

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторным работам 1-3
для студентов

Куйбышев 1967

Составленные в соответствии с программами курсов "Лазерная обработка материалов", "Основы технологии лазерной обработки", "Лазерная технология", "Основы научных исследований" методические указания содержат рекомендации к выполнению заданий лабораторного практикума, к решению задач по отысканию технологических параметров операций лазерной обработки материалов и определяют задачи и содержание курсового проектирования процессов изготовления деталей летательных аппаратов и двигателей с использованием лазерной технологии.

Предназначены для студентов спец. 0537, 0408 и слушателей ФПК инженерно-технических работников предприятий.

Составитель В.И.М о р д а с о в

Рецензенты: Л.Л.Г о п ш т е й н, Е.И.И з ж е у р о в

И Н С Т Р У К Ц И Я

по технике безопасности при эксплуатации лазерных технологических установок в учебной лаборатории "Лазерная обработка материалов" кафедры "Автоматические системы энергетических установок"

Инструкция составлена на основе "Технических описаний и инструкций по эксплуатации лазерных технологических установок", "Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей".

К работам на лазерных технологических установках в качестве обслуживающего персонала допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр, имеющие квалификационную группу по электробезопасности не ниже третьей. Ремонт и наладку установок могут производить лица, имеющие квалификационную группу по электробезопасности не ниже четвертой. Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ по лазерной обработке материалов под руководством преподавателя или лаборанта. Учитывая возможность вредного воздействия лазерного излучения на организм человека, наличия высоких напряжений при работе установки ($U = 20$ кВ), требуется неукоснительное соблюдение правил техники безопасности и технической эксплуатации лазерных установок. По условиям электробезопасности лазерные технологические установки относятся к электроустановкам напряжений выше $U = 1000$ В, по нормам техники безопасности - к четвертой категории опасности. Необходимо помнить, что потоки лазерного излучения, выходящие из технологических установок, являются невидимыми.

Лица, нарушившие требования данной инструкции, подвергаются административным взысканиям.

Перед началом работы

На рабочем месте необходимо иметь инструкции по технике безопасности и технической эксплуатации, инструмент для работы с электрооборудованием, диэлектрические перчатки, разрядную диэлектрическую штангу, индикаторы напряжения, защитные очки, спецодежду.

1. Необходимо убедиться в исправности лазерной технологической установки путем внешнего осмотра.

2. Проверить заземление установки.

3. Проверить блокировку излучателя, блока электропитания системы охлаждения и газовой системы лазерной технологической установки.

4. Установить устройство, ограничивающее прохождение лазерного излучения в нерабочую зону. Ограждение выполняется из несгораемого, неплавящегося и светонепроницаемого материала, например, асбеста.

5. Установить ограждение, исключающее возможность проникновения человека в зону лазерной обработки.

6. Собрать оптическую систему, закрепить обрабатываемые детали в технологическом приспособлении.

7. Убрать случайные предметы на пути прохождения лазерного излучения, вызывающие отражение луча и попадание его в обслуживающий персонал.

8. Включить лазерную технологическую установку, руководствуясь инструкцией по эксплуатации.

Б период работы на лазерной установке

1. Оберегать оптические элементы от возможных загрязнений при выбросе расплавленного металла из зоны обработки детали.

2. Провести юстировку излучателя в случае несоответствия распределения плотности мощности излучения в световом пятне.

3. Запрещается работать с источником питания, излучателем при снятых крышках кожуха с искусственным снятием блокировки, оставлять включенную лазерную технологическую установку без надзора.

4. Выполнять технологические операции, предусмотренные инструкцией по эксплуатации, технике безопасности и санитарными нормами.

5. При возникновении аварийных ситуаций следует: немедленно отключить лазерную технологическую установку от сети; провести анализ и установить причину возникновения аварии; заменить вышедшие из строя элементы устройств установки.

По окончании работы

1. Отключить лазерную технологическую установку от сети.

2. Прекратить подачу воды в систему охлаждения и сжатых газов в функциональные системы установки.

3. Привести рабочее место в порядок.

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Лабораторные работы выполняются в учебной лаборатории "Лазерной обработки материалов", где размещено специализированное технологическое оборудование: мощные лазеры для осуществления технологических операций пробивки отверстий, газолазерной резки, сварки и термообработки; измерители мощности и энергии лазерного излучения; аппаратура регистрации характеристик плазмообразования и тепловых потоков, а также металлографическое оборудование.

1. Технологические лазеры. К ним относятся газовый CO_2 -лазер непрерывного и импульсного режимов генерации "ЛАТУС-31", твердотельный непрерывный лазер ЛТН-102, импульсные "Квант-15" и ГОС-1001. Их технические характеристики, используемые в расчетах лабораторного практикума, приведены в табл. I. Каждая технологическая установка укомплектована универсальным приводом, обеспечивающим требуемые параметры перемещения деталей при осуществлении технологических операций. Для правильной установки оптических осей прохождения потоков лазерного излучения используется подсветка лазера видимого диапазона, для юстировки оптических резонаторов - выверительное устройство.

2. Измерители мощности и энергии. Определение распределений плотности мощности и энергии в световом пятне проводится измерителями типа ИМО-2Н (диапазон измерения мощности непрерывного излучения составляет 0,001...1 Вт) и ИКТ-1М (диапазон измерения энергии импульсного излучения составляет 0,05...150 Дж). Данные измерители пригодны для регистрации характеристик излучения длиной волны как $\lambda = 10,6 \mu\text{м}$, так и $\lambda = 1,06 \mu\text{м}$. Изучение параметров мощных потоков лазерного излучения проводится с помощью полупрозрачных фильтров или по величине отраженного потока, проходящего через прозрачную пластину.

3. Регистрирующая аппаратура характеристик плазмообразования и тепловых потоков представлена высокоскоростной камерой ВСК-5 (скорость съемки - $K = 10^5 \dots 10^6$ кадр в сек), скоростным фоторегистратором СКР (скорость съемки $K = 10^3 \dots 10^4$ кадр в сек), тепловизором ТВ-03 (диапазон измерения температур $T = 10 \dots 200^\circ\text{C}$, погрешность измерения $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$). Для регистрации малых упругопластических перемещений деталей используются методы лазерной голографической интерферометрии. Их применение осуществляется с помощью голографических установок ОГМ или УИГ-22. Синхронизация регистрирующей аппаратуры и момента генерации излучения технологической установки

обеспечивается генератором импульсов ГИ-2 (диапазон временной задержки импульсов $T = 0,05 \dots 5$ сек, имеется 5 согласующих каналов).

4. Металлографическое оборудование. Морфология поверхности деталей, обработанных лазерным излучением, изучается на растровых электронных микроскопах РЭМ-200 или РЭМ-100У при увеличениях 2000х и в необходимых случаях 10000х. Микроструктурное исследование зоны обработки осуществляется с помощью металлографических микроскопов МИМ-8 и "Neophot" при увеличениях до 1500х на микрошрифтах с использованием специальных проявителей. Эти же шлифы используются для измерений микротвердости, проводимых на микротвердомере ПМТ-3.

Т а б л и ц а I

#	Наименование параметров	Фактические данные
1	<p>Технологический CO₂-лазер "ЛАТУС-31"</p> <p>Режим работы: непрерывный; импульсный с диапазоном регулирования импульсов и пауз</p> <p>Выполняемые технологические операции</p> <p>Длина волны излучения</p> <p>Мощность в непрерывном режиме: многомодовом одномодовом</p> <p>Расходимость пучка</p> <p>Диаметр светового потока, выходящего из резонатора</p> <p>Расстояние от излучателя до обрабатываемой поверхности</p> <p>Фокусное расстояние линзы</p> <p>Диапазон регулирования скорости перемещения детали:</p> <p style="text-align: right;">угловое линейное</p> <p>Состав газовой смеси CO₂:He:N₂</p> <p>Потребляемая мощность</p>	<p>0,03...100 с</p> <p>резка, сварка, термоупрочнение</p> <p>10,6 мкм</p> <p>1,5 кВт 0,7 кВт</p> <p>$3 \cdot 10^{-3}$ рад</p> <p>40 мм</p> <p>1400 мм</p> <p>75±120 мм</p> <p>0,05...1,5 с⁻¹ 0,5...1 мм/с</p> <p>2:10:20</p> <p>25 кВт</p>
2	<p>Технологический твердотельный лазер ЛТН-102</p> <p>Режим работы</p> <p>Выполняемые технологические операции</p> <p>Длина волны излучения</p>	<p>непрерывный</p> <p>сварка, резка, термоупрочнение</p> <p>1,06 мкм</p>

№	Наименование параметров	Фактические данные
	Мощность в непрерывном режиме Расходимость пучка Диаметр светового потока, выходящего из резонатора Расстояние от излучателя до обрабатываемой поверхности Фокусное расстояние линзы Диапазон регулирования скорости перемещения детали Потребляемая мощность	0,125 кВт $3 \cdot 10^{-3}$ рад 8 мм 400 мм 50...70 мм 0,5...1 мм/с 6 кВт
3	Технологический твердотельный лазер "КВАНТ-15" Режим работы: импульсный с диапазоном регулирования: длительности импульса длительности пауз Выполняемые технологические операции Длина волны излучения Энергия в импульсе Диаметр светового потока, выходящего из резонатора Расходимость пучка Расстояние от излучателя до обрабатываемой поверхности Фокусное расстояние линзы Диапазон регулирования скорости перемещения детали Потребляемая мощность	$1,5...4 \cdot 10^{-3}$ с 0,05...0,1 с пробивка, сварка, термоупрочнение 1,06 мкм 6 Дж 8 мм $3 \cdot 10^{-3}$ рад 700 мм 70...100 мм 0...1 мм/с 10 кВт
4	Лазерная установка ГОС1001 Режим работы импульсный Длина волны излучения Энергия в импульсе Диаметр светового потока, выходящего из резонатора Расходимость пучка Фокусное расстояние линзы Потребляемая мощность Выполняемые технологические операции	0,03 с 1,06 мкм 100...1000 Дж 45 мм 0,05 рад 250...1000 мм 5 кВт термоупрочнение, пробивка

Лабораторная работа I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ В СВЕТОВОМ ПЯТНЕ ИМПУЛЬСНОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

Цель работы - ознакомиться с методикой измерения распределения плотности энергии в световом пятне импульсного твердотельного лазера; обработать результаты экспериментальных исследований методом наименьших квадратов, установив аналитические выражения зависимостей распределения плотности энергии по пятну.

I. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для проведения технологических расчетов параметров лазерной обработки требуется знать аналитическую зависимость распределения плотности энергии \bar{E} в световом пятне. Во многих случаях ее распределение оказывается очень сложным из-за суперпозиции нескольких поперечных мод l, δ . Для лазерной обработки материалов предпочтительнее использовать одномодовое излучение, называемое гауссовым. В этом случае зависимость плотности энергии \bar{E} от радиуса r описывается выражением

$$\bar{E}(r) = \bar{E}_0 \exp(-r^2/\omega^2), \quad (1)$$

где \bar{E}_0 - плотность энергии в центре пучка, ω - радиус гауссова пучка, на котором плотность энергии падает в e^2 раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка. Для многомодового потока лазерного излучения могут быть использованы следующие выражения линейной $\bar{E}(r) = ar + b$, экспоненциальной $\bar{E}(r) = ae^{kr} + c$ и гиперболической зависимости $\bar{E}(r) = \frac{a}{r} + b$, где a, b, c - коэффициенты аппроксимации, которые устанавливаются обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Суть этого метода заключается в том, что аппроксимирующая кривая будет наилучшим образом проходить между экспериментальными точками, если сумма квадратов расстояний всех точек будет минимальной. Для зависимостей линейного вида $\bar{E}(r) = ar + b$ коэффициенты аппроксимации a, b вычисляются с помощью выражений /3/

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n \bar{E}(z)_i z_i - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n E(z)_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2}, \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n \bar{E}(z) - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n z_i \bar{E}(z)_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2}. \quad (3)$$

Дисперсия уклонения экспериментальных точек от прямой S_0^2 и дисперсии коэффициентов S_a^2 и S_b^2 определяют по следующим формулам

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{E}(z)_i^2}{n-2} - \frac{\left[\sum_{i=1}^n \bar{E}(z)_i \right]^2}{n(n-2)} - \frac{\left[n \sum_{i=1}^n z_i \bar{E}(z)_i - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n \bar{E}(z)_i \right]^2}{n(n-2) \left[n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2 \right]}, \quad (4)$$

$$S_a^2 = \frac{S_0^2 n}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2}, \quad (5)$$

$$S_b^2 = \frac{S_0^2 \sum_{i=1}^n z_i^2}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2}, \quad (6)$$

где n - число экспериментальных точек (измерений).

В случае аппроксимации экспоненциальной и гиперболической зависимостей $\bar{E}(z)$ применяют метод линеаризации (выравнивания) путем ввода новых переменных. Так, экспоненциальная зависимость $\bar{E}(z) = a e^{\delta z} + c$ приводится к линейной форме $Y = B + AZ$ подстановкой вида

$$Y = \ln[C - \bar{E}(z)], \quad B = \ln(-a), \quad A = \delta;$$

$$C = \frac{\bar{E}(z)_1 \bar{E}(z)_2 - \bar{E}(z)_3^2}{\bar{E}(z)_1 + \bar{E}(z)_2 - 2\bar{E}(z)_3} \quad (7)$$

где $\bar{E}(z)_1, \bar{E}(z)_2, \bar{E}(z)_3$ - величины плотности энергии излучения при крайних и среднем значении радиуса z .

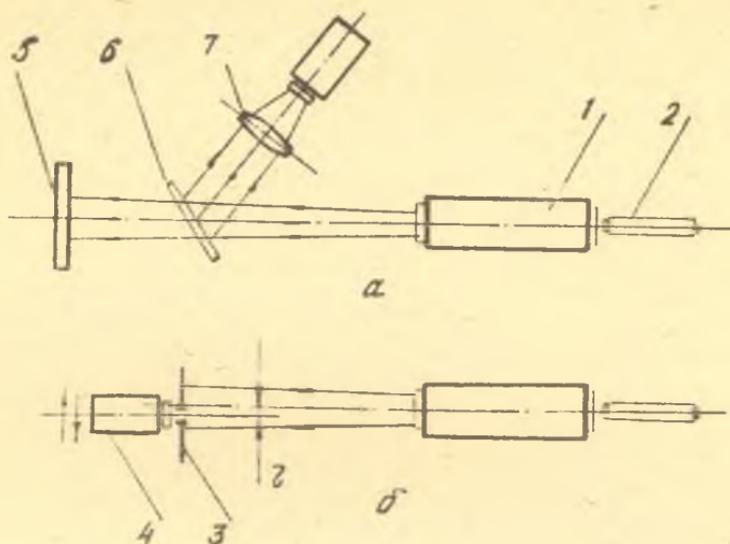
Гиперболическая зависимость $\bar{E}(z) = \frac{a}{z} + b$ приводится к линейной форме $\bar{E}(z) = aX + b$ подстановкой $X = \frac{1}{z}$. В дальнейшем расчеты коэффициентов a и b проводятся с помощью соотношений (2,3).

II. Описание лабораторной установки

В сменном устройстве лабораторной установки на единой оптической оси размещены: излучатель импульсного твердотельного лазера ГОС 1001, головка измерителя энергии, установленная на перемещаемом устройстве, He-Ne - лазер для определения оптической оси, поворотная прозрачная пластина и экран с затемненной поверхностью. Изменение расположения сменных элементов лабораторной установки (рис.1) позволяет последовательно проводить регистрацию распределения плотности энергии $\bar{E}(z)$ в световом пятне по характеру изменения цвета затемненного экрана и величине показаний измерителя ИКТ-М, а также определять энергию в импульсе E . Диафрагмирование входного отверстия измерительной головки применяют лишь в случае установления величины плотности энергии $\bar{E}(z)$ в заданной точке z_0 . Энергия в импульсе определяется измерением отраженного светового потока наклоненной кварцевой пластинкой.

III. Домашнее задание

Рассчитать значение коэффициентов аппроксимации a, b линейной зависимости $\bar{E}(z) = az + b$ распределения плотности энергии $\bar{E}(z)$ в световом пятне. Необходимые справочные данные приведены в прил. I.



Р и с. 1. Схемы измерения энергии в импульсе E (а) и распределения плотности энергии по пятну (б): 1 - излучатель твердотельного лазера ГОС-1001; 2 - излучатель He-Ne-лазера; 3 - диафрагма; 4 - головка измерителя энергии ИКТ-1М; 5 - экран с затемненной поверхностью; 6 - поворотная пластина; 7 - фокусирующая линза

IV. Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкции по эксплуатации лазера ГОС 1001, He-Ne-лазера и измерителя энергии ИКТ-1М. Определить порядок операций по их включению и выключению. С помощью сменных элементов лабораторной установки собрать согласно рис.1 схемы измерения энергии в импульсе E и распределения плотности энергии по пятну $E(r)$. Лабораторное задание выполнять в следующей последовательности.

I. Определить энергию лазерного излучения в импульсе E , генерируемого установкой ГОС 1001, при заданном уровне энергии накачки оптического резонатора E_H . Расчет величины отраженной энергии E_r от поворотной пластинки проводить в соответствии с данными оптических свойств материалов (прил.2).

2. Установить распределение плотности энергии $\bar{E}(z)$ лазерного излучения в световом пятне, генерируемого установкой ГОС 1001 при заданном уровне энергии накачки оптического резонатора E_H . Принять шаг перемещения головки измерителя энергии ИКТ-1М таким, чтобы 8...10 точек измерений были равномерно распределены вдоль светового пятна. Провести регистрацию распределения энергии с помощью затемненного экрана.

3. Обработать результаты экспериментальных исследований методом наименьших квадратов, установив аналитические выражения зависимости плотности энергии в световом пятне $\bar{E}(z)$ в линейной $\bar{E}(z) = az + b$, экспоненциальной $\bar{E}(z) = ae^{bz} + c$ и гиперболической $\bar{E}(z) = \frac{a}{z} + b$ формах. Анализируя значения дисперсии отклонения экспериментальных точек S_0^2 и дисперсии коэффициентов S_a^2 , S_b^2 , выявить зависимость $\bar{E}(z)$, имеющую наилучшую сходимость с экспериментальными данными.

У. Указания к отчету

При составлении отчета необходимо привести характеристики технологического и измерительного оборудования, схемы измерений энергии в импульсе E и распределения плотности энергии по пятну $\bar{E}(z)$. Результаты расчетов коэффициентов аппроксимации экспериментальной зависимости $\bar{E}(z)$ представить в виде таблицы по предлагаемой форме (табл.2). Построить графики экспериментальной и аналитических зависимостей распределения плотности энергии по пятну $\bar{E}(z)$, отразить выводы и оценку полученных результатов.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетов коэффициентов аппроксимации экспериментальной зависимости плотности энергии $\bar{E}(z)$, Дж/мм² вдоль радиуса светового пятна z , мм^x

Значения параметров	$n = i$									$\sum_{i=1}^n$
	1	2	3	4	...	9	10			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

x Твердотельный лазер ГОС 1001, энергия в импульсе $E = \dots$ Дж, энергия накачки $E_H = \dots$ Дж

I. Экспериментальные данные

$$\bar{E}(z)_i$$

$$z_i$$

2. Линейная зависимость $\bar{E}(z) = az + b$

$$(a = \dots, b = \dots, S_0^2 = \dots, S_a^2 = \dots, S_b^2 = \dots)$$

$$\bar{E}(z)_i^2$$

$$z_i^2$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

$$\bar{E}(z)_i z_i$$

$$\text{и } \bar{E}(z)_{расч}$$

3 Экспоненциальная зависимость $\bar{E}(z) = ae^{bz} + c$

$$(a = \dots, b = \dots, c = \dots, S_0^2 = \dots, S_a^2 = \dots, S_b^2 = \dots)$$

$$Y_i = \ln[c - \bar{E}(z)_i]$$

$$Y_i^2$$

$$Y_i z_i$$

$$\bar{E}(z)_{расч}$$

4 Гиперболическая зависимость $\bar{E}(z) = \frac{a}{z} + b$

$$(a = \dots, b = \dots, S_0^2 = \dots, S_a^2 = \dots, S_b^2 = \dots)$$

$$X_i = \frac{1}{z_i}$$

$$X_i$$

$$\bar{E}(z)_i X_i$$

$$\bar{E}(z)_{расч}$$

VI. Вопросы для самопроверки

1. Какие распределения плотности энергии в световом пятне возникают у твердотельных и газовых лазеров?
2. Перечислите способы измерения энергии лазерного излучения.
3. В чем заключается сущность метода наименьших квадратов при обработке экспериментальных данных?
4. Каким образом можно применить метод линеаризации при аппроксимации экспериментальных данных квадратичной кривой?
5. Каким показателем оценить наилучшую сходимость экспериментальной и аналитической зависимостей?
6. В каких случаях возможно применение при обработке экспериментальных данных экспоненциальной зависимости?

Лабораторная работа 2

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ CO₂-ЛАЗЕРА

Ц е л ь р а б о т ы - ознакомиться с устройствами регулирования и контроля формирования газовой смеси быстропоточного CO₂-лазера. Установить методом планирования эксперимента оптимальный состав газовой смеси из условия максимальной мощности.

1. Краткие теоретические сведения

При отработке состава газовой смеси CO₂-лазера, генерирующего излучение с максимальной мощностью W , математическую модель принимают в следующем виде [2]

$$W = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2; \quad (8)$$

где $b_i = \frac{\sum_{i=1}^n W_{срi} x_i}{N}$ - коэффициенты уравнения регрессии; W - мощность лазерной установки в непрерывном режиме; N - число опытов; n - число экспериментов в опыте; $W_{срi}$ - среднее значение мощности излучения в опыте; x_i - фактор (безразмерные величины парциальных давлений компонент газовой смеси $P_{CO_2} : P_{He} : P_{N_2} \approx 2:10:20$. Выполняется условие постоянства величины общего давления $P_{общ} = const$ (табл.3).

Выбор уровней факторов

Уровни	Факторы	
	P_{CO_2}	P_{He}
Основной, P_0		
Интервал варьирования, ΔP		
Верхний, P_{max}		
Нижний, P_{min}		
Код	$x_1 = (P_{CO_2} - P_{CO_2}) / \Delta P_{CO_2}$	$x_2 = (P_{He} - P_{He}) / \Delta P_{He}$

При построении математической модели (8) используются следующие расчетные характеристики:

$$S_{W_i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - W_{расч})^2}{n-1} - \text{квадратичное отклонение величины мощности в опыте;}$$

$W_{расч}$ - расчетное значение мощности по математической модели;

$f_1 = n - 1$ - число свобод в эксперименте;

$f_2 = N$ - число свобод в опыте;

$t_{табл}$ - коэффициент Стьюдента по определению значимости коэффициентов математической модели;

S_W, S_B - дисперсия в определении мощности и коэффициентов математической модели;

$G_{табл}$ - критерий Кохрена в определении однородности дисперсий;

$G_{расч} = \frac{S_{W_{max}}}{\sum_{i=1}^N S_{W_i}^2}$ - расчетное значение критерия Кохрена;

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (W_{расч_i} - W_{экс_i})^2}{N-K} - \text{дисперсия неадекватности;}$$

$W_{расч_i}, W_{экс_i}$ - значения мощности в i -ом опыте, соответственно рассчитанные по уравнению регрессии и определенные экспериментально;

K - число коэффициентов уравнения регрессии (8), включая δ_0 ;

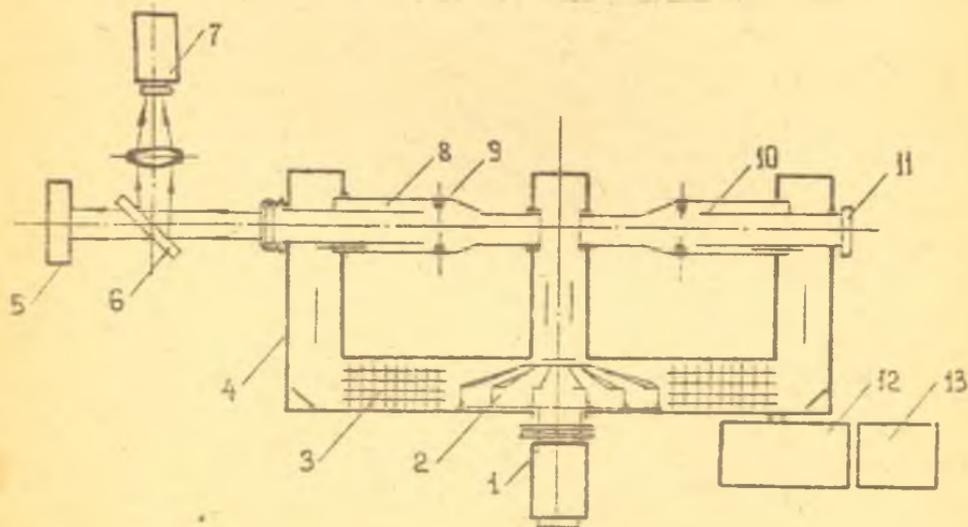
$$F_{расч} = \frac{S_{неод}^2}{S_{W_i}^2} - \text{критерий Фишера по определению адекватности математической модели};$$

σ - коэффициент, определяющий точность выполнения эксперимента.

Матрица планирования эксперимента, результаты вычислений коэффициентов уравнения математической модели (8), определение их значимости и проверка адекватности представляется в форме табл.4 и 5.

П. Описание лабораторной установки

Исследования по обработке оптимального состава газовой смеси CO_2 -лазера проводятся на базе технологической установки "ЛАТУС-31". Основные уровни давлений газов составляют: $P_{CO_2} = 2 \cdot 10^2$ Па, $P_{He} = 10^3$ Па, $P_{N_2} = 2 \cdot 10^3$ Па. Управление составом газовой смеси осуществляется распределительным устройством дроссельного типа (рис.2). Давление отдельных компонент газовой смеси определяется манометрической аппаратурой. Величина мощности лазерного излучения W устанавливается по показаниям проточного калориметрического измерителя.



Р и с. 2. Общий вид быстропроточного CO_2 -лазера "ЛАТУС-31": 1 - высокоскоростной привод; 2 - центробежный вентилятор; 3 - холодильник; 4 - корпус газового тракта; 5 - задний огнеупорный экран; 6 - поворотная пластина; 7 - проточный калориметрический измеритель мощности; 8 - разрядная камера; 9 - электроды; 10 - газоотделительные каналы; 11 - устройство истировки зеркал; 12 - распределительное устройство газовой смеси; 13 - манометр

Ш. Домашнее задание

Провести выбор уровней факторов X_1 и X_2 при построении математической модели зависимости мощности излучения непрерывного быстроточного CO_2 -лазера "ЛАТУС-31" от состава газовой смеси. Описать назначение отдельной газовой компоненты в процессе генерации лазерного излучения.

IV. Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкции по эксплуатации лазера "ЛАТУС-31", а также проведению изменений состава газовой смеси и определению мощности генерируемого излучения W . Определить порядок включения и выключения установки. Ввиду гигроскопичности оптического материала установки (KCC) не допускается попадание влаги на шлифованные поверхности. Оптические материалы разрешается брать только боксовой поверхностью (периметру). Лабораторное задание выполнять в следующей последовательности:

1. Определить мощность лазерного излучения W непрерывной генерации установкой "ЛАТУС-31" в соответствии с заданным изменением парциальных давлений газовых компонент P_{CO_2} и P_{He} табл.3. Провести многократный замер мощности W_i в каждом опыте.

2. Проверить однородность дисперсий, т.е. выяснить определяются ли различные значения W_i с одинаковой точностью по критерию Кохрена. Расчетное значение G -критерия сравнивают с табличным в зависимости от уровня значимости α , числа степеней свободы $f = (n - 1)$ и числа опытов N (прил.3). Ряд дисперсий считается однородным, если $G_{расч} < G_{табл}$. Уровень значимости α - мера точности ответа. Для инженерных расчетов $\alpha = 0,05$, что соответствует вероятности правильного ответа 95%. В случае условия неоднородности дисперсий $G_{расч} > G_{табл}$ следует увеличить количество экспериментов по определению мощности W_i .

3. Вычислить значения коэффициентов b_i уравнения регрессии (8). Проверить их статическую значимость. Рассчитать дисперсию в определении коэффициентов $S_{b_i}^2 = \frac{S^2}{nN}$. Коэффициент b_i считается значимым, когда его абсолютная величина больше доверительного интервала, т.е. $|b_i| > \Delta b_i = t S_{b_i}$, где t - критерий Стьюдента (берется из таблиц в зависимости от уровня значимости α и числа степеней

Определение коэффициентов математической модели зависимости местности W от состава газовой смеси

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	Результаты эксперимента				Проверка адекватности модели				
					W_1	W_2	W_3	W_0	W_{cp}	$S_{W_i}^2$	$W_{расч}$	$W_{расч} \cdot W_{экс}$	
1	+1	-1	-1	+1									
2	+1	+1	-1	-1									
3	+1	-1	+1	-1									
4	+1	+1	+1	+1									
Σ									Σ				

Таблица 5

Проверка однородности дисперсии, $S_{W_i}^2$; значимости коэффициентов и адекватности модели по определению оптимального соотношения газовой смеси

Параметр	$\Sigma S_{W_i}^2$	$S_{W_{max}}^2$	$G_{расч}$	α	f_1	f_2	$G_{табл}$
Параметр	S_W^2	$t_{табл}$	S_B^2	S_B	Δb_i	$1b_i$	
Дисперсии однородны (неоднородны) $G_{расч} \leq G_{табл}$				Значимы (незначимы) $\beta_1, \dots, \beta_k = \dots$			
Параметр	$\Sigma (W_{расч} - W_{экс})^2$	$S_{неад}$	$F_{расч}$	α	f_1	f_2	
Модель адекватна (неадекватна) $F_{расч} \leq F_{табл}$							

свободы при определении дисперсии опыта (прил.3), S_{β_i} - среднеквадратичная ошибка определения коэффициентов регрессии $S_{\beta_i} = \sqrt{S_{\beta_i}^2}$. Статистическая незначимость коэффициента β_i интерпретируется как отсутствие влияния соответствующего фактора в изученных интервалах его изменения. Такие коэффициенты из модели (8) исключаются.

4. Проверить адекватность модели зависимости мощности W от состава газовой среды, чтобы ответить на вопрос - можно ли использовать полученное уравнение или необходима более сложная модель. Проверку осуществляют с помощью критерия Фишера $F = \frac{S^2_{неод}}{S^2_{wi}}$. Гипотеза об адекватности уравнения (8) принимается в том случае, когда $F_{расч} \leq F_{табл}$ для свободы f_1 и f_2 (прил.3).

5. Провести анализ математической модели зависимости мощности W лазерного излучения от состава газовой среды, оценить влияние каждого фактора на процесс генерации излучения.

У. Указания к отчету

При составлении отчета требуется привести схему устройства быстропоточного CO_2 -лазера "ЛАТУС-31". Матрица планирования эксперимента и его результаты представляются по форме в виде табл.3-5. Отразить анализ математической модели зависимости мощности W лазерного излучения от состава газовой среды, оценку влияния каждого фактора.

УІ. Вопросы для самопроверки

1. Объясните назначение узлов устройства быстропоточного CO_2 -лазера "ЛАТУС-31".
2. Каким образом выбирается основной уровень и интервалы варьирования факторов?
3. В чем заключается проверка однородности дисперсий?
4. Как проводится проверка статической значимости коэффициентов модели?
5. Что следует выполнить, если не выполняется условие адекватности модели?
6. Каким образом осуществляется контроль и регулирование состава газовой смеси CO_2 -лазера?

ПРОБИВКА ОТВЕРСТИЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Цель работы - ознакомиться с методикой калибровки оптического резонатора твердотельного импульсного лазера. Определить влияние технологических параметров (энергии импульса, длительности импульса и положения фокуса относительно обрабатываемой поверхности детали) на глубину получаемого отверстия. Ознакомиться с протекающим структурным превращением в зоне термического влияния при лазерной обработке.

1. Краткие теоретические сведения

При получении отверстий стадиями разрушения непрозрачных материалов лазерным излучением умеренной плотности являются испарение и плавление вещества. Лунка растет в глубину в основном за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров (рис.3). Имеет место баланс энергии [8/

$$dE = dE_1 + dE_2;$$

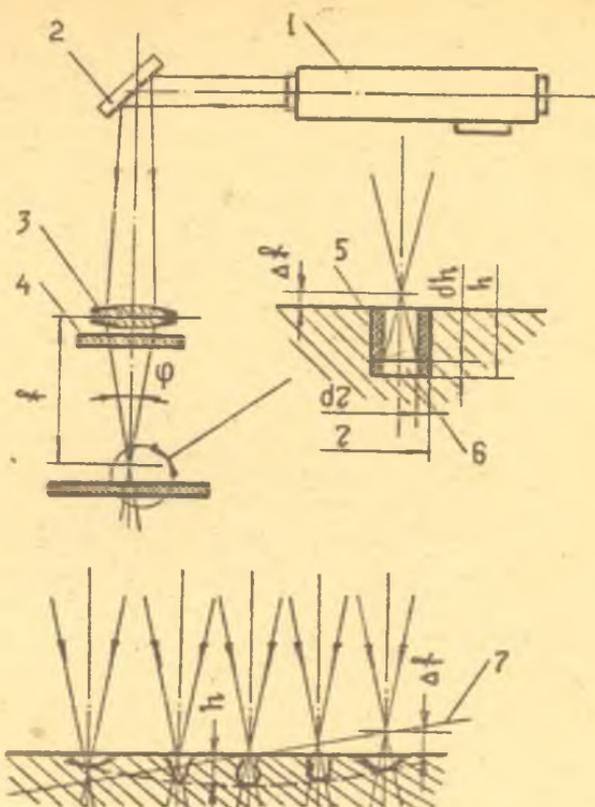
$$W(\tau) d\tau = \pi L_g r^2(\tau) dh + 2\pi L_m r^2(\tau) h(\tau), \quad (9)$$

где dE - изменение энергии в импульсе; dE_1 - теплота образования паров; dE_2 - теплота образования жидкой фазы; L_g - удельная теплота испарения материала; L_m - удельная теплота плавления материала; $r(\tau)$, $h(\tau)$ - соответственно радиус и глубина лунки; τ - длительность импульса; $W(\tau)$ - мощность излучения.

Принимая допущения о постоянстве мощности излучения $W(\tau) = const$, а также то, что глубина отверстия больше, чем его диаметр $h(\tau) > r(\tau)$ при условии $dr(h) = dh(\tau)$, интегрированием уравнения (9) получаем

$$h = \sqrt[3]{\frac{3 W \tau}{\pi g^2 \rho (L_g + 2 L_m)}}, \quad r = r_0 \sqrt[3]{\frac{3 W \tau}{\pi (L_g + 2 L_m)}} \quad (10)$$

где r_f - радиус светового пятна на поверхности материала; φ - угол светового конуса.



Р и с. 3. Механизм образования отверстия импульсным лазерным излучением: 1 - излучатель; 2 - поворотное зеркало; 3 - фокусирующая линза; 4 - защитное стекло; 5 - область расплава; 6 - область парообразования; 7 - положение фокуса

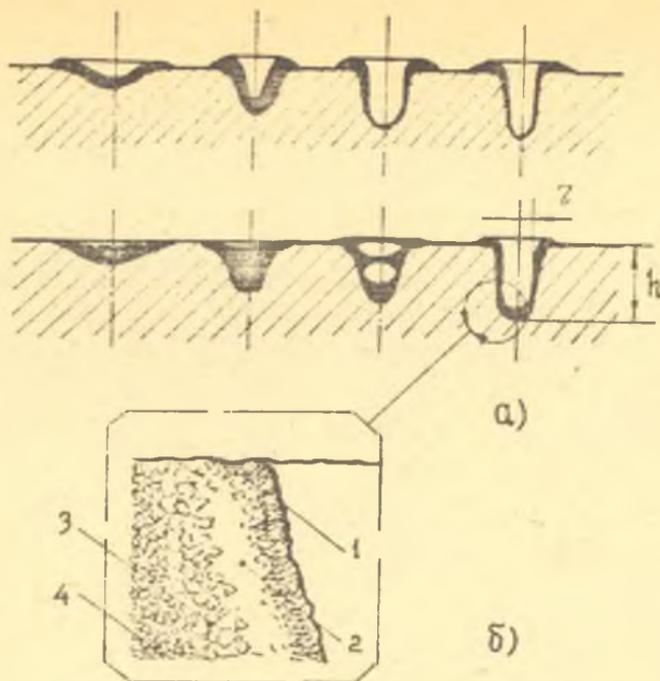
Из формул (10) видно, что глубина образования отверстия не пропорциональна энергии импульса, а находится в степени $(1/3)$. Здесь большое влияние имеет угол светового конуса, т.е. длина фокуса объектива f . На профиль лунки и характер разрушения материала влияют условия фокусировки лазерного излучения. При обработке в сходящемся световом пучке характерным является конический профиль лунки, а в расходящемся - цилиндрический (см. рис. 3). Колбообразный профиль -

комбинация конуса и цилиндра. За счет неравномерности распределения излучения по сечению светового пятна в течение и во время импульса, а также под влиянием теплопроводности и газодинамических явлений, профиль лунки искажается. На входе появляется характерная воронка и плавный переход от дна к стенкам. Лунка может иметь параболический профиль.

Не вся жидкая фаза удаляется из лунки, частично расплав остается в ней. Причиной этого является уменьшение плотности светового потока на дне лунки как за счет расфокусировки светового пучка по мере ее роста в глубину, так и вследствие обычно наблюдаемого у твердотельных лазеров уменьшения мощности генерации к концу импульса. Уменьшение скорости вылета и давления паров в лунке приводит к частичному выбросу расплава. Полное заплывание лунок наблюдается при определенном отношении h/τ . У глубоких лунок весь расплав, составляющий в среднем 2/3 объема лунки, после окончания импульса под действием сил поверхностного натяжения переформируется (рис.4) и принимает форму некоторого тела вращения с минимальной площадью поверхности ($\frac{h}{\tau} < 0,7$ - лунка заплывлена, $\frac{h}{\tau} > 4$ - не заплывлена, так как потоки жидкости турбулентны).

При образовании отверстия импульсным лазерным излучением в металлах поверхностный слой имеет изменение исходной структуры (см.рис.4). Зона воздействия лазера состоит из двух участков /5/. Характерной особенностью микроструктуры первого участка является ее столбчато-дендритное строение. Вследствие высоких скоростей охлаждения при кристаллизации происходит преимущественный рост главных осей дендритов, направленных перпендикулярно границе раздела участков. Столбчатые кристаллы выглядят как равноосные зерна, состоящие из отдельных блоков, определенным образом ориентированных в пределах каждого зерна. На втором участке микроструктура характеризуется мелкодисперсностью, что объясняется фазовой перекристаллизацией в условиях быстрого охлаждения. Если исходное состояние заготовки являлось закаленным, то второй участок имеет зону отпуска с пониженной микротвердостью. Образование зоны отпуска связано с низкой скоростью охлаждения в периферийных слоях заготовки.

Для получения глубоких отверстий используется многоимпульсная лазерная обработка. В этом случае необходимое число импульсов и относительная глубина отверстия, которую можно получить в заготовке, определяется следующими выражениями /8/

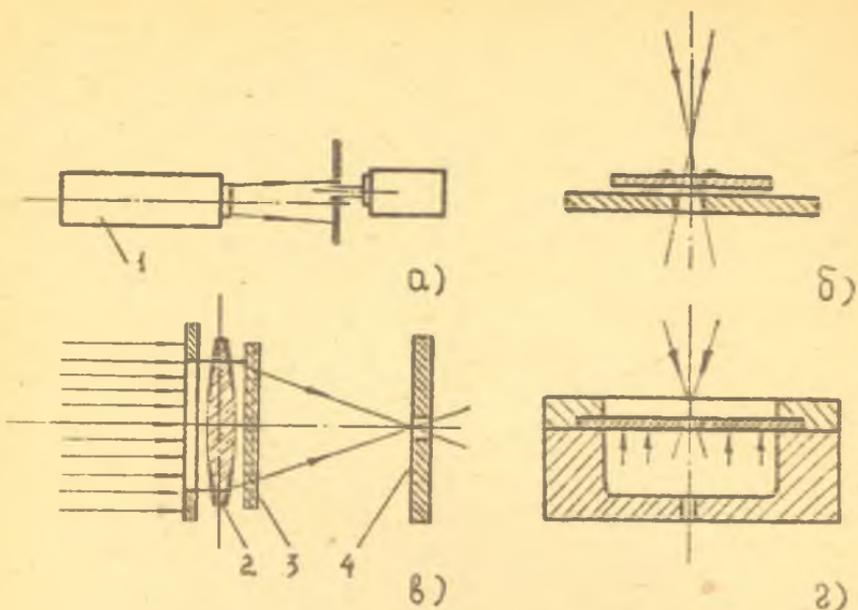


Р и с. 4. Заплавление отверстий при лазерной обработке (а) и общий вид микроструктуры предварительно закаленного стального образца в зоне термического влияния (б): 1 - участок мелкодисперсных дендритов; 2 - упрочненная зона; 3 - участок отпуска; 4 - исходная структура

$$\frac{r}{z} = \frac{0,56 L_B^{0,33} E^{0,17}}{\pm g \varphi^{1,33} E_B^{0,5}} ; \quad r = \frac{1,748^{0,33} E^{0,17}}{\pm g \varphi^{0,33} E_B^{0,5}} ; \quad (II)$$

где E - энергия импульса; E_B - предельная плотность энергии; которая вызывает испарение материала; L_B - удельная теплота испарения; φ - угол светового конуса.

В первоначальный момент фокус светового пучка располагается над поверхностью детали. С увеличением глубины отверстия его заглубляют. Для повышения точности размеров отверстий устраняют чрезмерное образование жидкой фазы на их внутренней поверхности. Последнее достигают применением пневматического калибрования, накладных экранов и диафрагмирования (рис.5).



Р и с. 5. Схема измерения распределения плотности энергии по пятну (а) и размещение накладных экранов (б), диафрагм (в), устройств калибрования (г) при улучшении качества пробиваемых отверстий импульсным излучением: 1 - излучатель; 2 - фокусирующая линза; 3 - защитное стекло; 4 - деталь

П. Описание лабораторной установки

При проведении лабораторной работы используется импульсная лазерная установка ГОС 1001, имеющая энергию импульса не менее $E = 1$ кДж, и технологическая установка "КВАНТ-15". Исследования проводятся на листовых стальных и алюминиевых образцах, имеющих накладные экраны. В сменном устройстве лабораторной установки на единой оптической оси размещены (см. рис.5) излучатель импульсного лазера ГОС 1001, головка измерителя энергии ИКТ-1М, He-Ne-лазер для определения оптической оси, поворотная прозрачная пластина, экран с затемненной поверхностью и набор диафрагм. Сменные элементы лабораторной установки позволяют последовательно проводить регистрацию распределения плотности энергии $E(r)$ в световом пятне по характеру изменения света затемненного экрана и величине показаний измерителя ИКТ-1М, а также определить энергию в импульсе E . Величину отверстия диафрагмы измерительной

газовки выбирают из условия точности измерения плотности энергии в заданной точке. Для калибровки оптического резонатора применяется выверитель.

III. Домашнее задание

Пользуясь теплофизическими характеристиками материалов (прил.4) и техническими данными установки "КВАНТ-15" (табл.1), определить количество импульсов, необходимых для получения отверстия в пластинах из стали 45 толщиной 1,5 и 2 мм. Для расчета воспользоваться зависимостями (II).

IV. Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкции по эксплуатации лазера ГОС 1001, технологической установки "КВАНТ-15", He-Ne-лазера и измерителя энергии ИКТ-1М. Определить порядок операций по их включению и выключению. С помощью сменных элементов лабораторной установки собрать согласно рис.5 схемы измерения энергии излучения и выполнения технологической операции пробивки отверстия. Лабораторное задание выполнить в следующей последовательности.

1. С помощью выверителя провести калибровку оптического резонатора импульсной установки ГОС 1001. Воздействием лазерного излучения на затемненный экран выявить распределение плотности мощности по пятну.

2. Применяя измеритель энергии ИКТ-1М, построить зависимости плотности мощности по пятну при различных энергиях накачки резонатора. Аппроксимировать экспериментальные данные экспоненциальной кривой $E(z) = ae^{bz}$. Результаты измерений представить в форме табл.6.

Т а б л и ц а 6

Таблица результатов измерений и обработки экспериментальных данных

№	Энергия накачки, кДж	Плотность мощности в пятне Вт/см ² при удалении от оси z , мм			
		$z = 0$	$z = 8$	$z = 16$	$z = 24$
1	20				
2	30				
3	40				

№	Энергия накачки, кДж	Значения коэффициентов аппроксимации	
		a	b
1	20		
2	30		
3	40		

3. Экспериментально установить зависимости глубины h и диаметра d пробиваемого отверстия от величины энергии в импульсе E установки ГСС 1001 и удаления фокуса от поверхности детали sf . Результаты экспериментов для алюминиевых и стальных образцов сопоставить с расчетными данными, полученными по соотношениям (10).

4. Пользуясь теоретическими зависимостями (11), рассчитать необходимое количество импульсов для пробивки пластины из стали 45 толщиной 1,5 и 2 мм на установке "КВАНТ-15". Сопоставить расчетные данные с результатами эксперимента. Значения теплофизических характеристик приводятся в прил.4.

5. Применяя диафрагмирование светового потока с величиной перекрытия 20, 30, 50% при условии равенства энергии излучения, воздействующего на образец, а также изменяя энергию накачки, выявить зависимость относительной глубины пробиваемого отверстия от формы распределения плотности энергии лазерного излучения по пятну. Использовать лазерную установку ГСС 1001.

6. Знакомиться с микроструктурой зон термического влияния при пробивке отверстий в образцах из алюминиевых сплавов и углеродистых сталей.

У. Указания к отчету

При оформлении отчета требуется привести схемы измерения энергии излучения и оптической схемы технологической операции пробивки отверстия. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных представить в форме табл.6. Привести результаты численных расчетов и экспериментальных данных по установлению зависимости глубины h и диаметра d пробиваемого отверстия от величины энергии в импульсе E и удаления фокуса от поверхности детали sf . Про-

вести анализ зависимости относительной глубины $\frac{h}{d}$ пробиваемого отверстия от формы распределения плотности энергии лазерного излучения по пятну. Зарисовать схему образования микроструктур при пробивке в стальных образцах.

VI. Вопросы для самоподготовки

1. Какие стадии разрушения непрозрачных материалов различают при пробивке их импульсным излучением?
2. Как зависит геометрия дунки от положения фокуса относительно поверхности материала? В каких случаях получается отверстие правильной формы?
3. В каких случаях происходит заглавление отверстия? От каких энергетических параметров зависит процесс выноса продуктов расплава?
4. Каким путем улучшить качество пробиваемых отверстий?
5. Чем отличается микроструктура зон термического влияния при пробивке отверстий лазерным излучением в закаленном и отожженном образцах?

Библиографический список

1. Абельсиитов Г.А. и др. Мощные CO_2 -лазеры и их применение в технологии.- М.:Наука, 1984.- 104 с.
2. Адлер Д.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.- М.:Наука, 1976.- 279 с.
3. Кассандрова О.Л., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений.- М.:Наука, 1970.- 104 с.
4. Коваленко В.С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров.- Киев: Вища школа, 1977.- 144 с.
5. Криштал М.А. и др. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера.- М.:Металлургия, 1973.- 192 с.
6. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник/Н.Н.Рыкалин и др.- М.:Машиностроение, 1985.- 496 с.
7. Реди Д. Промышленные технологические лазеры и их применение.- М.:Мир, 1981.- 638 с.
8. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка в машиностроении.- М.:Машиностроение, 1975.- 295 с.
9. Шорин В.П. и др. Лазерная технология в авиастроении.- Куйбышев:КуАИ, 1966.- 25 с.

Варианты домашних заданий по обработке экспериментальных данных зависимости плотности энергии $\bar{E}(z)$ по радиусу светового пятна методом наименьших квадратов

Вариант	Значения плотности энергии $\bar{E}(z)$, Дж/мм ²														
	0	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	17,5	18,5	19	20	
I	0,70	0,71	0,71	0,70	0,68	0,65	0,64	0,60	0,60	0,60	0,58	0,57	0,58	0,56	0,55
2	0,48	0,40	0,35	0,32	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	0,35	0,41	0,44	0,46	0,48
3	0,64	0,63	0,62	0,58	0,57	0,54	0,50	0,48	0,45	0,42	0,41	0,40	0,35	0,30	0,20
4	0,40	0,38	0,34	0,30	0,29	0,24	0,21	0,20	0,32	0,42	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50
5	0,20	0,24	0,28	0,30	0,32	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48	0,52	0,53	0,54	0,58	0,61
6	0,50	0,51	0,56	0,60	0,63	0,68	0,70	0,71	0,64	0,60	0,56	0,50	0,50	0,45	0,40
7	0,40	0,41	0,42	0,44	0,45	0,48	0,49	0,50	0,50	0,54	0,58	0,61	0,61	0,61	0,62
8	0,60	0,62	0,56	0,50	0,46	0,42	0,40	0,35	0,31	0,30	0,28	0,27	0,29	0,31	0,30
9	0,70	0,68	0,71	0,72	0,68	0,56	0,50	0,47	0,41	0,36	0,30	0,32	0,35	0,37	0,40
10	0,80	0,79	0,79	0,80	0,71	0,54	0,40	0,38	0,39	0,40	0,41	0,40	0,38	0,37	0,35
11	0,90	0,84	0,76	0,60	0,61	0,56	0,30	0,33	0,35	0,38	0,41	0,38	0,44	0,48	0,50

Оптические свойства материалов, используемых для изготовления линз и окон для излучения различной длины волны

Материал	Показатель преломления, n	Показатель поглощения β , см ⁻¹
Излучение $\lambda = 10,6$ мкм	1,39	0,13...0,17
	1,49	(2...4)·10 ⁻³
	1,46	(2...4)·10 ⁻³
	2,37	6·10 ⁻⁴
	2,40	(2...9)·10 ⁻³
	3,30	(1...5)·10 ⁻²
	4,00	(4...2)·10 ⁻²

Технические характеристики зеркал, используемых в лазерных установках для излучения различной длины волны

Материал	Коэффициент отражения, R	Энергетический порог повреждения в режиме		Примечание
		импульсном, Дж/см ²	непрерывном, кВт/см ²	
Излучение $\lambda = 10,6$ мкм никель-медь	0,98	5 $\tau = 0,6$ мкс	I (охлажд)	Точность обработки поверхности, мкм 0,5
бериллий-медь	0,93	100	-	0,5
молибден	0,98	35	200	0,25
Суперполированные из меди	0,99	130	200 (с охлажд)	0,25 тонкий слой N наносится на обработанную поверхность высококачественной меди

Приложение 3

Значения t -критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$

Число степеней свободы, f	1	2	3	4	5	6
Значения t -критерия	12,71	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45
Число степеней свободы, f	7	8	9	10	11	12
Значения t -критерия	2,36	2,30	2,26	2,23	2,20	2,17

Значения G -критерия Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$

Число степеней свободы, f	1	2	3	4	5	6
Число опытов, N						
2	0,999	0,975	0,939	0,906	0,877	0,853
3	0,967	0,871	0,798	0,746	0,707	0,677
4	0,907	0,768	0,684	0,629	0,580	0,560
5	0,841	0,684	0,598	0,544	0,507	0,478
6	0,781	0,616	0,532	0,480	0,445	0,418
7	0,727	0,561	0,480	0,431	0,397	0,373
8	0,680	0,516	0,438	0,391	0,360	0,316

Значения F -критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$

Число степеней свободы, f	1	2	3	4	5	6
Число опытов, N						
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,6	234,0
2	18,4	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3
3	10,1	9,5	9,3	9,1	9,0	8,9
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2

Число степеней свободы, f Число опытов, N	Число степеней свободы, f					
	1	2	3	4	5	6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6

Приложение 4

Физические свойства различных технических материалов

Наименование материалов	Плотность,	Теплопроводность,	Теплоемкость
	кг/м ³ γ	Вт/кг·К λ	кДж/кг·К C
Сталь	7830	51	0,494
Сталь 45	7830	47,8	0,490
И2Х18Н10Т	7860	16,3	0,494
Al -сплавы	2800	163	1,13
Ti -сплавы	4460	8,7	0,524
Оргстекло	1180	0,184	1,43
Резина	1200	0,159	1,382
Стекловолокно	120	0,11	0,84
Фторопласт	2150	0,247	1,05
Эбонит	1200	0,165	-

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Инструкция по технике безопасности при эксплуатации лазерных технологических установок в учебной лаборатории "Лазерная обработка материалов" кафедры "Автоматические системы энергетических установок".....	3
Приборы и оборудование.....	5
Лабораторная работа 1. Определение распределения плотности энергии в световом пятне импульсного твердотельного лазера.....	8
Лабораторная работа 2. Выбор оптимального состава газовой смеси CO ₂ -лазера.....	14
Лабораторная работа 3. Пробивка отверстий импульсным лазерным излучением.....	20
Библиографический список.....	27
П р и л о ж е н и я.....	28

Составитель Василий Иванович М о р д а с о в

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Редактор Л.Б а л ь к о в а

Техн.редактор Н.К а л е н ю к

Корректор Н.К у и р и я н о в а

Подписано в печать 15.11.87 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага оберточная белая. Печать оперативная.

Усл.п.л. 1,86. Уч.-изд.л. 1,8. Т. 200 экз.

Заказ №550. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Участок оперативной полиграфии, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.