

На правах рукописи

Зо Йе Мьят

УДАРНАЯ ОБРАБОТКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
МАЛОМОЩНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

05.02.07 – Технологии и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва 2020

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

Научный руководитель:

Мельников Дмитрий Михайлович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Дмитриев Александр Сергеевич
доктор технических наук,
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт
(технический университет)», заведующий
кафедрой низких температур, профессор

Ставертий Антон Яковлевич
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью «КЕМИКА»
Группа Компаний «ПОЛИТЕГ-МЕТ», инженер

Ведущая организация:

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» г. Москва

Защита диссертации состоится «__» _____ 2020 г. в _____
на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Телефон для справок +7-499-267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим направлять по указанному адресу.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06
кандидат технических наук, доцент

А.В.Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Ускоряющиеся темпы развития машиностроения требуют постоянной разработки эффективных технологий, способных повысить надёжность работы деталей и механизмов в различных условиях эксплуатации. Среди методов повышения износостойкости деталей машин большое распространение находят методы поверхностной обработки, призванные повысить эксплуатационные показатели за счёт изменения структуры и повышения твёрдости поверхностного слоя. Особое значение среди таких методов имеют методы холодной пластической деформации, приводящие к упрочнению, повышению усталостной прочности и износостойкости без теплового воздействия.

Большой интерес в последние годы находит технология лазерной ударной обработки (ЛУО), которая заключается в создании мощной и направленной ударной волны в процессе лазерной абляции специального поглощающего покрытия, наносимого на обрабатываемую поверхность. ЛУО используется для повышения усталостной прочности ответственных изделий в области авиастроения, в частности лопаток газотурбинных двигателей.

Одной из важнейших задач развития технологии ЛУО является повышение её коммерциализуемости и, соответственно, более широкое внедрение в промышленное производство. Для обработки лопаток газотурбинных двигателей и схожих применений необходимы импульсы наносекундной длительности и энергии до 50 Дж. Для этого требуется применение твердотельных лазеров с модуляцией добротности, построенных по схеме генератор – каскад усилителей. Такие системы крайне дороги и громоздки, а предпосылок к их существенному прогрессу и удешевлению пока не наблюдается. Использование этих установок оправдано в случае крупносерийной обработки ответственных и дорогостоящих изделий, но существенно тормозит применение ЛУО в других областях техники, в частности локальной обработки для улучшения сварных швов, технологического текстурирования поверхности, торможения развития усталостных трещин и др.

Решением данной проблемы является переход от мощных одиночных импульсов с энергией порядка от 10 до 50 Дж и диаметром пятна в несколько миллиметров к высокочастотной обработке сфокусированным пятном с энергией менее 1 Дж. Такой подход позволит значительно снизить стоимость применяемых лазерных источников и существенно расширить область промышленного использования технологии ЛУО.

Настоящая работа посвящена исследованию физических предпосылок и разработке методов осуществления процесса ЛУО при помощи низкоэнергетических лазерных установок с сохранением высоких технологических показателей. Это необходимо для использования ЛУО как способа локальной поверхностной холодной пластической деформации при обработке изделий, работающих в условиях механического или усталостного износа. Поэтому ЛУО низкоэнергетическими источниками следует признать актуальной и быстроразвивающейся технологией поверхностного упрочнения, имеющей важное научное и практическое значение.

Целью диссертационной работы является разработка актуального метода лазерной ударной обработки цветных металлов и сплавов маломощным лазерным источником и определение областей рационального его применения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка энергетических и технологических условий перехода к низкоэнергетическим источникам при ЛУО путём математического моделирования этапов преобразования лазерной энергии в энергию механической ударной волны в условиях лазерной абляции в жидкой среде.

2. Определение параметров процесса лазерной ударной обработки низкоэнергетическими источниками, сочетание которых необходимо оптимизировать для получения результатов, сопоставимых с лазерной обработкой на традиционных режимах.

3. Исследование оптимальных технологических условий локальной лазерной ударной обработки низкоэнергетическими источниками.

4. Разработка стратегий получения заданных свойств поверхности лазерной ударной обработкой низкоэнергетическими источниками.

5. Выявление области применения локальной лазерной ударной обработки низкоэнергетическими источниками.

6. Разработка технологических рекомендаций по использованию локальной лазерной ударной обработки низкоэнергетическими источниками

Методы исследований. Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Моделирование процесса ЛУО было основано на расчёте профилей остаточных напряжений по наиболее распространённой в литературе методике, включающей себя описание материала с помощью критерия пластичности Мизеса. Для прогнозирования динамических эффектов при пластическом деформировании использовалась модель Джонсона-Кука. Экспериментальные исследования производились с помощью лазерной установки «Solar LQ 829», работающей в режиме модуляции добротности с максимальной энергией в импульсе до 1 Дж. Планирование и проведение экспериментальных исследований осуществлялось с помощью стандартных методов однофакторных и многофакторных экспериментов. Критериями эффекта ЛУО использовались поверхностные микротвёрдость и остаточные напряжения, а также геометрия получаемых вмятин. Полученные результаты ЛУО низкоэнергетическими источниками сравнивались с результатами ЛУО на традиционных режимах, полученными в результате литературного и экспериментального исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлено, что снижение диаметра пятна при одинаковой интенсивности при ЛУО приводит к снижению эффекта пластической деформации. Установлено, что при использовании одиночных импульсов в процессе ЛУО применение диаметров меньше 500 мкм приводит к снижению эффекта пластической деформации при постоянной интенсивности излучения.

2. Меньшая эффективность лазерной ударной обработки при малых размерах пятен до 200 мкм может быть скомпенсирована обработкой с коэффициентами

перекрытия, обеспечивающими 4-кратное облучение единичной площади обрабатываемой поверхности.

3. На основании экспериментального и теоретического исследований процесса лазерной абляции в жидкости установлено, что изменение угла падения луча при ЛУО в жидкости, в отличие от обработки на воздухе, приводит к изменению эффекта пластической деформации не более, чем на 5 %, что может быть использовано при ЛУО сложной геометрии.

4. Применение лазерной ударной обработки к зоне термического влияния сварного шва за счёт пластической деформации позволяет изменить знак напряжений с растягивающих на сжимающие с величиной до 4-х раз большей, чем до обработки.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Установлена область режимов ЛУО цветных металлов и сплавов, позволяющая использовать низкоэнергетические источники лазерного излучения и применять технологию для локальной поверхностной обработки.

2. Определены оптимальные технологические покрытия, обеспечивающие возможность проведения многоимпульсной ЛУО, выдерживающих до 4 повторных облучений без полного разрушения.

3. Разработаны регрессионные модели, связывающие основные характеристики ЛУО: глубину, микротвёрдость поверхности – с параметрами технологических режимов для оптимизации процесса обработки

4. Разработаны технологические рекомендации для ЛУО низкоэнергетическими источниками цветных металлов и сплавов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением основных положений естественных наук при проведении расчётных исследований, использованием современных стандартных программ и алгоритмов при проведении расчётов и построении моделей, осуществлении измерений на поверенном оборудовании по стандартным методикам. Она подтверждается экспериментальными данными, полученными с использованием современного лазерного технологического оборудования и обработанными с помощью методов статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологические условия перехода режимов лазерной ударной обработки цветных металлов и сплавов в область применения низкоэнергетических лазерных источников.

2. Установленные зависимости геометрических и механических характеристик лазерной ударной обработки от параметров процесса.

3. Установленные взаимосвязи физических процессов при лазерной ударной обработке и эффективности получаемой пластической деформации.

4. Технологические рекомендации по применению локальной лазерной ударной обработки для повышения характеристик изделий, работающих в условиях усталостного или абразивного износа.

Апробация работы

1. Доклад автора на семинаре кафедры лазерных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019).

2. Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» «МГТУ им. Н.Э. Баумана». (Москва, 2016).

3. Международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ». (Москва, 2017).

4. XXVIII Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (г. Дубна, 2017).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 5 научных работ в отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ и в 2 тезисах конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка литературы (144 наименования). Изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность работы, приведены цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, обоснование достоверности полученных результатов и информация об апробации работы. Актуальность выбранной темы связана с необходимостью расширения традиционных областей применения ЛУО на технологии, где экономический эффект может быть достигнут только при снижении стоимости основного оборудования. Внедрение ЛУО для локальной модификации поверхностного слоя изделий обусловлено возможностью бесконтактной автоматизируемой обработки, в том числе геометрии сложной формы. При этом достигается эффект упрочнения сопоставимый с конкурирующими процессами.

В **Главе 1** проведены литературные исследования, посвящённые актуальности применений ЛУО низкоэнергетическими источниками. Рассмотрены основные аспекты традиционного подхода к ЛУО включающие в себя: использование поглощающего и сдерживающего покрытий; механику формирования ударной волны; режимы подачи лазерного излучения; основные эффекты ЛУО на физико-механические свойства обрабатываемых изделий и освоенные области применения.

Работы по исследованию ЛУО проводились отечественными учёными: Григорьянцем А.Г., Шигановым И.Н., Мисюровым А.И., Сахвадзе Г.Ж., Мельниковым Д.М., а также зарубежными: Peyre P., Fabbro R., Montross C.S., Zhang W., Ding K. И др.

Приведён анализ существующих методов локальной поверхностной обработки, демонстрирующий основные их преимущества и недостатки. В частности, показано, что эти методы являются либо контактными, либо сопряжены с нагревом, что является проблемой для ряда научно-технических задач модификации или постобработки поверхностных слоёв. ЛУО является холодным бесконтактным процессом благодаря чему позволяет создавать области остаточных сжимающих напряжений в труднодоступных местах или в областях

со сложной криволинейной геометрией. Направленность воздействия приводит к слабому влиянию на шероховатость поверхности, а эффект наклёпа сопоставим с наиболее эффективными процессами поверхностной пластической деформации.

Выявлены актуальные вопросы развития метода ЛУО. В частности, показано, что традиционный подход к ЛУО связан с использованием крайне дорогостоящих установок. Это обусловлено использованием энергии в импульсе от 1 до 50 Дж в режиме модуляции добротности. Для расширения возможностей метода необходим переход к низкоэнергетическим установкам. Выявлены перспективные применения ЛУО с низкими энергиями в импульсе, к которым относятся постобработка сварных швов, нанесение микрорельефа на поверхности деталей, работающих в условиях износа и др.

На основании проведённых литературных исследований были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В Главе 2 приведены сведения о материалах используемых образцов, использованном технологическом и измерительном оборудовании, методах исследований.

Метод определения эффективности преобразования лазерной энергии в энергию расширяющегося плазменного факела основан на экспериментальном измерении или оценке составляющих энергетического баланса (1) при лазерной абляции. Особое внимание уделялось факторам, связанным с технологическими условиями проведения процесса ЛУО.

$$E_{\Sigma} = E_R + E_t + E_{ab} + E_L + E_{th} \quad (1)$$

где E_{Σ} – падающая энергия, E_R – отражённая энергия; E_t – энергия, пошедшая на нагрев мишени; E_{ab} – энергия, поглощённая плазменным факелом; E_L – энергия, затраченная на испарение; E_{th} – кинетическая энергия испарённых частиц.

Эффект ЛУО в большинстве экспериментов оценивался путём измерения микротвёрдости поверхности. Для этого образцы предварительно полировались, но после ЛУО на них образовывались вмятины. При измерении твёрдости приходилось иметь дело с неплоской поверхностью. Поправка на неплоскостность, заложенная в использованном твердомере, была согласована с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Измерения остаточных напряжений производились по стандартной методике Брэгговской дифракции (или « $\sin^2\psi$ »), в котором образец облучался рентгеновским излучением под разными углами, после чего искались максимумы брэгговской дифракции, по которым оценивалось искажение кристаллической решётки, а затем напряжённое состояние в данном кристаллографическом направлении.

Диаметры пятна в экспериментах оценивались с помощью зависимости (2). Эта зависимость часто используется для сопоставления размеров аблированной геометрии и оптического размера пятна гауссова (или близкого к нему) профиля. Методика оценки заключалась в следующем. Измерялась пороговая энергия абляции для различных установок фокусирующей линзы, затем при данной энергии производилась лазерная абляция и при помощи оптического микроскопа измерялся её след. После этого диаметр пятна рассчитывался по зависимости (2).

$$D^2 = 2w^2 \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{\text{пор}}}\right) = 2w^2 \cdot \ln\left(\frac{W}{W_{\text{пор}}}\right) \quad (2)$$

где D – размер следа от абляции (например, на фольге); w – размер (диаметр) лазерного пятна; $F/F_{пор}$ – лазерный поток / пороговый лазерный поток; $W/W_{пор}$ – энергия / пороговая энергия лазерного импульса.

В данной работе использовались два алюминиевых сплава: АМг-6 и 1469 как представители конструкционных алюминиевых сплавов, а также чистый никель НП2, как модельный материал.

ЛЮО осуществлялась при помощи твердотельного лазера «SOLAR LQ 829» с максимальной энергией в импульсе 1 Дж, длительностью импульса 10 нс и возможностью перестройки во вторую гармонику. Оптические измерения проводились с помощью инвертирующего металлографического микроскопа «Olympus GX-51». Измерения твёрдости проводились на поверенном твердомере «Emcotest Durascan 20», шероховатости – на приборе «Taylor Hobson. Surtronic S-100», лазерной энергии – при помощи пирозлектрического сенсора «Ophir PE25-C».

В Главе 3 приведены результаты моделирования остаточных напряжений на поверхности и в глубине материала после ЛЮО, сопоставление с экспериментальными результатами, а также экспериментальные исследования влияния условий облучения на этапы преобразования энергии при лазерной абляции.

Расчёт поверхностных остаточных напряжений проведён по методике для моделирования процесса ЛЮО методом конечных элементов. В данной методике мощность, создаваемой после ударной волны определяется по экспериментальной зависимости (3).

$$P = 0,01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z \cdot I_0} \quad (3)$$

где P – давление ударной волны [ГПа], I_0 – интенсивность лазерного излучения [ГВт/см²], Z – эффективный акустический импеданс, $(2/Z \approx 1/Z_1 + 1/Z_2)$ материалов сдерживающей среды (Z_1) и мишени (Z_2), α – эффективность преобразования лазерной энергии в энергию плазмы, которая связана с E_{th} из уравнения (1).

После этого поверхностные пластические остаточные напряжения с учётом принятых допущений рассчитываются по зависимости (4).

$$\sigma_{surf} = \sigma_0 - \left[\frac{\mu \varepsilon_p (1+\nu)}{(1-\nu) + \sigma_0} \right] \left[1 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} (1+\nu) \frac{L_p}{a\sqrt{2}} \right] \quad (4)$$

где a – размер рассматриваемого элемента поверхности, σ_0 – значение остаточных напряжений до обработки, C_{el} и C_{pl} – скорости упругой и пластической деформации, L_p – глубина пластического эффекта.

Поверхностная пластическая деформация ε_p находилась по зависимости (5), её расчёт основывался на нахождении предела упругости Гюгонио σ_{HEL} .

$$\varepsilon_p = \frac{-2\sigma_{HEL}}{3\lambda+2\mu} \left(\frac{P}{\sigma_{HEL}} - 1 \right) \quad (5)$$

Было предположено, что пластической течение материала мишени происходит при той же скорости деформации (около 10^6 с⁻¹), что и при достижении пиковым давлением значения σ_{HEL} , тогда динамический предел текучести при одноосных условиях связан с σ_{HEL} :

$$\sigma_{HEL} = \sigma_y^{\text{дин}} \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуассона;

$\sigma_y^{\text{дин}}$ – динамический предел текучести.

Разумно принять допущение, что импульс давления, возбуждаемый плазмой, является равномерным по всей поверхности лазерного пятна, а также то, что пластическая деформация из-за высоких темпов деформации соответствует критерию максимальных критических напряжений вон Мизеса, в котором определяется динамический предел текучести. Последний в данной работе находился по классической модели Джонсона Кука:

$$\sigma_y^{\text{дин}} = \sigma_y \cdot (1 + K \cdot \varepsilon_p^n) \cdot \left(1 + b \cdot \left(\ln \frac{d\varepsilon_p}{d\varepsilon_0}\right)^m\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma_y \cdot \eta^{1/3}}\right) \cdot P\right) \quad (7)$$

где ε_0 – начальная деформация, σ_y – статический предел текучести материала, K , n , b , m – коэффициенты модели Джонсона-Кука, η – объёмный коэффициент сжатия.

Так как ЛУО подразумевается холодным процессом, то температурным эффектом в выражении (7) пренебрегали.

Из анализа зависимостей с (3) по (7) видно, что интенсивность лазерного излучения влияет на эффект наклёпа в соответствии с $\sigma_{\text{surf}} \propto \sqrt{I_0}$, что согласуется с литературными данными и результатами измерения микротвёрдости.

Для расчёта глубины воздействия ЛУО в зависимость (3) вставлялось экспоненциальное затухание ударной волны с показателем, определяемым акустическим сопротивлением среды. После этого была получена зависимость многоимпульсного воздействия на эффект ЛУО, показанная на Рисунке 1. На рисунке видно, что остаточные сжимающие напряжения максимальны вблизи поверхности и постепенно убывают вглубь. Многоимпульсное воздействие, при этом, позволяет увеличить не только амплитуду создаваемых напряжений, но и их глубину. Экспериментальное измерение распределение микротвёрдости вглубь образца из материала АМг-6 после ЛУО демонстрируют похожую зависимость (Рисунок 2). Стоит отметить, что экспериментальное исследования влияния повторного облучения также показывало рост эффекта ЛУО, но заметно только до 4-5 повторений, после чего наступал эффект насыщения.

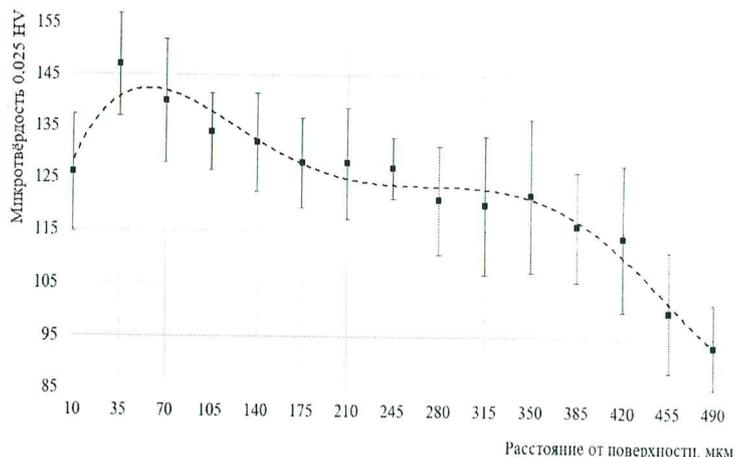
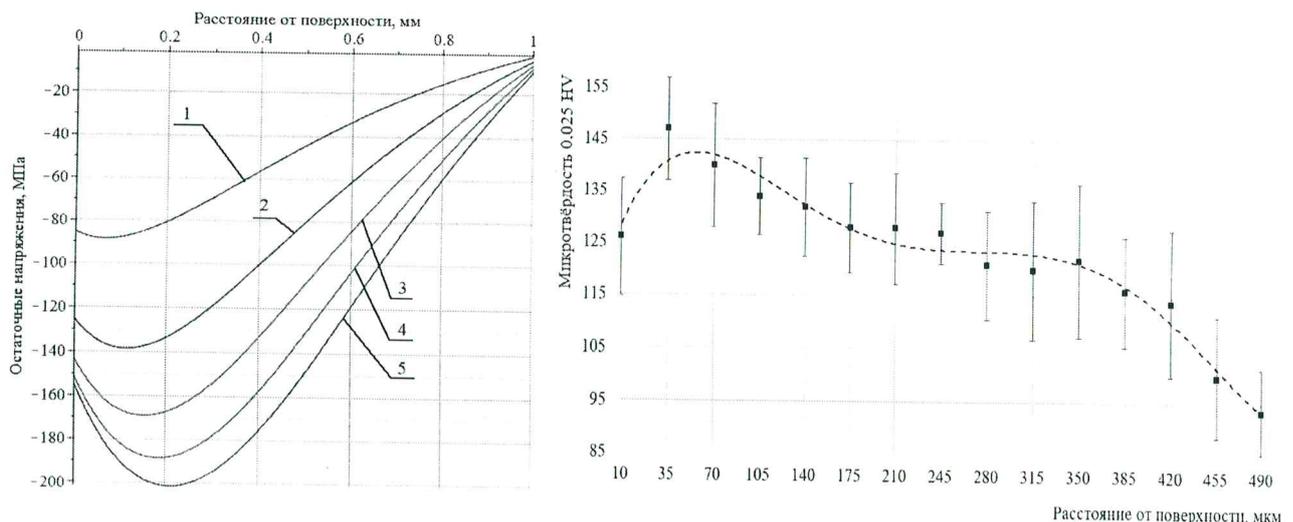


Рисунок 1. Теоретически рассчитанная (а) глубина распространения остаточных сжимающих напряжений после многократной ЛУО сплава АМг-6: 1 – 1 удар, 2 – 2 удара, 3 – 3 удара, 4 – 4 удара, 5 – 5 ударов; и экспериментально полученный профиль (б) распределения микротвёрдости вглубь мишени после ЛУО (интенсивность излучения – 2,5 ГВт/см², диаметр пятна – 1 мм)

Таким образом применение многократного облучения во время ЛУО позволяет достигать значительных уровней пластической деформации при умеренных плотностях мощности. Этот эффект имеет большое значение для применения низкоэнергетических источников для ЛУО. Возможно не только достижения высокой степени упрочения на поверхности мишени при меньших энергиях в импульсе, но и добиться значительной глубины пластического эффекта.

Важным этапом перехода к низкоэнергетическим источникам при ЛУО является снижение размера пятна, позволяющее использовать ту же интенсивность, что и при традиционных режимах. Для исследования данного вопроса была получена расчётная модель, показывающая влияние размера пятна и основанная на зависимостях с (3) по (7). Модель показала, что профиль напряжений после ЛУО с меньшим пятном и одинаковой интенсивности снижается (Рисунок 2). Экспериментально этот же эффект наблюдался и по результатам измерения микротвёрдости обработанной поверхности (Рисунок 3).

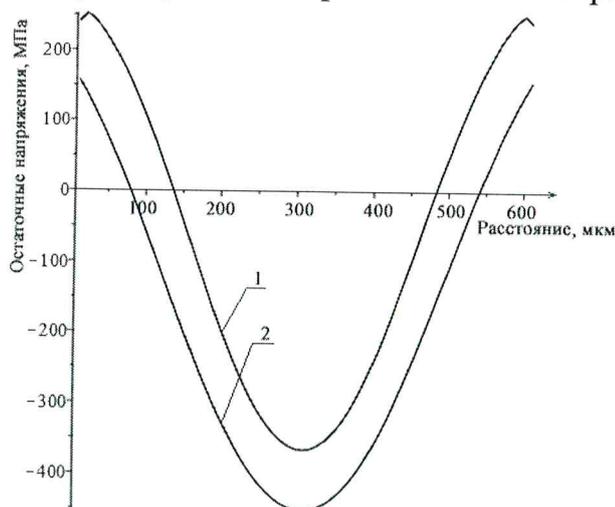


Рисунок 2.

Результаты численного моделирования профилей распределения остаточных при одинаковой интенсивности и различных диаметрах пятен (1 – диаметр пятна 220 мкм, 2 – диаметр пятна 270 мкм)

В представленной модели снижение эффекта ЛУО при острой фокусировке объясняется тем, что итоговые остаточные напряжения в элементарном участке являются результатом суперпозиции ударных волн от всех элементарных участков, подвергнутых облучению. Кроме того, увеличение диаметра пятна при постоянной интенсивности характеризуется существенно большим ($\sim d_1^2/d_2^2$)

энерговкладом. При этом обычно увеличивается массовый выход лазерной абляции, что обязано вносить вклад в мощность ударной волны

По результатам проведённых исследований был сделан вывод о том, что точный выбор диаметра пятна имеет значение не только с точки зрения технологических особенностей, но и с точки зрения энергетической эффективности процесса. Разумной границей является 400 мкм, когда чистое влияние диаметра пятна снижается по отношению к другим параметрам процесса ЛУО.

Так как к задачам практической реализации ЛУО низкоэнергетическими источниками относится обработка сложной, неплоской геометрии, то были проведены исследования влияние угла падения излучения на эффективность лазерной абляции в жидкости (как самой распространённой сдерживающей среде). Эти исследования показали, что абляция на воздухе или с тонким (около 1 мм) слое жидкости зависит от угла падения по причине того, что коэффициент отражения и доля перекрытия луча плазменным факелом уменьшаются при увеличении угла. Но было обнаружено и показано, что при толстом слое жидкости динамика развития факела меняется. Это отчётливо заметно на фотоснимках, показанных на Рисунке 4. Плазменный факел распространяется в соответствии с направлением падения луча. Характер наблюдаемого факела позволил сделать вывод, что происходит ионизация материала мишени, а не жидкости. Из-за полного перекрытия факела и лазерного луча, угла падения незначительно влияет на эффект ЛУО.

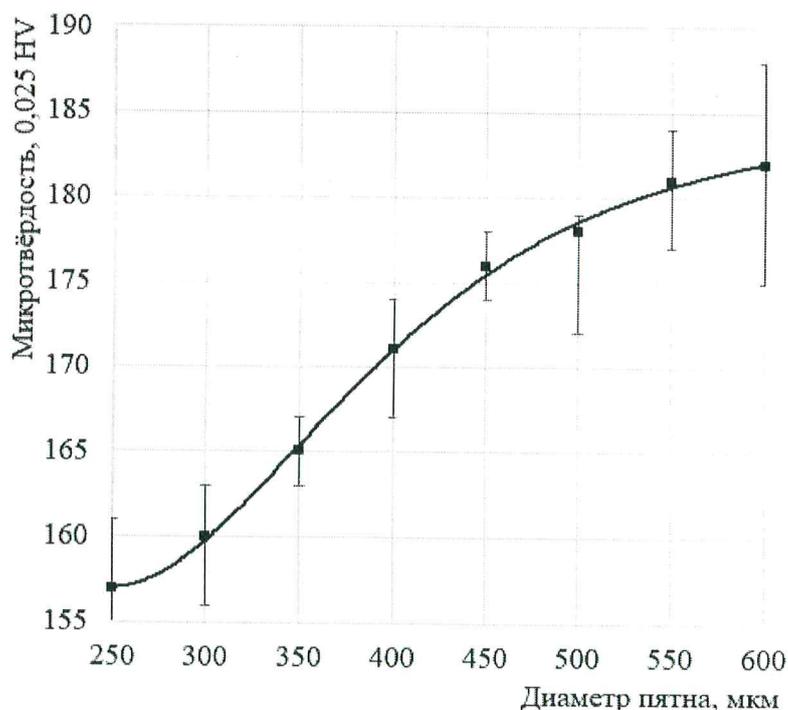


Рисунок 3.

Зависимость микротвёрдости поверхности никелевой пластины после лазерной ударной обработки от диаметра пятна. диаметр варьировался от 250 до 600 мкм, интенсивность составляла $2,7 \cdot 10^9$ Вт/см²

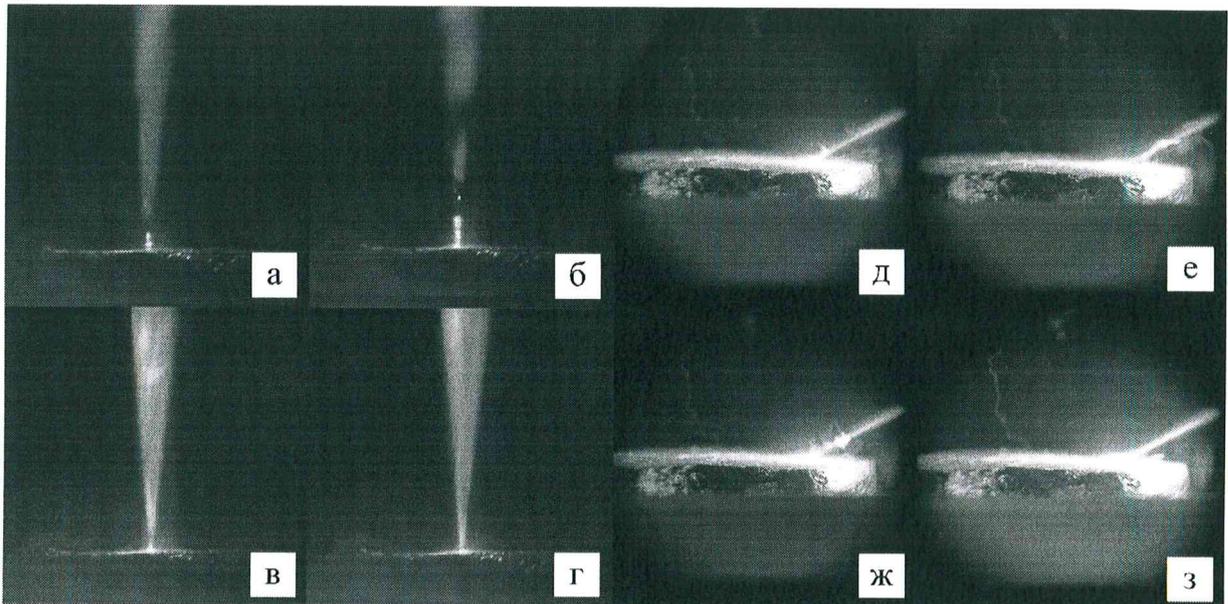


Рисунок 4.

Фотографии процесса лазерной абляции в жидкости, полученные для разных временных этапов процесса при нормальном угле падения (а – г), и угле падения луча 60° (д – з)

Экспериментальное изучение влияния угла падения на микротвёрдость поверхности обрабатываемых образцов при фиксированной интенсивности ЛУО также не выявил значительных изменений. Данное обстоятельство является положительным эффектом, т.к. говорит о том, что при значительных толщинах жидкой среды в процессе ЛУО, обработка сложной геометрии будет сопряжена с минимальными колебаниями результирующего эффекта.

В Главе 4 приведены результаты исследований по разработке технологических приёмов, позволяющих эффективно осуществлять ЛУО низкоэнергетическими источниками.

На основе проведённых экспериментов были установлены оптимальные сочетания технологических покрытий – важных составляющих процесса ЛУО, особенно при необходимости применения многократного облучения. Сдерживающие покрытия были выбраны из двух соображений: значения акустического импеданса – определяющего эффективность сдерживания развития плазменного факела, и удобства использования в различных технологических применениях. Абляционные покрытия выбраны с точки зрения коэффициента поглощения, коммерческой и технологической доступности, а также способности выдерживать многоимпульсную обработку. В качестве сдерживающей среды наибольшей эффективностью обладают твердотельные прозрачные среды, такие как стекло, однако их применимость в технологии ограничена ровными поверхностями. Среди жидких сред следует выбирать среды с наибольшим акустическим импедансом, но коэффициент поглощения лазерного излучения может быть проблемой – плотные среды могут сильно рассеивать лазерное излучение, что снижает эффективность применения данного покрытия.

Результаты сравнения различных сдерживающих покрытий показаны на Рисунке 5, а.

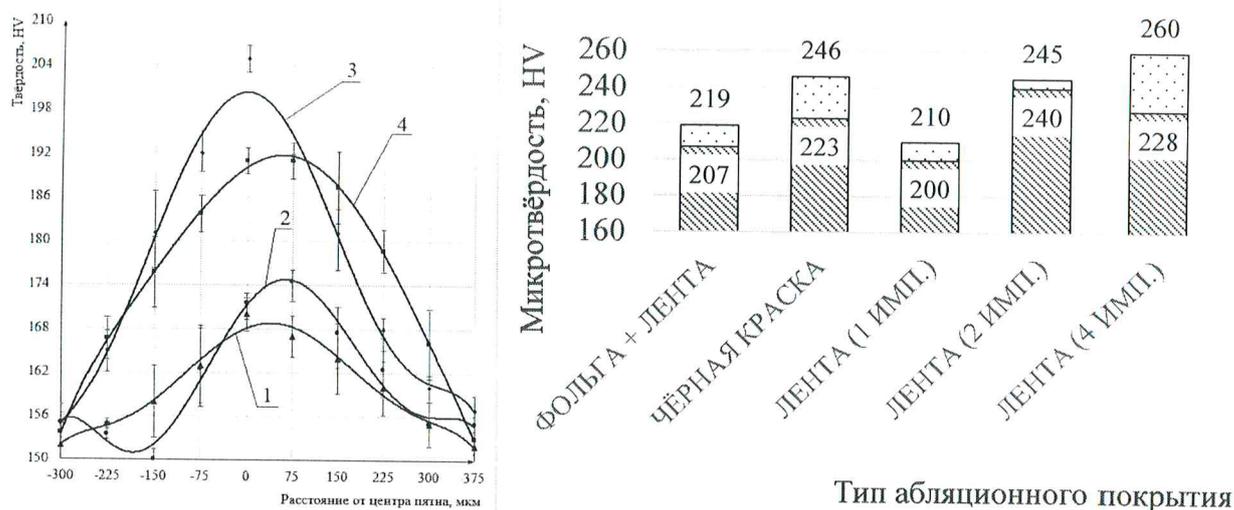


Рисунок 5.

Распределение поверхностной микротвёрдости никелевой пластины после лазерного наклёпа при разных сдерживающих покрытиях (а): 1 – спирт, 2 – глицерин, 3 – вода, 4 – стекло (энергия в импульсе была 180 мДж, диаметр пятна – 210 мкм по полуширине пика); и различных абляционных покрытиях (б)

В случае, если данная технология лазерного наклёпа предполагает перекрытие импульсов с частотой большей нескольких герц, следует уделять внимание способности покрытия выдерживать многоимпульсную обработку. Оптимальным абляционным покрытием для многоимпульсной обработки является сочетание алюминиевая фольга – клейкая лента, которое обладает хорошей эффективностью поглощения лазерного излучения, высокой адгезией к любым поверхностям, возможностью использования для криволинейных поверхностей, способностью выдерживать до 4-х повторных лазерных ударов (Рисунок 5, б)

Влияние непосредственных параметров процесса ЛУО на микротвёрдость было проанализировано с помощью регрессионных моделей. В качестве выходного параметра в данной работе использовалась микротвёрдость поверхности. Входными параметрами были плотность энергии, диаметр пятна и количество повторных облучений. Выбор именно этих параметров был обусловлен установленными ранее возможностями к переходу на ЛУО низкоэнергетическими источниками. Наибольшее согласование с экспериментом показала регрессионная зависимость (8). Обобщённые результаты многофакторного исследования показаны на Рисунке 6.

$$HV = 226,64 - 0,412 \cdot D + 44,04 \cdot N + 0,079 \cdot q - 0,11 \cdot DN - 0,0007 \cdot Dq - 0,3005 \cdot Nq + 0,001 \cdot DNq + 0,00053 \cdot D^2 + 0,5 \cdot N + 0,00166 \cdot E^2 \quad (8)$$

где E – плотность лазерной энергии (Дж/см²), D – диаметр пятна (см), q – количество повторных ударов.

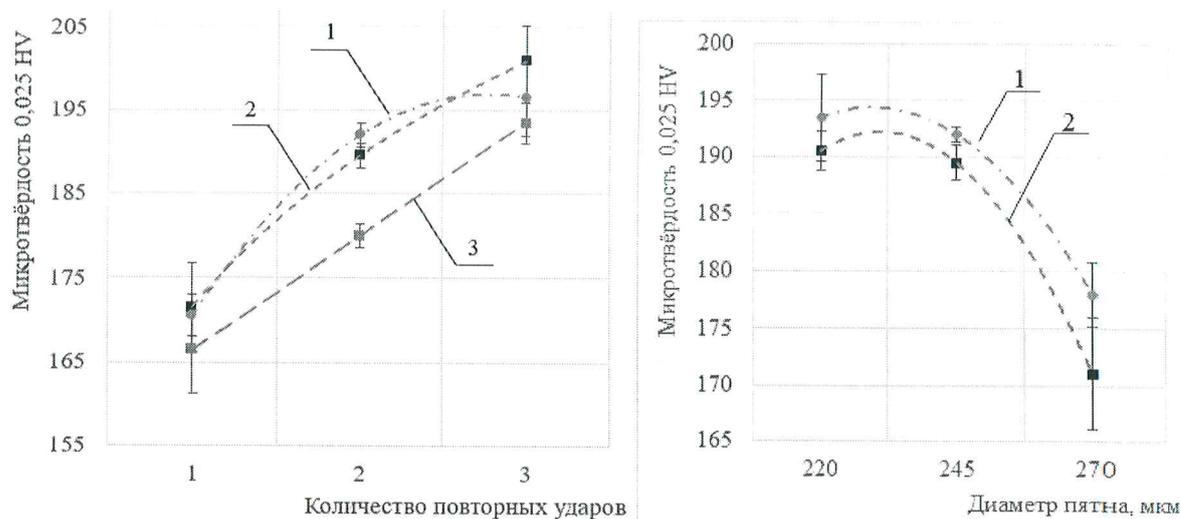


Рисунок 6.

Зависимость микротвёрдости поверхности после ЛУО от повторных облучений (а) при различных энергиях в импульсе (1 – 120 мДж, 2 – 90 мДж, 3 – 60 мДж) и от диаметра пятна (1 – 120 мДж, 2 – 90 мДж)

Анализ проведённого исследования показал, что повторное облучение при правильном выборе технологических покрытий позволяет нивелировать негативный эффект острой фокусировки. Количество повторных облучений всегда приводит к увеличению эффекта ЛУО, а изменения размера пятна при постоянной энергии в импульсе – к снижению. Отдельно увеличение размера пятна в варьлируемых диапазонах режимов, очевидно, имеет более слабый эффект чем интенсивность.

Так как острая фокусировка и многократное облучение предполагает обработку с перекрытиями импульсов, было проведено экспериментальное исследование, которое выявило оптимальную стратегию сканирования поверхности лучом, позволяющую добиться более равномерного распределения характеристик. Кроме того, получена зависимость равномерности свойств от коэффициента перекрытия лазерного луча. Были исследованы перекрытия 25, 50 и 70 %. При перекрытии в 50 % было получено наименьшее колебание микротвёрдости и умеренное увеличение средней шероховатости при стабильном трёхкратном облучении.

В Главе 5 рассмотрены перспективы практического применения ЛУО низкоэнергетическими источниками. Показаны возможности по постобработке сварных швов алюминиевых сплавов, также разработаны режимы получения регулярного микрорельефа на поверхностях изделий, работающих в условиях износа, позволяющие получать геометрию микрорельефа аналогичную традиционным способам.

Исследование влияния ЛУО на микротвердость поверхности аргонодуговых сварных соединений из сплава АМгб показало, что применение ЛУО существенно (на уровень от 60 до 70 %) увеличивает микротвердость в переходной зоне и сварном шве (Рисунок 7). Такое повышение микротвердости может свидетельствовать об изменении остаточных напряжений в этой зоне.

Измерение микротвердости проводили на расстоянии около 150 мкм от поверхности. Результаты изменений остаточных напряжений рентгеновским методом в переходной зоне аргонодугового сварного соединения сплава АМгб до и после ЛУО показали, что после сварки в переходной зоне образуются остаточные напряжения растяжения около 15 МПа. Применение ЛУО переводит эти напряжения из растягивающих в сжимающие с величиной в до -50 МПа.

Обнаруженное изменение микротвердости связано с процессом наклепа и пластической деформацией поверхностных слоев металла, что приводит к изменению знака напряжений. В наиболее опасном участке сварного соединения у линии сплавления шва с основным металлом после ЛУО возникают сжимающие напряжения, что должно привести к повышению усталостной прочности сварной конструкции.



Рисунок 7.

Распределение микротвердости в сварном соединении сплава АМгб, полученном аргонодуговой сваркой, до (1) и после (2) ЛУО

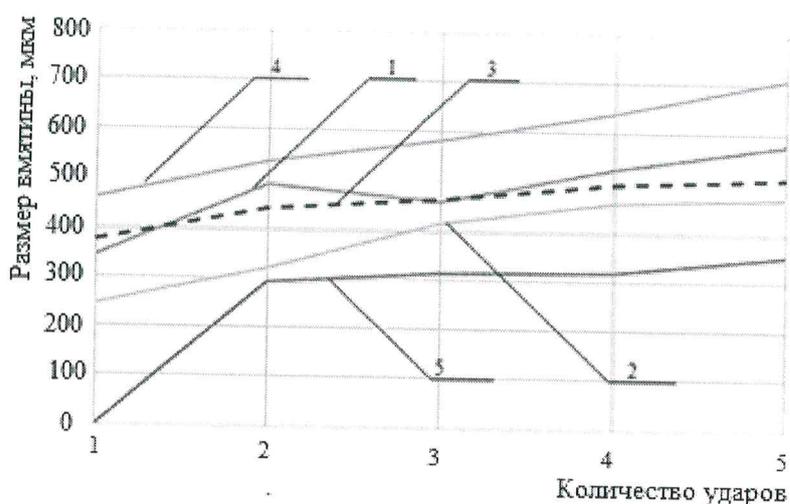
Рентгеноструктурное и оптическое исследования микроструктуры образца до и после ЛУО показали, что лазерное воздействие приводит к тому, что вместо грубой сетки включений, содержащих β -фазу, металл приобретает структуру с тонкими (нитевидными) выделениями β -фазы. В сочетании со сжимающими напряжениями, это должно способствовать повышению коррозионной стойкости ЗТВ. В структуре также появляется фаза Mg_2Si . Её твёрдость при нагрузке 10 г составляет 176 НВ, что выше твёрдости матрицы (118 НВ) и твёрдости β -фазы (156 НВ).

Анализ традиционных подходов к нанесению регулярного микрорельефа на поверхности издклий, работающих в условиях износа показал, что к существенным улучшениям процесса трения приводит массив поверхностных микровмятин размерами около 400 мкм в диаметре и до 30 мкм в глубину. Влияние параметров процесса ЛУО на глубину вмятин основывалось на регрессионном анализе. Входными параметрами также являлись энергия в импульсе, повторные облучения и диаметр пятна.

Результатом проведенных расчетов является следующая зависимость:

$$L = -645,998 + 4,663 \cdot D + 30,794 \cdot N + 0,512 \cdot q - 0,107 \cdot DN - 0,002 \cdot Dq - 0,116 \cdot Nq + 0,0005 \cdot DNq - 0,008 \cdot D^2 - 0,375 \cdot N + 0,0002 \cdot E^2 \quad (9)$$

Коэффициенты регрессии прошли проверку на значимость, а модель на адекватность, так что она может использоваться для прогнозирования размеров вмятин после ЛУО.



- 1 – 220 мкм, 60 мДж,
- 2 – 245 мкм, 120 мДж,
- 3 – 220 мкм, 120 мДж (теоретический),
- 4 – 270 мкм, 120 мДж,

Рисунок 8.

Зависимости размеров вмятин от параметров процесса ЛУО в сравнении с теоретическими расчётами

Были получены и проанализированы фотографии геометрий полученных вмятин при различных режимах. Результаты измерений размеров вмятин при указанных режимах ЛУО (Рисунок 8) показывают отличия от теоретически рассчитанных, но корреляционная взаимосвязь явно прослеживается. После анализа зависимостей был получен корреляционный коэффициент (10), который может использоваться в качестве рекомендаций по выбору конкретного технологического режима ЛУО для нанесения регулярных микрорельефов.

$$K = \frac{S_{\text{эксп}} - d_{\text{п}}}{(S_{\text{теор}} - d_{\text{п}}) \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{\text{пор}}}\right)} \quad (10)$$

где $S_{\text{эксп}}$ – экспериментально измеренный размер вмятины; $S_{\text{теор}}$ – теоретически рассчитанный размер вмятины; $d_{\text{п}}$ – диаметр лазерного пятна; F – плотность потока лазерного излучения, Дж/см²; $F_{\text{пор}}$ – пороговая плотность потока, Дж/см².

Коэффициент корреляции K , рассчитанный по зависимости (10) составил значение 1,85. Его применение дало согласование теоретических и экспериментальных данных при различных плотностях лазерной энергии со средней ошибкой в 12,72 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Переход к низкоэнергетическим лазерным источникам при ЛУО может быть осуществлён за счёт сочетания снижения диаметра пятна, энергии в импульсе и повторных облучений. Это позволяет добиваться результатов, сопоставимых с облучениями большими размерами пятен, но приводит к снижению энергетических требований к лазерным источникам для ЛУО.
2. Разработана теоретическая модель, позволяющая производить оценку величины и глубины образующихся после лазерной ударной обработки остаточных сжимающих напряжений, учитывающая влияние технологических условий процесса на эффективность преобразования лазерной энергии
3. При больших толщинах прозрачной жидкой среды увеличение угла падения лазерного луча не приводит к изменению эффективности абляции, что имеет практическое значение для обработки сложной геометрии.
4. Были определены оптимальные технологические покрытия для осуществления процесса ЛУО низкоэнергетическими источниками, которые позволяют эффективно осуществлять обработку криволинейной геометрии, а также выдерживать до 4-х повторных лазерных ударов.
5. Разработана регрессионная модель процесса ЛУО низкоэнергетическими источниками, связывающая микротвёрдость поверхности и основные параметры ЛУО,
6. Экспериментально показано, что повторное облучение при правильном выборе технологических покрытий позволяет нивелировать негативный эффект острой фокусировки,
7. Для ЛУО с перекрытиями выявлена оптимальная стратегия сканирования луча, позволяющая добиться более равномерного распределения характеристик поверхности, получена зависимость равномерности свойств от коэффициента перекрытия лазерного луча, показано, что оптимальным перекрытием является 50 %.
8. Лазерная ударная обработка сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 позволил изменить растягивающие напряжения в околошовной зоне, возникающие после сварки, на сжимающие с величиной в 3-4 раза большей, чем до обработки.
9. Установлено, что лазерная ударная обработка позволяет ликвидировать снижение микротвёрдость в переходной зоне сварного, что в сочетании с образованием в этой зоне остаточных сжимающих напряжений может служить критерием повышения механических характеристик соединения.
10. Деформационные процессы, возникающие под действием лазерной ударной обработки, приводят к измельчению микроструктуры, выделению упрочняющих фаз в объёме обработанной зоны, что вкупе с образованием зоны

остаточных сжимающих напряжений повышает механические свойства соединения.

11. Лазерная ударная обработка является актуальной и быстроразвивающейся технологией поверхностного упрочнения с постоянно расширяющейся областью применения. Благодаря локальности, бесконтактности и удобству автоматизации лазерная ударная обработка может быть эффективно использована для повышения усталостной прочности, сопротивления износу и других характеристик ответственных изделий.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зо Й. М., Бурак А. В., Мельников Д. М. Исследование влияния количества импульсов на характеристики сплавов после лазерного наклёпа // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии», Москва, 2016. С.1-6.

2. Зо Йе Мьят., Мельников Д.М. Исследование влияния параметров процесса лазерного наклепа на повышение характеристик сварных швов алюминиевых сплавов // вторая международная конференция Электронно-лучевая сварка и смежные технологии «Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Москва, 2017. С. 196 – 203.

3. Шиганов И.Н., Мельников Д.М., Зо Йе Мьят. Лазерное ударное упрочнение алюминиевых материалов // XXVIII международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине», Дубна, 2017. С. 43 – 47.

4. Шиганов И. Н., Мельников Д. М., Зо Йе Мьят. Влияние лазерной ударной обработки на свойства сварных соединений алюминиевых сплавов // Сварочное производство. № 4.2018. С. 12 – 17.

5. Зо Йе Мьят [и др.]. Перспективы применения лазерного наклёпа для повышения характеристик деталей, получаемых методом селективного лазерного плавления // Научно-технические технологии в машиностроении. № 7. 2018. С. 32 – 37.