

На правах рукописи

ЖУРАВЛЕВ Михаил Михайлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ
СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТОРСИОННЫХ ВАЛОВ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель наук РФ, лауреат премии Президента РФ
Королев Альберт Викторович

Официальные оппоненты: **Багайсков Юрий Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Волжский институт
строительства и технологий (филиал)
«Волгоградский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой
«Общетехнические дисциплины»

Аничкин Александр Николаевич
кандидат технических наук,
ОАО «НПП Алмаз», г. Саратов,
инженер-программист 1-й категории
отдела САПР КИТ

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»**

Защита состоится 30 декабря 2014 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.02 в ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» по адресу: 410054, г. Саратов, Политехническая, 77, корпус 1, аудитория 319/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» и на сайте www.sstu.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Игнатъев Александр Анатольевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном машиностроении значительно возрос уровень требований, предъявляемых к новым двигателям, используемых в авиации. К ним относятся: низкий уровень шума, минимальный уровень выбросов вредных веществ в атмосферу, долговечность работы и др. Для выполнения подобных требований, а также для повышения эксплуатационной надежности необходимо совершенствовать технологии изготовления отдельных нагруженных элементов конструкции, за счет применения современных методов их обработки. В настоящей работе рассматриваются наиболее нагруженные элементы авиационных двигателей – торсионные валы.

Применение торсионного вала особенно целесообразно для уменьшения размеров и массы различных машиностроительных агрегатов, таких как двигатели, компрессоры, турбины, центрифуги, генераторы тока, статоры и другие. Главной особенностью подобных валов является то, что они работают в условиях динамических деформаций под действием знакопеременных меняющихся нагрузок. Иногда для передачи крутящего момента в приборе по конструктивным соображениям требуется применение торсионного вала, но с таким расчетом, чтобы его скручивание не превышало определенной величины. Для того чтобы контролировать и предотвращать разрушение торсионных валов от скручивания необходимо упрочнять поверхностный слой длинной цилиндрической части детали, оставляя при этом основной объем детали эластичным. Операцию упрочнения обычно выполняют на дробеметной установке с последующим низкотемпературным отпуском. Но при дробеструйной обработке на поверхности вала образуются высокие напряжения, приводят к сильной деформации. Деформацию удаляют правкой и последующим низкотемпературным отпуском. В результате этого трудоемкость изготовления таких деталей очень велика, что требует поиска более совершенной технологии.

На основе анализа работ в области лазерного поверхностного упрочнения деталей ведущих отечественных и зарубежных ученых таких, как В.Н. Дубняка, А.Г. Григорьянца, А.Н. Сафонова, В.С. Коваленко, В.С. Майорова, В.Я. Панченко, Н.Н. Рыкалина, L.W. Carloy, J. Nam, D.Q. Payne, M.E. Gerts и др., в том числе работ ученых, представляющих научную школу «Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.», Б.М. Бржозовского, В.Н. Лясникова, В.В. Мартынова, В.В. Перинского, С.К. Сперанского, и др., можно сделать вывод, что наиболее пригодной для обработки рассматриваемых в данной работе деталей является технология поверхностного упрочнения лазерным воздействием.

Изучение состояния вопроса показало, что технология лазерного упрочнения поверхностного слоя мало жестких деталей изучена недостаточно для эффективного практического применения для изготовления деталей типа торсионных валов. Поэтому тема диссертационной работы, направленная на разработку и исследование упрочняющей стабилизирующей лазерной технологии обработки мало жестких деталей типа торсионных валов является актуальной.

Целью данной работы является разработка и исследование упрочняющей стабилизирующей лазерной технологии мало жестких деталей типа торсионных валов, позволяющей многократно снизить трудоемкость изготовления деталей и повысить их качество.

Методы и средства исследований. Теоретические исследования процесса формирования упрочненного поверхностного слоя основываются на методах технологии машиностроения, расчетно-аналитических методах материаловедения и сопротивлении материалов, на математическом моделировании режимов лазерной обработки, теории многофакторного планирования эксперимента. Экспериментальные исследования базировались на металлографическом анализе, применении лазерной установки «Квант-15» для упрочнения образцов, прибора ПМТ-3 при исследовании микротвердости поверхностного слоя, установки для проведения испытания на скручивание 6365377. Разработка математической модели проводилась в среде MathCAD. Эмпирические данные обрабатывались в программе Microsoft Excel с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы:

1. На основе существующих теоретических положений лазерной закалки выполнено обоснование рационального способа лазерного упрочнения мало жестких деталей, предотвращающего их деформацию. Построена расчетная схема температурного воздействия импульсного лазерного излучения на обрабатываемую поверхность при ее перемещении относительно зоны нагрева с учетом суммирования температуры от последовательных лазерных излучений. Показано, что для мало жестких деталей типа торсионных валов наиболее рациональным является способ обработки, при котором заготовка перемещается вдоль образующей со скоростью, обеспечивающей коэффициент перекрытия точек нагрева не менее 0,5. В этом случае обеспечивается высокая равномерность глубины закалки, а после выхода обрабатываемой поверхности из зоны нагрева она еще достаточно продолжительное время находится под действием температуры отпуска, обеспечивающей стабилизацию геометрических параметров детали. Показано влияние упрочненного при лазерной обработке поверхностного слоя на циклическую прочность мало жестких деталей при скручивании.

2. Установлены закономерности влияния мощности излучения лазера, диаметра лазерного пятна в фокальной плоскости, скорости обработки и коэффициента перекрытия лазерного пятна на микротвердость упрочненного слоя и его размеры, позволяющие контролировать процесс и формировать заданные параметры.

3. В условиях поверхностного упрочнения твердотельным Nd:YAG лазером в импульсном режиме обоснована методика определения рациональных режимных параметров, обеспечивающих снижение трудоемкости изготовления мало жестких деталей типа торсионных валов.

Практическая ценность и реализация работы:

– предложена инновационная технология лазерного упрочнения торсионных валов, позволяющая в несколько раз сократить трудоемкость изготовления вала и повысить запас сопротивления усталости на 43%;

–предложена инженерная методика определения рациональных режимов лазерной обработки, позволяющая прогнозировать микротвердость и размеры упрочненного слоя;

–разработаны практические рекомендации по использованию полученных результатов исследований при изготовлении торсионных валов;

–результаты работы приняты к внедрению на предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ» (г. Саратов) для обработки торсионных валов 181.353, входящих в состав стартер-генераторов СТГ-12ТМО-1000.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается лабораторными исследованиями, выполненными с применением современных методов планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных, а также показателями эффективности опытно-производственного применения разработанной технологии и практических рекомендаций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на XVI Международной научно-практической конференции «Высокие технологии и фундаментальные исследования», Санкт-Петербург, 2010;

- на VI Международной научно-практической конференции «Технологическое обеспечение качества машин и приборов», Пенза, 2011;

- на XIII Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Санкт-Петербург, 2012;

- на ежегодных научно-технических конференциях молодых ученых СГТУ имени Гагарина Ю.А. (2010-2014 гг.);

- на заседаниях кафедры «Технология машиностроения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. (2010-2014 гг.);

- на заседаниях совета «Института электронной техники и машиностроения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. (2013-2014 гг.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 работ, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Общий объем публикаций составляет 6,8 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованной литературы из 90 наименований, 3 приложений. Диссертационная работа изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц, 48 рисунков.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Инновационная технология изготовления торсионных валов на основе стабилизирующего лазерного упрочнения поверхности возвратно-поступательным способом, обеспечивающая снижение себестоимости их выпуска за счет исключения операций рихтовки и низкотемпературного отпуска из состава технологического процесса.

2. Результаты анализа рациональной схемы лазерного поверхностного упрочнения маложестких деталей типа торсионных валов, обеспечивающую требуемую твердость поверхности и повышенную циклическую прочность на скручивание в зависимости от условий обработки, свойств материала, геометрических параметров и других факторов.

3. Закономерности лазерной обработки, отражающие влияния мощности излучения лазера, диаметра лазерного пятна в фокальной плоскости, скорости обработки и коэффициента перекрытия лазерного пятна на микротвердость упрочненного слоя и его размеры, позволяющие контролировать процесс и формировать заданные параметры.

4. Использование в процессе лазерного упрочнения торсионных валов предложенных режимов: мощности излучения лазера $P = 0,5 \text{ кВт}$, диаметра лазерного пятна в фокальной плоскости $d = 1,2 \text{ мм}$, скорости обработки $v = 10 \text{ мм/с}$ и коэффициента перекрытия лазерного пятна $K_n = 2$, обеспечивает повышение запаса циклической прочности на 43%, снижение трудоемкости в 14 раз и технологической себестоимости в 5 раз.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, сформулирована научная новизна и практическая ценность, приведены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе проанализирован существующий способ дробеструйного упрочнения торсионных валов. Выявлены недостатки технологии. Обоснована необходимость замены дробеструйной обработки на технологию поверхностного упрочнения немеханическим воздействием для обработки данного типа деталей. Произведен анализ современных способов и технических средств, применяемых при поверхностном упрочнении деталей. На основе анализа выбран способ поверхностного упрочнения деталей типа торсионных валов лазерным воздействием.

Выполнен обзор способов лазерного поверхностного упрочнения, широко применяемых на современных машиностроительных предприятиях. Рассмотрены работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные изучению вопроса поверхностного упрочнения деталей. Анализ существующих схем обработки лазером деталей типа тел вращения показал, что в большинстве технологий лазерного поверхностного упрочнения используют винтовую схему обработки. Но при такой схеме обработки расположение упрочненной зоны вдоль вектора крутящего момента вызывает разрушение детали либо образование трещин при его эксплуатации, что подтверждено испытанием на скручивание.

На основе вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследований:

1. Предложить технологию изготовления торсионных валов взамен существующей технологии дробеструйного упрочнения, альтернативной упрочняющей лазерной технологией, предотвращающей деформацию детали после ее поверхностного упрочнения.

2. Обосновать схему лазерной обработки, обеспечивающую требуемую твердость поверхности и повышенную циклическую прочность на скручивание в зависимости от условий обработки, свойств материала, геометрических параметров и других факторов.

3. Выполнить экспериментальные исследования, отражающие влияние мощности излучения лазера, диаметра лазерного пятна в фокальной плоскости, скорости обработки и коэффициента перекрытия лазерного пятна на микротвердость упрочненного слоя и его размеры, позволяющие контролировать процесс и формировать заданные параметры.

4. Разработать практические рекомендации по использованию результатов исследований и инженерную методику определения рациональных режимов лазерного поверхностного упрочнения торсионных валов.

Вторая глава посвящена обоснованию рационального способа лазерного упрочнения мало жестких деталей, предотвращающего деформацию детали и обеспечивающего повышение ее циклической прочности на скручивание. Сформулированы и обоснованы принятые в работе исходные данные и допущения. Рассмотрен механизм влияния на глубину зоны упрочнения основных технологических факторов, в том числе интенсивности излучения лазера, диаметра лазерного пятна и других факторов.

На основе анализа работ А.Г Григорьянца, И.Н. Шиганова и А.И. Мисюрова выбрана возвратно-поступательная схема перемещения заготовки в процессе лазерной закалки с периодическим поворотом детали вокруг оси. Такая схема позволяет получить однородность структуры и твердости вдоль полос упрочнения, что уменьшает искривление мало жесткого вала.

Воспользовавшись методикой расчета температуры в зоне и вне зоны лазерного излучения, разработанной В.С. Майоровым для непрерывного движущегося источника излучения, определена температура в произвольной точке обрабатываемой поверхности, возникающей от импульсного лазерного источника. Температура в произвольной точке поверхности заготовки, находящейся в зоне нагрева, равна

$$\theta = \theta_0 + \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha(\tau - t)}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha(\tau - t)}\right) \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(2 - \exp\left(-\frac{s_{\min}^2}{4 \cdot \alpha(\tau - t)}\right) - \exp\left(-\frac{s_m^2}{4 \cdot \alpha(\tau - t)}\right)\right) d\omega, \quad (1)$$

где q_0 – удельное количество тепла, выделенное источником лазерного излучения, Дж/м²; t – начальный момент времени, с; τ – время от начального момента действия источника, с; ρ – плотность материала изделия, кг/м³; α – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – удельная теплоемкость, Дж/кг К; z – расстояние от обрабатываемой поверхности вглубь металла, м; θ_0 – исходная температура материала, °С; R – радиус зоны нагрева, м; r – расстояние от центра зоны нагрева, м.

Показано, что с увеличением расстояния от центра зоны нагрева температура поверхности в зоне нагрева уменьшается. Это отмечается и в других работах. Однако нами установлено, что характер изменения температуры внутри зоны нагрева зависит от ее радиуса. При малом радиусе зоны нагрева температура резко снижается с увеличением расстояния от центра зоны. С увеличением радиуса зоны нагрева температура почти до границы зоны не меняется и только вблизи ее границы резко падает. С возрастанием расстояния от поверхности температура снижается, что подтверждают многочисленные исследования. Однако характер изменения температуры в различных точках поверхности нагрева различный. Если за 0,01 с в центре зоны нагрева температура уменьшилась почти в 4 раза, то по краю зоны – всего в 3 с небольшим раза. Это обстоятельство имеет значение для построения рационального режима нагрева и охлаждения поверхности мало жесткой заготовки.

По аналогии, определим температуру в точке вне зоны нагрева:

$$\theta = \frac{q}{4 \cdot c \cdot \rho (\pi \cdot \alpha (\tau - t))^{3/2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4\alpha(\tau-t)}} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \delta}{\sqrt{R^2/r^2 - \sin^2 \delta}} d\delta \cdot \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} s \cdot \exp\left(-\frac{s^2}{4 \cdot \alpha (\tau - t)}\right) ds \quad (2)$$

На рис. 1 приведены зависимости температуры, возникающей от очередной лазерной вспышки в точке, перемещающейся за пределами зоны нагрева на расстоянии $r > R$. В положении рассматриваемой точки обрабатываемой поверхности r_0 в зоне нагрева осуществляется очередная лазерная вспышка, которая оказывает влияние на температуру в данной точке.

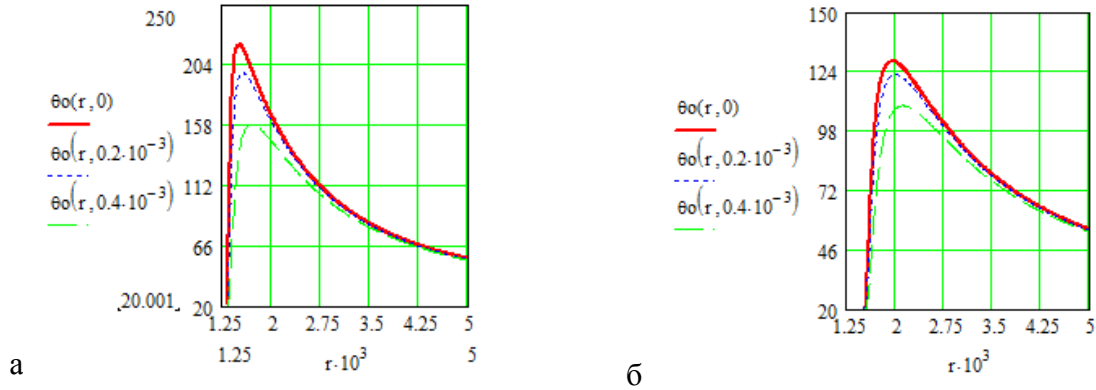


Рис. 1 – Распределение температуры $\theta(x, z)$ ($^{\circ}\text{C}$) за пределами поверхности нагрева при $z=0$; 0.2 и 0.4 мм после лазерной вспышки, возникшей на разном расстоянии от зоны нагрева: а) $r_0=1.25$ мм; б) $r_0=1.5$ мм

Как видно из графиков, температура в рассматриваемой точке повышается не мгновенно после лазерной вспышки, а спустя некоторое время, и после достижения своего максимального значения она постепенно падает. Это важная закономерность, так как обеспечивает возможность при определенных условиях сдерживать падение температуры после закалки и тем самым предотвращать появление остаточных напряжений, что важно для маложестких деталей. Представленные исследования показали, что можно обеспечить такие условия лазерной обработки, при которой температура, возникающая в зоне нагрева от лазерных вспышек, будет накладываться одна на другую, а после выхода из зоны нагрева длительное время будет находиться в зоне низкотемпературного отпуска, что предотвращает деформацию детали. Далее анализируются такие условия.

Рассмотрено изменение температуры в точке обрабатываемой поверхности, перемещающейся вдоль направления подачи заготовки относительно зоны лазерного нагрева. Координаты начального положения этой точки в момент очередной лазерной вспышки обозначим через x_0, y . Тогда в текущую точку с координатами x, y эта точка переместится за время $\tau = (x - x_0)/v$, где v – скорость перемещения обрабатываемой поверхности. Предположим, что в начальном положении эта точка находится непосредственно перед зоной нагрева. Тогда на основе (2) температура в этой точке будет равна

$$\theta(x_0, x, y) = \theta_0 + \frac{q_0}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \cdot \sqrt{\alpha(\tau - t)}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4\alpha(\tau-t)}} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \delta}{\sqrt{\frac{(x_0 + y)^2}{R^2} - \sin^2 \delta}} \cdot \left(\frac{e^{\frac{(\sqrt{(x_0+y)^2 - R^2 \sin^2 \delta - R \cos \delta})^2}{4\alpha(x-x_0)/v}}}{-e^{\frac{(\sqrt{(x_0+y)^2 - R^2 \sin^2 \delta + R \cos \delta})^2}{4\alpha(x-x_0)/v}}} \right) d\omega, \quad (3)$$

где x, y – координаты рассматриваемой точки на поверхности заготовки (m) с началом в центре окружности зоны лазерного нагрева, осью ox в направлении подачи заготовки, осью oy – направленной перпендикулярно оси ox в плоскости зоны нагрева ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$); x_0 – ордината положения точки в момент очередной лазерной вспышки; v – скорость подачи заготовки (m/c); λ – время между соседними лазерными вспышками, c .

Очередная лазерная вспышка происходит в зоне нагрева. Координаты рассматриваемой точки в этот момент равны $(x_0 + \lambda \cdot v), y$. Тогда температура в точке с координатами x, y при $x > (x_0 + \lambda \cdot v)$ будет складываться из остаточной температуры от предыдущей лазерной вспышки, определяемой (3), и остаточной температуры от последней лазерной вспышки (1):

$$\theta(x, y) = \theta(x_0, x, y) + \frac{q_0}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} \sqrt{\alpha(x - x_0 - \lambda \cdot v)}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2 \cdot v}{4 \cdot \alpha(x - x_0 - \lambda \cdot v)}\right) \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(2 - e^{-\frac{(\sqrt{R^2 - (x_0 + \lambda \cdot v + y)^2 - (x_0 + \lambda \cdot v + y) \cos \omega})^2}{4 \alpha(x - x_0 - \lambda \cdot v) / v}} - e^{-\frac{(\sqrt{R^2 - (x_0 + \lambda \cdot v + y)^2 + (x_0 + \lambda \cdot v + y) \cos \omega})^2}{4 \alpha(x - x_0 - \lambda \cdot v) / v}} \right) d\omega, \quad (4)$$

где $\theta(x_0, x, y)$ – остаточная температура, полученная точкой в положении x_0 , определяемая (3); $\theta(x_n, x, y)$ – остаточная температура в рассматриваемой точке, получаемая от лазерной вспышки в положении $x_n = x_0 + (n_m + 1) \lambda \cdot v$.

Таким образом, осуществляется суммирование температуры от последовательных лазерных вспышек. Если при нахождении точки в зоне нагрева осуществляется несколько лазерных вспышек, то осуществляется суммирование остаточной температуры от всех этих вспышек:

$$\theta(x, y) = \theta(x_0, x, y) + \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2}} \sum_{i=1}^{n(x)} \frac{1}{\sqrt{\alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v)}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v) / v}\right) \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(2 - \exp\left[-\frac{(\sqrt{R^2 - (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y)^2 \cdot \sin^2 \omega - (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y) \cdot \cos \omega})^2}{4 \cdot \alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v) / v}\right] - \exp\left[-\frac{(\sqrt{R^2 - (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y)^2 \cdot \sin^2 \omega + (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y) \cdot \cos \omega})^2}{4 \cdot \alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v) / v}\right] \right) d\omega, \quad (5)$$

где i – номер очередной лазерной вспышки; $n(x)$ – число лазерных вспышек, которое испытывала рассматриваемая точка при перемещении от начального положения x_0 в положение x , равное $n(x) = (x - x_0) / \lambda \cdot v$.

Если рассматриваемая точка обрабатываемой поверхности вышла за пределы зоны нагрева, то ее суммарная температура будет равна

$$\theta(x, y) = \frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2}} \cdot \sum_{i=1}^{n_m} \frac{1}{\sqrt{\alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v)}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v) / v}\right) \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(2 - e^{-\frac{(\sqrt{R^2 - (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y)^2 \cdot \sin^2 \omega - \cos \omega (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y)})^2}{4 \alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v) / v}} - e^{-\frac{(\sqrt{R^2 - (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y)^2 \cdot \sin^2 \omega + \cos \omega (x_0 + i \cdot \lambda \cdot v + y)})^2}{4 \alpha(x - x_0 - i \cdot \lambda \cdot v) / v}} \right) d\omega + \theta(x_n, x, y) \quad (6)$$

где n_m – число лазерных вспышек, воздействующих на рассматриваемую точку при прохождении через зону нагрева $n_m = (2\sqrt{R^2 - y^2}) / v \cdot \lambda$; $\theta(x_n, x, y)$ –

остаточная температура в рассматриваемой точке, получаемая от лазерной вспышки в положении $x_n = x_o + (n_m + 1) \cdot \lambda \cdot v$.

На рис. 2 в качестве примера представлена зависимость температуры, соответствующей (5) и (6), от положения рассматриваемой точки относительно центра зоны нагрева при ее перемещении вдоль центральной оси ox для указанных выше условий.

Рис. 2 показывает, что интервал перемещения рассматриваемой точки на обрабатываемой поверхности между двумя последовательными лазерными вспышками равен $\Delta x = \lambda \cdot v = 0,5$ мм. За начало отсчета положения рассматриваемой точки принят центр зоны лазерного нагрева $x = 0$ мм. Первое положение точки, при которой осуществляется лазерная вспышка $x = -1,25$ мм. Так как радиус зоны нагрева $R = 1$ мм, то, следовательно, рассматриваемая точка в этот момент находится за пределами зоны нагрева. При дальнейшем перемещении рассматриваемой точки до следующей лазерной вспышки ее температура плавно повышается до 120 °C, а затем падает. При последующих четырех лазерных вспышках рассматриваемая точка находится в зоне нагрева. При каждой такой вспышке ее температура резко возрастает до температуры закали, а затем резко падает.

Как известно, многоцикловая закалка обеспечивает образование благоприятной мелкодисперсной структуры металла, а ее падение до 300-400 °C ограничивает образование остаточных напряжений. После выхода рассматриваемой точки за пределы зоны нагрева ее температура сначала падает, а затем при очередной лазерной вспышке при $x = 1,25$ мм, ее температура повышается. Тем самым обеспечивается задержка резкого падения температуры. На сравнительно большом участке перемещения рассматриваемой точки от $x = 1,75$ мм до $x = 3,5$ мм температура находится в зоне низкотемпературного отпуска, что способствует удалению остаточных напряжений.

Выполненный анализ позволил предложить способ лазерного упрочнения мало жестких валов, сущность которого заключается в следующем. Упрочнение осуществляется путем изменения уровня лазерного теплового воздействия на обрабатываемую поверхность за счет обеспечения необходимой скорости перемещения обрабатываемой поверхности, которую определяют по формуле: $v = k \cdot D_{pr} / \lambda$, а шаг перемещения поверхности в поперечном направлении устанавливают равным $l = k \cdot D_{pp}$, где D_{pr} и D_{pp} размеры зоны нагрева обрабатываемой поверхности при однократной лазерной вспышке соответственно вдоль ее перемещения и в поперечном направлениях, m ; λ – такт лазерных вспышек, s ; k – коэффициент перекрытия зоны нагрева при двух последовательных лазерных вспышках,

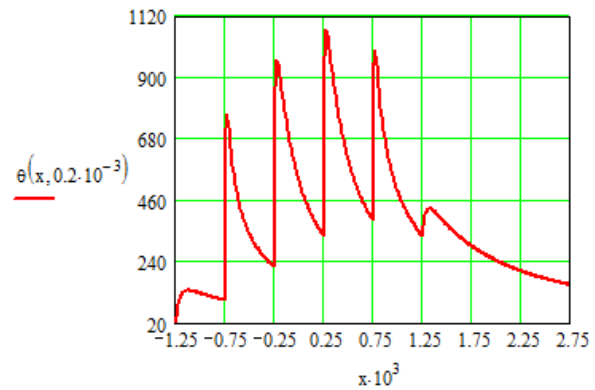


Рис. 2. Распределение температуры $\theta(x, z)$ (°C) на глубине $z = 0,2$ мм от обрабатываемой поверхности при ее перемещении относительно зоны лазерного нагрева

определяемый в зависимости от интенсивности лазерного излучения и от требуемого режима теплового воздействия: $k = 0,2 - 0,5$.

По результатам исследований с погрешностью, не превышающей 10%, определена зависимость глубины лазерной закалки от влияющих факторов:

$$z = \sqrt{4 \cdot \alpha(\tau - t) \cdot \ln \left(\frac{q}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \pi^{3/2} (\alpha(\tau - t))^{1/2} \cdot (\theta - \theta_0)} \cdot \int_0^{\pi/2} \left(1 - e^{-\frac{R^2 \cos^2 \omega}{\alpha(\tau - t)}} \right) d\omega \right)}.$$

Анализ данной зависимости показал, что она обеспечивает примерно такой же результат расчета, как и другие известные зависимости, что подтверждает адекватность представленного выше анализа.

При характере работы рассматриваемого вала в процессе эксплуатации на передачу крутящего момента он подвергается циклически изменяющимся во времени нагрузкам. Если уровень напряжений, вызванный этими воздействиями, превышает определенный предел, то они накапливаются в материале, что приводит к усталостному разрушению. Повышения сопротивления усталости можно добиться с помощью лазерной обработки поверхности детали.

Запас циклической прочности вала под действием касательных напряжений определяется по формуле

$$n_\tau = 0,6 \cdot \sigma_{-1} \cdot K_v \cdot \beta \cdot \varepsilon_o / (\tau_{\max} \cdot C_k), \quad (7)$$

где σ_{-1} – предел выносливости под действием нормальных напряжений; K_v – коэффициент учитывающий влияние поверхностного упрочнения; τ_{\max} – максимальное касательное напряжение; β – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности вала; ε_o – коэффициент влияния размера вала; C_k – коэффициент концентрации напряжений.

Рассчитанные по формуле (7) значения коэффициента запаса циклической прочности под действием касательных напряжений представлены на рис. 3.

Из расчетов видно, что коэффициент запаса циклической прочности после лазерного поверхностного упрочнения повысился на 43% по сравнению с дробеструйным упрочнением. Это объясняется тем, что при дробеструйном упрочнении сильно увеличивается шероховатость поверхности, что негативно сказывается на циклической прочности торсионного вала. Кроме того, при лазерном воздействии коэффициент влияния поверхностного упрочнения имеет большее значение, чем при дробеструйной обработке. Это объясняется тем, что в зоне лазерного воздействия образуется мелкодисперсный мартенсит, который препятствует движению дислокаций, и, следовательно, предотвращает появление усталостных трещин. Также высокая скорость охлажде-

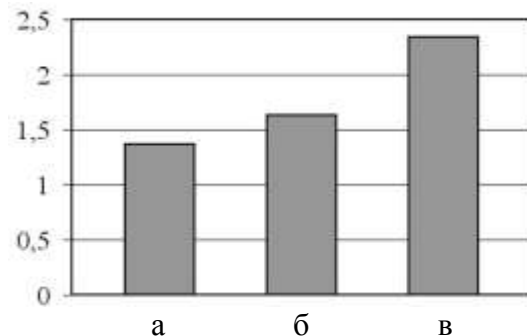


Рис. 3. Запас циклической прочности вала под действием касательных напряжений: а) без поверхностного упрочнения; б) с поверхностным упрочнением дробеструйной обработкой; в) с поверхностным упрочнением лазерным воздействием

нием, что в зоне лазерного воздействия образуется мелкодисперсный мартенсит, который препятствует движению дислокаций, и, следовательно, предотвращает появление усталостных трещин. Также высокая скорость охлажде-

ния во время лазерной обработки способствует накоплению в поверхностном слое металла остаточных напряжений сжатия, что повышает предел выносливости торсионного вала.

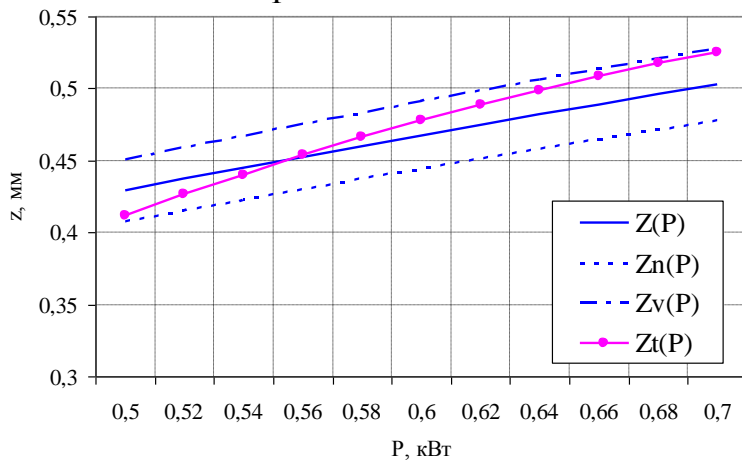


Рис. 4. Зависимость глубины упрочненного слоя от мощности лазера

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. В качестве примера на рис. 4 показаны теоретические и экспериментальные значения глубины упрочненного слоя от мощности лазера. Точками изображена теоретическая зависимость, сплошной линией – экспериментальные. Пунктирной и штрихпунктирной линиями обозначены границы доверительного интервала экспериментальных значений. Как видно, теоретические значения глубины упрочненного слоя находятся в пределах доверительных границ, что подтверждает адекватность математической модели.

В третьей главе представлена методика проведения экспериментальных исследований, а именно: методика изготовления экспериментальных образцов, методика проведения эксперимента по лазерному упрочнению и испытанию на скручивание для оценки влияние предлагаемой технологии на характер работы вала в приближенных к эксплуатационным условиям; методика проведения металлографического анализа упрочненной зоны. Обоснован выбор лазерной установки, специальной оснастки и условий проведения экспериментальных исследований.

Описаны характеристики лазерной установки Квант-15 для практической реализации предлагаемой технологии. Объектом исследования является торсионный вал 181.353 (рис. 5) конструкции ОАО «КБ Электроприбор» (г. Саратов). Вал изготавливается из прутка круглого сечения, выполненного из конструкционной высокопрочной и высоколегированной стали 25Х2ГНТА, закаленной до твердости 41...48 HRC.

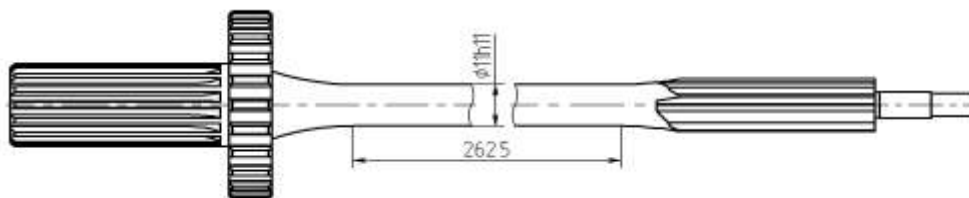


Рис. 5. Упрочняемая поверхность торсионного вала 181.353

Первая серия экспериментов позволила подтвердить выбранную возвратно-поступательную схему лазерного упрочнения торсионных валов с периодическим поворотом вала на заданный угол. Были проведены экспериментальные исследования: торсионные валы, взятые из одной партии, разделили на две группы, лазерное упрочнение одной из которых осуществили по винтовой схеме, другой – по принятой возвратно-

поступательной схеме. Режим лазерного поверхностного упрочнения обеих групп обеспечивался одинаковый. После этого их испытывали на циклическую прочность при скручивании на специальной установке 6365377 в условиях и по методике ООО «СЭПО-ЗЭМ». Как оказалось, на валах, упрочненных по винтовой схеме, после окончания испытания образовались визуально заметные трещины, а группа валов, упрочненных по возвратно-поступательной схеме, успешно прошла испытание.

Вторая серия экспериментов проводилась с целью оценки влияния мощности лазерного излучения на характер распределения микротвердости упрочненного слоя по глубине.

Третья серия экспериментов осуществлялась для установления связи основных показателей обработки, таких как микротвердость упрочненного слоя, его глубина и ширина, от параметров лазерной закалки: мощности излучения лазера, диаметра лазерного пятна в фокальной плоскости, скорости обработки и коэффициента перекрытия лазерного пятна. Для этого использовался метод многофакторного планирования эксперимента.

В четвертой главе приведены результаты и выполнен анализ экспериментальных исследований, определены рациональные условия лазерного упрочнения торсионного вала.

Получены следующие уравнения регрессии, связывающие микротвердость и размеры упрочненного поверхностного с технологическими факторами при лазерной обработке в импульсном режиме, такими как: мощность лазера P ($кВт$), диаметр лазерного пятна в фокальной плоскости d ($мм$), скорость обработки v ($мм/с$) и коэффициент перекрытия K :

$$H = 7,88 \cdot P^{0,26} \cdot d^{-0,23} \cdot v^{0,15} \cdot K^{0,2}; \quad (8)$$

$$z = 0,99 \cdot P^{0,54 \ln d + 0,29} \cdot d^{0,5} \cdot v^{-0,2} \cdot K^{-0,13}; \quad (9)$$

$$b = 2,44 \cdot P^{0,5} \cdot d^{0,48} \cdot v^{-0,33} \cdot K^{-0,28}, \quad (10)$$

где H – микротвердость упрочненного слоя, $мПа$; z и b – соответственно глубина и ширина упрочненного слоя, $мм$.

Для анализа влияния отдельных факторов построены графики. В качестве примера на рис. 6 и 7 показана зависимость микротвердости поверхностного слоя от мощности лазера и коэффициента перекрытия фокального пятна лазера.

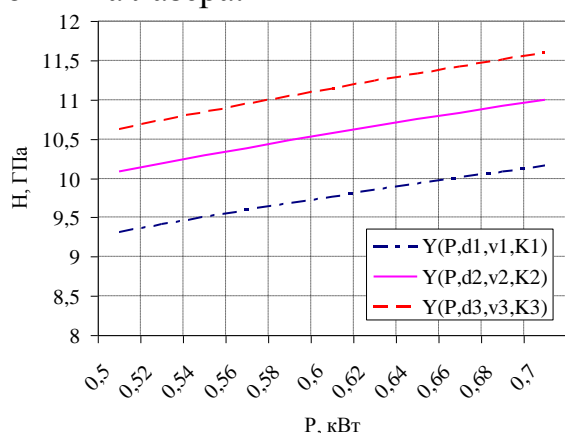


Рис. 6. Влияние мощности лазера на микротвердость упрочненного слоя

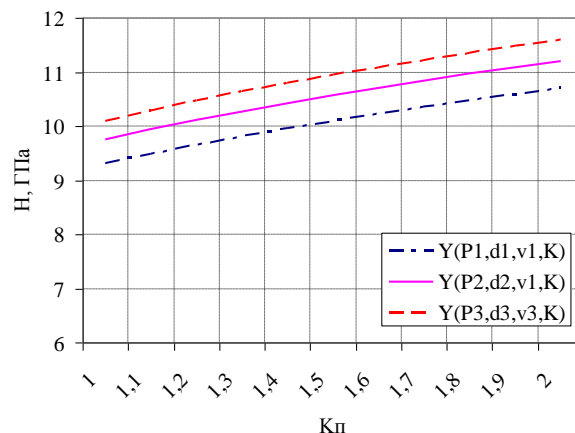


Рис. 7. Влияние коэффициента перекрытия фокального пятна лазера на микротвердость упрочненного слоя

Как видно из графиков, значительное влияние на микротвердость упрочненного слоя торсионного вала оказывают мощность лазера P и коэффициент перекрытия лазерного пятна в фокальной плоскости K . С увеличением обоих факторов микротвердость упрочненного слоя также увеличивается. Объясняется это тем, что при увеличении мощности лазера скорость нагрева поверхностного слоя детали возрастает, что и позволяет получить наивысшие значения микротвердости.

Оптимизацию режимов лазерного упрочнения поверхностного слоя торсионных валов проводили на основе двух критериев – максимальной глубины закаленного слоя и максимальной производительности изготовления данных деталей при заданных значениях микротвердости поверхностного слоя, ширины упрочненного слоя, диаметра фокального пятна, мощности лазера и коэффициента перекрытия лазерного излучения.

В результате были определены максимальная допустимая скорость подачи заготовки $v = 10$ мм/с. При этом обеспечиваются глубина лазерной закалки $z = 0,45$ мм, ширина упрочненного слоя $b = 0,72$ мм, микротвердость упрочненного слоя $H = 10,24$ ГПа. Потребная мощность лазера $P = 0,5$ кВт, диаметр фокального пятна $d = 1,2$ мм, и коэффициент перекрытия $K = 2$. Именно при этих параметрах будут достигаться максимальные значения производительности изготовления и коэффициента запаса циклической прочности объекта исследования.

В пятой главе приведены практические рекомендации и расчет технико-экономической эффективности результатов исследования.

Показано, что областью практического применения полученных результатов является производство торсионных валов для изделий авиационной промышленности и подобных им маложестких деталей. Сравнение качества изготовления торсионных валов, обработанных на предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ» традиционным способом и по предлагаемой технологии, показало, что лазерное воздействие не вызывает радиального биения у детали. При этом обеспечивается повышение производительности в 4,2 раза и запаса циклической прочности на 43%. Все это позволяет достичь высокой технико-экономической эффективности способа лазерного поверхностного упрочнения за счет отсутствия необходимости рихтовки вала после упрочнения, а следовательно повышения производительности и снижения трудоемкости изготовления, улучшения качества и эксплуатационной надежности деталей. Расчет экономического эффекта от практического использования предложенной технологии осуществлялся для условий производства ООО «СЭПО-ЗЭМ». Расчет показал, что годовой экономический эффект от использования предлагаемой технологии изготовления торсионных валов типа «Валик 181.353» составляет 678 тыс. руб., а срок окупаемости капиталовложений – около 8 месяцев. Это подчеркивает высокую экономическую эффективность предложенной технологии.

Результаты исследования приняты к внедрению на предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ» для изготовления валиков 181.353 и других однотипных валов применяемых в изделиях СТГ-12ТМО-1000, СТГ-18ТМО-1000, СТ-111Т, ГПТ-100 и др. Сравнение существующей технологии с предложенным способом показывает значительные преимущества последнего за счет сокращения числа трудоемких неоднократно выполняемых технологических операций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили решить поставленную в работе актуальную задачу разработки и исследования упрочняющей стабилизирующей технологии обработки маложестких деталей типа торсионных валов лазерным воздействием, обеспечивающей повышение производительности изготовления и достижение требуемого качества.

2. Предложена и обоснована технология лазерного поверхностного упрочнения малогабаритных торсионных валов возвратно-поступательным методом, обеспечивающая повышение запаса сопротивления усталости, а также снижение себестоимости изготовления за счет отсутствия необходимости в последующих операциях рихтовки и низкотемпературного отпуска.

3. Выполнены экспериментальные исследования влияния различных технологических факторов при лазерном упрочнении на микротвердость, глубину и ширину упроченной зоны. Предложены регрессионные зависимости показателей лазерного упрочнения от основных технологических факторов: мощности лазерного излучения, диаметра лазерного пятна в фокальной плоскости, скорости подачи заготовки и коэффициента перекрытия K . Предложенные зависимости позволяют моделировать процесс лазерного поверхностного упрочнения различных маложестких деталей и определять рациональные условия его осуществления. Разработаны практические рекомендации по использованию полученных результатов.

4. Предложена методика определения рациональных условий осуществления процесса лазерного упрочнения деталей типа торсионных валов. Для торсионного вала, используемого в качестве объекта исследований, рекомендованы следующие условия обработки: скорость подачи заготовки $v = 10 \text{ мм/с}$, мощность лазера $P = 0,5 \text{ кВт}$, диаметр фокального пятна $d = 1,2 \text{ мм}$, и коэффициент перекрытия $K = 2$. При этом обеспечиваются глубина лазерной закалки $z = 0,45 \text{ мм}$, ширина упроченного слоя $z = 0,45 \text{ мм}$, микротвердость упроченного слоя $H_{\mu} = 10,24 \text{ ГПа}$. Именно при этих параметрах достигается максимальная производительность изготовления и повышенный коэффициент запаса циклической прочности объекта исследования. Данные режимы позволяют упрочнять поверхностный слой вала без оплавления и без негативного влияния на геометрию профиля детали.

5. Усовершенствованная технология поверхностного упрочнения торсионных валов на основе лазерной обработки показали значительные преимущества перед существующей технологией дробеструйного упрочнения: снижение себестоимости в 5 раз, увеличение запаса циклической прочности на 43%. Результаты работы приняты к внедрению на предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ», г. Саратов. Предложенная технология лазерного упрочнения может эффективно использоваться при изготовлении торсионных валов и других однотипных деталей авиационных компонентов взамен традиционных технологий.

Результаты опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Журавлев М.М. Влияние мощности лазерного излучения на изменение твердости поверхностного слоя деталей [Текст] / М.М. Журавлев, О.П. Решетникова, А.Г. Мирошкин // Вестник СГТУ. – 2012. – № 68. – С. 130-133.
2. Журавлев М.М. Определение рациональных режимов лазерной закалки деталей [Текст] / М.М. Журавлев, А.В. Королев, М.К. Решетников // Вестник СГТУ. – 2013. – № 4 (73). – С. 107-110.
3. Журавлев М.М. Теплофизическая модель закалки сканирующим лазерным пучком [Текст] / М.М. Журавлев, А.В. Королев, М.К. Решетников // Вестник СГТУ. – 2013. – № 4 (73). – С. 110-114.
4. Журавлев М.М. Моделирование микротвердости и глубины упрочненного слоя при лазерной закалке с оплавлением поверхности [Текст] / М.М. Журавлев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 6. – С. 16-19.
5. Журавлев М.М. Распределение температуры внутри температурного поля при лазерной обработке [Текст] / М.М. Журавлев, А.В. Королев, М.К. Решетников // Вестник СГТУ. – 2014. – № 1 (74). – С. 62-67.
6. Журавлев М.М. Распределение температуры за пределами зоны нагрева при лазерной обработке [Текст] / М.М. Журавлев, А.В. Королев, М.К. Решетников // Вестник СГТУ. – 2014. – № 1 (74). – С. 67-70.

Публикации в других изданиях

7. Журавлев М.М. Лазерное упрочнение деталей машин [Текст] / М.М. Журавлев, Е.В. Филимонов // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: сб. науч. тр. / СГТУ. – Саратов, 2010. – С. 68-71.
8. Журавлев М.М. Лазерное упрочнение нежестких валов [Текст] / М.М. Журавлев, Е.В. Филимонов // Высокие технологии и фундаментальные исследования – HTFR-16: сб. ст. XVI Междунар. конф.: в 2 т. / под ред. А.П. Кудинова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – Т. 1. – С. 257-260.
9. Журавлев М.М. Анализ основных направлений эффективного использования лазерных технологий в машиностроении [Текст] / М.М. Журавлев, Е.В. Филимонов // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: VI Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст. – Пенза : ПДЗ, 2011. – С. 22-24.
10. Журавлев М.М. Моделирование твердости поверхностного слоя изменением мощности излучения лазера [Текст] / М.М. Журавлев, А.В. Королев, Е.В. Филимонов // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике. : сб. ст. XIII Междунар. науч. конф.: в 2 т. / под ред. А.П. Кудинова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 205-208.

Подписано в печать 29.10.14

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,0

Заказ

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 1,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru