

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

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

**ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ**

**У т в е р ж д е н о**  
**редакционно-издательским**  
**советом института**  
**в качестве**  
**методических указаний**  
**к лабораторным работам 4,5,6**  
**для студентов**

Куйбышев 1987

Лабораторные работы по курсам "Лазерная обработка материалов", "Основы технологии лазерной обработки", "Лазерная технология" содержат рекомендации по выполнению заданий лабораторного практикума.

Рекомендуются студентам спец.0537, 0408, а также слушателям ФПК инженерно-технических работников предприятий.

Составитель: В.И.М о р д а с о в

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

ГАЗОЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МАТЕРИАЛОВ

Цель работы - ознакомиться с методикой проведения юстировки оптического резонатора газоразрядного  $\text{CO}_2$ -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.

I. Краткие теоретические сведения

Процесс резки лучом лазера представляет собой совокупность ряда теплофизических и газодинамических явлений. Здесь характерны две стадии /I/: нагрев металла в объеме реза до температур, не ниже температуры плавления, и удаление продуктов разрушения из полости реза /4-6/. 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

$$T = \frac{W}{2\pi\lambda s} K_0(u) e^{-\frac{vz}{2a}}, \quad (I)$$

где  $u = Rv \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{\beta^2}{a}}$ ,  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad \beta = \frac{2\alpha_0}{c\gamma s},$$

$K_0(u)$  - функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка,  $\alpha_0$  - коэффициент поверхностной теплопередачи,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c$  -

теплоемкость,  $\delta$  - удельный вес,  $S$  - толщина листа,  $W$  - тепловая мощность лазерного излучения,  $v$  - скорость перемещения светового пятна,  $x, y$  - координаты.

Уравнение (1) хорошо описывает модель линейного источника тепла лишь в области небольших скоростей резки ( $v \sim 1 \dots 1,5$  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

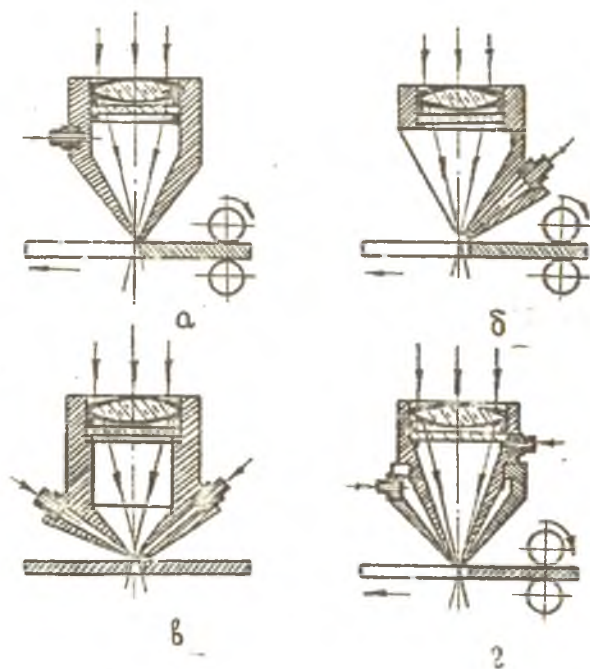
$$v = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{c \gamma S \rho T_s}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - 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 газолазерному резанию делятся на две группы; разлагающиеся или плавящиеся при нагреве. К первой группе относятся пластмассы, ткани, резина, фанера и стекло, ко второй группе - стекло, керамика, асбоцемент. 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 недифицитные газы: сжатый воздух и азот.

Основными требованиями к конструкции 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 (рис.1). Последняя конструкция резака позволяет наиболее эффективно удалять расплавленную фазу из 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.



Р и с. 1. Конструкции резаков, применяемых при газолазерной резке: движение режущего газа совпадает с направлением лазерного излучения (а); движение режущего газа направлено под углом к направлению лазерного излучения (б); использование двухстороннего бокового поддува (в); ограниченный расход основного режущего газа (г)

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 отверстий при газолазерной резке наблюдается уменьшение глубины первого слоя вследствие принудительного удаления расплавленного материала направленной струей режущего газа.

## II. Описание лабораторной установки

Для исследований используется технологический  $\text{CO}_2$ -лазер "ЛАТУС-31" мощностью  $N = 1,5$  кВт. Лабораторная установка укомплектована оптической системой для фокусировки излучения резаками осевого и бокового поддува, перемещателем заготовок, а также измерителем мощности проточного типа. 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  $\text{He-Ne}$  -лазером.

## III. Домашнее задание

С помощью зависимости (I) рассчитать температурное поле в зоне резки листового образца из углеродистой стали толщиной  $S = 1,5$  мм с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью  $N = 1$  кВт в струе воздуха со скоростью перемещения  $z = 1,2$  мм/с. Необходимые значения функции  $K_0(u)$  приводятся в прил. I.

## IV. Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкцию по эксплуатации при работе на лазерной технологической установке "ЛАТУС-31". 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  $\text{KCl}$ , давление режущего газа не должно превышать значений  $P = 10$  Па. Соблюдать следующий порядок выполнения лабораторной работы.

1. Провести юстировку газоразрядного лазера с получением много-модового 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. I.

Т а б л и ц а I

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	$S$ , мм	Положение фокуса	$v$ , мм/с	$S$ , мм
1	Осевое						
2	— " —						
3	— " —						
1	Боковое						
2	— " —						
3	— " —						

3. Результаты экспериментов по определению скорости реза сопоставить с расчетными данными, полученными по формуле (2). С помощью зависимости (I) построить распределение температур в зоне обработки для одного из вариантов режима резки. Сопоставить расчетную ширину реза с экспериментальным значением.

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

## У. Указания к отчету

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

## VI. Вопросы для самопроверки

1. Из каких основных стадий 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 инертные 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?



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ  
МЕТАЛЛОВ

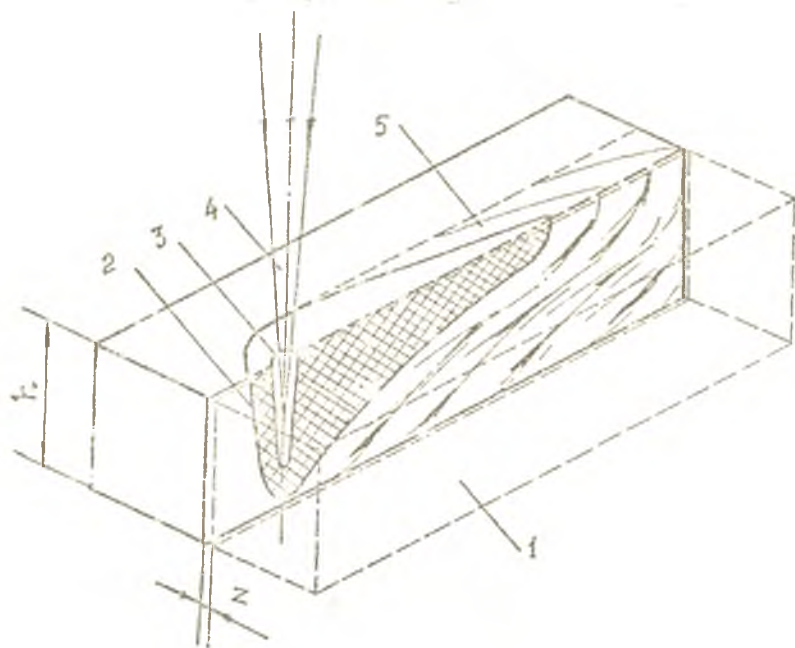
Цель работы - определить величину основных параметров лазерной сварки (энергии импульса, мощности генерации излучения, скорости перемещения свариваемой детали, расстояния между фокусом и поверхностью обрабатываемой заготовки) при непрерывном и импульсном режимах обработки; установить влияние режимов генерации (одномодового, многомодового) лазерной установки на величину глубины проплавления при сварке; ознакомиться с микроструктурой сплавов в зоне термического влияния при лазерной сварке.

I. Краткие теоретические сведения

К основным преимуществам лазерной сварки над традиционными способами следует отнести /4-6/: высокую скорость лазерной сварки (для стальных деталей  $3,5 \cdot 10^{-2}$  м/с, для титановых  $5 \cdot 10^{-2}$  м/с); увеличение термического КПД энергии, падающей на металл, до значений  $\eta = 0,3 \dots 0,42$ , (традиционные -  $\eta = 0,18 \dots 0,22$ ); мелкозернистое строение металла и сколовочной зоны из-за большой скорости охлаждения при кристаллизации; высокую сопротивляемость холодному растрескиванию соединений; снижение уровня остаточной деформации (продольные остаточные напряжения в 3...5 раз меньше, чем при дуговой сварке, поперечные снижаются в 5...6 раз) не требует последующей механической доводки сварных конструкций.

Свариваемые части заготовок следует располагать так, чтобы зазор между ними не превышал  $0,15 S$ , а расстыковка по высоте не превышала  $0,25 S$ , где  $S$  - толщина материала. Части заготовок должны быть прижаты одна к другой. Сглаживание поверхности шва в зоне соединения двух стальных заготовок достигается подбором защитной среды: аргона; гелия; смеси аргона, гелия и ацетилена ( $C_2H_2$ ); фреона ( $CCl_2F_2$ ) с нестифтористой серой ( $SF_6$ ) (содержание добавок менее 3%). Наличие добавок в инертном газе не отражается на глубине сварного шва.

Улучшения эксплуатационных характеристик сварных соединений достигают созданием расплавленной сварочной ванны, имеющей различные скорости кристаллизации металла по толщине. Последнее приводит к образованию на некоторой высоте "ступеньки" (рис.2). Положительное



Р и с. 2. Образование шва глубокого проплавления при лазерной сварке: 1 - свариваемые образцы; 2 - зона расплава; 3 - газогазовый канал; 4 - поток лазерного излучения; 5 - закристаллизовавшийся участок

влияние разных скоростей кристаллизации, оказывается в том, что нижняя часть ванны покрыта слоем жидкого металла, который может подпитывать усадочные объемы, образующиеся в процессе кристаллизации. Устранение усадочных дефектов при лазерной сварке повышает деформационную способность шва. Кристаллизация верхней части ванны происходит как бы на площадке из закристаллизованного, но находящегося при высокой температуре металла. Обычно образования "ступеньки" достигают при сварке стали со скоростью выше  $v = 1$  мм/с. При этом потери легирующих элементов на испарение и угар при лазерной сварке несколько

больше, чем при дуговой и электронно-лучевой. Последнее объясняется большей удельной поверхностью контакта жидкого металла с газовой фазой из-за получения парогазового канала.

На проплавляющую способность лазерного излучения при сварке существенное влияние оказывают состояние поверхности и подготовка кромок соединяемых деталей. Изменение состава парогазовой фазы при лазерной сварке путем введения различных добавок в поверхностные слои металла влияет на характер взаимодействия излучения и материала. При нанесении на поверхность свариваемых образцов элементов с низшим потенциалом ионизации ( $K$ ,  $Na$ ) либо деионизаторов ( $F_2$ ,  $CF_2$ ), происходит уменьшение экранирующего действия на лазерное излучение частично ионизированного парогазового облака. Уменьшение ширины шва происходит при сварке с покрытием из жидкого стекла, хлорного железа и флюса ФС-71. Применение предварительной подготовки кромок приводит к улучшению формирования швов и увеличению глубины проплавления. Существует оптимальная форма разделки кромок деталей в случае, если угол разделки стремится к углу сходимости луча. При этом оптимальная плотность мощности пучка с наибольшей проплавляемостью существует, если оптическая система, имеющая диаметр линзы  $D$ , формирует луч с длиной фокуса  $f = (0,5 \dots 0,7)D$ , т.е. для эффективности проведения процессов лазерной сварки требуется применение короткофокусной оптики.

Повысить эффективность проплавления при лазерной сварке возможно, применив динамическую фокусировку луча. Для реализации процесса применяется оптико-механический сканатор. Оптимальные значения частоты  $\nu$  и амплитуды  $A$  сканирования луча по глубине  $h$  при сварке, например нержавеющей стали, составляют:  $\nu = (70 \dots 150) \text{ Гц}$ ,  $A = (0,2 \dots 0,5)h$ . Путем динамической фокусировки глубину проплавления увеличивают в 1,5 раза при возрастании ширины шва на 30%. Работа сканатора придает стабильность процессу формирования шва при увеличении теплового КПД на 70-80%.

Сварку импульсным излучением следует применять при соединении тонких материалов путем непродолжительного плавления с последующей кристаллизацией. Здесь различают повную и точечную сварку. Для получения литой зоны с заданными размерами требуется определенная энергия

$$W = \frac{K}{2} mc (T_s - T_0), \quad (3)$$

где  $K$  - коэффициент, учитывающий теплоту плавления материала,  $\eta$  - термический КПД сварки,  $m$  - масса точечного расплавления свариваемых деталей,  $c$  - удельная теплоемкость материала,  $T_S$  - температура плавления и начальная температура образца.

Время импульса  $\tau$  и плотность энергии  $\bar{E}$  выбирают из условия, чтобы не допустить значительного испарения металла и обеспечить заданную глубину проникновения теплового потока. При этом лазерное излучение поглощается тонким поверхностным слоем толщиной менее 1 мкм. Если время импульса  $\tau$  и плотность энергии  $\bar{E}$  недостаточны для интенсивного испарения металла ( $q = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности импульса  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-2}$  с), то передача тепла в глубину свариваемых материалов осуществляется за счет теплопроводности. При этом зона проплавления имеет форму, близкую к сферической. Для увеличения глубины проплавления  $h$  значения времени импульса  $\tau$  и плотности энергии  $\bar{E}$  следует повысить, не допуская интенсивного испарения металла.

Распределение температур в зоне нагрева при лазерной сварке рассчитывают по формуле (1). Ее следует применять в случае скорости сварки, не превышающей значения  $v = 0,5$  мм/с. При увеличении скорости перемещения источника тепла и пропорциональном возрастании его мощности  $W$  тепло распространяется лишь в направлении, перпендикулярном оси перемещения источника.

## II. Описание лабораторной установки

Исследование процессов лазерной сварки выполняется на технологическом лазере "ЛАТУС-31" мощностью  $W = 1,5$  кВт. Лабораторная установка укомплектована оптической системой для фокусировки излучения, устройством перемещения заготовок защитного газа, измерителем мощности проточного типа. В качестве исследуемых образцов применяются трубчатые или листовые заготовки из нержавеющей стали. Регулирование расхода защитного газа осуществляется расходомером. Для уменьшения трудоемкости совмещения фокального пятна с плоскостью разреза свариваемых заготовок оптическая ось освещена He-Ne-лазером. Процессы сварки деталей осуществляются в импульсном и в непрерывном режимах.

## III. Домашнее задание

Используя уравнение теплового баланса (3) процесса точечной сварки, рассчитать энергию импульса  $E$  и частоту генерации  $\nu$ , необхо-

димую для сварки обечайки из нержавеющей стали IX18Ni9Ti толщиной  $S = 0,8$  мм на лазерной установке "КВАНТ-15".

#### VI. Лабораторное задание и методические указания

Перед выполнением работы изучить инструкцию по эксплуатации лазерной установки "ЛАТУС-31". Освоить порядок включения устройств переключателя заготовки, а также измерителя мощности и подачи защитного газа в зону обработки. Лабораторная работа выполняется в следующей последовательности.

1. Методом математического планирования эксперимента установить оптимальное соотношение газовой среды при генерации одномодового излучения на установке "ЛАТУС-31". При отработке одномодового излучения стремиться получить наибольший коэффициент сосредоточения  $K$ .

$q = q_0 e^{-\frac{x^2}{\kappa^2}}$ , многомодового – максимальную мощность излучения  $W$ . Математическую модель искать в виде

$$W = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2,$$

$$K = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2. \quad (4)$$

При измерении значений мощности  $W$  и распределения ее плотности по пятну  $q = q_0 e^{-\frac{x^2}{\kappa^2}}$  использовать измеритель ИМО-2М.

2. Определить величину основных параметров лазерной сварки. Теоретические значения энергии импульса, мощности излучения, скорости сварки, величины заглабления фокуса рассчитывать с помощью уравнения (3) и представить в виде табл.2. Оптимальные режимы лазерной сварки установить путем подбора скорости прохождения светового пятна, зазора между заготовками, величины заглабления фокуса и свойств свариваемых образцов: температуропроводности  $\alpha$ , коэффициента поглощения  $R$ . Высокая температуропроводность  $\alpha$  гарантирует эффективную передачу тепла и обеспечивает наибольшую глубину проплавления. При низком коэффициенте поглощения  $R$  затрудняется передача тепла, а следовательно, для сварки требуется больше энергии, чем для соединения металлов с менее отражающей способностью. Отражение лазерного луча от поверхности снижает нанесением покрытий. Они могут также играть роль легирования зоны сварного шва. Оптимальная величина заглабления фокуса составляет  $\Delta f = (0,3 \dots 0,5)S$  от толщины свариваемого материала.

Провести анализ по эффективности применений одноимодового и импульсного режимов лазерной сварки.

3. Изучить микроструктуру зоны термического влияния при лазерной сварке. Объяснить причину наличия зон отпуска в околшовной зоне.

Т а б л и ц а 2

Результаты экспериментов и расчета при выборе параметров лазерной сварки

Режим обработки	Удельная мощность $W/F$	Заглубление фокуса $\Delta f$ , мм	Отношение ширины к глубине шва $\frac{b}{h}$	Скорость сварки, $v$	
				расчет.	эксперимен.
1. Импульсный					
2. Непрерывный: а) одноимодовый; б) многоимодовый					

Здесь  $F$  - поперечная площадь сварного шва.

#### У. Указания к отчету

При составлении отчета следует отразить расчетную схему процесса лазерной сварки. Результаты экспериментов по подбору состава газовой смеси при генерации одноимодового и многоимодового излучений представить в виде таблиц. Отразить анализ эффективности применений импульсного и одноимодового излучений при сварке (табл.2). Привести значения расхода защитного газа.

#### VI. Вопросы для самопроверки

1. Как влияет режим генерации (одноимодовый, многоимодовый, импульсно-периодический) установки на глубину проплавления при лазерной сварке?

2. Объясните причину вытянутой формы сварочной ванны при лазерной сварке и положительное влияние ее на формирование эксплуатационных свойств детали?

3. В чем заключается метод математического планирования экспериментов, как определяются уравнения регрессии?

4. В связи с чем микроструктура сварного шва имеет мелкозернистое строение? Каковы причины возникновения зон отпуска в околосшовной области?

5. Как получить гладкую поверхность сварного шва? Назвать способы защиты сварочной ванны от окислительных процессов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

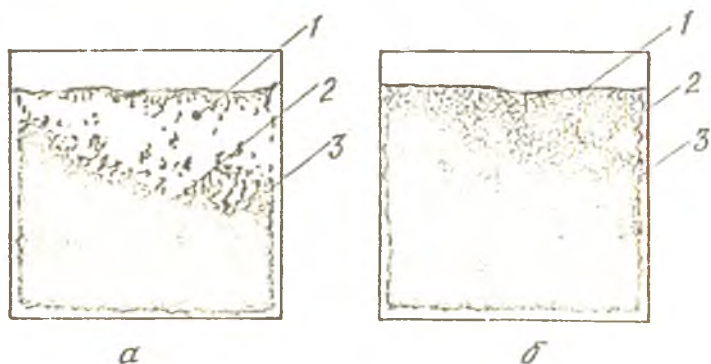
Цель работы – определить величину основных параметров лазерного упрочнения металлов (энергии импульса, мощности генерации излучения, скорости перемещения обрабатываемой детали, расстояния между фокусом и поверхностью обрабатываемой заготовки) при непрерывном и импульсном режимах обработки; ознакомиться с устройством плоских оптических элементов (фокусаторов), применяемых для улучшения свойств упрочненной поверхности деталей; изучить микроструктуры металлов в зоне термического влияния при лазерном упрочнении металлов.

### I. 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) (рис.3,а). 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 мелкозернистого мартенсита с некоторым количеством остаточного феррита. Микротвердость этой зоны составляет  $H_{50} = 8800...9200$  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 блсков, определен-





Р и с. 3. Микроструктура зоны обработки импульсным излучением лазера в образце из стали У8 (x200) (а) и при лазерном легировании поверхности  $Ti-4V$  (x200) (б): 1 - зона с высокой твердостью; 2 - зона с пониженной твердостью; 3 - исходная структура

ным образом ориентированных в пределах каждого зерна. Причем, внутри блоков наблюдается 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 плазменн-напыленного легирующего покрытия, обмазки типа "металл-металл" или непосредственным вдуванием легирующего порошка в зону расплавленного металла (рис.3,б).

При использовании обмазок высший эффект упрочнения углеродистых сталей получают легированием поверхности сочетанием  $Ti + Nb$ . Микротвердость  $H_{50} = 17600$  МПа при лазерной обработке на установке "Квант-16" сохраняется на глубине  $H = 200 \dots 220$  мкм. Примечание от-

дельных легирующих элементов, например титана, не приводит к однородности свойства по глубине заготовки: на поверхности  $H_{50} = 15900 \text{ МПа}$  на глубине  $H = 70 \text{ мкм}$   $H_{50} = 12900 \dots 14300 \text{ МПа}$ .

Глубину зоны упрочнения при импульсной лазерной обработке приближенно определяют по соотношению  $z = \sqrt{\frac{a\tau}{2\theta\sigma}}$ , где  $a$  - температуропроводность,  $\tau$  - длительность импульса,  $\theta = \frac{T_1}{T_0}$  - отношение температур  $T_1$ , при которой происходит прекращение изотензивного 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, обеспечивающей равномерное распределение плотности мощности излучения в световом пятне.

Значения температуры при лазерном упрочнении по глубине образца вычисляют по формулам /4/

$$T = \frac{2q\sqrt{a}}{\lambda} \left[ \frac{1}{\tau^2} i\Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right) - (\tau - \tau_0)^{\frac{1}{2}} i\Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a(\tau - \tau_0)}}\right) \right], \quad (5)$$

$$T = \frac{2q\sqrt{a_2\tau}}{\lambda_1} \left\{ i\Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} (-m)^n \left[ i\Phi\left(\frac{2n\ell + z}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) + i\Phi\left(\frac{2n\ell - z}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) \right] \right\}; \quad m = \frac{\lambda_2/\sqrt{a_2} - \lambda_1/\sqrt{a_1}}{\lambda_2/\sqrt{a_2} + \lambda_1/\sqrt{a_1}}, \quad (6)$$

где  $i\Phi(u)$  - дополнительная функция ошибок (прил. I),  $\tau$  - время протекания процесса воздействия,  $\tau_0$  - время импульса,  $q$  - плотность излучения,  $\ell$  - толщина покрытия,  $z$  - осевая координата,  $a_1, a_2$  - температуропроводность наружного слоя и основного металла,  $\lambda_1, \lambda_2$  - теплопроводность наружного слоя и основного металла. Уравнение (5) используется в расчетах процесса закалки; уравнение (6) - при лазерном легировании. Программа для ЭВМ СМ4, необходимая для проведения расчетов температур по соотношению (6), приводится в прил. 2.

## II. Описание лабораторной установки

При проведении лабораторной работы используется импульсная установка ГСС-ГСО1, имеющая энергию импульса  $E = 1 \text{ кДж}$ , и лазерная

установка "ЛАТУС-31" с непрерывным излучением мощностью  $W = 1,5$  кВт. Исследования проводятся на образцах из инструментальных сталей. Для изучения вопроса упрочнения сталей лазерным легированием применятся образцы с покрытиями, нанесенными плазменным или детонационным способом. Лабораторные установки (рис.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-31" снабжена специальным плоским оптическим элементом (фокусатором) (рис.4,б). Он фокусирует падающий поток лазерного излучения в отрезок прямой и представляет собой рельефную пластину, выполненную из меди методом гальванопластики.

### III. Домашнее задание

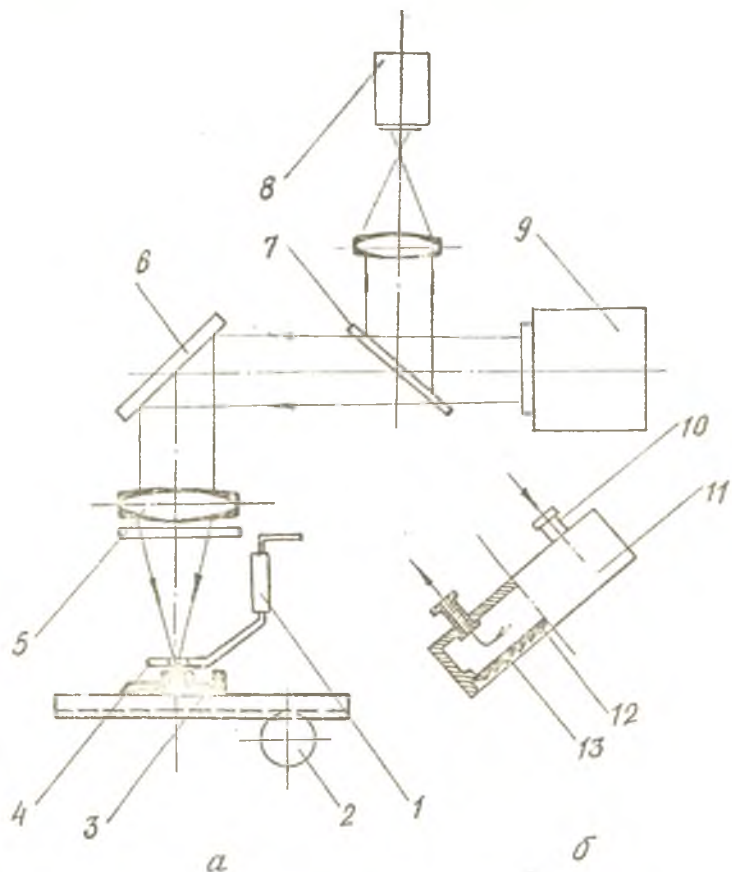
Рассчитать глубину упрочнения при лазерной обработке стали У8 на установке ГОС 1001. Определить распределение температуры на поверхности образца и границе зоны загалки. Расчет проводить с помощью выражения (5).

### IV. Лабораторное задание и методические указания

Изучить инструкцию по эксплуатации при работе на лазерных установках "ЛАТУС-31" и ГОС 1001. Освоить порядок включения и выключения установки, запуск и регулирование скоростью перемещателя заготовки, а также измерение мощности лазерного излучения. При установке фокусатора угол между оптической осью резонатора и плоскостью рельефа составляет  $45^\circ$ . Лабораторная работа выполняется в следующем порядке.

1. С помощью затемненного экрана выявить характер распределения плотности излучения на поверхности обрабатываемой детали. На установке "ЛАТУС-31" 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  $v$ , величины расстояния фокуса над поверхностью детали) при работе на установках ГОС 1001 и



Р и с. 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 - фокусирующая 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

"ЛАТУС-31". Теоретические значения температур по глубине образца при лазерном упрочнении вычислить по формулам (5),(6) 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.

#### У. 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 термобработке. Привести значения расхода защитного газа.

#### У1. 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 механизмы сцепления легированного слоя и основного материала.
5. Какие способы контроля за качеством деталей, упрочненных лазером, используются в производстве?

#### Библиографический список

1. Абельсмитов Г.А. и др. Мощные CO<sub>2</sub>-лазеры и их применение в технологии.-М.:Наука, 1984.- 104 с.
2. Коваленко В.С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров.-Киев:Вища школа, 1977.- 144 с.
3. Кристал М.А. и др. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера.-М.:Металлургия, 1973.- 192 с.

4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник /Н.Н.Рыкалин и др. - М.:Металлургия, 1973.- 192 с.

5. Геди Д. Промышленные технологические лазеры и их применение.- М.:Мир, 1981.- 638 с.

6. Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка в машиностроении.-М.: Машиностроение, 1975.- 295 с.

Приложение I

Значения модифицированной функции Бесселя второго рода  
нулевого порядка  $K_0(u)$

$u$	$\frac{2}{\pi} K_0(u)$	$u$	$\frac{2}{\pi} K_0(u)$	$u$	$\frac{2}{\pi} K_0(u)$
0	—	0,2	1,116	1,2	0,203
0,02	2,565	0,3	0,874	1,4	0,155
0,04	2,124	0,4	0,710	1,6	0,120
0,05	1,867	0,5	0,589	1,8	0,093
0,08	1,685	0,6	0,495	2,0	0,073
0,10	1,545	0,7	0,421	2,2	0,057
0,12	1,431	0,8	0,360	2,4	0,045
0,14	1,335	0,9	0,310	2,6	0,036
0,16	1,253	1,0	0,268	2,8	0,028
0,18	1,180	1,1	0,233	3,0	0,022

Значения дополнительной функции интеграла ошибок

$$i\Phi(u) = \frac{1}{\pi} e^{-u^2} - u\Phi^*(u); \quad \Phi^*(u) = \frac{2}{\pi} \int_0^u e^{-u^2} du$$

$u$	$\Phi^*(u)$	$u$	$\Phi^*(u)$	$u$	$\Phi^*(u)$
0	0	1,1	0,820	2,1	0,702
0,1	0,112	1,2	0,910	2,2	0,814
0,2	0,223	1,3	0,934	2,3	0,886
0,3	0,329	1,4	0,952	2,4	0,931
0,4	0,428	1,5	0,966	2,5	0,959
0,5	0,521	1,6	0,976	2,6	0,976
0,6	0,604	1,7	0,9838	2,7	0,985
0,7	0,678	1,8	0,991	2,8	0,992
0,8	0,742	1,9	0,998	2,9	0,996
0,9	0,797	2,0	0,999	3,0	0,997

Программа для вычисления распределения температур по соотношению (6) с помощью ЭВМ СМ-4 \*

```

      P=1.0
      C=0.001
      T1=1.0
      R=0.0
      PL=0.0
      FL=0.0
      S=0.0
      A=0.0
      P=0.0
      CALL PINT(0,A,10,1,0,0,0)
      PRINT 6,FL
6     FOR J1=(1,10)
      S=S+(R-PL)*T1
      I=(3-R)*C*PL*(T1+0.5)
      A=PL*(T1+0.5)
      P=PL*(T1-0.5)
      CALL PINT(0,A,10,1,0,0,0)
      CALL PINT(0,B,10,1,0,0,0)
      PRINT 12,P
12    FORMAT(1SS=1,F14.10)
100   CONTINUE
2     DO 200 J=1,10
      SFP(J)=0
      SFNU(J)=0
      DO 200 JJ=1,13
      SFP(J)=SFP(J)+FNU(J,JJ)
      SFNU(J)=SFNU(J)+FNU(1,JJ)
200   CONTINUE
      PRINT 14,SFP
      PRINT 10,SFNU
14    FORMAT(10F14.0)
10    FORMAT(10F14.0)
      DO 300 JJ=1,10
      T(J)=1/PL*(FL(J1)+R*(SFP(J1)+SFNU(J1)))
300   CONTINUE

```

\* Программа составлена инженером Г.А.Никитиной.



```

PRINT D,T
FOR J=1 TO IT=1:FOR K=1 TO
  FOR
    T=H*(D+T)+H*(T(X(X),Y),T)
    Y=L+D*(Y+T)
    D=H*(A+X+Y)
    T=H
  NEXT
  S=(D*(Y+T)+T*(X+Y))/2
  FOR I=1 TO PL
    X=X+H*(X+T)
    Y=Y+H*(Y+T)
    F=T*(X+Y)
    S=S+T*(X+Y)
  NEXT I
  F1=(1+Y/3+T*(X+Y)+F*(X+Y))/3
  D=D+H*(F1)
  RETURN
END

FOR J=1 TO IT=1:FOR K=1 TO
  FOR I=1 TO PL
    F=EXP(-((F1+D)*H+.5)*H)
    T=H*(F)
  NEXT I
  RETURN
END

FOR J=1 TO IT=1:FOR K=1 TO
  FOR I=1 TO PL
    F=EXP(-((F1+D)*H+.5)*H)
    T=H*(F)
  NEXT I
  RETURN
END

```

Обозначение идентификаторов:

$H$  - шаг интегрирования;

$T(j1) = i\Phi(u)$ ;

$S_m = m$ ;

$x_0 = \frac{z}{\sqrt{\sigma_1}}$ ;

$PL = n$ .

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 4. Газолазерная резка материалов.....	3
Лабораторная работа 5. Определение технологических параметров лазерной сварки металлов.....	9
Лабораторная работа 6. Определение технологических параметров лазерного упрочнения.....	16

Составитель Василий Иванович М о р д а с о в

## ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Редактор Л.Б а л ь к о в а  
Техн.редактор Н.К а л е н ю к  
Корректор А.П.З а х а р д я е в а

Подписано в печать 23.10.87. Формат 60x84 I/16.  
Бумага оберточная белая. Печать оперативная.  
Усл. п.л. I,62. Уч.-изд.л. I,5. Т.200 экз.  
Заказ 511. Бесплатно.

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

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