

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

В.И.Мордасов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В АВИАСТРОЕНИИ

Учебное пособие

Куйбышев 1989

Проектирование лазерной технологии в авиастроении: Учеб. пособие / В.И. Мордашов; Куйбыш. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 109 с.

Учебное пособие определяет задачи и содержание дипломного проектирования технологических процессов с применением лазерной обработки: пробивка отверстий, раскрой, сварка, термообработка. Приведен порядок расчетов параметров обработки технологических лазеров в режимах непрерывной, импульсно-периодической и импульсной генерации излучения. Изложение материала сопровождается информационно-справочными данными, типовыми подпрограммами САПР технологических процессов производства деталей летательных аппаратов и их двигателей. Подробно освещено содержание обязательных разделов дипломного проекта: конструктивно-технологический анализ деталей, выбор размера заготовок и типа раскроя, последовательность операций и степень совмещенности, технологические расчеты лазерной обработки, выбор технологического лазера и средств механизации и автоматизации, конструирование и расчет оптических систем, экономическое обоснование целесообразности выбранного варианта.

Учебное пособие предназначено для студентов факультета двигателей, выполняющих дипломный проект по специальности "Лазеры", инженеров машиностроительных предприятий, конструкторов авиационной и космической техники, слушателей ФПК и спецфакультета "Лазерная технология".

Ил. 16. Табл. 21. Библиогр.: 17 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук Ю.И. Федотов,
канд. физ-мат. наук Д.М. Гуреев

В В Е Д Е Н И Е

Область промышленного применения мощных технологических лазеров в заготовительном производстве многих отраслей машиностроения постоянно расширяется. Методы лазерной обработки (пробивка отверстий, резка, сварка, термообработка, поверхностное легирование и др.) получают широкое внедрение при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов: жаростойких, нержавеющей и других сталей и сплавов. По сравнению с известными видами обработки – резанием, газокислородной резкой, дуговой сваркой и закалкой ТВЧ – лазерная технология позволяет значительно повысить производительность, улучшить культуру труда, снизить энергозатраты, а в некоторых случаях создать принципиально новые способы изготовления деталей.

По виду режимов генерации излучения промышленные установки разделяют на три основные группы: импульсные, импульсно-периодические и непрерывные лазеры. В табл. VI представлен перечень выполняемых ими технологических операций в порядке эффективности. Отсутствие четкой методики проектирования, систематизации необходимых сведений в справочной литературе требует значительного времени на разработку технологического процесса изготовления деталей с применением лазерной обработки.

Цель настоящего пособия – овладение современной методологией технологического проектирования процессов лазерной обработки при производстве деталей летательных аппаратов и их двигателей. В ходе дипломного проектирования предполагается выполнение расчетов технико-экономических показателей как вручную, так и с использованием ЭВМ, что способствует приобщению студентов к современным методам инженерного труда, основанным на математическом моделировании и применении ЭВМ.

В первой главе проводится последовательность проектирования операций пробивки отверстий, поверхностного упрочнения и легирования локальных участков, шовной и точечной сварки с соединением однородных и разнородных материалов. Данную группу операций экономически выгодно отличает использование импульсных режимов генерации излучения применительно к условию выпуска деталей в мелкосерийном производстве.

Во второй главе рассматриваются операции сверления отверстий – шовная сварка и газолазерная резка, осуществляемые в режимах им-

Т а о л и ц а VI

Перечень технологических операций, применяемых при импульсном, импульсно-периодическом и непрерывном режимах генерации излучения

Режим генерации излучения	Выполняемые технологические операции	Условие эффективного применения
Импульсный	Пробивка отверстий, поверхностное упрочнение и легирование, сварка (шовная, точечная) однородных и разнородных материалов	Обработка локальных участков поверхностей деталей Мелкосерийное производство
Импульсно-периодический	Сверление отверстий, шовная сварка, газоплазменная резка	Обеспечение условия проникновения излучения на значительную глубину, обработка материалов с высокой отражательной способностью
Непрерывный	Поверхностное упрочнение, легирование и наплавка. Газоплазменная резка, шовная сварка	Обработка поверхностей детали значительных размеров Серийное производство

пульсно-периодической генерации лазерного излучения. На примерах обработки деталей из материалов с высокими отражательными свойствами показаны преимущества каждого способа, определены условия выбора параметров генерации светового пучка и скорости движения детали с переходом режима сварки в режим резки. При расчетах используется подпрограмма САПР.

В третьей главе подробно освещены вопросы технологического проектирования процессов лазерной обработки: поверхностного упрочнения, легирования и наплавки, газолазерной резки, шовной сварки непрерывным излучением, а также даны рекомендации по выбору поглощающих покрытий, расчету оптических систем и приспособлений для подвода режущего и защитного газов. Экономическая эффективность данной группы операций присуща серийным условиям производства.

В четвертой главе приводится описание оптических систем в лазерной обработке. Рассмотрены вопросы применения плоских оптических элементов в операциях поверхностной закалки, возможность расширения их функционального назначения путем использования их вращения вокруг оптической оси.

В пятой главе описаны технологические модули для проведения технологических операций, используемые в современном отечественном и зарубежном машиностроении. Сформулированы требования к выбору технологических модулей для проведения конкретных операций лазерной обработки.

При написании пособия предполагалось, что читателю известны теоретические основы взаимодействия лазерного излучения с конструкционными материалами, вопросы оптимизации технологии лазерной обработки деталей при пробивке отверстий, сварке, термоупрочнении и др., методика расчета оптических систем и технологической оснастки. Представленные материалы дополняют сведения работ [1,2], в которых приведены технологические характеристики, область применения и описание способов лазерной обработки.

Г. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Изготовление деталей с использованием импульсной энергии лазерного излучения находит широкое применение в заготовительном производстве. Поверхностная лазерная закалка и легирование сталей, ранее подвергнутых обычной термической обработке, дополнительно повышает твердость металла. Импульсным методом осуществляется точечная сварка соединений разнообразной конфигурации, а также шовная сварка стыковых соединений в результате последовательного наложения сварных точек с перекрытием зон облучения. Многоимпульсную обработку используют для получения максимально глубоких отверстий без особо жестких требований к их точности и форме, а также получения прецизионных отверстий. Рассмотрим последовательность проектирования этих технологических процессов применительно к производству авиационных деталей.

Г.Г. Последовательность проектирования технологического процесса

При проектировании технологического процесса импульсной лазерной обработки (ИЛО) исходными данными являются чертеж детали (марка материала, точность размеров и взаимного расположения поверхностей, их шероховатость), способ изготовления исходной заготовки детали, годовая программа ее выпуска. В технологическом процессе изготовления детали оговаривается место ИЛО. Перед ее проведением начнутся подготовительные операции: очистка поверхности детали, нанесение поглощающих покрытий, нанесение покрытий для легирования, установление технологических зазоров при сварке.

О ч и с т к а п о в е р х н о с т и деталей от окалины, окисных пленок, загрязнений и прочего проводится механическим путем (гидропескоструйной, абразивной и инструментальной обработкой), операции промывки проводятся в проточной воде в течение 2...5 мин, далее обезжиривание в растворе каустической соды (100...150 г/л) при 80...90°C в течение 20...30 мин с последующей промывкой в горячей воде (70...80°C) в течение 1...2 мин с последующей сушкой на воздухе. Следует контролировать значение шероховатости поверхности деталей в зоне обработки $R_z = 0,63...1,25$ мкм, поскольку с увеличением величины шероховатости при ИЛО наступает преждевременное оплавление поверхности, а с уменьшением возрастают отражательные

свойства обрабатываемого материала. Удаление окисных пленок на поверхности титановых и алюминиевых заготовок осуществляется непосредственно перед выполнением операций ИЛО.

Нанесение поглощающих покрытий вызвано снижением величины отражения лазерного излучения от металлической поверхности детали. В состав покрытия входят специальные теплостойкие вещества, хорошо поглощающие ИК-излучение, например, фосфат цинка, для которого при температуре $T=1000^{\circ}\text{C}$ эффективный коэффициент поглощения $K = 0,7$. Применяют оксидирование, фосфат марганца, полиграфическую краску, гуашь и газовую сажу. К нанесению поглощающих покрытий предъявляют требования: его толщина не превышает $S = 25 \pm 5$ мкм; размер частиц не более ~ 3 мкм, высокие адгезионные свойства, безвредность продуктов выброса при ИЛО. В табл. I приводятся рекомендации по выбору поглощающих покрытий и наполнителей.

В качестве покрытий для легирования участков поверхности деталей применяют легирующие элементы по назначению, которые наносятся различными способами: накатыванием (фольги из легирующего элемента), электролитическим осаждением, детонационным покрытием, плазменным напылением, нанесением обмазки из порошка и связующего вещества и др. Толщину покрытий для поверхностного легирования материала деталей назначают из условия удовлетворительного перемешивания основы и легирующих элементов. Обычно для напыленных покрытий она составляет величину $S = 50 \dots \dots 100$ мкм, для обмазок $S = 200 \dots 300$ мкм.

Установление технологических зазоров при сварке заготовок ИЛО осуществляют так, чтобы допустимые вертикальные смещения кромок при стыковой сварке и зазоры между листами при нахлестке не превышали $0,25$ толщины листа, а зазоры в стыке - $0,15$ толщины. Такие требования к сборке обусловлены влиянием смещения кромок и зазоров на поглощение энергии лазерного излучения, т.е. на эффективность, воспроизводимость и качество сварки. Для увеличения глубины проплавления применяют специальную разделку кромок: угол снятия фаски равен глубине светового конуса, а высота фаски составляет $0,25$ толщины листа. В некоторых случаях при недостаточной текучести жидкого металла из-за сил поверхностного натяжения величину зазора между заготовками увеличивают. Ввиду значительной трудоемкости подготовительных операций рекомендуется сварку тонкостенных заготовок проводить внахлест.

Поглощающие покрытия и наполнители

Основа покрытия	λ , Вт/мК (при 298 К)	C , кал/моль·град (при 298 К)	$T_{пл}$, К	A , %
Сажа аэрозольная	268	2,04	4020	27
Порошок медный ПМО-2 ГОСТ 4960-75	397	5,84	1357	90
Порошок никелевый ПНЭ-1	67	6,23	1728	72
Порошок оловянный ПО-1	63	6,45	505	54
Порошок железный ПЖ ГОСТ 9849-74	82	5,97	1811	65
Алюминиевая пудра	213	5,82	933	71

Примечания: 1. Значения теплопроводности λ , теплоемкости C , температуры плавления $T_{пл}$, коэффициента поглощения A соответствуют длине волны падающего излучения 1,0 мкм.

2. Значения теплотехнических констант покрытия 1 соответствуют свойствам графита.

Проектирование технологического процесса ИЛО сводится к решению ряда технологических задач в следующей последовательности (по этапам):

- технологический анализ рабочего чертежа детали;
- составление плана операций технологического процесса;
- расчет операционных размеров и назначение технических требований на операцию;
- разработка операций технологического процесса и оформление операционных карт;
- расчет режимов обработки и норм времени;
- выбор основного технологического оборудования и средств автоматизации;
- проектирование и расчет специальных приспособлений;
- проектирование и расчет оптических систем;
- проектирование специальных контрольных приспособлений.

Рассмотрим последовательно каждый из этапов проектирования, при этом выбираем такие условия проведения ИЛО, чтобы ее эффективность была максимальной.

1.2. Этапы проектирования

Технологический анализ рабочего чертежа детали состоит из двух этапов: изучение и анализ конструкции детали; анализ ее технологичности. Следует выяснить служебное назначение детали и отдельных ее поверхностей, связь детали со смежными деталями, конструкторские базы и условия работы при эксплуатации изделия. При анализе технологичности оцениваются свойства материала детали с точки зрения методов получения заготовки и последующего ее изготовления (отражательные способности, свариваемость, прокаливаемость и т.д.). Здесь большое значение имеет конфигурация детали, точность размеров, расположение поверхностей, требуемая шероховатость, доступность отдельных поверхностей для обработки на лазерных установках, удобство фиксации и надежность закрепления детали при изготовлении. При необходимости следует изменить конструкцию детали с целью повышения ее технологичности изготовления.

Составление плана операций технологического процесса ИЛО имеет цель показать ее технологические преимущества. Количество и последовательность операций определяется формой детали, требуемой точностью и т.д. Необходимо стремиться к наименьшему количеству операций, увеличению производительности, т.е. повышению

концентрации операций лазерной обработки и совмещению. Количество изменений позиций заготовки должно быть сведено к минимуму. Лазерной обработке с применением средств автоматизации предшествуют операции подготовки установочных баз. Необходимо стремиться к использованию типовых процессов обработки заготовок, по возможности не проектировать обработку заготовок на уникальном оборудовании. Применение последних должно быть обосновано. В плане отражаются операции промежуточного контроля, слесарной обработки, нанесения антикоррозийных и технологических покрытий.

После согласования плана операций проводится расчет операционных размеров заготовки и назначаются технические требования на выполнение операций. В результате окончательно определяются все размеры заготовки. При необходимости производят округление размеров до стандартных значений. Выполняется рабочий чертеж заготовки в масштабе 1:1. Структура и механические свойства материала, способ получения заготовки, группы контроля, допустимые дефекты поверхности, допустимые погрешности, термообработка, очистка поверхности от окалины, обезжиривание, пропитка, нанесение технологических покрытий и другие параметры указываются в технических требованиях чертежа. Допуски на операционные размеры промежуточных операций назначаются в соответствии с экономической точностью выполнения операций, а на окончательные операции берутся из чертежа детали, за исключением тех случаев, когда по результатам расчета размерных цепей возникает необходимость уменьшения допуска.

Разработка операций технологического процесса и оформление технологических карт проводятся в соответствии с принятым ранее планом операций. При этом следует разработать операционную карту, карту эскизов и расчетно-технологическую карту на данные операции. Для этих же операций необходимо спроектировать инструменты и приспособления, дать необходимые расчеты и описания.

При оформлении операционных карт и карт эскизов наряду с данными, которые заносятся в эти документы, следует указать схему установки заготовки (базирование и закрепление), последовательность обработки поверхностей (переходы), точность выполняемых размеров, названия и вид приспособления, применяемое оборудование. Все эти данные определяют принципиальную схему приспособления.

Расчет режимов обработки и норм времени проводится на основе информационно-справочных материалов [I, II, I6 и др.]. Здесь выбирается величина суммарной мощности излуче-

ния, длина волны излучения, находят отражения все подготовительные этапы ИЛО детали. Следует учитывать режимы генерации излучения. Операции резки и сварки проводят в одномодовом режиме, а упрочнение — при многомодовом излучении. Требуемая величина плотности мощности излучения вычисляется с помощью известных аналитических выражений, представленных в табл. I.2. Номинальная мощность технологического лазера должна быть достаточной для обеспечения

Т а б л и ц а I.2

Наименование операций	Формулы для расчета
Пробивка отверстия	$H = \left[\left(\frac{z_0}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \right)^3 + \frac{3E}{\pi \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} L \rho \gamma} \right]^{1/3} \frac{z_0}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}};$ $D_{\text{отв}} = 2 \left(z_0^3 + \frac{3E \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\pi L \rho \gamma} \right)^{1/3}$
Закалка	$z_{\text{зак}} = \frac{\pi z_{\text{зак}}^2}{4a} [T_{\text{пл}} / (T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}})];$ $V_{\text{зак}} = \frac{8a (T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}})^{3/2}}{\pi T_{\text{пл}}^2 z_{\text{зак}}^{3/2}};$ $z_{\text{зак}} = (4a \tau / \pi)^{1/2} (T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}}) / T_{\text{пл}};$ $q_{\text{пл}} = T_{\text{пл}} \lambda (\pi / a \tau)^{1/2}$

Примечание. H — глубина пробиваемого отверстия; D — диаметр отверстия; φ — угол светового конуса; γ — удельный вес; z_0 — радиус светового пятна на поверхности детали; $z_{\text{зак}}$ — глубина закалки; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления; $T_{\text{зак}}$ — температура закалки; τ — время воздействия; λ — коэффициент теплопроводности; a — коэффициент температуропроводности; $q_{\text{пл}}$ — интенсивность излучения, при которой наступает оплавление поверхности.

заданной производительности при выполнении совмещенных операций. При этом необходимо учитывать потери мощности излучения, проходящего через оптические системы. Рабочее пространство технологического модуля должно обеспечить размещение технологической оснастки.

Выбор основного технологического оборудования и средств автоматизации при ИЛО осуществляется с учетом размеров заготовки, точности изготовления, требуемой мощности и производительности. Соответствие оборудования установленному режиму обработки, мощности и производительности подтверждается расчетами. При выборе лазерного технологического оборудования рекомендуется пользоваться табл. I.3, а при выборе другого – ГОСТ 14.304-73 ЕСТНП. Следует иметь в виду, что для ряда операций может оказаться целесообразным применение станков с ЧПУ. При этом составляется расчетно-технологическая карта команд и величин перемещения исполнительных органов станка. Станки следует выбирать преимущественно отечественного производства по действующим каталогам и прейскурантам.

Лазерная обработка в условиях заданной программы выпуска при соблюдении технических и эксплуатационных требований должна являться наиболее простым и экономичным способом изготовления деталей. Целесообразна автоматизация установки – снятия и перемещения деталей. Следует применять групповую форму организации производственных процессов, типизацию технологических процессов, использовать однородное вспомогательное оборудование. Детали должны иметь одинаковые поверхности для базирования, позволяющие без дополнительной выверки устанавливать заготовки в зону обработки, где для их базирования и закрепления должна использоваться универсальная технологическая оснастка. Необходимо проанализировать номенклатуру захватных устройств и предусмотреть возможность применения широкодиапазонных захватов.

Степень автоматизации процессов ИЛО определяется экономической целесообразностью и во многом зависит от типа производства. В массовом и крупносерийном производстве однотипных деталей целесообразна комплексная, в серийном и мелкосерийном – частичная автоматизация техпроцесса.

Проектирование и расчет специальных приспособлений проводится с учетом конструктивных особенностей лазерных установок технологических модулей и других видов оснастки с соблюдением всех норм техники безо-

Технические характеристики импульсных лазерных установок

Технические характеристики	"Квант-9"	"Квант-15	"Квант-20"	4Р222Ф2
Средняя мощность излучения при частоте следования импульсов 100 Гц, Вт	10	100	63	40
Частота следования импульсов излучения, Гц	6...60	0,1...20	0,1...20	0,1...20
Минимальный диаметр светового пятна, мм	0,15	0,25	0,25	0,15
Потребляемая мощность, кВт	2	12	10	12,5
Габаритные размеры, мм:				
станка	1005x820x1255	1200x1000x960	1450x850x1400	1520x750x1275
стойки питания	540x598x1212	760x620x1900	-	720x620x1900
Масса, кг	350	815	400	1500

пасности. При проектировании специального приспособления обращается внимание на стандартизацию и унификацию его отдельных элементов, выполняются необходимые инженерные расчеты и чертежи общего вида приспособления.

Рабочее пространство технологического модуля (ТМ) должно обеспечивать размещение технологической оснастки. Конструкция оснастки и вспомогательных устройств, входящих в состав (ТМ), разрабатываются с учетом материала, массы, формы и типоразмеров деталей; параметров и конструктивных особенностей изделия, в том числе базовых поверхностей; технологических схем оборудования и фиксации деталей; серийности производства.

На основании операционных карт составляется задание по проектированию приспособления с учетом основных требований:

обеспечение заданной точности обработки заготовки на данной операции;

получение высокой производительности при обработке заготовки и экономической эффективности от применения приспособления;

выполнение условий эксплуатации: соблюдение правил охраны труда, обеспечение удобства установки и снятия заготовки, обслуживание приспособлений и т.д.

В настоящий момент вспомогательное время, затрачиваемое на базирование, закрепление и раскрепление заготовки, составляет 30...60% от общего вспомогательного времени на выполнение операции. Сократить вспомогательное время в значительной степени позволяет механизация и автоматизация приспособлений и внедрение наиболее совершенных конструкций.

При проектировании приспособления целесообразно предусмотреть механизацию или автоматизацию следующих этапов:

подача заготовок в рабочую зону приспособления с помощью подающего или загрузочного устройства;

закрепление и раскрепление заготовок;

повороты заготовок при позиционной обработке с последующей фиксацией и зажимом поворотной части приспособления;

перемещение при непрерывной обработке с механизированным или автоматизированным закреплением или раскреплением обрабатываемых заготовок на координатном столе;

удаление обрабатываемых заготовок из рабочей зоны приспособления;

подача газа или порошка в зону лазерной обработки.

Уровень механизации и автоматизации того или иного приспособления зависит от программы выпуска деталей в год. Чем больше годовая программа выпуска деталей, тем выше должен быть уровень механизации и автоматизации приспособления. Однако при решении этого вопроса необходимо проводить экономическое обоснование целесообразности применения выбранного варианта приспособления.

З а д а н и я

1. Определить величину плотности мощности лазерного излучения, которую можно достигнуть при фокусировке светового потока диаметром $A = 40$ мм при длине волны $\lambda = 10,6$ мкм, фокусное расстояние линзы $f = 100$ мм, длительность импульса $\tau = 5$ мс, энергия в импульсе $E = 20$ Дж.

2. Рассчитать объектив для транспортировки лазерного излучения $\lambda = 1,06$ мкм на расстоянии $l = 5$ м. Исходный диаметр светового пучка $d = 8$ мм.

3. Установить предельное значение плотности мощности, которую можно достигнуть при его генерации установкой "КВАНТ-15". Фокусное расстояние объектива $f = 100$ мм. Расстояние от оптического резонатора до объектива составляет $l = 450$ мм. Диаметр светового пучка $d = 8$ мм, энергия в импульсе $E = 8$ Дж при длительности $\tau = 3$ мс.

4. Построить распределение поля температур при импульсном нагреве лазерного излучения с конструкционным материалом в виде толстостенной пластины в момент времени $\tau = 0,5\tau_0, \tau = \tau_0, \tau = 1,5\tau_0$. Показать участок нагрева и значения коэффициента сосредоточенности k , при которых задачу следует отнести к нагреву материала равномерно распределенным источником.

5. Установить влияние теплофизических характеристик внешнего слоя при нагреве двухслойной пластины на распределение температуры в переходном слое. Принять импульсный режим генерации лазера.

Распределение температур построить для момента времени

$$\tau = 0,5\tau_0, \tau = \tau_0, \tau = 1,5\tau_0.$$

6. При каких соотношениях теплофизических свойств покрытий и основного материала, а также соотношения их толщин, скорости перемещения источника нагрева с гауссовским распределением мощности в световом пятне можно применить решение объемной температурной задачи для тонкостенной пластины?

7. Используя метод суперпозиции, построить температурное поле в толстостенной пластине для неподвижного импульсного источника нагрева в момент времени $\tau = 0,5\tau_0$. Световое пятно имеет форму отрезка прямой длиной $\ell = 10$ мм, шириной $\delta = 0,1$ мм. Материал заготовки сталь Ю. Длительность импульса $\tau_0 = 0,03$ с, плотность мощности $q = 10$ Вт/мм².

8. Рассчитать температурное поле для движущегося полосового источника при нагреве стальной толстостенной пластины. Принять $\delta = 1$ мм, $\ell = 8$ мм. Скорость движения светового пятна $V = 0,05$ мм/с, $q = 10^2$ Вт/мм².

Лабораторная работа

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОБИВКИ ОТВЕРСТИЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ц е л ь р а б о т ы - ознакомиться с методикой юстировки оптического резонатора твердотельного импульсного лазера. Определить влияние технологических параметров (энергии импульса, длительности импульса, положения фокуса относительно обрабатываемой поверхности детали) на глубину получаемого отверстия. Ознакомиться с протеканием структурных превращений в зоне термического влияния при лазерной обработке.

Краткие теоретические сведения

При получении отверстий стадиями разрушения непрозрачных материалов лазерным излучением умеренной плотности являются испарение и плавление вещества. Дунка растет в глубину в основном за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров.

Принимая допущения о постоянстве мощности излучением $W(\tau) = \text{const}$, а также то, что глубина отверстия больше, чем его диаметр $h(\tau) > z(\tau)$ при условии $dz(h) = dh(\tau)$, интегрированием уравнения получаем

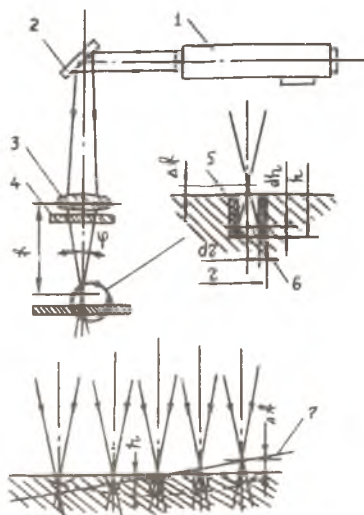
$$h = \sqrt[3]{\frac{3W\tau}{\pi t g^2 \varphi (L\delta + 2L_m)}}, \quad z = z_f + \sqrt[3]{\frac{3W\tau}{\pi (L\delta + 2L_m)}}, \quad (I.I)$$

где $L_{\text{в}}$ - удельная теплота испарения материала; $L_{\text{м}}$ - удельная теплота плавления материала; $z(\tau)$, $h(\tau)$ - соответственно радиус и глубина лунки; τ - длительность импульса; $W(\tau)$ - мощность излучения; $r_{\text{л}}$ - радиус светового пятна на поверхности материала; φ - угол светового конуса.

Из формул видно, что глубина образования отверстий 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 (рис. 1.1). 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/z . У глубоких лунок весь расплав, со-

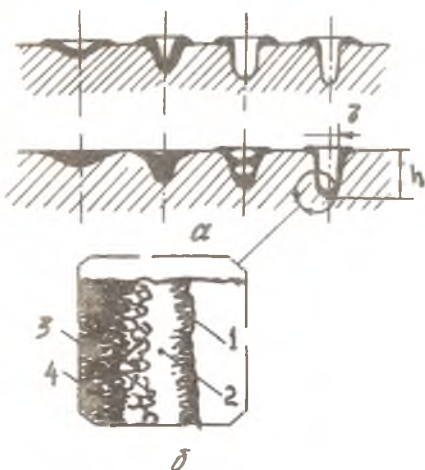


Р и с. 1.1. Механизм образования отверстия импульсным лазерным излучением: 1-излучатель; 2-поворотное зеркало; 3-фокусирующая линза; 4-защитное стекло; 5-область расплава; 6-область парообразования; 7-положение фокуса

ставляющий в среднем 2/3 объема лунки, после окончания импульса под действием сил поверхностного натяжения переформируется (рис. I.1) и принимает форму некоторого тела вращения с минимальной площадью поверхности ($\frac{h}{z} < 0,7$ - лунка заплывлена, $\frac{h}{z} > 4$ - не заплывлена, так как потоки жидкости турбулентны).

При образовании отверстия импульсным лазерным излучением в металлах поверхностный слой имеет изменение исходной структуры (рис. I.2). Зона воздействия лазера состоит из двух участков. Ха-

рактерной особенностью микро-структуры первого участка является ее столбчато-дендритное строение. Вследствие высоких скоростей охлаждения при кристаллизации происходит преимущественный рост главных осей дендритов, на-



Р и с. I.2. 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

правленных 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 необходимо число импульсов и относительная глубина отверстия, которую можно получить в заготовке, определяется следующими выражениями [11]:

$$\frac{h}{z} = \frac{0,56 L_0^{0,33} E^{0,17}}{\text{tg } \varphi^{1,33} E_0^{0,5}} ; \quad n = \frac{1,7 L_0^{0,33} E^{0,17}}{\text{tg } \varphi^{0,33} E_0^{0,5}} , \quad (I.2)$$

где E - энергия импульса; $E_{\text{г}}$ - предельная плотность энергии, которая вызывает испарение материала; $L_{\text{г}}$ - 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 [11].

Описание лабораторной установки

При проведении лабораторной работы используется импульсная лазерная установка ГОС-1001, имеющая энергию импульса не менее 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 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 диафрагмы. Сменные элементы лабораторной установки позволяют последовательно проводить регистрацию распределения плотности энергии $E(z)$ в световом пятне по характеру изменения света затемненного экрана и величине показаний измерителя ИКТ-1М, а также определять энергию в импульсе E . Величину отверстия диафрагмы измерительной головки выбирают из условия точности измерения плотности энергии в заданной точке. Для юстировки оптического резонатора применяется выверитель.

Домашнее задание

Пользуясь теплофизическими характеристиками материалов и техническими данными установки "КВАНТ-15" (см.табл.1.3), определить количество импульсов, необходимых для получения отверстий в пластине из стали 45 толщиной 1,5 и 2 мм. Для расчета воспользоваться зависимостями (1.1-1.2).

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 схемы измерения энергии излучения и выполнения технологической операции пробивки отверстия. Лабораторное задание выполнить в следующей последовательности.

1. С помощью выверителя провести юстировку 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 $E(z) = ae^{\delta z}$. Результаты измерений представить в форме табл. 1.4 и 1.5.

Т а б л и ц а 1.4

Таблица результатов измерений и обработки
экспериментальных данных

Энергия накачки, кДж	плотность мощности, Вт/см ² в пятне при удалении от оси z, мм			
	z = 0	z = 8	z = 16	z = 24
20				
30				
40				

Т а б л и ц а 1.5

Энергия накачки, кДж	Значение коэффициентов аппроксимации	
	a	δ
20		
30		
40		

3. Экспериментально установить зависимости глубины h и диаметра d пробиваемого отверстия от величины энергии в импульсе

установки ГОС-1001 и удаления фокуса от поверхности детали Δf . Результаты экспериментов для алюминиевых и стальных образцов сопоставить с расчетными данными, полученными по соотношениям (I.I).

4. Пользуясь теоретическими зависимостями, 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.

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 ГОС-1001.

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

Указания к отчету

При оформлении отчета требуется привести схемы измерения энергии излучения и оптической схемы технологической операции пробивки отверстия. Результаты измерения и обработки экспериментальных данных представить в форме табл. I.5. 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 Δf . Провести 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. Составить технологическую карту по пробивке отверстия в детали.

Вопросы для самоподготовки

1. Какие стадии разрушения непрозрачных материалов различают при пробивке их импульсным излучением?

2. Как зависит геометрия лунки от положения фокуса относительно поверхности материала? В каких случаях получается отверстие правильной формы?

3. В каких случаях происходит заплавление отверстий? 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?

2. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Импульсно-периодические лазеры обладают рядом технико-экономических преимуществ по сравнению с лазерами непрерывного и импульсного режимов генерации, которые составляют основу действующего технологического лазерного оборудования. Глубокое проплавление материала, низкая себестоимость режимов обработки деталей при наличии технологических пауз, простота конструкции импульсно-периодического лазера, гибкость регулирования энергетических характеристик (средняя и импульсная мощность, длительность импульса излучения, частота следования импульсов, скважность) обуславливают высокую эффективность его использования при газолазерной резке, шовой сварке толстостенных заготовок, сверлении глубоких отверстий. На примере производства авиационных деталей рассмотрим последовательность проектирования технологических процессов импульсно-периодической лазерной обработки (ИПЛО).

2.1. Последовательность проектирования технологического процесса

Исходными данными к проектированию технологического процесса ИПЛО является чертеж детали, который содержит требования к марке материала, точности размеров и взаимного расположения поверхностей их шероховатости. Также описаны способ изготовления исходной заготовки детали и ее годовая программа выпуска, оговаривается место ИПЛО в технологическом процессе изготовления детали. Как и в случае импульсной лазерной обработки, перед проведением ИПЛО назначаются подготовительные операции: очистка поверхности заготовки, нанесение поглощающих и легирующих покрытий, установление технологических зазоров при сварке. Данные подготовительные операции подробно описаны в п.1.1, однако следует учесть технологические особенности режимов ИПЛО. Заметное сокращение зоны термического влияния и глубокое проплавление материала позволяют снизить величину допуска на изготовление детали, а следовательно уменьшить технологические зазоры при сварке заготовок. В некоторых случаях

при ИЛЛО устраняется явление экранирования потоков лазерного излучения плазмой и снижаются отражательные свойства металлической поверхности деталей, что ограничивает область применения поглотительных покрытий. В состав покрытий входят теплостойкие вещества, хорошо поглощающие ИК - излучение, а также обладающие высокими адгезионными свойствами, безвредностью продуктов выброса.

Установление технологических зазоров при сварке заготовок ИЛЛО осуществляют так, чтобы допустимые вертикальные смещения кромок при стыковой сварке и зазоры между базовыми поверхностями комбинированных соединений не превышали значение $(0,15 \dots 0,25) S$, зазоры в стыке - $0,15 S$, где S - толщина заготовки при ИЛЛО. Такие жесткие требования к сборке при сварке толстостенных деталей обусловлены влиянием смещения кромок и зазоров на процесс формирования сварочной ванны, на поглощение энергии лазерного излучения, т.е. на эффективность, воспроизводимость и качество сварки. Для увеличения глубины проплавления при ИЛЛО также применяют специальную разделку кромок.

Как и в случае ИЛО, при лазерной обработке импульсно-периодическим излучением проектирование технологического процесса включает решение ряда технологических задач в следующей последовательности (по этапам):

технологический анализ рабочего чертежа детали; составление плана операций технологического процесса; расчет операционных размеров и назначение технических требований на операцию; разработка операции технологического процесса и оформление операционных карт; расчет режимов обработки и норм времени; выбор основного технологического оборудования и средств автоматизации; проектирование и расчет специальных приспособлений; проектирование и расчет оптических систем; проектирование специальных контрольных приспособлений.

Этапы проектирования технологического процесса подробно описаны в п. 1.2 для ИЛО, поэтому в дальнейшем в целях исключения повторений отразим лишь отличительные особенности построения технологии обработки деталей импульсно-периодическим лазерным излучением.

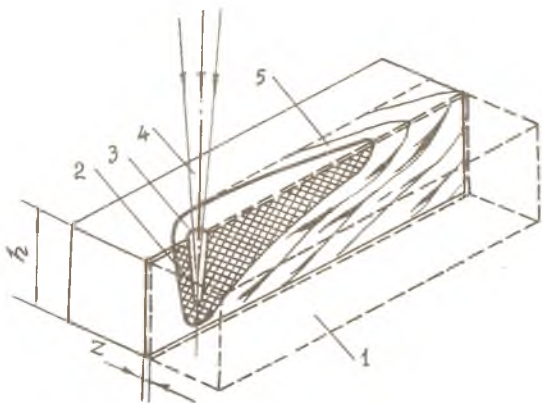
2.2. Этапы проектирования

В отличие от импульсной обработки, при проектировании технологического процесса ИЛЛО следует учитывать повышение точности изготовления детали, высокую проплавляемость материала, уменьшение

зоны термического влияния, возрастание производительности изготовления деталей сверлением отверстия, шовной сваркой и газолазерной резкой. Выполнение технологического анализа рабочего чертежа детали включает анализ конструкции детали и ее технологичности. При выяснении служебного назначения деталей, отдельных ее поверхностей, связей со смежными элементами узла, конструкторских баз и эксплуатационных условий следует учесть, что после проведения операций ИЛЛО, как правило, детали имеют высокие прочностные и эксплуатационные свойства. В связи с чем способы ИЛЛО могут быть применены для изготовления ответственных деталей конструкций летательных аппаратов (ЛА) и их двигателей, например, валов, шестерней, тяг управления и т.д. Увеличиваются требования к свариваемости точности выполнения размеров шероховатости обрабатываемых поверхностей. Следует выявить наиболее удобное положение фиксации и надежность закрепления детали при изготовлении, так как в отличие от импульсной лазерной обработки, при ИЛЛО используется технологическая оснастка повышенной жесткости.

Расчет режимов обработки и норм времени проводится на основе информационно-справочных материалов [4, II и др]. При ИЛЛО заготовок следует рассчитать величину суммарной мощности ЛЛ, мощность в импульсе, скважность и частоту генерации. Рассмотрим порядок расчетов режимов обработки деталей при шовной сварке, газолазерной резке и сверлении отверстий.

Шовная сварка с глубоким проплавлением. Используемые в производстве импульсно-периодические CO_2 -лазеры имеют излучение длительностью импульса $\tau = 0,1$ мс, частоту $f = 0,3$ кГц. Под действием такого излучения при относительно медленном движении заготовки возникает режим сварки, если увеличить скорость движения заготовки, то режим сварки переходит в режим резки. Принимаем допущение следующего механизма проникновения ЛЛ в глубь металла: парогазовый канал сварочной ванны после импульсного воздействия не схлопывается во время паузы, а сохраняется к моменту воздействия нового импульса. Парогазовый канал имеет форму конуса, задняя образующая которого параллельна направлению падения света, а передняя наклонена относительно этого направления (рис.2.1). Поток ЛЛ попадает на переднюю стенку канала, нагревает и проплавляет металл за время импульса на определенную глубину. Если температура поверхности достигает точки кипения, то расплавленный слой металла с передней стенки давлением паров перегоняется на заднюю, где он и застывает. За



Р и с. 2.1. Схематическое изображение пароговзогового канала при импульсно-периодической сварке

один импульс ЛИ пароговзоговый канал передвигается на расстояние, равное толщине слоя металла, перенесенного с передней стенки на заднюю. Его толщину определяют $\xi = \epsilon / \chi(\epsilon)$, где ϵ - плотность энергии ЛИ, поглощаемой передней стенкой, $\chi(\epsilon)$ - эффективность разрушения металла, которая вычисляется

$$\chi(\epsilon) = a(\epsilon - \epsilon_K) \tau^{3/4} + c \gamma T_K, \quad (2.1)$$

T - температура плавления металла, c - удельная теплоемкость, ϵ_K - плотность энергии ЛИ, необходимой для плавления материала, τ - длительность импульса, a - постоянная, определяемая свойствами материала образца (в случае $\epsilon \rightarrow q\tau$, $\chi \rightarrow a\gamma$), a - теплопроводность, γ - удельный вес, q - удельная плотность мощности испарения металла). Плотность энергии ϵ определяют из предположения о равномерном распределении энергии импульса по поверхности и равномерном поглощении стенками пароговзогового канала. последнее вызвано многократным отражением лазерного луча от металлических стенок, слабо поглощающих ИК - излучение. Однако перенос массы металла с передней стенки на заднюю можно реализовать лишь при условии, что на переднюю стенку падает энергия большая, чем на заднюю. Эта разница значений определяется фокусировкой

луча, формой парогазового канала и т.п. Если принять, что скорость сварки при $a \ll 1$ пропорциональна постоянной a , то выражение по расчету скорости сварки V имеет вид [4]

$$V = a f \frac{\varepsilon}{\pi d h} \chi^{-1}(\varepsilon/\pi d h), \quad (2.2)$$

а максимальная глубина проплавления достигается в случае предельно малой скорости движения заготовки $\chi(\varepsilon/\pi d h) \rightarrow \infty$

$$h_{max} = \frac{\varepsilon}{\pi d c \gamma T_K \sqrt{a \tau}}, \quad (2.3)$$

где ε - энергия импульса излучения; f - частота генерации излучения; d - диаметр парогазового канала.

Максимальная глубина сварки и характерная скорость зависят от мощности потока излучения, длительности и энергии импульса. С ростом частоты повторения импульсов f их взаимное влияние сказывается задолго до того, как будет достигнуто равенство $\tau f \approx 1$. При большой частоте поверхность парогазового канала во время паузы не успеет остыть, что отразится на нагреве во время следующего импульса. На расстоянии от канала, равном $\sqrt{4a/f}$, устанавливается стационарная температура T_f . При ИЛЮ применяется малая скорость V и стационарная температура T_f на расстоянии $z_0 + \sqrt{4a/f}$ в той точке, где она не изменяется во времени, при значении средней мощности излучения $q = \pi z_0^2 \varepsilon f$ следующая:

$$T_f = \frac{q}{2\pi k h} \ln \frac{h}{z_0 + \sqrt{4a/f}}. \quad (2.4)$$

Так как нагрев передней стенки канала в каждом импульсе происходит от температуры T_f , то действительная максимальная глубина проплавления

$$h_{max} = \frac{\varepsilon}{\pi d \sqrt{a \tau} c \gamma T_K} - \frac{q}{2\pi k T_K} \ln \frac{h}{z_0 + \sqrt{4a/f}}. \quad (2.5)$$

В выражении (2.5) второе слагаемое определяет глубину плавления в непрерывном режиме. Отсюда видно, что при малой скорости лазерной сварки при ИЛЮ глубина проплавления всегда будет выше, чем при непрерывном режиме обработки. При большой частоте следования импульсов средняя температура стенок канала может достигать

температуры плавления и металл, перетекающий на заднюю стенку, к приходу следующего импульса не будет застывать, он стекает вниз и заполняет канал. Критическая частота f_k , при которой не заполняется жидким расплавом дно канала, определится из условия $T_f = T_{пл}$:

$$f_k = \frac{2}{z_0} \sqrt{\frac{a}{\tau}} \left(\frac{T_k}{T_{пл}} - 1 \right)^{-1} \ln^{-1} \frac{h}{z_0 + \sqrt{4a/f}}. \quad (2.6)$$

Для малой скорости V при ($f < f_k$) ширина зоны расплава близка к диаметру луча и с ростом скорости глубина парогазового канала h уменьшается.

Как показывает теоретический анализ зависимости, в случае применения импульсно-периодического лазера со следующими энергетическими характеристиками: энергия в импульсе $E \sim 3$ Дж, длительность $\tau \sim 60$ мкс при малой частоте генерации 50...70 Гц, при скорости движения светового пятна в интервале $V = 0,15 \dots 0,3$ мм/с наблюдается переход от режима сварки к резке заготовки. Это объясняется тем, что при переносе массы за счет испарения с передней стенки парогазового канала на заднюю не происходит конденсации материала и она в парообразном состоянии удаляется наружу из зоны расплава. В оптимальном режиме обработки при постоянной частоте ν максимальная глубина проплавления h возрастает пропорционально увеличению энергии в импульсе E . При постоянной мощности глубина сварки возрастает с увеличением энергии импульса E и уменьшением частоты ν , относительное значение диаметра зоны расплава $\frac{h}{d_{пл}}$ возрастает с увеличением скорости движения светового пятна. Кинжалность проплавления для ИПЛО имеет высокое значение во всем диапазоне изменения скорости V и максимальная величина составляет $\frac{h}{d_{пл}} = 25$.

Газолазерная резка заготовок импульсно-периодическим излучением аналогична процессу непрерывной резки. Для удаления расплава из образовавшейся расплавленной ванны применяется режущий газ. ИПЛО устойчива при малых скоростях движения светового пятна, в то время как непрерывная резка имеет неустойчивый режим, связанный с неуправляемым процессом горения металла в кислороде. Это свойство ИПЛО широко используется на практике, в качестве технологического модуля возможно применить модернизированные приводы от металлообрабатывающих станков с ЧПУ, т.к. они имеют низкую скорость перемещения. При использовании резки в режиме ИПЛО большое внимание уделяется конструкции соплового аппарата. Здесь требуется выполнение жестко-

го требования – точное совмещение струи режущего газа и светового пучка, в связи с чем сопловой аппарат имеет узел фиксации и плавной регулировки.

Расчет необходимой мощности излучения W , ширины реза l и скорости перемещения светового пятна при газолазерной резке в режиме ИПЛО может быть осуществлен по формулам (2.5) и (2.6). При этом допускается, что струя режущего газа полностью удаляет расплавленный металл из зоны реза.

Сверление отверстий импульсно-периодическим излучением достигается при условии, что материал со дна глухого отверстия не задерживается на боковых стенках. Последнее можно достигнуть уменьшением длительности импульса τ_0 и увеличением его энерговклада E . Если средняя мощность излучения, вводимая в образец, окажется высокой, то произойдет взаимное влияние импульсов и температура заготовки T вблизи отверстия возрастет. С увеличением T повышается эффективность операции пробивки отверстия за счет улучшения испарительного механизма металла. Отсутствие конденсации газа на стенках канала приводит к поглощению им последующего импульса ЛД, что приводит к возникновению звуковых колебаний, вызывая неоднородные давления на стенках канала. При сверлении легкоплавких материалов неоднородность давления приводит к формированию глубоких отверстий с неправильным профилем.

Проектирование и расчет специальных приспособлений проводится с учетом конструктивных особенностей лазерных установок для ИПЛО (табл. 2.1–2.3), применяемых технологических модулей и других видов оснастки. Большое внимание при разработке приспособлений следует уделить выполнению заданной точности обработки заготовок, получению высокой производительности при обработке заготовок, экономической эффективности от применения приспособления, выполнению условий эксплуатации: удобству установки и снятию заготовки, соблюдению охраны труда. Эти требования для процессов ИПЛО значительно возрастают, так как в отличие от импульсной лазерной обработки допуски на изготовление деталей значительно уменьшаются.

З а д а н и я

1. Определить скорость движения светового пятна, положение фокуса при двухсторонней сварке встык полосового материала ИХВНЮТ

Основные технические характеристики технологических быстропрогночных газовых CO₂-лазеров серии "ДЮКРА-СИСТЕМ" фирмы "МАРТИСОТ" (Франция)

наименование	Технические характеристики	Модификации			
		FZ-150 NR	FZ-150 RE	FR-400	FR-800
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	0,15	0,15	0,40	0,80
	Диаметр луча, мм	10	10	15	15
	Расходимость, рад	< 2	< 2	< 2	< 2
	Режим работы: частота генерации, Гц	непр.	100	100	100
Laser	Напряжение сети, В	380	380	380	380
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	4	4	8	12
	Состав газовой смеси и расход газов, нмЗ	Не 74 N 20 CO ₂ 60	" - " - " -	" - " - " -	" - " - " -
	Расход охлаждаемой воды, л/мин	0,056	0,056	1,03	2
	Габаритные размеры, мм	350x2450x350	350x2450x350	650x2250x1150	650x2250x1150
Блок питания	То же	2200x550x600	2200x550x600	2200x550x600	2200x550x600
	Вес, кг	230	280	500	650

Основные технические характеристики технологического быстрого газового CO₂-лазера серии "ФОТОН" фирмы "ОРИЗЬ" (ФРГ)

Наименование	Технические характеристики	
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	0,625
	Диаметр луча, мм	I2
	Расходимость, рад	2 · 10 ⁻³
	Режим работы:	
	частота генерации, Гц	1000
	длительность импульса, мс	0,2
лазер	Напряжение сети, В	380/460
	Состав газовой смеси и расход газов, мм ³	He 100 N ^o 46
	Расход охлаждаемой воды, л/мин	CO ₂ 6 I6,7
Излучатель Блок питания	Газаритные размеры, мм	2100x700x800
	То же	Г700x600x700
	Вес, кг	465

Основные технические характеристики технологических быстроспрогночных газовых CO₂-лазеров серии "ГОФИН-СНАР" фирмы "ДАУРЭЛЬ" (ФРГ)

Наименование	Технические характеристики	Модификации		
		RS = 500	RS = 1000	RS = 1500
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	0,5	1,0	1,5
	Диаметр луча, мм	13	16	18
Лазер	Расходимость, рад	1,5 · 10 ⁻³	1,5 · 10 ⁻³	1,5 · 10 ⁻³
	Режим работы: частота генерации, Гц	до 2500	до 2500	до 2500
Лазер	Напряжение сети, В	380/415	380/415	380/415
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	10	20	25
	Состав газовой смеси и расход газов, ммз	He 97,5 N 46,5 CO ₂ 5	100 45 10	100 45 10
	Расход охлаждаемой воды, л/мин	18	40	60
Излучательный блок питания	Габаритные размеры, мм	670x2020x620	1185x2025x640	1185x2025x640
	То же	1800x1200x620	1800x1800x620	1800x1800x640
	Вес, кг	730	1650	1955

толщиной $S = 7$ мм на непрерывном CO_2 -лазере мощностью $W = 5$ кВт. Расходимость $\alpha = 3$ мрад, диаметр пучка на выходе из резонатора $d = 45$ мм, длина оптической системы $l = 1500$ мм.

2. По условиям предыдущего задания вычислить параметры лазерной сварки внахлест двух цилиндрических обечаек диаметром $D = 1200$ мм толщиной $S = 3$ мм из титанового сплава BT-20.

3. Установить распределение температурного поля в сварном шве при импульсно-частотной сварке встык листового материала ЗОХГСА толщиной $S = 0,5$ мм. Технологический лазер "КВАНТ-15", частота генерации излучения 150 Гц, энергия в импульсе 2 Дж.

4. Рассчитать положение фокуса при комбинированной сварке алюминиевого кожуха из сплава АМГ2Н толщиной 1 мм и толстостенной обечайки из стали IX18N10T. Сварка осуществляется в импульсно-частотном режиме, частота генерации излучения 100 Гц, длительность импульса $\tau_0 = 0,001$ с, энергия в импульсе $E = 0,5$ Дж.

5. Определить влияние температуры подогрева заготовок на термодинамические параметры лазерной сварки по условиям задания 1.

6. Рассчитать оптическую систему для непрерывной шовной сварки на внутренней поверхности оболочки диаметром $D = 150$ мм, толщиной $S = 3$ мм из стали 40Х. Расстояние места сварки от торца $l = 30$ мм. Используется CO_2 -лазер мощностью $W = 5$ кВт, расходимость $\alpha = 3$ мрад, диаметр пучка $d = 45$ мм.

7. Определить скорость резки стального листа непрерывным излучением лазера. Режущий газ - кислород, ширина реза $l = 0,5$ мм, толщина листа $S = 2$ мм, мощность излучения $W = 5$ кВт, коэффициент эндотермической реакции $R = 2,1$.

8. По условиям задания 1 установить величину шероховатости разрезаемой листовой заготовки, время изготовления, допуск на обработку, если мощность излучения колеблется с отклонением $\pm 0,1$. Выбрать оптимальный вариант расположения заготовок в листе, рассчитать коэффициент использования материала и коэффициент загрузки установки. Заготовка имеет форму полукруга $D = 180$ мм.

9. Определить изменение составляющих скорости V_x , V_y на участке закругления при вырезке угловой части детали, если выполняется условие постоянства касательной скорости.

10. На примере расчета параметров газолазерной резки металлических материалов показать, что энергетические условия резки характеризуются с помощью удельной энергии резки, которая не зависит от условий резания, а является характеристикой материала.

II. Определить зависимость ширины зоны термического влияния δ' от температуры подогрева детали T_n . Материал детали - сталь 40, $W = 450$ Вт, $V = 0,02$ мм/с, $S = 2$ мм.

12. Используя распределение температуры в центре нормально распределенного источника, установить зависимости ширины реза листового материала от скорости газолазерной резки V .

Лабораторная работа

ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы - ознакомиться с методикой проведения юстировки оптического резонатора газоразрядного CO_2 -лазера. Определить влияние технологических параметров (мощности излучения, давления режущего газа и положения фокуса относительно обрабатываемой поверхности детали) на глубину проплавления и скорость резки материалов. Ознакомиться с протеканием структурных превращений в зоне термического влияния при газолазерной резке металлов.

Краткие теоретические сведения

Процесс резки лучом лазера представляет собой совокупность ряда теплофизических и газодинамических явлений. Здесь характерны две стадии: нагрев металла в объеме реза до температур, не ниже температуры плавления, и удаление продуктов разрушения из полости реза. От длительности первой фазы зависит производительность процесса. Главным фактором, ограничивающим скорость нагрева, а следовательно и скорость резки, является теплопроводность материала. При сопоставлении с электронно-лучевой и газокислородной лазерная резка материалов обеспечивает наибольшую плотность энергии и наименьший эффективный диаметр нагрева. Поэтому при лазерной резке детали имеют незначительную величину зоны термического влияния. Распределение температуры в зоне нагрева определяется по формуле

$$T = \frac{W}{2\pi a S} K_0(U) e^{-\frac{Vx}{2a}}, \quad (2.7)$$

где $U = R\sqrt{\frac{V^2}{4a^2} + \frac{\delta}{a}}$, $R = \sqrt{x^2 + y^2}$, $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, $\delta = \frac{2\alpha_0}{c\gamma^2}$,

$K_0(U)$ - функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка, α_0 - коэффициент теплопередачи, λ - коэффициент теплопроводности, c - теплоемкость, γ - удельный вес, S - толщина листа, W - тепловая мощность лазерного излучения, V - скорость перемещения светового пятна, x , y - координаты.

Уравнение (2.7) хорошо описывает модель линейного источника тепла лишь в области небольших скоростей резки ($V = 1 \dots 1,5$ м/мин). При увеличении скорости перемещения источника тепла и пропорциональном возрастании его мощности W тепло распространяется лишь в направлении, перпендикулярном оси перемещения источника. В этих условиях скорость резки определяется следующим соотношением:

$$V = \frac{q\sqrt{2e}}{c\gamma S \ell T_S}, \quad (2.8)$$

где ℓ - ширина реза, q - тепловая мощность источника, $c\gamma$ - объемная теплоемкость, S - толщина разрезаемого материала, T_S - температура, при которой происходит интенсивное разрушение (плавление) разрезаемого материала.

Процесс удаления продуктов разрушения материалов оказывает существенное влияние на качество резки, ширину реза, глубину зоны термического влияния. Плохая удаляемость продуктов резки приводит к заметному ухудшению качества резки и может служить причиной замедления и даже прекращения процесса резки. Удаление продуктов осуществляется под действием кинетической энергии струи режущего газа на расплав. В качестве режущего газа может применяться кислород, воздух, а также инертные газы. В случае использования кислорода он окисляет поверхность металла и тем самым способствует повышению коэффициента поглощения тепла. Энергия, выделяемая в процессе экзотермической реакции горения материала, сопоставима с энергией лазерного луча. Выбор режущего газа необходимо проводить с учетом конкретной технологии. Так, при резке алюминиевых сплавов следует использовать гелий, а при обработке титановых сплавов - аргон. С поддувом инертных газов качество реза улучшается, однако несколько снижается производительность процесса.

Неметаллические материалы по способности подвергаться газо-лазерному резанию делятся на две группы: разлагающиеся или плавя-

щиеся при нагреве. К первой группе относятся пластмассы, ткани, резина, фанера и стекло, ко второй группе - стекло, керамика, асбестоцемент. Скорость резки разлагающихся материалов гораздо выше, чем плавящихся. Особенность резки - выделение значительного количества дыма. Для этих материалов состав газа существенного влияния не имеет, поэтому целесообразно применять недефицитные газы: сжатый воздух и азот.

Основными требованиями к конструкциям резаков, применяемых при газолазерной резке, являются: обеспечение высоких давлений режущего газа в зоне расплава (до 0,5...1 МПа), совпадение плоскости движения газовой струи с плоскостью реза материала, обеспечение жесткости закрепления резака по отношению к оптической системе. Конструкции резаков разделяются по направлению движения режущего газа. Применяются наиболее простые по конструкции резаки, имеющие совпадение движения режущего газа с направлением лазерного излучения, а также резаки, у которых движение режущего газа направлено под углом к направлению лазерного излучения α . Последняя конструкция резака позволяет наиболее эффективно удалять расплавленную фазу и зоны реза. Для экономии расхода дорогостоящих защитных газов применяют конструкцию резаков с боковым поддувом воздуха. В этом случае давление воздуха выбирается на 30-40% ниже давления подачи основного режущего газа.

Как и в случае пробивки отверстий лазерным излучением, при газолазерной резке зона термического влияния также состоит из двух слоев. Первый слой имеет мелкозернистую дендритную структуру в условиях высокой скорости кристаллизации. Второй слой имеет мелкозернистую структуру с высокой величиной микротвердости из-за протекания фазовой перекристаллизации. Однако в отличие от процесса пробивки отверстия при газолазерной резке наблюдается уменьшение глубины первого слоя вследствие принудительного удаления расплавленного материала направленной струей режущего газа.

Описание лабораторной установки

Для исследований используется технологический CO₂-лазер "ЛАТУС-31" мощностью $W = 1,5$ кВт. Лабораторная установка укомплектована оптической системой для фокусировки излучения резаками осевого и бокового поддува, перемещателем заготовки, а также измерителем мощности проточного тина. В качестве исследуемых образцов

применяются трубчатые листовые материалы из углеродистой стали. Регулирование давления режущего газа в процессе резки осуществляется с помощью редукторов. Контроль траектории резки проводится путем подсветки оптической оси $He-Ne$ -лазером.

Домашнее задание

С помощью зависимости (2.8) рассчитать температурное поле в зоне резки листового образца из углеродистой стали толщиной $S = 1,5$ мм с использованием CO_2 -лазера мощностью $W = 1$ кВт в струе воздуха со скоростью перемещения $V = 1,2$ мм/с. Необходимые значения функции $K_p(U)$ приводятся в справочной литературе [17].

Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкцию по эксплуатации при работе лазерной технологической установки "ЛАТУС-3I". Освоить порядок включения и выключения установки, запуск и регулирование скоростью перемещателя заготовки, а также измерение мощности лазерного излучения. При установке резаков из-за низкой прочности фокусирующей линзы, выполненной из кристалла $KClO$, давление режущего газа не должно превышать значений $P = 10$ Па. Соблюдать следующий порядок выполнения лабораторной работы.

1. Провести юстировку газоразрядного лазера с получением многомодового равномерного распределения удельной мощности излучения по пятну. С помощью измерителя мощности определить величину излучаемой мощности при различных вариантах включения обмоток трансформатора блока питания.

2. Экспериментально установить зависимость скорости газолазерной резки от мощности излучения при различных положениях фокусного пятна ($-\frac{S}{4}$, 0 , $\frac{S}{4}$) при постоянном давлении режущего газа (S - толщина заготовки). При резке стальных образцов использовать сжатый кислород и воздух. Результаты экспериментов представить в виде табл. 2.4.

3. Результаты экспериментов по определению скорости реза сопоставить с расчетными данными, полученными по формуле (2.8). С помощью зависимости (2.7) построить распределение температур в зоне обработки для одного из вариантов режима резки. Сопоставить расчетную ширину реза с экспериментальным значением.

Т а б л и ц а 2.4

Результаты экспериментов по газолазерной резке листового материала из углеродистой стали

Направление движения газовой струи	Резка с кислородом			Резка с воздухом		
	Положение фокуса	V , мм/с	l , мм	Положение фокуса	V , мм/с	l , мм
Осевое						
" "						
" "						
Боковое						
" "						
" "						

4. Ознакомиться с микроструктурами зон термического влияния при газолазерной резке, возникающими в конструкционных сталях, титановых и алюминиевых сплавах.

Указания к отчету

При выполнении лабораторной работы привести схему процесса газолазерной резки, конструкции резаков, результаты экспериментов по отработке технологического процесса в виде табл. 2.4. Отразить распределение температур в зоне обработки для одного из вариантов режима резки. Провести анализ зависимости изменения ширины реза от положения фокуса относительно детали, а также от скорости ее перемещения и выбора режущего газа. Составить технологическую карту по лазерной резке заготовки.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких основных стадии состоит процесс газолазерной резки? В чем преимущество резки лазерным лучом по сравнению с остальными способами?
2. Как изменяется конфигурация температурного поля при увеличении скорости резки и возрастании мощности лазерного излучения?
3. Каково назначение режущего газа при лазерной резке? В каких случаях используются газы? Почему снижается длительность лазерной резки, если применять инертные газы взамен кислорода?

4. В каких случаях происходит существенное уменьшение толщины зоны термического влияния: при осевой подаче режущего газа или боковом направлении движения газовой струи?

5. Какими условиями протекания процесса газолазерной резки обусловлено оптимальное положение фокального пятна относительно поверхности разрезаемого материала? Чем вызвано использование длиннофокусной оптики при газолазерной резке?

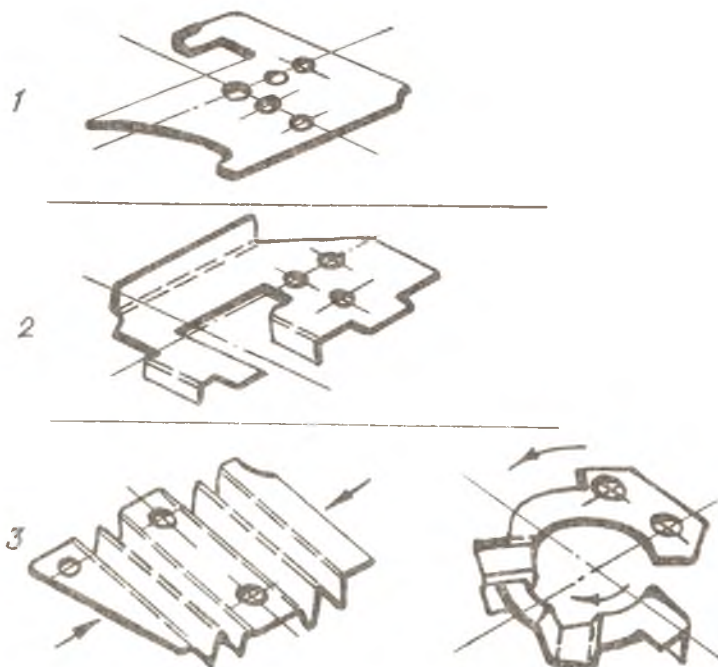
3. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В настоящее время наиболее широкое применение получили технологические лазеры непрерывной генерации излучения. Анализ тенденций развития современных видов оборудования заготовительного производства показывает перспективность создания автоматизированных комплексов, совмещающих различные виды обработки. Например, технологические лазеры, являясь одним из элементов оборудования гибких автоматических производств, хорошо встраиваются в переналаживаемые линии заготовительных цехов и с высокой эффективностью применяются при выполнении разделительных и формообразующих операций листового материала. При этом процессы, связанные с проведением разделительных операций (например, замена операции вырубki в штампах лазерной резкой по криволинейному контуру с совмещением отверстий на прессах малой мощности) являются перспективными и внедряются в производство (*TRUMATIC LASER PRESS*) имеет CO_2 -лазер 0,5 кВт, скорость реза 10 м/мин, точность позиции совпадает с точностью штамповки $\pm 0,03 \pm 0,1$ мм, снабжены прессом 12,5 тс, 200 ходов в минуту, обеспечивает получение качественных деталей и с успехом заменяет штамповочные операции). Технологические возможности данного специализированного оборудования могут быть расширены при незначительных его доработках.

Лазер как инструмент для проведения локальной термической обработки материалов является универсальным средством, позволяющим осуществлять различные технологические процессы регулировкой плотности мощности в фокальном пятне, в основном применяется лишь для поверхностей термообработки, сварки, резки.

Значительное расширение области использования лазеров достигается при осуществлении формообразующих операций, с помощью которых из листовой или трубчатой заготовки получают пространствен-

ные детали. Здесь лазерное излучение выполняет роль источника нагрева для штамповки заготовок с местным подогревом (рис.3.1), когда использование других видов источников (т.в.ч., контактного или лучевого нагрева) не представляется возможным.



Р и с. 3.1. Общий вид заготовок и размещение зон нагрева при формообразовании листовых материалов на спецоборудовании: 1 - совмещение газолазерной резки и пробивки отверстий на быстроходных прессах; 2 - совмещение операций газолазерной резки, пробивки отверстий и гибки с местным подогревом детали; 3 - совмещение операции газолазерной резки, пробивки отверстий, гибки предварительно разупрочненной заготовки с применением шибера и крутящего устройства

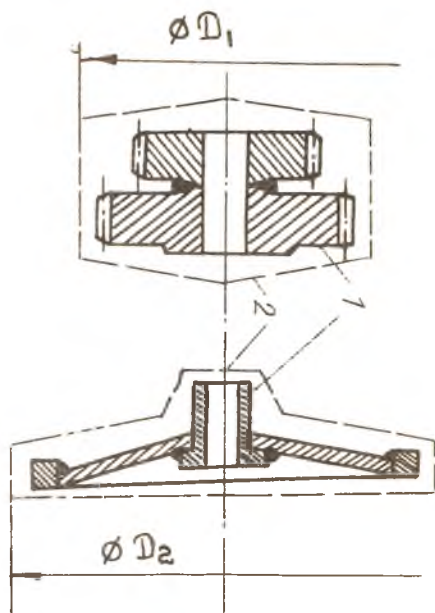
При существующей технологии изготовления листовых деталей на специализированном оборудовании силовые и точностные характеристики процесса определяются механическими свойствами материалов (склонностью к упрочнению, пластичностью, прочностью, анизотропией механических свойств и т.д.). Уменьшение доводочных работ требует применения значительных калибрующих усилий, что приводит к увели-

чению энергоемкости оборудования и, вследствие этого, снижению его быстроходности. Точность изготовления деталей зависит от точности изготовления штампа и его конструкции. Технологическая оснастка имеет значительную металлоемкость и не является универсальной для всей номенклатуры деталей. При получении высокоточных деталей данные недостатки существующей технологии приводят к значительным затратам на проведение термических операций для фиксирования заданных свойств штампуемого листа, на изготовление многочисленных комплектов инструмента, на капитальные вложения в основное оборудование.

Устранить недостатки существующей технологии и получить значительную экономию материальных и трудовых ресурсов возможно путем применения в специализированном оборудовании совмещения операций вырубки, газолазерной резки, формоизменяющих операций с применением местного подогрева.

На рис. 3.1 приведены общий вид заготовок и размещение зон нагрева при формоизменении листового материала изгибающим моментом и кручением. При этом значительного улучшения схемы течения материала и локализации пластических деформаций достигают при изменении структурно-фазового состояния металлических материалов, например, местного разупрочнения заготовки. В этом случае использование штамповой оснастки с шиберным и скручивающим устройствами позволяет значительно расширить номенклатуру выпускаемой продукции, уменьшить пружинение, радиусыгиба, повысить точность изготовления деталей.

При конструктивном анализе детали необходимо обратить внимание на сложность ее отдельных элементов: глубокие и тонкие ребра, малые радиусы закругления, отверстия малого диаметра и др. Получение таких деталей вызывает значительные трудности в связи с большими удельными давлениями штамповки и низкой стойкостью инструмента. Под технологичностью детали понимается сочетание конструктивных элементов, обеспечивающее наиболее простое и экономичное изготовление деталей в условиях заданной программы выпуска при соблюдении технологических и эксплуатационных требований к ним. В процессе анализа выполняются все необоснованные требования к конструкции детали. Если позволяют условия эксплуатации, конструкцию детали заменяют элементами простой формы, менее трудоемкой в изготовлении (рис.3.2).

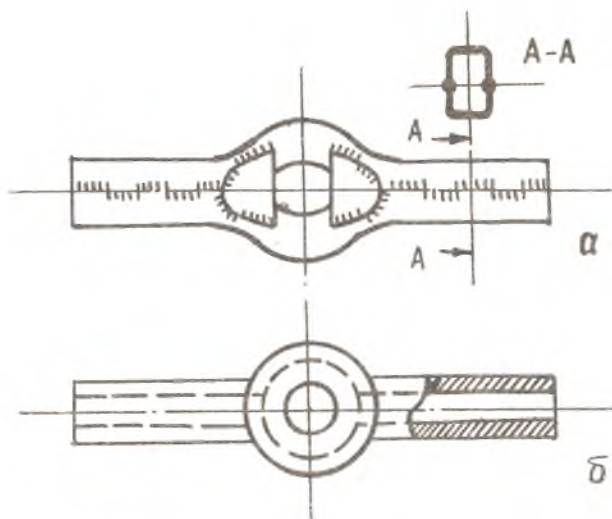


Р и с. 3.2. Сокращение расходов материалов при изготовлении деталей путем их рационального конструктивного членения: 1-при использовании лазерной обработки; 2-при обработке резанием

Примером повышения технологичности изготовления конструкций может служить технология производства арматуры трубопроводов,^I корпусов вентиля и т.д. Литейные конструкции заменяются сварными, получаемыми в процессе холодного выдавливания и глубокой вытяжки. При этом поэлементное расчленение конструкции проводится с целью обеспечения высокой технологичности каждой штамповочной операции. На рис. 3.2 наглядно представлено использование технологических вставок для снижения растягивающих напряжений в опасных местах очага деформаций, что позволяет штамповать исходные детали за один переход. Обычно технологические вставки помещаются в том месте, где деталь в процессе эксплуатации испытывает взаимодействие только сжимающих напряжений.

Штамповочно-сварные конструкции с успехом могут заменять горяче-штамповочные детали, что может найти отражение при изготовлении задних мостов автомобилей (рис.3.3). Здесь деформирование сварной заготовки проводится взрывом в закрытом штампе. В качестве передаточной среды служит увлажненный песок. Технологическое окно,

^I Работа проводится *Prof. Dr sc.techn A. Neubauer, Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Sect. Techn der mVI, DDR.*



Р и с. 3.3. Изготовление заднего моста грузового автомобиля с применением лазерной сварки (а) и объемным деформированием (б)

предварительно получаемое вырубкой в заготовке, позволяет не допустить появления растягивающих напряжений при взрыве. После проведения штамповочных операций требуемая форма отверстия заднего моста выполняется путем лазерной приварки косынок.

В табл. 3.1 – 3.7 приводятся характеристики непрерывных технологических лазеров, а в табл. 3.8 – зависимости для расчета технологических параметров лазерной обработки.

З а д а н и я

1. Построить зависимость изменения относительной величины границы раздела фаз \angle от момента времени τ при оплавлении поверхности толстостенной стальной пластины лазерным источником нагрева. Поглощаемая мощность источника теплоты составляет $W = 100$ Вт.

2. Установить время стационарного состояния раздела фаз при оплавлении стальной толстостенной пластины, если мощность источника лазерного излучения $W = 400$ Вт, а коэффициент отражения при длине волны $\lambda = 1,06$ мкм составляет величину $A = 0,6$.

Основные технические характеристики технологии технологических быстропроточных газовых CO₂-лазеров серии "ЭВЕРДАВЕ" фирмы "КОГЕРЕНТ ДЖЕНЕРАЛЬ" США

Наименование	Технические характеристики	Модификации		
		EFA = 50	EFA = 51	EFA = 52
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	0,625	1,25	1,55
	Диаметр луча, мм	13	16	16
	Режим работы	Непр.	Непр.	Непр.
Лазер	Напряжение сети, В	380 - 480	380 - 480	380 - 480
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	10	20	25
	Состав газовой смеси и расход газов, мл/мин	He N ₂ CO ₂	119 21 1,7	119 21 1,7
	Расход охлаждаемой воды, л/мин	57 - 76	57 - 76	57 - 76
Излучатель	Габаритные размеры, мм	153x620x550	164x700x575,4	2600x700x575,4
Блок питания	То же	2439, 4x914, 4x1308	2439, 4x914, 4x1308	2439, 4x914, 4x1308
		260x700x575,4	2439, 4x914, 4x1308	2439, 4x914, 4x1308

Т а б л и ц а 3.2

Основные технические характеристики технологических быстропрогрочных газовых CO₂-лазеров серии "СИЛЬВАНИЯ" фирмы ГТЕ "СИЛЬВАНИЯ" США

Наименование	Технические характеристики	М о д и ф и к а ц и и	
		№ 97I	№ 975
Оптический резонатор лазера	Мощность излучения, кВт	2,5	5
	Диаметр луча, мм	46	46
	Режим работы	Непр.	Непр.
Лазер	Напряжение сети, В	460 В + 10%	460 + 10%
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	60	120
Излучатель	Габаритные размеры, мм	I, 82x2, 08xI, 52	I, 82x2, 08x3, 2
	То же	I, 93x2, 38x0, 66	I, 93x2, 38x0, 66
Блок питания	Вес излучателя, кг	I748	3295
	Вес блока питания, кг	2I30	2I30

Основные технические характеристики технологических быстропрочных газовых CO₂-лазеров серии "ГРУМАТИК" фирмы "ГРУМФ" (ФРГ)

Наименование	Технические характеристики	М о д и ф и к а ц и и				
		TLLF = 500	TLLF = 1000	TLLF = 1500	TLLF = 2500	TLLF = 5000
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	0,5	1,0	1,5	2,5	5,0
	Диаметр луча, мм	10	13	13	20	25
	Расходимость, рад	< 1·10 ⁻³	1·10 ⁻³	< 1·10 ⁻³	< 1,5·10 ⁻³	< 1,5·10 ⁻³
	Режим работы	Непр.	Непр.	Непр.	Непр.	Непр.
Лазер	Напряжение сети, В	10·10 ³	15·10 ³	30·10 ³	60·10 ³	120·10 ³
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	17	27	36	88	148
	Состав газовой смеси (мм рт.ст.)	He 30 N ₂ 7,5 CO ₂ 1,9	40 10 2,5	40 10 2,5	60 12 3	110 16 3
Излучатель	Габаритные размеры, мм	1200х600х1259	1790х880х1550	1790х880х1350	1790х880х1750	3004х940х1650
	То же	1200х880х1900	1200х880х1900	1200х880х1900	1800х800х1900	3600х800х1900
	Вес, кг	950	1640	1710	2860	5060

Таблица 3.4

Основные технические характеристики технологического
быстропроточного газового CO₂-лазера "ПЛУТОН-1" (СССР)

Наименование	Технические характеристики	
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	2,0
	Диаметр луча, мм	50
	Расходимость, рад	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	Режим работы	Непр.
Лазер	Напряжение сети, В	30
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	$M8 - 0,08;$ $CO_2 - 0,04$
	Состав газовой смеси и расход газов, мм ³	$N - 0,18$
	Расход охлаждающей воды, л/мин	0,5
Излучатель	Газовитные размеры, мм	2155x1800x2070
	То же	1600x800x1800
	Вес, кг	3000

Т а б л и ц а 3.5

Основные технические характеристики технологического
быстропроточного газового CO₂-лазера "ЛДТУС-31" (СССР)

Наименование	Технические характеристики	
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	1
	Диаметр луча, мм	45
	Расходимость, рад	$3 \cdot 10^{-3}$
	Режим работы: частотный - длительность импульса, мс непрерывный	10...100
Лазер	Напряжение сети, В	380
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	25
	Состав газовой смеси, мм рт.ст.	CO ₂ :N ₂ :He=2:20:10
	Расход охлаждаемой воды, л/мин	8
Излучатель	Габаритные размеры, мм	2040x1140x1670
	Вес, кг	1250

Основные техничекие характеристики технологического
быстропроточного газового CO₂-лазера "ДОК-3М", ИТЭМ СОАГСССР

Наименование	Технические характеристики	
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт Диаметр луча, мм Расходимость, рад Режим работы	0,2 - 2,5 55 I · 10 ⁻³ Непр.
Лазер	Напряжение сети, В Максимальная потребляемая мощность, кВт Состав газовой смеси и расход газов, нм ³ Расход охлаждаемой воды, л/мин	380/220 60 CO ₂ - 0,33; N ₂ - I He ₂ - 0,7 0,56
Иллучатель Блок питания	Газаритные размеры, мм То же Вес, кг	I600x2300xI650 I500x400x2000 I600

Основные технические характеристики технологического
быстропроточного газового CO₂-лазера "ХЕБР-1" (Болгария)

Наименование	Технические характеристики	
Оптический резонатор	Мощность излучения, кВт	1,5
	Диаметр луча, мм	40
	Расходимость, рад	4 · 10 ⁻³
	Режим работы	непр.
Лазер	Напряжение сети, В	380
	Максимальная потребляемая мощность, кВт	30
	Состав газовой смеси и расход газов, мм ³ /ч	He - 0,085; $\frac{1}{2}$ - 0,027; CO ₂ - 0,005
	Расход охлаждаемой воды, л/мин	3
	Габаритные размеры, мм	2050x1550x1300
Блок питания	То же	1520x650x1900
	Вес, кг	1500

Т а б л и ц а 3.8

Наименование операций	Формулы для расчета
Сварка	$H_{св} = \frac{W}{2\pi\lambda T_{пл}} \ln \frac{z_0 + a / \sqrt{c\gamma\tau}}{z_0} \quad (3.1)$ $T = \frac{W}{\sqrt{c\gamma\tau} \sqrt{4\pi\lambda c\gamma\tau}} \times \quad (3.2)$ $\times e^{-\frac{y^2}{4a\tau} - \delta\tau},$ $\delta = \frac{2\alpha\tau}{c\gamma\tau}, \quad \tau = \frac{2z_0}{\sqrt{c\gamma\tau}}$
Резка	$e = \frac{AW\sqrt{2/\pi e}}{V_{рез} c\gamma\tau T_{пл}} \quad (3.3)$
Закалка	$V_{зак} = \frac{8az_0(T_{пл} - T_{зак})}{z_{зак} T_{пл}} \quad (3.4)$

Примечание. $H_{св}$ - глубина проплавления; W - мощность; λ - теплопроводность; $T_{пл}$, $T_{зак}$ - соответственно температуры плавления и закалки; a - температуропроводность; τ - время воздействия; $\alpha\tau$ - коэффициент полной поверхностной теплоотдачи; c, γ - соответственно теплоемкость и удельный вес, $V_{зак}$, $V_{рез}$ - соответственно скорость закалки и резки, $z_{зак}$ - глубина закалки.

3. Определить изменение температуры в движущейся системе координат при интенсивном испарении поверхности стального образца.

4. Вычислить режимы лазерного воздействия, обеспечивающие максимальные объемы испаренного вещества при лазерной обработке алюминиевого сплава.

5. Установить плотность потока лазерного излучения при интенсивном испарении алюминиевых, титановых сплавов и сталей.

6. При каких соотношениях теплофизических свойств покрытия и основного материала, а также соотношения их толщин, скорости перемещения источника нагрева с гауссовским распределением мощности в световом пятне можно применить решение объемной температурной задачи для тонкостенной пластины?

7. Используя метод суперпозиции, построить температурное поле в толстостенной пластине для неподвижного импульсного источника нагрева в момент времени $\tau = 0,5 \tau_0$. Световое пятно имеет форму отрезка прямой линии $l = 10$ мм шириной $b = 0,1$ мм. Материал заготовки сталь 10. Длительность импульса $\tau = 0,03$ с. Плотность мощности $q = 10$ Вт/мм².

8. Рассчитать время лазерного упрочнения режущей кромки вырубного штампа из стали $У_0$ на установке "КВАНТ-15". Длина режущей кромки $b = 100$ мм. Коэффициент перекрытия пятна $K=0,5$.

9. Определить требуемое распределение интенсивности излучения в движущемся полосовом источнике нагрева, при котором наступает равномерное распределение температур на поверхности заготовки. Задачу решить в безразмерном виде.

10. Установить зависимость скорости охлаждения стали $У10$ от глубины h при нагреве излучением лазера длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм без существенного разрушения поверхности после окончания импульса. Длительность импульса $\tau = 0,001$ с, $q = 10^3$ Вт/мм², $a = 10$ мм²/с, $\alpha = 33,5$ Вт/(м⁰С).

11. По условиям задания 3 построить распределение изотерм в стали 45 в зоне воздействия излучения лазера без существенного разрушения поверхности в зависимости от времени τ после окончания действия импульса. Диаметр светового пятна $d = 2$ мм.

12. Вычислить значение интенсивности теплового источника q , время закалки τ , необходимую скорость закалки V , глубину упрочнения h углеродистой стали 45, предварительно охлажденной до температур $T_1 = -50^\circ\text{C}$, $T_2 = -100^\circ\text{C}$.

13. Определить энергию импульса E при лазерном спекании напыленного слоя из карбида вольфрама WC с добавкой Ni толщиной $S = 10^{-2}$ мм, нанесенного на поверхность детали из стали 3. Коэффициент перекрытия пятна 0,5, диаметр пятна $d = 3$ мм, длительность импульса $\tau_0 = 6$ мс.

Лабораторная работа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Ц е л ь р а б о т ы - определить величину основных параметров лазерного упрочнения металлов (энергии импульса, мощности генерации излучения, скорости перемещения обрабатываемой детали, расстояния между фокусом и поверхностью обрабатываемой заготовки) при непрерывном и импульсном режимах обработки; ознакомиться с устройством плоских оптических элементов (фокусаторов), применяемых для улучшения свойств упрочненной поверхности деталей; изучить микроструктуры металлов в зоне термического влияния при лазерном упрочнении металлов.

Краткие теоретические сведения

Локальное кратковременное воздействие лазерного излучения на стали позволяет получить за счет фазовых превращений упрочненный слой микротвердостью в 1,2...1,5 раза выше исходного [2,3], на 80% сократить расходы на термообработку, увеличить производительность процесса закалки в 1,5 раза. Распределение микротвердости по толщине слоя при различных скоростях обработки для углеродистых сталей показывает: имеются три зоны обработки (с высокой твердостью, пониженной твердостью и исходной структурой). Наличие участков с пониженной твердостью позволяет устранить трещинообразование при многочисленных нагревах и охлаждениях, характерных для лазерной обработки.

При лазерной обработке закаленных углеродистых сталей, например стали У8, формируются следующие структуры. Структура первой зоны состоит из мелкоигольчатого мартенсита с некоторым количеством

остаточного аустенита. Микротвердость этой зоны составляет $H_{50} = 8800 \dots 920$ МПа. Пребывание некоторого объема металла в жидком состоянии приводит к образованию столбчато-дендритного строения структуры. Вследствие высоких скоростей кристаллизации происходит преимущественный рост главных осей дендритов, направленных перпендикулярно границе зон термического влияния. В поперечном сечении столбчатые кристаллы выглядят как равновесные зерна, состоящие из отдельных блоков, определенным образом ориентированных в пределах каждого зерна. Причем внутри блоков наблюдаются очень мелкие дендритные ветви. Вторая зона на границе с исходной структурой имеет зону отпуска с пониженной, по сравнению с исходной, микротвердостью. Рентгеновские исследования показывают, что изменения структуры при лазерной обработке во многом аналогичны изменениям, происходящим при закалке или пластической деформации.

Возникает значительное уменьшение размеров блоков структуры металла, увеличение плотности дефектов, а также возрастание микронапряжений в кристаллической решетке.

Значительное увеличение твердости поверхности деталей достигается лазерным легированием. Этот процесс может осуществляться путем лазерной обработки поверхности детали с предварительным нанесением плазменно-напыленного легирующего покрытия, обмазки типа "металл-металл" или непосредственным вдуванием легирующего порошка в зону расплавленного металла.

При использовании обмазок высокий эффект упрочнения углеродистых сталей получают легированием поверхности сочетанием $Ti + Nb$. Микротвердость $H_{50} = 17800$ МПа при лазерной обработке на установке "Квант-16" сохраняется на глубине $H = 200 \dots 220$ мкм. Применение отдельных легирующих элементов, например титана, не приводит к однородности свойств по глубине заготовки: на поверхности $H_{50} = 159000$ МПа, на глубине $H = 70$ мкм, $H_{50} = 12900 \dots 14300$ МПа.

Глубину зоны упрочнения при импульсной лазерной обработке приближенно определяют по соотношению $z = \sqrt{\frac{\alpha \tau}{2\theta}}$, где α - температуропроводность, τ - длительность импульса, $\theta = \frac{T_1}{T_0}$ - отношение температуры T_1 , при которой происходит прекращение мартенситного превращения, к температуре T_0 плавления металла. Для сталей $\theta = 0,2 \dots 0,3$.

Шероховатость поверхности детали после обработки следует уменьшить путем изменения положения фокуса относительно облучаемой поверхности, а также путем применения специальной оптики, обес-

печивающей равномерное распределение плотности мощности излучения в световом пятне.

Значения температуры при лазерном упрочнении по глубине образца вычисляются по формулам:

$$\tau = \frac{2q\sqrt{a}}{\lambda} \left[\frac{1}{\tau^2} i\Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right) - (\tau - \tau_0)^{\frac{1}{2}} i\Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a(\tau - \tau_0)}}\right) \right] \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{2q\sqrt{a_2\tau}}{\lambda_2} \left\{ i\Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a_2\tau}}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} (-m)^n \left[i\Phi\left(\frac{2n\ell + z}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) + i\Phi\left(\frac{2n\ell - z}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) \right] \right\}; \quad m = \frac{\lambda_2/\sqrt{a_2} - \lambda_1/\sqrt{a_1}}{\lambda_2/\sqrt{a_2} + \lambda_1/\sqrt{a_1}}, \quad (3.6)$$

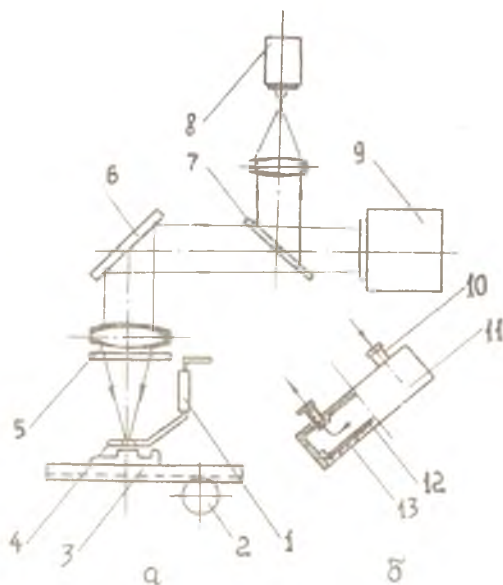
где $i\Phi(u)$ - дополнительная функция ошибок [17], τ - время протекания процесса воздействия, τ_0 - время импульса, q - плотность излучения, ℓ - толщина покрытия, z - осевая координата, a_1 , a_2 - температуропроводность наружного слоя и основного металла, λ_1 , λ_2 - теплопроводность наружного слоя и основного металла.

Уравнение (3.5) используется в расчетах процесса закалки; уравнение (3.6) - при лазерном легировании. Программа для ЭВМ СМ4, необходимая для проведения расчетов температур по соотношению (3.6), приводится в прил. 2.

Описание лабораторной установки

При проведении лабораторной работы используется импульсная установка ГОС-1001, имеющая энергию импульса $E = 1$ кДж, и лазерная установка "ЛАТУС-31" с непосредственным излучением мощностью $W = 1,5$ кВт. Исследования проводятся на образцах из инструментальных сталей. Для изучения вопроса упрочнения сталей лазерным легированием применяются образцы с покрытиями, нанесенными плазменным или детонационным способом. Лабораторные установки (рис.3.4) укомплектованы оптической системой для фокусировки излучения, устройствами перемещения заготовок, подводом защитного газа, измерителями мощности и энергии генерируемого излучения. Регулирование расхода защитного газа осуществляется расходомером. Процесс термоупрочнения проводится как в импульсном, так и непрерывном режимах

для увеличения производительности и создания равномерного распределения плотности излучения на широком участке упрочняемой поверхности детали. Лазерная установка "ЛАТУС-3I" снабжена специальным плоским оптическим элементом (фокусатором) (рис.3.4). Он фокуси-



Р и с. 3.4. Схема термоупрочнения детали лазерным излучением (а) и устройство плоского фокусирующего элемента (б): 1 - расходомер; 2 - устройство перемещения детали; 3 - обрабатываемая деталь; 4 - подвод защитного газа; 5 - формирующая линза и защитное стекло; 6 - поворотное зеркало; 7 - прозрачная пластина; 8 - измеритель мощности (энергии); 9 - технологический лазер; 10 - штуцер подвода воды для охлаждения; 11 - корпус; 12 - рельефная пластина; 13 - выступы оптического элемента

рует подающий поток лазерного излучения в отрезок прямой и представляет собой рельефную пластину, выполненную из меди методом гальванопластики.

домашнее задание

Рассчитать глубину упрочнения при лазерной обработке стали У8 на установке "ЛАС-ЛАСI". Определить распределение температуры на

поверхности образца и границе зоны закалки. Расчет проводить с помощью выражения (3.1).

Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкцию по эксплуатации при работе на лазерных установках "ЛАТУС-3I" и ГОС 100I. Освоить порядок включения и выключения установки, запуск и регулирование скорости перемещателя заготовки, а также измерение мощности лазерного излучения. При установке фокусатора угол между оптической осью резонатора и плоскостью рельефа составляет 45° . Лабораторная работа выполняется в следующем порядке.

1. С помощью затемненного экрана выявить характер распределения плотности излучения на поверхности обрабатываемой детали. На установке "ЛАТУС-3I" фокусировку лазерного излучения осуществлять плоским оптическим элементом, перераспределяющим световой поток в отрезок.

2. Определить величину основных параметров лазерного упрочнения и легирования поверхности (энергии импульса E , мощности излучения q , скорости движения светового пятна U , величины расстояния фокуса над поверхностью детали) при работе на установках "ГОС-100I" и "ЛАТУС-3I". Теоретические значения температур по глубине образца при лазерном упрочнении вычислить по формулам (3.1, 3.2) с помощью ЭВМ СМ-4 (прил. 2). Результаты расчета привести в форме таблицы.

3. Изучить микроструктуру зоны термического влияния при лазерном упрочнении и легировании поверхности стальных деталей. Выявить основные зоны термического влияния. Объяснить наличие зон отпуска при лазерном упрочнении и легировании поверхности предварительно закаленных деталей.

Указания к отчету

Отразить расчетную схему процессов лазерного упрочнения и легирования. Результаты экспериментов по отработке оптимальных режимов лазерной обработки представить в виде таблицы. Отразить анализ эффективности применения фокусаторов при лазерной термообработке. Привести значения расхода защитного газа.

Вопросы для самопроверки

1. Чем объяснить возникновение микроструктуры с высокой твердостью при лазерном упрочнении сталей?
2. Объяснить преимущества лазерной обработки перед другими видами упрочнения деталей.
3. Каков порядок расчета режимов лазерной обработки конструкционных материалов при их упрочнении?
4. Объяснить принцип упрочнения деталей методом лазерного легирования и механизм сцепления легированного слоя и основного материала.
5. Какие способы контроля за качеством деталей, упрочненных лазером, используются в производстве?

4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ^I

Улучшение эксплуатационных свойств деталей, прошедших лазерную обработку (термоупрочнение, сварка, резка и т.д.), во многом определяется возможностью перераспределять по поверхности заготовки с заданной интенсивностью, а также управлять этим перераспределением.

Распределение энергии в поперечном сечении пучков лазерного излучения, оказывающее наибольшее влияние на качество термообработки, определяется внутренним устройством лазера. Однако подвергать объекты энергетическому (тепловому, термохимическому) воздействию необходимо по зонам обработки самых разнообразных форм, а одним из основных требований технологии качественного изготовления деталей является создание в зоне обработки температурных полей конкретного профиля. Желательно, чтобы объект обработки располагался удобно по отношению к источнику излучения.

Для передачи излучения в зону обработки, регулирования его параметров и изменения плотности мощности в настоящее время применяются различные оптические системы, состоящие из отклоняющих и фокусирующих элементов. В качестве отклоняющих элементов, осуществляющих изменение направления луча, применяются металлические зеркала. Создание необходимой плотности мощности на поверхности деталей производится фокусирующими элементами - линзами, металлически-

^I Работа выполнена совместно с асп. С.И.Мурзиным.

ми объективами из сферических и параболических зеркал. Материалы для изготовления линз - щелочно-галогидные кристаллы *NaCl*, *KCl* и др. имеют высокий коэффициент пропускания на длине волны 10,6 мкм (CO_2 -лазеры), но обладают недостаточной лучевой стойкостью и гигроскопичны. Металлические объективы обладают высокой стойкостью, надежностью и долговечностью, обеспечивают достаточную для технологических целей концентрацию энергии излучения. Однако габариты такой системы доставки лазерного излучения чрезмерно велики из-за большого числа вспомогательных оптических элементов. Сферические и параболические зеркала сложны в изготовлении и представляют значительные искажения формы пятна фокусировки при увеличении угла падения излучения. Используя подобные фокусирующие элементы, невозможно достичь заданной формы светового пятна.

Широко применяемые в настоящее время системы, обеспечивающие получение светового контура на поверхности детали за счет двухкоординатного перемещения их элементов, имеют существенные недостатки. В частности, неравномерность тепловыделения по ширине лазерного следа из-за колебательного закона сканирования луча, высокая стоимость, низкая надежность из-за наличия механических частей, движущихся с большими скоростями. Сегментные и гибкие фокусирующие зеркала для формирования заданного распределения интенсивности излучения не нашли достаточного применения из-за сложности изготовления, очень высокой стоимости и низкой надежности. Таким образом, ни одна из применяемых оптических систем не может обеспечить одновременного сочетания таких свойств, как создание требуемого распределения интенсивности, концентрации всей энергии лазерного излучения в зоне воздействия заданной формы и высокой надежности.

Решить эти задачи невозможно, используя отражающие оптические элементы, осуществляющие одновременно отклонение и фокусировку излучения в заданную область на поверхность детали с целью проведения соответствующей термической обработки.

4.1. Расчет формы поверхности отражающих оптических элементов

Расчет оптических элементов, фокусирующих лазерное излучение в заданную геометрическую фигуру в пространстве с заданным распределением интенсивности, проводится в рамках положений геометрической оптики. Для вывода исходных уравнений служат геометрикооптические

кие законы отражения лучей, а также условие прохождения всех отраженных от фокусирующего элемента лучей через заданную фокальную область. В исходные уравнения вносятся информация о распределении интенсивности падающего и отраженного пучка. Уравнение, описывающее форму поверхности оптического элемента, имеет вид $z = z(U, V)$ и удовлетворяет следующему условию:

$$\Phi_2(U, V, z) - \Phi_1(U, V, z) = 0, \quad (4.1)$$

где $\Phi_1(U, V, z)$ - эйконал излучения, падающего на оптический элемент;

$\Phi_2(U, V, z)$ - эйконал отраженной волны.

В табл. 4.1 приводятся аналитические выражения для случаев преобразования излучения в точку, отрезок равномерной интенсивности, прямоугольник равномерной интенсивности. Здесь введены обозначения: $z(U, V)$ - высота рельефа в точке (U, V) оптического элемента; U, V - координаты точки отражающего элемента в системе координат с осью OU , направленной противоположно проекции падающего луча и имеющей начало в центре зеркала, расположенного в области $G: U^2 \cos^2 \theta + V^2 = R^2$; θ - угол между падающим лучом и нормалью к плоскости оптического элемента; R - радиус фокусируемого пучка; f - фокусное расстояние элемента; α - угол между фокальным отрезком и проекцией оси OU на фокальную плоскость; a, b - стороны фокального прямоугольника ($b \gg a$); L - длина фокального отрезка; z - параметр фокусирующего пучка гауссовского распределения плотности излучения, в котором интенсивность уменьшается в e раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка; $U_f; V_f$ - координаты проекции фокальной точки на плоскость оптического элемента; $\Phi(R/z)$ - значение интеграла вероятностей (функции Лапласа) для фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности излучения:

$$\Phi(R/z) = \frac{2}{\pi} \int_0^R \exp(-V^2/z^2) dV; \quad (4.2)$$

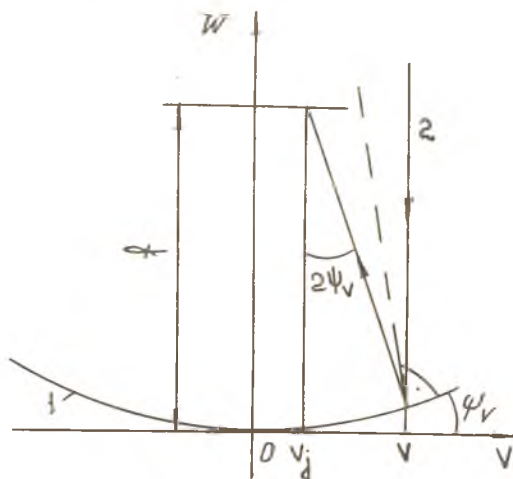
G_2 - часть области G элемента, проекция которой на ось $O\xi$ лежит левее точки ξ вдоль этой оси; $O\xi$ - ось, проходящая через проекцию начала координат плоскости OUV на фокальную плоскость и параллельная фокальному отрезку или стороне b фокально-

Аналитические выражения, описывающие рельеф поверхностей отражающих оптических элементов, предназначенных для фокусировки гауссовского потока излучения в различные геометрические пятна

Форма сфокусированного светового пятна	Аналитическое выражение	Допущения
Точка в фокальной плоскости	$Z(U, V) = \frac{1}{2 \cos \theta} \sqrt{f^2 - (V - V_f)^2} + (U - U_f)^2 \cos^2 \theta$	$\sin \psi \approx \psi$ $R \ll f$
Отрезок прямой линии равномерной интенсивности	$Z(U, V) = \left[\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{4f} - \frac{(U \cos \alpha \cos \theta + V \sin \alpha)^2}{\pi f [\Phi(R/z)]^2} \right] \times$ $\int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \exp(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}) \left[\frac{1}{\cos \theta} \right]$	$\tan \psi \approx \psi$
Прямоугольник с равномерным распределением интенсивности	$Z(U, V) = \left[\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{4f} - \frac{1}{\cos \theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \exp(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}) d\varphi d\theta \right]^2 \frac{f \pi}{U \theta_0 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \exp(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}) dV}$	Угол между проекцией стороны θ светового пятна и осью OZ равен 0; $\theta \gg \alpha$

го прямоугольника; M – координата U прямой на поверхности фокусатора, проекция которой на фокальную плоскость является отрезком $\xi = \text{const}$; N – координата V прямой на поверхности фокусатора, проекцией которой на фокальную плоскость является отрезок, параллельный оси $O\xi$.

Проведем вывод аналитического выражения, описывающего форму поверхности отражающего оптического элемента, преобразующего излучение в точку в фокальной плоскости с координатами ее проекции на плоскость оптического элемента ($U_j; V_j$). На рис. 4.1 пред-



Р и с. 4.1. Схема направления распространения луча, отражающегося от оптического элемента, и положения фокальной плоскости в системе координат WOV при преобразовании излучения в точку: 1 – сечение зеркальной поверхности $Z(U, V)$ плоскостью WOV ; 2 – проекция хода луча на плоскость WOV

ставлены ход луча, отразившегося от оптического элемента, и положение фокальной плоскости в системе координат WOV . Для искомой поверхности

$$\sin 2\psi_V = \frac{(V - V_j)}{\sqrt{f^2 + (V - V_j)^2}}, \quad (4.3)$$

$$z(U) = \int \frac{(U - U_j) \cos \theta dU}{2\sqrt{f^2 + (U - U_j)^2 \cos^2 \theta}} = \int \frac{(U - U_j) dU}{2\sqrt{\left(\frac{f}{\cos \theta}\right)^2 + (U - U_j)^2}} \quad (4.8)$$

Интегрируя выражение (4.8), получаем аналитическую зависимость, удовлетворяющую условиям (4.6) и (4.8):

$$z(U, V) = \frac{1}{2 \cos \theta} \sqrt{f^2 + (V - V_j)^2 + (U - U_j)^2 \cos^2 \theta} \quad (4.9)$$

Выражение, описывающее форму поверхности отражающего оптического элемента, фокусирующего излучение в световое пятно в виде отрезка прямой линии равномерной интенсивности, получено следующим образом. Предположим, угол между световым отрезком оси OU на фокальную плоскость $\alpha = 0$. На рис. 4.3 и 4.4 показаны ход лучей и положения фокуса в системах координат WOU и ZOU . Поверхность оптического элемента должна удовлетворять условиям:

$$\operatorname{tg} 2\psi_V = \frac{V}{f}; \quad (4.10)$$

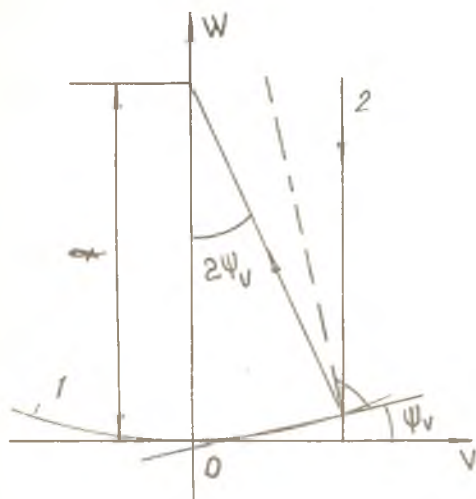
$$\operatorname{tg} 2\psi_U = \frac{U \cos \theta - f}{f} \quad (4.11)$$

Для пучка излучения с гауссовским распределением интенсивности (рис. 4.5) величина ξ равна

$$\xi = \frac{\int_0^R \int_0^R \exp\left(-\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dU dV}{2 \int_0^R \int_0^R \exp\left(-\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dU dV} \quad (4.12)$$

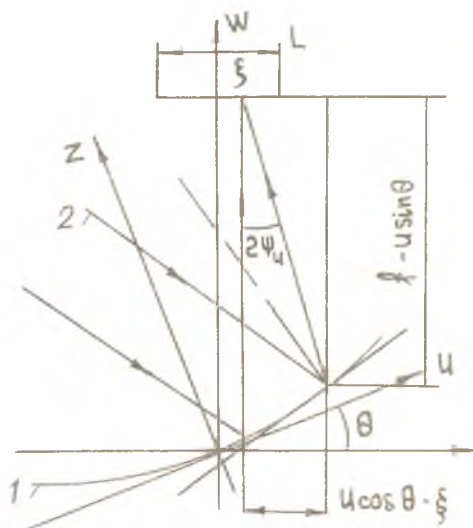
Здесь

$$\int_0^R \int_0^R \exp\left(-\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dU dV = 2 \int_0^{R/\cos \theta} \exp\left(-\frac{U^2 \cos^2 \theta}{z^2}\right) \times \\ \times dU \int_0^R \exp\left(-\frac{V^2}{z^2}\right) dV = \frac{2}{\cos \theta} \frac{\pi}{4} [\Phi(R/z)]^2, \quad (4.13)$$

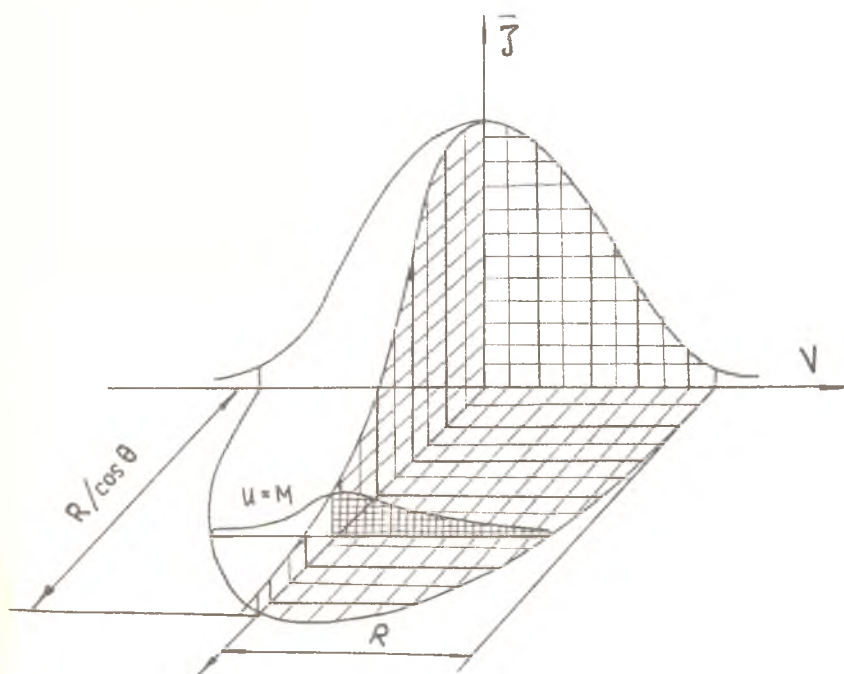


Р и с. 4.3. Схема положения фокальной плоскости и проекции луча, отражающегося от прямой $V = \text{const}$, на плоскость $W O V$ при фокусировке пучка в световое пятно - отрезок: 1 - сечение поверхности $z(u, V)$ плоскостью $W O V$; 2 - проекция направления распространения излучения

Р и с. 4.4. Схема проекции направления распространения излучения на ось $Z O U$ при фокусировке излучения в отрезок или прямоугольник равномерной интенсивности: 1 - сечение отражающей поверхности плоскостью $Z O U$; 2 - проекция падающего и отраженного луча



$$\begin{aligned}
 & \int \int_{\Omega} \exp\left(-\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dU dV = \\
 & = 2 \int_0^M dU \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2 \cos^2 \theta}} \exp\left(-\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dV = \\
 & = \frac{2}{\cos \theta} \int_0^{M \cos \theta} dU \int \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV.
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$



Р и с. 4.5. Распределение интенсивности в области Ω плоскости оптического элемента, установленного под углом θ к метке излучения гауссовского распределения плотности энергии

После преобразований этих выражений, аналогично (4.4-4.8), получаем:

$$z(V) = \int \frac{V dV}{2f} \frac{1}{\cos \theta}, \quad (4.15)$$

$$z(U) = \int \frac{U \cos \theta - \xi}{2f} dU. \quad (4.16)$$

Решая совместно (4.15) и (4.16) с учетом (4.12-4.14), будем иметь:

$$z(V, U) = \left[\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{4f} - \frac{U \cos \theta L_0 \int_0^{M \cos \theta} \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\pi f [\Phi(R/z)]^2} \right] \frac{1}{\cos \theta}. \quad (4.17)$$

Если возникает необходимость ориентировать световое пятно под каким-либо углом $\alpha \neq 0$ к проекции оси OU , то высота рельефа оптического элемента вычислится:

$$z(V) = \int \frac{V - \xi \sin \alpha}{2f} dV \frac{1}{\cos \theta}; \quad (4.18)$$

$$z(U) = \int \frac{U \cos \theta - \xi \cos \alpha}{2f} dU. \quad (4.19)$$

Здесь $2\xi = \left[\frac{2L_0 \iint_{G_2} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\pi f [\Phi(R/z)]^2} \right], \quad (4.20)$

где G_2 - область, ограниченная прямыми.

$$V \cos \alpha - U \cos \theta \sin \alpha = 0; \quad V \cos \alpha - U \cos \theta \sin \alpha = M \cos \theta$$

и окружностью $U^2 + V^2 = R^2$.

Аналитическое выражение, полученное при решении (4.18) и (4.19) с учетом условия (4.20), имеет вид

$$Z(U, V) = \left[\frac{U^2 \cos^2 \theta + V^2}{4f} - \frac{(U \cos \alpha \cos \theta + V \sin \alpha)}{2\pi f [\Phi(R/z)]^2} \right] \times (4.21) \\ \times \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) \frac{1}{\cos \theta} \cdot$$

Для создания заданных температурных условий обработки образцов требуется, чтобы интенсивность вдоль светового отрезка изменялась по зависимости $J(\xi) = J_0 f(\xi)$. В этом случае при синтезе оптических элементов величина ξ вычисляется из соотношения

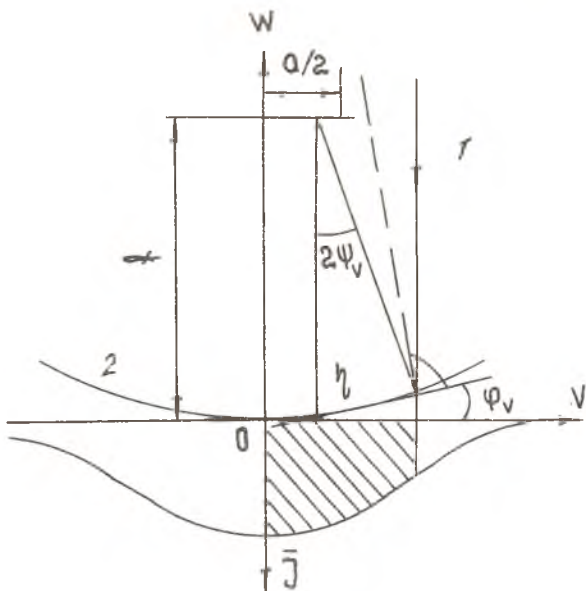
$$\frac{2 \int_0^{\xi} \int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right)}{\pi f [\Phi(R/z)]^2} = \frac{\int_0^{\xi} f(\xi) d\xi}{\int_0^{L/2} f(\xi) d\xi} \quad (4.22)$$

Получим выражение, описывающее форму поверхности отражающего оптического элемента, фокусирующего излучение в световое пятно в виде прямоугольника с равномерным распределением интенсивности со сторонами $b \gg a$, причем угол между проекцией стороны b светового пятна на оптический элемент и осью θ равен 0. На рис. 4.6 показаны ход лучей, положение фокальной плоскости в системе координат WOV , распределение интенсивности излучения \bar{J} вдоль прямой $U=M$ на поверхности оптического элемента:

$$\operatorname{tg} 2\psi_V = \frac{V-z}{f}, \quad (4.23)$$

где

$$2\eta = \frac{a \int_0^N \exp\left(-\frac{M^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dV}{\int_0^{\sqrt{R^2 - M^2 \cos^2 \theta}} \exp\left(-\frac{M^2 \cos^2 \theta + V^2}{z^2}\right) dV}$$



Р и с. 4.6. Схема проекции падающего и отраженного от оптического элемента луча в системе координат $W O V$ и распределение интенсивности излучения \bar{J} вдоль прямой $U=M$ на поверхности оптического элемента $Z(U, V)$: 1 - сечение поверхности луча; 2 - проекция направления распространения луча

Как видно из рис. 4.6

$$\operatorname{tg} \psi_v = \frac{U \cos \theta - f}{f}, \quad (4.24)$$

где

$$2\xi = \frac{8 \int_0^{M \cos \theta} dU \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\frac{\pi}{4} [\Phi(R/z)]^2}. \quad (4.25)$$

Решая совместно (4.23-4.25), получаем аналитическую зависимость

$$Z(U, V) = \left[\frac{U^2 \cos^2 \theta + V}{4f} - \frac{U \cos \theta \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\pi f [\Phi(R/z)]^2} - \frac{\alpha \Phi(N/z)}{2f \Phi\left(\frac{\sqrt{VR^2 - M^2 \cos^2 \theta}}{z}\right)} \right] \frac{1}{\cos \theta} \quad (4.26)$$

В ряде технологических операций для создания необходимых условий обработки деталей целесообразно применять оптические элементы, формирующие световое пятно наложением двух или нескольких световых волн. Например, для увеличения интенсивности излучения в центре фокального прямоугольника, оптический элемент целесообразно изготовить по аналитическим зависимостям:

$$Z(U, V) = 1,41 \left[\frac{U^2 + 2V}{4f} - \frac{0,71M \int_0^{\sqrt{(KR)^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\pi f [\Phi((KR)/z)]^2} - \frac{\alpha \Phi(N/z)}{2f \Phi\left(\frac{\sqrt{(KR)^2 - M^2/2}}{z}\right)} \right] \quad (4.27)$$

при $0 < U^2/2 + V^2 < (KR)^2$,

$$Z(U, V) = 0,71 \sqrt{f^2 + V^2 + U^2/2} - 0,71 \pm 0,71 n \lambda \quad (4.28)$$

Здесь обозначено: k - коэффициент пропорциональности; $n = 0, 1, 2$ - целое число.

При фокусировке излучения оптическим элементом, выполненным по зависимостям (4.27) и (4.28), центральная область зеркальной поверхности преобразует излучение в прямоугольник равномерной интенсивности, а периферийная область - в точку, находящуюся в центре светового пятна. Коэффициент K определяет размеры этих областей, а следовательно и часть энергии, фокусируемой соответственно в прямоугольник и точку.

Выражение (4.27) получено из зависимости (2.26) при $\theta = 45^\circ$ путем замены R на κR . Аналитическая зависимость (4.28) получена следующим образом. Из (2.8) при $V_j = 0, U_j = 0, \theta = 45^\circ$ получаем

$$Z(U, V) = 0,71 \sqrt{f^2 + V^2 + U^2/2}. \quad (4.29)$$

Максимум интенсивности лазерной энергии при суперпозиции двух волн достигается при выбранной величине разности фаз между ними $2\pi n$ (n - целое число). Рельеф зон рассчитывается с учетом соблюдения условия - разность хода волн должна быть равной $\Delta = \lambda n$, т.е. при $\theta = 45^\circ$:

$$Z(0, 0) = \pm 0,71 n \lambda. \quad (4.30)$$

Решая совместно (4.29) и (4.30), получаем аналитическую зависимость (4.28), описывающую рельеф области, преобразующей излучение в точку в фокальной плоскости.

При синтезе оптического элемента его отражающую поверхность возможно разделить на зоны, геометрические параметры которых равны параметрам области фокусировки. Для повышения стойкости зеркала центральные зоны выполняются плоскими, как в случае растровой оптики. Этим достигается снижение поглощения в области наибольшей интенсивности лазерного излучения. Периферийные зоны возможно выполнить таким образом, чтобы излучение фокусировалось в точки на плоскости, перпендикулярной оси отраженного пучка на расстоянии $f/2$ от оптического элемента. Световое пятно образуется при наложении нескольких волн, отразившихся от разных зон элемента. Например, оптический элемент, преобразующий излучение в прямоугольник равномерной интенсивности со сторонами $a \times b$, целесообразно выполнить состоящим из областей размерами $(a/\cos\theta) \times b$, ограниченных прямыми $U = ia/\cos\theta, V = jb$, где $i = \dots, -1, 0, 1, \dots; j = \dots, -1, 0, 1, \dots$. Форма плоских областей, принадлежащих площади эллипса $U^2 + V^2 = 2f^2$ описывается выражением

$$Z(U, V) = U \frac{a(i - i_0)}{2f \cos\theta} + V \frac{b(j - j_0)}{2f}, \quad (4.31)$$

где σ - параметр гауссовского распределения интенсивности падающего на элемент излучения, в котором интенсивность на расстоянии z от центра пропорциональна $\exp(-z^2/2\sigma^2)$, i_0, j_0 - индексы области, находящейся под углом θ к падающему лучу.

Рельеф поверхности периферийных зон описывается выражением

$$z(U, V) = \left\{ \sqrt{f^2/4 + \left[(U - \bar{U}_i) - \frac{\tilde{U} + \bar{U}_i}{2} \right]^2 \cos^2 \theta + \left[(V - \bar{V}_j) - \frac{\tilde{V} - \bar{V}_j}{2} \right]^2} \right\} \times \frac{1}{2 \cos \theta} \quad (4.32)$$

Здесь обозначено: \tilde{U}, \tilde{V} - координаты центра светового пятна, \bar{U}_i, \bar{V}_j - координаты центра области знака i, j .

Аналитическая зависимость (2.32) получена из выражения (2.9) при соблюдении следующего условия:

излучение на плоскости параллельной фокальной и находящейся на расстоянии $f_i = f/2$ от оптического элемента фокусируется в набор точек с координатами

$$\left(\frac{\tilde{U} + \bar{U}_i}{2}; \frac{\tilde{V} + \bar{V}_j}{2} \right).$$

Термообработку детали, перемещающейся в системе координат $X-Y$, целесообразно проводить импульсным излучением, так как нет необходимости устранения периферийных участков светового пятна. Поскольку распределение плотности энергии равномерно, лазерное воздействие возможно осуществить без перекрытия зон однократного воздействия. Коэффициент использования импульсов $K_{\text{л}}$, определяемый отношением действительной площади, облученной импульсами, к максимальной теоретической площади обработки тем же числом импульсов, равен $K_{\text{л}} = 1$.

Применение схемы нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом, параллельно траектории движения) или вращающийся отрезок, позволяет расширить технологические возможности лазерной поверхностной обработки. Неоднородное распределение интенсивности излучения по длине отрезка с ее максимумом в центре приводит к снижению уровня пластических деформаций заготовки и, следовательно, к уменьшению ее коробления в процессе обработки. В этом случае при выборе

конструкции оптической системы целесообразно осуществить вращение отражающего элемента, форма рабочей поверхности которого определяется формулой

$$z(U, V) = \frac{U^2 + 2V}{5,65f} - \frac{2UL_0 \int_0^{0,7M} \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\pi f [\Phi(R/z)]^2}, \quad (4.33)$$

где L_0 - первоначальная длина фокального отрезка.

Аналитическая зависимость (4.33) получена из выражения (4.17) при $\theta = 45^\circ$. При повороте на угол φ оптического элемента, отражающая поверхность которого выполнена по формуле (4.33), происходит поворот светового пятна в фокальной плоскости на угол φ_f :

$$\varphi_f = \alpha z \operatorname{ctg}(\sqrt{2} \operatorname{tg} \varphi),$$

происходит увеличение средней величины плотности энергии, распределенной в световой отрезок в фокальной плоскости, и уменьшение его длины.

Уменьшение длины светового отрезка и увеличение средней величины плотности энергии в фокальном пятне при повороте фокусатора происходят за счет изменения области H распределения излучения по поверхности оптического элемента. Так, при $\varphi = 0$ область H находится внутри эллипса $U^2/2 + V^2 = R^2$, а при повороте фокусатора на угол $\varphi = 90^\circ$ границей области H является кривая $U^2 + V^2/2 = R^2$. Теоретические исследования изменения длины фокального отрезка, перераспределения интенсивности при вращении отражающего оптического элемента, выполненного по аналитической зависимости (4.33), приведены в разд. 4.3.

Для увеличения номенклатуры обрабатываемых деталей целесообразно иметь возможность изменять плотность равномерно распределенной в отрезок мощности и его размеры. Это осуществляется поворотом оптического элемента, рабочая поверхность которого изготовлена по аналитической зависимости

$$z(U, V) = \frac{1}{5,65f} [(V \sin \varphi + U \cos \varphi - 2R)^2 + 2(V \cos \varphi - U \sin \varphi)^2 - 1,41 \xi(\varphi)(V \sin \varphi + U \cos \varphi - 2R)]. \quad (4.34)$$

$$\xi(\varphi) = \frac{\Delta(\varphi) \int_{G_i} \int \frac{(V \sin \varphi + U \cos \varphi - 2R) + (V \cos \varphi - U \sin \varphi)^2}{z^2} dV dU}{\pi [\Phi(R/z)]^2} \quad (4.35)$$

φ - угол между проекцией фокусируемого луча на оптический элемент и осью OU ; $\Delta(\varphi)$ - требуемая длина отрезка в зависимости от угла поворота φ , G_i - область, ограниченная прямыми $V \sin \varphi + U \cos \varphi - 2R = 0$, $V \sin \varphi + U \cos \varphi - 2R = M \cos \theta$ и окружностью $(U \cos \varphi - U \sin \varphi)^2 + (V \sin \varphi + U \cos \varphi - 2R)^2 = R^2$.

Выражения (4.34) и (4.35) получены из формул (4.12-4.17) при условиях: $\theta = 45^\circ$, радиус-вектор центра фокусируемого пучка на оптический элемент равен $2R$. При повороте оптического элемента (4.34) вокруг нормали к его центру размер Δ светового пятна изменяется непрерывно в зависимости от угла поворота φ . Для фокусировки излучения по второй координате необходимо использовать цилиндрическую линзу. Исключить эту необходимость возможно, если при синтезе оптического элемента разделить его на зоны, размером не меньше области падающего на него излучения и центром, лежащим на окружности $U^2 + V^2 = (2R)^2$. Расчет каждой зоны проводится по выражению (4.34) с фиксированным параметром φ , равным углу между осью OU и центром этой зоны. В этом случае целесообразно проводить не вращение зеркала, а его поворот на угол φ . Длина Δ светового отрезка изменяется дискретно.

При создании динамических оптических элементов отражающую рельефную поверхность возможно наносить на поверхность более сложной формы. Например, нанесение рельефа по аналитической зависимости (4.36) на поверхность формы (4.37) позволяет осуществить движение светового пятна по прямой в фокальной плоскости с постоянной скоростью v при вращении оптического элемента с постоянной угловой скоростью ω :

$$z(\rho, \varphi) = \sqrt{(\rho^2 + \rho'^2)/2}, \quad (4.36)$$

$$z(\rho, \varphi) = \frac{b}{2\pi} \int \operatorname{tg} \left\{ \frac{a z \operatorname{ctg} [\varphi b / (2\pi \rho)]}{2} \right\} d\varphi. \quad (4.37)$$

Отражающий элемент такого типа может быть использован для осуществления гибки листовых заготовок с предварительным нанесением углублений на поверхность детали.

Выражение (4.36) получено с учетом (4.9) при $U_j = 0, V_j = 0, \theta = 45^\circ$; ось $O\rho$ совпадает с положительным направлением OV . Если на оптический элемент (2.37) спроектировать поток лазерного излучения, имеющий координаты центра $\bar{U} = 0, \bar{V} = (3+4)R$, то возможно осуществить фокусировку в область размером $a_{max} = 0,293R$. Определение a_{max} приведено в разд. 4.3. Световое пятно, в которое фокусируется излучение, остается неподвижным при вращении оптического элемента вокруг нормали, проходящей через его центр, так как выражение (4.37) не зависит от координаты φ .

Для осуществления равномерного движения светового пятна в фокальной плоскости при вращении оптического элемента с постоянной скоростью ω угол наклона зеркальной поверхности в точке падения луча должен изменяться по зависимости

$$\beta = \frac{1}{2} a z \operatorname{ctg} \frac{\varphi \delta}{2\pi f}, \quad (4.38)$$

так как

$$v = \frac{\delta}{\pi} \omega, \quad (4.39)$$

где δ - максимальное перемещение светового пятна в фокальной плоскости. При $\varphi = 0$ $\beta = 0$. Таким образом, производная от функции $z(\varphi)$ должна удовлетворять условиям:

$$z'(\varphi) = \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} a z \operatorname{ctg} \frac{\varphi \delta}{2\pi f} \right], \quad (4.40)$$

$$z'(\varphi) \Big|_{\varphi=0} = 0. \quad (4.41)$$

Интегрируя выражение (4.40) по φ , получаем

$$z(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int \operatorname{tg} \left\{ \frac{a z \operatorname{ctg} [\varphi \delta / (2\pi f)]}{2} \right\} d\varphi + D, \quad (4.42)$$

где D - постоянная интегрирования, принимается равной $D = 0$. Учитывая $z(\rho, \varphi) = \delta z(\varphi)$, получим аналитическую зависимость (4.37).

Осуществить движение светового пятна в фокальной плоскости возможно сканированием оптического элемента. Поворот отражающего элемента целесообразно проводить вокруг оси $O\xi'$, проходящей через проекцию светового пятна на зеркальную поверхность. В этом случае изменение перераспределения энергии в световом пятне минимальное. Аналитическое выражение формы поверхности фокусирующего элемента, полученное из формулы (4.21) для случая расходящегося пучка равномерного распределения интенсивности, которым можно аппроксимировать распределение энергии при многомодовом режиме генерации, при $\theta = 45^\circ$ имеет вид

$$z(U, V) = [0,25U^2 + 0,5V^2 - (0,71U \cos \alpha + V \sin \alpha) \times \frac{L}{\pi R^2} \iint_{\sigma_i} d\xi d\eta] \frac{0,71}{F} \quad (4.43)$$

Здесь F - расстояние от оптического элемента до фокальной плоскости,

$$F = \frac{f(a + R' \operatorname{ctg} \tilde{\theta}/2)}{a + R' \operatorname{ctg} \tilde{\theta}/2 + f} \quad (4.44)$$

a - расстояние от выходного зеркала резонатора до фокусирующего элемента; $\tilde{\theta}$ - угол расходимости лазерного излучения; R' - радиус луча на выходе из резонатора лазерной установки.

Выражение (4.44) для расстояния F получено из формулы тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{\ell} \quad (4.45)$$

В данном случае величина ℓ равна:

$$\ell = a + R' \operatorname{ctg} \tilde{\theta} \quad (4.46)$$

При повороте оптического элемента вокруг оси $O\xi'$ не происходит перераспределения энергии в световом отрезке, не изменяется его длина. Так как прямой с координатами $\xi' = M = \text{const}$ на поверхности фокусирующего элемента соответствует точка на фокальном отрезке и изменяется только распределение интенсивности вдоль этой прямой, а суммарная энергия излучения вдоль прямой $M = \text{const}$ остается постоян-

ной, то интенсивность в каждой точке отрезка не изменяется. Это справедливо при небольших углах поворота отражающего элемента.

4.2. Область применения фокусаторов в технологических операциях

Определенные решением уравнения (4.1) оптические поверхности, аналитические выражения для которых приведены в разд. 4.1, обычно оказываются такой формы, которую очень сложно или невозможно выполнить современными техническими средствами. В приближении подобную поверхность возможно получить при помощи кусочно-гладкого зеркала (профилированной зонной пластины) $z=z(u, v)$, которая удовлетворяет уравнению

$$\Phi_2(u, v, z) - \Phi_1(u, v, z) = \lambda c(u, v), \quad (4.47)$$

где λ - длина волны падающего излучения; $c(u, v)$ - произвольная кусочно-постоянная целочисленная функция.

Профилированная зонная пластина (фокусатор) обеспечивает изменение фазы излучения от 0 до 2π . Поскольку оптическое излучение является электромагнитным колебанием с периодом 2π , то в приближении $R \ll f$ фокусатор будет работать как соответствующая гладкая поверхность. В этом случае справедливы формулы, приведенные в разд. 4.1.

Фокусаторы, обеспечивающие поворот пучка лазерного излучения, его пространственную фазовую модуляцию и перераспределение его энергии в различные геометрические фигуры с заданным распределением интенсивности, представляют собой профилированные отражающие или пропускающие излучение пластины с микрорельефной структурой рабочей поверхности. Микрорельеф поверхности, определяемый в зависимости от заданной формы зоны обработки, распределения в ней интенсивности излучения, синтезируется с учетом его длины волны λ . Поперечное сечение каждого выступа микрорельефа имеет форму зубчика с одной вертикальной стороной. Другая сторона выступа выполняется плавно изменяющейся по высоте h от основания к вершине. Относительное положение выступов над плоскостью пластины толщиной 3-4 мм рассчитывается на электронно-вычислительной машине и имеет сложную конфигурацию. В технологических операциях

могут применяться плоские оптические элементы, выполненные в виде пластин двух типов - отражающих или пропускающих лазерное излучение. Наиболее перспективно применение в технологических операциях отражательной оптики, имеющей повышенную стойкость и надежность, большой ресурс эксплуатации. Отражающие пластины изготовлены либо цельнометаллическими, либо с нанесением на поверхность микрорельефа отражающего покрытия. Высота h в этом случае изменяется в диапазоне значений от 0 до $\lambda/2 \cos \theta$. Для отражающих фокусаторов используют материалы с высоким коэффициентом отражения. Так, в ИК-диапазоне применяются фокусаторы, выполненные из меди. Их процесс изготовления включает следующие этапы: построение математической модели, получение аналитических зависимостей и расчет на ЭВМ оптического элемента по назначению, получение амплитудной маски, изготовление реплики фокусатора (обратной матрицы), напыление металлического слоя с последующим электролитическим наращиванием Гальваноконии оптического элемента.

4.3. Изменение длины фокального отрезка и перераспределение интенсивности излучения и изменения фокального отрезка при вращении фокусатора

На первом этапе определения изменения длины фокального отрезка при вращении отражающего фокусатора, изготовленного по аналитической зависимости (4.17), необходимо найти координату ξ точки на отрезке, являющейся проекцией прямой $U=M$ на поверхности оптического элемента. Согласно (4.12-4.14)

$$2\xi = \frac{4L \int_0^{M \cos \theta} \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{2z}\right) dV dU}{\pi [\Phi(R/z)]^2} \quad (4.48)$$

Определим $M_{\max}(\varphi)$ - максимальное значение координаты ξ падающего на элемент пучка в зависимости от угла поворота φ оптического элемента. Границей области H распределения лазерного излучения по поверхности фокусатора при $\varphi = 0$ является эллипс:

$$U^2/2 + V^2 = R^2. \quad (4.49)$$

при повороте эллипса (4.49) на угол φ относительно начала координат его уравнение в подвижной системе координат имеет вид

$$\bar{U}^2/2 + \bar{V}^2 = R^2. \quad (4.50)$$

Здесь $\bar{U} = U \cos \varphi + V \sin \varphi$,

$$\bar{V} = V \cos \varphi - U \sin \varphi. \quad (4.51)$$

Выражения (4.50) и (4.51) можно представить в виде:

$$\frac{(U \cos \varphi + V \sin \varphi)^2}{2} + (V \cos \varphi - U \sin \varphi)^2 = R^2,$$

$$U^2 \left(\frac{1}{2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right) - UV \cos \varphi \sin \varphi + V^2 \left(\cos^2 \varphi + \frac{1}{2} \sin^2 \varphi \right) = R^2, \quad (4.52)$$

$$\left[U^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} - UV \cos \varphi \sin \varphi + \right.$$

$$\left. + V^2 \left(\frac{\cos \varphi \sin \varphi}{2 \sqrt{\frac{1}{2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}} \right)^2 \right] + V^2 \left[\cos^2 \varphi + \frac{1}{2} \sin^2 \varphi - \right.$$

$$\left. - \frac{\cos^2 \varphi \sin^2 \varphi}{4 \left(\frac{1}{2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right)} \right] = R^2,$$

$$\left(U \sqrt{\frac{1}{2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} - V \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{\sqrt{2(1 + \sin^2 \varphi)}} \right)^2 +$$

$$+ V^2 \frac{1}{1 + \sin^2 \varphi} = R^2.$$

пусть:

$$A = \frac{1}{1 + \sin^2 \varphi}, \quad (4.53)$$

$$B = \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{\sqrt{2(1 + \sin^2 \varphi)}}, \quad (4.54)$$

$$C = \sqrt{\frac{1}{2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}, \quad (4.55)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{1 + \sin^2 \varphi}, \quad (4.56)$$

Из аналитического выражения (4.52) с учетом условий (4.53–4.56) выразим U :

$$U = \frac{\sqrt{R^2 - AV^2} + BV}{C}. \quad (4.57)$$

Определим значение координаты U при $\varphi = \text{const}$, $\frac{dU}{dV} = 0$, $U > 0$, $U = M_{\max} |\varphi|$ (максимум функции), исследовав функцию (4.57) на экстремум:

$$\frac{dU}{dV} = \frac{1}{C} \left(-\frac{1}{\sqrt{R^2 - AV^2}} - 2AV + B \right) = \frac{B}{C} - \frac{2AV}{C\sqrt{R^2 - AV^2}}. \quad (4.58)$$

Область допустимых значений функции:

$$R^2 - AV < 0,$$

$$V^2 < \frac{R^2}{A}, \quad \text{т.е.} \quad V \in \left] -\frac{R}{\sqrt{A}}; \frac{R}{\sqrt{A}} \right[\Rightarrow U \in \left] -\frac{BR}{C\sqrt{A}}; \frac{BR}{C\sqrt{A}} \right[;$$

$$\frac{dU}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{B}{C} - \frac{2AV}{C\sqrt{R^2 - AV^2}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{B\sqrt{R^2 - AV^2} - 2AV}{C\sqrt{R^2 - AV^2}} = 0 \Rightarrow \begin{cases} B\sqrt{R^2 - AV^2} - 2AV = 0 \\ C\sqrt{R^2 - AV^2} \neq 0 \end{cases} \quad (4.59)$$

В области допустимых значений функции (4.58) $C \neq 0$, $R \neq AV^2$. Решая (4.59) относительно V , получаем

$$V^2 = \frac{B^2 R^2}{4A^2 + AB^2} \Rightarrow V_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{B^2 R^2}{A(B^2 + 4A)}}.$$

Пусть $U(V_1) < U(V_2)$, следовательно,

$$U(V_2) = \sqrt{R^2 \frac{B^2 R^2}{B^2 + 4A}} + \frac{B^2 R}{\sqrt{A(B^2 + 4A)}}. \quad (4.60)$$

Проведя арифметические преобразования (4.60), получим значение максимума функции (4.57) $M_{max}(\varphi)$:

$$U(V_2) = M_{max}(\varphi) = \frac{2R \sqrt{\frac{A}{B^2 + 4A}} + \frac{B^2 R}{\sqrt{A(B^2 + 4A)}}}{C}. \quad (4.61)$$

Длина отрезка в фокусе оптического элемента, определяемая в рамках положений геометрической оптики без учета изменения области, равна:

$$L = L_{\Sigma} = \Delta f \operatorname{tg} \psi_{0max} = L_0 + 2\Delta + \Delta f \operatorname{tg} \psi_{0max}, \quad (4.62)$$

где L_{Σ} - проекция области G оптического элемента на плоскость $W=f$; Δf - изменение фокального расстояния при повороте фокусатора; ψ_{0max} - угол между лучами, отразившимися от точек фокусатора с координатами $(0;0)$ и $(\sqrt{2}R)$; L_0 - длина фокального отрезка при $\varphi = 0$; Δ - половина увеличения длины фокального отрезка за счет изменения угла наклона прямой $V = const$ к фокальной плоскости.

На рис. 4.7 показано определение длины фокального отрезка при $\varphi = 90^\circ$:

$$\Delta = R \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \cos \beta \right). \quad (4.63)$$

Здесь β - угол между прямой $V = const$ и фокальной плоскостью:

$$\beta = \operatorname{arcsin} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \varphi \right). \quad (4.64)$$

Угол ψ_{Vmax} определится:

$$\psi_{Vmax} = \arctg \left(\frac{R-L/2}{f} \right). \quad (4.65)$$

Определим значение величины изменения фокуса Δf при вращении фокусатора, изготовленного по зависимости (4.33). При повороте фокусатора на угол φ происходит увеличение ширины светового отрезка в плоскости $W=f$. В рамках геометрических представлений при $\varphi = 90^\circ$ половина ширины отрезка (см.рис.4.8) будет равна:

$$\Delta a_{max} = \Delta a_1 \pm \Delta a_2 = R - \frac{R}{\sqrt{2}} \pm \frac{R}{\sqrt{2}} \operatorname{tg} \psi_{Vmax}, \quad (4.66)$$

где ψ_{Vmax} - угол между лучами, отразившимися от точек фокусатора $(0;0)$ и $(0; R)$.

Так как при синтезе оптического элемента используют допущение $f \gg R$, т.е. $\operatorname{tg} \psi_V \rightarrow 0$, то $\Delta a_1 \gg \Delta a_2$, поэтому

$$a_{\Delta max} = R \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 0,293R.$$

При значениях $\varphi \in]0; 90[$

$$\Delta a = R(1 - \cos \alpha). \quad (4.67)$$

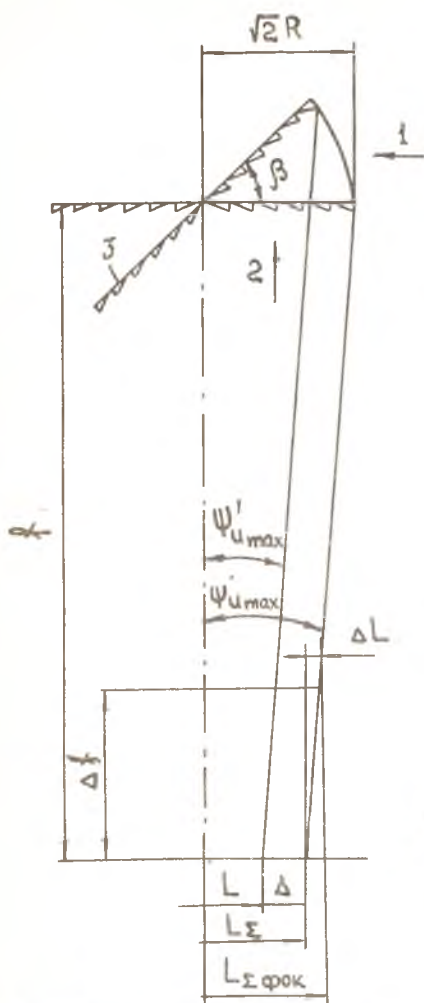
Здесь α - угол наклона прямой $U=M$ к плоскости $W=f$:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \varphi \right), \quad (4.68)$$

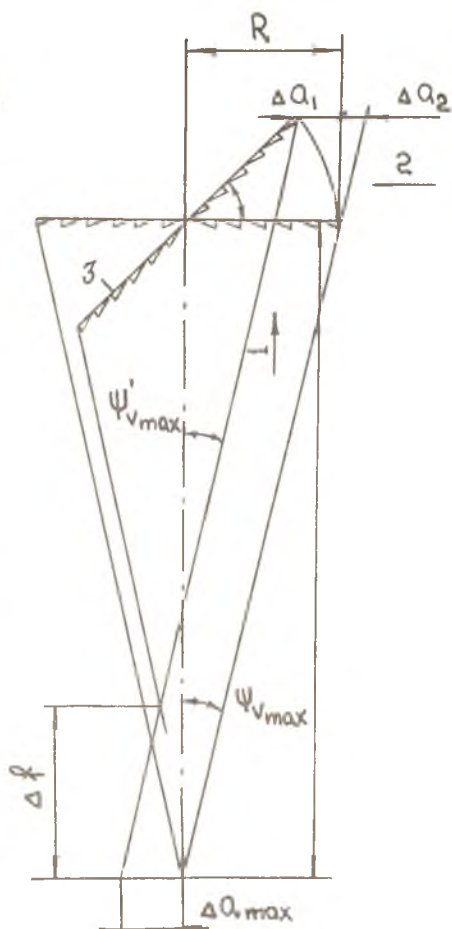
$$\Delta f = \Delta a \operatorname{ctg} \psi_{Vmax} = \Delta a \frac{f}{R}. \quad (4.69)$$

Подставив в выражение (4.69) значения Δa и α из (4.67) и (4.68), получим аналитическую зависимость для определения изменения фокусного расстояния Δf при повороте фокусатора (4.33) на угол φ :

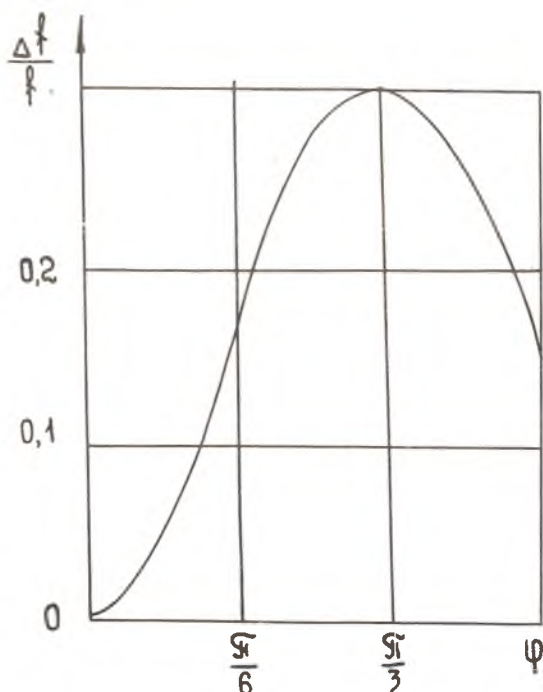
$$\Delta f = f \left\{ 1 - \cos [\arcsin (0,71 \sin \varphi)] \right\}. \quad (4.70)$$



Р и с. 4.7. Схема определения длины фокального отрезка: 1; 2 - направление падающих на оптический элемент лучей соответственно при $\varphi = 0$; $\varphi = 90^\circ$; 3 - сечение фокусатора плоскостью $V = \text{const}$



Р и с. 4.8. Схема определения величины изменения фокального расстояния Δf : 1, 2 - направление падающего на элемент пучка излучения соответственно при $\varphi = 0$; $\varphi = 90^\circ$; 3 - сечение фокусатора плоскостью $U = M = \text{const}$



Р и с. 4.9. График зависимости относительного изменения фокального расстояния $\Delta f/f$ от угла поворота оптического элемента

На рис. 4.9 представлен график изменения положения фокуса в зависимости от угла поворота φ фокусатора (4.33). Длину фокального отрезка определим по аналитической зависимости (4.48), проводя подстановку значений M из (4.61), L из (4.62) с учетом (4.63–4.70):

$$L(\varphi) = \frac{0,71 M_{\max}(\varphi) \sqrt{R^2 - U^2}}{\pi [\Phi(R/z)]^2} \int_0^L dU \int_0^L \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV \quad (4.71)$$

Величина перераспределения энергии определяется вычислением соотношения площадей фигур, полученных сечением плоскости $U=M=const$ двух тел, ограниченных линиями (см.рис.4.5):

$$1) S_1: x = \exp\left(-\frac{U^2/2 + V^2}{z^2}\right); \quad V = \sqrt{R^2 - U^2/2}; \quad x=0,$$

$$2) S_2: x = \exp\left[-\frac{(C_1 V - B_1 U)^2 - A_1 U^2}{z^2}\right];$$

$$V = \frac{\sqrt{R^2 - A_1 U^2} + B_1 U}{C_1}; \quad x=0. \quad (4.72)$$

Здесь

$$A_1 = \frac{1}{1 + \cos^2 \varphi},$$

$$B_1 = \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{\sqrt{2(1 + \cos^2 \varphi)}}, \quad (4.73)$$

$$C_1 = \sqrt{\cos^2 \varphi + \frac{1}{2} \sin^2 \varphi}, \quad (4.74)$$

$$\frac{B_1}{C_1} = \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{1 + \cos^2 \varphi}, \quad (4.75)$$

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \int_0^{\sqrt{R^2 - M^2/2}} \exp\left(-\frac{M^2/2 + V^2}{z^2}\right) dV = \\ &= 2z \exp\left(-\frac{M^2}{2z^2}\right) \int_0^{\frac{\sqrt{R^2 - M^2/2}}{z}} \exp\left(-\frac{V^2}{z^2}\right) d\left(\frac{V}{z}\right) = \left[\omega = \frac{V}{z}\right] = \\ &= 2z \exp\left(-\frac{M^2}{2z^2}\right) \int_0^{\frac{\sqrt{R^2 - M^2/2}}{z}} \exp(-\omega^2) d\omega = \\ &= 2z \exp\left(-\frac{M^2}{2z^2}\right) \Phi\left(\frac{\sqrt{R^2 - M^2/2}}{z}\right), \end{aligned} \quad (4.76)$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= 2 \exp\left(-\frac{A_1 M^2}{z^2}\right) \int_0^{\frac{\sqrt{R^2 - A_1 M^2} + B_1 M}{C_1}} \exp\left[-\frac{(C_1 V - B_1 M)}{z}\right] dV = \\
 &= \frac{2z}{C_1} \exp\left(-\frac{A_1 M^2}{z^2}\right) \int_0^{\frac{\sqrt{R^2 - A_1 M^2} + B_1 M}{z C_1}} \exp\left[-\left(\frac{C_1 V - B_1 M}{z}\right)^2\right] \times \\
 &\times d\left(\frac{C_1 V - B_1 M}{z}\right) = \frac{2z}{C_1} \exp\left(-\frac{A_1 M^2}{z^2}\right) \Phi x \\
 &\times \Phi\left(\frac{\sqrt{R^2 - A_1 M^2} + B_1 M}{z C_1}\right). \tag{4.77}
 \end{aligned}$$

Интенсивность излучения в точке ξ , являющейся проекцией прямой $U=M$ на фокальную плоскость, оценивается соотношением

$$\varphi(\xi) = \frac{\varphi_0 S_2 L_0}{S_1 L}, \tag{4.78}$$

где φ_0 - интенсивность излучения в точке отрезка при $U=M$.

Величину ξ возможно определить согласно аналитической зависимости (4.4б) с учетом (4.62-4.70).

Если на фокусатор, изготовленный по зависимости (4.33), падает поток излучения гауссовского распределения интенсивности с параметрами $z_0 \neq z$, $R_0 < R$, то длина фокального отрезка при $\varphi = 0$ описывается зависимостью

$$\bar{L}_0 = \frac{L_0 \int_0^{R_0} dU \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{z^2}\right) dV}{\pi [\Phi(R/z)]^2}, \tag{4.79}$$

Выражение (4.79) получено из формулы (4.48) при условии $M \cos \theta = R_0$, $L = L_0$. вычисление $\bar{L}(\varphi)$ проводится аналогично оценке $L(\varphi)$.

Распределение интенсивности в фокальной плоскости при $\varphi = 0$ определяется из выражения

$$q(\xi) = \frac{4_0 S_2}{S_1}, \quad (4.80)$$

где S_1 и S_2 - площади фигур, полученных сечением плоскости $U = M = \text{const}$ двух тел, ограниченных линиями:

$$1) S_1: x = \exp\left(-\frac{U^2/2 + V^2}{z^2}\right); \quad V = \sqrt{R^2 - U^2/2}; \quad x = 0,$$

$$2) S_2: x = \exp\left(-\frac{U^2/2 + V^2}{z_0^2}\right); \quad V = \sqrt{R_0^2 - U^2/2}; \quad x = 0.$$

Если при многомодовом режиме генерации распределение интенсивности лазерного излучения аппроксимируется кривыми $q_1(U), q_2(U)$, угол расходимости излучения $\theta \rightarrow 0$, то величина $q(\xi)$ изменяется по соотношению (4.78), где

$$S_2 = 2 \int_0^{\sqrt{R^2 - A_1 M + B_1 M}} \frac{q_1(U) q_2(U) dU}{C_1}. \quad (4.81)$$

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДУЛИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В связи с быстрым развитием лазерной технологии наиболее актуальными становятся такие направления совершенствования средств обеспечения, как разработка автоматизированных и роботизированных технологических комплексов; создание оптических систем управления пространственным формированием излучения; проектирование установок для совмещения различных видов обработки и гибких производственных систем, работающих по модульному принципу. Центры лазерной обработки, находящиеся в промышленной эксплуатации, должны быть выполнены с учетом необходимости максимальной реализации преимуществ этого вида технологии (высокие скорости термообработки, в частности для металлов - до 3...5 м/мин; прецизионность - отклонение луча $\pm 0,1$ мм; локальность воздействия) и эксплуатационно-экономических требований повышения рентабельности капиталовложений.

Поэтому все большее значение по сравнению с улучшением источников излучения приобретает модернизация вспомогательных систем и устройств, составляющих в совокупности технологический модуль.

Являясь одной из составных частей лазерно-технологического комплекса, модуль включает систему транспортировки и фокусировки излучения; технологический пост для перемещения обрабатываемого изделия и подачу вспомогательных газов. Установку - снятие и манипулирование обрабатываемой деталью в условиях крупносерийного производства целесообразно роботизировать.

Опыт внедрения лазерных технологических процессов на промышленных предприятиях показал необходимость комплексного подхода к выбору и компоновке основного (генератор излучения) и вспомогательного оборудования. При их изготовлении целесообразен дифференцированный подход. Так на базе оборудования, производимого специализирующимися на выпуске излучателей фирмой „*Rofin Sinar*“ (ФРГ) komponуются одни из самых лучших современных технологических установок *RS*. В прил. 2 представлена схема технологического комплекса на основе CO_2 -лазера *RS-1000* с порталной установкой с ЧПУ и шкафом управления.

Установленная в порталной конструкции консольная оптическая система позволяет проводить обработку материалов, не перемещая ни источник излучения, ни изделие. Луч от источника направляется в подвижную рабочую режущую головку, движение которой может управляться по 1...5 осям координат для подачи излучения под оптимальным углом к поверхности заготовки. В порталной конструкции возможно исключить ось X из системы оптического управления и использовать ее для перемещения изделия по плоскости в условиях ЧПУ. Это позволяет проводить обработку крупногабаритных и длинномерных заготовок с большой скоростью, существенно уменьшить производственную площадь и при использовании, например, съемных зажимных приспособлений значительно сократить время на операцию. Подобная схема нашла применение при проектировании установки АЛТК-СР на базе лазера "Хебр-1М" (НРБ), близкого по конструкции модели "*Silvaria-97I*" фирмы „*Spectra Physics*“ и целого ряда других автоматизированных комплексов для резки листового материала.

При обработке крупногабаритных объемных заготовок возникает необходимость перемещать инструмент по 4...6 осям. В этом случае широко применяются системы робот-лазер, в которых робот осуществляет функции позиционера обрабатывающей головки. Встраивание луча в

робот позволяет использовать все степени подвижности робота, осуществляя гибкость в ориентации луча. К существенным недостаткам этой системы следует отнести ее высокую стоимость и потери энергии на поглощение зеркалами, направляющими излучение (до 5...10% на устройство) и фокусирующими линзами.

Процессы, связанные с проведением разделительных операций (например, замена операции вырубki в штампах лазерной резкой по криволинейному контуру с совмещением пробивки отверстий на прессах малой мощности), являются перспективными и внедряются в производство. Фирма „TRUMPF“ (ФРГ) разработала серию лазерных установок мощностью 0,5-5 кВт, совмещенных с прессом. Устройство с CO_2 -лазером мощностью 0,5 кВт имеет скорость реза до 10 м/мин, точность позиции совпадает с точностью штамповки $\pm 0,03 \pm 0,1$ мм, снабжено прессом 12,5 тс, 200 ходов в минуту, обеспечивает получение качественных деталей и с успехом заменяет штамповочные операции. Технологические возможности данного специализированного оборудования могут быть расширены при незначительных доработках.

В научно-исследовательском центре по технологическим лазерам АН СССР совместно с Всесоюзным НИИ электросварочного оборудования разработан быстропроточный CO_2 -лазер ТЛ-5. Первый в СССР промышленный лазер мощностью 5 кВт эксплуатируется в составе лазерного центра АЛТК-ЛОЦ на базе микропроцессорной техники. Технологический пост имеет 5 степеней подвижности. Одним из недостатков этого комплекса является высокая стоимость как источника излучения, так и вспомогательных систем, их пока еще низкая надежность.

В настоящее время сформулированы требования к технологическим обрабатывающим центрам для эксплуатации в условиях производства. Эти условия можно разделить на три группы.

К первой группе следует отнести требования к параметрам и характеристикам со стороны лазерных технологических процессов. Промышленные установки должны обеспечить соответствующие величины уровней мощности излучения, стабильности характеристик во времени, размеры светового пятна, угловую расходимость. В табл. 5.1 и 5.2 представлены указанные характеристики в соответствии с современными условиями применения лазеров в машиностроении и авиастроении для поверхностной термообработки и резки. Требования к угловой расходимости и апертуре пучка связаны с необходимостью достижения заданной интенсивности излучения при фокусировке. Величина допустимой длины транспортировки излучения во многом определяется разме-

рами технологического поста и перемещением зоны обработки вдоль изделия. Качество процесса лазерной обработки (однородность обработанного слоя, глубины и ширины зоны термического влияния) определяется величиной нестабильностей мощности, угловой расходимости и положения оси пучка.

Ко второй группе относятся условия к эксплуатации оборудования, не зависящие от вида технологии: высокий полный ресурс (не менее 10^4 часов), надежность и ремонтпригодность всех узлов и агрегатов; высокий процент времени работы с генерацией (до 90%), простота управления установкой; высокий уровень автоматизации; удобство монтажа, демонтажа и перевозки установки, небольшие производственные площади под нее, эстетичный внешний вид; низкие эксплуатационные расходы и обеспечение санитарно-гигиенической и экологической безопасности.

Конкретные значения этих норм зависят от конструкции лазерного комплекса. Согласно зарубежным данным стоимость CO_2 -лазеров мощностью 0,3-5 кВт составляет 50-100 тыс. долларов на 1 кВт. Эксплуатационные расходы составляют 1 доллар на 1 кВт.ч выходной энергии и складываются в основном из затрат на электроэнергию и обновление газовой смеси. Требования санитарии и экологии имеют юридический характер и определяются Государственными "Санитарными нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров".

Третья группа требований связана с изготовлением лазерных центров обработки. Это прежде всего простота конструкции, низкая себестоимость изготовления, модульность конструкции.

Улучшение эксплуатационных свойств деталей, прошедших лазерную обработку, во многом зависит от способности оптической системы перераспределять энергию с заданной интенсивностью по поверхности заготовки и их надежности. Каждая из существующих систем транспортировки и фокусировки излучения, состоящая из отклоняющих и фокусирующих элементов, обладает своими преимуществами и недостатками. Однако ни одна из них не может обеспечить такого сочетания свойств, как концентрация всей энергии излучения в зоне обработки и создание необходимой плотности мощности в зоне обработки. При существующей технологии изготовления деталей на специализированном лазерном оборудовании распределение механических свойств обработанных материалов в значительной степени определяется характером распределения энергии луча на выходе из излучателя.

Характеристики технологических лазеров

Наименование	Технические характеристики	Фактические данные
"ЛДЛС-31" Технологический CO ₂ -лазер	<p>Режим работы: импульсный с диапазоном регулирования пауз, непрерывный</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: угловое линейное</p> <p>Состав газовой смеси CO₂:He:Ar</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 3 x 10⁻³ рад 40 мм 1400 мм 75 ± 120 мм</p> <p>0,05...1,5 с⁻¹ 0,5...1 мм/с 2:10:20</p> <p>25 кВт</p>
ЛДН-102 Технологический твердотельный лазер	<p>Режим работы</p> <p>Выполнение технологических операций</p> <p>Длина волны излучения</p> <p>Мощность в непрерывном режиме</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>Потребляемая мощность</p>	<p>Непрерывный</p> <p>Сварка, резка, термоупрочнение</p> <p>1,06 мкм</p> <p>0,125 кВт 3 x 10⁻³ рад 8 мм</p> <p>400 мм 50...70 мм 0,5...1 мм/с 6 кВт</p>

Наименование	Технические характеристики	Фактические данные
<p>Технологический лазер "КВАНТ-15"</p> <p>Технологический лазер "ТВОДО-1"</p>	<p>Режим работы: импульсный с диапазоном регулирования: длительности импульса длительности пауз</p> <p>Выполняемые технологические операции</p> <p>Длина волны излучения</p> <p>Энергия в импульсе</p> <p>Диаметр светового потока, выходящего из резонатора</p> <p>Расходимость пучка</p> <p>Расстояние от излучателя до обрабатываемой поверхности</p> <p>Фокусное расстояние линзы</p> <p>Диапазон регулирования скорости перемещения детали</p> <p>Потребляемая мощность</p>	<p>1,5...4x10⁻³с 0,05...0,1с</p> <p>Пробивка, сварка, термоупрочнение</p> <p>1,06 мкм 6 Дж 8 мм 3 x 10⁻³ рад 700 мм 70...10 мм 0...1 мм/с 10 кВт</p>
<p>Лазерная установка ТЭС 1001</p>	<p>Режим работы импульсный</p> <p>Длина волны излучения</p> <p>Энергия в импульсе</p> <p>Диаметр светового потока, выходящего из резонатора</p> <p>Расходимость пучка</p> <p>Фокусное расстояние линзы</p> <p>Потребляемая мощность</p> <p>Выполняемые технологические операции</p>	<p>0,03 с 1,06 мкм 100...1000 Дж 45 мм 0,05 рад 250...1000 мм 5 кВт</p> <p>Термоупрочнение, пробивка</p>

авторами разработаны динамические оптические элементы для управления изменением перераспределения энергии излучения и статические фокусаторы для создания необходимых условий взаимодействия излучения с веществом. Наиболее перспективными в плане термообработки являются динамические фокусаторы излучения в отрезок. При вращении оптического элемента такого типа происходит изменение перераспределения энергии, распределенной в световой отрезок, его ориентации, изменение фокального расстояния. Проведенный расчет изменения этих параметров при различном законе распределения энергии исходного пучка (в т.ч. многомодовое, гауссовское с различным коэффициентом сосредоточенности и размерами луча) показал, что, если известны характеристики фокусируемого излучения и отражающей поверхности, то необходимое распределение интенсивности можно получить, осуществляя поворот оптического элемента вокруг центральной нормали на определенный угол.

Устройство является универсальным, имеется возможность установить его практически в любой технологический модуль. Для порталных конструкций целесообразно его применение вместо последнего поворотного зеркала оптического блока. Достигается значительное расширение функциональных возможностей этих установок в связи с проведением дополнительной операции термообработки. Применение устройства позволяет исключить пропускающие оптические элементы (линзы), имеющие низкую стойкость и надежность, из состава системы транспортировки и фокусировки излучения. Для установок типа "Латус-3I" целесообразно применение устройства в качестве основного блока технологического модуля на базе промышленного робота.

В табл. 5.3 приводятся технические характеристики технологи-

Т а б л и ц а 5.2

Требования к параметрам лазерного излучения со стороны лазерных технологических процессов (для поверхностной обработки и резки)

Технические характеристики	Поверхностная термообработка	Резка
Мощность излучения, кВт	1...5	0,5...5
Размер фокального пятна, мм	$1 \div 15$	$0,1 \div 0,2$
Интенсивность излучения на поверхности обрабатываемого изделия, Вт/см ²	$0,5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6 \dots 10^7$
Угловая расходимость по уровню 0,86 полной мощности, мрад	$2 \div 5$	$0,3 \div 1$
Апертура пучка, мм	$10 \dots 80$	$10 \dots 30$

Технические характеристики	Поверхностная термообработка	Резка
Длина транспортировки излучения, м	3...10	1...15
Допустимая угловая стабильность пучка, мрад	0,2 ± 0,5	0,03 ± 0,05
Допустимая нестабильность мощности и угловой расходимости, %	2 ± 3	до 2

ческих модулей, выпускаемых лазерных комплексов в СССР и за рубежом.

Библиографический список

1. Абельситов Г.А. и др. Мощные CO₂-лазеры и их применение в технологии. М.: Наука, 1984. 104 с.
2. Белоусов А.И. Проектирование станочных приспособлений. М.: Высшая школа, 1980. 240 с.
3. Белянин П.Н. Промышленные роботы и их применение. М.: Машиностроение, 1983.
4. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
5. Евстигнеев М.И., Подзей А.В., Сулина А.М. Технология производства двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982.
6. Капдунов Р.С. Точность контрольных приспособлений. М.: Машиностроение, 1968. 219 с.
7. Коваленко В.С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров. Киев.: Вища школа, 1977. 144 с.
8. Козырев М.Г. Промышленные роботы: Справочник. М.: Машиностроение, 1983.
9. Кристал М.А. и др. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. М.: Металлургия, 1973. 192 с.
- Ю. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. М.: Машиностроение, 1983. 277 с.
- II. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Рыкалин Н.Н. и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

Технические характеристики технологических модулей, выпускаемых лазерных комплексов

Наименование установки	Диаметр луча, мм	Стабильность мощности, %	Скорость перемотки, м/мин	Точность позиционирования, мм	Система управления	Габариты детали, мм
RS-1000, фирма Трумпф, ФРГ	13	± 2	10	$\pm 0,1$	Двухкоординатная ЧПУ	1300x2000
ЛУРМ-1600	40	± 5	42	$\pm 0,5$	Двухкоординатная ЧПУ	1600x1500
Севан	8	± 5	6	$\pm 0,1$	Двухкоординатная ЧПУ	1400x1200
ТЛУ-1000 (Хеор)	20	± 2	4	$\pm 0,5$	Трехкоординатная ЧПУ	1200x2000x600
Алмаз - 5	40	± 5	4	$\pm 0,5$	Двухкоординатная ЧПУ	3000x2500
Бирюза	50	± 5	6	$\pm 0,5$	Двухкоординатная ЧПУ	2500x12000
RS-1500, фирма Рофин Синар, США	18	± 2	10	$\pm 0,1$	Трехкоординатная ЧПУ	1500x200
Л 5000, фирма Трумпф, ФРГ	25	± 2	30	$\pm 0,05$	Пятикоординатная ЧПУ	3000x2000x750
МББ-мультилаз, фирма МББ ФРГ	25	± 2	60	$\pm 0,1$	Пятикоординатная ЧПУ	10000x2500x1000

12. Новиков М.П. Основы технологии: сборник машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1980.

13. Новицки М. Лазеры в электронной технологии и обработке материалов. М.: Машиностроение, 1981. 151 с.

14. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.

15. Современные промышленные роботы: Каталог /Под ред. Ю.Г. Козырева и Я.А. Шифрина. М.: Машиностроение, 1984.

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

17. Ямаде Е. и др. Специальные функции. М.: Наука, 1968. 344 с.

ИНСТРУКЦИЯ

по технике безопасности при эксплуатации
лазерных технологических установок в учебной
лаборатории

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.

П е р е д н а ч а л о м р а б о т ы

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.

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

2. Проверить заземление установки.

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

4. Установить устройство, ограничивающее прохождение лазерного излучения в нерабочую зону. Ограждение выполняется из негорячего, 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.

В 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, техникой 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.

П о о к о н ч а н и и р а б о т ы

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, 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 "ЛАНУС-31", твердотельный непрерывный лазер ЛТН-102, импульсные "Квант-15" и ГОС-1001. Их технические характеристики, используемые в расчетах лабораторного практикума, приведены в табл. 1.3. 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 $\lambda = 10,6$ мкм, так и $\lambda = 1,06$ мкм. 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), тепловизатором ТВ-03 (диапазон измерения температур $T = 10 \dots 200^\circ\text{C}$, погрешность измерения $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$). Для регистрации малых упругоэластичных перемещений деталей используются методы лазерной голографической интерферометрии. Их применение осуществляется с помощью голо-

графических установок ОГМ или УИГ-22. Синхронизация регистрирующей аппаратуры и момента генерации излучения технологической установки обеспечивается генератором импульсов ГИ-2 (диапазон временной задержки импульсов $\tau = 0,05 \dots 5$ с, 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 $\times 2000$ и в необходимых случаях $\times 1000$. Микроструктурное исследование зоны обработки осуществляется с помощью металлографических микроскопов МИМ-8 и „*Neophot*“ при увеличениях до $1500\times$ на микрошлифах с использованием специальных проявителей. Эти шлифы используются для измерений микротвердости, проводимых на микротвердомере ИМТ-3.

Программа I для вычисления температурного поля при взаимодействии лазерного движущегося источника нагрева с толстостенной пластиной при гауссовском распределении плотности мощности в световом пятне

Обозначение идентификаторов:

X, Y, Z, K - соответственно переменные x, y, z, k ;

DL - шаг изменения переменных x, z ;

DLY - шаг изменения переменной y

$A1, A2, FF$ - арифметические выражения;

$x0, xy$ - нижний и верхний пределы интегрирования арифметического выражения FF по переменной x ;

$P, DELTA$ - число участков и шаг интегрирования методом трапеций;

S - безразмерный параметр температуры

$$S = \frac{\tau \lambda S}{9070^2}$$

Программа NMS состоит из основной программы, подпрограммы SIMPS и подпрограммы функции

FTN. B, L

```

PROGRAM NMS
DIMENSION DAL(2)
COMMON AL, A1, A2, Z
DATA DAL(1), DAL(2) / 1., 3. /, DL / 0.1 /, PI / 3.1416 /, DLY / 0.5 /
EXTERNAL FUNC1
DO 10 K=1, 2
AL=DAL(K)
WRITE(5, 100) AL
100  FORMAT(3H AL=, F6.4)
X=0
DO 20 I=1, 15
X=X+DL
WRITE(5, 110) X
110  FORMAT(2HX=, F6.4)
Z=0
DO 30 J=1, 15
Z=Z+DL
WRITE(5, 120)
120  FORMAT(2HZ=, F6.4)
Y=-2
DO 40 L=1, 12
Y=Y+DLY
WRITE(5, 130) Y

```

¹ Программа для ЭЦВМ СМ-4 составлена инж. Никитиной Г.А.

```

130  FORMAT(2HY=,F6.4)
      A1=((X-1./AL)**2+Y**2)
      A2=(X**2+Y**2)
      A=PI/180.
      B=(PI/2.-PI/180.)
      CALL STMP(S,A,B,88.,FUNCI,T)
      WRITE(5,2)T
2     FORMAT(2HT=,F12.8)
40    CONTINUE
30    CONTINUE
20    CONTINUE
10    CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE STMP(XO,XU,P,FUNC,SV)
      DELTA=(XU-XO)/P
      M=P-1.
      X=XO
      S=(FUNC(XO)+FUNC(XU))/2.
      DO 1 I=1,M
      X=X+DELTA
      S=S+FUNC(X)
1     CONTINUE
      SV=S*DELTA
      RETURN
      END
      FUNCTION FUNC1(XU)
      COMMON AL,A1,A2,Z
      FF=EXP(A1*STN(XU)**2-(TAN(XU)**2/AL**2)-A2(Z**2/TAN(XU)**2))
      FUNC1=FF
      RETURN
      END
      ENDP

```

Программа для вычисления температурного поля при взаимодействии лазерного неподвижного источника нагрева с двухслойной пластиной при равномерном распределении плотности мощности в световом пятне

Обозначение идентификаторов:

- PL - относительная толщина наружного слоя $PL = l / \sqrt{\alpha \tau}$;
- BM - координата в направлении оси Z ;
- $DELTA$ - шаг изменения переменной PL ;
- H - шаг изменения переменной SM ;
- $FT(J)$ - дополнительная функция ошибок $i\Phi^*(u)$;
- $N, DELTAX$ - число участков и шаг интегрирования методом трапеций;
- C - параметр, учитывающий разницу теплофизических свойств наружного и внутреннего слоев материала;
- A, B, FF - арифметические выражения;

T - безразмерный параметр температуры

$$t = \frac{T_{A1}}{2q\sqrt{a\tau}}$$

Программа *RT1* состоит из основной программы, подпрограммы *PINT* и трех подпрограмм функций (*TABL1*, *TABL2*, *TABL3*)

```
PROGRAM RT1
COMMON /A/PL/B/I3
DIMENSION FL(10),FNP(10,100),FNO(10,100),PM(3),SFNP(10),
1 SFNO(10),T(10)
EXTERNAL TABL1,TABL2,TABL3
DATA PM(1);PM(2),PM(3)/-0.5;-0.2,1.0/
SM=0
PL=0
H=0.03
DELTA=0.5
DO 1000 I=1,3
R=PM(I)
DO 2000 I1=1,3
PL=PL+DELTA
C=PL*0.5
CALL PINT(0,C,10,TABL1,FL)
PRINT 6,FL
6 FORMAT(' FL=',10F14.8)
DO 100 I3=1,100
P=SM
SM=P+(-PM)**I3
IF((SM-P).LE.(H*P))GOTO 2
A=PL*(I3+0.5)
B=PL*(I3-0.5)
CALL PINT(0,A,10,TABL2,FNP)
CALL PINT(0,B,10,TABL3,FNO)
PRINT 12,P
12 FORMAT(' SS=',F14.10)
100 CONTINUE
2 DO 200 J=1,10
SFNP(J)=0
SFNO(J)=0
DO 200 JJ=1,13
SFNP(J)=SFNP(J)+FNP(J,JJ)
SFNO(J)=SFNO(J)+FNO(J,JJ)
200 CONTINUE
PRINT 14,SFNP
PRINT 16,SFNO
14 FORMAT(' NP=',10F14.8)
16 FORMAT(' NO=',10F14.8)
DO 300 J1=1,10
T(J1)=1/PL*(FL(J1)+P*(SFNP(J1)+SFNO(J1)))
300 CONTINUE
PRINT 4,T
4 FORMAT(' I=',10F14.8)
END
```

Окончание программы

```

SUBROUTINE PINT(X0,XU,N,TABL,FT)
DIMENSION FT(10)
DELTAX=(XU-X0)/N
M=N-1
X=X0
S=(TABL(X0)+TABL(XU))/2.
DO J I=1,M
X=X+DELTAX
S=S+TABL(X)
SV=S*DELTAX
F=TABL(X)
FT(I)=1/3.1416**0.5*F-XU*2/3.1416**0.5*SV
CONTINUE
RETURN
END
FUNCTION TABL(XU)
COMMON /A/PL
FF=EXP(-(((PL*XU)*0.5)**2))
TABL1=FF
RETURN
END
FUNCTION TABL2(XU)
COMMON /A/PL,/B/13
FF=EXP(-((PL*(13+XU*0.5)**2))
TABL2=FF
RETURN
END
FUNCTION TABL3(XU)
COMMON /A/PL,/B/13
FF=EXP(-((PL*(13-XU*0.5)**2))
TABL3=FF
RETURN
END

```

Программа для вычисления температурного поля при взаимодействии лазерного неподвижного источника нагрева с двухслойной пластиной при Гауссовском распределении плотности мощности в световом пятне

Обозначение идентификаторов:

- ZN* - координата в направлении оси Z ;
H1 - толщина наружного слоя конструкционного материала;
DK - коэффициент сосредоточенности k при гауссовском распределении плотности излучения в световом пятне

$$q = q_0 \exp(-z/k);$$
TY - длительность импульса; τ
TP, AI - теплопроводность и температуропроводность материала;
RO - радиус пятна нагрева, при котором плотность излучения падает в e раз;
FO - интенсивность плотности мощности излучения в центре пластины q_0 ;
BFI, VK - корни уравнения Бесселя первого $J_1(u) = 0$ и нулевого порядков $J_0(u) = 0$;
G - параметр, учитывающий разницу теплофизических свойств наружного и внутреннего слоев материала;

DK; SN; FK - арифметические выражения;

T - температура материала;

DELTAZ; DELTAH шаг изменения переменных *Z* и *H*.

Программа *TPLM* состоит из основной программы, двух под-
программ (*RINES*, *SIMPS*) и пяти подпрограмм функций
(*FUNCF1*, *FUNCF2*, *FUNCF3*, *FUNCF4*, *FUNCF5*)

```
PROGRAM TPLM
COMMON /AL/ HI, ZN, A1, TY, D, CK, E
COMMON /BL/ PI
DIMENSION VK(10), BF1(10), FS(10), FSK(10), SK(10), Z(10),
* SK1(10), SK2(10), SK3(10), SK4(10), DK(3)
DATA VK/2.405, 5.52, 8.654, 11.792, 14.931, 18.071, 21.211,
* 24.352, 27.493, 30.635/, BF1/3.832, 7.016, 10.174, 13.324, 16.471,
* 19.616, 22.761, 25.904, 29.047, 32.190/, RO/0.5/, FO/100./, TP/0.18/,
* A1/0.4/, TY/0.5/, G/0.2/, DK/0.0, 0.5, 1./, PI/3.1416/
EXTERNAL FUNC1, FUNC2, FUNC3, FUNC4, FUNC5
DO 50 J2=1, 3
CK=DK(J2)
ZN=0
DELTAZ=0
DO 30 I1=1, 5
ZN=ZN+DELTAZ
HI=0
DELTAH=0
DO 40 J1=1, 5
HI=HI+DELTAH
SN=0
OK=2*SQRT((A1*TY)/PI)
DO 20 J=1, 10
SK1(J)=EXP(-((2*HI*(J-1)+ZN)**2/(4*A1*TY)))
SK2(J)=EXP(-((2*HI*J-ZN)**2)/(4*A1*TY)))
A=(2*HI*(J-1)+ZN)/(2*SQRT(A1*TY))
CALL SIMPS(0, A, 10, FUNC3, ALL)
SK3(J)=(2*HI*(J-1)+ZN)*(ALL*2/SQRT(PI))
B=(2*HI*J-ZN)/(2*SQRT(A1*TY))
CALL SIMPS(0, B, 10, FUNC4, VAL)
SK4(J)=(2*HI*J-ZN)*(VAL*2/SQRT(PI))
SN=SN+(G**(J-1))*(OK*SK1(J)+G*SK2(J)-SK3(J)+G*SK4(J))
T=0
DO 10 I=1, 10
SK(I)=VK(I)/RO
Z(I)=SK(I)*RK
D=SK(I)
E=Z(I)
FK=(2*FO)/(PI*RO**2*BF1(I)**2)
CALL RINEG(0, 0.7, 50, FUNC2, RF)
FS(I)=FK*RF
CALL SIMPS(0, PI, 50, FUNC5, CAL)
FSK(I)=(FS(I)*CAL)/(TP*PI)
T=T+FSK(I)*SN
10 CONTINUE
PRINT 2, T
2 FORMAT(' T=', F12.3)
DELTAH=0.05
40 CONTINUE
DELTAZ=0.05
30 CONTINUE
50 CONTINUE
END
```

```

SUBROUTINE RINGS(X0,XF,N,FUNC,RI)
COMMON /BL/ PI
COMMON /DL/ C
EXTERNAL FUNC1,FUNC5
IF(MOD(N,2).NE.0)STOP 111
N2=N/2-1
H=(XF-X0)/FLOAT(N)
S1=0
S2=0
X=X0
DO 10 I=1,N2
X=X+H
S1=S1+FUNC(X)
C=X
CALL SIMPS(0,PI,50,FUNC1,RR)
S1=S1*RR
X=X+H
S2=S2+FUNC(X)
C=X+H
CALL SIMPS(0,PI,50,FUNC1,RR)
10 S2=S2*RR
T0=0
T1=C+H
TU=PI
* RI=(4.*(S1+FUNC(X+H)*FUNC5(T1))+2.*(S2+FUNC(XF)*
FUNC5(TU)+FUNC(X0)*FUNC5(T0)))*H/3
RETURN
END
SUBROUTINE SIMPS(A,B,N,FUNC,RR)
IF(MOD(N,2).NE.0)STOP 111
N2=N/2-1
H=(B-A)/FLOAT(N)
S1=0
S2=0
X=A
DO 40 I=1,N2
X=X+H
S1=S1+FUNC(X)
X=X+H
S2=S2+FUNC(X)
40 RR=(4.*(S1+FUNC(X+H))+2.*(S2+FUNC(A)+FUNC(B)))*H/3
RETURN
END
FUNCTION FUNC1(TU)
COMMON /AL/ HI,ZN,AI,TY,D,CK,E
COMMON /DL/ C
FF=COS(D*C*SIN(TU))
FUNC1=FF
RETURN
END

```

```
FUNCTION FUNC2(XF)
COMMON /AL/ HI,ZN,A1,TY,D,CK,E
FF=XF*EXP(-(CK*XF**2))
FUNC2=FF
RETURN
END
FUNCTION FUNC3(J)
COMMON /AL/ HI,ZN,A1,TY,D,CK,E
FF=EXP(-(((2*HI*(J-1)+ZN)/(2*SORT(A1*TY)))**2))
FUNC3=FF
RETURN
END
FUNCTION FUNC4(J)
COMMON /AL/ HI,ZN,A1,TY,D,CK,E
FF=EXP(-(((2*HI*J-ZN)/(2*SQR(A1*TY)))**2))
FUNC4=FF
RETURN
END
FUNCTION FUNC5(TU)
COMMON /AL/ HI,ZN,A1,TY,D,CK,E
FF=COS(E*SIN(TU))
FUNC5=FF
RETURN
END
```

Список аббревиатур

- ЛА - летательный аппарат;
ЛИ - лазерное излучение;
ИЛО - импульсная лазерная обработка ¹ ;
ИПЛО - импульсно-периодическая лазерная обработка ² ;
НЛО - непрерывная лазерная обработка ³ ;
ЛПТО - лазерная поверхностная термообработка;
ЗТВ - зона термического влияния.

- ¹ Импульсной лазерной обработке характерно применение в технологических операциях режимов генерации лазерного излучения (ЛИ) с продолжительной паузой между одиночными последующими импульсами длительностью 1...3 мс с малой частотой.
- ² Современные импульсно-периодические лазеры, используемые в обработке материалов в технологических операциях, имеют режимы генерации ЛИ с длительностью 0,1 мс с частотой 0,3...1 кГц.
- ³ При непрерывной лазерной обработке характерным является непрерывный режим генерации ЛИ в течение всего технологического этапа проведения операции.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение.....	3
1. Лазерная обработка импульсным излучением..	6
1.1. Последовательность проектирования технологического процесса.....	6
1.2. Этапы проектирования.....	9
2. Лазерная обработка импульсно-периодическим излучением.....	22
2.1. Последовательность проектирования технологического процесса.....	22
2.2. Этапы проектирования.....	23
3. Лазерная обработка непрерывным излучением....	38
4. Оптические системы в лазерной обработке.....	57
4.1. Расчет формы поверхности отражающих оптических элементов.....	58
4.2. Область применения фокусаторов в технологических операциях.....	76
4.3. Изменение длины фокального отрезка и перераспределение интенсивности излучения и изменения фокального отрезка при вращении фокусатора.....	77
5. Технологические модули для лазерной обработки материалов.....	86
Библиографический список.....	93
Приложения.....	96

МОРДАСОВ Василий Иванович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
В АВИАСТРОЕНИИ**

Редактор Т. К. Кр е т и н и н а
Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к
Корректор Н. С. К у п р и я н о в а

Свод. тем. пл. № 125

Подписано в печать 15.11.89 г. ЕО 00355.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага оберточная белая.
Печать оперативная. Усл. п. л. 6,0. Уч.-изд. л. 5,0.
Т. 400 экз. Заказ 6463. Цена 25 коп.

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

Тип. им. В. П. Мяги Куйбышевского полиграфического
объединения, 443099 Куйбышев, ул. Венцека, 60.