

На правах рукописи

Угланов Дмитрий Александрович

**Повышение эффективности технологии обработки деталей летательных аппаратов за счет форсирования технологического СО<sub>2</sub>-лазера**

Специальность 05.07.02 – проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Самара-2006

Работа выполнена на кафедре теплотехники и тепловых двигателей в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» (СГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Довгялло Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Первышин Александр Николаевич,  
кандидат технических наук, доцент  
Крутиков Александр Владимирович

Ведущая организация - Открытое акционерное общество «Авиационный завод «Авиакор», г. Самара.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» (СГАУ) по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.015.04  
кандидат технических наук, доцент

Прохоров Александр Георгиевич

**Актуальность.** Современное производство летательных аппаратов (ЛА) включает в себя большую номенклатуру деталей, выполняемых из листовых материалов, таких как нержавеющей сталь, титановые и алюминийевые сплавы и др. Эти детали имеют довольно сложную конфигурацию и различную толщину (от 0,5мм до 6мм). По характеру производство ЛА является штучным и мелкосерийным и предполагает большое количество специальной оснастки, штампов, шаблонов, инструментов, которые используются эпизодически, а при изменении конструкции самолета (производство новой модификации) эта оснастка требует замены. Это приводит к существенным затратам денежных средств и времени. К тому же изделия сложной формы требуют дополнительной чистовой обработки после выполнения основных технологических операций.

Одним из методов решения проблемы изготовления деталей из листовых полуфабрикатов является применение лазерной обработки. Лазерное излучение, обеспечивая высокую концентрацию энергии, позволяет обрабатывать практически любые металлы и сплавы независимо от их механических и теплофизических свойств. Достижения в области изучения физических процессов лазерной обработки отражены в работах Н.А. Генералова, А.Г. Григорьянца, В.С. Голубева, В.А. Лапоты и др., а опыт применения концентрированных потоков энергии в технологии производства подробно изучен в работах В.Н. Анциферова, В.А. Барвинка, В.Ф. Безъязычного, А.Г. Братухина и др. В настоящее время наиболее распространенными технологическими лазерами, применяемыми при производстве ЛА, являются газоразрядные СО<sub>2</sub>-лазеры.

С позиций технико-экономической эффективности применение лазерной резки особенно целесообразно в тех случаях, когда требуется получить деталь с высокой степенью точности размеров и формы, что характерно для изделий авиационного производства. Так как стоимость лазерного технологического комплекса (ЛТК) достаточно высока (стоимость лазера мощностью излучения 1,5кВт около 4 млн. руб., а лазера мощностью излучения 2,5кВт около 5,5 млн. руб.), то выбор производится исходя из толщины основной номенклатуры деталей. То есть предполагается, что детали больших толщин будут изготавливать традиционными методами, которые, как отмечалось, требуют больших затрат.

Возможность получения качественной обработки деталей при заданной толщине материала и требуемой производительности определяются мощностью излучения лазера и скоростью резки. Таким образом, если при заданном диапазоне регулирования мощности излучения ЛТК необходимо разрезать лист повышенной толщины, то уменьшение скорости резки приведет к резкому ухудшению качества реза и не позволит выполнить производственную задачу. Все это ограничивает возможности применения ЛТК в технологическом процессе. Учитывая эти обстоятельства, возникает потребность в ЛТК повышенной мощности, что также ведет к увеличению стоимости изделий. Дополнительным отрицательным моментом будет неполная загрузка существующего лазерного оборудования.

Возможным решением этой проблемы является форсирование мощности излучения СО<sub>2</sub>-лазера методом охлаждения рабочей среды до температур ниже

273К. Экспериментальные и теоретические предпосылки, а также некоторые результаты реализации такого метода были представлены в работах Б.Ф. Городиеца, Н.Г. Басова, К.Н. Патела, В. Виттемана и др. Однако, анализ работ этих и других авторов не позволил выявить практического приложения этого метода в технологии. Это объясняется отсутствием решения научно-технических задач по моделированию процессов в охлаждаемом до температур ниже 273К СО<sub>2</sub>-лазере, а также методик расчета, позволяющих с необходимой достоверностью выявить зависимость параметров и характеристик активной среды лазера от температуры охлаждения. В связи с этим актуальным является решение научно-технических задач в области повышения производительности, снижения трудоемкости и экономии материальных затрат в процессе производства плоских деталей ЛА на основе повышения мощности излучения технологического СО<sub>2</sub>-лазера охлаждением до температур ниже 273К.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности технологии обработки деталей летательных аппаратов за счет форсирования технологического СО<sub>2</sub>-лазера охлаждением до температур ниже 273К.

#### **Задачи исследований:**

1. Анализ технологий производства плоских деталей летательных аппаратов и современного состояния развития технологических лазеров в авиационной промышленности;
2. Разработка методики расчета СО<sub>2</sub>-лазера с математическим описанием кинетики процессов генерации, концентраций компонентов рабочей смеси и тепловых эффектов в лазере на углекислом газе при учете распределения параметров газовой смеси в газоразрядной трубке;
3. Разработка алгоритма программы расчета и проведение численного моделирования процессов в активной среде СО<sub>2</sub>-лазера.
4. Создание экспериментальной установки и проведение исследований по реализации метода форсирования с получением характеристик СО<sub>2</sub>-лазера при его захолаживании;
5. Получение энергетических характеристик лазерного комплекса с учетом всех видов энергопотребления;
6. Разработка рекомендаций по выбору состава и облика лазерного комплекса, с учетом технологических требований обработки деталей летательных аппаратов и условий эксплуатации.
7. Выполнение сравнительного технико-экономического анализа процессов обработки деталей ЛА при использовании форсированного ЛТК.

#### **Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов**

В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях технологии производства ЛА, квантовой электроники, термодинамики, теории и практики теплофизического эксперимента и включают в себя: численное моделирование и решение систем дифференциальных уравнений с использованием численных методов расчета на ЭВМ; экспериментальные стендовые исследования.

**Научная новизна** работы заключается в получении совокупности теоретических и экспериментальных результатов, способствующих повышению эффективности

технологии обработки деталей ЛА за счет применения форсированного CO<sub>2</sub>-лазера

Разработана методика уточненного расчета CO<sub>2</sub>-лазера с учетом распределения параметров активной среды в газоразрядной трубке (концентраций, парциальных давлений и соотношений состава компонентов рабочей смеси), что впервые позволяет с необходимой точностью определять характеристики излучателя при температурах ниже 273К.

Впервые проведены целенаправленные испытания и экспериментальные исследования CO<sub>2</sub>-лазера в диапазоне температур 233...293К, позволившие получить результаты, необходимые для оценки эффективности метода форсирования его энергетических характеристик; определены режимные и конструктивные параметры контуров охлаждения, обеспечивающие максимально возможную эффективность системы.

**Практическая ценность.** Доказана практическая возможность метода повышения эффективности и энергетических характеристик CO<sub>2</sub>-лазера за счет захолаживания. Разработаны уточненные методики расчета параметров активной среды газового лазера на углекислом газе. Разработаны рекомендации по выбору режимов обработки форсированным ЛТК с учетом расширения номенклатурного ряда обрабатываемых деталей. Доказана экономическая эффективность процессов лазерной обработки форсированным технологическим CO<sub>2</sub>-лазером. Результаты диссертационной работы использованы для модернизации ЛТК «Trumatic Laser Press 240», применяемого в ОАО «Авиационный завод «Авиакор» (г. Самара). Детали самолета АН-140, такие как 140.00.6504.106.00 – Фланец, 140.00.6504.265.015 – стенка (изделия, входящие в состав узла управления двигателя), 140.00.4215.035.000 – коромысло (изделие, входящее в состав выключателя стойки шасси) и др. изделия из листовых заготовок, ввиду ограничения мощности ЛТК «Trumatic Laser Press 240» были изготовлены именно за счет его форсирования данным методом, при выполнении требований по качеству и одновременной экономии средств в 500 тыс. руб.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались на всероссийских и отраслевых конференциях и семинарах, в том числе: Всероссийской научно-технической конференции «Лазерные системы и их применение» (июнь 2004, г. Кострома); второй конкурс-конференции научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике (октябрь 2004, г. Самара); третьей конкурс-конференции научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике (ноябрь 2005, г. Самара); семинаре бизнес-идей и научно-исследовательских разработок «Молодые. Дерзкие. Перспективные» (май 2005, г. Санкт-Петербург); 12-ой международной специализированной выставке «Энергетика» (февраль 2006, г. Самара), инновационно-промышленном форуме «Промышленный салон – 2006» (октябрь 2006, г. Самара).

#### **Публикации по теме диссертации**

Основное содержание диссертации отражено в 10 научных работах, в том числе получен один патент.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 55 наименований, и приложения. Работа изложена на 172 листах машинописного текста, содержит 101 рисунок, 9 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы повышения эффективности технологии обработки деталей летательных аппаратов за счет форсирования энергетических характеристик лазеров на углекислом газе, как инструмента обработки плоских деталей ЛА, представлены основные особенности систем обеспечения температурного режима работы лазеров при их захлаживании ниже 273К, на основе чего обосновывается актуальность темы и определяется цель исследований.

**В первой главе** представлен обзор традиционных способов изготовления плоских деталей ЛА, современных областей применения лазеров в аэрокосмической промышленности, существующих методов повышения энергетических характеристик газоразрядных  $\text{CO}_2$  – лазеров, на основании которого формируется вывод о перспективности метода форсирования излучателей на углекислом газе за счет захлаживания.

Сравнение различных видов обработки по сравнению с лазерной резкой показало, что преимуществами последней является отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал, минимальные термические деформации, возникающие как в процессе резки, так и остаточные после полного остывания. Вследствие этого можно изготавливать плоские детали с высокой степенью точности, в том числе из легкодеформируемых и нежестких заготовок. Благодаря большой плотности мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхностей реза. Сравнительно простое управление лазерным лучом позволяет осуществить лазерную резку плоских и объемных деталей и заготовок по сложному контуру с высокой степенью автоматизации процесса.

Анализ существующих методов накачки и возбуждения активной среды  $\text{CO}_2$  – лазера показывает, что для реализации наиболее удобным, надежным и распространенным среди газоразрядных лазеров является самостоятельный разряд постоянного тока (СРПТ), который позволяет наиболее эффективно возбуждать активную среду газового лазера. В последнее время находит широкое применение накачка ВЧ-разрядом. Применение остальных видов систем накачки сопряжено с техническими трудностями при их реализации в серийных  $\text{CO}_2$ -лазерах.

Анализ современного состояния развития  $\text{CO}_2$  – лазеров, применяемых в различных областях науки и техники, позволяет сделать вывод, о том, что параметры активной среды лазера данного типа оказывают взаимное влияние на самих себя таким образом, что изменение одного параметра ведет к изменению всех остальных. Температурный режим рабочей смеси  $\text{CO}_2$  – лазера является определяющим фактором. Эксперименты и теория показывают, что при достижении некоторой критической температуры  $T_{кр} \sim 800\text{—}900\text{К}$  инверсная населенность лазерной смеси исчезает. С другой стороны, охлаждение лазера до температур ниже 273К позволяет увеличить коэффициент усиления, зависящий от температуры рабочей среды, и снизить скорость релаксации верхнего лазерного уровня. Вместе с тем, захлаживание рабочей смеси позволяет повысить ее общее давление, что также увеличивает энергетические характеристики лазерного комплекса.

Анализ публикаций по теме работы позволяет сделать вывод о том, что в

основном в них освещаются вопросы теоретического плана, но не практического применения.

На основании проведенного в главе анализа следует, что исследования по охлаждению CO<sub>2</sub>-лазера дадут основания для разработки практических рекомендаций для реализации данного метода совершенствования лазерных комплексов.

**Вторая глава** посвящена теоретическим исследованиям влияния температуры охлаждения на энергетические характеристики отпаянного CO<sub>2</sub>-лазера.

Первый раздел главы посвящен теплообмену внутри газоразрядной трубки и влиянию распределения температуры на распределение концентраций компонентов рабочей смеси по радиусу ( $r$ ), вызванного термодиффузией. В существующих методиках, например, в работах В. Виттемана, распределение температуры  $T_g(r)$  по радиусу трубки описывается решением уравнения теплопроводности для неограниченного цилиндра с выделением тепла в объеме и заданной температурой на поверхности:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_g}{dr} \right) + \frac{w(r)}{\lambda_{mix}} = 0 \\ w(r) = j(r)E = \frac{I \cdot E}{\pi R^2 c_1} \cdot J_0 \left( \frac{ar}{R} \right) \end{cases}$$

где  $\lambda_{mix}$  – коэффициент теплопроводности газовой смеси,  $I$  – сила разрядного тока,  $R$  – внутренний радиус газоразрядной трубки,  $j(r)$  – плотность силы тока разряда,  $J_0(ar/R)$  – функция Бесселя нулевого порядка,  $w(r)$  – мощность разряда,  $E$  – напряженность продольного электрического поля,  $a=2,405$  – числовой коэффициент, зависящий от критерия подобия  $Pr$ ,  $c_1 = 0,432$  – числовой коэффициент, связанный с распределением концентрации зарядов по радиусу.

Решение уравнения находится двумя квадратурами:

$$T_g - T_w = \frac{I \cdot E}{\pi \cdot c_1 \cdot a^2 \cdot \lambda_{mix}} \cdot J_0 \left( \frac{ar}{R} \right),$$

где  $T_w$  – температура стенки.

В отличие от существующих методик здесь коэффициент теплопроводности газовой смеси  $\lambda_{mix}$  определялся для каждого расчетного слоя в зависимости от его температуры. Кроме того, расчет проводился по нескольким методикам. Для расчета коэффициентов теплопроводности, как показал анализ расчетов, вполне приемлемым является применение формулы Лемана:

$$\lambda_{mix}(T_g) = \left( \sum_i y_i \cdot \lambda_i(T_g) \cdot (M_i)^{1/3} \right) / \left( \sum_i y_i \cdot (M_i)^{1/3} \right),$$

где  $\lambda_{mix}(T_g)$  – коэффициент теплопроводности газовой смеси, зависящий от температуры;  $\lambda_i(T_g)$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го компонента газовой смеси;  $M_i$  – молярная масса компонента,  $y$  – мольная доля газа в смеси.

Для сравнения расчет изменения температуры проводился без учета изменения коэффициента теплопроводности смеси по сечению (рис.1,а) и с учетом его изменения (рис.1,б). Важно отметить, что расчет по осредненным параметрам дает значения температур, превышающие порог срыва генерации излучения (750-850К),

и это показывает неприемлемость существующих методик и необходимость в уточненных методах расчета.

Определение термодиффузного разделения в рабочей смеси проводилось в соответствии с методом, основанным на модели массопереноса в неоднородных газах в неизотермических смесях.

Для неоднородной по составу неизотермической смеси, состоящей из  $i$  компонентов, плотность полного мольного потока  $i$ -го компонента смеси определяется следующим выражением:

$$Q_{iL} = -\nabla(D_i c_i) + \frac{D_i c_i}{T} \nabla T + c_i v; \quad D_{ki} = \left( \sum_{j=1}^n \frac{c_j}{c \cdot D_{kj}} \right)^{-1},$$

где  $c_i$  - парциальная мольная плотность  $i$ -го компонента смеси,  $v$  - локальная скорость движения смеси как целого. Коэффициент самодиффузии в смеси  $D_i$  рассчитывается по формуле Бланка. Результаты расчетов плотности полного мольного потока компонентов рабочей смеси CO<sub>2</sub>-лазера, распределение концентраций частиц каждого компонента по сечению газоразрядной трубки отражены, соответственно, на рис.2,3.

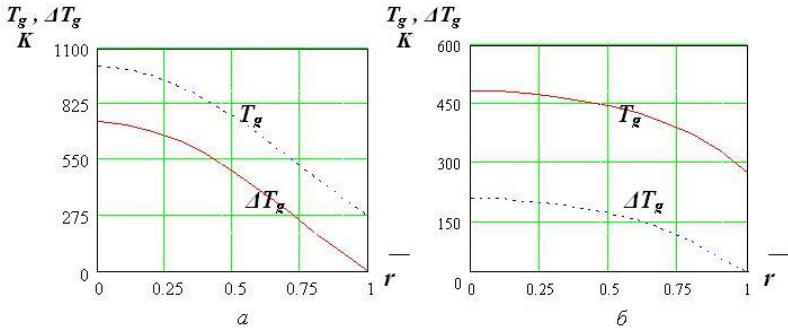


Рис.1 Распределение температур и ее изменение ( $T_g, \Delta T_g$ ) в CO<sub>2</sub>-лазере (ЛГН-703) без учета изменения коэффициента теплопроводности смеси (а) и с учетом(б).

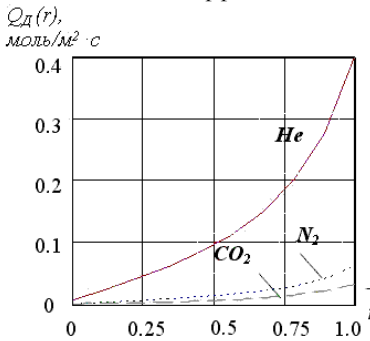


Рис.2. Величины (уровни) плотности полного мольного потока компонентов рабочей смеси по сечению газоразрядной трубки отпаянного CO<sub>2</sub>-лазера ( $T_{cr}=283K$ ).

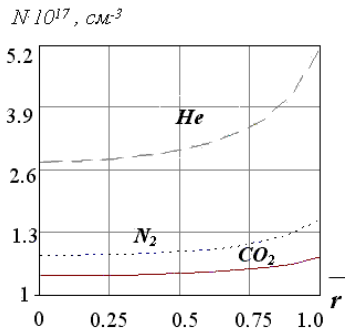


Рис. 3. Распределение концентраций частиц компонентов рабочей смеси по сечению газоразрядной трубки отпаянного CO<sub>2</sub>-лазера ( $T_{cr}=283K$ ).



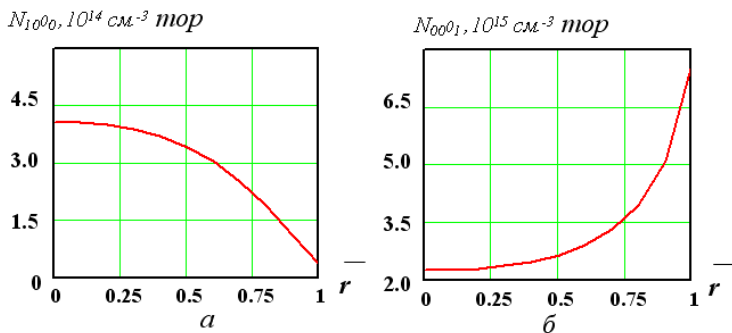


Рис.4. Распределение заселенности нижнего (а) и верхнего (б) лазерных уровней по сечению газоразрядной трубки CO<sub>2</sub>-лазера.

Во втором разделе представлен расчет энергетических процессов CO<sub>2</sub>-лазера. Для решения этой задачи используется пятитемпературная модель Мейнса и Сегина, по которой рассчитывается изменение интенсивности излучения внутри резонатора  $dI_{\nu 0}/dt$ , заселенность верхнего лазерного уровня  $N_{0001}$  и нижнего лазерного уровня  $N_{1000}$ , значения инверсной заселенности  $\Delta N$  между верхним и нижним лазерными уровнями и поток мощности через выходное зеркало с прозрачностью  $P_{изл}$ .

При этом учитывается коэффициент отражения выходного зеркала,  $s$  - эффективная площадь поперечного сечения активной среды,  $\rho$  - объемная плотность энергии излучения.

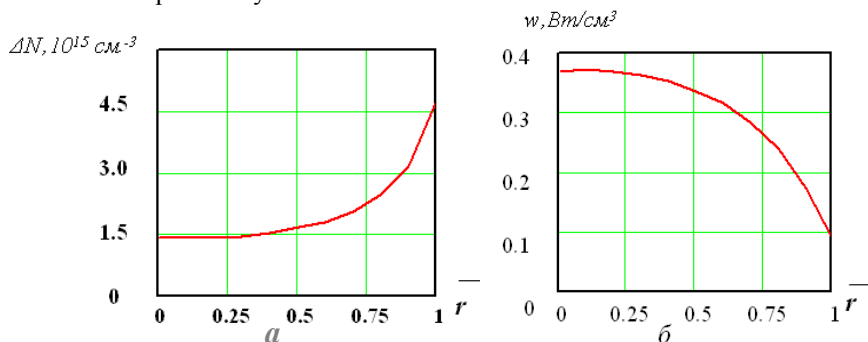


Рис.5. Распределение инверсной заселенности (а) и удельной мощности (б) по сечению газоразрядной трубки CO<sub>2</sub>-лазера.

Расчеты, проведенные по данной методике, представлены в графическом виде на рис. 4-6. Из них следует, что внешнее охлаждение оказывает существенное влияние на инверсную заселенность и мощность генерации излучения. Как показывает анализ, переход от температуры охлаждения лазера 293К к 203К диктует необходимость повышения давления рабочей смеси в 1,5-2 раза с целью получения оптимальных условий генерации.

Таким образом, аналитические исследования, выполненные во второй главе, показывают, что понижение температуры охлаждения лазера с 293К до 203К позволяет повысить значения инверсной заселенности в 3,5 раза, и тем самым

прогнозирует повышение мощности излучения не только с качественной, но и с количественной стороны на более обоснованном уровне решения теоретической задачи. Расчет распределения температуры по средним коэффициентам рабочей среды лазера дает результат, противоречащий реальной ситуации (рис. 1,а нагрев активной среды превышает оптимальные значения температуры рабочей смеси, что означает срыв генерации излучения лазера). Значительно более точный результат получается при расчете по разработанной в диссертации методике.

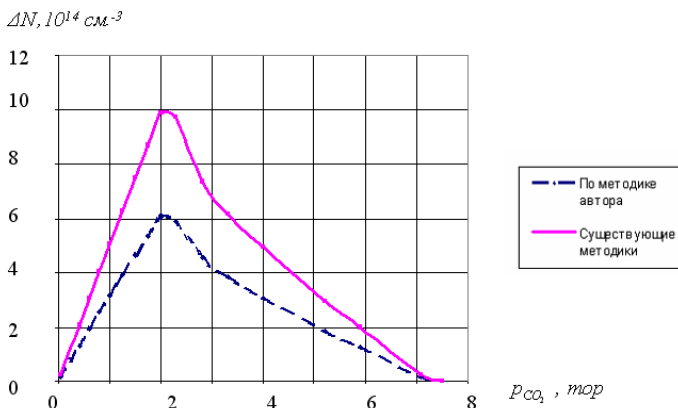


Рис. 6. Зависимость инверсной заселенности от давления  $CO_2$  для смеси  $x \text{ тор } CO_2 + 1 \text{ тор } N_2 + 8 \text{ тор } He$  ( $N_e = 2,75 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ) при температуре стенки трубки  $T_{ст} = 203 \text{ К}$  с учетом распределения температуры по сечению газоразрядной трубки лазера.

**Третья глава** содержит результаты экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на специально созданной установке, схема которой представлена на рис.7.

Экспериментальная установка обеспечивает: мощность излучения  $CO_2$ -лазера (ЛГН-703) от 25Вт до 45Вт при его охлаждении до отрицательных температур в диапазоне от 293К до 233К; варьирование величины расхода хладагента ТОСОЛ-40 (в диапазоне 1..5 л/мин); регистрации замеров температуры в различных точках системы охлаждения лазера; измерение мощности излучения лазера; измерение мощности, вкладываемой в активную среду лазера; измерение гидравлических потерь в контуре охлаждения.

В процессе проведения экспериментов мощность излучения лазера ЛГН-703 определялась двумя способами: с помощью измерителя мощности «ОСИСМ-А» и с помощью специального калориметра.

Последний, названный как «специальный калориметр» (в дальнейшем называемый просто калориметр), представляет собой ловушку для излучения, выполненную из меди, с установленными в ней двумя термopарами. Уравнение энергетического баланса для калориметра будет выглядеть следующим образом:

$$P_{изл} \cdot \tau = \Delta I_{л} + \Delta Q_{окр.ср.}$$

где  $P_{изл}$  – мощность излучения лазера,  $\tau$  – время нагрева калориметра лазерным излучением,  $\Delta I_{л}$  – изменение энтальпии калориметра за время нагрева  $\tau$ ,  $\Delta Q_{окр.ср.}$  – суммарное тепло, отдаваемое калориметром в окружающую среду за счет

естественной конвекции и лучистого теплообмена, а также отражения части излучения лазера, выходящего из отверстия.

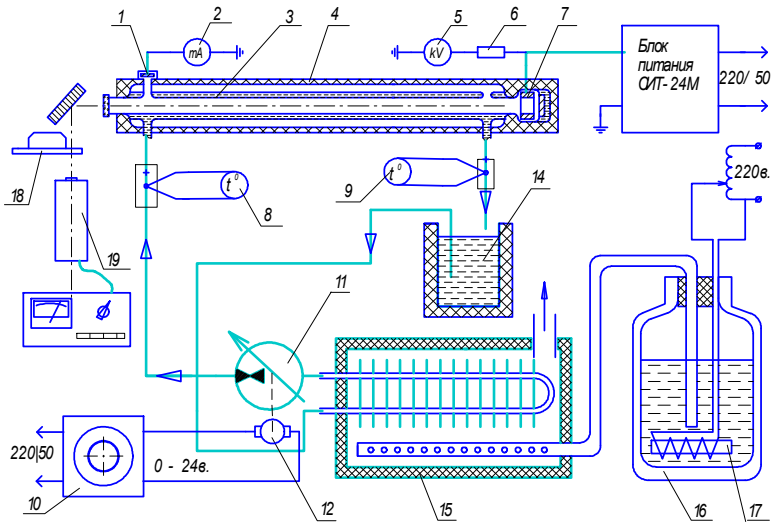


Рис. 7. Схема экспериментальной установки. 1 - катод, 2 - миллиамперметр, 3 - излучатель ИЛГН, 4 – теплоизоляция, 5 - киловольтметр, 6 – резистор, 7 – анод, 8,9 - измерители температуры, 10 – регулятор напряжения, 11 – насос, 12 – привод насоса, 13 – теплообменник, 14 - бак, 15 - теплоизоляция, 16 – азотный термос, 17 - подогреватель, 18 – ослабитель излучения, 19 – калориметрический измеритель мощности.

Основным измеряемым параметром для определения мощности излучения лазера в эксперименте является изменение температуры теплопринимающего калориметра за время  $\tau$ . По замерам температуры калориметра  $T_{Л}$  в течение времени  $\tau$  мощность излучения лазера рассчитывается по следующему соотношению:

$$P_{изл} = \frac{c_p \cdot m \cdot (T_{Л} - T_{окр.ср.}) + \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{Л} - T_{окр.ср.}) \cdot \tau}{\tau},$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи,  $F$  – площадь поверхности калориметра,  $T_{Л}$  – температура калориметра,  $T_{окр.ср.}$  – температура окружающей среды,  $c_p$  – теплоемкость калориметра,  $m$  – масса калориметра.

На рис.8 представлены экспериментальные зависимости мощности излучения исследуемого лазера ЛГН-703 от температуры охлаждающей жидкости на входе в лазер. Как видно из графика, при изменении температуры охлаждающей жидкости от 288К до 243К мощность генерации увеличилась в среднем с 30 до 53 Вт, т.е. на 80%. На этом же рис.8 представлены расчетные зависимости, полученные по уточненной методике и методике осредненных параметров. Такое сравнение обеспечило подтверждение предложенной методики, которая позволяет с более высокой точностью определять мощность излучения CO<sub>2</sub>-лазера.

Зависимости КПД лазерной установки от различных температур охлаждающей жидкости представлены на рис. 9. Энергетический баланс и эффективный КПД лазерной установки будут выражены следующим образом:

$$N_{полн.} = N_{ист.л} + N_{с.о.}, N_{с.о.} = N_{И} + N_{нас}, Q_{гор} = Q_X + N_K + Q_{m.л} + Q_{нас}, \eta = \frac{N_{ИЗЛ}}{N_{эл.пит}}$$

где  $\eta$  - эффективный КПД лазерного комплекса;  $N_{полн.}$  - полная потребляемая мощность лазерной установки;  $N_{ист.л}$  - мощность, подводимая к источнику питания лазера;  $N_{с.о.}$  - мощность, затрачиваемая на работу системы охлаждения;  $Q_X$  - холодопроизводительность системы охлаждения;  $N_{И}$  - мощность испарителя;  $Q_{m.л}$  - теплопритоки через изоляцию;  $N_{нас}$  - мощность насоса для прокачки хладонотителя;  $Q_{нас}$  - тепловыделение, внесенное в жидкостный контур работой насоса;  $Q_{гор}$  - суммарное тепло, сбрасываемое в окружающую среду.

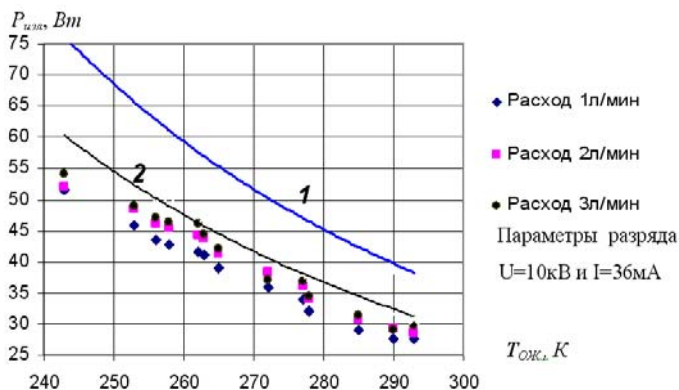


Рис. 8. Сравнение расчетных методик и экспериментальных данных: 1 – расчет по существующей методике, 2 – расчет по уточненной методике и экспериментальные значения мощности излучения от температуры охлаждающей жидкости.

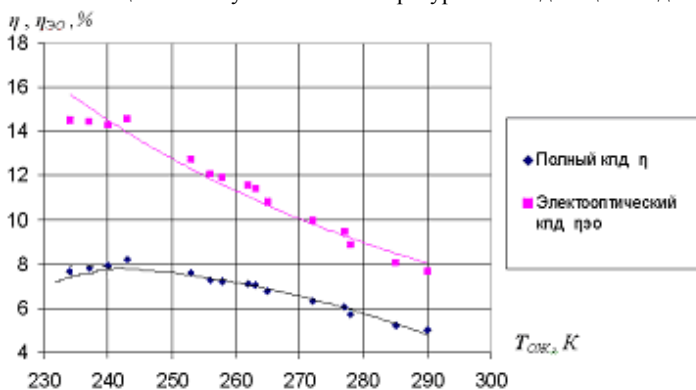


Рис. 9. Зависимость полного и электрооптического к.п.д. от температуры охлаждающей жидкости (расход жидкости 1,2л/мин; параметры разряда  $U=10\text{кВ}$  и  $I=36\text{мА}$ ).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: увеличение потребляемой мощности лазерной установки в 1,25 раза (в

эксперименте) обусловлено энергопотреблением контура охлаждения. При этом экспериментальное значение эффективного КПД установки увеличивается и при температуре 253К достигает максимума 7-8 % (для разных расходов жидкости), после чего КПД снижается (рис.9). Это объясняется тем, что на таких температурных уровнях возрастает энергопотребление в системе охлаждения.

Основным результатом численных и физических экспериментов является практическая реализация форсирования серийного CO<sub>2</sub>-лазера с увеличением мощности излучения на 6-7% на каждые 5К градусов охлаждения. Специальный раздел главы посвящен оценке погрешностей определяемых величин. Погрешность замера мощности излучения составила не более 7% на минимальном уровне ее измерения.

**В четвертой главе** представлена модель выбора оптимального способа повышения эффективности использования технологического CO<sub>2</sub>-лазера (ТЛ) в производстве деталей ЛА. Проведено технико-экономическое обоснование форсирования ТЛ за счет охлаждения, определены границы эффективного применения форсированных и серийных ТЛ в производстве. Показаны основные преимущества и проблемы реализации данного метода, представлен сравнительный анализ основных эксплуатационных и экономических характеристик серийных и форсированных технологических CO<sub>2</sub>-лазеров. Произведен также расчет себестоимости процесса лазерной обработки, капитальные вложения, приведенные затраты по сравнению с традиционными методами обработки деталей ЛА.

Реализация предлагаемого метода повышения мощности излучения позволяет форсировать ЛТК на основе CO<sub>2</sub>-лазера, как новый, так и уже используемый на предприятии при минимальных затратах, т. к. стоимость системы охлаждения составляет величину менее 15% от величины полной стоимости ЛТК.

Охлаждение CO<sub>2</sub>-лазера до температур ниже 273К позволяет снизить расход воды в 3-4 раза по сравнению с расходом у серийных лазеров такого типа, а также снизить расход газовой смеси на 20-25% по сравнению с серийными лазерами такого типа.

Реализация предлагаемого метода повышения мощности излучения CO<sub>2</sub>-лазера позволяет сэкономить денежные средства (рис.10):

- до 15% от цены на серийный лазер такого же уровня мощности излучения – если приобретается новый технологический CO<sub>2</sub>-лазер вместе с холодильной машиной.
- до 90% от цены на серийный лазер такого же уровня мощности излучения – если происходит модернизация уже имеющегося на предприятии технологического CO<sub>2</sub>-лазера, за счет подбора соответствующей холодильной машиной.

Экономически выгоднее (в 2,5раза) использование форсированной лазерной технологической установки, находящейся в эксплуатации, по сравнению с выполнением аналогичных технологических задач с помощью нового ЛТК одинакового уровня мощности излучения.

Появляется новое качество управления технологическим процессом, заключающееся в регулировании мощности излучения, и, соответственно, режимом обработки изделий.

Анализ режимов обработки позволяет выявить положительный экономико-технологический эффект предлагаемого метода повышения энергетических характеристик ТЛ на основе  $\text{CO}_2$ -лазеров по сравнению с традиционными видами обработки изделий в аэрокосмической отрасли. Причем наибольший эффект получается при модернизации уже используемого на предприятии ТЛ за счет охлаждения его до температур ниже 273К (рис.11).

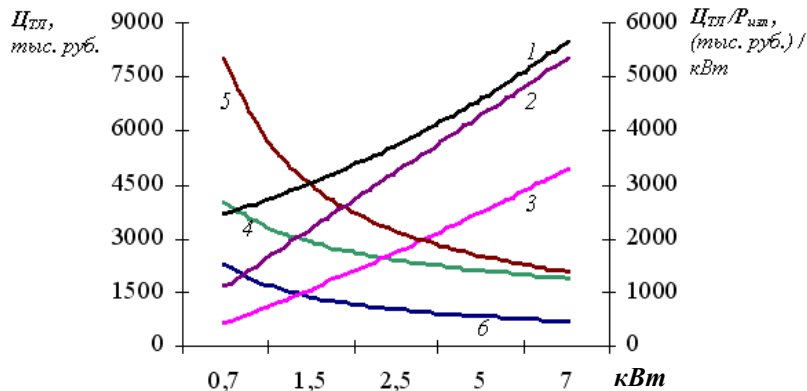


Рис.10. Влияние выходной мощности излучения  $I_{ТЛ}$ , на полную (1,2,3) и приведенную  $I_{ТЛ}/P_{изл}$  стоимость (4,5,6) ЛТК: 1,5- серийного нефорсированного  $\text{CO}_2$ -лазера; 2,4 – форсированного за счет охлаждения  $\text{CO}_2$ -лазера; 3,6 – форсированного за счет охлаждения эксплуатируемого (4года)  $\text{CO}_2$ -лазера

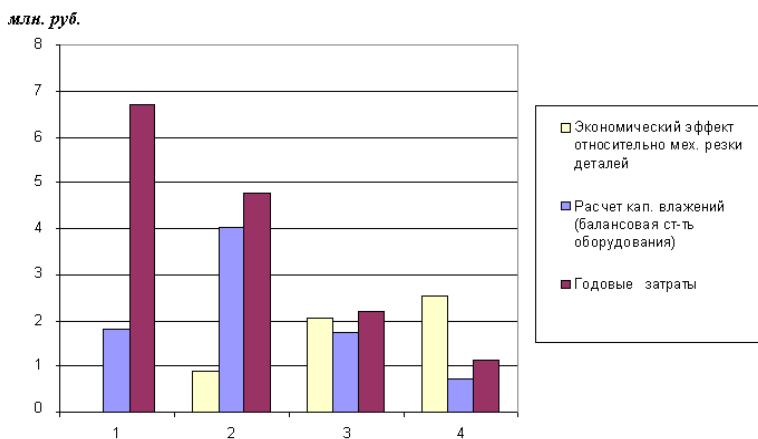


Рис. 11. Суммарный экономический эффект относительно процесса штамповки и суммарные годовые затраты для процессов:

1. Резка металла базовым оборудованием (штамповка).
2. Резка металла лазерным комплексом ТЛ-1,5.
3. Резка металла форсированным технологическим лазерным комплексом ТЛ-700 + холодильная машина (новая установка).
4. Резка металла форсированным технологическим лазерным комплексом ТЛ-700 + холодильная машина (ЛТК, используемый определенный период времени (4года) и модернизируемый предлагаемым методом повышения мощности излучения).

Современные лазерные технологические комплексы уже содержат встроенную систему охлаждения, как правило, рассчитанные на нормальный температурный уровень. В таких случаях задача сводится к поиску и выбору оптимальной системы захлаживания существующего контура лазера и корректировки его технических характеристик.

В настоящее время ЛТК «Trumatic Laser Press 240», применяемый в ОАО «Авиационный завод «Авиакор» (г. Самара), модернизирован в соответствии с рекомендациями диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы и для лазерных комплексов авиационно-космического назначения. Для выбора оптимальной системы охлаждения разработаны критерии, связанные с массогабаритными и энергетическими характеристиками комплексов в случае их применения на транспортных средствах в бортовых авиационных комплексах.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Решена важная научно-техническая проблема повышения эффективности технологии обработки плоских деталей ЛА за счет форсирования CO<sub>2</sub>-лазера путем его захлаживания до температур ниже 273К.

1. Разработана уточненная методика расчета CO<sub>2</sub>-лазера, позволяющая на научном и инженерном уровнях определять параметры и характеристики, как модернизируемых, так и вновь создаваемых лазерных технологических комплексов (ЛТК);
2. Впервые учтено распределение параметров активной среды в газоразрядной трубке (концентраций, парциальных давлений и соотношений состава компонентов рабочей смеси), что впервые позволяет с необходимой точностью определять характеристики CO<sub>2</sub>-лазера при температурах ниже 273К. Разработан алгоритм программы расчета и проведено численное моделирование процессов в активной среде CO<sub>2</sub>-лазера;
3. Подтверждено увеличение производительности в 2-3 раза и экономия энергетических затрат на 10-15% при обработке листовых деталей форсированным технологическим CO<sub>2</sub>-лазером;
4. Снижение затрат на технологию производства плоских деталей летательного аппарата при обеспечении необходимого качества за счет использования предлагаемого метода для нового оборудования составляет до 65%, а для модернизируемого комплекса до 85% по сравнению с традиционным методом обработки (штамповкой);
5. Результаты диссертационной работы использованы для модернизации ЛТК «Trumatic Laser Press 240», применяемого в ОАО «Авиационный завод «Авиакор» (г. Самара);
6. С использованием лазерного технологического комплекса «Trumatic Laser Press 240» на форсированном режиме изготовлены детали самолета АН-140, такие как 140.00.6504.106.00 – фланец, 140.00.6504.265.015 – стенка (изделия, входящие в состав узла управления двигателя), 140.00.4215.035.000 – коромысло (изделие, входящее в состав выключателя стойки шасси) и другие изделия из листовых заготовок;

7. Экспериментальная установка по исследованию тепловых режимов и энергетических характеристик CO<sub>2</sub>-лазера внедрена в учебный процесс СГАУ;
8. Экономический эффект от внедрения разработанной технологии на предприятии аэрокосмической отрасли г. Самары применительно к ЛТК типа «Trumatic Laser Press 240», составляет 500 тыс. руб. на каждый комплекс.

Результаты исследований могут быть использованы для создания форсированных систем охлаждения бортовых лазерных комплексов как аэрокосмического, так и наземного применения.

**Основные научные результаты диссертации изложены в следующих публикациях.**

1. Снижение трудоемкости и повышение производительности процессов изготовления деталей летательных аппаратов за счет форсирования технологического CO<sub>2</sub>-лазера / Д.А.Угланов; Самар. госуд. аэрокосмич. ун-т. – Самара, 2006. – 9 с. - Библ.: с.9. – Деп. в ВИНТИ 14.11.06, №1374-B2006.
2. Повышение технико-экономической эффективности процессов изготовления деталей летательных аппаратов за счет форсирования технологического CO<sub>2</sub>-лазера/ Д.А.Угланов; Самар. госуд. аэрокосмич. ун-т. – Самара, 2006 – 17 с. - Библ.:17с. – Деп. в ВИНТИ 14.11.06, №1375-B2006.
3. Угланов Д.А. Результаты экспериментального исследования CO<sub>2</sub>-лазера при отрицательных температурах контура охлаждения // Аспирантский вестник Поволжья. - 2006.-N2. - С.77-80.
4. Довгялло А.И., Логашкин А.П., Угланов Д.А. Техничко-экономические аспекты форсирования технологических CO<sub>2</sub>-лазеров охлаждением до температур ниже 0<sup>0</sup>С” // Тезисы докладов научно-технической конференции "Новые материалы и технологии - 2006". – М.:МАТИ, 2006. - с. 65.
5. Гришанов В.Н., Изжеуров Е.А., Угланов Д.А. Системы охлаждения лазеров: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2006. 103с.
6. Климов Н.А., Угланов Д.А. Влияние изменения температуры рабочей смеси по сечению газоразрядной трубки на расчет энергетических и теплофизических характеристик отпаянного CO<sub>2</sub>-лазера. // Материалы научно-технической конференции Самарского государственного университета, 24-25 ноября 2005. – Самара, СамГУ, 2005. - С.110-120.
7. Угланов Д.А. Возможность повышения энергетических характеристик CO<sub>2</sub> – лазера при его охлаждении до отрицательных температур // Материалы научно-технической конференции Самарского государственного университета, 20-21 октября 2004. – Самара, СамГУ, 2004. - С.98-107.
8. Довгялло А.И., Угланов Д.А. Энергетический баланс технологического комплекса CO<sub>2</sub> – лазера - холодильная машина // Сборник научных трудов научно-технической конференции «Лазерные системы и их применение». - М.:МНТОРЭС им.А.С.Попова, 2004. - С. 96-98.
9. Довгялло А.И., Угланов Д.А. Опыт форсирования серийного CO<sub>2</sub> - лазера методом охлаждения рабочей смеси до отрицательных температур // Аспирантский вестник Поволжья. – 2003. - N1(5). - С.65-66.
10. Пат. 2230222 Российская Федерация, МПК F 07 В 19/24. Термокомпрессор / Довгялло А.И., Угланов Д.А. Заявка 2002111489/06 от 29.04.02. Оpubл. 10.06.2004. Бюл. №16.

Подписано в печать \_\_\_\_\_, Формат 60x84 1/16

Офсетная печать. Усл. Печ. Л. 1,3 Заказ № \_\_\_\_\_

Тираж 100экз. г. Самара, СГАУ, Московское шоссе, 34

Участок оперативной печати