

*На правах рукописи*

**Хомич Юрий Владиславович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
МЕТАЛЛОВ И КЕРАМИК НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ  
ЛАЗЕРНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ  
ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ**

Специальность 2.6.1 (05.16.01) –  
Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук (ИЭЭ РАН).

**Научный руководитель:**

**Ямщиков Владимир Александрович**

доктор технических наук, член-корреспондент РАН

**Официальные оппоненты:**

**Люшинский Анатолий Владимирович**

доктор технических наук, заместитель главного технолога – начальник научно-технической лаборатории сварочных технологий, АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»

**Уткин Иван Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры сварки и мониторинга нефтегазовых сооружений Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)»

Защита диссертации состоится «28» октября 2021 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.1.078.01 (Д 002.060.01), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук



Костина М. В.

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Диффузионная сварка широко используется при изготовлении прецизионных узлов для соединения металлов, сплавов и керамических изделий в таких высокотехнологических отраслях как авиационная и аэрокосмическая промышленность, атомная энергетика и др. Ее преимуществами являются высокое качество сварного соединения, возможность сварки разнородных материалов и деталей разных форм в широком диапазоне размеров.

Технологическое развитие формирует потребности в освоении соединений разнообразных материалов при растущих требованиях к улучшению качества сварного шва и сокращению энергетических и временных затрат при диффузионной сварке. Решение этой проблемы связано как с развитием новых методов предварительной подготовки свариваемых материалов, так и с исследованием таких важных факторов, как форма и шероховатость соединяемых поверхностей, эффект низкотемпературной сверхпластичности и использование промежуточного слоя, которые оказывают существенное влияние на процесс диффузионной сварки.

Повышение прочности соединения при диффузионной сварке возможно за счёт формирования на свариваемых поверхностях упорядоченных, микронных и субмикронных структур с заданными параметрами геометрии и направленно изменяющих физико-химические свойства поверхности. Ранее для изменения структуры поверхности применяли такие технологические приёмы, как нанесение покрытий, использование прослоек из металлов или порошкообразных материалов, а также создание на свариваемых поверхностях периодического рельефа посредством механической или лазерной обработки. Термическая обработка поверхности металла лазерным излучением позволяет получить такие преимущества, как увеличение площади контакта, закаливание и повышение износостойкости материала, снижение температуры и давления

сварки, очистка исходной поверхности от примесей и загрязнений, увеличение прочности и устойчивости шва к окислению.

Несмотря на перспективность использования лазерного метода модификации поверхности для процесса диффузионной сварки, вопрос о выборе наиболее эффективного лазера был недостаточно исследован. Особый интерес представляет возможность применения наносекундных лазеров, генерирующих ультрафиолетовое (УФ) излучение, которое эффективно поглощается большинством материалов.

Таким образом, исследование влияния предварительной термической обработки контактных поверхностей наносекундным лазерным УФ излучением на свойства их соединения при диффузионной сварке является актуальным.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка научных основ метода лазерной термической обработки поверхности металлов и сплавов одиночными импульсами и сканирующим пучком лазерного ультрафиолетового излучения наносекундной длительности с целью улучшения механических свойств соединений сталей и сплавов, полученных диффузионной сваркой, а также обоснование целесообразности использования лазеров для перфорации металлических прокладок и термообработки поверхности керамических заготовок при диффузионной сварке керамических материалов с металлами.

### **Задачи работы**

– выбрать лазерный источник с определенными на основе теоретического анализа параметрами, и создать экспериментальную установку для проведения исследований по термической обработке свариваемых поверхностей ряда сталей, сплавов и керамик лазерными наносекундными импульсами;

– провести эксперименты по лазерной модификации поверхности в режимах неподвижного пятна облучения и сканирования лазерного пучка для выбора режима термообработки сталей и сплавов перед диффузионной сваркой;

– провести исследования влияния термической обработки свариваемых поверхностей ряда технологических сталей и сплавов на качество шва и механические свойства соединения после их диффузионной сварки и на основные параметры сварки;

– исследовать влияние термической обработки поверхности керамических образцов из нитрида кремния лазерными наносекундными импульсами и использования прослойки из перфорированной лазером медной фольги на механические свойства их соединения после диффузионной сварки.

### **Научная новизна**

Впервые исследовано влияние режимов термической обработки наносекундными лазерными импульсами с длиной волны 355 нм на механические свойства соединений при диффузионной сварке. Показано, что предварительная термическая обработка поверхности сканирующим лучом наносекундного лазера позволяет существенно повысить механическую прочность диффузионно-сварного соединения металлических и керамических материалов.

Обоснована эффективность использования наносекундных УФ лазеров для получения микроотверстий при перфорации металлических прокладок и поверхности заготовок, в процессе диффузионной сварки керамических материалов с использованием прокладок, что приводит к повышению механических свойств сварных соединений.

Впервые при облучении поверхности Cu-Cr бронзы сканирующим лучом наносекундного лазера с длиной волны 355 нм в диапазоне плотностей энергии от 0,6 до 1,2 Дж/см<sup>2</sup> обнаружены квазиупорядоченные шарообразные структуры диаметром около 500 нм, расположенные на конических ножках высотой порядка 1 мкм и выявлена корреляция их пространственной плотности от скорости сканирования.

### **Научная и практическая значимость**

Предложенный способ предварительной термической обработки

поверхности образцов наносекундными импульсами лазерного УФ излучения приводит к улучшению механических свойств соединений металлических сплавов, полученных диффузионной сваркой в условиях горячего изостатического прессования (ГИП), а также позволил снизить оптимальную температуру процесса на 160 °С с сохранением механических характеристик сварного соединения и прочих условий сварки.

Использование наносекундного УФ лазера для сверления микроотверстий в металлических прокладках улучшает эффективность их применения при осуществлении диффузионной сварки керамических материалов и позволяет увеличить пределы прочности и относительного удлинения твердофазного соединения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – медь –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

На основании результатов работы поданы и получены положительные решения на три заявки на изобретения:

1. Ёлкин В. Н., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Филин С. А., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А. Заявка на изобретение № 2200132971/05(060110) от 07.10.2020 г. «Способ получения наноструктурированной поверхности металлической заготовки лазерной обработкой».
2. Вашуков Ю. А., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филин С. А., Хомич Ю. В. и Ямщиков В. А. Заявка на изобретение № 2200132971/05(060110) от 07.10.2020 г. «Способ диффузионной сварки керамики с керамикой или с металлами».
3. Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филин С. А., Хомич Ю. В. и Ямщиков В. А. Заявка на изобретение № 2020132973/05(060114) от 07.10.2020 г. «Способ сварки деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе с использованием лазерного излучения».

**Защищаемые положения:**

1. Результаты разработки и исследования метода лазерной обработки поверхности ряда коррозионностойких сталей и сплавов перед проведением

диффузионной сварки, включая выбор лазерного источника и режимов лазерной термической обработки.

2. Режим предварительной термической обработки поверхности образцов, изготовленных из сплава на никелевой основе ЧС 57, сканирующим пучком наносекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 355 нм приводящий к:

- улучшению механических свойств (увеличению предела прочности и деформации растяжения более чем на 10 % и 20 %, соответственно, по сравнению с необработанными образцами) соединения, полученного диффузионной сваркой в условиях горячего изостатического прессования;

- снижению оптимальной температуры сварочного процесса на 160 °С при сохранении механических характеристик диффузионно-сварного соединения.

3. Результаты исследования предварительной термической обработки поверхности Cu-Cr бронзы сканирующим пучком наносекундного лазера с длиной волны 355 нм при плотностях энергии излучения  $\approx 1$  Дж/см<sup>2</sup> и скорости сканирования луча 0,5÷1 мм/с, выявившие образование не наблюдавшихся ранее квазиупорядоченных структур с характерной шарообразной формой диаметром около 500 нм, расположенных на ножках высотой  $\approx 1$  мкм.

4. Метод перфорации микроотверстий в металлических прокладках и термической обработки поверхности керамических заготовок наносекундным УФ Nd:YаG лазером, позволяющий повысить прочность диффузионно-сварных соединений из керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с применением перфорированной лазером медной прокладки в 1,45 раза при одновременном увеличении значений относительного удлинения до 50 % по сравнению с применением сплошной прокладки и необработанных керамических образцов.

#### **Реализация результатов работы**

Результаты, полученные в диссертационной работе, были использованы в ФГБУН Институте электрофизики и электроэнергетики РАН, АО «Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники

имени Н.А. Доллежала», ФГАОУ ВО «Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева», а также в АО «Российские космические системы». Созданные экспериментальные установки и разработанные методики использованы для совершенствования технологий лазерной обработки керамических изделий и металлических заготовок под диффузионную сварку.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в постановке конкретных задач исследований, создании экспериментальной установки, разработке методики экспериментов при реализации метода термической обработки поверхности образцов, в подготовке и проведении экспериментов, измерении характеристик облученных образцов, а также в выборе режимов термообработки материалов для их дальнейшей диффузионной сварки и механических испытаний. Автор принимал непосредственное участие в обработке, научном анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных.

### **Апробация работы и научные публикации**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах ФГБУН Института электрофизики и электроэнергетики РАН, АО «Российские космические системы», АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала», а также докладывались на следующих всероссийских и международных симпозиумах и конференциях: 5<sup>th</sup> European Conference on Crystal Growth ECCG5 (Bologna, Italy, 9-11 September, 2015); 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies (Beijing, China, 28 November – 01 December, 2017); International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications - PHENMA 2019 (Hanoi, Vietnam, November 7-10, 2019); Научно-практическая конференция учёных России и Хорватии (Москва, Россия, 4-5 октября 2019);



Международная конференция Физика. СПб (Санкт-Петербург, Россия, 19–23 октября 2020).

По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 10 статей в журналах из перечня ВАК, 7 статей в журналах, входящих в базы данных WoS или Scopus, 6 публикаций в трудах конференций; а также получены положительные решения на 3 заявки на патенты.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 139 страниц машинописного текста, 11 таблиц, 65 рисунков по тексту и список литературы, который состоит из 136 ссылок на публикации отечественных и зарубежных авторов.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, дана оценка ее научной новизны, отмечена научная и практическая значимость полученных в работе результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание работы по главам.

**В первой главе** представлены основные этапы и рассмотрены особенности процесса диффузионной сварки. Проведено сравнение различных методов подготовки свариваемых поверхностей, таких как механическая обработка, нанесение поверхностного наноструктурированного слоя, отжиг, использование промежуточного металлического слоя. Рассмотрено влияние таких факторов, как температура, давление, время сварки и эффекта низкотемпературной сверхпластичности.

Из проведенного обзора литературы следует, что существенное влияние на качество диффузионного соединения оказывают рельеф и микроструктура свариваемых поверхностей, которые в значительной степени влияют на кинетику развития первой стадии процесса сварки – формирование физического контакта. Однако в ряде работ вопрос о влиянии шероховатости поверхности на

процесс диффузионной сварки приводит к неоднозначным выводам и остается предметом дальнейших исследований.

Формирование на контактной поверхности образцов слоя с мелкозеренной структурой, обеспечивающего высокую плотность очагов схватывания, приводит к повышению качества сварного соединения. Кроме того, путем механического наноструктурирования материалов удастся значительно снизить температурную границу появления эффекта сверхпластичности известных материалов и, тем самым, уменьшить температуру процесса диффузионной сварки.

Обзор научной литературы выявил наличие весьма ограниченного ряда работ по лазерной термообработке контактных поверхностей перед диффузионной сваркой. В них применялись лазеры, генерирующие излучение в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. Такое излучение сильно отражается многими металлами, поэтому представляет интерес оценить возможность применения лазеров, излучение которых эффективно поглощается большинством материалов. Также не было исследовано влияние параметров и режимов лазерной термической обработки на характер модификации поверхности и свойства соединения при диффузионной сварке.

Обзор методов лазерной модификации поверхности показал, что наиболее простым и доступным является метод прямого лазерного наноструктурирования с использованием лазеров, генерирующих излучение в наносекундном диапазоне длительностей. Тем не менее, вопрос о выборе конкретного лазерного источника с определенным набором параметров, достаточно надежного и эффективного для создания экспериментальной установки и проведения исследований оставался открытым и требовал дальнейшего изучения.

**Во второй главе** диссертации приведена теоретическая оценка процессов лазерной термообработки материалов с целью модификации поверхности для последующей диффузионной сварки, обоснован выбор лазерного источника и его параметров, представлены описание экспериментальной установки и методики исследования.

Технологическое применение лазеров основывается на тепловом воздействии света на материал, в результате чего при достижении определенных значений температур на поверхности и в объеме облучаемого материала могут развиваться различные физические процессы. Используя уравнение теплопроводности и соответствующие граничные условия для импульсных лазеров, в работе была получена зависимость для пороговой (критической) плотности мощности  $q_{th}$  для нагревания поверхности до определенной температуры  $T$ :

$$q_{th} = \frac{(T - T_{in})\lambda\sqrt{\pi}}{2(1 - R)\sqrt{\alpha\tau}}, \quad (1)$$

где  $T_{in}$  – начальная температура материала,  $\alpha$  – температуропроводность материала,  $\lambda$  – теплопроводность материала,  $R$  – коэффициент отражения. С её помощью рассчитаны пороговые плотности мощности при плавлении  $q_m$  и испарении  $q_v$  для исследуемых в работе материалов (никелевые и медные сплавы, нержавеющие стали, керамики).

Также для данных материалов с помощью теоретической модели образования наноструктур при оплавлении поверхности лазерным импульсом были оценены характерные параметры поверхностных структур (толщина оплавленного слоя, время кристаллизации, размер центра кристаллической фазы). Показано, что использование наносекундного Nd:YAG лазера позволяет работать при длительности импульса 10-20 нс в рассматриваемом диапазоне плотностей энергии (до 10 Дж/см<sup>2</sup>), где возможно получение поверхностных наноструктур размером до 100 нм.

В рамках теоретической модели нагрева боковых стенок скважины лазерной плазмой при многоимпульсном сверлении высокоаспектных микроотверстий рассмотрены безразмерные критерии для прямоугольного и гауссова пучков с учетом того, что не будет плавления боковых стенок плазменным нагревом, и не будет искажен цилиндрический профиль обрабатываемого отверстия.

Учитывая критерий для гауссова пучка, который характерен для наносекундного Nd:YAG лазера, в работе предлагается использовать несколько параметров для улучшения качества сверления отверстий в медной фольге. Во-первых, минимизировать диаметр отверстия (приблизительно 20 мкм). Во-вторых, использовать медную фольгу толщиной 100 мкм, что меньше эффективной длины плазменного факела ( $L^* = 140$  мкм).

Из приведенных в работе оценок следует, что для термической обработки поверхности различных материалов перед сваркой подходят импульсно-периодические наносекундные лазеры, генерирующие ВУФ и УФ излучение, в частности, Nd:YAG лазер, излучающий на 3-й гармонике на длине волны 355 нм, который и был использован в составе экспериментальной установки, разработанной для проведения исследований (рис. 1).

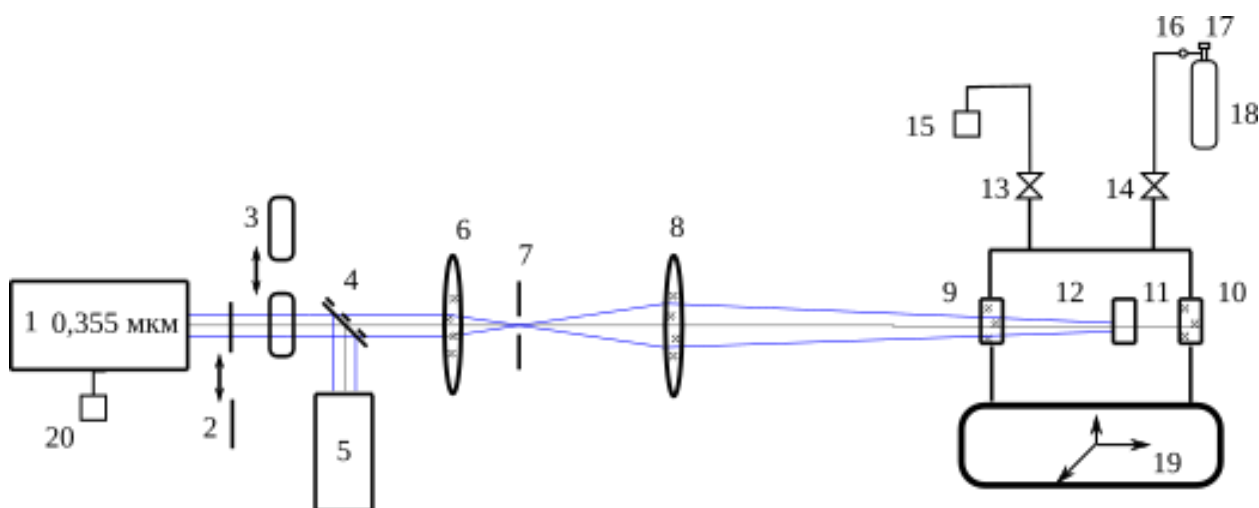


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – Nd:YAG лазер, 2 – электромеханический затвор, 3 – измеритель энергии, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – приемник излучения, 6 – конденсор, 7 – маска, 8 – линза, 9, 10 – окна газовой камеры, 11 – обрабатываемый образец, 12 – газовая камера, 13, 14 – газовые клапаны, 15 – насос, 16 – манометр, 17 – вентиль, 18 – газовый баллон, 19 – трехкоординатный предметный столик, 20 – насос

Разработанная методика эксперимента позволила с высоким разрешением проводить комплексные исследования процессов модификации поверхности заготовок из металлов и керамик путем их термической обработки лазерным пучком в достаточно широком диапазоне параметров излучения и скорости сканирования по поверхности.

**В третьей главе** работы представлены результаты исследований процессов термической обработки поверхностей жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЧС 57 (ХН55МВЦ), сталей марок 09Х17Н, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т и Cu-Cr бронзы в режимах неподвижного и сканирующего пятна наносекундными лазерными импульсами.

При формировании микронных, субмикронных и наноструктур на поверхности технологических материалов использовался метод прямого лазерного наноструктурирования с применением наносекундного твердотельного Nd:YAG лазера с длиной волны 355 нм. Показано, что возникновение структур возможно при энергиях лазерного излучения 0,5-5 Дж/см<sup>2</sup>, при количестве импульсов равном от 100 до 500 в зависимости от материала. Более высокие плотности энергии и количество импульсов приводят к значительному оплавлению в области пятна облучения и формированию глубокого кратера с относительно высоким бруствером из расплавленного материала вокруг пятна.

При обработке жаропрочного сплава на никелевой основе ЧС57 при плотности энергии около 0,7 Дж/см<sup>2</sup> наблюдались конусообразные участки, развивающиеся при 500 импульсах воздействующего излучения (рис. 2). Наличие хорошо развитой поверхности в виде лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур в периферийной зоне пятна облучения говорит в пользу проведения экспериментов по сканированию лазерным пучком по поверхности для предотвращения образования кратеров и формирования микро- и наноструктур по всей площади материала.

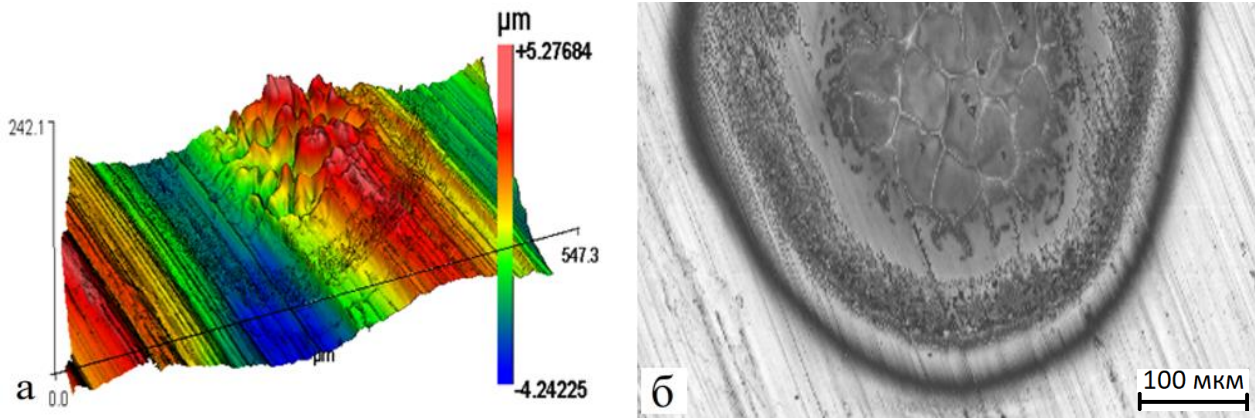


Рисунок 2 – Данные профилометрии поверхности ЧС57 после лазерной термообработки; а) трехмерный профиль поверхности; б) фотография поверхности

При допороговых значениях плотности энергии в импульсе  $0,25 - 1 \text{ Дж/см}^2$  на поверхности полированного образца кратерообразование не наблюдалось, однако следы лазерного воздействия тем не менее присутствовали. На рис. 3 приведены результаты воздействия 30 импульсами при плотности энергии  $0,55 \text{ Дж/см}^2$  на поверхность сплава. Металл в зоне воздействия слегка вспучился, возникло необратимое поднятие материала. Визуализировались границы зерен. В некоторых зернах появились следы кристаллографического скольжения.

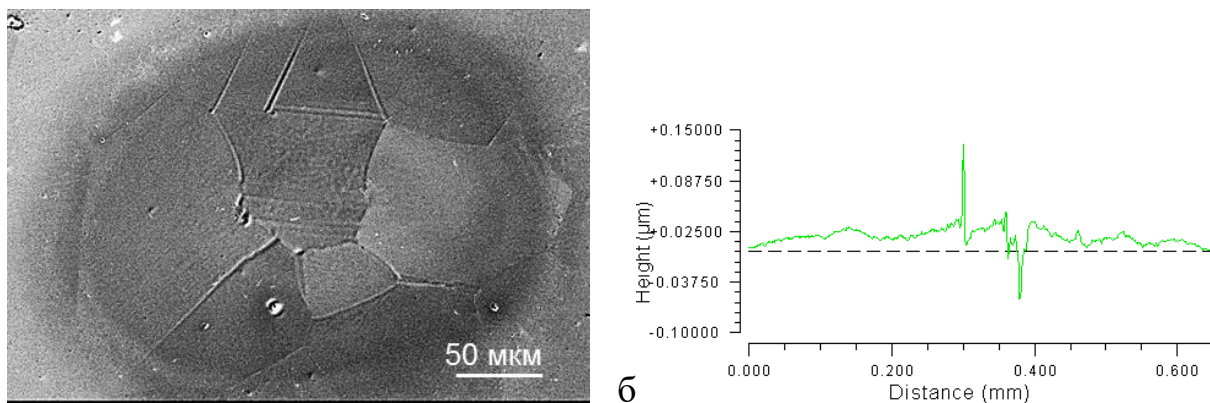


Рисунок 3 – Поверхность сплава ЧС57 после лазерной термообработки: а) СЭМ микрофотография пятна; б) профиль пятна

В работе впервые экспериментально определены основные режимы модификации поверхности Cu-Cr бронзы, приводящие к фазовым и структурным превращениям при ее облучении сканирующим пучком наносекундного лазера с

длиной волны 355 нм в различных диапазонах плотностей энергии излучения и разных скоростях сканирования. Обнаружены не наблюдавшиеся ранее квазиупорядоченные шарообразные структуры характерной формы диаметром около 500 нм, расположенные на ножках высотой порядка 1 мкм, которые возникают при плотностях энергии излучения около 1 Дж/см<sup>2</sup>. При скорости сканирования луча 1 мм/с плотность распределения по поверхности составляет около 20 структур на 100 мкм<sup>2</sup>, а при скорости сканирования до 0,5 мм/с их количество на единицу поверхности увеличивается почти в два раза (рис. 4).

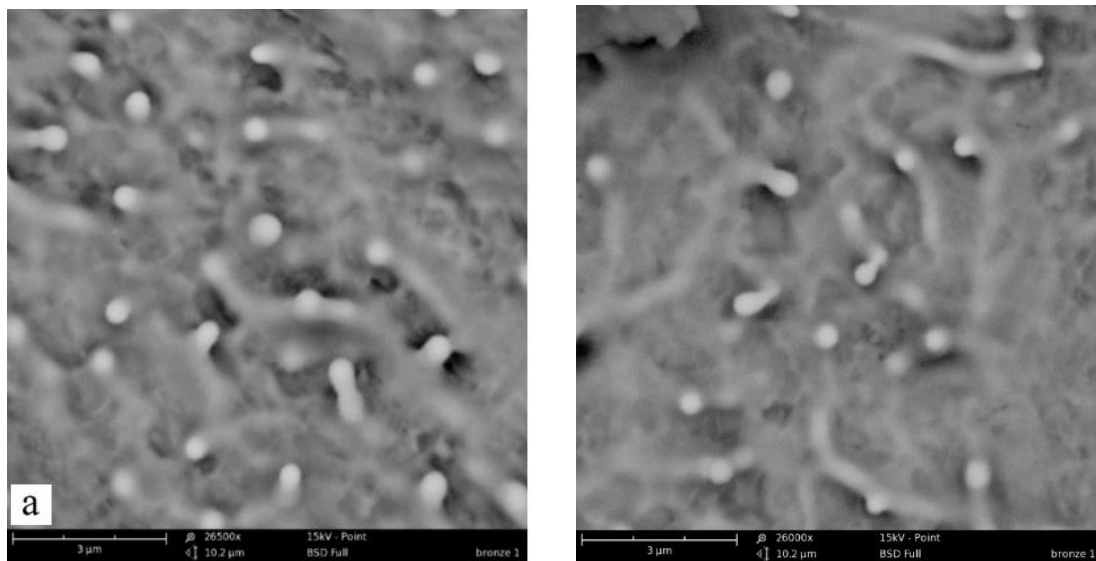


Рисунок 4 – СЭМ изображения поверхности бронзы после лазерной термообработки при плотности энергии 1,2 Дж/см<sup>2</sup> и двух скоростях сканирования: а) – 0,5 мм/с; б) – 1,0 мм/с

Экспериментально исследована зависимость концентрации хрома в приповерхностном слое термообработанного участка сплава Cu-Cr от плотности энергии излучения в диапазоне плотностей энергии 0,15 – 1,85 Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что максимальная концентрация хрома 0,9% соответствует наибольшей плотности (около 20 шт. на 100 мкм<sup>2</sup>) субмикронных структур в виде застывших капель на ножках. Это наблюдалось при термообработке сканирующим лазерным пучком с плотностью энергии около 1 Дж/см<sup>2</sup> и скоростью сканирования 1 мм/с.

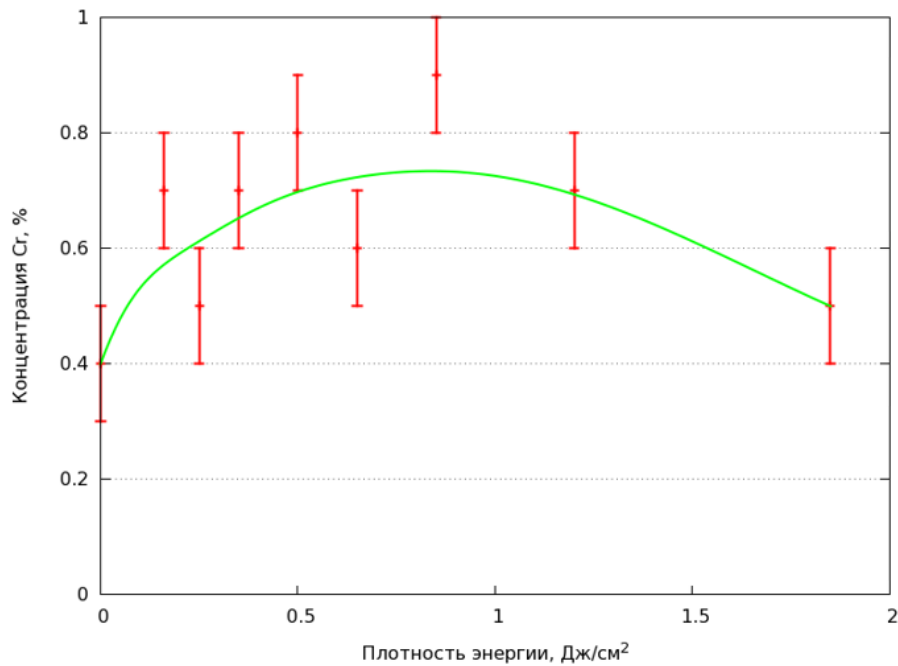


Рисунок 5 – Концентрация хрома в приповерхностном слое термообработанного участка в зависимости от плотности энергии излучения

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию влияния предварительной термической обработки поверхностей заготовок на качество и механические свойства шва диффузионно-сварного соединения металлов и сплавов.

После лазерной термообработки поверхностей сплава ЧС57, сталей 08Х18Н10Т, 09Х17Н, 12Х18Н10Т и хромированной бронзы заготовки помещались в тонкостенный герметичный контейнер определенными группами (с исходными и обработанными поверхностями) для дальнейшей диффузионной сварки методом горячего изостатического прессования. После сварки проводились испытания соединений на статическое растяжение при комнатной температуре с измерением предела прочности и относительного удлинения сварного шва.

Для соединения ЧС57 – ЧС57 наблюдалось увеличение предела прочности на 12 % и относительного удлинения на 21 % у деталей с лазерной обработкой при температуре диффузионной сварки 1160 °С (см. рис. 6). При температуре в 1000 °С увеличение предела прочности после обработки лазерным пучком с



плотностью энергии 2 Дж/см<sup>2</sup> составило 29 %, а относительного удлинения 160 % относительно соединения образцов с необработанными поверхностями (рис. 6). Следует отметить, что при плотности энергии 3 Дж/см<sup>2</sup> наблюдалось заметное уменьшение рассматриваемых параметров соединения. Для соединения Cu-Cr бронза – сталь 12Х18Н10Т предел прочности незначительно увеличился на 5 % – с 245 МПа до 258 МПа при температуре диффузионной сварки 1160 °С. Для соединения 08Х18Н10Т – 09Х17Н предел прочности увеличился на 14 % с 416 МПа до 474 МПа.

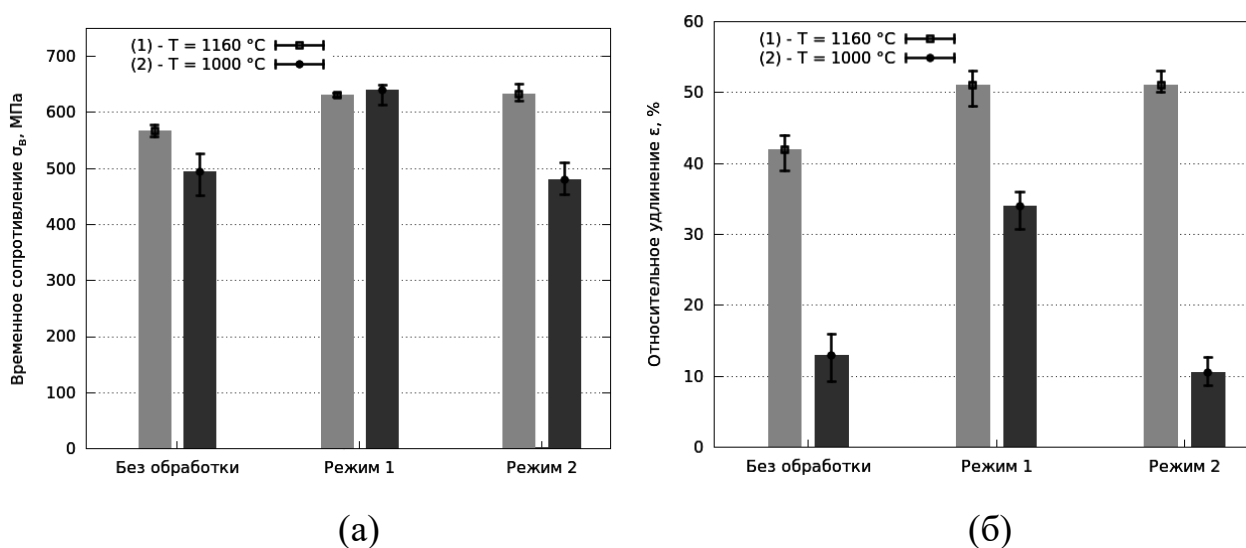


Рисунок 6 – Временное сопротивление (а) и относительное удлинение (б) сварных соединений, полученных при температурах:

1160 °С (1) и 1000 °С (2) в условиях ГИП

Улучшение качества сварного шва (увеличение предела прочности и относительного удлинения) соединений из стали и сплавов, возможно, вызвано уменьшением среднего размера зерен, сформировавшихся в процессе предварительной лазерной термообработки. Из-за малой глубины проникновения лазерного излучения внутрь облучаемой поверхности происходит нагрев тонкого приповерхностного слоя с последующим быстрым отводом тепла. Высокая скорость охлаждения приводит к образованию поверхностных наноструктур с характерным размером менее 100 нм, что существенным образом влияет на кинетику формирования твердофазного

соединения, ускоряя залечивание микропор. Это улучшает механические свойства сварного шва и позволяет уменьшить температуру процесса сварки.

**В пятой главе** исследовано влияние термической обработки поверхности керамических образцов из нитрида кремния и использования прослойки из перфорированной лазером медной фольги на механические свойства диффузионно-сварного соединения «керамика-медь-керамика».

Теоретически обоснована и экспериментально продемонстрирована перспективность использования наносекундных УФ лазеров в качестве высокоточного источника локального нагрева при нанесении перфорированных микроотверстий как в металлических прокладках, так и в поверхностях керамических заготовок для улучшения процесса диффузионной сварки керамических материалов с применением металлических прокладок.

Величина деформации  $\varepsilon_t$  и коэффициент перфорации  $K_{p0}$  (отношение площади отверстий к площади обрабатываемого материала) зависят от начального радиуса просверленных отверстий в соответствии с теоретической моделью трансформации перфорированной прокладки при диффузионной сварке материалов следующим образом:

$$\varepsilon_{tr} = \frac{r_0^2}{r_n^2}, \quad (2)$$

$$K_{p0} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{r_0}{r_n} \right)^2, \quad (3)$$

где  $r_n$  – радиус нейтральной поверхности (половина расстояния между центрами соседних отверстий),  $r_0$  – начальный радиус отверстия до диффузионной сварки. Стоит отметить, чем меньше коэффициент перфорации, тем меньше необходимо приложить усилий для деформации прокладки во время сварки.

Диаметр отверстия при лазерной перфорации зависит от размера сфокусированного пятна, который в свою очередь определяется известной формулой для дифракционного предела лазерных лучей в дальнем поле:

$$d - \frac{\lambda}{2n \cdot \sin \alpha} = 0, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения,  $n$  – показатель преломления окружающей среды,  $\alpha$  – угол расхождения лазерного луча,  $d$  – минимальный диаметр лазерного пятна. Из выражения (4) следует, что для достижения меньшего диаметра пятна необходимо использовать более короткие длины волн из области УФ или ВУФ излучения. На качество обработки материалов также будет влиять длительность импульсов излучения, определяющая плотность мощности в импульсе. С учетом этого в работе и было использовано излучение третьей гармоники (355 нм) твердотельного наносекундного Nd:YAG лазера.

Проведены экспериментальные исследования механических свойств следующих групп диффузионно-сварных соединений керамика-медь-керамика: 1) со сплошными медными прокладками; 2) с перфорированными медными прокладками; 3) с перфорированными медными прокладками и с перфорированными углублениями на поверхности керамики.

В ходе проведённых экспериментов было установлено, что использование перфорированных медных прокладок толщиной 100 мкм с микроотверстиями диаметром 30 мкм и периодом в 125 мкм, а также дополнительное нанесение лазером углублений на свариваемых поверхностях керамики  $\text{Si}_3\text{N}_4$  позволило интенсифицировать пластическую деформацию перфорированной прокладки, что существенно повлияло на кинетику образования сварного соединения и сделало распределение деформации по поверхности соединения существенно более равномерным по сравнению со сплошной прослойкой.

При использовании только перфорированных прокладок предел прочности соединения увеличился до 77-82 МПа, а величина относительного удлинения – до 28-38 % по сравнению с 53-75 МПа и 18-30%, соответственно, для неперфорированных прокладок. В случае сочетания перфорированных прокладок с использованием перфорированных отверстий на контактных поверхностях керамики удалось получить сварные соединения, имевшие прочность в среднем в

1,45 раза бoльшую, чем соединения со сплошной прокладкой при одновременном увеличении средних значений относительного удлинения почти на 50 %.

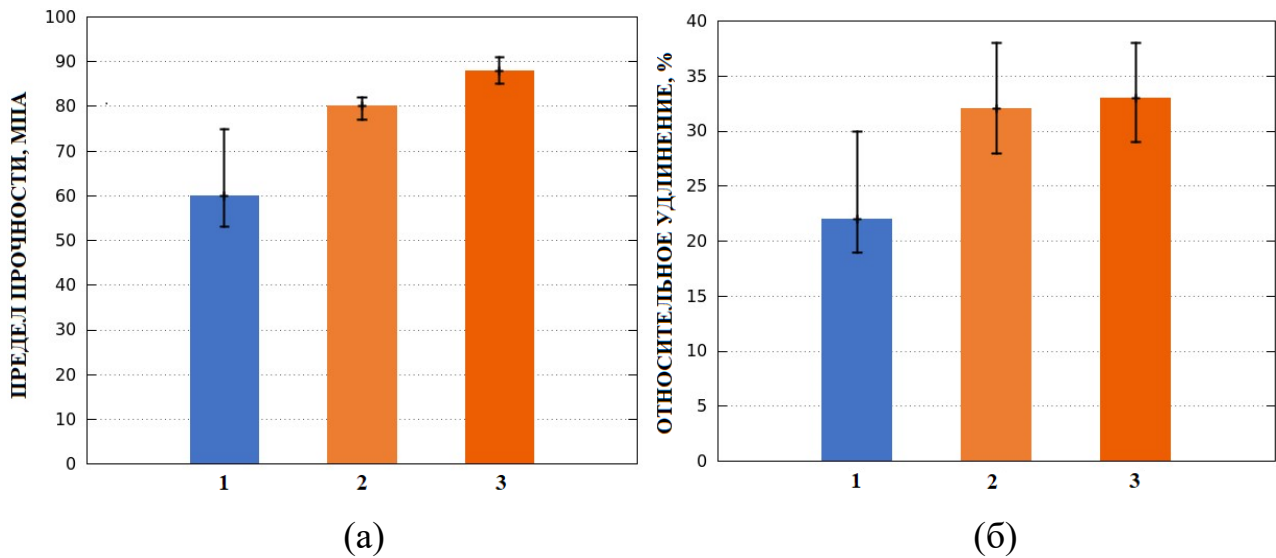


Рисунок 7 – Предел прочности (а) и относительное удлинение (б) сварных соединений керамических заготовок из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при использовании медных прокладок: 1 – сплошной, 2 – перфорированной; 3 – перфорированной и с углублениями на контактных керамических поверхностях.

При использовании лазерной перфорации элементов получилось снизить такие основные параметры процесса диффузионной сварки, при которых формируются высокопрочные соединения, как время, давление и температура, что представляет особую важность при применении данного метода на практике.

**В заключении** приводятся основные результаты настоящей диссертационной работы.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны научные основы метода лазерной обработки поверхности ряда коррозионностойких, в т. ч. жаропрочных, сталей и сплавов, включая выбор лазерного источника и режимов лазерной термической обработки, обеспечивающих оптимальное качество поверхности перед проведением диффузионной сварки.

2. Экспериментально показано, что предварительная термическая обработка сканирующим пучком наносекундного лазера с длиной волны

$\lambda = 355$  нм при плотностях энергии излучения в диапазоне  $2 \div 3$  Дж/см<sup>2</sup> и скорости сканирования луча 1 мм/с поверхности образцов, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе ЧС 57, приводит к улучшению механических свойств сварных соединений: увеличению прочности на растяжение и деформации растяжения более чем на 10 и 20 %, соответственно, по сравнению с необработанными образцами – при оптимальной температуре (1160 °С) диффузионной сварки в условиях горячего изостатического прессования.

3. Установлено, что предварительная лазерная термическая обработка поверхности образцов, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе ЧС 57, при пониженной температуре сварки в 1000 °С приводит к увеличению прочности на растяжение до 30 % и деформации растяжения до 150 % по сравнению с необработанными образцами, что позволяет снизить температуру процесса горячего изостатического прессования на  $\approx 160$  °С при сохранении механических характеристик сварного соединения.

4. Впервые экспериментально обнаружены и исследованы не наблюдавшиеся ранее квазиупорядоченные структуры шарообразной формы диаметром  $\approx 500$  нм, расположенные на ножках высотой  $\approx 1$  мкм на поверхности Cu-Cr бронзы при её облучении сканирующим пучком Nd:YAG лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 355$  нм в диапазонах плотностей энергии излучения  $0,1 \div 2$  Дж/см<sup>2</sup> и скоростей сканирования  $0,5 \div 1$  мм/с. Установлено, что при скорости сканирования луча 1 мм/с плотность распределения шарообразных структур по поверхности составляет около 20 структур на 100 мкм<sup>2</sup>, а при скорости сканирования до 0,5 мм/с их количество на единицу поверхности увеличивается приблизительно в два раза.

5. Перфорация микроотверстий в металлических прокладках и термообработка поверхности керамических заготовок с применением наносекундного Nd:YAG лазера перед осуществлением диффузионной сварки позволили повысить прочность сварных соединений из керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с

применением перфорированной лазером медной прокладки в 1,45 раза при одновременном увеличении значений относительного удлинения до 50 % по сравнению с применением сплошной прокладки.

#### IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

##### Публикации в научных изданиях

1. С.И. Миколуцкий, Ю.В. Хомич. Влияние лазерного УФ излучения наносекундной длительности на структуру и адгезионные свойства металлов и сплавов. Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122. №2. С. 1-7.
2. Ю.А. Вашуков, В.Д. Еленев, Ю.А. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков. Влияние лазерной перфорации элементов диффузионно-сварного соединения «керамика-медь-керамика» на его механические свойства. Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 2. С.1–6.
3. Ю. А. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Рогалин, С.А. Филин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, И.А. Каплунов, А.И. Иванова. Деформационные процессы на поверхности никелевого сплава при воздействии наносекундными лазерными импульсами. Деформация и разрушение материалов. 2021. № 2. С. 15-20.
4. Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Рогалин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, И.А. Каплунов, А.И. Иванова. Пластическая деформация меди в результате воздействия мощного ультрафиолетового наносекундного лазерного импульса. Письма в ЖТФ. 2020. Том 46. Вып. 16. С. 51-54.
5. Ю.А. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Рогалин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, И.А. Каплунов, А.И. Иванова. Модификация поверхности твердого сплава WC—3% Co мощными наносекундными ультрафиолетовыми лазерными импульсами. Деформация и разрушение материалов. 2020. № 11. С. 11-14.
6. Елкин В.Н., Малинский Т.В., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Влияние предварительной лазерной обработки поверхности на механические свойства

диффузного сварного соединения железоникелевого сплава. Физика и химия обработки материалов. 2020. № 3. С. 40-47.

7. Yolkin V.N., Malinskiy T.V., Khomich Y.V., Yamshchikov V.A. Modification of the surface microtopography of a bronze alloy under irradiation with a scanning beam of nanosecond laser radiation pulses. Inorganic Materials: Applied Research. 2020. T. 11. № 3. С. 598-603.

8. Ю.А. Вашуков, С.Ф. Демичев, В.Д. Еленев, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки. Прикладная физика. 2019. № 1. С. 82-87.

9. Yu.A. Zheleznov, T.V. Malinskiy, Yu.V. Khomich, V.A. Yamshchikov. The effect of a scanning nanosecond laser pulse beam on the microtopography of ceramic AL2O3 coatings. Inorganic materials: Applied research. 2018. V. 9. No.3. P. 460-463.

10. В.Н. Ёлкин, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, Р.Р. Хасая, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков. Влияние облучения наносекундными лазерными импульсами на структуру поверхности металлических сплавов. Физика и химия обработки материалов. 2016. № 6. С. 5-12.

11. Ю.А. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, Р.Р. Хасая, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением. Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1 (13). С. 45-48.

12. Ю.А. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, Р.Р. Хасая, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, В.Н. Токарев. Экспериментальная установка по микро и наноструктурированию поверхности твёрдых тел лазерным излучением. Прикладная физика. 2014. № 3. С. 83-87.

#### **Публикации в трудах конференций**

13. Yu V Khomich, T V Malinskiy, S I Mikolutskiy, V E Rogalin, V A. Yamshchikov, I A Kaplunov and A I Ivanova. Powerful ultraviolet laser pulse impact on polished metals and semiconductors. Journal of Physics: Conference Series 1697 (2020) 012254 IOP Publishing.

14. Yu.V. Khomich, T.V. Malinskiy, V.E. Rogalin, I.A. Kaplunov, A.I. Ivanova. Features of microrelief formation during laser treatment of Cu-Cr-Zr alloy surface for diffusion welding. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 939. P. 012035.
15. Yu.V. Khomich, V.A. Yamshchikov. The effect of preliminary laser surface treatment on the mechanical properties of a solid-phase compound of an iron-nickel alloy in diffusion welding. Chapter 6. Advanced Materials. Proceedings of the International conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2019). P. 61-71.
16. Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Рогалин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков. Высокоэнергетическое воздействие ультрафиолетового лазера на полированную поверхность бескислородной меди. Тезисы докладов научно-практической конференции учёных России и Хорватии: Сборник – НИТУ «МИСиС», 2019. С. 171 -173.
17. S.I. Mikolutskiy, R.R. Khasaya, Yu. V. Khomich. Influence of nanosecond laser radiation on the surface structure of metals. Proceedings of the 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies. November, 2017. Beijing: Metallurgical Industry Press. P. 319–325.
18. S.I. Mikolutskiy, R.R. Khasaya, Yu. V. Khomich, V.A. Yamshchikov, Yu.A. Zheleznov. Growth and formation of nanostructures on metal surfaces under the action of nanosecond laser pulses. В сборнике: Abstracts book of 5th European Conference on Crystal Growth. 2015. P. 313.