы и присадочного материала.

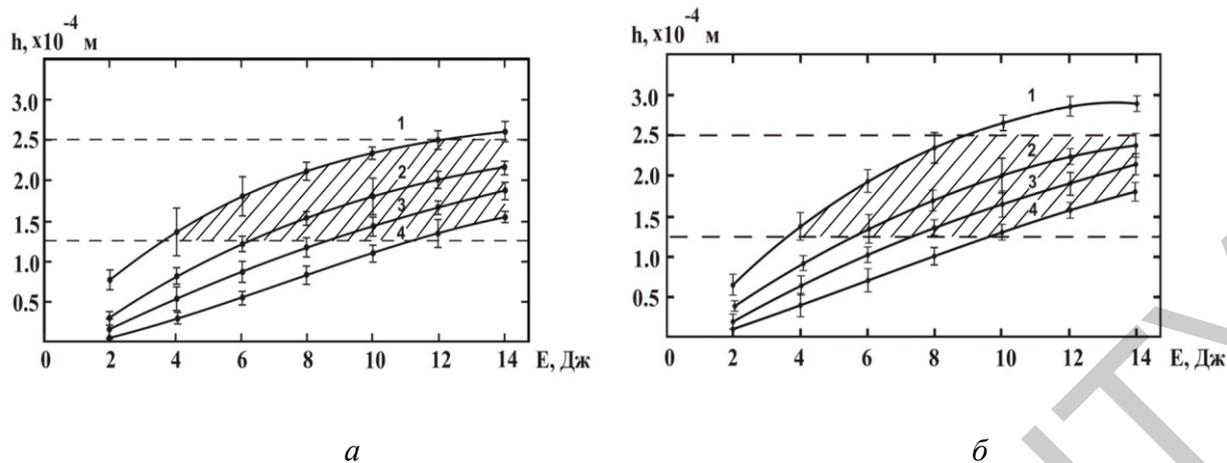
Изменение температуры в зоне воздействия до значения, меньшего температуры плавления, происходит при плотности мощности, равной q_3 (рисунок 2), производя тем самым сопутствующий подогрев для снижения скорости кристаллизации наплавленного металла.

Экспериментально установлено, что для нанесения покрытий из алюминиевых сплавов АК-6 и АК-8 без микротрещин и с показателем пористости не более 5% необходимо коаксиально с лазерным пучком в зону воздействия подавать аргон (расход 4 – 6 л/мин), обеспечивая коэффициент перекрытия пятен в пределах 0,5 – 0,7. Значения плотности мощности для каждой области развития импульса лазерного излучения должны быть следующими: для испарения оксидной пленки – $q_1 = 2,0 \cdot 10^{12}$ Вт/м², для плавления и сопутствующего подогрева соответственно: $q_2 = 2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² и $q_3 = 1,5 \cdot 10^7$ Вт/м².

В ходе экспериментальных исследований установлено, что качество и эффективность процесса наплавки высокопрочных сталей зависят от энергетических и временных параметров импульсного лазерного излучения. Диапазон изменения данных параметров при нанесении покрытий ограничен с одной стороны наличием выплеска металла в зоне расплава и значением коэффициента формы валика наплавки, с другой – глубиной плавления, достаточной для обеспечения прочности соединения основы с наплавляемым металлом. Установлено, что при нанесении покрытий присадочным материалом в виде проволоки диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м из высокопрочных сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А в среде аргона максимальная глубина плавления не должна быть больше $\frac{1}{2}$ диаметра присадочного материала ($0,25 \cdot 10^{-3}$ м). Превышение данной величины обуславливает снижение коэффициента формы валика наплавки до значений, меньших 0,4, и выплеск жидкого металла из зоны воздействия лазерного излучения. Минимальное значение глубины плавления соответствует $\frac{1}{2}$ радиуса присадочного материала. При глубине плавления, меньшей половины радиуса, в покрытиях формируются участки несплавления между основой и покрытием, сосредоточенные по краям валика наплавляемого металла.

Данные условия позволили установить предельно допустимые энергетические и временные параметры лазерного излучения (заштрихованные области на рисунке 3), обеспечивающие качество и эффективность процесса наплавки присадочным материалом в виде проволоки диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м за счет снижения количества дефектов в покрытиях и увеличения коэффициента формы валика наплавки для сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А.

Формирование рельефа покрытий при лазерном оплавлении определяет движение жидкой фазы. При использовании лазерного излучения с гауссовым или многомодовым распределением энергии по сечению пучка в расплаве возникает сила, направленная от центра ванны расплава к её краям, под действием которой формируется профиль поверхности с прогибом в центре.



a – сталь 30ХГСА; *б* – сталь 30ХГСН2А

Рисунок 3 – Зависимость глубины плавления основы от энергии лазерного излучения: 1, 2, 3, 4 – при длительности импульса $4 \cdot 10^{-3}$, $6 \cdot 10^{-3}$, $8 \cdot 10^{-3}$, $10 \cdot 10^{-3}$ с соответственно

Одним из способов, который может быть использован для повышения эффективности процесса импульсной лазерной наплавки вследствие увеличения коэффициента формы валика наплавки, является применение лазерного излучения с распределением энергии по сечению пучка в виде кольца. Наплавка таким пучком приводит к уменьшению выброса металла из зоны плавления и к смещению большей части расплавленного металла к центру ванны расплава. Экспериментально установлено, что при плотности мощности излучения, обеспечивающей оптимальную глубину плавления основы из высокопрочной стали, значения коэффициента формы валика наплавки, выполненной с применением кольцевого пучка – 0,91, а при использовании пучка кругового сечения – 0,77.

В ходе исследований влияния параметров лазерного излучения и условий нанесения на микротвердость покрытий из высокопрочных сталей (30ХГСА и 30ХГСН2А) установлено, что при длительности импульса излучения $6 \cdot 10^{-3}$ с в условиях однослойного нанесения происходит закалка наплавленного металла, у которого микротвердость в 1,5–2 раза больше микротвердости основы. Характерной особенностью структуры покрытия является образование крупноигльчатого мартенсита и остаточного аустенита. Микротвердость покрытия ниже, чем микротвердость исходного металла в ЗТВ, структура которого состоит из мелкоигльчатого мартенсита.

При нанесении однослойных покрытий из сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А значение микротвердости в наплавленном металле и ЗТВ при заданной плотности мощности лазерного излучения ($6,31 \cdot 10^9$ Вт/м²) может быть снижено за счет увеличения длительности импульса лазерного излучения.

Экспериментально установлено, что микротвердость покрытия и основы в ЗТВ при однослойном нанесении уменьшается (для стали 30ХГСА до – 5200 МПа при микротвердости основы 3800 МПа, а для стали 30ХГСН2А – до 6200 МПа с микротвердостью основы 5100 МПа) при длительности импульса излучения $15 \cdot 10^{-3}$ с.

Для получения микротвердости покрытия, равноценной микротвердости основы, наплавка металлов производилась послойно с использованием метода отжигающего валика. В ходе нанесения послойных покрытий присадочным материалом в виде проволоки диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м установлено, что нанесение последующего валика на поверхность нижнего предыдущего слоя (рисунок 4) приводит к снижению микротвердости в этом слое до значений ± 10 % от микротвердости основы. Верхний валик (третий слой) характеризуется более высоким значением микротвердости по отношению к микротвердости основы.

Исследования показали, что для обеспечения высокой степени однородности структуры наплавленного металла и основы необходимо, чтобы отдельно наплаваемые слои были одинакового сечения 200 ± 20 мкм. При этом зона, характеризующаяся температурой отпуска, которая формируется наплаваемым слоем, должна перекрывать зону закалки предыдущего слоя и проводить её отпуск. При спектральном анализе наплавленного металла в точках (1–10), указанных на рисунке 4, установлено, что его химический состав соответствует элементному составу основы (ГОСТ 4543–71) и техническим требованиям для исследуемых сталей.

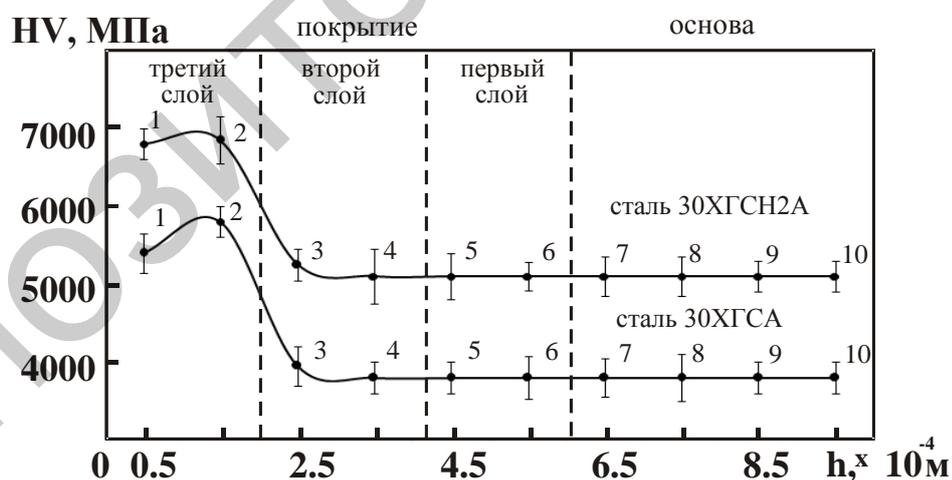


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по глубине многослойного покрытия и основы в образцах из сталей 30ХГСН2А и 30ХГСА

В ходе трибологических испытаний установлено, что на образцах с однослойным покрытием износостойкость в 1,5–2,2 раза выше износостойкости основы. При нанесении на поверхность образцов трехслойного покрытия с

последующим механическим снятием верхнего третьего слоя интенсивность изнашивания увеличилась, но не превысила значения износостойкости основы.

Сопоставляя данные измерений микротвердости и трибологических испытаний, был сделан вывод о том, что для формирования покрытий из легированных высокопрочных сталей с физико-механическими свойствами, близкими к свойствам основы, необходимо проводить послойное нанесение покрытий методом отжигающего валика.

В пятой главе представлены технология и оборудование для импульсной лазерной наплавки на поверхности деталей авиационной техники, изготовленных из легированных высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов.

Технология включает следующие основные этапы: операции входного контроля (дефектация, определение зон и размеров повреждения деталей); предварительная подготовка поверхностей деталей и присадочного материала к наплавке; подготовка лазерной установки; монтаж детали на установку; проведение наплавки; демонтаж детали; контроль качества наплавленного слоя; механической обработки; контроль качества наплавки и детали после механической обработки.

Технология импульсной лазерной наплавки внедрена на ОАО «558-й Авиационный ремонтный завод» (г. Барановичи). Для реализации данной технологии созданы и внедрены в производство многофункциональная лазерная установка и производственные инструкции по восстановлению поверхностей деталей авиационной техники: № 8А-1025 от 02.04.2002 г. для восстановления деталей из стали 30ХГСА (узел поддува, стойка передней опоры, шток подкоса подъемника), № 10А-2 от 02.04.2002 г. по ремонту сваркой точечных дефектов на деталях из сталей 30ХГСН2А, 30ХГСНА, 30ХГСА и № 10А-15 от 17.01.2003 г. для восстановления деталей из сталей 30ХГСН2А и 30ХГСНА (кардан шасси, полуось стабилизатора, шток цилиндров тормозных щитков), № 9. 13С-805 от 31.01.2002 г. для восстановления деталей из АК-6 и АК-8 (волноводы и элементы фюзеляжа); технологическая инструкция № ОТП-39 по ремонту деталей и узлов авиатехники лазерной наплавкой и сваркой от 14.12.2006 г. Общая стоимость восстановленных деталей составила 170000 у.е.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В ходе моделирования процесса импульсной лазерной наплавки присадочным материалом в виде проволоки на поверхность основы из высокопрочной стали, учитывающего зависимость их теплофизических свойств от температуры, установлено, что кинетика плавления присадки и основы

зависит от плотности мощности излучения и формы воздействующих импульсов. Определено, что оптимальной формой импульса лазерного излучения является треугольная форма с крутым передним и убывающим задним фронтом, так как для плавления основы на заданную глубину при одинаковых значениях длительности импульсов для данного импульса необходимо затратить энергии меньше (на 20–30 %), чем для других исследуемых форм импульсов.

Установлено, что для нанесения покрытий на поверхность высокопрочных сталей без разупрочнения исходного металла на участке рекристаллизации в ЗТВ время пребывания его при температуре отпуска должно быть меньше $22,6 \cdot 10^{-3}$ с. Для выполнения данного условия длительность импульса лазерного излучения не должна превышать $20 \cdot 10^{-3}$ с [3, 6, 11, 20].

2. Экспериментально установлено влияние формы импульса лазерного излучения и распределения энергии по сечению пучка на показатель пористости в покрытиях из высокопрочных сталей (30ХГСА, 30ХГСН2А) и коэффициент формы валика наплавки. Определено, что для формирования покрытий с показателем пористости не более 5 % оптимальной формой импульса лазерного излучения является треугольная форма с крутым передним и убывающим задним фронтом. Для нанесения покрытий с коэффициентом формы валика наплавки 0,91 необходимо использовать лазерное излучение с распределением энергии по сечению пучка в виде кольца [1, 8 – 10, 12, 13, 22].

3. Экспериментально исследовано влияние энергетических и временных параметров лазерного излучения на глубину плавления основы из высокопрочных сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А при нанесении покрытий присадочным материалом в виде проволоки диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Установлены диапазон глубины плавления основы, который должен быть не больше $\frac{1}{2}$ диаметра присадочного материала и меньше $\frac{1}{2}$ его радиуса, а также предельно допустимые значения энергии и длительности импульсов излучения, обеспечивающие выполнение качественного и эффективного нанесения покрытий за счет снижения количества дефектов в наплавляемых металлах и увеличения коэффициента формы валика наплавки [2, 4, 10, 17, 18].

4. В результате исследований влияния параметров лазерного излучения и условий нанесения покрытий из высокопрочных сталей (30ХГСА и 30ХГСН2А) на их физико-механические свойства установлено, что при длительности импульса излучения $6 \cdot 10^{-3}$ с в условиях однослойного нанесения происходит закалка наплавленного металла, у которого микротвердость в 1,5 – 2 раза больше микротвердости основы. Определено, что микротвердость покрытия может быть снижена для стали 30ХГСА до 5200 МПа при микротвердости основы 3800 МПа, а для стали 30ХГСН2А – до 6200 МПа с микротвердостью основы 5100 МПа при длительности импульса излучения $15 \cdot 10^{-3}$ с. Установлено, что для формирования покрытий микротвердостью ± 10 % от микротвердости основы необходимо проводить послойную наплавку присадочным материалом

в виде проволоки диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, чтобы отдельно наплавляемые слои были одинакового сечения размером 200 ± 20 мкм [1, 4, 7, 14, 23, 24].

5. Экспериментально исследовано влияние формы импульса лазерного излучения, его энергетических и временных параметров на формирование наплавляемых слоев из алюминиевых сплавов (АК-6, АК-8). Установлено, что использование лазерного импульса специальной формы с изменяющейся во времени интенсивностью излучения позволяет наносить слои с пористостью не более 5%. На различных этапах развития данная форма импульса излучения характеризуется различными значениями плотности мощности: для испарения оксидной пленки с поверхностей свариваемых металлов $q_1 = 2,0 \cdot 10^{12}$ Вт/м², для плавления $q_2 = 2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м², для сопутствующего подогрева $q_3 = 1,5 \cdot 10^7$ Вт/м² [5, 7, 16, 15, 19, 21, 25].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработаны технология и производственные инструкции для восстановления поверхностей деталей авиационной техники: № 8А-1025 от 02.04.2002 г. для восстановления деталей из стали 30ХГСА, № 10А-2 от 02.04.2002 г. по ремонту сваркой точечных дефектов на деталях из сталей 30ХГСН2А, 30ХГСНА, 30ХГСА и № 10А-15 от 17.01.2003 г. для восстановления деталей из сталей 30ХГСН2А и 30ХГСНА, № 9.13С-805 от 31.01.2002г. для восстановления деталей из АК-6 и АК-8; технологическая инструкция № ОТП-39 по ремонту деталей и узлов авиатехники лазерной наплавкой и сваркой от 14.12.2006 г.

Технология, оборудование и производственные инструкции для восстановления поверхностей деталей авиационной техники внедрены на ОАО «558-й Авиационный ремонтный завод» (г. Барановичи). Общая стоимость восстановленных деталей составила 170000 у.е.

Результаты работы также внедрены в войсковой части № 63604 (г. Гомель) для восстановления деталей военной техники и на физическом факультете УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» в учебном процессе при подготовке студентов специализации «Новые материалы и технологии».

Представленные результаты могут быть использованы при восстановлении поверхностей деталей, технологической и штамповой оснастки, изготовленных из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов, применяемых в машиностроении, станкостроении, приборостроении и др. отраслях народного хозяйства.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

Статьи в научных журналах

1. Мышковец, В. Н. Исследование процесса лазерной сварки при восстановлении деталей с поверхностными дефектами / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 72– 74.
2. Лазерная установка с оптоволоконной приставкой для сварки изделий из нержавеющей стали / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, С. Н. Юркевич // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 84 – 87.
3. Yurkevich, S. N. Laser surfacing of components of 30KhGSA steel without reducing the physical-mechanical properties of the base material / S. N. Yurkevich, V. N. Myshkovec, A. V. Maksimenko // *Welding International.* – 2004. – Vol.18, № 10. – P. 829 – 830.
4. Юркевич, С. Н. Восстановление деталей из стали 30ХГСН2А наплавкой методом лазерной сварки / С. Н. Юркевич, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко // *Справочник. Инженерный журнал.* – 2004. – № 5. – С. 11 – 12.
5. Юркевич, С. Н. Лазерная сварка волноводов из алюминиевых сплавов / С. Н. Юркевич, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2004. – № 7. – С.48 – 49.
6. Моделирование тепловых процессов при импульсной лазерной наплавке металлов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 5 – 9.
7. Максименко, А. В. Особенности импульсной лазерной наплавки высокопрочных конструкционных низко и среднелегированных сталей / А. В. Максименко // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 80 – 85.
8. Максименко, А. В. Импульсная лазерная наплавка конструкционных сталей кольцевыми пучками / А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, П. С. Шаповалов // *Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого.* – 2010. – №4. – С. 63 – 68.

Материалы конференций

9. Мышковец, В. Н. Система формирования лазерного излучения в пучки кольцевого сечения / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, И. М. Каморников // *Лазерная физика и спектроскопия: материалы IV Междунар. конф. по лазерной физике и спектроскопии; под ред. В. К. Кононенко: в 2 ч.* – Гродно: ГрГУ, 1999. – Ч. 2. – С. 174 – 176.
10. Восстановление деталей с поверхностными дефектами из стали 30ХГСН2А методом лазерной сварки / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. Н. Юркевич, Г. А. Баевич // *Технологии ремонта, восстановления,*

упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: материалы V Междунар. практич. конф.-выставки., Санкт-Петербург, 8 – 10 апреля 2003 г. / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; научн. редактор: Н. А. Соснин. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 277–279.

11. Моделирование процесса лазерной наплавки стали / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы VI Междунар. конф., Минск, 28 – 30 сентября 2005 г. / редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2005. – С. 316 – 318.

12. Лазерная наплавка конструкционных сталей кольцевыми пучками / А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, А. И. Кравченко, П. С. Шаповалов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев. обл, исполн. ком., Нац. акад. Респ. Беларусь, Беларус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – Ч. 1. – С. 222 – 223.

Тезисы докладов

13. Установка для лазерного термоупрочнения с системой формирования лазерного излучения в пучки заданной геометрии / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Ю. В. Никитюк, И. М. Каморников // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. тематический сборник. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет: 1999. – С. 245 – 246.

14. Максименко, А. В. Восстановление деталей с поверхностными дефектами лазерным излучением / А. В. Максименко // Квантовая электроника: материалы Междунар. науч.-технич. конф. – Минск, 18 – 21 ноября 2002; / под ред. И. С. Манака. – Минск: БГУ, 2002. – С. 204.

15. Исследование процессов лазерной сварки алюминиевых сплавов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, А. Ф. Каморников // Квантовая электроника: материалы Междунар. науч.-технич. конф, Минск, 18 – 21 ноября 2002; под ред. И. С. Манака. – Минск: БГУ, 2002. – С. 205.

16. Лазерная сварка изделий из алюминиевых сплавов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. Н. Юркевич, В. В. Штин, Г. А. Баевич // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: материалы V Междунар. практич. конф.-выставки, Санкт-Петербург, 8 – 10 апреля 2003 г. / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; науч. ред.: Н. А. Соснин. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 280 – 281.

17. Восстановление размеров деталей из сталей средней прочности наплавкой методом лазерной сварки / С. Н. Юркевич, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, В. В. Штин, С. В. Кунашенко // Электрофизические и электрохимические методы обработки: тезисы Международной научно-практической конференции «ФХМО-2003», 14–16 октября 2003. – Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – С. 40 – 44.

18. Наплавка деталей из высокопрочных сталей методом лазерной сварки / С. Н. Юркевич, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, А. Н. Тучин, Е. Г. Прищепов, Е. В. Самостюк // Электрофизические и электрохимические методы обработки: тезисы Международной научно-практической конференции «ФХМО-2003», 14 – 16 октября 2003. – Санкт-Петербург: Политехника, 2003.– С. 45 – 49.

19. Оборудование для лазерной технологии обработки материалов / В.Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // Технологии-оборудование-качество: сб. материалов IX Междунар. симпозиума; Минск, 16 – 19 мая 2006. – Минск, 2006. – С. 89.

20. Моделирование лазерной наплавки среднелегированных высокопрочных сталей / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // Технологии-оборудование-качество: сборник материалов IX Междунар. Симпозиума; Минск, 16 – 19 мая 2006. Минск, 2006. – С. 95.

21. Оборудование и технологии для лазерной обработки материалов / В.Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г.А. Баевич, В.В. Грищенко // Технологии-оборудование-качество: сборник материалов X Междунар. симпозиума. – Минск, 2007. – С. 87 – 88.

Патенты

22. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком; пат. № 2068328 РФ, МПК 6 В23К 26/00 / А. Т. Малащенко, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. Л. Покаташкин; заявитель Гом. гос. ун-т. им. Ф. Скорины. – № 4884890; заявл. 26.11.90; опубл. 27.11.96// Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели». – 1996. – № 30.

23. Установка для лазерной обработки; пат. № 65 Респ. Беларусь, МПК 6 В23К 26/00 / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев; заявитель Гом. гос. ун-т. им. Ф. Скорины. № u 19990024; заявл. 16.03.99; опубл. 1.09.99// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1999. – № 4. – С. 194.

24. Оптическая головка для лазерной обработки; пат. № 1015 Респ. Беларусь, МПК 7 В23К 26/00 / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, В. И. Рыбин, А. Н. Тучин, С. Н. Юркевич, С. В. Шалупаев; заявители Гом. гос. ун-т. им. Ф. Скорины, РУПП «558 Авиационный ремонтный завод» –

№ и 20020389; заявл. 16.12.2002; опубл. 02.05.2003// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 3. – С. 251.

Оптическая головка для лазерной обработки; пат. №34427 РФ МПК 7 В23К 26/00 / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, В. И. Рыбин, А. Н. Тучин, С. Н. Юркевич, С. В. Шалупаев; заявители Гом. гос. ун-т. им. Ф. Скорины, РУПП «558 Авиационный ремонтный завод» – № 2003117187/20; заявл. 11.06.2003; опубл. 10.12.2003// Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели». – 2003. – № 34.

25. Способ лазерной сварки металлов; пат. № 7130 Респ. Беларусь, МПК 7 В 23К 26/00 / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, А. Н. Тучин, С. Н. Юркевич; заявители Гом. гос. ун-т. им. Ф. Скорины, РУПП «558 Авиационный ремонтный завод» – № и 20020004; заявл. 01.04.2002; опубл. 30.09.2003// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 2. – С. 205.

Способ лазерной сварки металлов; пат. № 2269401 РФ МПК В23К 26/20/ В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, А. Н. Тучин, С. Н. Юркевич; заявители Гом. гос. ун-т. им. Ф. Скорины, РУПП «558 Авиационный ремонтный завод» – № 2003104668/02; заявл. 17.02.2003; опубл. 10.02.2006// Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» – 2006. – № 4.

РЭЗЮМЭ

Максіменка Аляксандр Васільевіч

Тэхналогія аднаўлення паверхні дэталеў авіяцыйнай тэхнікі імпульснай лазернай наплаўкай

Ключавыя словы: лазерная імпульсная наплаўка, YAG – лазер, тэмпературнае поле, кампактны прысадны матэрыял, глыбіня плаўлення, зона тэрмічнага ўплыву, порыстасць, мікрацвёрдасць.

Мэта работы: распрацаваць тэхналогію аднаўлення паверхні дэталеў авіяцыйнай тэхнікі мэтадам імпульснай лазернай наплаўкі.

Метады даследавання: асноўныя рэзультаты атрыманы пераважна эксперыментальнымі метадамі і сагласаваны з тэарэтычнымі разлікамі.

Атрыманыя вынікі: устаноўлена, што кінэтыка плаўлення асновы і прысаднага матэрыялу з высокамоцнай сталі пры іх нагрэве ў працэсе наплаўкі залежыць ад шчыльнасці магутнасці і формы імпульсаў лазернага выпраменьвання. Вызначаны тэмпературныя рэжымы наплаўкі кампактных прысадных матэрыялаў на паверхні гэтых сталяў. Паказана залежнасць ад часавых і прасторава-энергетычных параметраў лазернага выпраменьвання на дэфектыўнасць у наплаўленых канструкцыйных высокамоцных сталях і алюмініевых сплавах. Выяўлена, што размерныя параметры наплаўкі вызначаюцца энергетычнымі і часавымі параметрамі выпраменьвання. Устаноўлен гранічна дапушчальны дыяпазон працягласці і энэргіі імпульсаў лазернага выпраменьвання для рэалізацыі высокаэфектыўнай і якаснай наплаўкі высокамоцных сталяў. Устаноўлены прасторава-энергетычныя параметры лазернага выпраменьвання, а таксама ўмовы правядзення апрацоўкі для фарміравання наплаўкі высокамоцных сталяў і алюмініевых сплаваў з фізіка-механічнымі ўласцівасцямі, раўнацэннымі ўласцівасцям асновы.

Распрацаваны тэхналогія і вытворчыя рэкамендацыі па аднаўленню паверхні дэталеў авіяцыйнай тэхнікі.

Рэзультаты работы ўкаранёны на ААГ «558-мы Авіацыйны рамонтны завод» (г. Баранавічы). Агульная каштоўнасць аднаўлённых дэталеў складае 170000 у.а. Вынікі работы выкарыстоўваюцца ў вайскавай часці № 63604 і ў вучэбным працэсе УА «Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Францыска Скарыны» пры падрыхтоўцы студэнтаў па спецыялізацыі «Новыя матэрыялы і тэхналогіі».

РЕЗЮМЕ

Максименко Александр Васильевич

Технология восстановления поверхностей деталей авиационной техники импульсной лазерной наплавкой

Ключевые слова: лазерная импульсная наплавка, YAG-лазер, температурное поле, компактный присадочный материал, глубина плавления, зона термического влияния, пористость, микротвердость.

Цель работы: разработать технологию восстановления поверхности деталей авиационной техники методом импульсной лазерной наплавки.

Методы исследования: основные результаты получены, преимущественно, экспериментальными методами и согласованы с теоретическими расчетами.

Полученные результаты: установлено, что кинетика плавления основы и присадочного материала из высокопрочной стали при их нагреве в процессе наплавки зависит от плотности мощности и формы импульсов лазерного излучения. Определены температурные режимы наплавки компактных присадочных материалов на поверхности этих сталей. Показано влияние временных и пространственно-энергетических параметров лазерного излучения на дефектность в наплавляемых конструкционных высокопрочных сталях и алюминиевых сплавах. Выявлено, что размерные параметры наплавки определяются энергетическими и временными параметрами излучения. Установлен предельно допустимый диапазон длительности и энергии импульсов лазерного излучения для реализации высокоэффективной и качественной наплавки высокопрочных сталей. Определены пространственно-энергетические и временные параметры лазерного излучения, а также условия проведения обработки для формирования наплавки высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы.

Разработаны технология и производственные инструкции по восстановлению поверхностей деталей авиационной техники.

Результаты работы внедрены на ОАО «558-й Авиационный ремонтный завод» (г. Барановичи). Общая стоимость восстановленных деталей составила 170000 у. е. Результаты диссертации используются в войсковой части № 63604 (г. Гомель) и в учебном процессе физического факультета УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» при подготовке студентов специализации «Новые материалы и технологии».

SUMMARY

Maksimienka Aliaksandr Vasilevich

Technology of restoration of details surfaces of aviation technics pulsing laser weld deposit

Keywords: pulsing laser weld deposit, YAG-laser, temperature distribution, a compact addition agent, depth of fusion, zone of thermal influence, porosity, microhardness.

The work purpose: to develop technology of restoration of details surfaces of aviation technics by a method of pulsing laser weld deposit.

Methods of research: the basic results are received, mainly, by the experimental methods and are compounded with theoretical calculations.

The received results: it is establish that the kinetics of fusion of a bottom and a addition agent from a high-strength steel at their heating in process of weld deposit depends on a power density and the shape of impulses of laser beams. Temperature regimes of weld deposit of compact addition agent on a surface of these steels are determined. Influence of temporary and spatially-power parameters of laser beams on unsoundness in weld deposit constructional high-strength steels and aluminum alloys is shown. It is revealed that dimensional parameters of a weld deposit are defined by power and time parameters of laser beams. The maximum permissible range of duration and energy of laser beams for implementation of a highly effective and qualitative weld deposit of high-tensile steels is fixed. Is spatially-power and temporary parameters of laser radiation, and also requirement of conducting of machining for formation of overlaying welding of high-strength steels and aluminum alloys with physic and mechanical properties, equivalent to properties of a bottom are spotted.

The production engineering and industrial instructions on restoration of details surfaces of aviation technics are developed.

Results of work are used on JSC «558 Aircraft Repair Plant» (Baranovichi). The total cost of the recovered details has made 170000 \$. Results of the dissertation are used in a military part № 63604 (Gomel) and in educational process on physical faculty of establishment of education «Gomel state university named after F. Skorina» at tutoring of students of specialization «New materials and technologies».

Научное издание

МАКСИМЕНКО Александр Васильевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Подписано в печать 13.09.2011.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,45. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 60. Заказ 917.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65, 220013, Минск.