

1554 350

На правах рукописи

Богданов Александр Владимирович

Технологические возможности твердотельных лазеров и
разработка рациональных режимов их использования.

Специальность 05.03.07 – Оборудование и технология
лазерной обработки.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва

1997 г.

5520.15
6219.0427

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент ГАВРИЛИК В.С.

Официальные оппоненты : доктор технических наук,
Ямпольский В.М.
кандидат технических наук
Кваша Ю.Н

Ведущее предприятие НИЦТЯ РАН

Защита диссертации состоится "26" июня 1997г. на заседании диссертационного совета К 053.15.03 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв в 1-м экземпляре ~~запечатанным~~ ~~напечатать~~ ~~прислать~~
высылать по указанному

С диссертацией и

Телефон для спра

Автореферат разо

Ученый секретарь
специализированного С
к.т.н., доцент

Подписано к печат
Заказ N 126

1554350

Общая характеристика работы.

Актуальность проблемы. В последние годы обработка материалов с применением твердотельных лазеров (далее - ТТЛ) поднимается на качественно новую ступень развития (вследствие новых технологий получения лазерных твердотельных активных элементов). В качестве примера можно привести ТТЛ с длиной волны 1.06 мкм, который при высокой монохроматичности и узкой направленности характеризуется, легкостью манипулирования излучением, возможностью фокусирования луча в малые размеры за счет небольшой длины волны, чрезвычайно малыми потерями излучения на начальной стадии обработки (в несколько раз меньше, чем у газовых CO_2 -лазеров), малым тепловложением и небольшими остаточными деформациями, широким спектром материалов для изготовления оптических элементов и их дешевизной, отсутствием вакуумных камер и простотой обслуживания оборудования, возможностью транспортировки в труднодоступные места и на большие расстояния.

1554350
Хотя на характеристики сфокусированного излучения ТТЛ влияют все элементы оптического тракта лазерной установки, но резонатор и фокусирующая система в этом влиянии доминируют. Поэтому характеристикам фокусирующих систем и их согласованию с параметрами резонатора необходимо придавать первостепенное значение. Это особенно актуально для новых, более мощных лазерных систем - в связи с относительно большими поперечными размерами луча, повышенной расходимостью и, следовательно, повышенными aberrациями фокусирующих систем. Однако до настоящего времени технологи-сварщики, в лучшем случае, имеют рекомендации по выбору одиночных оптических элементов к лазерным установкам, а имеющиеся в литературе сведения по этой тематике носят частный характер. Это, в свою очередь, приводит к неполному использованию возможностей лазерного луча и низкой эффективности процесса сварки.

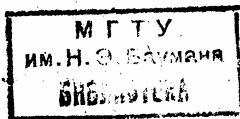
Кроме того, возростание мощностей лазерных установок предъявляет особые требования к оптическому тракту. Традиционные же одиночные линзы и объективы не дают желаемого эффекта, т.к. в этих случаях необходим более точный учет характеристик излучения и режима работы лазера (с отслеживанием его системой управ-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1554350

Богданов А.В. Технологичес



1

ления).

Цель работы. Исследование влияния оптических систем на эффективность применения излучения твердотельных лазеров, разработка рекомендаций по расчету оптических систем ТТЛ и газовых лазеров, а также сравнение эффективности их использования.

Методы исследования. Расчет на ЭВМ оптических систем для лазеров: He-Ne и ТТЛ и проверка результатов расчетов путем измерения характеристик сфокусированных лучей методом сканирования луча по диафрагме с круглым отверстием и испарения тефлоновой пленки.

Проплавляющая способность лазерного луча изучалась проплавлением плоских образцов различных сталей с последующим измерением глубины и площади поперечного сечения швов.

Тепловложение измерялось каллориметрированием по методике, разработанной в МВТУ. В экспериментах использовались газовые лазеры: ЛТ-1 и Хебр-1, а также ТТЛ: ЛТН-102, ЛТН-103 и Фотон-1.

Научная новизна. 1. Установлено, что в твердотельных лазерах зависимость плотности мощности от выходной мощности носит экстремальный характер, тогда как у газовых лазеров плотность мощности монотонно увеличивается с ростом выходной мощности.

2. Для каждого типа твердотельного лазера и даже каждого экземпляра существует определенный ток накачки, при котором плотность мощности в пятне и эффективность воздействия является максимальной. Знание этого режима позволит увеличить глубину проплавления, а для резки уменьшить ширину реза и увеличить скорость обработки. У большинства ТТЛ максимальная эффективность воздействия достигается при токах накачки 0.8 - 0.85 от максимально допустимых.

Практическая ценность. Разработана методика выбора параметров оптического тракта. Предложены инженерные соотношения и номограммы для определения параметров оптического тракта. Даются рекомендации по выбору материалов для изготовления фокусирующих элементов и фокусирующих систем ТТЛ, предназначенных для технологического использования. Выведена зависимость, позволяющая определить перемещение оптической системы при обработке. Разработана автоматизированная система, позволяющая оперативно подбирать лазер для разрабатываемого технологического процесса и оценивать возможность применения уже имеющегося оборудования,

Реализация результатов работы.

Результаты работы использованы при разработке на ЭВМ оптических систем для новых ТТЛ и экспертной системы по лазерной технике и технологии. Экспертная система была использована для оценки технологических возможностей лазеров, разработанных НИЦТЛ РАН.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на всесоюзной конференции в Свердловске и Иркутске в 1990 году, в Шатуре 1995 году, в МГТУ им.Н.Э.Баумана в 1995 и 1996 гг.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 6 печатных работ и получено 2 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе приложений и изложена на 187 страницах.

Представленная работа содержит: 111 страниц машинописного текста, 64 рисунка, 22 таблицы, 103 наименования использованных литературных источников и 3 приложения.

Работа выполнена при научной консультации д.т.н., проф. Григорьянца А.Г., которому автор выражает глубокую признательность.

В первой главе кратко рассмотрены особенности лазерного луча как инструмента и основные характеристики излучения современных технологических лазерных установок, дан анализ применяемых оптических систем и принципов их расчета.

Кратко рассмотрено развитие ТТЛ, причины именно такого развития и основные характеристики излучения лазеров данного типа; определено место лазерной технологии с использованием ТТЛ и дано сравнение технологий с твердотельными и CO_2 -лазерами.

Современный этап развития ТТЛ характеризуется стремлением исследователей к увеличению глубины проплавления, эффективности процесса воздействия на металл, уменьшению габаритов и стоимости лазерных установок, а также возможности автоматизации процесса.

Применение ТТЛ с длиной волны 1.06 мкм для нужд промышленности известно давно, однако их широкое применение сдерживалось из-за отсутствия технологии для получения активных сред больших объемов. До 1987 г. это служило сдерживающим фактором в расширении областей применения ТТЛ, поскольку мощность лазерных установок не превышала 250 Вт (хотя известны отдельные случаи получения на некоторых кристаллах повышенных мощностей).

Новые разработки в области выращивания кристаллов, реализованные промышленностью, позволяют получать кристаллы диаметром 8, 10 и более мм в количествах, необходимых для выпуска крупных партии ТТЛ больших мощностей.

По сравнению с газовыми лазерами, ТТЛ обладают значительно меньшими габаритами и весом, просты в управлении и надежны; в них отсутствуют системы вакуумирования и газового наполнения. Вопросы замены элементов ТТЛ решаются легче, а их ремонтпригодность значительно выше. ТТЛ более дешевы, по сравнению с аналогичными лазерами тех же технических возможностей. Резонаторы твердотельных технологических лазеров (ТТЛ), как правило, плоскопараллельные при пороговых мощностях накачки. При больших мощностях они становятся устойчивыми.

Спецификой ТТЛов является и то, что каждой мощности накачки в лазере соответствует конкретный тип резонатора. Что приводит к изменению параметров излучения. В установившемся же

режиме работы лазера параметры резонатора достаточно стабильны.

Структура излучения ТТЛ, как правило, многомодовая. С расходимостью, достигающей 25 мрад (в зависимости от типа установки) при выходных мощностях до 1000 Вт. Обычно для фокусировки используются оптические системы со сферическими поверхностями и с рабочим отрезком не менее 50 мм. Объективы – 2-х линзовые, склеенные (одиночные линзы, как правило, используют для термообработки).

Проведенный анализ показал, что имеется несколько путей повышения эффективности работы ТТЛ: а) за счет увеличения объема активной среды и более рационального его использования, б) за счет прецизионной фокусировки излучения, в) за счет оптимального подбора как режима работы лазера, так и режима обработки материала.

В работе решались следующие задачи:

1. Оценка применимости известных инженерных методик определения параметров фокусирующих систем.
2. Определение тепловложения для длин волн 1.06 и 10.6 мкм при лазерном воздействии на распространенные металлы (СТ10 и 12Х18Н9Т).
3. Сравнение возможностей лучей ТТЛ и CO_2 -лазера как инструмента для проведения технологического процесса лазерной обработки.
4. Исследование характеристик излучения ТТЛ различных систем и разработка рекомендаций по выбору и расчету оптических фокусирующих систем.
5. Исследование влияния параметров лазерного луча на размеры зоны лазерного воздействия (ЗЛВ).
6. Разработка компьютерного программного комплекса для моделирования технологических процессов лазерной обработки.

Вторая глава посвящена: описанию конструктивных особенностей различных типов ТТЛ, исследованию параметров их излучения, разработке рекомендаций по расчету оптических систем и сравнению твердотельных и газовых лазеров

Для изучения параметров излучения был создан стенд, включающий в себя устройства, позволяющие регистрировать среднюю и пиковую мощности, а также расходимость и диаметр луча.

Приведены экспериментальные данные по параметрам излучения, полученные с помощью разработанного стенда.

Экспериментально исследовано влияние тока накачки, как основного фактора, на расходимость, мощность и диаметр луча. Полученные результаты указывают на то, что термодиформация активных элементов в каждом конкретном режиме работы лазера приводит к возникновению своего конкретного типа резонатора, который обладает своими особыми свойствами. До настоящего времени наиболее распространенными типами резонаторов для ТТЛ являются: плоскопараллельный и устойчивый. Причем один и тот же резонатор на разных токах (мощностях) накачки имеет свои свойства. Вследствие этого требуется точное измерение параметров излучения и учет их взаимосвязи как для правильной разработки фокусирующих систем, так и для технологических процессов лазерной сварки.

Для расчета оптических систем использовалась методика, предлагаемая для длины волны 10.6 мкм. Оптические системы, рассчитанные по этой методике, имеют в 10 раз меньшие фокусные расстояния, чем для оптических систем газовых лазеров. На основе известных методик для длины волны 10.6 мкм оптимальное фокусное расстояние можно определить как:

$$F_{\text{опт}} = 0.4 * D_{\text{л}} * \left(P / \theta_{0.86} \right)^{1/3} \quad (1)$$

а диаметр луча в плоскости наилучшей установки определится как:

$$d_{\text{min}} = 0.6 * D_{\text{л}} * P^{1/3} * \theta_{0.86}^{2/3} \quad (2)$$

где: $D_{\text{л}}$ - диаметр луча на 1-ой оптической поверхности (мм)
 P - абберационный параметр линзы
 θ - расходимость излучения в дальней зоне (рад).

Для случая длины волны 1.06 мкм эти зависимости лучше использовать в случаях:

- а) расчета оптических систем для термообработки,
- б) определения приближенных параметров оптического тракта применительно к процессам сварки, резки и прошивки отверстий

(как оценочную методику).

Задача разработки оптического тракта для ТТЛ решается достаточно просто, если перейти к многолинзовым системам. При этом предлагается следующая методика:

1. Оценить возможность применения однолинзовой системы.
2. Оценить возможность применения 2-х линзового объектива (обе линзы компенсируют aberrации).
3. Рассчитать оптический тракт, состоящий из 3-х линз (1 и 2 линзы представляют собой телескопическую систему, а 3-я используется как фокусирующая линза).
3. Минимизировать aberrации этой системы.
4. В случае невозможности использования 3-х линзовой системы перейти к 4-х линзовой (3-ий и 4-ый элементы - фокусирующий объектив).
5. Минимизировать aberrации этой системы.
6. Провести тригонометрический расчет оптического тракта.

Из-за сильного влияния тока накачки на выходные параметры излучения оптическая система должна рассчитываться на определенное положение в оптическом тракте. Изменение положения оптической системы по отношению к расчетному может привести к значительному изменению плотности мощности в пятне. Пределы перемещения объектива от рассчитанного положения не должны превышать величины L , которая определяется следующим образом:

$$L = 3 \sqrt{\frac{32 * F^3}{\theta^2 * P} * \left(\frac{1}{K^{1/2}} - 1 \right) + \frac{D^3}{K^{1/2} * \theta^3} - \frac{D}{\theta}} \quad (3)$$

где: D - диаметр луча на первой фокусирующей поверхности оптического тракта (мм)

θ - расходимость излучения в дальней зоне (рад)

L - максимальное (минимальное) расстояние в пределах которого можно перемещать оптическую систему (мм).

K - коэффициент, учитывающий допустимое падение плотности мощности. $K = 0.9$ при допустимом падении плотности мощности до 10% ($K = 0.8$ - до 20%).

Данная зависимость применима для ТТЛ и газовых лазеров.

На основании расчетов получена номограмма для определения фокусного расстояния оптического тракта. Предлагаемая номограм-

ма может быть использована для газовых и ТТЛ - это является ее основным отличием. С помощью описанных в работе методик был рассчитан и изготовлен объектив, который обеспечивает меньший диаметр пятна и большую плотность мощности по сравнению с наиболее часто применяемым объективом от системы "СОК-2".

Материалы для оптических систем на длину волны 1.06 отличаются большой номенклатурой (т.к. много материалов имеют "прозрачность" для этой длины волны). Однако в отличие от длины волны 10.6 мкм, где спектр применяемых материалов ограничивается NaCl, KCl, BaF₂, GaAs, ZnSe с показателем преломления от 1.4 до 4.2, на длине волны 1.06 мкм используют материалы с показателем преломления от 1.4 до 1.7. Это с одной стороны не позволяет компенсировать аберрации оптических элементов за счет значительного увеличения показателя преломления, а с другой - аберрации хорошо компенсируются за счет применения дополнительных оптических элементов. Применение многолинзовых систем практически не приводит к потерям излучения за счет просветляющих покрытий, технология нанесения которых для длины волны 1.06 мкм хорошо отработана.

Проведено сравнение параметров излучения ТТЛ и СО₂-лазеров (сравнение проводилось в относительных единицах). Из результатов исследований видно, что изменение относительной расходимости у газового лазера составляет до 30% во всем диапазоне выходных мощностей, а у ТТЛ более 200%. Установлено, что для ТТЛ в отличие от газовых лазеров необходимо проводить оценку всех параметров луча (расходимость, диаметр) в зависимости от мощности, в то время как для газовых лазеров достаточно указания диапазона выходных мощностей и величины расходимости и диаметра луча.

Исходя из этого следует, что промышленные ТТЛ необходимо укомплектовывать АСУ, позволяющей оперативно управлять излучением ТТЛ лазера во всем диапазоне выходных мощностей. Это особенно важно при использовании ТТЛ в комплексах по раскрою материалов.

Далее в работе приводится описание результатов исследований влияния параметров лазерного луча на плотность мощности, исходя из которого видно, что:

а) у ТТЛ эта зависимость имеет экстремальный характер, а

для газового лазера с ростом выходной мощности плотность мощности увеличивается монотонно.

б) для использования ТЛ в технологическом процессе необходимо проводить оптимизацию параметров его излучения на максимальную плотность мощности.

Данная оптимизация должна проводиться для каждого конкретного типа лазера и даже экземпляра, вследствие разброса параметров лазерного луча от выходной мощности.

В третьей главе рассматриваются экспериментальные данные по исследованию поглощения излучения с длиной волны 1,06 по сравнению с 10,6 мкм. В качестве модельных материалов были выбраны (ст.10 и 12X18H9T) толщиной 2мм. В процессе экспериментов исследовалось поглощенное тепло в зависимости от скорости обработки материала. Скорость изменялась от 10 до 60 м/ч. По результатам эксперимента вычислен эффективный КПД процесса проплавления. Описана методика проведения исследований и обработки полученных данных. В результате исследований было установлено:

- а) зависимость эффективного К.П.Д. от скорости обработки для ТЛ также как и для газовых лазеров имеет экстремум;
- б) максимальное значение эффективного К.П.Д. процесса обработки у твердотельных лазеров смещено в область малых скоростей = 0.008–0.013 м/с (30–50 м/ч);
- в) во всех случаях эффективный К.П.Д. у твердотельного лазера выше, чем у газового.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод:

1. Твердотельные технологические лазеры целесообразно применять при скоростях обработки от 0.0028 до 0.019 м/с (10–70 м/ч).
2. С увеличением выходной мощности максимум эффективного К.П.Д. (η) будет смещаться в область больших скоростей.

Далее в главе описываются результаты исследований по влиянию длины волны излучения и режима лазерной обработки на геометрию зоны лазерного воздействия (в качестве материала использовалась сталь 45). Описывается методика подготовки, проведения исследований и обработки результатов.

В исследованиях сравнивались твердотельные и газовые лазеры. Обработка проводилась с оплавлением ($V_{\text{опл.}} = 0.002\text{--}0.012\text{ м/с}$) и без оплавления ($V_{\text{обп.}} = 0.02\text{--}0.06\text{ м/с}$) поверхности. На осно-

ве проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Скорость обработки при использовании ТТЛ оказывает меньшее влияние на глубину ЗЛВ по сравнению с газовыми лазерами.
2. Эффективность применения ТТЛ на высоких скоростях обработки значительно выше по сравнению с газовыми лазерами.
3. Для процессов термообработки с использованием твердотельного лазера допустимо не применять поглощающие покрытия.

Для определения круга сварочных задач, в которых могут использоваться твердотельные лазеры, были проведены эксперименты по изучению влияния параметров лазерного излучения на глубину и ширину шва. Для исследований были выбраны: сталь 3 и 12Х18Н10Т. При этом исследовалось влияние: оптических систем, мощности излучения, скорости перемещения образца и заглабления фокуса на глубину и ширину шва.

Исследования проводились на установках ЛТН-102, ЛТН-103, Фотон-1. В результате исследований были сделаны следующие выводы:

1. Наиболее эффективно использовать для сварки диапазон мощностей, близкий к максимальному.
2. Наибольшая глубина проплавления получается на короткофокусной оптике.
3. В исследованном диапазоне мощностей для получения максимальной глубины проплавления положение перетяжки, формируемой оптической системой, должно быть на поверхности обрабатываемого металла.

В четвертой главе описывается компьютерный программный продукт, позволяющий провести выбор лазера и осуществить (с энергетических позиций) разработку технологического процесса сварки (резки, термообработки) для твердотельных и газовых лазеров. Приведены примеры использования программы для расчета техпроцесса лазерной обработки. В основу автоматизированной системы выбора оборудования и расчета технологии лазерной обработки металлов (АВТОЛОМ) положены результаты исследований и математические модели, опубликованные в печати.

АВТОЛОМ может использоваться для оценки возможностей имеющегося лазерного оборудования, для расчетов необходимых изменений в различных технологических операциях с использованием од-

ного лазерного излучателя. Система предназначена для расчетов всех параметров лазерных технологических установок как в комплексе, так и отдельными блоками. При использовании системы можно определить необходимые требования к конструкции лазерного источника под определенный технологический процесс. Все это значительно упрощает разработку лазерных технологических комплексов и технологий.

Система включает в себя три расчетных блока:

1. Технология,
2. Оптика,
3. Лазеры.

Система полностью автономна и позволяет редактировать создаваемые ею компьютерные файлы данных и базы данных по лазерным и обрабатываемым материалам.

Далее в разделе представлено описание моделей, применяемых в АВТОЛОМЕ и описана методика работы с системой. Приведены примеры работы с системой АВТОЛОМ и результаты по расчету глубины и ширины шва для лазеров ЛТН-103 и Фотон-1. Ниже приведены результаты расчета для лазера ЛТН 103.

Исходные данные:

Лазер	-	ЛТН 103
Длина волны	-	1.06 мкм
Скорость сварки	-	2.77 мм/с (10 м/ч)
Фокусное расстояние линзы	-	50 мм
Материал	-	ст.10
Толщина	-	2 мм

Таблица 1.

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования.

Р Вт	ЭКСПЕРИМЕНТ		РАСЧЕТ		ОТКЛОНЕНИЕ	
	Н мм	В мм	Н мм	В мм	Н %	В %
68.6	0.22	0.25	0.216	0.271	1.8	8.4
115	0.35	0.32	0.343	0.343	2	7.2
140	0.40	0.42	0.430	0.430	7.5	2.4
160	0.43	0.54	0.430	0.536	0	0.7
176	0.46	0.598	0.461	0.587	0.2	1.8
191	0.50	0.60	0.490	0.610	2	1.6

В качестве примера использования АВТОЛОМа для разработки

технологии лазерной обработки рассматривается применение лазера "Spectra 820" для сварки. Приводятся параметры его излучения, свойства материала и полученные результаты расчета. Сопоставление результатов расчета с данными, представленными в рекламном буклете Spectra-Physics по сварке металлов, показало хорошее совпадение проведенных расчетов с данными, представленными Фирмой-изготовителем.

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что разработанный компьютерный программный продукт дает возможность оперативно решать задачи, связанные как с разработкой технологического процесса, так и выбора оборудования, необходимого для его проведения.

Общие выводы и результаты работы.

1. Намечившаяся тенденция применения твердотельных технологических лазеров в промышленных целях в значительной степени ограничивается большим изменением расходимости излучения от выходной мощности, что осложняет его фокусировку в пятно малых размеров. Учет особенностей параметров излучения твердотельных технологических лазеров и применение специально рассчитанных элементов оптического тракта позволяет улучшить эту важнейшую характеристику.

2. Возникающая в процессе работы лазера, вследствие деформации активных элементов, термолинза приводит к значительному разбросу выходных параметров лазерного луча - диаметра луча, расходимости и выходной мощности при неизменных токах накачки.

3. При выборе технологического режима с использованием твердотельного технологического лазера (ТТЛ), в отличие от газового лазера, необходимо учитывать функциональную зависимость расходимости и диаметра луча от выходной мощности (мощности накачки).

4. С увеличением тока накачки плотность мощности излучения твердотельного лазера достигает экстремального значения в диапазоне $0.8 - 0.85$ от максимальной выходной мощности, что позволяет считать этот диапазон оптимальным, определяющим технологические возможности.

5. В ТТЛ при мощности до 250 Вт эффективный КПД (эффективный коэффициент использования подводимой мощности) на скоростях

обработки 10-70 м/ч существенно (1.5-2.0 раза) выше, чем у газовых лазеров сравнимой мощности, что позволяет их рекомендовать к использованию на этих режимах взамен более дорогих газовых лазеров с длиной волны 10.6 мкм.

6. Темп уменьшения глубины зоны лазерного воздействия при изменении скорости обработки на длине волны 1.06 мкм меньше, чем на длине волны 10.6 мкм, что является преимуществом твердотельного лазера и указывает на предпочтительность разработки лазеров повышенной мощности в этом диапазоне длин волны.

7. Разработан программный продукт, позволяющий с энергетических позиций, оперативно подбирать лазер, рассчитывать оптический тракт и основные параметры режима лазерной обработки для разрабатываемого технологического процесса. Программа обеспечивает так же оперативную оценку возможности применения имеющегося лазерного оборудования для других видов лазерной обработки.

8. Разработана методика расчета оптического тракта, учитывающая в расчете аберрации оптических систем 3-го порядка и вычисляющая величины продольной и поперечной перетяжки с учетом остаточных аберраций оптической системы. На этой основе уточнена номограмма для выбора фокусного расстояния и расширен диапазон ее применения.

9. На основе проведенных расчетов была разработана и изготовлена фокусирующая система для сварки металлов излучением с длиной волны 1.06 мкм, обеспечивающая в 2 раза большую плотность мощности по сравнению с объективом, входящим в комплект лазерной установки типа ЛТН-103.

По теме диссертации опубликовано 5 статей, 3 методические разработки издания РИО МГТУ для учебного процесса и тезисы 3-х докладов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. Богданов А. В., Мазов И. В. Автоматизированная система для расчета технологических процессов лазерной обработки // Сварочное производство. -1996. -№ 8. -С.25-27.

2. Богданов А. В. Автоматизированная система выбора оборудования и расчета технологического процесса лазерной обработ-

ки // V Межд. конф. Лазерные технологии '95: Тез. докл., Шатура, 1995. - С. 30

3. К вопросу оптимизации параметров излучения твердотельных технологических лазеров/ Григорьянц А. Г., Богданов А. В., Гаврилюк В. С. и др // Сварочное производство, - 1991. - N 11. - С. 19-21.

4. Критерии оценки технологических возможностей лазерных систем/ Григорьянц А. Г., Богданов А. В., Гаврилюк В. С. и др. // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. - 1991. - N1. - С. 105-110.

5. Григорьянц А. Г., Гаврилюк В. С., Богданов А. В. Сравнение воздействия лазеров с длинами волн 10.6 и 1.06 мкм на металлы // Применение лазеров в науке и технике: Тез. докл. III Всесоюз. науч.-техн. сем. - Иркутск, 1990. - С. 65-66.

6. Богданов А. В., Гаврилюк В. С. Оптимизация режима эксплуатации твердотельного технологического лазера при сварке // Математические методы и САПР в сварочном производстве: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Свердловск, 1990. - С. 86-87.

7. А. с. 1279157 СССР, МКИ В23К26/02. Устройство для лазерной обработки / Григорьянц А. Г., Фромм В. А., Богданов А. В. - N3915864 / 25-27; Заявл. 22. 04. 85; Оpubл. 22. 08. 86. - 2с. // Б. И. - 1986. - N 33.

8. А. с. 1330874 СССР, МКИ В23К26/00. Устройство для лазерной обработки / Григорьянц А. Г., Фромм В. А., Богданов А. В. - N3950693 / 31-27; Заявл. 07. 06. 85; Оpubл. 15. 04. 87. - 2с. // Открытия, изобретения. - 1987. - N 15.