

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
для студентов

Составители: *В. И. Мордасов, А. П. Морозов,*
В. Н. Гришанов, С. П. Чижов,
В. А. Рыбин, С. П. Мурзин

УДК 621.791.144

Лазерная обработка материалов: Метод. указания / В. И. Мордасов, А. П. Морозов, В. В. Гришанов и др.; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 28 с.

Составленные в соответствии с программами курсов «Лазерная обработка материалов», «Основы технологии лазерной обработки» и «Основы научных исследований» указания содержат рекомендации по подготовке к выполнению лабораторных работ, включая расчетную часть. Рассмотрены операции термообработки и сварки полуфабрикатов из металлических и полимерных материалов. Приводятся методы расчета, моделирования и контроля параметров тепловых процессов, сведения о технологических параметрах лазерной обработки материалов, а также порядок обработки результатов экспериментов.

Методические указания предназначены для студентов факультета «Двигатели летательных аппаратов», обучающихся по специальности 13.02 (специализация «Конструирование и эксплуатация энергетических установок»), факультета «Обработка металлов давлением», обучающихся по специальности 11.08, и слушателей ФПК инженерно-технических работников спецфакультета «Лазерная технология».

Рецензенты: Л. Л. Голштейн, Е. А. Изжеуров

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Редактор А. П. Захардяева
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. Д. Чайникова

Подписано в печать 20.05.89 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага оберточная. Печать высокая.
Усл. п. л. 1,7. Уч.-изд. л. 1,6. Т. 200 экз.
Заказ 520. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королева.
443086 Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института.
443001, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.

1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Лабораторные работы выполняются в учебной лаборатории «Лазерной обработки материалов», где имеется специализированное технологическое оборудование: CO_2 — лазер «ЛАТУС-31», твердотельные лазеры ЛТН-102, «КВАНТ-15» и ГОС 1001. Их технологические характеристики подробно освещены в методических указаниях (см. Мордасов В. И. Лазерная обработка материалов. Лабораторные работы № 1—3. Куйбышев: КуАИ, 1987, 32 с). Ниже приводится описание регистрирующей аппаратуры, необходимой для исследования процессов взаимодействия потоков мощного лазерного излучения с конструкционными материалами.

Установка ВСК-5 предназначена для высокоскоростной фотографической регистрации быстропротекающих процессов в видимой области спектра, позволяет производить съемку в ждущем режиме. Основные параметры установки в варианте фотохронографа: скорость развертки изображения по пленке от 418 до 5020 м/с, временное разрешение при ширине изображения щели 0,1 мм до $2 \cdot 10^{-8}$ с, фотографическая разрешающая способность на пленке «Изопанхром» тип 17 в центре фокальной дуги не менее 20 лин/мм, эквивалентное фокусное расстояние — 500 мм, эквивалентное относительное отверстие — 1:20, формат кадра — 654×40 мм, угол поля зрения — $4^\circ 30'$. Частота съемки установки ВСК-5 в варианте высокоскоростной фотокамеры при формате кадров $7,6 \times 10,2$ мм составляет от 43 до 520 тыс. кадр/с. Фотографическая емкость — 130 кадров.

Скоростная киносъемочная камера СКС-1М предназначена для исследования фотографическим методом быстро движущихся объектов. В 16-мм камере размер окна $7,5 \times 10,4$ мм имеет частоту съемки от 150 до 4000 кадр/с, емкость бабины с продолжительностью транспортирования пленки от 1,5 до 25 с. Экспозиция при максимальной частоте съемки при 8×130 кадр/с составляет $1/5 \times 10^{-4}$ с.

Тепловизор ТВ-03 необходим для визуального бесконтактного наблюдения распределения температурных полей по поверх-

ности в диапазоне от 20°C до 200°C. Частота кадров — 16 Гц \pm 5%, частота строк (число строк в растре 100) — 1600 Гц \pm 5%, расстояние до объекта 2,5...6 м (с объективом 0,17...0,22 м), разность температур, измеряемых при помощи двух изотерм с погрешностью \pm 20%, составляет 1...10°C. Температурное разрешение в диапазоне температур объекта 30...40°C имеет значение 0,2... \pm 0,03°C. Угол зрения — ($4^\circ \times 4^\circ 30'$) \pm 15'.

Прибор двухкоординатный измерительный ДИП-1 предназначен для автоматической цифровой обработки измерений линейных размеров с помощью ЭВМ ДЗ-28. Предел измерения длин: в продольном направлении от 0 до 200 мм, в поперечном направлении от 0 до 100 мм. Предел измерения углов от 0 до 360°. Пределы измерения диаметров отверстий методом оптического щупа с применением устройства для измерения внутренних размеров от 1 до 40 мм. Наибольшая глубина измеряемого отверстия — 40 мм. Цена младшего разряда отсчетного устройства 0,5 мкм. Пределы допускаемых погрешностей прибора при измерении проекционным методом при температуре (+20 \pm 2)°C: линейных размеров — \pm (1,0 + L/100) мкм, диаметр гладких цилиндров в центрах — \pm (4,0 + L/70) мкм, плоского угла — \pm 1'30", допускаемая погрешность при изменении диаметров сквозных отверстий методом оптического щупа — \pm (1 + L/100), мкм, где L — измерительная база.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ»

2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с конструкцией элементов плоской оптики (фокусаторами). Определить распределение плотности мощности q в фокальной плоскости оптического элемента. Установить распределение температурного поля в поверхностном слое заготовки при обработке лазерным лучом.

2.2. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Улучшение эксплуатационных свойств деталей, прошедших лазерную обработку (термоупрочнение, сварку, резку и т. д.), во многом зависит от способности оптических систем перераспределять энергию по поверхности заготовки с заданной интенсивностью, а также от их надежности. Во многих случаях недостаточно сфокусировать излучение в точку, требуется более сложная фокуси-

ровка: в отрезок прямой, прямоугольник, кривую линию и т. п. с заданным распределением интенсивности энергии излучения. Высокую энергетическую эффективность и надежность при сложной фокусировке лазерного излучения имеют плоские фазовые зонные пластинки /1, 2/. Они представляют собой профилированные элементы, высота рельефа которых в пределах каждой зоны изменяется от 0 до $\lambda/2$, где λ — длина волны излучения. Фокусаторы пропускающего типа изготавливаются из ZnSe, GaAs, NaCl, KCl ($\lambda = 10,6$ мкм), а отражающие фокусаторы — из материалов с высоким коэффициентом отражения, например, в ИК-диапазоне из меди.

Процесс изготовления фокусаторов включает следующие этапы: построение математической модели и вывод аналитических зависимостей для расчета формы поверхности оптического элемента по назначению, проведение расчета на ЭВМ формы поверхности фокусатора с помощью уравнений табл. 1, получение на прецизионном фотопостроителе, управляемом от ЭВМ, амплитудной маски, в которой плотность затемнения соответствует высоте рельефа, затем изготавливают поверхность рельефа из неметаллического материала, проводят вакуумное напыление с последующим электролитическим наращиванием гальваноконши оптического элемента.

Таблица 1

Аналитические выражения поверхности фокусатора при фокусировке гауссовского потока излучения в различные геометрические фигуры

Вид фокального пятна	Аналитическое выражение
Отрезок прямой линии с равномерной интенсивностью	$z(u, v) = \left[\frac{u^2 \cos^2 \Theta + v^2}{4f} - \frac{y_0}{2f} (v \cos \alpha - u \cos \Theta \sin \alpha) - \frac{1}{2f} \int_0^u x(\xi) d\xi \right] \frac{1}{\cos \Theta}$ $y_0 = \frac{u_1 + f \sin \Theta}{\cos \Theta} (\sin \alpha + v_1 \cos \alpha)$
Кривая линия с равномерной интенсивностью	$z(u, v) = \left\{ \frac{u^2 + v^2}{2} - \int x_0(t) [T(u, v)] dv + y_0(t) [T(u, v)] dv \right\} \frac{1}{2f}$ $T(u, v) = x_0(T)u + y_0(T)v \quad \eta(T) = 0$ $x_0^2(t) + y_0^2(t) = 1; \quad 0 < t < L$

Изображение амплитудной маски осуществляется с помощью устройства вывода ЭВМ. Для машинного синтеза широкого класса оптических фазовых элементов необходима система, включающая ЭВМ серии ЕС и сопряженное с ЭВМ прецизионное устройство регистрации многоградационных изображений Р-1700.

С помощью амплитудной маски путем селективного дублирования бихромированного желатина с последующим вымыванием незадублированных участков, амплитудный рельеф превращается в фазовый. Затем изготавливается его реплика (обратная матрица) с помощью фотополимеризующегося олигоэфиракрилата, на которую напыляется тонкий токопроводящий слой меди. Заключительный этап изготовления фокусатора — электролитическое наращивание, которое в условиях лаборатории целесообразно проводить в серноокислых электролитах, основными компонентами которых являются сульфат меди и серная кислота. При этом матрица используется многократно.

В таблице введены обозначения: Θ — угол между падающим лучом и нормалью к плоскости оптического элемента, R — радиус фокусирующего пучка, f — фокусное расстояние элемента, u_n, v_n ($n=1,2$) — координаты концов проекции отрезка, в который с помощью оптического элемента проводится фокусировка на плоскость потока излучения, α — угол поворота отрезка, в который производится фокусировка излучения на плоскость относительно оси ou , r_0 — радиус светового пятна, при котором мощность излучения падает в e раз, $z(u, v)$ — высота зеркала в точке (u, v) оптического элемента.

Распределение температурного поля при обработке детали с помощью плоского оптического элемента определяется методом суперпозиции. В этом случае тепловой источник заменяется набором точечных источников с гауссовским распределением плотности в световом пятне [3].

$$F = \frac{P}{\pi^{1/2} R r_0} \int_0^{-2} \exp \left\{ \left[\left(\frac{x}{r_0} - \frac{1}{z} \right)^2 + \left(\frac{y}{r_0} \right)^2 \right] \sin^2 \mu - \frac{1g^2 \mu}{d^2} \left[\left(\frac{x}{r_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{r_0} \right)^2 \right] - \frac{\left(\frac{z}{r_0} \right)^2}{1g^2 \mu} \right\} d\mu; \quad (1)$$

$$\frac{1g^2 \mu}{\alpha} = m_1 - m; \quad \alpha = \frac{u_0}{c_{\text{ин}}}; \quad m = \frac{x}{r_0};$$

где a — температуропроводность; k — коэффициент теплопроводности; γ — удельный вес; σ — радиус, при котором плотность излучения снижается в e раз; v — скорость перемещения светового пятна.

Лазерная обработка материалов с использованием фокусаторов, например, излучения в отрезок с равномерной интенсивностью,

является эффективным технологическим средством, позволяющим создать высокотемпературные защитные, износостойкие и ударопрочные покрытия, увеличивающие ресурс эксплуатации дорогостоящих узлов и деталей.

Высокое качество покрытий достигается лазерным спеканием покрытия из тугоплавкого сплава высокой твердости, нанесенного на поверхность детали [3, 4]. Лазерная термообработка после проведения плазменного напыления существенно улучшает их механическую прочность, уменьшает их пористость, удаляет оксиды и усиливает связь покрытия с подложкой. Применение фокусатора, проектирующего излучение в отрезок с равномерным распределением интенсивности обеспечивает температурно-скоростные режимы обработки покрытий без образования трещин. При этом глубина лазерного воздействия при обработке с применением фокусаторов является равномерной по всей ширине зоны термического влияния.

При сварке листовых полимерных материалов внахлест с помощью непрерывного излучения лазера также возможно применение фокусатора в отрезках. Здесь, при движении прижимных и транспортирующих роликов (валков), местный нагрев заготовок излучением лазера производят со сканированием светового пятна в виде отрезка вдоль линии соприкосновения материалов. Еще большей эффективности сварки можно достичь применением фокусатора, преобразующего излучение с гауссовским распределением интенсивности в световое пятно в виде прямоугольника. При этом центр прямоугольника лежит на линии соприкосновения материалов, а большая сторона прямоугольника параллельна ей. Передача энергии лазерного излучения происходит непосредственно в зону сварки, находящуюся в центре этой линии, а по всей ее длине происходит приварка заготовок излучением меньшей интенсивности, чем в зоне сварки. Повышение прочности сварного соединения и его герметизация обеспечивается путем прохождения заготовок между прижимными и транспортирующими роликами с уменьшением толщины заготовок.

2.3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

При выполнении лабораторной работы используются лазерная технологическая установка «ЛАТУС-31», отражающий элемент плоской оптики (фокусатор), измеритель мощности ИМО-2Н, тепловизор ТВ-03. На рис. 1 представлена оптическая схема лабораторной установки. Излучение от лазера попадает на фокусатор. Полностью отразившись, луч падает на пластину из КС1. Часть пучка, отразившись от пластины, проходит через диафрагму, уста-

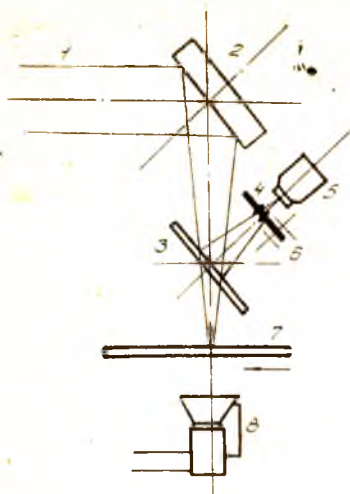


Рис. 1. Оптическая схема лабораторной установки: 1 — поток лазерного излучения, 2 — фокусатор, 3 — полупрозрачная пластина, 4 — диафрагма, 5 — измеритель мощности, 6 — устройство перемещения диафрагмы, 7 — листовая заготовка, 8 — тепловизор ТВ-03

новленную таким образом, что выполняется равенство:

$$a + b = f,$$

где a — расстояние от фокусатора до пластины; b — расстояние от пластины до диафрагмы; f — фокусное расстояние фазового оптического элемента. Затем излучение попадает на измеритель мощности. Другая часть пучка, пройдя через пластину, попадает на листовую заготовку. Распределение температурного поля регистрируется тепловизором. Для обеспечения замера мощности вдоль фокального отрезка предусмотрено устройство перемещения диафрагмы.

2.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Провести юстировку газоразрядного лазера с получением распределения интенсивности излучения, близкого к одномодовому.
2. Определить величину излучаемой мощности.
3. При помощи ИМО-2Н произвести замер мощности в 4 точках на фокальном отрезке. Построить кривую распределения интенсивности вдоль отрезка.
4. Методом отпечатков выявить характер распределения интенсивности в фокальной плоскости оптического элемента и сравнить ее с графиком.
5. Произвести лазерную обработку поверхности заготовки с использованием покрытия типа «металл—металл».
6. Зарисовать температурное поле, регистрируемое тепловизором.

2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите недостатки используемых в настоящее время оптических систем.
2. Что представляет собой фокусатор? Типы фокусаторов.
3. Какие этапы включает процесс изготовления фокусаторов?
4. Опишите методику расчета температурного поля при обработке детали с помощью плоского оптического элемента.

5. Расскажите о возможностях применения фокусаторов при лазерной обработке материалов.

6. Опишите схему лабораторной установки.

7. Опишите схему сварки листовых полимерных заготовок с применением фокусатора.

2.6. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Используя данные по лабораторной работе, провести методом суперпозиции расчет температурного поля.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ»

3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить механизм взаимодействия лазерного излучения с конструкционными материалами, имеющими различные теплофизические и оптические свойства. Установить методом скоростной фоторегистрации зависимость пространственного распределения плотности и скорости движения частиц материала от энергетических характеристик импульса.

3.2. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Механизм взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами во многом зависит от их теплофизических и оптических свойств: температуры плавления, теплопроводности, теплоемкости, показателя преломления и поглощения, удельных теплот фазовых переходов; внешних условий: наличия плазмообразования, режима генерации и т. д. Давление паров материала при его испарении является возрастающей функцией температуры поверхности. Поэтому появление испарения происходит очень быстро. Вводится понятие порога возникновения испарения материала. Если образец нагревают достаточно медленно и время нагрева $t_n \gg r_n^2/4\chi$, то температуру поверхности мишени можно считать функцией интенсивности мощности излучения $q/5, 6/$

$$T_n = \alpha \cdot q \cdot r_n / k, \quad (2)$$

где r_n — радиус луча на поверхности; k — коэффициент теплопроводности материала; χ — коэффициент температуропроводности; α — коэффициент поглощения излучения.

Порог испарения q_k находят из условия, что поверхность нагревается до температуры кипения T_k :

$$\alpha \cdot q_k = k \cdot T_k / r_d. \quad (3)$$

При импульсном нагреве интенсивность q'_k , при которой материал к концу импульса закипит, находят подстановкой $r_d \cong 2\sqrt{\chi \tau}$ в уравнение (3)

$$\alpha \cdot q'_k = k \cdot T_k / 2\sqrt{\chi \cdot \tau}. \quad (4)$$

Если $q \gg q_k$, то вся энергия лазерного луча тратится на испарение материала. Формируется так называемая волна испарения. Скорость перемещения поверхности испаряемого материала v_k определяется из закона сохранения энергии и массы

$$\alpha \cdot q = \lambda \cdot \rho \cdot v_k, \quad (5)$$

где λ — энтальпия единицы массы испаряемого материала; ρ — плотность.

В большинстве случаев лазерная обработка материалов, в частности металлов, сопровождается образованием плазменного факела. Интенсивность излучения, как правило, при этом не превышает $q = 10^7$ Вт/см². Однако при взаимодействии с мишенями лазерных пучков меньшей интенсивности также наблюдается пробой и возникает плазма, имеющая температуру $T = 10^4$ К. Образование плазмы ослабляет или усиливает воздействие излучения на материал.

Механизм взаимодействия лазерного излучения высокой интенсивности с материалами очень сложен и обуславливается многими условиями, о которых речь шла выше. Однако наиболее сильное влияние в процесс взаимодействия может вносить плазмообразование. Оно может ослабить или усилить это взаимодействие в зависимости от условий обработки. Усиление наблюдается для коротких лазерных импульсов ($\tau \cong 1$ мкс), когда плазменное облако за время импульса не успевает отойти от мишени. Передача энергии к образцу может возрасти за счет более полного поглощения излучения плазмой с последующей передачей тепла за счет теплопроводности или за счет излучения из плазмы. Поскольку максимум спектральной плотности теплового излучения из плазменного факела обычно лежит в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, это излучение поглощается образцом более эффективно, чем ИК-излучение лазера. В непрерывном режиме или при большей длительности импульса наблюдается ослабление интенсивности излучения, сфокусированного на поверхность образца из-за поглощения и дефокусировки его в плазме.

Экранирующее действие плазмы может быть очень сильным и в ряде случаев достигать 80...90%, а то и полностью перекрывает

путь излучения к мишени. Для металлов фаза активной экранировки наступает через 150...200 мс после попадания излучения в мишень при $E \cong 0,2 \dots 10$ кДж/см². Необходимо отметить и отражающее действие поверхности плазменного факела (может достигать величины 50...55% от значения падающего излучения).

При лазерной обработке, когда фокальная плотность находится перед поверхностью образца, может образоваться пробой газовой среды, и плазма может образовываться без участия паров материала. В запыленной атмосфере порог пробоя может снижаться до $q = 5 \cdot 10^8$ Вт/см². Это явление необходимо учитывать при разработке технологических процессов лазерной обработки.

3.3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки, используемой для изучения процессов взаимодействия лазерного излучения с конструкционными материалами методом скоростной фоторегистрации, приводится на рис. 2.

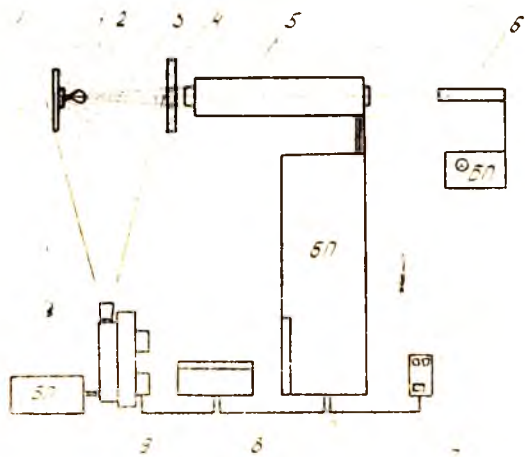


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — экран, 2 — образец, 3 — иловая диафрагма, 4 — защитная пластина, 5 — установка ГОС 1001, 6 — лазер, 7 — нуль дистанционного управления, 8 — система синхронизации, 9 — скоростная кинокамера СКС-1М

Используется лазерная установка ГОС 1001. Для удобства установки образца в фокальной плоскости применяется He—Ne—лазер. Скоростная киносъёмочная камера СКС-1М устанавливается в плоскости, перпендикулярной световой оси лазера. Для количественной оценки распределения плотности и скорости движения час-

тиц материала в пространстве применяется щелевое диафрагмирование зоны взаимодействия. Фоторегистрация проводится в затемненном помещении. Защита элементов оптики осуществляется прозрачными съемными пластинками.

Интенсивность взаимодействия при прочих равных условиях определяется общей энергией излучения и плотностью энергии в пятне, т. е. диаметром фокусировки. Энергия накачки излучателя

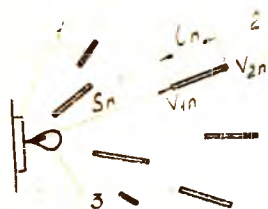


Рис. 3. Процесс взаимодействия лазерного излучения с материалами: 1 — образец, 2 — трек частицы, 3 — плазменный факел

установки ГОС 1001 выбирается в диапазоне 12...25 кДж, при этом плотность энергии на образце может достигать $E = 10^5$ Дж/см², а плотность мгновенной мощности $q = 10^8...10^9$ Вт/см². Способы покaдровой и с наложением высокоскоростной фото- и кинорегистрации быстротекущих процессов имеют свои преимущества. Однако удобно использовать наиболее простой способ одnorазовой съемки с синхронизацией затвора (рис. 3). Обладая хорошим качеством и высокой разрешающей способностью, фотоснимки могут дать богатый материал для анализа процессов взаимодей-

действия, определить качественные и количественные зависимости протекающего процесса.

Определение скорости движения частицы

$$v_n = (l_n / \Delta \tau_{\phi}) k_M, \quad (6)$$

где l_n — длина трека, $\Delta \tau_{\phi}$ — выдержка затвора при фоторегистрации, k_M — коэффициент, учитывающий масштаб фотографии.

Определение коэффициента неоднородности скоростей частиц

$$\omega = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} = \frac{l_{\max}}{l_{\min}}, \quad (7)$$

Определение времени выброса частицы из мишени

$$\tau_{vn} = \frac{s_n k_M}{v_n} = \frac{s_n k_M}{l_n k_M} \Delta \tau_{\phi} = \frac{s_n}{l_n} \Delta \tau_{\phi}, \quad (8)$$

где s_n — путь, пройденный частицей до начала ее фотографирования.

Определение дисперсности выброса по массе или объему выброшенного вещества

$$\eta_m = N / \Delta m [1/2]; \quad \eta_v = N / \Delta v [1/\text{мм}^3], \quad (9)$$

где N — общее количество выброшенных частиц, подсчитывается при наличии зон 1 и 2, Δm , Δv — потери в весе и объеме образца, определяются точным взвешиванием образца до и после обработки.

При использовании щелевой диафрагмы возможно судить о распределении количества частиц, их скоростей по направлению. Таким образом можно построить диаграммы направленности, разбив область

$$n = f(\alpha), \quad v = f(\alpha) \quad (10)$$

на отдельные секторы при помощи наложения специальной сетки, нанесенной на оргстекло.

По наиболее удаленным от мишени и наименее скоростным частицам (на границе зоны 2) можно определить время начала выброса τ_v , подсчитывая его максимальное значение по формуле (8).

Ориентировочно можно определить время начала образования факела:

$$\tau_{\Phi} \approx \Delta \tau_{\Phi}^{i-1} + \tau_{\Phi}^{i-1} \cdot \epsilon = \Delta \tau_{\Phi}^{i-1} (1 + \epsilon), \quad (11)$$

где i — фотография, на которой выявилось первое изображение факела и которой соответствует большая выдержка; $i - 1$ — предыдущая фотография, где факела нет и выдержка более короткая; ϵ — неопределенный коэффициент [0, 1]. Указанная формула может использоваться при условии равенства времени начала открытия фотозатвора при различных выдержках. Приблизительно можно принять $\epsilon = 0.5$.

3.4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Ознакомиться с существующими методами скоростной регистрации быстротекущих процессов, с конструкцией устройств синхронизации и подсветки.

3.5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Провести эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с конструкционными материалами с выдержками фотозатвора 1/60, 1/125, 1/250, 1/500 с без использования нулевой диафрагмы, располагая образцы в фокусе объектива лазерной установки ГОС 1001 при заданной энергии накачки излучателя. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность, толщину $S = 5 \dots 10$ мм, располагаться под прямым углом к оси излучателя. Для эксперимента при выдержке 1/500 с произвести взвешивание образцов до и после взаимодействия.

Провести эксперименты со смещением фокусировки излучения на величину $\pm \Delta f$ при выбранной выдержке фотозатвора. Вели-

чина выдержки равна минимальной, при которой появился факел плазмы. Провести эксперименты с использованием щелевой диафрагмы при выдержке фотозатвора 1/500 или 1/250 с.

2. Рассчитать по формуле (4) минимальную плотность мощности q_k , при которой к концу импульса материал на поверхности образца закипит. По формуле (5) определить ориентировочное значение скорости волны испарения материала. Сделать фотографии форматом не менее 10×15 см, и определить масштабный коэффициент k_m , определить фазы развития факела, размеры зон 1, 2.

Подсчитать число частиц для фотографий, снятых с выдержками 1/500 с или 1/250 с при взаимодействии с материалами без использования щелевой диафрагмы, подсчитать число частиц и определить по формуле (9) дисперсность выброса η_m , определить максимальные и минимальные скорости разлета частиц и коэффициент скоростной неоднородности (7). Для этих же снимков подсчитать время начала процесса выброса материалов (8) и время появления плазменного факела (11).

3. По снимкам процессов взаимодействия с использованием щелевой диафрагмы построить диаграмму распределения выброса по направлению. Произвести сравнительный анализ результатов экспериментов для различных материалов.

Достоверность полученных результатов определена следующими условиями:

— на фотографии видны все выброшенные частицы (некоторые могут остыть и быть невидимыми — тогда необходимо использовать подсветку), что определяется наличием зон 1 и 2, где треки частиц отсутствуют, а это определяет временные границы начала и конца выброса вещества;

— точность определения параметров процесса возрастает с уменьшением выдержки при фоторегистрации;

— с помощью проведения нескольких фоторегистраций с различной временной задержкой поджига относительно времени начала открытия фотозатвора можно с высокой точностью определить границы процесса.

Таким образом, проведя анализ снимков, можно с достаточной достоверностью определить количественные и качественные зависимости. Кроме перечисленных, можно определить скорость развития факела плазмы, размеры выброшенных частиц (по толщине грека), условия распространения ударной волны, взаимодействие частиц между собой, восстановить последовательность прохождения различных стадий процесса, сравнить характер взаимодействия для различных материалов, рассмотреть закономерности взаимодействия с различным положением фокуса излучения относительно поверхности образца.

3.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схему проведения экспериментов, схематичный рисунок процесса взаимодействия импульсного излучения с материалом (по указанию преподавателя), расчетные формулы, используемые в работе, таблицы 2 и 3 результатов экспериментов и анализа фотографий, графики распределения частичного выброса в зависимости от направления для различных материалов и основные выводы лабораторной работы, относящиеся к описанию процессов взаимодействия и сравнению результатов экспериментов для различных материалов.

Результаты заносятся в таблицу по следующей форме.

Таблица 2

Результаты экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с конструкционными материалами

Материал, марка	Энергия накачки Q_n , кДж	Выход- ная энергия Q , Дж	Диаметр пятна d , мм	Длитель- ность импульса t имп, с	Плот- ность мощности q , Вт/см ²	Критич. плотн. мощно- сти, Вт/см ²	Вывод
АМГ-6							q > q _к процесса испаре- ния
ОТЧ-1							

Скорость волны испарения v_n , м/с	Смещение фокуса Δf , мм	Выдержка фото- затвора, Δt_f	Масшт. коэф- фициент	Развитие факела		Размеры зон 1 и 2	
				фор- ма	удале- ние, мм	R_1	R_2
	0	1/60					
	0	1/125					
	0	1/250					
	0	1/500					
	+ Δf	1/*					
	- Δf	1/*					

* минимальная выдержка, при которой появляется факел.

*Результаты анализа фотографии процесса взаимодействия
импульсного излучения*

Материал, марка	Выдержка фото- затвора Ат	Удален. масса А, мг	Число видимых частич N, шт.	Дисперс. выброса, $\eta_{дис}$	Скорость частич cm/sec	Полно- родность ш	Время выброса т _п	Время начала образ. факела т _ф
Сталь	1/500							
Титан	1/500							
Алюминий	1/500							

3.7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем определяется эффективность действий мощного импульсного излучения на материалы?
2. Как зависит коэффициент эффективного поглощения излучения от плазмообразования?
3. От чего зависит дисперсность выброса материала из мишени?
4. Какова относительность выброса материала из отверстий различной относительной глубины?
5. Что даст диафрагмирование мишени щелевой диафрагмой для анализа фотографий?
6. Принципы работы фоторегистраторов быстротекущих процессов.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с моделированием тепловых процессов при комбинированном воздействии лазерного излучения на аналоговых вычислительных машинах. Построить зависимость изменения температурного поля в пластинке.

4.2. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Особенностью задач, связанных с нагревом материалов лазерным излучением, является то, что тепловой источник обладает

резко изменяющимися пространственно-временными характеристиками. В общем случае удельная мощность теплового источника на поверхности материала является сложной функцией координат и времени $q = q(x, y, \tau)$, где x, y — координаты, τ — время нагрева.

С некоторым приближением это соотношение может быть представлено в виде произведения функций, каждая из которых зависит только от времени, либо только от координат:

$$q(x, y, \tau) = A \cdot \varphi(\tau) \cdot q^*(x, y). \quad (12)$$

A — поглощательная способность поверхности материала. В качестве функции $q^*(x, y)$ наиболее часто на практике применяют равномерное и нормальное распределение мощности по пятну нагрева. Функция $\varphi(\tau)$ для импульса с хаотической генерацией имеет вид:

$$\varphi(\tau) = \tau^n \exp(-b \tau^m), \quad (13)$$

где n, m — некоторые числа.

Для импульса с упорядоченной генерацией

$$\varphi(\tau) = c(\tau) (1 - \cos(\omega \tau)), \quad (14)$$

где $c(\tau)$ — функция времени, ω — частота следования отдельных всплесков в импульсе, а для квазистационарного режима генерации

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau < 0 \\ 1, & 0 \leq \tau < \tau_0 \\ 0, & \tau \geq t, \end{cases} \quad (15)$$

где t — длительность импульса.

В общем случае задача нагрева материалов лазерным излучением определяется решением уравнения теплопроводности, точное решение которого для всех случаев, встречающихся на практике, не представляется возможным. Однако в первом приближении можно ввести ряд условий, существенно упрощающих решение поставленной задачи, если не учитывать температурные зависимости теплофизических и оптических постоянных для металлов, пренебречь тепловыми потерями с нагреваемой поверхностью за счет излучения и конвекции, а также выполнить условия одномерной задачи

$$r_f \gg \sqrt{a \tau_i},$$

где r_f — радиус светового пятна, a — коэффициент теплопроводности, τ_i — время воздействия.

Математическая формулировка задачи примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \begin{matrix} \tau > 0 \\ 0 < x < b, \end{matrix} \quad (16)$$

$$\dot{x} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = Aq(x, y) \varphi(\tau). \quad (17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \quad T(x, 0) = T_0.$$

Для решения уравнения используется аналоговая вычислительная машина АВК-31, которая представляет машину 3-го поколения, предназначенную для решения систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений до 6-го порядка, а также для исследования динамических систем методом математического моделирования. Она включает в себя пульт управления и наборное поле, которое образуется совокупностью лицевых панелей функциональных блоков, входящих в состав машины и служит для воспроизведения на нем математической модели. Ее воспроизведение осуществляется путем коммутации гнезд наборного поля с помощью специальных проводников в соответствии с определенной структурной схемой. Передняя панель машины, лицевая часть которой является наборным полем, имеет в своем составе блок управления и посадочные места для функциональных блоков, с помощью которых реализуется математическая модель. Каждый функциональный блок может выполнять определенные математические операции, так, для выполнения линейных математических операций (суммирование, интегрирование, инвертирование) используются линейные блоки БИС-31. Для выполнения операций умножения, деления, возведения в квадрат и извлечения квадратного корня служит блок БП-31. Произвольную нелинейную зависимость от одной переменной можно получить с помощью нелинейного универсального блока БИФ-31 с фиксированно произвольным разбиением аргумента. Для реализации типовых нелинейных и логических операций используются блок логических элементов БЛЭ-31 и блок набираемого оператора БНО-31.

Пульт управления включает в себя системы контроля и управления машиной. Система контроля содержит два датчика для задания тестовых напряжений, измерительную схему, гнезда выходов операционных усилителей, схему задания тестового напряжения и схему сигнализации.

Особенностью АВК-31, как и всех АВМ, относящихся к структурным моделям, является то, что она предназначена для решения алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений. При решении на ней дифференциальных уравнений с частными производными необходимо перейти от этих уравнений к уравнениям с обыкновенными производными. Этот переход осуществляется с помощью метода прямых [7], суть которого состоит в том, что производные по одним независимым переменным заменяются приближенными выражениями через конечные разности, тогда как производные по остальным переменным остаются без изменений.

Тем самым исходное дифференциальное уравнение заменяется системой дифференциальных уравнений, но с меньшим числом независимых переменных.

Применяя описанный метод к уравнению (16), получаем систему уравнений

$$dl_i(\tau)/d\tau = \mu [T_{i+1}(\tau) - 2T_i(\tau) + T_{i-1}(\tau)], \quad (18)$$

где $\mu = a/(l/n)^2$; n — число разбиений (для АВК-31, $n_{\max} = 6$), l — толщина пластины. Схема для АВК-31, реализующая систему (16, 17) показана на рис. 4.

Граничные условия задаются выражениями (19, 20). Временная зависимость $q(\tau)$ аппроксимирует импульсы, характерные для квазистационарного режима излучения

$$q(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau < t_1 \\ q_1, & t_1 \leq \tau < t_2 \\ q_2, & t_2 \leq \tau < t_3 \\ q_1, & t_3 \leq \tau < t_4 \\ 0, & \tau \geq t_4 \end{cases} \quad (19)$$

$$q_1 < q_2.$$

а для режима с упорядоченной генерацией

$$q(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau < t_1 \\ A \sin(\omega t) + B, & t_1 \leq \tau < t_2 \\ 0, & \tau \geq t_2. \end{cases} \quad (20)$$

Коммутационные схемы, соответствующие граничным условиям (19), (20) изображены на рис. 5 и рис. 6. Начальные условия принимаются равными нулю.

4.4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Используя метод прямых для решения дифференциальных уравнений, рассчитать значение коэффициента μ в случае вычисления температуры при нагреве алюминиевой и титановой пластины толщиной $l = 1$ мм, при числе разбиений $n = 6$.

4.5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Перед выполнением работы изучить инструкцию по эксплуатации аналоговой вычислительной машины АВК-31, с помощью коммутационных шнуров собрать схемы на наборном поле АВК-31 согласно рис. 5 и рис. 6. По окончании сборки проверить правильность набора.

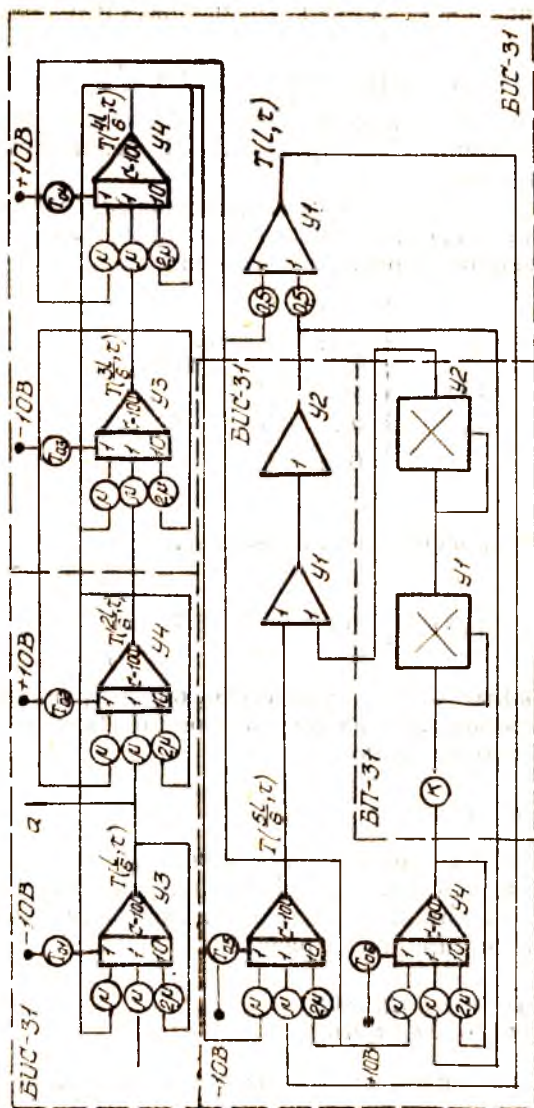


Рис. 4. Коммутационная схема для АВК-31, реализующая одномерную температурную задачу

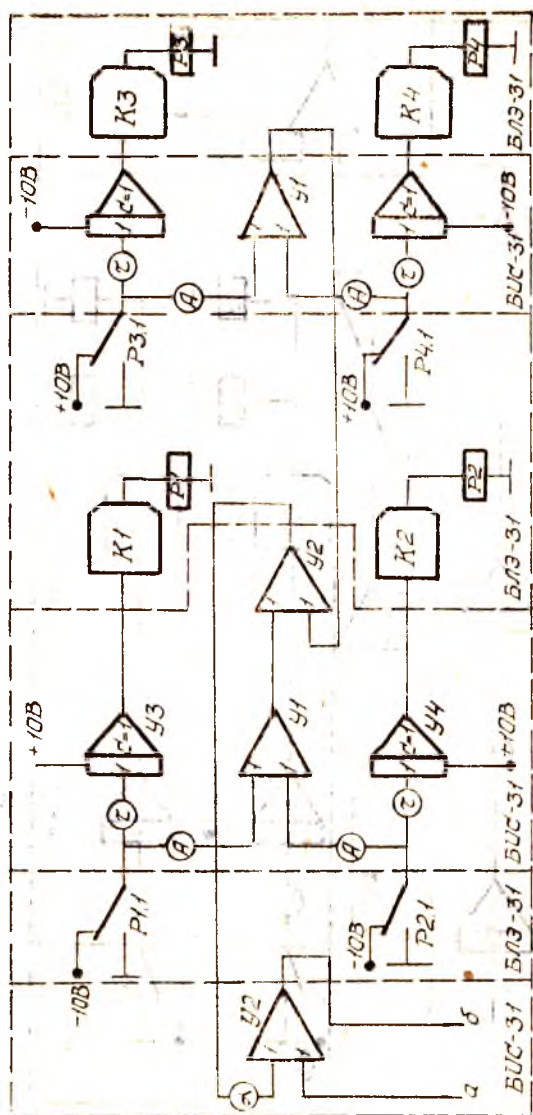


Рис. 5. Коммутационная схема для АВК-31, реализующая температурную задачу для квадранта стационарного режима излучения

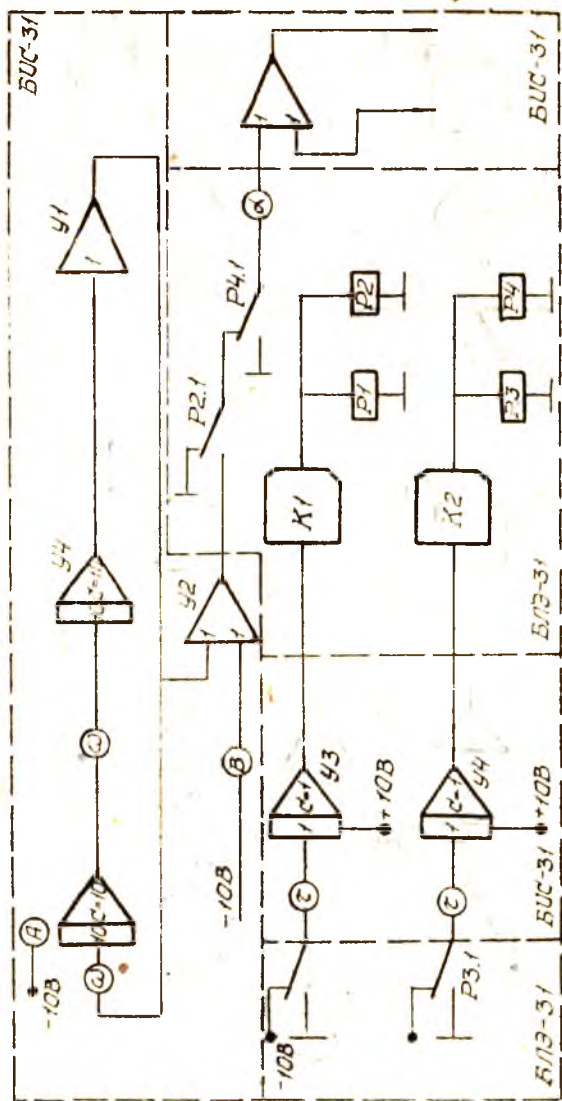


Рис. 6. Коммутационная схема для АВК-31, реализующая температурную задачу для рейки с упорядоченной генерацией излучения

2. Выставить требуемые коэффициенты, используя методику, описанную в инструкции по эксплуатации. Запустить задачу на выполнение нажатием клавиши «Пуск». Результаты решения задачи снимаются при помощи вольтметра, расположенного на пульте управления АВК-31.

3. Изменяя соответствующие величины A , B , q , исследовать зависимости температуры от величины энергетического выброса, его длительности частоты следования импульсов (при импульсно-периодическом воздействии). Пронаблюдать визуально влияние указанных параметров с помощью осциллографа и зарисовать графики зависимостей.

4. После проведения всех измерений выключить машину и разобрать схему.

4.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать таблицы значений температур по глубине пластины от времени, при различных величинах энергетического выброса, его длительности и частоты следования импульсов. Приводится графическое изображение эпюр указанных зависимостей после регистрации на экране осциллографа.

4.7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Сформулировать математическую задачу нагрева тонкой пластины источником ИТП, если обратная сторона а) теплоизолирована; б) имеет потери тепла за счет излучения.

2. Кратко описать состав АВК-31.

3. Какой метод решения теплофизических задач используется в работе? В чем он заключается?

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ В СВАРНОМ ШВЕ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ»

5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить методом голографической интерферометрии расположение дефектов структуры сварного шва при различных режимах лазерной обработки.

5.2. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

• РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В процессе лазерной сварки материалов могут возникнуть следующие дефекты: образование раковин и трещин в сварном шве, неполный провар по толщине и т. д., а остаточные температурные

напряжения в конечном итоге приводят к короблению детали. Для выявления внутренних и наружных дефектов материалов, оценки качества поверхности сварного шва обычные средства измерения требуют значительного аппаратного обеспечения. Здесь целесообразно применить методы голографической интерферометрии [8—10], которые позволяют одновременно выявить как внутренние, так и наружные дефекты и провести качественный анализ состояния поверхности сварного шва.

Различают два основных способа голографической интерферометрии: двухэкспозиционная и в реальном масштабе времени. При методе двух экспозиций на одну и ту же фотопластинку до проявления производят запись голограмм объекта в двух состояниях, например, до и после приложения термической нагрузки.

По методу реального масштаба времени производится запись голограммы неподвижного объекта, после чего фотопластинка полностью обрабатывается и возвращается точно на прежнее место в экспериментальной установке. Затем исследуемый объект наблюдается сквозь голограмму. При этом методе смещение объекта приводит к возникновению интерференционных полос, наблюдаемых в реальном масштабе времени.

Одной из важнейших задач анализа надежности сварного шва является определение характера искажения его геометрии под действием статической или термической нагрузки. Напряженное состояние, возникающее в сварном шве, вызывает упруго-пластические деформации, наибольшая величина которых достигается на поверхности шва, подвергаемого нагружению, в частности нагреву лазерным излучением. При этом сварной шов смещается между двумя экспозициями в своей плоскости на величину Δx (в данном случае используется метод двух экспозиций) и лучи, отраженные от идентичных точек шва (рис. 7), например, A и A_1 получают разность хода:

$$\delta_x = AB - A_1B_1 = \Delta x (\cos \alpha_n - \cos \alpha_n) = n_x \lambda, \quad (21)$$

где α_n и α_n — угол между осью x и направлением падения света и наблюдения восстановленного изображения; n_x — порядок интерференционной полосы; λ — длина волны света.

Если объект перемещается вдоль оси z , которая перпендикулярна его поверхности (рис. 7), разность оптического хода лучей можно записать в виде:

$$\delta_z = AB_1 + AB = \Delta z (\cos \alpha_n + \cos \alpha_n) = n_z \lambda, \quad (22)$$

В общем случае величину оптической разности хода лучей можно определить по следующей формуле:

$$\delta = n \lambda = \Delta r (\bar{n}_n - \bar{n}_n), \quad (23)$$

где Δr — вектор перемещения точки сварного шва, а \bar{n}_n и \bar{n}_n еди-

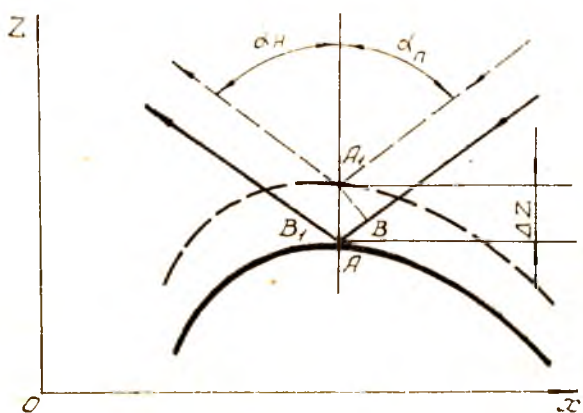
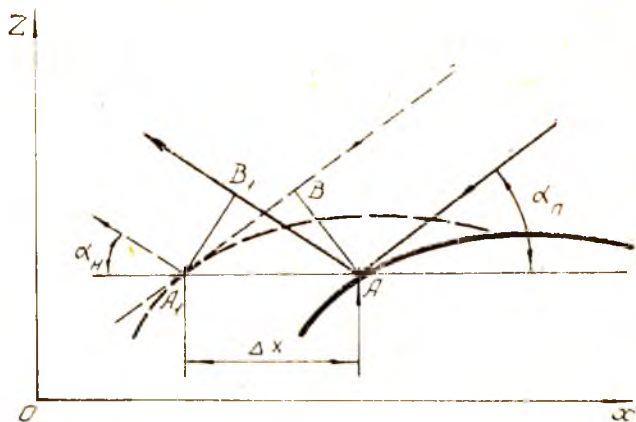


Рис. 7. Схема хода лучей при смещении объекта параллельно исследуемой поверхности (а) и в перпендикулярном направлении (б)

нические векторы направления наблюдения и падения света соответственно.

Таким образом, из выражения (23) видно, что частота интерференционных полос зависит не только от величины смещения точек поверхности, но и от направлений освещения и наблюдения сварного шва.

Из выражений (22), (23) видно, что интерференционная картина для диффузно-отражающих объектов образуется в двух случаях, а если учитывать поворот объекта вокруг любой оси x , y или z на малый угол φ , то и в трех, т. е. несет информацию от трех компонентах вектора перемещения.

В тоже время интерферограммы зеркально-отражающих объектов образуются только тогда, когда они перемещаются перпендикулярно исследуемой поверхности. Следовательно, количественная обработка голографических интерферограмм в общем случае значительно сложнее интерферограмм, полученных с помощью обычных интерферометров.

Однако в некоторых случаях расшифровка интерферограмм не представляет больших трудностей. Поскольку в данной работе рассматриваются только малые деформации, действие статической нагрузки перпендикулярно оси x , то проекцией вектора перемещений в направлении оси x можно пренебречь ввиду его малости и для расчета можно использовать формулу (19). В данном случае начало отсчета принимается в заделке заготовки, так как здесь перемещение практически отсутствует и, следовательно, будет находиться нулевая полоса. Таким образом, прогиб вдоль середины интерференционной полосы будет равен произведению ее порядкового номера на длину волны. Полученные экспериментальные результаты можно сравнить со значениями прогибов, полученных по формуле, известной из сопротивления материалов:

$$\delta_k = x^2(3l - x) / x_k(3l - x_k), \quad (24)$$

где δ_k — прогиб в контрольной точке, измеряемый с помощью индикатора часового типа, l — ширина участка прогиба, x_k — координата точки отсчета.

5.3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения операции сварки пластины и получения интерферограммы сварного шва используется технологический CO_2 -лазер «ЛАТУС-31», оптическая система транспортировки излучения и голографическая установка УГМ-1. Из-за сравнительной надежности и простоты в работе используется метод двух экспозиций. На рис. 8 представлено изображение оптической схемы голографирования поверхности детали. Излучение от вспомогательного He-Ne лазера попадает на делительное зеркало. Часть пучка,

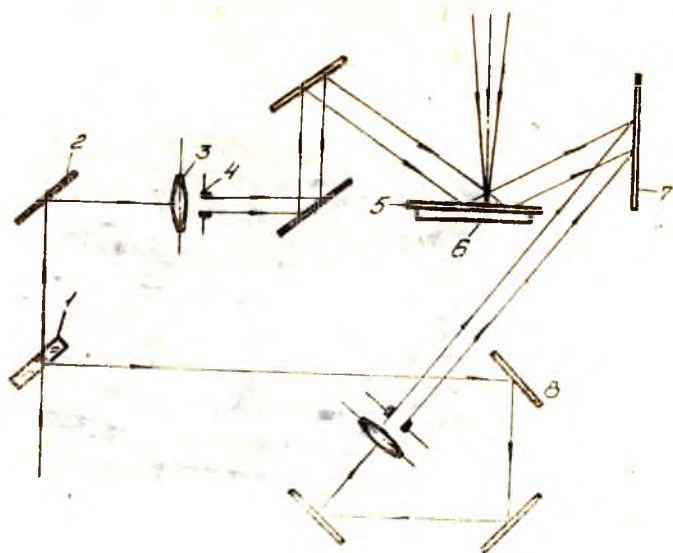


Рис. 8. Оптическая схема голографирования поверхности детали: 1 — делительное зеркало, 2 — поворотное зеркало, 3 — линза, 4 — диафрагма, 5 — исследуемая деталь, 6 — устройство перемещения, 7 — фотоэмульсия

пройдя через него, попадает на глухое поворотное зеркало. Полностью отразившись, излучение проходит через линзу, которая необходима для расширения пучка. Пучок должен быть параллельным, для этого за линзой поставлена диафрагма. Затем пучок попадает на исследуемую деталь, и, отразившись от нее, попадает на фотоэмульсию. В качестве опорного пучка используется часть излучения, которое отражается от поворотного зеркала и, пройдя систему поворотных зеркал, линзу и диафрагму, также попадает на фотоэмульсию. Для обеспечения неизменного положения исследуемой детали предусмотрено устройство перемещения фокусирующей системы технологического лазера относительно линии свариваемых деталей.

5.4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Используя зависимость разности оптического хода лучей (22), рассчитать величину деформаций в сварном шве по интерферограмме, представленной на рис. 9.

Преобразовать формулу (22) для вычисления разности хода лучей при повороте объекта вокруг оси y на угол φ .

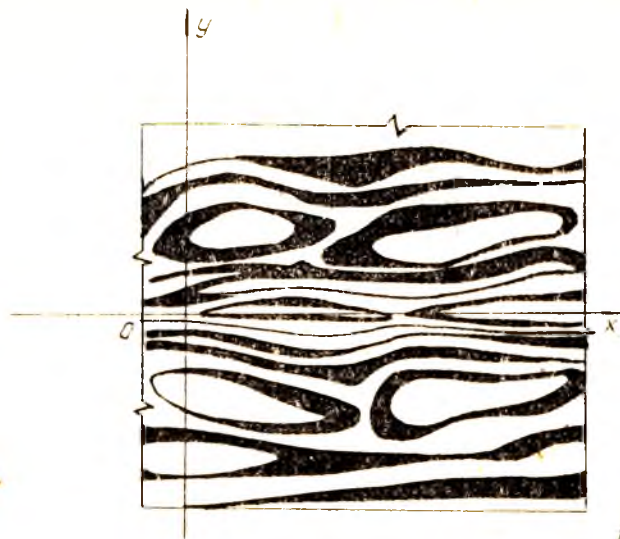


Рис. 9. Интерферограмма сварного шва детали

5.5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Изучить инструкции по эксплуатации технологической установки «ЛАТУС-31», He—Ne-лазера. Определить порядок операций по их включению и выключению. Проверить правильность расположения оптических узлов и механических перемещений на лабораторной установке. Лабораторное задание выполнить в следующей последовательности.

1. Закрепить заготовку для сварки в приспособлении на столике УГМ-1.
2. Включить установку «ЛАТУС-31» для проведения процесса сварки.
3. Проверить оптическую схему сварки заготовок с помощью юстировочного He—Ne лазера; необходимо, чтобы луч падал на стык двух заготовок.
4. Осуществить сварку заготовок при скорости перемещения светового пятна $v = 0,5 \dots 1,0$ м/мин.
5. Сделать первую экспозицию съемки сварного шва. Для этого необходимо выполнить следующие требования:
затемнить помещение, в котором находится лабораторная установка;

установить фотопластинку в зажимное устройство (можно проводить при слабом темно-зеленом свете). Первая экспозиция составляет $t_{\text{экс1}} = 10 \dots 30$ с.

7. Осуществить воздействие на сварной шов статической нагрузки.

8. Провести вторую экспозицию съема $t_{\text{экс2}} = 10 \dots 30$ с. В целях обеспечения лучшего качества интерференционных полос необходимо, чтобы $t_{\text{экс1}} = t_{\text{экс2}}$.

9. Убрать фотопластинку из зажимного устройства и произвести ее химическую фотообработку.

10. Закрепить фотопластинку в штатив установки УГМ-1.

11. Закрыть предметный пучок затвором и осветить фотопластинку только опорным пучком.

12. Подсчитать значение n_s , измерить α_n и подставить в формулу (22) и вычислить перемещение Δz .

13. Для определения расположения дефектов в сварном шве необходимо прогреть заготовку с помощью лазерного сканатора. В случае появления в сварном шве микротрещины или раковины будет наблюдаться концентрация интерференционных полос и их обрыв в месте дефекта, если перемещение точек поверхности $> \lambda/4$.

Порядок выполнения работы по определению дефектов сварного шва тот же, что и при определении его деформаций, только вместо пункта 7 следует провести операцию: осуществить прогрев сварного шва с помощью лазерного сканатора.

5.6. УКАЗАНИЯ К ОТЧЕТУ

При оформлении отчета требуется привести описание измерительной и технологической схемы лабораторной работы. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных представить в форме таблицы. Привести результаты расчетов по определению пластических деформаций в сварном шве.

5.7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Опишите схему получения голограммы трехмерного объекта и укажите, какую роль выполняет опорный луч в схеме?

2. В какой последовательности осуществляется запись и восстановление изображения трехмерного объекта.

3. Перечислите преимущество голографической интерферометрии перед обычными интерференционными методами.

4. Охарактеризуйте метод двух экспозиций. Как находится положение нулевой полосы? Что такое временная погрешность? Что такое пространственная когерентность источника?

5. Почему нужно выравнивать пути, пройденные опорным и предметным лучами?

6. Какие требования предъявляют к источникам света в голографической интерферометрии?

7. Изобразите схему хода лучей при повороте объекта вокруг оси y на угол φ и при смещении объекта перпендикулярно исследуемой поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сисакян Н. П. и др. Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов // Компьютерная оптика: Сб. ИОФАН СССР. 1986.

2. Голуб М. А. и др. Фокусировка излучения в заданную область пространства // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. С. 618—623.

3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Рыкалин П. П. и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

4. Рэди Д. Действие моющего лазерного излучения: Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 469 с.

5. Веденов А. А., Глуши Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.

6. Суминов В. М. и др. Обработка деталей лучом лазера. М.: Машиностроение, 1969. 196 с.

7. Коздоба А. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Наука, 1975. 228 с.

8. Применение голографической интерферометрии и лазерной техники для контроля качества промышленных изделий / Под ред. Бугусова М. М. Горький, 1975. 115 с.

9. Вест Н. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 215 с.

10. Голографические неразрушающие исследования / Под ред. Р. Эрфа. М.: Машиностроение, 1979. 103 с.