

На правах рукописи

Шепелев Александр Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ
ПОСТОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 2.5.5.
Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2026 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ковровский государственный технологический университет имени В.А. Дегтярева»

Научный руководитель: Солохин Сергей Александрович
кандидат физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой
лазерных и оптико-электронных систем
КГТУ им. В.А. Дегтярева

Официальные оппоненты: Горунев Андрей Игоревич
доктор технических наук, доцент, профессор
научно-образовательного центра
«Конструкционные и функциональные
материалы»
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Петровский Виктор Николаевич
кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры лазерной физики
Института лазерных и плазменных технологий
НИЯУ МИФИ, Руководитель Лазерного
центра НИЯУ МИФИ

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в _____ час. на заседании
диссертационного совета 24.2.331.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 263-66-33 *3628

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного
совета 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 «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.331.02, кандидат
технических наук, доцент



А. В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современное машиностроение характеризуется внедрением аддитивных технологий. Активно осваиваются производственные технологии изготовления широкого номенклатурного ряда деталей для ответственных отраслей гражданского и специального приборостроения, медицины, IT, микроэлектроники и пр.

Однако в силу особенностей реализации технологии детали и изделия, полученные с применением соответствующих методов, часто требуют последующей дополнительной обработки для удаления остаточного материала (технологические перемычки, опоры-поддержки, наплывы) и/или модификации поверхности (микроструктурирование). Для полимерных изделий данная задача решается достаточно просто, однако для металлических материалов производственная операция оказывается более трудо- и энергоемкой и требует применения специализированного оборудования, что влияет на общую производительность и эффективность процесса. Кроме того, дополнительно в период жизненного цикла изделия может возникать необходимость внесения конструктивных изменений, например, при расширении функционального назначения детали (формирование зональной матрицы отверстий или дополнительных каналов, локальная поверхностная обработка и пр.).

В качестве перспективного универсального инструмента оказывается перспективным применение лазерных технологий, которые обеспечивают локальность воздействия, гибкость управления технологическими режимами и высокую степень автоматизации процесса. При этом ключевой задачей для их производственного внедрения, по-прежнему, остается повышение производительности и энергетической эффективности. В этом ключе значительным потенциалом обладают технологические лазерные излучатели с генерацией импульсов короткой и ультракороткой длительности. Однако, главным сдерживающим фактором для их широкого производственного внедрения остается высокая стоимость. Кроме того, особенности физико-технических процессов, протекающих в зоне воздействия импульсов ультракороткой длительности (интенсивное плазмообразование, нелинейные процессы оптического пробоя и пр.) значительно сужают возможности их функционального применения. Вместе с тем, потенциал энергетических и технологических возможностей, более доступных и наиболее распространенных технологических лазерных комплексов, генерирующих импульсы микро- и миллисекундной длительности с высокой энергией, не реализован в полной мере. Их энергетическую и технологическую эффективность, определяемую оптимальным балансом процессов плавления, испарения и давления отдачи паров, можно существенно повысить, управляя параметрами воздействующих лазерных импульсов применительно к свойствам материала и физическим процессам в зоне лазерной обработки. Особый научный и практический интерес представляют комбинированные режимы генерации излучения, которые, синтезируя

преимущества импульсов различной длительности, позволяют достигать требуемые технологические показатели с большей производительностью.

Таким образом, реализация адаптированных к условиям и свойствам материала энергоэффективных параметров лазерного воздействия, реализация, так называемых, «smart-режимов» технологической обработки, является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит существенно повысить производительность обработки перспективных функциональных и конструкционных материалов, изготовленных с применением аддитивных технологий производства, снизить интегральные энергетические и финансовые затраты.

Целью работы является повышение производительности лазерной постобработки деталей из аддитивных металлических материалов путем разработки и реализации энергоэффективных комбинированных режимов лазерного воздействия, основанных на перераспределении энергии по временному профилю импульсов.

Для достижения поставленной цели работы требуется решить следующие **научные задачи:**

1. Разработать математическую модель процесса импульсного лазерного воздействия на аддитивно произведенные металлические материалы с пористой микроструктурой, учитывающую зависимости теплофизических свойств материалов от параметров пористости.

2. На основе разработанной модели теоретически обосновать и разработать энергоэффективный метод лазерного разрушения (удаления) материала, основанный на перераспределении энергии по временному профилю лазерного импульса, для управления механизмами плавления, испарения и выплеска с целью увеличения производительности лазерной обработки.

3. Разработать и создать лабораторный технологический импульсно-периодический твердотельный лазер с системой управления временным профилем генерируемых импульсов, обеспечивающий реализацию комбинированных режимов воздействия на материалы.

4. Провести экспериментальные исследования эффективности разрушения классических и аддитивных металлических конструкционных материалов импульсами в различных режимах генерации технологического твердотельного лазера.

Научная новизна работы заключается в том, что:

– разработана математическая модель импульсного лазерного воздействия на аддитивные металлические материалы с пористой микроструктурой, отличающаяся тем, что учитывает зависимости теплофизических параметров материала от пористости и распределение энергии по временной форме лазерного импульса;

– теоретически обоснован и разработан новый энергоэффективный метод лазерного разрушения аддитивных металлических материалов, основанный на перераспределении энергии по временной форме воздействующих лазерных импульсов, что позволяет инициировать конкретный доминирующий механизм

скоростного разрушения материала для повышения производительности обработки;

- установлено и теоретически обосновано оптимальное амплитудно-временное распределение энергии по временной форме комбинированного лазерного импульса, обеспечивающее, за счет интенсификации механизма удаления расплава в режиме выплеска, улучшение качества, уменьшение ЗТВ в 7-10 раз сокращение времени обработки в 1,1 - 16 раз для традиционных и аддитивных металлических материалов с разняющимися теплофизическими свойствами.

Теоретическая значимость работы состоит в получении новых фундаментальных знаний, вносящих вклад в развитие теории процессов физико-технической обработки материалов, а именно:

- получены новые знания о механизмах взаимодействия импульсного лазерного излучения с металлическими материалами, обладающими пористой микроструктурой, характерной для аддитивных технологий их получения;

- разработана и верифицирована математическая модель импульсного лазерного воздействия на пористые аддитивные металлические материалы, являющаяся инструментом для фундаментального исследования, прогнозирования и оптимизации технологического процесса.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработан новый энергоэффективный метод импульсно-периодической лазерной постобработки аддитивных металлических материалов (технологических опор), адаптированный к их отличительным свойствам, позволяющий повысить качество и производительность финишной обработки аддитивно произведенных деталей;

- для количественной оценки влияния режима воздействия предложен и применен новый критерий – коэффициент интенсификации процесса, характеризующий эффективность воздействия на материалы лазерных импульсов различной временной формы в сравнении с классическими импульсами гауссовой временной формы эквивалентной энергии и длительности;

- определено оптимальное амплитудно-временное распределение энергии лазерных импульсов, позволяющее сократить длительность обработки и повысить ее качественные характеристики: обеспечено уменьшение зоны термического влияния в 7–10 раз и снижение шероховатости поверхности на порядок для традиционных и аддитивных материалов;

- результаты работы прошли предварительную производственно-технологическую апробацию на специализированном оборудовании для обработки прототипов специзделий на предприятии КБ «Арматура» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» (г. Ковров, Владимирская обл.), которая подтвердила эффективность предложенных решений для повышения качества и сокращения времени обработки исследованных прототипов специзделий.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы математического моделирования и комплекс экспериментальных исследований. Математическое моделирование процессов

взаимодействия лазерного излучения с веществом базировалось на численном решении уравнения теплопроводности методом дробных шагов по времени с применением неявной конечно-разностной схемы. Математическое моделирование выполнялось с использованием современных средств вычислительной техники и системы компьютерной алгебры MathCAD. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях на базе КГТУ им. В.А. Дегтярева с использованием современных средств измерений и обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель, описывающая процесс взаимодействия импульсного лазерного излучения с металлическими материалами, полученными методом аддитивного производства, учитывающая зависимости теплофизических параметров материала от пористости и позволяющая выявлять доминирующий механизм разрушения материалов в зависимости от параметров воздействующего лазерного импульса;
- научно обоснованный энергоэффективный метод повышения производительности лазерной постобработки аддитивных металлов, основанный на перераспределении энергии по временной форме лазерных импульсов, воздействие которых обеспечивает интенсификацию механизма удаления материала за счет комбинирования ключевых механизмов: плавления, испарения и удаления расплава в режиме выплеска;
- установленные зависимости времени разрушения классических и аддитивных металлических материалов различной толщины от временного профиля воздействующих лазерных импульсов, доказывающие повышение эффективности и улучшение качества обработки, по сравнению с технологическими режимами облучения материалов лазерными импульсами стандартной (гауссовой) формы.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность выводов и результатов работы подтверждается:

- использованием фундаментальных законов физики взаимодействия лазерного излучения с веществом при разработке математической модели;
- применением известных, апробированных численных методов и их корректной программной реализацией в среде MathCAD;
- соответствием результатов экспериментальных исследований результатам математического моделирования;
- использованием современного сертифицированного лабораторного оборудования и средств измерений.

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на различных всероссийских и международных профильных конференциях: II Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы машиностроительных производств». М., 2025; X и XVI Всероссийской школе Национального центра физики и математики и Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по

лазерной физике и лазерным технологиям. Саров (Нижегородская обл.), 2016, 2025; XXIII Школе-конференции «Новые материалы: Перспективные технологии и методы исследования материалов». М., 2025; Международной научной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021», «Ломоносов-2025». М., 2021, 2025; XI и XII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз». М., 2025, 2026; Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». М., 2024; X Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2021; IX Всероссийской конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М., 2016; XIV Всероссийском молодежном Самарском конкурсе-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Самара, 2016.

По теме диссертации получен грант Российского научного фонда (2025-2026 гг.), проект РНФ №25-29-20294: «Разработка технологии скоростной лазерной постобработки аддитивно произведенных материалов» (руководитель – Солохин С.А., ответственный исполнитель – Шепелев А.Е.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Название и содержание материалов диссертационной работы соответствует пунктам 2, 3 и 4 раздела «Области исследований» паспорта специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки:

- теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий;

- исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки, инструмента;

- создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных трудах, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; 3 публикации, индексируемые в базе данных Scopus; 12 статей и докладов, опубликованных в сборниках трудов научных конференций, общим объемом 3,2 п. л. / 1,83 п. л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов и заключения, списка литературы. Материал диссертации изложен на 114 страницах машинописного текста, включая 63 рисунка, 9 таблиц и список литературы, содержащий 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель диссертационной работы. Определена научная новизна, полученных в работе результатов, а также их практическая и теоретическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 работы посвящена анализу состояния проблемы повышения производительности лазерной обработки металлических материалов, полученных как традиционными технологиями, так и методами аддитивного производства.

Показано, что традиционный подход повышения производительности лазерной обработки основан на улучшении энергетических параметров воздействующего излучения, а также на использовании лазерных импульсов короткой и ультракороткой длительности, применение которых может приводить к нежелательным эффектам (интенсивное плазмообразование).

Отмечена сохраняющаяся актуальность использования микро- и миллисекундных лазерных импульсов высокой энергии.

По результатам проведенного анализа установлено, что одним из наиболее перспективных способов повышения энергоэффективности и производительности обработки материалов, в том числе аддитивных металлов, является использование комбинированных импульсов сложной временной формы, сочетающих преимущества различных режимов лазерного воздействия.

В **Главе 2** изложены теоретические основы исследования. Разработана математическая модель тепловых процессов, возникающих при воздействии импульсно-периодического лазерного излучения на металлические материалы, полученные с применением как традиционных, так и аддитивных технологий производства.

Физической основой модели является двумерное нестационарное уравнение теплопроводности в осесимметричной цилиндрической системе координат. Теплофизические параметры принимались независимыми от температуры, что допустимо ввиду их относительного изменения не более 10% в диапазоне 300 К – температура плавления. Численное решение уравнения реализовано с применением устойчивой неявной конечно-разностной схемы и метода дробных шагов по времени, что обеспечивает адекватный расчет при высоких градиентах температуры, характерных для лазерного воздействия.

Ключевая особенность модели – учет сложно сообщающейся пористости аддитивных материалов, принципиально меняющей их отклик на лазерное воздействие по сравнению с традиционными материалами. Эта специфика учитывается через функциональную зависимость эффективных теплофизических и оптических свойств материала от объемной доли пористости (Φ).

В частности, теплопроводность и удельная электропроводность материала описывается соотношениями для сред со сложносообщающимися порами:

$$\lambda_T(\Phi) = \lambda_{T0} \times (1 - \Phi)^3 \quad (1)$$

$$\sigma(\Phi) = \sigma_0 \times (1 - \Phi)^3, \quad (2)$$

где λ_{T0} и σ_0 – теплопроводность и удельная электропроводность плотного материала ($\Phi=0$).

Удельная теплоемкость и плотность материала приняты линейно зависящими от величины пористости:

$$c(\Phi) = c_0 \times (1 - \Phi) \quad (3)$$

$$\rho(\Phi) = \rho_0 \times (1 - \Phi), \quad (4)$$

где c_0 и ρ_0 – теплоемкость и плотность материала при $\Phi=0$.

Коэффициент поглощения на границе раздела рассчитывается по формулам Френеля, где диэлектрическая проницаемость определяется через зависимость от пористости удельную электропроводность. Данный подход позволяет корректно учесть влияние пористости на величину энерговклада лазерного излучения в материал.

Моделирование выполнено для четырех материалов:

- сталь 3 (традиционная технология);
- титан BT1-0 (традиционная технология);
- никель 50Н, полученный SLM ($\Phi=5\%$, неравномерное распределение);
- сталь 10X17H13M2T, полученная SLM ($\Phi=10\%$, квадратичное распределение по глубине).

В модели учитывались следующие параметры воздействующего излучения: энергия импульса 1,2 Дж, длительность 3 мс, частота следования 12 Гц. Показано, что при данной частоте поверхность остывает до начальной температуры между импульсами, что позволяет перейти к рассмотрению единичного импульса.

Исследованы три временные формы воздействующего лазерного импульса:

- прямоугольный импульс (классической формы);
- импульс сложной формы, представляющий собой комбинацию длинного импульса (3 мс, 1 Дж) и короткого импульса (0,5 мс, 0,2 Дж), с задержкой 2,5 мс;
- комбинированный импульс – сложный импульс, в котором короткий импульс заменен цугом наносекундных импульсов с частотой модуляции 50 кГц (энергия наносекундного импульса 8 мДж, длительность 100 нс).

Для SLM-никеля 50Н со средней объемной пористостью 5% установлено, что воздействие прямоугольного лазерного импульса обеспечивает глубину испарения 12,3 мкм при превышении давления отдачи паров над капиллярным давлением в 11 раз. Применение импульса сложной временной формы позволяет увеличить глубину испарения до 15,2 мкм, что на 24% выше, чем при прямоугольном импульсе, при этом соотношение давлений возрастает до 59 раз. Использование комбинированного импульса с частотой модуляции 50 кГц дает глубину испарения 15,5 мкм, а давление отдачи паров превышает капиллярное давление в 155 раз, что более чем в 14 раз выше, чем при прямоугольном импульсе. Кроме того, комбинированный импульс обеспечивает существенное снижение термического влияния обработки: температура поверхности на расстоянии 400 мкм от центра пятна составляет 617 К против 713 К для прямоугольного импульса, что соответствует уменьшению на 96 К (13%).

Для SLM-стали 10X17H13M2T, характеризующейся объемной пористостью 10% с квадратичным распределением по глубине и максимальной пористостью в поверхностном слое, высокая доля пор приводит к снижению коэффициента отражения и, соответственно, росту доли поглощенной энергии лазерного

излучения. Установлено, что воздействие прямоугольного лазерного импульса обеспечивает максимальную среди всех исследуемых форм глубину испарения, достигающую 51 мкм, при превышении давления отдачи паров над капиллярным давлением в 20 раз. Применение импульса сложной временной формы позволяет увеличить соотношение давлений до 60 раз, однако глубина испарения несколько снижается и составляет 49 мкм. Воздействие комбинированного импульса приводит к дальнейшему снижению глубины испарения до 42 мкм, однако давление отдачи паров достигает рекордного значения $3,5 \times 10^7$ Па, превышая капиллярное давление в 3763 раза. Кроме того, комбинированный импульс обеспечивает наименьшее термическое влияние на материал: температура поверхности на расстоянии 400 мкм от центра пятна составляет 750 К, что на 148 К (16%) ниже, чем при прямоугольном импульсе (898 К), и на 13 К ниже, чем при импульсе сложной формы (763 К).

Результаты расчетов для традиционных материалов также демонстрируют эффективность использования комбинированных импульсов для повышения производительности лазерной обработки.

На основе выполненных теоретических исследований предложены рекомендации по выбору временной формы лазерного импульса:

- для интенсификации удаления расплава в режиме выплеска для традиционных и аддитивных материалов наиболее эффективен комбинированный импульс — превышение давления отдачи паров над капиллярным давлением возрастает на порядки (до 3763 раз для SLM-стали);
- для минимизации термического влияния (температуры материала за пределами зоны воздействия) также предпочтителен комбинированный импульс — снижение температуры на 13–16% по сравнению с действием прямоугольного импульса.

В **Главе 3** представлены результаты экспериментальной апробации разработанных в **Главе 2** теоретических положений. Целью исследований являлось количественное и качественное определение влияния временной формы воздействующих лазерных импульсов на производительность обработки и механизм разрушения как традиционных (сталь 3, ВТ1-0), так и аддитивных (никелевый сплав 50Н, сталь 10Х17Н13М2Т, метод SLM) материалов.

Экспериментальные исследования выполнены на разработанном технологическом YAG:Nd³⁺-лазере с ламповой накачкой и активной системой управления, обеспечивающей возможность работы лазера в трех основных режимах (рисунок 1):

- режим свободной генерации с формированием классических импульсов гауссовой формы;
- режим свободной генерации, формирующий импульсы сложной временной формы;
- режим генерации комбинированных лазерных импульсов.

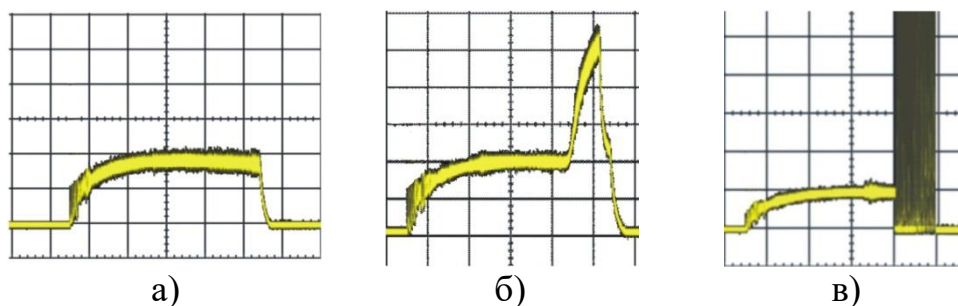


Рисунок 1 – Временные формы лазерных импульсов: а) классический импульс гауссовой формы; б) импульс сложной формы; в) комбинированный импульс

Эксперименты проводились при фиксированных параметрах воздействующих лазерных импульсов (цугов): энергия 1,2 Дж, длительность 3 мс, частота следования 12 Гц.

Основным измеряемым параметром являлось время сквозного разрушения образца, фиксируемое фотоприёмником за мишенью. Для количественной оценки влияния временной формы импульса введён коэффициент интенсификации процесса:

$$K_{int} = \frac{t_G}{t_{sp}}, \quad (5)$$

где t_G – время разрушения образца при воздействии импульсами гауссовой временной формы; t_{sp} – время разрушения образца при воздействии импульсами модифицированной формы. Значение $K_{int} > 1$ свидетельствует о повышении производительности обработки по сравнению с режимом воздействия импульсами гауссовой временной формы.

Для качественного анализа физических механизмов разрушения материалов, методами оптической микроскопии исследовалась морфология зон разрушения.

Для **традиционных материалов** установлено, что применение импульсов сложной формы (рисунок 1б) и комбинированных импульсов (рисунок 1в), с оптимальной частотой следования наносекундных импульсов 100 кГц, позволяет не только увеличить предельную глубину эффективной обработки с 1,2 до 1,5 мм, но и обеспечить многократное сокращение времени сквозного разрушения образцов.

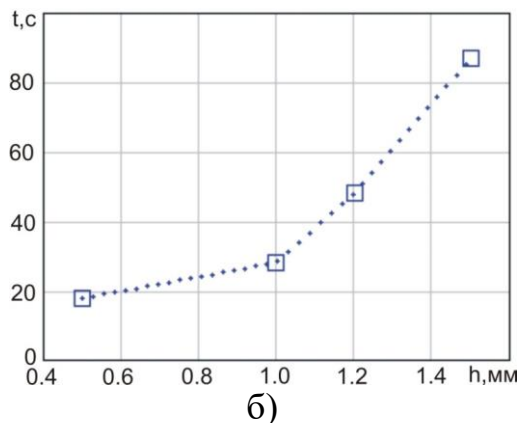
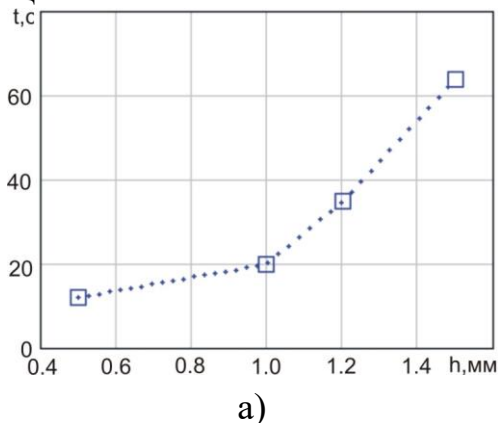


Рисунок 2 – Зависимости времени обработки импульсами сложной формы от толщины образцов из стали 3 (а) и титана ВТ1-0 (б)

Воздействие импульсами сложной временной формы на образцы из стали 3 (рисунок 2а) сокращает время обработки примерно в 1,3 раза для толщины 0,5 мм (с 16 с до 12 с), в 2,4 раза для 1 мм (с 47 с до 20 с) и в 2,1 раза для 1,2 мм (с 75 с до 35 с) по сравнению с воздействием импульсами гауссовой формы аналогичной энергии и длительности. В случае обработки титановых образцов производительность также возросла: время разрушения сократилось в ~1,8 раза для толщины 0,5 мм, в ~2,4 раза для 1 мм и в ~2 раза для 1,2 мм.

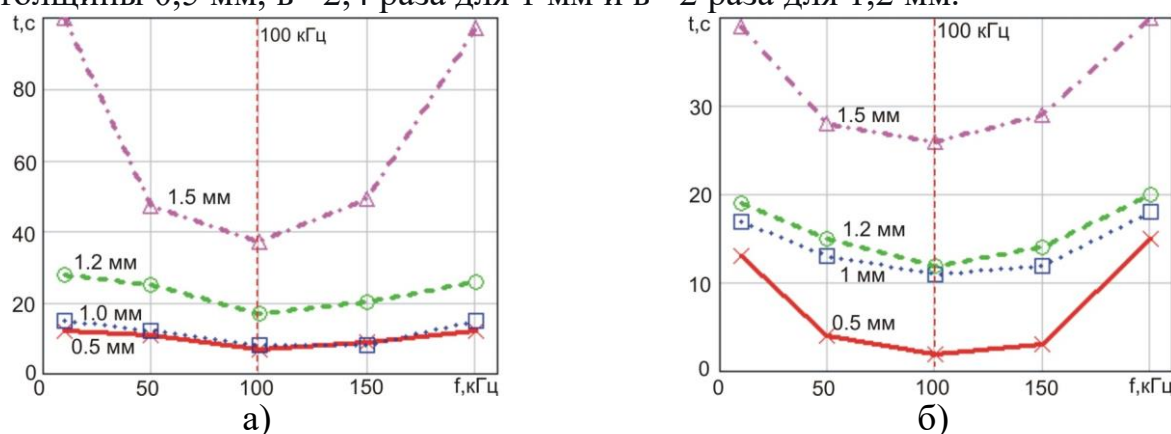


Рисунок 3 – Зависимости времени обработки комбинированными импульсами от толщины образцов из стали 3 (а) и титана ВТ1-0 (б)

В случае использования комбинированных импульсов минимальное время разрушения стальных и титановых образцов достигалось при частоте следования наносекундных импульсов 100 кГц (энергия ~4 мДж), что привело к сокращению времени обработки образцов из стали 3 в ~2,3 раза для толщины 0,5 мм (с 16 с до 7 с), в 5,9 раза для толщины 1 мм (с 47 с до 8 с) и примерно в 4,4 раза для толщины 1,2 мм (с 75 с до 37 с). Для титановых образцов в режиме воздействия комбинированными импульсами получено рекордное сокращение времени обработки: в 16 раз для толщины 0,5 мм (с 32 с до 2 с), в 8,5 раз для 1 мм (с 68 с до 8 с) и примерно в 8,2 раза для 1,2 мм (с 98 с до 12 с).

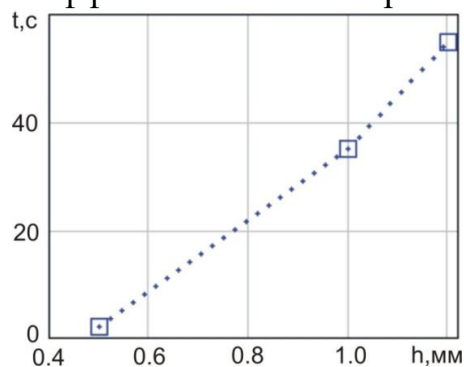
Таким образом, максимальные значения коэффициента интенсификации для стали 3 достигнуты на толщине 1 мм ($K_{\text{int}}=5,9$) для титана ВТ1-0 — на толщине 0,5 мм ($K_{\text{int}}=16$). Морфология отверстий, полученных при воздействии комбинированными импульсами, характеризуется минимальной зоной термического влияния и наличием брызг металла, что экспериментально подтверждает доминирование механизма выплеска расплава под действием давления отдачи паров, теоретически обоснованного в Главе 2.

Для **аддитивных материалов** выявлена определяющая роль пористости в эффективности лазерной обработки.

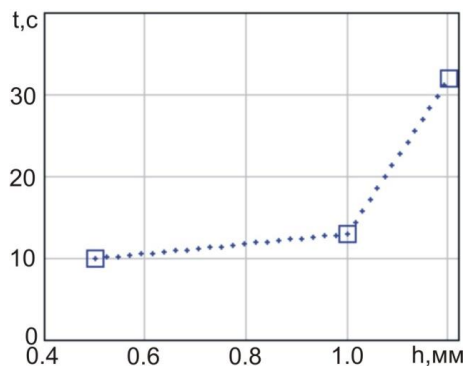
Результаты экспериментальных исследований (рисунок 4а) демонстрируют, что использование импульсов сложной временной формы обеспечило сокращение времени обработки тонкого аддитивного образца из никеля 50Н (в 9 раз), для толщин 1 и 1,2 мм прирост производительности был в ~1,6 и ~1,2 раза соответственно.

В случае воздействия импульсами сложной формы по аддитивным образцам из стали (рисунок 4б) наибольшая эффективность обеспечивается для средней

толщины образцов (1 мм). Время обработки сокращается в $\sim 2,6$ раза. Для других толщин эффект был менее выражен.



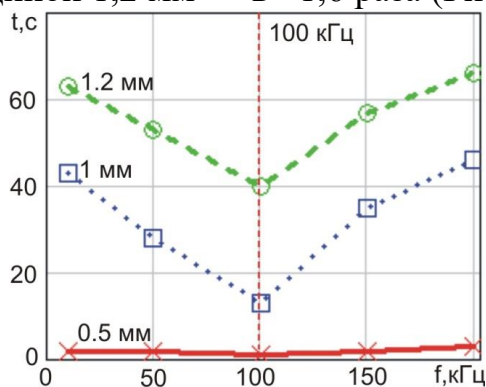
а)



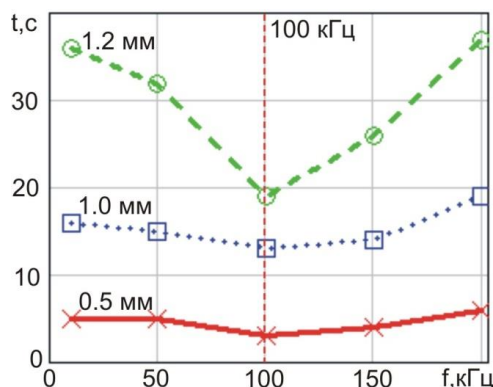
б)

Рисунок 4 – Зависимости времени обработки импульсами сложной формы от толщины аддитивных образцов из никеля 50Н (а) и стали (б)

Воздействие комбинированными лазерными импульсами при оптимальной частоте модуляции (100 кГц) обеспечивает сокращение времени обработки никелевых образцов толщиной 0,5 мм в 9 раз, толщиной 1 мм – в $\sim 4,4$ раза, толщиной 1,2 мм — в $\sim 1,6$ раза (Рисунок 5а).



а)



б)

Рисунок 5 – Зависимости времени обработки комбинированными импульсами от толщины аддитивных образцов из никеля 50Н (а) и стали (б)

В случае обработки аддитивных стальных образцов комбинированный режим подтвердил свою высокую эффективность, обеспечив максимальное сокращение времени обработки для тонкого образца (~ 4 раза) и значительное — для всех остальных толщин.

Таким образом для никеля 50Н с неравномерной объёмной пористостью 5% на толщине 0,5 мм все модифицированные лазерные импульсы обеспечивают одинаковую эффективность ($K_{int}=9,0$) за счёт эффекта сквозного проплавления. С увеличением толщины максимальную эффективность сохраняют комбинированные импульсы ($K_{int}=4,4$ для 1 мм). Для стали 10X17H13M2T с высокопористым поверхностным слоем (10%) комбинированные лазерные импульсы обеспечивают стабильно высокую интенсификацию во всём диапазоне толщин ($K_{int}=2,5...4,0$).

Морфология соответствующих отверстий также характеризуется незначительной зоной термического влияния и наличием брызг металла, что подтверждает интенсификацию механизма удаления расплава в режиме выплеска.

Выполнен сравнительный анализ качества лазерной резки тонколистовых образцов (сталь, 0,5 мм), полученных традиционными и аддитивными методами (перегородки технологической поддержки). Показано, что использование оптимальной временной формы комбинированных импульсов позволяет сократить зону термического влияния в 7-10 раз и уменьшить шероховатость поверхности на порядок по сравнению с импульсами гауссовой формы. Несмотря на структурную неоднородность аддитивных материалов, качество обработки остается стабильным: микротрещины отсутствуют, рельеф равномерный. Результаты свидетельствуют об эффективности и универсальности применения предложенного подхода.

Совокупность полученных экспериментальных данных полностью подтверждает, что управление временной формой лазерного импульса, в частности использование комбинированных импульсов, является эффективным методом повышения производительности и качества лазерной постобработки как традиционных, так и аддитивных металлических материалов.

Общие выводы и заключение

- 1. Разработана математическая модель** импульсного лазерного воздействия на аддитивные металлические материалы с пористой микроструктурой, учитывающая зависимости теплофизических параметров от пористости и распределение энергии по временной форме лазерного импульса.
- 2. Теоретически обоснован и разработан новый энергоэффективный метод** лазерного разрушения аддитивных металлических материалов (технологических опор), основанный на перераспределении энергии по временной форме воздействующих лазерных импульсов для повышения производительности обработки. Метод обеспечивает скоростное разрушение материала за счет оптимизации баланса механизмов плавления, испарения и удаления расплава в режиме выплеска.
- 3. Создан лабораторный твердотельный технологический лазер** с активной системой управления, позволяющей в реальном времени независимо варьировать параметрами лазерных импульсов, включая амплитудно-временное распределение энергии.
- 4. Установлено и теоретически обосновано оптимальное амплитудно-временное распределение энергии** по временной форме комбинированного лазерного импульса, обеспечивающее сокращение времени обработки металлических материалов в сравнении с импульсами гауссовой временной формы эквивалентной энергии и длительности.
- 5. Предложен и применен новый критерий** – коэффициент интенсификации процесса, характеризующий эффективность воздействия лазерных импульсов различной временной формы, показывающий, что применение оптимальных комбинированных лазерных импульсов позволяет сократить в 1,1–16 раз время разрушения традиционных конструкционных материалов (сталь 3, титан ВТ1-0) и аддитивных материалов (сталь 10X17H13M2T, никель 50Н).

6. Установлено, что применение комбинированных импульсов при лазерной обработке материалов превосходит эффективность действия классических импульсов гауссовой формы (при эквивалентных длительностях и энергиях импульсов) по ряду критически важных параметров, в частности, позволяет сократить зону термического влияния в 7-10 раз и повысить качество кромки реза (достигнуть более чем десятикратного уменьшения размера микронеровностей). Это позволяет эффективно решать задачу удаления технологических опор (поддержки, перемычки) при постобработке металлических деталей, полученных методами аддитивного производства.

Список публикаций по теме диссертации

1. Modeling Exposure of Additively Manufactured Metallic Materials to Laser Pulses of Complex Temporal Shape / S.A. Solokhin, A.E. Shepelev [et al.] // Physics of wave phenomena. 2025. Vol. 33, No 6. P. 463-467. (0,36 п. л. / 0,20 п. л.)

2. Лазерная обработка конструкционных материалов импульсами сложной временной формы / А.Е. Шепелев [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. № 5 (373). С. 14-23. (0,45 п.л. / 0,25 п.л.)

3. Применение комбинированных миллисекундных и наносекундных импульсов для повышения производительности лазерной обработки / А.Е. Шепелев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 12. С. 205-213. (0,42 п.л. / 0,21 п. л.)

4. Перспективные лазерные системы для перфорирования отверстий в конструкционных материалах / А.Е. Шепелев [и др.] // Научный вестник «Развитие систем управления». Сетевой научно-технический электронный журнал. 2024. № 2. С. 65-71. (0,33 п. л. / 0,17 п. л.)

5. Methods for the solid-state lasers generation modes control for the material laser processing efficiency improving / A.E. Shepelev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1822. P. 012015. (0,06 п. л. / 0,03 п. л.)

6. Application of Combined Millisecond and Nanosecond Pulses to Increase Laser Processing Productivity / A. Shepelev [et al.] // 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk. 2025. P. 154-157. (0,39 п. л. / 0,23 п. л.)

7. Влияние временной формы лазерных импульсов на механизм абляции металлических аддитивных материалов / А.Е. Шепелев [и др.] // XII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2026».: Сборник трудов. Москва, 2026. С. 81. (0,07 п. л. / 0,05 п. л.)

8. Обработка аддитивно произведенных металлических материалов лазерными импульсами сложной временной формы / А.Е. Шепелев [и др.] // II Международная научно-техническая конференция (МашТех-2025).: Сборник материалов. Москва. 2025. Т. 2. С. 300-305. (0,2 п. л. / 0,12 п. л.)

9. Воздействие лазерных импульсов сложной временной формы на металлические образцы, изготовленные методом аддитивного производства / А.Е. Шепелев [и др.] // XVI Всероссийская школа Национального центра физики

и математики и Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям.: Тез. Докл. Саров (Нижегородская обл.). 2025. С. 78–79. (0,05 п. л. / 0,03 п. л.)

10. Абляция поверхности аддитивно произведенного металла комбинированными лазерными импульсами / А.Е. Шепелев [и др.] // НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ: Перспективные технологии и методы исследования материалов.: Тез. Докл. 23-й Международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов имени профессора Б.А. Калина. Москва. 2025. С. 162-163. (0,05 п. л. / 0,03 п. л.)

11. Управление временной формой воздействующих импульсов для повышения эффективности лазерной обработки конструкционных материалов / А.Е. Шепелев [и др.] // XI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2025».: Сборник трудов. Москва, 2025. С. 64. (0,07 п. л. / 0,05 п. л.)

12. Шепелев А.Е., Кормнова О.Д., Путилов А.Г. Лазерная обработка металлических конструкционных материалов импульсами сложной временной формы // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2025». [Электронный ресурс]. Москва. 2025. (0,10 п. л. / 0,06 п. л.)

13. Шепелев А.Е. Управление временной формой импульсов для повышения эффективности функционального использования твердотельных лазеров // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике.: Сборник трудов. Москва. 2021. С. 107-109. (0,05 п. л. / 0,05 п. л.)

14. Зависимость эффективности обработки материалов от временной формы воздействующих лазерных импульсов / А.Е. Шепелев [и др.] // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021». [Электронный ресурс]. Москва. 2021. (0,06 п. л. / 0,04 п. л.)

15. Солохин С.А., Шепелев А.Е., Пегасина А.В. Обработка конструкционных материалов профилированными импульсами тандемного твердотельного лазера // Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России».: Сборник докладов. Москва. 2016. С. 320-322. (0,11 п. л. / 0,06)

16. Тандемный технологический ИАГ:Nd-лазер / А.Е. Шепелев [и др.] // XIV Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике.: Сборник трудов конференции. Москва. 2016. С. 380-386. (0,20 п. л. / 0,12 п. л.)

17. Исследование эффективности обработки конструкционных материалов комбинированными импульсами тандемного ИАГ:Nd – лазера / А.Е. Шепелев [и др.] // Десятая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям.: Сборник докладов. Саров (Нижегородская обл.). 2017. С. 297-301. (0,23 п. л. / 0,13 п. л.)