

УНИВЕРСИТЕТ
ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА
В МАШИНОСТРОЕНИИ

А. А. МАЛАЩЕНКО, А. В. МЕЗЕНОВ

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА
МЕТАЛЛОВ

*Допущено научно-методическим советом в качестве
учебного пособия для слушателей заочных курсов
повышения квалификации ИТР по технологии и
оборудованию сварочного производства*



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1984

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Физико-технические основы лазерной сварки металлов	3
Структурные схемы лазерных сварочных установок и их параметры	5
Формирование лазерных пучков для сварки	8
Отражение лазерного излучения при сварке	10
Нагрев и плавление металла при сварке	14
Тепловой расчет процесса сварки	15
Повышение эффективности и качества лазерной сварки	22
Оценка возможных источников нестабильного режима сварки	23
Производительность лазерной сварки	24
Снижение энергозатрат путем многократного возврата отраженного излучения	25
Компенсация изменений оптических свойств материала при сварке с возвратом отраженного излучения	30
Стабилизация поперечного размера сфокусированного пучка оптической системой КФО	32
Особенности лазерной сварки осесимметричных соединений	34
Примеры промышленного использования лазерной сварки	36
Автоматизация лазерной сварки	38
Общие принципы построения АСУ ТПС	39
Анализ математической модели процесса импульсной лазерной сварки	40
Построение алгоритма управления процессом лазерной сварки	42
Автоматическая перестройка параметров лазерного излучения	42
Вопросы для самопроверки	44
Рекомендации по изучению и практическому использованию материала на производстве	45
Список литературы	46

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроения и приборостроения неразрывно связано с разработкой и внедрением прогрессивных технологических процессов, основанных на новейших достижениях науки и техники. К числу таких процессов принадлежит лазерная обработка материалов.

Процессы лазерной технологии относительно просты в осуществлении, легко управляемы, а высокая пространственно-временная локализованность излучения и отсутствие механического воздействия пучка лазера на объект обработки позволяют реализовать различные уникальные операции: сварку, резку, скрайбирование, поверхностное упрочнение и другие операции, осуществляемые на легко деформируемых изделиях и деталях, в том числе и вблизи теплочувствительных элементов.

Однако широкое использование лазеров в промышленности и, в частности для сварки, зависит от решения ряда проблем, к которым в первую очередь следует отнести необходимость разработки высококачественных и производительных процессов, удовлетворяющих условиям их автоматизации с управлением от ЭВМ. Производительность и технологические возможности лазеров, особенно при сварке энергоемких металлов, ограничиваются относительно низким КПД процесса. При лазерной сварке многих изделий машино- и приборостроения возникает проблема загрязнения изделия частицами свариваемых металлов. В книге приведены некоторые решения названных проблем.

Учебное пособие представит интерес как для специалистов, впервые знакомящихся с технологией лазерной сварки, так и для специалистов, занимающихся разработкой и внедрением наиболее эффективных методов лазерной материаловой обработки.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

Лазерная сварка относится к термическому классу процессов сварки, для которых получение неразъемного соединения достигается местным расплавлением материалов, с последующей кристаллизацией расплава. При затвердевании расплава между атомами материалов устанавливаются прочные химические связи, соответствующие природе соединяемых материалов и типу их кристаллической решетки.

Источником тепловой энергии для активации поверхности соединяемых твердых материалов при сварке лазером служит энергия излучения, поглощаемая материалами в зоне воздействия лазерного пучка.

В настоящее время лазерную сварку, применяемую в прибор- и машиностроении, можно условно разделить на три вида: микросварка (соединение элементов с толщиной или глубиной проплавления менее 100 мкм), мини-сварка (глубина проплавления 0,1—1 мм) и макросварка (глубина проплавления более 1 мм).

Для первых двух видов сварки, получивших наибольшее распространение в промышленности, используют преимущественно импульсные лазеры с чрезвычайно удачным сочетанием свойств излучения, необходимых для осуществления локальной сварки. Для получения литой зоны с заданными размерами требуется определенная энергия. Чем выше плотность мощности пучка в зоне нагрева, тем меньше необходимо времени для ввода этой энергии и расплавления требуемого объема металла, и тем меньше размеры зоны термического влияния (ЗТВ). Сочетание коротких импульсов излучения с высокой концентрацией энергии в малом пятне облучения — большие преимущества лазерной импульсной сварки, особенно при соединении легко деформируемых деталей. Для обеспечения технической чистоты импульсную сварку чаще всего осуществляют без значительного перегрева материала, т. е. исключая его интенсивное испарение. В этом случае передача теплоты в глубь свариваемых деталей происходит в основном за счет теплопроводности (теплопроводностный режим сварки).

В связи с промышленным выпуском непрерывных лазеров в последнее время получает развитие и лазерная макросварка. Механизм формирования сварного шва при воздействии мощного непрерывного излучения (сотни — тысячи ватт) во многом подобен механизму формирования при электронно-лучевой сварке и характеризуется в основном газодинамическими явлениями в зоне расплава. При сварке излучением мощного (до 4 кВт) CO_2 -лазера в головной части ванны образуется глубокий парогазовый канал, что позволяет сварить различные материалы большой толщины с узкой зоной проплавления. Образование парогазового канала обуславливает высокую эффективность использования лазерного пучка, который многократно поглощается на стенках канала вследствие многочисленных переотражений. При сварке в режиме глубокого проплавления в шве часто образуются несплошности, которые могут быть уменьшены расфокусировкой (расположением фокальной плоскости над поверхностью материала).

Процесс сварки излучением непрерывных и импульсно-периодических лазеров мощностью до 1 кВт не связан с интенсивным испарением материала из сварочной ванны и во многом подобен теплопроводностному режиму сварки. Глубина проплавления при этом несколько превышает глубину проплавления при сварке импульсными твердотельными лазерами и составляет 0,5 — 1,5 мм.

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНЫХ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Процесс лазерной сварки происходит по следующей схеме: излучение лазера, как правило, направляется на фокусирующую систему, после которой формируется в пучок меньших размеров и попадает на свариваемые детали, где частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается, вызывая его нагрев и плавление.

Для сварки металлов широкое применение нашли следующие типы технологических лазеров: импульсные, в качестве активных сред которых используются стекло или алюмоиттриевый гранат (АИГ) с неодимом; непрерывные твердотельные АИГ-лазеры и газовые СО₂-лазеры, активной средой которых служит молекулярный углекислый газ в смеси с азотом и гелием.

При промышленном использовании лазеры дополнительно содержат различные функциональные устройства, которые вместе с лазером составляют технологическую установку. Независимо от типа лазера сварочные установки чаще всего состоят из ряда аналогичных блоков (рис. 1). Лазер 1 генерирует излучение 2, которое формируется оптической системой 3 в пучок с определенными пространственными характеристиками и направляется на свариваемый объект 4.

С помощью микроскопа 5 возможны визуальный контроль положения объекта сварки, наблюдение за ходом процесса сварки и оценка его результатов. Для наблюдения можно также использовать специальный экран или телемонитор. Механизм 6 обеспечивает фиксацию свариваемого объекта на рабочей позиции, его перемещение и замену. Установка может быть снабжена программным устройством 7, управляющим механизмом 6 и параметрами лазера. Датчик 8 предназначен для контроля параметров излучения, а датчик 9 — параметров технологического процесса (температуры зоны сварки, яркости свечения плазменного факела, энергии отраженного излучения и т. п.).

Сигналы с датчиков 8 и 9 поступают в элементы управления лазером непосредственно или через программное устройство, передавая информацию, необходимую для автоматического управления процессом сварки. Некоторые процессы сварки требуют подачи в рабочую зону той или иной технологической среды, а также отсоса из рабочей зоны продуктов сгорания материалов. Для этих

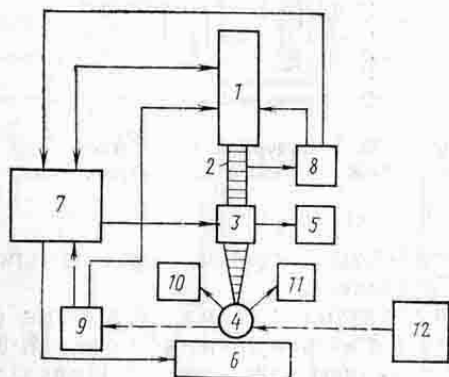


Рис. 1. Структурная схема лазерной сварочной установки

целей служат соответствующие устройства 10 и 11. Для повышения КПД процесса сварки металлов установка может быть снабжена устройством 12 введения дополнительной энергии (генератор ультразвука, устройство возврата отраженного излучения и т. п.). Кроме перечисленных узлов установка может содержать устройство сканирования лазерного пучка или его точного наведения на объект сварки (на схеме не показано).

Структурная схема твердотельного лазера для сварки (рис. 2) содержит блок питания 1, обеспечивающий импульсный или непрерывный режим горения лампы накачки 2, которая вместе с осветителем 3, активным элементом 4 и оптическим резонатором 5 составляет излучатель 6. Система управления 7 осуществляет контроль и регулирование параметров режима работы блока питания.

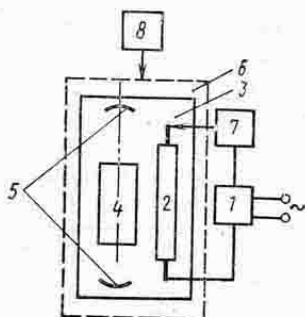


Рис. 2. Структурная схема твердотельного лазера для сварки

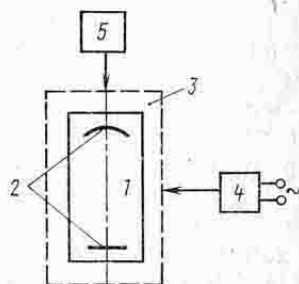


Рис. 3. Структурная схема CO_2 -лазера для сварки

Система охлаждения 8 служит для отвода теплоты от элементов излучателя.

Структурная схема CO_2 -лазера (рис. 3) содержит рабочую камеру 1 с активной газовой средой. Камера и оптический резонатор 2 составляют излучатель 3. Импульсный или непрерывный газовый разряд, ведущий к возбуждению активной среды, создается источником питания 4, содержащим, как правило, элементы управления параметрами излучения. Рабочая камера обычно охлаждается с помощью устройства охлаждения 5. Лазеры с прокачкой газовой среды имеют также систему прокачки газа и форвакуумный насос для откачки рабочей камеры.

Более подробно с устройством и функционированием технологических лазеров, в том числе лазеров для сварки, можно ознакомиться в работах [6, 7].

Наиболее важным параметром, характеризующим тепловое воздействие излучения на материал, является плотность мощности излучения лазера $q_{\text{л}}$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$; $\text{Вт}/\text{см}^2$), которая связана с другими параметрами излучения следующей зависимостью:

$$q_{\text{л}} = P_{\text{л}}/S = E_{\text{л}}/(\tau S), \quad (1)$$

где $P_{\text{л}}$ — полная мощность излучения, Вт; S — площадь облучения материала, м^2 (см^2); τ — длительность воздействия излучения, $E_{\text{л}}$ — энергия излучения, Дж.

Формула (1) в общем случае выражает приближенную зависимость между параметрами излучения, она точна лишь для излучения с равномерным распределением мощности во времени и в пятне облучения.

Для сварки обычно используют излучение лазеров, сформированное в зоне обработки материала в сплошное круговое пятно радиусом r_0 . В этом случае площадь пятна облучения $S = \pi r_0^2$ и формула (1) принимает вид

$$q_{\text{л}} = P_{\text{л}} / (\pi r_0^2) = E_{\text{л}} / (\pi r_0^2 \tau). \quad (1)$$

Основные технические характеристики отечественных сварочных установок, построенных на базе импульсных твердотельных лазеров, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики лазерных сварочных установок
(длина волны излучения 1,06 мкм)

Параметр	Тип лазерной установки					
	„Квант-10“	„Квант-12“	„Квант-15“	„Квант-16“	„Квант-17“	„Квант-30“
Активный элемент	Стекло: Nd	АИГ: Nd	АИГ: Nd	Стекло: Nd	АИГ: Nd	АИГ: Nd
Номинальная энергия импульса излучения, Дж	15	3	8	30	3×2	2
Максимальная средняя мощность излучения, Вт	15	30	80	10	40×2	16
Максимальная частота повторения импульсов, Гц	1	20	20	1	20	20
Длительность импульса излучения, мс	2—7	1,5 2 2,5 4	1,5 2 2,5 4	2—7	1,5 2 2,5 4	0,1—5
Регулируемый диаметр пятна облучения, мм	0,4—1,4	0,5—1	0,5—1	0,4—1,4	0,5—1	0,05—0,3
Глубина проплавления по никелю, мм	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	—
Конфокальный параметр В, мм	670	780	730	670	720	—

Для сварки непрерывным пучком промышленностью освоен выпуск твердотельных лазеров на АИГ («Квант-50», ЛТН-102, ЛТН-103) с мощностью излучения 100—250 Вт и газовых CO_2 -лазеров: УЛН-1,2 (1,2 кВт), УЛГ-2.01 (2 кВт), УЛГН-5.02 (5 кВт).

Для передачи энергии излучения лазера к месту сварки, формирования пучка с заданной плотностью мощности и конфигурацией, регулирования параметров излучения служат оптические системы, состоящие в общем случае из фокусирующих, отражающих и преломляющих оптических элементов.

В сварочных установках наиболее распространена оптическая система, состоящая из коллиматора и фокусирующего объектива (рис. 4). Сферические линзы 1 и 2 составляют коллиматор, служащий для уменьшения и изменения расходимости лазерного пучка, что достигается относительным смещением линз вдоль оси Z . Объектив 3 служит для фокусировки лазерного пучка в зону сварки. Применение коллиматора позволяет уменьшить размеры сфокусированного пучка и реализовать достаточно удобный способ изменения размеров пятна облучения путем перемещения линзы 1 или 2 при неподвижном объекте сварки.

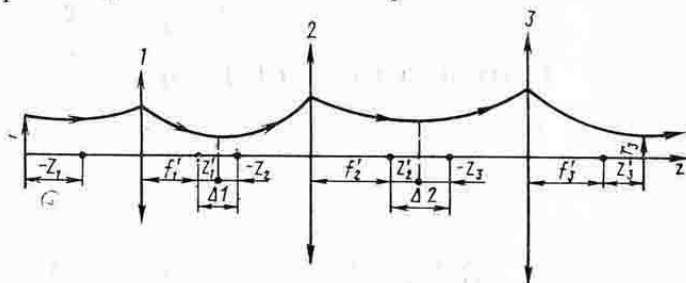


Рис. 4. Оптическая система для формирования пучка в лазерных сварочных установках

Для анализа закономерностей формирования лазерных пучков оптической системой коллиматор — фокусирующий объектив (КФО) следует использовать дифракционную теорию преобразования пучков [5]. Более простые методы геометрической оптики не позволяют проанализировать осевое смещение лазерного пучка и, кроме того, дают неверное представление о его параметрах после трансформации.

В литературе [5] на основе теории дифракции Френеля рассмотрено преобразование лазерных пучков одиночной линзой (объективом) и отдельной коллимирующей системой. Применение результатов этого анализа к совокупному действию оптической системы КФО на лазерный пучок приводит к следующим аналитическим выражениям:

$$B_3 = \frac{2f'_1 f'_3}{f'_2} \frac{B}{4z_1^2 + B^2} \times \frac{4(z_1 + \Delta_1 A_1)^2 + B^2}{4(z_1 + \Delta_1 A_1)^2 + B^2 + 4\gamma_1^4 \Delta_2^2 + 8\gamma_1^2 \Delta_2 (z_1 + \Delta_1 A_1)} ; \quad (3)$$

$$r_3 = r \sqrt{B_3/B}; \quad (4)$$

$$z_3' = (z_2' - \Delta_2) 4 (f_3')^2 \gamma_1^4 / [4 \gamma_1^4 (z_2' - \Delta_2)^2 + B^2], \quad (5)$$

где B и B_3 — соответственно конфокальные параметры* лазерного пучка до преобразования и после преобразования линзами 1, 2 и 3 (сфокусированный пучок);

$$A_1 = 4 (z_1^2 + B^2) / 4 (f_1')^2; \quad z_2' = (z_1 + \Delta_1 A_1) / \gamma_1^2;$$

$$\gamma_1^2 = [4 (z_1 + \Delta_1 A_1)^2 + B^2] / 4 (f_1')^2 A_1.$$

Остальные обозначения в формулах (3) — (5) даны в соответствии с обозначениями на рис. 4 и с учетом принятого в оптике правила знаков.

Используя эти выражения по известным параметрам пучка в излучателе (B , r) и заданным характеристикам системы КФО (z_1 , f_1' , Δ_1 , f_2' , f_3' , Δ_2), можно рассчитать размер сфокусированного пучка в перетяжке r_3 и положение перетяжки z_3' (сечение пучка с минимальными поперечными размерами) относительно объектива 3.

Контуры лазерного пучка, распространяющегося в свободном пространстве (огibaющая каустики пучка), могут быть рассчитаны по формуле

$$r_0(z) = r_0(0) \sqrt{1 + 4z^2/B_0^2}, \quad (6)$$

где $r_0(z)$ — радиус пучка на расстоянии z от его перетяжки; $r_0(0)$ — радиус пучка в перетяжке; B_0 — конфокальный параметр рассматриваемого пучка.

Значение $r_0(0)$ легко найти полуэмпирически, определив экспериментально $r_0(z)$ в любом сечении пучка за резонатором и вычислив $r_0(0)$ по формуле (6).

Значение параметра B можно рассчитать по формуле

$$B = \sqrt{L(2\rho_3 - L)}, \quad (7)$$

справедливой для «пустого» симметричного резонатора, образованного сферическими зеркалами с радиусом кривизны ρ_3 , находящимися на расстоянии L друг от друга.

Значения параметра B для некоторых сварочных установок приведены в табл. 1.

При использовании формул (3) — (6) необходимо также знать положение перетяжки преобразованного лазерного пучка, т. е.

* Любой оптический резонатор, формирующий лазерный пучок, может быть приведен к симметричному конфокальному резонатору, формирующему пучок с такими же характеристиками. Конфокальный параметр лазерного пучка соответствует радиусу кривизны эквивалентного резонатора, составленного из одинаковых зеркал, фокальные точки которых совмещены [10].

положение перетяжки в резонаторе. Такие сведения могут быть получены из работ [5, 10]. Перетяжка лазерного пучка, сформированного симметричным резонатором, находится в центре резонатора, а сформированного плоскосферическим резонатором — на поверхности плоского зеркала.

Анализ уравнений (3) — (6) позволяет сформулировать некоторые практические рекомендации по настройке оптических систем сварочных установок.

1. Положение перетяжки сфокусированного пучка z_3' в общем случае не совпадает с положением фокальной плоскости фокусирующего объектива. На практике $z_3' > 0$, т. е. минимальное сечение пучка располагается за задним фокусом объектива.

2. Уменьшение поперечных размеров сфокусированного пучка может быть достигнуто либо увеличением расстояния z_1 , либо увеличением оптического интервала Δ_2 и деколлимацией пучка ($|\Delta_1| \gg 0$). Во всех случаях необходимо исключать возможность виньетирования пучка на элементах оптической системы 1 и 3.

3. Вблизи перетяжки сфокусированного пучка существует участок пучка, поперечные размеры которого мало отличаются от размеров перетяжки. Длину l такого симметричного относительно перетяжки квазицилиндрического участка каустики пучка можно рассчитать по формуле

$$l = 2z, \quad (8)$$

где z определяется из выражения

$$r_3^2(z)/r_3^2(0) = \varphi = 1 + 4z^2/B_3^2; \quad (9)$$

$r_3(z)$ — радиус пучка на расстоянии z от перетяжки; $r_3(0)$ — радиус пучка в перетяжке; φ — коэффициент, характеризующий форму каустики квазицилиндрического участка.

Поскольку $B_3 \sim r_3^2$, а $l \sim B_3^3$, то $l \sim r_3^6$, т. е. увеличение длины квазицилиндрического участка может быть достигнуто только за счет увеличения поперечных размеров сфокусированного пучка, например применением более длиннофокусного объектива или уменьшением значений параметров z_1 и Δ_2 .

ОТРАЖЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ

Процесс отражения лазерного излучения от зоны сварки металла можно охарактеризовать коэффициентом отражения R' , представляющим собой отношение доли отраженного от гладкой элементарной площадки излучения к падающему, при условии, что излучение распространяется в непоглощающей и нерассеивающей среде. Интегральные отражающие свойства всего участка облучения характеризуются коэффициентом $\bar{R}'$.

Измеряемый коэффициент отражения R в общем случае не тождествен коэффициентам R' и $\bar{R}'$, так как падающее и отраженное излучения на пути между измерительным прибором и метал-

лом могут частично рассеяться и поглотиться продуктами разрушения металла, а также частично поглотиться металлом в процессе вторичных актов переотражения на микро- и макронеоднородностях участка облучения.

Отличие измеряемого коэффициента R может быть также обусловлено дополнительным поглощением излучения оксидной пленкой металла, неравномерностью прогрева участка облучения и т. п.

Учитывая, что при сварке ($q_{\text{л}} = 10^5 \div 10^6$ Вт/см²) эффектами рассеяния и поглощения лазерного излучения в плазменном облаке можно пренебречь, измерение коэффициента отражения R позволяет оценить в первом приближении истинную долю поглощенного излучения: $A = 1 - R$.

Измерение характеристик отраженного излучения при сварке металлов может быть выполнено методом зеркальной полусферы, имеющей отверстие для ввода лазерного пучка.

При расположении облучаемой мишени вблизи оптического центра такой полусферы отраженное мишенью излучение будет перефокусировано полусферой в пятно, сопряженное с пятном излучения, сфокусированным на мишень. Приемник, регистрирующий отраженное излучение располагают так, чтобы центр его приемной площадки (входного зрачка) совмещался с центром перефокусированного пятна излучения. Схема такой установки и методика эксперимента для исследования характера отражения лазерного излучения при импульсной сварке металлов рассмотрены в работе [4].

Эксперимент позволяет для каждого случая облучения мишени получить осциллограммы изменения мощности падающего пучка и соответствующие изменения мощности зеркально и диффузно отраженного излучения. Зеркально отраженным излучением считается излучение, поступающее в апертуру фокусирующего объектива, а диффузно отраженным — излучение, отраженное на поверхность полусферы. Значение измеряемых коэффициентов отражения в каждый момент времени определяют как отношение мгновенных интенсивностей соответствующего отраженного и падающего излучений. Таким образом находят диффузную $R_{\text{д}}(t)$ и зеркальную $R_{\text{з}}(t)$ доли отражения. Суммарный коэффициент отражения определяют как $R(t) = R_{\text{д}}(t) + R_{\text{з}}(t)$.

На рис. 5 приведены осциллограммы мощности падающего и составляющая отраженного излучения, полученные при обработке различных мишеней. Здесь же представлены вычисленные временные зависимости коэффициентов отражения. Источником излучения в эксперименте служила лазерная сварочная установка «Квант-10».

На рис. 6 показаны изменения коэффициентов суммарного отражения $R(t)$ мишеней из различных металлов и сплавов при обработке их в режимах, характерных для сварки.

Различие в изменении хода кривых $R_{\text{з}}$, $R_{\text{д}}$, R , $P_{\text{д}}$ в начале облучения объясняется прежде всего различием оптических свойств

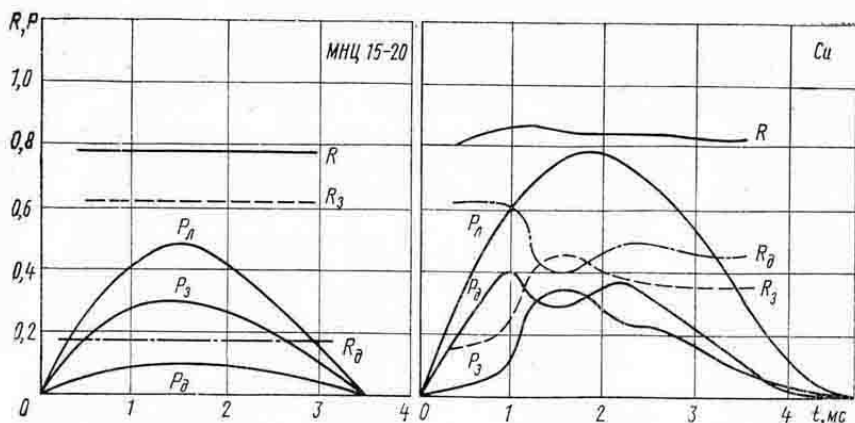


Рис. 5. Осциллограммы изменения мощности падающего пучка P_d , зеркальной P_3 и диффузной P_d доли отражения для сплава МНЦ-20 и меди. Коэффициенты отражения $R(t)$, $R_3(t)$, $R_d(t)$ рассчитаны по осциллограммам

поверхности в исходном состоянии. По мере нагрева материала с шероховатой поверхностью R_3 растет, а R_d , как правило, уменьшается из-за образования отдельных расплавленных участков поверхности металла (микрзеркал). Неоднородность плавления может быть обусловлена неравномерностью распределения интенсивности излучения в зоне обработки или неоднородностью оптических и теплофизических свойств поверхности. Суммарное отражение при этом меняется слабо. В некоторых случаях наблюдается увеличение R , что можно объяснить, например, модификацией поверхностного слоя обрабатываемого материала при его лазерном нагреве и плавлении.

Развитие процесса плавления приводит к тому, что коэффициент зеркального отражения достигает максимального значения и затем начинает уменьшаться. При этом коэффициент диффузного отражения ведет себя противоположным образом. Такое поведение составляющих коэффициента отражения хорошо объясняется изменением формы поверхности расплавленного металла с образованием лунки в процессе плавления.

Суммарное отражение при этом также уменьшается, что, видимо, обусловлено увеличением поглощения излучения в лунке в результате повторного отражения и значительным перегревом поверхностного слоя расплавленного металла.

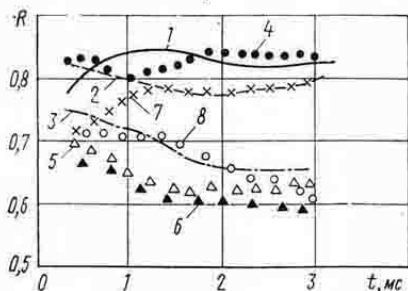


Рис. 6. Изменения коэффициента отражения R во времени в режиме нормального плавления поверхности различных металлов:
1 — Cu; 2 — Al; 3 — Ni; 4 — МН19;
5 — 47НД; 6 — сталь; 7 — МНЦ 15-20; 8 — 29НК

К концу действия импульса изменение составляющих коэффициентов отражения замедляется. Причем в ряде случаев наблюдается повышение коэффициента суммарного отражения, что соответствует заполнению лунки и охлаждению расплава к концу действия импульса.

Характер пространственного распределения отраженного излучения в различные моменты времени импульса также может быть исследован методом полусферы. В этом случае внутри полусферы устанавливают осесимметричные светопоглощающие экраны, обеспечивающие перефокусировку излучения, отражаемого мишенью в телесные углы, соответствующие плоским углам 2θ .

На рис. 7 приведены результаты измерений отношения мощности излучения $P(2\theta)$, отражаемого в угол 2θ , к мощности излучения $P(180^\circ)$ при облучении плоских алюминиевых мишеней с гладкой (а) и матированной (б) поверхностями для различных моментов времени. Наиболее резкое изменение в ходе кривых наблюдается при малых углах ($2\theta \leq 40 \div 60^\circ$). Наибольшие различия между

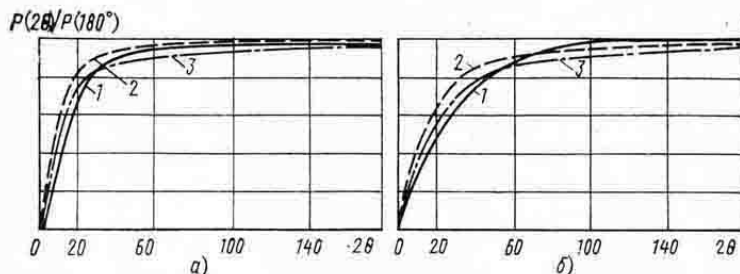


Рис. 7. Зависимости $P(2\theta)/P(180^\circ)$ для различных моментов времени плавления алюминиевых мишеней:
1—1 мс; 2—2 мс; 3—3 мс

значениями $P(2\theta)/P(180^\circ)$ в зависимости от момента времени наблюдаются при углах $2\theta = 20 \div 60^\circ$. При $2\theta > 60 \div 80^\circ$ рост кривых замедляется.

Приведенные результаты исследования характеристик отраженного при сварке металлов лазерного излучения позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Соотношения между компонентами отражения и их временные зависимости определяются начальным состоянием поверхности и характером процесса сварки. В соответствии с динамикой изменения коэффициентов $R_3(t)$ и $R_d(t)$ можно проследивать динамику изменения оптико-физических свойств поверхностного слоя, а также динамику плавления металла в участке облучения.

2. Коэффициент суммарного отражения излучения лазеров от зоны сварки различных металлов сравнительно велик ($R = 0,6 \div 0,9$).

3. Коэффициент суммарного отражения в течение действия импульса излучения при сварке (включая нагрев без плавления, сильное плавление и остывание) изменяется не более чем на 10%, что соответствует изменению доли поглощенного излучения не более чем в 1,5 раза.

4. Основная доля излучения, отраженного при сварке деталей с плоской поверхностью, распространяется в конус с плоским углом при вершине $\sim 90^\circ$.

НАГРЕВ И ПЛАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ

Теплофизическая стадия процесса воздействия лазерного излучения на металл заключается в передаче энергии поглощенного излучения $E = (1-R)E_{\text{л}}$ колебаниям решетки металла, его нагреве, плавлении, испарении и остывании нагретой зоны после окончания действия излучения.

Поглощение оптического излучения (излучение с длиной волны $\lambda = 0,1 \div 1000$ мкм) металлами происходит в слое толщиной $\delta = 10^{-6} \div 10^{-5}$ см, соответствующей глубине проникания излучения в металл. Поглощенная в поверхностном слое металла энергия излучения передается другим, более холодным, частям тела с помощью различных видов теплопроводности, из которых для металлов существенной является электронная. Начиная с момента времени $t \approx 10^{-9} \div 10^{-8}$ с, размер прогретой зоны — ЗТВ подчиняется закону Фурье, увеличиваясь пропорционально $\sqrt{a\tau}$, где a — температуропроводность металла, τ — длительность воздействия излучения. Температуропроводность связана с другими теплофизическими характеристиками твердого тела соотношением $a = k/(\rho c)$, где k — теплопроводность; ρ — плотность; c — удельная теплоемкость материала.

Из этого следует, что процесс нагрева непрерывным или импульсным излучением с длительностью $\tau > 10^{-9}$ с металлических деталей, характерный размер которых превосходит глубину проникания излучения δ , может быть описан в рамках задач теплопроводности с поверхностным источником теплоты, который «следит» за изменением потока излучения с пренебрежимо малым временем запаздывания ($10^{-9} - 10^{-8}$ с) и нагревает металл.

По мере нагрева металла поверхностным источником теплоты температуры различных точек ЗТВ повышаются и как будет показано ниже, достигают максимальных значений на поверхности облучения. При достижении на поверхности материала температуры плавления $T_{\text{пл}}$ начинается процесс его плавления. Дальнейший подвод энергии лазерного излучения обуславливает продвижение изотермы плавления в глубь тела и рост температуры его поверхности: $T > T_{\text{пл}}$. От этой температуры зависит глубина прогрева и проплавления, а также степень загрязнения свариваемых деталей продуктами испарения материала, так как интенсивность испарения твердого тела увеличивается с ростом его температуры.

Верхнюю допустимую температуру нагрева металлов при лазерной сварке без существенного загрязнения продуктами испарения материала обычно связывают с его температурой кипения $T_{\text{к}}$, при достижении которой с поверхности и в приповерхностном слое начинается интенсивное парообразование, движение и выплеск части расплава, что обусловлено наличием газовых раковин,

пор, неметаллических включений и других дефектов материала, служащих активными зародышами парообразования и вскипания.

Для инженерных оценок и расчетов процесса лазерной сварки металлов интерес представляют прежде всего интегральные характеристики стадии нагрева и плавления: распределение температуры в ЗТВ, глубина прогрева и глубина проплавления, верхняя температурная граница и др.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА СВАРКИ

Решение задач нагрева металлов лазерным излучением при сварке сводится к отысканию решений системы уравнений, состоящей в общем случае из дифференциального нелинейного уравнения теплопроводности и нелинейных краевых условий с поверхностным источником теплоты. Менее корректно, но значительно проще, теплофизика лазерной сварки рассматривается при линеаризации этих уравнений. Несмотря на ряд допущений, этот подход дает удовлетворительное качественное, а во многих случаях и количественное представление о стадии нагрева.

Линейная задача нагрева полубесконечного тела (приближение полубесконечного тела применимо, например, для пластины конечной толщины H , если $H \gg \delta$ и $H \gg \sqrt{a\tau}$) может быть сформулирована следующим образом (рис. 8):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} &= \Delta^2 T(r, z, t) \\ -k \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} &= \begin{cases} (1-R)q_{\lambda}(r, t), & r \leq r_0 \\ 0 & r > r_0 \end{cases} \\ T(r, z, 0) &= T(\infty, z, t) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

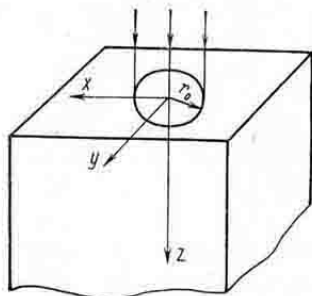


Рис. 8. Схема процесса нагрева полубесконечного тела лазерным пучком

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; ось z направлена в глубь тела из центра поверхностного кругового источника теплоты радиусом r_0 (радиус пятна лазерного излучения); R — коэффициент отражения металла в зоне воздействия лазерного излучения; $q_{\lambda}(r, t)$ — плотность мощности излучения с осесимметричным распределением потока на поверхности тела. Реальное пространственно-временное распределение излучения $q_{\lambda}(r, t)$ обычно аппроксимируется различными функциями, например:

$$q_{\lambda}(r, t) = \text{const}; \quad (11)$$

$$q_{\lambda}(r) = q_{\lambda \text{ max}} \exp(-r^2/r_0^2); \quad (12)$$

$$q_{\lambda}(t) = \{T_{\text{max}} k / [(1-R) \sqrt{a t_0}]\} \exp(-t/t_0) \text{erfi}(\sqrt{t/t_0}), \quad (13)$$

где $q_{\text{л max}}$ — максимальное значение $q_{\text{л}}(r)$, описываемого функцией Гаусса; T_{max} — максимальная температура тела; t_0 — задаваемое фиксированное значение времени;

$$\operatorname{erfi}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(u^2) du$$

— табулированная функция.

При составлении уравнений (10) не учитывали переход теплоты с поверхности металла в окружающую среду, что вполне оправдано при импульсной сварке и часто допустимо при непрерывной сварке. Некоторые решения задач (10) для отдельных участков ЗТВ и интервалов времени приведены в табл. 2. Используя эти решения, можно рассмотреть интегральные характеристики стадии нагрева, плавления и остывания металла при лазерной сварке.

Из физических представлений процесса нагрева твердых тел поверхностным источником теплоты следует, что в начальной стадии нагрева поток теплоты в глубь материала (в направлении оси z) всегда намного больше, чем поток теплоты в поперечном направлении ($r_0 \gg \delta$). Следовательно, в начальной стадии нагрева поверхностное распределение температуры $T(r, z=0)$ тела будет с большой точностью соответствовать поперечному распределению поглощенного удельного потока излучения $q(r) = (1-R)q_{\text{л}}(r)$. Этот вывод может быть подтвержден и расчетным путем [см., например, формулу (19)]. Длительность существования начальной стадии нагрева, т. е. время t' , в течение которого боковой теплоотвод мал, зависит от вида функции $q_{\text{л}}(r)$, температуропроводности материала a , размеров источника теплоты r_0 и для распределения $q_{\text{л}}(r, t)$ вида (11) оценивается по формуле

$$\approx t' = 0,25 r_0^2 / a, \quad (26)$$

а для гауссова источника теплоты $t' = 0,1 r_0^2 / a$.

В глубине тела радиальное распределение температуры в начальной стадии нагрева также подобно радиальному распределению $q_{\text{л}}(r)$, что подтверждается, например, анализом выражения (19). Полученный вывод можно использовать при прогнозировании формы зоны проплавления при сварке.

В момент времени $t \leq t \leq \tau$ подобие распределений $q_{\text{л}}(r)$ и $T(r)$ нарушается; наибольшее различие наблюдается в стационарном (для импульсного воздействия — в квазистационарном) режиме нагрева. В этих случаях плоский источник теплоты на поверхности полубесконечного тела может считаться точечным. Время t'' выхода процесса нагрева в стационарный режим оценивается по формуле

$$t'' = 10 r_0^2 / a, \quad (27)$$

справедливой для источников теплоты с различным распределением $q_{\text{л}}(r)$.

Распределение температуры в полубесконечном теле,
нагреваемом поверхностным источником теплоты
[решение задачи (10)]

Тип источника нагрева	Распределение температуры $T(r, z, t)$	Ограничения пространственно-временных координат	Номер формулы
$q_n(r, t) = \text{const}$	$\frac{2q_n(1-R)\sqrt{at}}{k} \left[i \Phi^* \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - i \Phi^* \left(\frac{\sqrt{z^2 + r_0^2}}{2\sqrt{at}} \right) \right]$	$r = 0; t \leq \tau$	(14)
	$\frac{q_n(1-R)\sqrt{z^2 + r_0^2} - z}{k}$	$r = 0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(15)
	$\frac{2q_n(1-R)r_0}{\pi k} K_2 \left(\frac{r}{r_0} \right)$	$r \leq r_0; z = 0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(16)
	$\frac{2q_n(1-R)r}{\pi k} \left[K_2 \left(\frac{r}{r_0} \right) - \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) K_1 \left(\frac{r_0}{r} \right) \right]$	$r > r_0; z = 0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(17)
$q_n(t) = \text{const}$	$\frac{q_n \max (1-R) r_0}{\sqrt{\pi} k} \operatorname{arctg} \left(\frac{2\sqrt{at}}{r_0} \right)$	$r = 0; z = 0; t \leq \tau$	(18)
$q_n(r) = q_n \max \exp(-r^2/r_0^2)$	$\frac{2q_n \max (1-R)\sqrt{at}}{k} \exp \left(-\frac{r^2}{r_0^2} \right) \times$ $\times i \Phi^* \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right)$	$0,1r_0^2 \geq t \leq \tau$	(19)
	$\frac{\sqrt{\pi} q_n \max (1-R) r_0}{2k} \exp \left(-\frac{r^2}{2r_0^2} \right) \times$ $\times I_0 \left(\frac{r^2}{2r_0^2} \right)$	$z = 0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(20)

Тип источника нагрева	Распределение температуры $T(r, z, t)$	Ограничения пространственно-временных координат	Номер формулы
$q_L(t) = \text{const}$ $q_L(r) = q_{L\max} \exp(-r^2/r_0^2)$	$\frac{\sqrt{\pi} q_{L\max} (1-R) r_0}{2k} \exp\left(\frac{z^2}{r_0^2}\right) \Phi^*\left(\frac{z}{r_0}\right)$	$r=0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(21)
	$\frac{\sqrt{\pi} q_{L\max} (1-R) r_0}{2k} \left(1 - \frac{r^2}{2r_0^2}\right)$	$r \ll r_0; z=0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(22)
	$\frac{q_{L\max} (1-R) r_0^2}{2kr}$	$r \gg r_0; z=0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(23)
	$\frac{\sqrt{\pi} q_{L\max} (1-R) r_0}{2k} \left(1 - \frac{2z}{\sqrt{\pi} r_0}\right)$	$r=0; z \ll r_0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(24)
	$\frac{q_{L\max} (1-R) r_0^2}{2kz}$	$r=0; z \gg r_0; \frac{10r_0^2}{a} \leq t \leq \tau$	(25)

Примечание: τ — длительность воздействия лазерного излучения;

$K_1(x), K_2(x)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода;

$i\Phi^*(x)$ — интеграл дополнительной функции интеграла вероятности $\Phi(x)$;

$I_0(x)$ — функция Бесселя от мнимого аргумента нулевого порядка.

Распределение температуры в заключительной стадии нагрева ($t'' \leq t \leq \tau$) описывается выражениями (15) — (17) для равномерного источника теплоты и (20) — (25) для гауссова источника.

Оценим применимость указанных решений задачи (10) для расчетов параметров процесса сварки металлов лазерным излучением.

Для типичных случаев лазерной сварки в приборостроении $r_0 = 0,5$ мм, $a = 0,1$ см²/с (сталь, никель, железо-никелевые сплавы) и $a = 1$ см²/с (медь, серебро, золото, медно-никелевые сплавы). Вычисления по формулам (26), (27) дают следующие результаты: $t_{Fe}' = 6,3$ мс; $t_{Fe}'' = 250$ мс; $t_{Cu}' = 0,63$ мс; $t_{Cu}'' = 25$ мс.

Поскольку для современных лазеров длительность импульса сварки $\tau = 0,1 \div 10$ мс, то для материалов с низкой теплопроводностью ($a \approx 0,1$ см²/с) наиболее вероятен режим нагрева с малым боковым теплопроводом. Для материалов с высокой теплопроводностью, особенно при $r_0 < 0,5$ мм, режим нагрева близок к квазистационарному. При непрерывной сварке практически всегда реализуется стационарный режим нагрева.

В практике часты случаи лазерной сварки тонких стержней с торца, когда $2r_0 \approx d$ (диаметр стержня), или массивных тел, когда $r_0 \gg z_{пл}$ (глубина проплавления тела), что позволяет применять в тепловых расчетах более простые выражения, описывающие одно-

мерную задачу нагрева. Так, например, из формулы (14) при указанных допущениях следует, что

$$T(z, t) = [2q_{\text{л}}(1-R)\sqrt{at}/k] i\Phi^*[z/(2\sqrt{at})], \quad (28)$$

при

$$0,25r_0^2/a \geq t \leq \tau,$$

$$T(0, \tau) = T_{\text{max}} = 2q_{\text{л}}(1-R)\sqrt{a\tau}/(\sqrt{\pi}k). \quad (29)$$

При одномерном нагреве металлов лазерным источником теплоты с более реальным распределением $q_{\text{л}}(t)$ вида (13) температура тела на оси источника

$$T(z=0, t) = T_{\text{max}}[1 - \exp(-t/t_0)], \quad (30)$$

$$T(z, t > 4t_0) = T_{\text{max}}\Phi^*[z/2\sqrt{at}], \quad (31)$$

где

$$t \leq \tau; \quad T_{\text{max}} = q_{\text{л max}}(1-R)\sqrt{a\tau}/0,54.$$

Из сравнения температурных зависимостей (28) — (30) следует, что темп нагрева поверхности тела до максимальной температуры выше при действии импульса излучения вида (13). Кроме того, этот источник теплоты обеспечивает длительное поддержание максимальной температуры нагрева, что способствует увеличению глубины проплавления.

До сих пор рассматривался лазерный нагрев металлов в течение действия излучения ($t \leq \tau$). Анализ температурного поля в материале после окончания действия излучения позволяет учесть дополнительный прогрев материала теплотой, запасенной в верхних слоях тела. Дополнительный прогрев тела наиболее ощутим при малом боковом теплоотводе, т. е. при сварке тонких стержней или массивных тел, когда $r_0 \gg z_{\text{пл}}$ и $t \leq 0,25r_0^2/a$.

Распределение температуры после окончания воздействия лазерного излучения для одномерных задач нагрева может быть рассчитано по формуле

$$\begin{aligned} T(z, t > \tau) = & [2q_{\text{л}}(1-R)/k]\sqrt{a} \times \\ & \times [\sqrt{t} i\Phi^*[z/(2\sqrt{at})] - \sqrt{t-\tau} \times \\ & \times i\Phi^*[z/(2\sqrt{a(t-\tau)})]]. \end{aligned} \quad (32)$$

На рис. 9 показаны временные изменения температуры различных точек тела на оси z ($z=0$ — кривая 1 и $z=\sqrt{a\tau}$ — кривая 2) как в течение действия импульса излучения длительностью τ , так и после его окончания. Кривые рассчитаны по формулам (28) и (32), описывающим одномерную модель нагрева.

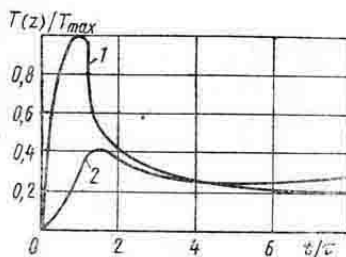


Рис. 9. Пространственно-временное распределение относительной температуры $T(z)/T_{\text{max}}$

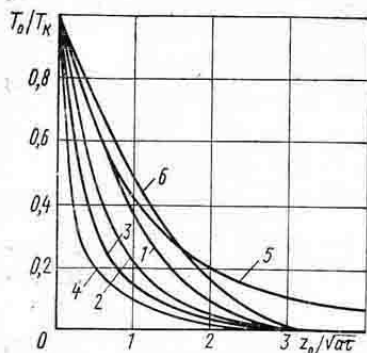


Рис. 10. Пространственно-временное распределение относительной температуры T_0/T_K

пределением $q_L(r, t) = \text{const}$ может быть рассчитана из уравнения (14):

$$T_0/T_K = \{i \Phi^* [z_0/(2\sqrt{a\tau})] - i \Phi^* [\sqrt{z_0^2 + r_0^2}/(2\sqrt{a\tau})]\} / \{1/\sqrt{\pi} - i \Phi^* [r_0/(2\sqrt{a\tau})]\}, \quad (33)$$

где

$$T_0 = T(r=0, z=z_0, t=\tau); \quad T_K = T(r=0, z=0, t=\tau).$$

Графическая интерпретация уравнения (33) приведена на рис. 10, где кривая 1 рассчитана для $r_0/\sqrt{a\tau} \geq 2$; кривая 2 — для $r_0/\sqrt{a\tau} = 1$; кривая 3 — для $r_0/\sqrt{a\tau} = 0.5$; кривая 4 — для $r_0/\sqrt{a\tau} = 0.2$. Пространственно-временные изменения температуры T_0 хорошо иллюстрируют тот факт, что с уменьшением бокового теплоотвода глубина продвижения изотермы увеличивается, достигая максимальных значений для заданной величины τ при одномерном нагреве. В этом случае z_0 может быть найдена графически по кривой 1 либо рассчитана по уравнению (33), где $\tau \leq 0.25r_0^2$.

$$T_0/T_K = \sqrt{\pi} i \Phi^* [z_0/(2\sqrt{a\tau})]. \quad (34)$$

При $T_0/T_K = 0.3 \div 0.6$, что соответствует расчету глубины залегания изотерм плавления (для металлов $T_{пл}/T_K = 0.3 \div 0.6$), графическая аппроксимация (34) позволяет получить более удобное выражение для расчета z_0 :

$$z_0 = 2\sqrt{a\tau} (0.85 - T_0/T_K). \quad (35)$$

Оценивая глубину распространения более низких температур [$T_0 \leq (0.3 \div 0.6) T_K$], необходимо учитывать дополнительный прогрев металла после прекращения действия лазерного излучения. Положив $T(z, t)$ в выражении (32) равным T_0 , взяв производную по

При сварке представляет интерес вычисление параметров глубины проплавления $z_{пл}$ и прогрева $z_{пр}$, характеризующих размеры ЗТВ. Расчет этих параметров может быть выполнен по уравнениям (14), (15), (19), (21), (25), (28), (31), (32); глубину залегания z_0 искомой изотермы T_0 находят с учетом приведенных выше замечаний о максимальной температуре сварки, которая при сварке без выплесков материала соответствует его температуре кипения T_K .

Глубина распространения изотермы T_0 за время действия на металл лазерного источника теплоты с рас-

t от обеих частей этого уравнения и приравняв ее нулю (при этом $z=z_0$ при $t=t_0$), находим, что наибольшая глубина проникания z_0 (для T_0) и время t_0 достижения z_0 связаны соотношением

$$z_0 = \sqrt{[4at_0(t_0 - \tau) \ln \sqrt{t_0/(t_0 - \tau)}] / \tau}. \quad (36)$$

В этом случае выражение (32) может быть записано в виде

$$T_0 = T_K \sqrt{\pi/\tau} \{ \sqrt{t_0} i \Phi^* \sqrt{[(t_0 - \tau)/\tau] \ln \sqrt{t_0/(t_0 - \tau)}} - \\ - \sqrt{t_0 - \tau} i \Phi^* \sqrt{(t_0/\tau) \ln [t_0/(t_0 - \tau)]} \}. \quad (37)$$

Кривая 5 на рис. 10 отражает графическую зависимость T_0/T_K от $z_0/\sqrt{a\tau}$, построенную по формулам (36) и (37). При $T_0/T_K < 0,3$ указанная зависимость хорошо описывается выражением

$$z_0/\sqrt{a\tau} = 0,43 T_K/T_0. \quad (38)$$

Таким образом, при импульсном лазерном нагреве металлов оценку глубины залегания изотермы T_0 в общем случае распространения теплоты можно выполнять по выражению (33). В случае малого бокового теплоотвода $z_{пл}$ можно рассчитывать по более удобным формулам (34) и (35), а оценку максимальной глубины распространения более низких температур выполнять по формуле (38).

Проведенный теплофизический анализ процесса лазерной сварки металлов позволяет выработать рекомендации по увеличению глубины сварки. Так, дополнительные возможности увеличения $z_{пл}$ без выплеска могут быть обеспечены формированием импульса лазерного излучения специальной формы. Например, при сварке с малым боковым теплоотводом целесообразен импульс вида (13). В этом случае глубину проплавления $z_{пл}$ в зависимости от длительности импульса τ можно рассчитать по формуле (31), приняв $t=\tau$. Эта зависимость представлена кривой 6 на рис. 10.

Кроме оптимизации формы импульса возможен и другой путь повышения глубины сварки, например за счет увеличения длительности лазерного излучения, применяя лазеры непрерывного действия. Однако при этом возрастает не только глубина сварки, но и в целом увеличивается ЗТВ, так как значительно возрастают потери теплоты на теплопроводность в глубь материала по всем направлениям.

Глубину залегания изотермы T_0 при действии непрерывного излучения с равномерным распределением плотности его мощности по пятну облучения можно найти из выражения (15), приняв $T(z_0) = T_0$ и $T_K = q_{пл}(1-R)r_0/k$:

$$z_0 = r_0 (T_K/T_0 - T_0/T_K)/2. \quad (39)$$

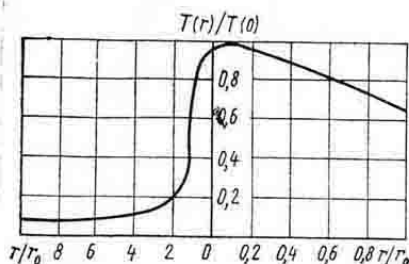


Рис. 11. Стационарное распределение температуры в материале, нагреваемом поверхностным круговым источником теплоты

Значительный отвод теплоты в направлениях, перпендикулярных к оси z , при стационарном нагреве приводит к тому, что при непрерывной сварке размер зоны плавления на поверхности облучения превышает размер пятна облучения.

Стационарное температурное поле в материале, нагреваемом круговым источником теплоты при $q_L(r, t) = \text{const}$, показано на рис. 11.

При анализе процесса лазерной сварки необходимо также знать скорости изменения температуры в ЗТВ. В общем случае скорость нагрева dT/dt материала на оси лазерного излучения можно получить из уравнения (10) дифференцированием по времени:

$$\begin{aligned} \partial T / \partial t &= [q_L (1-R) \sqrt{a} / (k \sqrt{\pi \tau})] \exp [-z^2 / (4a \tau)] = \\ &= [T(0, \tau) / (2\tau)] \exp [-z^2 / (4a \tau)]. \end{aligned} \quad (40)$$

Скорость изменения температуры на поверхности облучения ($z=0$), как следует из уравнения (40), можно рассчитать по формуле

$$\partial T(z=0) / \partial t = T(z=0, \tau) / (2\tau). \quad (41)$$

При сварке металлов [$T(z=0, \tau) = T_K$] импульсами излучения длительностью $\tau = 10^{-4} \div 10^{-2}$ с $\partial T / \partial t$ на поверхности облучения составляет соответственно $10^7 \div 10^5$ Кс $^{-1}$. С увеличением z при фиксированной длительности импульса излучения скорость нагрева уменьшается, причем для более коротких импульсов спад $\partial T / \partial t$ происходит более резко.

Распределение температуры по глубине прогретого слоя можно оценить, взяв соответствующую производную от выражения (28):

$$\begin{aligned} \partial T(z, t) / \partial z &= -[q_L (1-R) / k] \Phi^* [z / (2 \sqrt{a \tau})] = \\ &= -[T(z=0, \tau) \sqrt{\pi} / (2 \sqrt{a \tau})] \Phi^* [z / (2 \sqrt{a \tau})]. \end{aligned} \quad (42)$$

Для типичных случаев сварки сталей при $z=0$ $\partial T / \partial z = 10^6 \div 10^5$ К см $^{-1}$, а при $z = \sqrt{a \tau}$ и $z = 2\sqrt{a \tau}$ соответственно в 2,09 и 6,36 раза меньше.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Эффективность промышленного использования сварочных лазеров зависит от результата решения ряда технических и технологических задач. Например, ограниченная мощность лазерного из-

лучения при относительно низком КПД лазерного нагрева металлов значительно сужает технологические возможности лазерной сварки и препятствует росту ее производительности. Кроме того, нестабильный процесс лазерной сварки может привести к недопустимому изменению глубины проплавления, сильному испарению и выплеску материала.

Решению названных задач и посвящен данный раздел.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕСТАБИЛЬНОГО РЕЖИМА СВАРКИ

Основную причину нестабильного режима лазерной сварки материалов обычно связывают с колебаниями температуры поверхности свариваемых материалов. Повышение этой температуры до $T > T_k$ вызывает сильный перегрев сварочной ванны, а снижение температуры ($T < T_k$) — уменьшение глубины проплавления.

Для определения возможных источников колебания температуры поверхности T приведем уравнение (28) с учетом выражения (2) к следующему виду:

$$T = 2E_a(1-R)\sqrt{a}/(\sqrt{\pi^3\tau}kr_0^2). \quad (43)$$

Уравнение (43) описывает связь максимальной температуры нагрева материала равномерно распределенным источником теплоты с параметрами лазерного излучения и оптико-физическими характеристиками материала.

Изменение максимальной температуры ΔT , описываемое уравнением (43), вследствие флуктуаций параметров E_a , r_0 , τ , a , k , R может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \Delta T = & |\partial T / \partial E_a| \Delta E_a + |\partial T / \partial r_0| \Delta r_0 + |\partial T / \partial \tau| \Delta \tau + \\ & + |\partial T / \partial A| \Delta A + |\partial T / \partial k| \Delta k + |\partial T / \partial a| \Delta a, \end{aligned} \quad (44)$$

где $A = 1 - R$ — коэффициент поглощения лазерного излучения в процессе сварки.

Частные производные от температуры по соответствующему параметру с учетом зависимости (44) имеют вид

$$\begin{aligned} \partial T / \partial E_a &= 2A \sqrt{a} / (\sqrt{\pi^3\tau}kr_0^2); \\ \partial T / \partial r_0 &= -4AE_a \sqrt{a} / (\sqrt{\pi^3\tau}kr_0^3); \\ \partial T / \partial \tau &= -AE_a \sqrt{a} / (\sqrt{\pi^3\tau^3}kr_0^2); \\ \partial T / \partial A &= 2E_a \sqrt{a} / (\sqrt{\pi^3\tau^3}kr_0^2); \\ \partial T / \partial k &= -2AE_a \sqrt{a} / (\pi^3\tau k^2r_0^2); \\ \partial T / \partial a &= AE_a / (\sqrt{\pi^3\tau}ar_0^2). \end{aligned} \quad (45)$$

Числовой расчет производных (45) для случая сварки кобальта ($a=0,046$ см²/с, $k=0,19$ Вт/(см·°C), $A=0,25$, $T=T_k=2870^\circ\text{C}$), лазерным излучением с параметрами $E_{\text{л}}=5$ Дж, $\tau=5$ мс, $r_0=5\cdot 10^{-2}$ см дает следующие результаты:

$$\begin{aligned}\partial T / \partial E_{\text{л}} &\approx 570^\circ \text{C} / \text{Дж}; & \partial T / \partial r_0 &\approx 115000^\circ \text{C} / \text{см}; \\ \partial T / \partial \tau &\approx -280^\circ \text{C} / \text{мс}; & \partial T / \partial A &\approx 11500^\circ \text{C}; \\ \partial T / \partial k &\approx -14000^\circ \text{C} \cdot \text{см} / \text{Вт}; & \partial T / \partial a &\approx 5800^\circ \text{C} \cdot \text{с} / \text{см}^2.\end{aligned}$$

Расчет показывает, что наибольшее влияние на режим сварки оказывают флуктуации параметров R и r_0 , приводящие к существенному изменению температуры T . Например, при изменении параметров R , r_0 , $E_{\text{л}}$, τ , k , a на 10% соответствующие изменения температуры составят

$$\begin{aligned}|\Delta T_R| &\approx 900^\circ \text{C}, & |\Delta T_{r_0}| &= 560^\circ \text{C}, & |\Delta T_{E_{\text{л}}}| &= 280^\circ \text{C}, & |\Delta T_{\tau}| &= 135^\circ \text{C}, \\ & & |\Delta T_k| &= 280^\circ \text{C}, & |\Delta T_a| &= 30^\circ \text{C}.\end{aligned}$$

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

При разработке промышленной технологии лазерной сварки выбирать конструкцию соединения, свариваемые материалы и параметры лазерного излучения следует с учетом достижения максимальной производительности процесса сварки.

В качестве примера рассмотрим более общий случай лазерной импульсной сварки с перекрытием ЗТВ на поверхности материала. Для этого оценку скорости сварки обычно выполняют с помощью уравнения

$$v = 2r_0 F (1 - \epsilon), \quad (46)$$

где F — частота повторения импульсов излучения; ϵ — коэффициент перекрытия ЗТВ.

Формально из уравнения (46) следует, что для увеличения скорости сварки необходимо уменьшать ϵ и увеличивать r_0 и F . Однако такой вывод относительно параметра r_0 оказывается неверным, поскольку в уравнении (46) не учтена имеющаяся взаимосвязь между r_0 и $E_{\text{л}}$.

Введем в уравнение (46) вместо F величину энергии излучения $E_{\text{л}}$, связанную с F выражением

$$F = P_{\text{ср}} / E_{\text{л}}, \quad (47)$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя мощность импульсного излучения.

Поскольку параметры $E_{\text{л}}$ и r_0 связаны теплофизически, приведем уравнение (14) к виду

$$E_{\text{л}} = [2\pi k T_k \sqrt{a \tau^3} / (1 - R)] [r_0^2 / (\pi a \tau) \{1 / \sqrt{\pi} - i \Phi^* [r_0 / (2 \sqrt{a \tau})]\}], \quad (48)$$

описывающему расчет энергозатрат излучения на нагрев до температуры кипения T_k центра пятна облучения радиусом r_0 при действии равномерно распределенного источника ($q_{\pi}(r, t) = \text{const}$).

С учетом уравнений (47) и (48) выражение для скорости сварки (46) запишем в виде:

$$v = [2P_{\text{ср}}(1-R)(1-\varepsilon)/(\pi k \tau T_k)] (2\sqrt{a\tau}/r_0) \times \\ \times \{1/\sqrt{\pi} - i\Phi^* [r_0/(2\sqrt{a\tau})]\}. \quad (49)$$

Из анализа уравнений (47) и (49) следует, что для увеличения скорости сварки необходимо уменьшать энергию импульса излучения E_{π} , увеличивать среднюю мощность излучения и уменьшать коэффициент отражения R и радиус пятна облучения r_0 .

Из качественной зависимости $v(r_0)$ следует, что выигрыш в скорости сварки наблюдается при больших r_0 , а при малых r_0 скорость сварки от r_0 не зависит (рис. 12). Легко показать, что при $r_0 < 0,3\sqrt{a\tau}$ (квазистационарный режим сварки) v не зависит от r_0 :

$$v' = 2P_{\text{ср}}(1-R)(1-\varepsilon)/(\pi k T_k), \quad (50)$$

а при $r_0 > 2\sqrt{a\tau}$ (режим сварки с малым боковым теплоотводом) v пропорционально $1/r_0$:

$$v'' = v' 2\sqrt{a\tau}/(\sqrt{\pi} r_0). \quad (51)$$

Таким образом, для увеличения производительности процесса лазерной сварки необходимо снижать радиус пятна облучения r_0 до минимальной величины при одновременном снижении энергозатрат и увеличении частоты повторения импульсов до предельно допустимого значения.

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПУТЕМ МНОГОКРАТНОГО ВОЗВРАТА ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Среди известных способов снижения энергозатрат на лазерную сварку металлов сварка с многократным возвратом отраженного излучения обладает рядом существенных преимуществ: позволяет увеличить КПД сварки в 2—10 раз; относительно проста в реализации; обеспечивает саморегуляцию режима сварки; не требует дополнительных энергозатрат; применима как для импульсной, так и для непрерывной сварки.

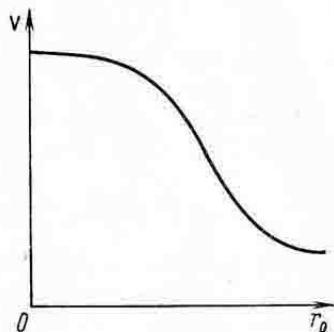


Рис. 12. Зависимость скорости сварки от радиуса пятна облучения

Рассмотрим эффективный КПД лазерной сварки металлов при возврате отраженного излучения. Выражение для энергии, вводимой в металл при n -кратном возврате, имеет следующий вид:

$$E_n = (1-R)(E_n + E_n Rk + \dots + E_n R^n k^n) = E_n (1-R) [1 - (Rk)^{n+1}] / (1-Rk), \quad (52)$$

где E_n — энергия лазерного излучения; R — средний за импульс коэффициент отражения металла; $(1-k)$ — коэффициент потерь отраженного излучения в системе возврата.

Увеличение ввода энергии лазерного излучения в металл можно характеризовать эффективным КПД лазерной сварки η_n , равным отношению поглощенной металлом энергии излучения при n -кратном возврате к энергии лазерного излучения E_n . В соответствии с (52) выражение для η_n имеет вид

$$\eta_n = E_n / E_n = (1-R) [1 - (Rk)^{n+1}] / (1-Rk). \quad (53)$$

Эффективность использования отраженного излучения можно характеризовать также коэффициентом δ_n , равным отношению энергии E_n , поглощенной металлом при n возвратах отраженного излучения, к энергии E_0 , поглощенной при однократном (первичном) воздействии излучения:

$$\delta_n = E_n / E_0 = [1 - (Rk)^{n+1}] / (1-Rk) = \eta_n / (1-R). \quad (54)$$

При разработке конкретных схем возврата для сварки материала с известными характеристиками отражения важно знать эффективное число возвратов, при котором используется определенная часть первоначально отраженного излучения. За такую величину может быть принято число возвратов n_3 , обеспечивающее ввод в металл $0,9 E_{n \rightarrow \infty}$:

$$n_3 = - [2,303 / \ln(Rk) + 1]. \quad (55)$$

На рис. 13 приведены расчетные зависимости характеристик эффективности возврата отраженного излучения в зону сварки. Анализ этих зависимостей показывает, что эффективный КПД лазерной сварки металлов с коэффициентами отражения $R = 0,6 \div 0,9$ может быть увеличен от 2 до 10 раз и более. Причем эффективность использования отраженного излучения возрастает с ростом коэффициента отражения металла. Для реальных систем возврата время, за которое происходит n_3 (< 20) возвратов, менее 10^{-8} с. Следовательно, при импульсной сварке металлов с длительностью импульсов $\tau \gg 10^{-8}$ с, можно пренебречь искажением формы поглощаемого материалом импульса излучения. В этом случае рассмотрение эффективности возврата для энергии лазерного излучения остается справедливым и для мгновенной мощности.

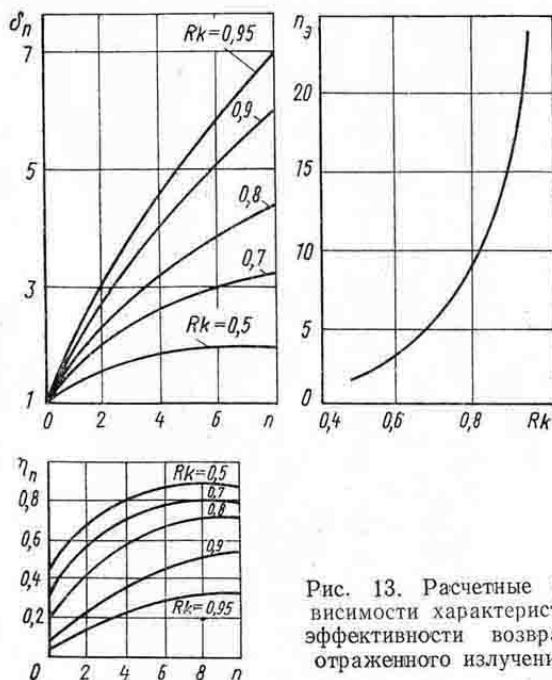


Рис. 13. Расчетные зависимости характеристик эффективности возврата отраженного излучения

На рис. 14 для иллюстрации эффективности возврата показаны пятна облучения на воздухе образцов из меди, мельхиора и никеля. Возврат отраженного излучения осуществлялся зеркальной полусферой, характеризующей коэффициентом отражения $k=0.9$. Образец устанавливали таким образом, чтобы центр зоны обработки был совмещен с центром полусферы, а нормаль к поверхности образца составляла некоторый угол с осью лазерного излучения для обеспечения однократного возврата зеркальной составляющей отражения. Диффузная составляющая отражения при этом возвращалась многократно (до затухания). Обработка проводилась импульсами лазерного излучения с одинаковой для каждого материала энергией (Cu — 20 Дж; МН19, Ni — 10 Дж) как с применением системы возврата (а), так и без нее (б).

На фотографии видно, что без возврата отраженного излучения медный образец не расплавлен (заметна лишь окисленная зона воздействия лазерного излучения), а на образцах из никеля и мельхиора имеется слабое (очаговое) плавление поверхностного слоя металла. Применение системы возврата обеспечило нормальное (для условия сварки без выплеска) плавление меди и мельхиора и сильное (с выплеском металла) плавление никеля. Аналогичные результаты по плавлению, но без использования возврата отраженного излучения, могут быть достигнуты лишь при увеличении энергии импульса излучения для меди и мельхиора в 2,5 раза, а для никеля в 2 раза. Приведенные цифры могут быть коли-

чественной характеристикой эффективности сварки указанных металлов с возвратом отраженного излучения с помощью зеркальной полусферы.

Для практического использования способа сварки с возвратом отраженного излучения следует применять специальные оптические световозвращатели. В качестве такого устройства можно использовать полусферическое зеркало, обладающее способностью собирать обратно лучи, выходящие из его центра. Без каких-либо

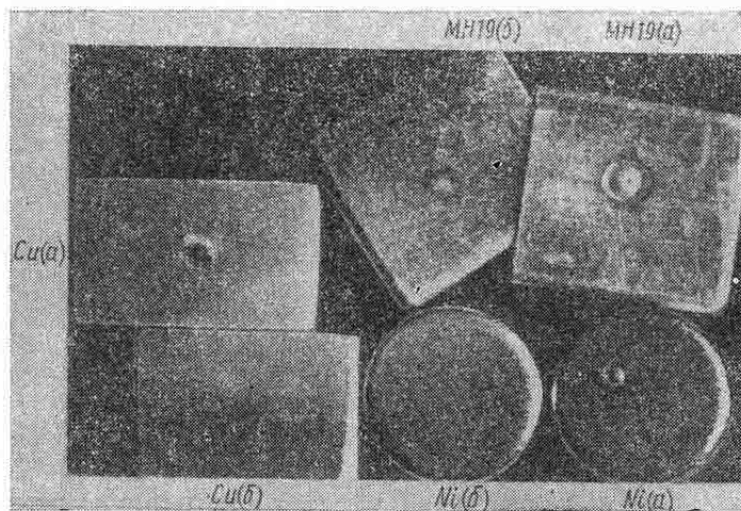


Рис. 14. Фотография участков облучения образцов из меди (Cu), никеля (Ni) и мельхиора (МН 19):
а — с возвратом; б — без возврата отраженного излучения

дополнительных приспособлений зеркальная полусфера обеспечивает многократный возврат диффузно отраженного излучения и однократный возврат зеркальной составляющей отраженного излучения. Число возвратов зеркально отраженного излучения может быть увеличено применением дополнительных оптических элементов.

При оценке эффективности использования устройств возврата необходимо учитывать характер диаграмм направленности отраженного излучения от конкретных материалов и эффекты возможного размытия пятна облучения в процессе переотражения.

Оценку расфокусирующего действия полусферы можно провести путем расчета размытия границ первоначального радиуса пятна облучения r_0 в зависимости от числа переотражений. На рис. 15 показан ход лучей, поясняющий это размытие. Лучи, выходящие под различными углами из точки, расположенной на расстоянии r от центра полусферы O , будут пересекать диаметрально плоскость полусферы в различных точках на расстоянии r' от центра полусферы. Максимальное и минимальное значения можно определить по формуле

$$r'_{\max} = r \rho' / (\rho' \mp 2r), \quad (56)$$

min

где ρ' — радиус полусферы.

Для расчета величины размытия светового пятна в процессе перефокусировки отраженного излучения в соответствии с (56) можно записать выражение для радиусов $r_{n, \max}$ и $r_{n, \min}$, характеризующих максимальное и минимальное смещение границ пятна после n отражений:

$$r_{n, \max} = \rho' r_0 / (\rho' \mp 2nr_0). \quad (57)$$

min

Из анализа выражений (56) и (57) следует, что путем подбора соотношений между радиусом пятна облучения и радиусом полусферического зеркала влияние aberrаций на размытие пятна облучения может быть приведено к технически допустимым пределам. На рис. 16 построены рассчитанные по формуле (57) зависимости $r_{n, \max}$ и $r_{n, \min}$ от первоначального радиуса пятна облучения для полусферического зеркала радиусом 70 мм с учетом числа отражений 1—5. Так как при лазерной сварке диаметр пятна облучения не превышает обычно 1 мм, то для возврата отраженного излучения следует использовать полусферические зеркала с радиусом 50—75 мм. При этом пятно увеличится примерно на 10%.

При использовании полусферического отражателя следует поддерживать высокую точность совмещения участка облучения с центром полусферы (не хуже 0,05 мм), так как смещению первоначального пятна от центра полусферического зеркала будет соответствовать удвоенное разнесение световых пятен, формирующихся в результате перефокусировки отраженного излучения.

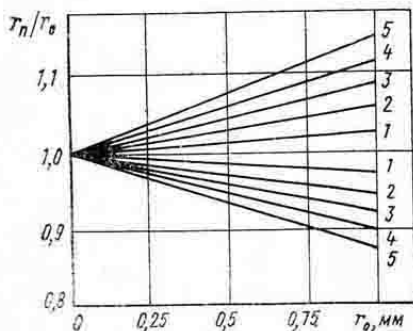


Рис. 16. Размытие границ пятна облучения с учетом числа переотражений

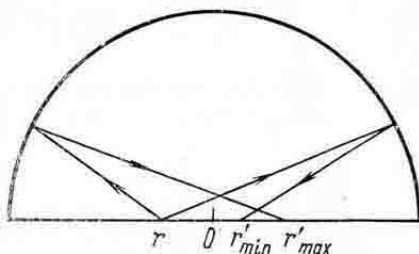


Рис. 15. Ход лучей в полусферическом отражателе

Формула (57) описывает максимальное размытие пятна облучения, соответствующего случаю идеально диффузного отражения при нормальном падении пучка лазерного излучения на поверхность металла.

При сварке плоских образцов, как было показано на рис. 7, диаграмма направленности рассеянного образца излучения более острая (излучение отражается в конус с плоским углом при вершине $\sim 90^\circ$) по сравнению с ламбертовским отражением. Следова-

тельно, расчет по формуле (57) для плоских образцов будет давать несколько завышенные результаты.

КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПРИ СВАРКЕ С ВОЗВРАТОМ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Изменение коэффициента отражения свариваемого материала может происходить как по мере продвижения лазерного пучка по поверхности материала, так и в течение импульса воздействия.

Результат воздействия лазерного излучения на металл в значительной мере определяется исходным состоянием поверхности. Так, например, по осциллограммам изменения P_3 и P_d можно определить время плавления металла. Плавление металла с шероховатой поверхностью происходит раньше, чем плавление металла с гладкой поверхностью. Сварка образцов с шероховатой поверхностью в режиме облучения, соответствующего режиму нормального плавления металла с гладкой поверхностью, приводит к сильным выплескам и испарению металла.

Из практики также известно, что существенное различие в результатах сварки может наблюдаться при получении стыковых соединений. Участки стыка металлов, имеющие небольшой зазор или скосы кромок, расплавляются на большую глубину и имеют сравнительно больший кратер, чем участки с хорошо пригнанными кромками.

Основная причина нестабильной лазерной сварки металлов, даже при условии стабильных параметров излучения, заключается в нерегулируемом изменении энерговложения, вызванном изменением оптических свойств поверхности облучения.

Оценить влияние флуктуаций коэффициента R на характер процесса нагрева можно с помощью уравнения, описывающего изменение скорости нагрева v_n на поверхности металла в связи с изменением коэффициента отражения R :

$$\Delta v_n = q_n \sqrt{a/\tau} \Delta R / [k \sqrt{\pi} (1-R)]. \quad (58)$$

Анализ уравнения (58) показывает, что для металлов, обладающих высоким значением R , даже небольшие его изменения приводят к значительным изменениям скорости нагрева, что, в конечном итоге, обуславливает нестабильность температуры на поверхности металла и невоспроизводимость процесса сварки.

Одним из способов повышения стабильности процессов лазерной сварки металлов является способ сварки с возвратом отраженного излучения. В этом случае уменьшение или увеличение доли поглощаемого излучения приводит к обратному изменению доли излучения, отражаемого и возвращаемого в зону сварки. Иначе говоря, процесс лазерной сварки с возвратом отраженного излучения при изменении оптических свойств материала обладает саморегулированием.

Нестабильность энерговложения лазерного излучения в обрабатываемый металл при осуществлении возврата отраженного излучения можно характеризовать коэффициентом неустойчивости γ :

$$\gamma = \Delta E / E, \quad (59)$$

где ΔE — изменение энергии, вводимой в металл, обусловленное изменением коэффициента отражения R .

Используя выражение (53) при $n \rightarrow \infty$, определим приращение энергии ΔE :

$$|\Delta E| = |\partial E / \partial R| \Delta R = E_d (1 - k) \Delta R / (1 - Rk)^2. \quad (60)$$

Подставляя (60) и (53) при $n \rightarrow \infty$ в уравнение (58), получим выражение, связывающее коэффициент γ с оптическими характеристиками свариваемого материала и системы возврата:

$$\gamma = (1 - k) \Delta R / [(1 - Rk)(1 - R)] \quad (61)$$

Для иллюстрации возможности саморегулирования режима сварки металлов при возврате отраженного излучения на рис. 17 приведены зависимости γ от R , рассчитанные для $\Delta R = 0,1$ и различных значений k . Даже при относительно больших потерях отраженного излучения ($k = 0,9$) стабильность энерговложения с возвратом пучка намного выше, чем при сварке с однократным воздействием излучения ($k = 0$).

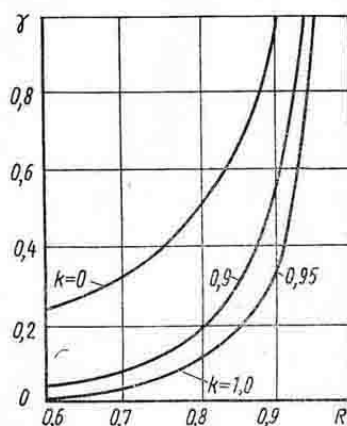


Рис. 17. Зависимость коэффициента неустойчивости от оптических свойств зоны сварки и устройства возврата

Экспериментальное подтверждение процесса саморегулирования демонстрирует рис. 18, на котором показан внешний вид мельхиоровой пластины с двумя участками плавления, различающихся коэффициентами отражения ($\Delta R = 0,1 \div 0,15$). Участки плавления, обозначенные на рисунке цифрой 1, соответствуют проплавлению пластины без возврата отраженного излучения. Участки, обозначенные цифрой 2, демонстрируют результат проплавления с возвратом отраженного излучения, осуществляемого зеркальной полусферой. Изменение оптических свойств поверхности в исходном (до облучения) состоянии практически не влияет на проплавление пластины при сварке с возвратом отраженного излучения.

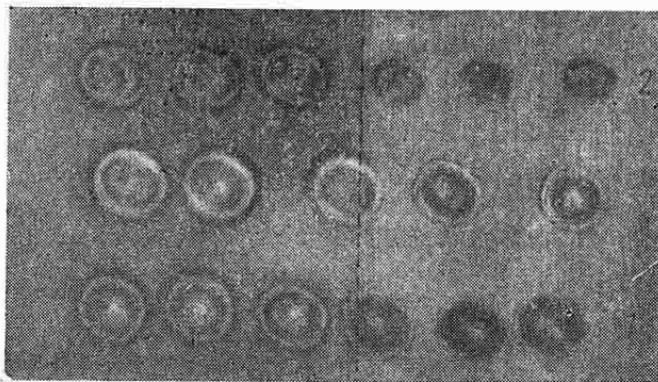


Рис. 18. Внешний вид участков плавления мельхиоровой пластины при однократном и многократном воздействии излучения. Справа от штриховой линии — участок очищенной поверхности

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗМЕРА СФОКУСИРОВАННОГО ПУЧКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ КФО

Как следует из анализа уравнений (3), (4), (6), поперечные размеры сфокусированного лазерного пучка зависят от конфокального параметра непреобразованного пучка B . Величина B определяется характеристиками резонатора лазера и может изменяться в процессе его работы в соответствии с флуктуациями расходимости излучения:

$$B = 2\lambda / (\pi \theta_0^2),$$

где θ_0 — угол расходимости излучения основной моды. Флуктуации расходимости лазерного излучения обусловлены, в первую очередь, термооптическими явлениями, происходящими в резонаторе.

Основные методы стабилизации расходимости лазерного излучения: термостабилизация охлаждающей жидкости; применение активных элементов со специально заданными термооптическими свойствами; управляемое изменение кривизны зеркал резонатора в соответствии с флуктуациями расходимости излучения.

Наряду с этим существует и другой метод стабилизации поперечного размера сфокусированного пучка, который заключается в специальной настройке оптической системы КФО. Из анализа выражений (3) — (6) следует, что характеристики преобразованного пучка определяются не только параметром B , но и параметрами оптической системы КФО. Очевидно, существует такая возможность выбора этих параметров, при которой влияние флуктуаций B будет минимально.

Для примера рассмотрим преобразование лазерного излучения основной моды. Переход к многомодовому пучку осуществляется умножением полученных результатов для параметров r и r_3 на заданный коэффициент модовости. В резонаторе радиус перетяжки пучка излучения основной моды связан с параметром B и длиной волны излучения λ следующей зависимостью:

$$r = \sqrt{\lambda B / (2\pi)}. \quad (62)$$

С учетом уравнения (4) можно получить аналогичное выражение и для радиуса перетяжки одномодового пучка после его преобразования оптической системой КФО:

$$r_3 = \sqrt{\lambda B_3 / (2\pi)}. \quad (63)$$

Рассмотрим практически важный случай построения оптической системы КФО, в которой оптический интервал $\Delta_2 = 0$. При этом выражения (3) и (5) упрощаются и имеют вид.

$$B_3 = 4\Gamma^2 (f_3')^2 B / (4z_1^2 + B^2); \quad (64)$$

$$z_3' = -M^2 [(z_1/A_1) + \Delta_1], \quad (65)$$

где

$$\Gamma = f_1' / f_2'; \quad M = f_3' / f_2'.$$

Подставляя (64) в (63), получаем выражение, позволяющее рассмотреть зависимость поперечного размера перетяжки r_3 от параметра резонатора B и характеристик оптической системы КФО f_1' , f_2' , f_3' , z_1 :

$$r_3 = \sqrt{\lambda / (2\pi)} 2\Gamma f_3' \sqrt{B / (4z_1^2 + B^2)}. \quad (66)$$

Анализ выражений (65), (66) показывает, что при изменении B перетяжка сфокусированного пучка перемещается либо по ходу пучка, либо в противоположном направлении; при этом изменяется и параметр r_3 . Для иллюстрации характера зависимости $r_3(B)$ на рис. 19 показаны рассчитанные по уравнению (66) кривые $r_3(B)$ при различных значениях параметра z_1 . Расчет выполнен для сварочной установки «Квант-10»: $\lambda = 1,06$ мкм; $f_3' = 70$ мм; $\Gamma = 0,5$; $B = 500 \div 1000$ мм. Для любого диапазона изменений B существует некоторое значение z_1 , при котором флуктуации r_3 наименьшие. Причем в этом диапазоне изменений B для оптимального z_1 , размер пучка r_3 имеет максимум.

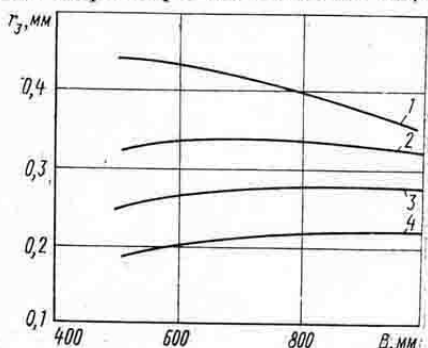


Рис. 19. Расчетные зависимости r_3 от B при различных значениях z_1 : 1 — 200 мм; 2 — 350 мм; 3 — 500 мм; 4 — 700 мм

Так как функция $y = B/(4z_1^2 + B^2)$, находящаяся в выражении (66) под знаком корня, удовлетворяет условиям Дирихле, то условие максимума y , а следовательно, и максимума r_3 будет $dy/dB = 0$. Путем вычислений находим, что

$$z_1 = -B/2. \quad (67)$$

Таким образом, при настройке КФО на условия $\Delta_2 = 0$, $z_1 = -B/2$ флуктуации B приводят к малым изменениям r_3 , причем r_3 при изменении B уменьшается. При расположении плоскости свариваемого материала в плоскости перетяжки сфокусированного пучка и движении этих плоскостей по закону, определяемому уравнением (65), параметр режима сварки r_0 будет также уменьшаться.

Для практики более удобен случай, когда свариваемые детали неподвижны, следовательно, возникает задача оптимального расположения свариваемых деталей относительно перетяжки сфокусированного пучка.

Аналогично выводу условия (67) легко показать, что наименьшие изменения размеров каустики лазерного пучка [выражение (6)] при продольном смещении каустики наблюдаются вблизи перетяжки пучка. Расположение плоскости сварки в перетяжке сфокусированного пучка имеет и еще одно преимущество: при выполнении условия (67) любые изменения B будут приводить к продольному смещению перетяжки и, следовательно, к увеличению параметра r_0 . Таким образом, может происходить частичная компенсация флуктуаций r_0 , имеющих разный знак.

Оценим возможность метода стабилизации размера пучка r_0 . В режиме одиночных импульсов расходимость излучения сварочных установок «Квант-10» и «Квант-16» составляет 10–12 мрад. Если расходимости пучка 13 мрад соответствует $B = 700$ мм, то увеличение расходимости на 1 мрад приведет к уменьшению B приблизительно на 100 мм. Расчет r_3 для $f_1' = 60$ мм, $f_2' = 120$ мм, $f_3' = 70$ мм, $\lambda = 1,06$ мкм дает следующие результаты.

В случае оптимальных $z_1 = -B/2 = -350$ мм и $\Delta_1 = -z_1/A_1$, $\Delta_2 = 0$ радиус $r_3(0)$ изменяется на 0,6%. Для $z_1 = -200$ мм (действительное значение z_1 в установках «Квант-10» и «Квант-16») $r_3(0)$ изменяется уже на 4%, т. е. в этом случае приращение $r_3(0)$ почти в 7 раз больше, чем при оптимальном расположении оптической системы и плоскости сварки, совмещенной с перетяжкой сфокусированного пучка.

Очевидно, что рассмотренный метод стабилизации r_0 может быть применен совместно с другими методами, указанными выше.

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В этом разделе на примере лазерной сварки осесимметричных соединений рассмотрено применение некоторых выводов и рекомендаций предыдущих разделов.

В конструкциях различных изделий промышленности для соединения тонколистовых деталей (контактов, держателей, лепестков и т. д.) с выводами, например, цоколя широко применяют тип соединения, показанный на рис. 20. Выводы металlostеклянного или металлокерамического цоколя имеют диаметр 0,3—1 мм и длину до места спая с диэлектриком $h=1\div 5$ мм. Толщина листовых деталей соизмерима с диаметром вывода и составляет 0,1—0,5 мм. Наиболее распространенной схемой лазерной сварки таких деталей является, как показано на рис. 20, точечная сварка одним импульсом излучения при совместном расплавлении деталей по всему торцу.

Лазерная сварка таких соединений на серийных установках характеризуется следующими особенностями: разрушение диэлектрика или других деталей, расположенных вне зоны сварки, вследствие непосредственного воздействия лазерного излучения, прошедшего мимо листовой детали, либо разрушение металлодиэлектрического спая, вследствие перегрева его теплотой, распространяющейся по выводу от места сварки; низкий КПД сварки, обусловленный высокой отражательной способностью свариваемых материалов; неравномерность нагрева свариваемых деталей с различными отражательными свойствами.

Рассмотрим возможные способы исключения указанных недостатков лазерной сварки осесимметричных соединений.

Очевидно, что прямое повреждение теплочувствительной детали может быть исключено, если зона сварки расположена в области расходящегося пучка, как показано на рис. 20. Огибающая каустика лазерного пучка описывается формулой (6), используя которую, можно получить выражение для расчета плотности энергии лазерного излучения на теплочувствительной детали W_T :

$$W_T = W_c (B_3^2 + 4z_c^2) / [B_3^2 + 4(z_c + h)^2], \quad (68)$$

где W_c — плотность энергии лазерного излучения на поверхности свариваемых деталей; z_c — расстояние от перетяжки сфокусированного пучка до места сварки; h — расстояние от места сварки до теплочувствительной детали; B_3 — конфокальный параметр сфокусированного пучка.

Исследуя функцию $y = W_T / W_c$ на экстремум, можно определить значение z_c , при котором для заданных B_3 и h W_T / W_c минимально:

$$z_{c, \text{опт}} = -0,5h + 0,5 \sqrt{h^2 + B_3^2}. \quad (69)$$

Значение B_3 для сварочных установок обычно составляет 2—10 мм. Тогда для $h=1\div 5$ мм из (69) следует, что $z_{c, \text{опт}}$ может

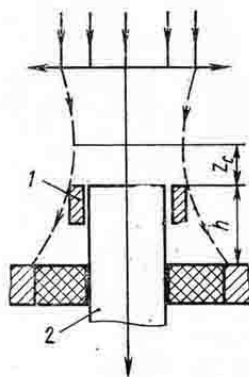


Рис. 20. Схема сварки осесимметричных соединений:

1—держатель; 2—вывод

составлять 3—0,2 мм. Например, для $B_3=4$ мм и $h=3$ мм, $z_{c, \text{опт}}=1$ мм, а $W_T/W_c=0,25$, т. е. плотность энергии на термочувствительном элементе может быть снижена в 4 раза по сравнению с плотностью энергии в месте сварки. При сварке в перетяжке ($z_c=0$) при тех же значениях B_3 и h $W_T/W_c=0,31$, что на 25% превышает оптимальное значение W_T/W_c . При оптимизации режима сварки, применяя короткофокусные объективы ($f_3'=30\div 40$ мм) и выбирая оптимальные z_c , можно добиться более существенного снижения $W_T/W_c < 0,1$.

Рассмотренный прием сварки не исключает возможности повреждения теплочувствительной детали в зоне спая с выводом из-за перегрева спая теплотой, распространяющейся по выводу от места сварки. Глубину проплавления и минимально допустимую величину h можно найти, используя уравнения (35) и (38). Например, расчет по (38) для коваровых выводов ($T_0/T_k=0,033$, $\tau=4 \times 10^{-3}$ с, $a=0,046$ см²/с) дает значение $z_0=1,8$ мм. В экспериментах тепловое разрушение стеклоспая наблюдалось при $h=1,5\div 2$ мм.

Указанные дефекты сварки осесимметричных соединений в значительной степени могут быть уменьшены при сварке с возвратом отраженного излучения. В качестве примера рассмотрим лазерную сварку держателей из серебра и бериллиевой бронзы с коваровыми выводами цоколя реле. Сварку выполняли на установке «Квант-10». Световозвращателем служила зеркальная полусфера с радиусом зеркала $\rho'=75$ мм, установленная таким образом, что обеспечивался однократный возврат зеркальной составляющей отражения и многократный — диффузной составляющей. Коэффициент отражения зеркала полусферы $k=0,9$.

Анализ результатов проплавления деталей показал, что для достижения равных объемов расплавленного металла при сварке без возврата отраженного излучения энергия импульса излучения должна быть в 2 раза больше, чем при сварке с возвратом. Кроме того, сварка с возвратом позволила избежать нежелательных выплесков металла, вследствие стабилизации режима сварки. При этом достигается значительное уменьшение прямого воздействия лазерного пучка на стеклоизолатор цоколя, что объясняется уменьшением энергии импульса излучения и увеличением его угла расходимости в процессе перефокусировки.

ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Наиболее широкое промышленное использование лазерной сварки связано в настоящее время с изготовлением различных электронных и электромеханических приборов (лампы, миниатюрные реле, микродвигатели и т. д.). Особенности эксплуатации этих изделий, заключающиеся, например, в одновременном и длительном воздействии вибрационных ускорений и термоударов, выдвигают особые требования и к способам сварки, которые, кроме того, должны обеспечивать надежное соединение энергоемких,

разнородных и разнотолщинных материалов. Сварку в большинстве случаев необходимо выполнять в труднодоступных местах, вблизи теплочувствительных деталей; при сварке чаще всего недопустимы выплески и испарение материалов.

Как показала практика, лазерная сварка наиболее полно отвечает поставленным требованиям и внедряется в производство несколькими путями.

Традиционный подход заключается в замене существующих способов пайки и нелазерных методов сварки. При этом доработка конструкций соединений, как правило, незначительна, а эффективность внедрения обусловлена в основном экономией материалов (припой), снижением трудозатрат, повышением надежности

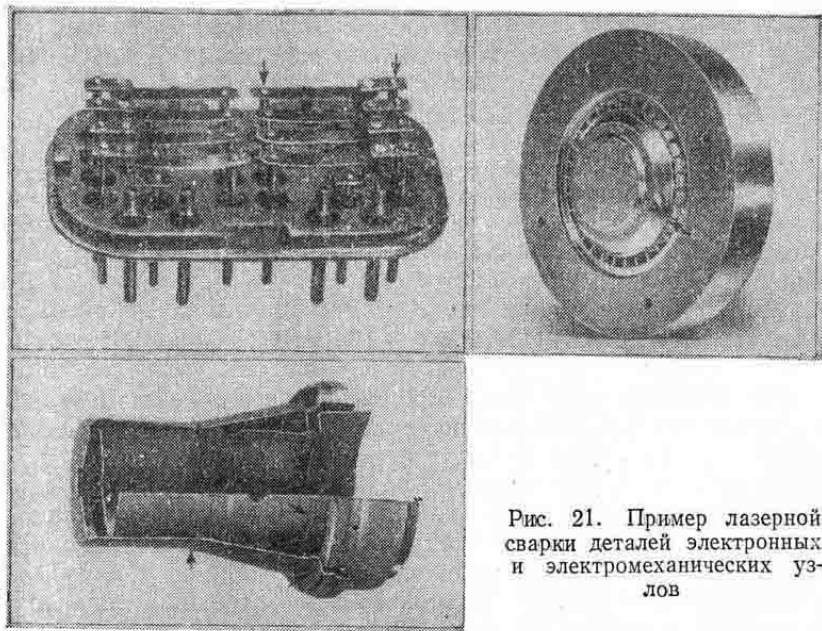


Рис. 21. Пример лазерной сварки деталей электронных и электромеханических узлов

соединений. Примером такого внедрения могут служить электронные и электромеханические узлы, представленные на рис. 21, где места сварки показаны стрелкой.

Другой подход к внедрению лазерной сварки связан с разработкой технологии сварки прибора одновременно с разработкой его конструкции. В этом случае могут быть учтены специфические требования лазерного источника нагрева, упрощена конструкция прибора, расширены его функциональные и эксплуатационные возможности и т. д. Примером такого подхода может служить результат разработки конструкции катодного узла электронной лампы, содержащего десять тонкостенных оксидных катодов, соединенных с держателями с помощью лазерной сварки (рис. 22). На рис. 23 отражены обобщенные конструктивно-технологические требования,

которые следует выполнять при разработке корпусов изделий приборо- и машиностроения, герметизируемых лазерной сваркой. В представленной конструкции соединения корпус — основание учтены рассмотренные выше требования по минимизации пятна облучения.

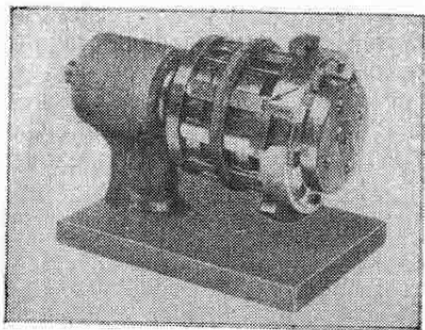


Рис. 22. Пример лазерной сварки деталей катодного узла

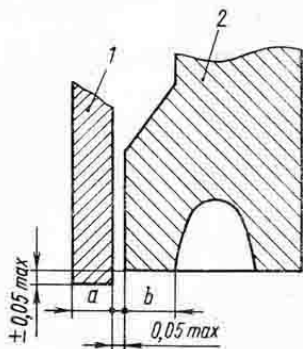


Рис. 23. Конструкция соединения корпус (1) — основание (2), выполняемого лазерной сваркой; $a + b \leq 1,5$ мм; $a/b = 0,5 \div 2$

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Автоматизация сварочных процессов — важнейший этап современного технического перевооружения сварочного производства. В настоящее время во многих отраслях промышленности действуют установки, оснащенные различными средствами механизации и автоматизации, что позволяет многие операции сварочного процесса производить в полуавтоматическом или автоматическом режиме. Выпускаемые промышленностью сварочные лазеры также оснащены различной контрольно-измерительной аппаратурой, а некоторые образцы оборудования содержат и микропроцессорные системы, что в целом значительно облегчает условия работы оператора, способствует повышению качества и производительности сварки.

Однако современный подход комплексной автоматизации производственных процессов, базирующийся, как известно [1], на создании гибкого автоматического производства (ГАП), требует соответствующего рассмотрения и вопросов автоматизации сварки.

В методологическом аспекте сварочная установка совместно с контрольно-измерительной аппаратурой и автоматической системой управления (АСУ) должна представлять собой гибкий автоматический модуль сварки (ГАМС), работающий без участия оператора как индивидуально, так и в составе автоматической линии, участка, цеха. При этом, ГАМС должен выполнять следующие функции: 1) сварку (нагрев и плавление материала) в соответ-

вии с заданными показателями качества; 2) перестройку технических средств ГАМС, например перестройку параметров установки при выполнении сварки нескольких соединений узла, отличающихся режимами сварки; 3) информационно-управляющую связь ГАМС с системами управления своего и верхних уровней управления; 4) подготовку ГАМС к работе и его переналадку при изменении номенклатуры свариваемых узлов; 5) диагностирование состояния технических средств ГАМС, предупреждение аварийных ситуаций и т. д.

Первые две функции ГАМС характеризуют специфику технологического процесса сварки (ТПС) и могут рассматриваться как функции, выполняемые подсистемой АСУ ТПС. Разработка и построение АСУ ТПС является основным этапом создания ГАМС.

Ниже рассмотрены некоторые вопросы, связанные с построением управляемых процессов лазерной сварки, причем основное внимание уделено управлению параметрами излучения.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АСУ ТПС

Процесс нагрева и плавления материала при сварке может быть представлен в виде многомерного нелинейного стохастического объекта, на который воздействуют управляющие и возмущающие переменные. Структурная схема такого процесса показана на рис. 24, где состояние объекта управления — технологической системы (ТС), ее материального входа (подлежащие сварке детали), выхода и внешней среды описываются соответствующими многомерными векторами состояния $\vec{S}$, $\vec{X}$, $\vec{Z}$, $\vec{Y}$.

Контролируемые переменные состояния подаются на вход АСУ, с выхода которой поступают управляющие сигналы, передаваемые в общем случае на исполнительные механизмы ТС ($\vec{U}$) и ее входы (на рис. 24 показано штриховой линией).

Управление входными переменными ТПС, как правило, невозможно, что связано с быстротечностью процесса сварки и отсутствием реальной возможности изменить свойства деталей, поступивших на сварку. Следовательно, управление ТПС должно строиться на воздействии АСУ на исполнительные механизмы ТС.

Разработка модели функционирования АСУ ТПС заключается в представлении формализованной связи входных, выходных и управляющих воздействий:

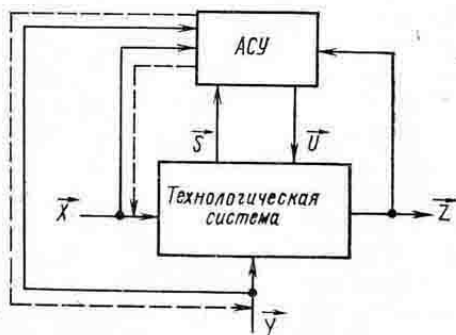


Рис. 24. Структурная схема управления технологическим процессом сварки

$$U(t) = U[X(t), Y(t), Z(t), S(t)]. \quad (70)$$

Конкретный вид уравнения (70) будет определяться выбранными показателями целей функционирования АСУ ТПС, связь которых с параметрами состояния может быть найдена путем математического моделирования ТПС, т. е. формализованным представлением связей вида

$$Z(t) = Z[X(t), Y(t), S(t)]. \quad (71)$$

Конкретный вид схемы управления ТПС зависит от вида используемых для выработки решения информационных сигналов $(\vec{Z}, \vec{S}, \vec{X}, \vec{Y})$, а также от выбранных для управления параметров ТС $(S_1, \dots, S_i)$.

При перестройке параметров ТС информационные сигналы могут поступать с входа и выхода ТС или из блока памяти АСУ, где также хранится программа управления перестраиваемыми параметрами.

Наиболее простой схемой управления процессом сварки является схема, по которой управляющие воздействия формируются по результатам активного непрерывного контроля качественных показателей:

$$U(t) = U[Z(t)]. \quad (72)$$

Для неразрушающего контроля качества сварки могут быть использованы косвенные методы, основанные на информации о процессе формирования сварочной ванны. Информационными сигналами при лазерной сварке могут быть отраженное от зоны сварки лазерное излучение [4], сигнал акустической эмиссии [3], сигнал плазменного факела [9] и др.

Управление параметрами ТС может осуществляться как в процессе сварки, так и вне его. Для реализации первого способа управления необходимо, чтобы длительность протекания сварки существенно превышала время, требуемое для контроля, принятия решения и отработки управляющих воздействий. В связи с кратковременностью сварочных процессов управление в реальном масштабе времени может быть реализовано и в упрощенном варианте, например прекращением процесса сварки при достижении заданных показателей качества. Для отключения ТС применяют коммутацию электроцепей питания, оптических элементов и т. д. Оптические методы коммутации отличаются высоким быстродействием [10], что делает возможным их успешное использование для управления процессами лазерной сварки.

Таким образом, выбор конкретной схемы управления процессом сварки определяется конструктивно-технологическими особенностями ТС, возможностями АСУ и технических средств контроля. Для определения взаимосвязи качественных показателей и параметров состояния ТПС необходимо рассмотреть математическую модель процесса сварки, что позволит выявить номенклатуру подлежащих контролю и управлению параметров. В качестве примера

проведем анализ детерминированной модели процесса импульсной лазерной сварки металлов, выполняемой на воздухе или в защитной среде, когда допустимые изменения параметров этой среды не оказывают существенного влияния на качество сварки.

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Наиболее важные показатели качества лазерной сварки изделий приборостроения — прочность и выплеск металла из сварочной ванны.

Для сварки без выплесков обычно применяют теплопроводностный режим, при котором максимальная температура T нагрева поверхности материала не превышает температуру его кипения T_k и для частого случая сварки с малым боковым теплоотводом находится из уравнения (43). Легко показать, что при этом максимальная глубина проплавления, а следовательно, и максимальная прочность соединения также реализуются при условии $T \rightarrow T_k$, т. е. уравнение (43) представляет собой математическую модель процесса импульсной лазерной сварки металлов с учетом отмеченных выше ограничений.

Из сравнения выражений (71) и (43) следует, что

$$\left. \begin{aligned} \vec{X} &= a, k, R \\ \vec{Y} &= 0 \\ \vec{S} &= E_{\text{л}}, r_0, \tau \\ \vec{Z} &= T. \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

В модельное уравнение (43) параметры внешней среды формально не входят, однако их влияние учитывается в связи с флуктуациями параметров лазерного излучения ($E_{\text{л}}, r_0, \tau$). Возможные изменения этих параметров в течение действия одного импульса излучения составляют $\pm 10\%$, а при длительной работе лазера $E_{\text{л}}$ и τ могут измениться на 300—400% и более. Изменение теплофизических и оптических свойств материалов (a, k, R), подлежащих сварке, также составляет $\pm 10\%$ и обусловлено допустимым отклонением этих параметров от номинальных значений.

Из результатов анализа уравнения (44) следует, что к наиболее чувствительным изменениям поверхностной температуры T приводят флуктуации радиуса пятна облучения r_0 и коэффициента отражения R . При длительной посылке импульсов излучения (более 100—150 импульсов) существенным становится и уменьшение энергии излучения $E_{\text{л}}$, обусловленное старением элементов излучателя. При этом коррекция энергии излучения $E_{\text{л}}$ повышением напряжения накачки может привести для некоторых типов лазеров к суще-

ственному (в 3—4 раза) изменению длительности импульса излучения [8].

Таким образом, анализ этой математической модели показывает, что для достижения выбранных показателей качества сварки необходимо учитывать влияние всех параметров лазерного излучения и коэффициента отражения излучения от зоны сварки. Модель управления процессом лазерной сварки с учетом сделанных выше замечаний может быть выражена общим уравнением:

$$\ddot{u} = u [R, E_{\text{л}}, r_0, \tau, T]. \quad (74)$$

где R , $E_{\text{л}}$, r_0 , τ — наиболее существенные параметры состояния процесса сварки; T — показатель качества сварки; $E_{\text{л}}$, r_0 , τ — управляемые параметры.

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Поскольку во время нагрева и плавления материала флуктуации параметра r_0 могут привести к сильному изменению показателя качества сварки T , то для реализации управления процессом сварки в реальном времени выберем схему вида (72).

В качестве управляемого параметра в промежутке между импульсами излучения выберем энергию излучения $E_{\text{л}}$, закон управления которой в соответствии с модельным уравнением (43) должен иметь вид

$$E_{\text{л}} (1 - R) / \sqrt{\tau} = \text{const.}$$

Блок-схема алгоритма управления рассмотренной модели приведена на рис. 25.

Очевидно, что управление процессом сварки в реальном масштабе времени может и не производиться. В этом случае параметр r_0 должен быть стабилизирован, что достигается, например, специальной настройкой оптической системы лазера КФО и расположением свариваемых деталей в плоскости перетяжки сфокусированного пучка излучения.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Автоматическое перестраивание параметров лазерного излучения должно выполняться в промежутках между импульсами излучения при необходимости изменения энергии излучения $E_{\text{л}}$ и радиуса пятна облучения r_0 . Отличительная особенность этой задачи состоит в том, что результат перестройки не всегда возможно, а экономически и не выгодно контролировать холостой посылкой излучения. В связи с этим способы задания параметров $E_{\text{л}}$ и r_0 должны отличаться высокой надежностью и обеспечивать широкий диапазон изменений параметров.

Для регулирования энергии излучения можно использовать способ, основанный на изменении напряжения накачки U_H . При этом необходимо учитывать существующую взаимосвязь параметров E_L и τ , а напряжение накачки выбирать из уравнения $U_H = f(E_L)$, вид которого зависит от срока службы элементов излучателя. Более простой способ изменения E_L — оптическое регулирование [8], основанное на изменении коэффициента пропускания излучения. В этом случае напряжение накачки может не корректироваться, следовательно, не будет изменяться и длительность излучения.

Для изменения параметра r_0 могут быть также использованы оптические методы, основанные на изменении параметров оптической системы лазера КФО, например, на изменении оптического интервала Δ_1 между линзами коллиматора. В этом случае, как было показано в предыдущих разделах, посвященных анализу преобразования лазерных пучков на основе теории дифракции Френеля, происходит продольное смещение перетяжки сфокусированного пучка. При $\Delta_2 = 0$ закон управления движением линз коллиматора упрощается и описывается уравнением (65). Используя выражения (6), (64) и (65), можно показать, что в общем виде закон изменения площади пятна облучения на поверхности неподвижных относительно фокусирующего объектива деталей выражается зависимостью

$$S = C_1 + C_2 \Delta_1 + C_3 \Delta_1^2,$$

где C_1, C_2, C_3 — постоянные коэффициенты.

Очевидно, рассмотренный способ изменения параметра r_0 может быть использован и для продольного смещения лазерного пучка, вызванного необходимостью сварки на новом участке, расположенном в другой плоскости.

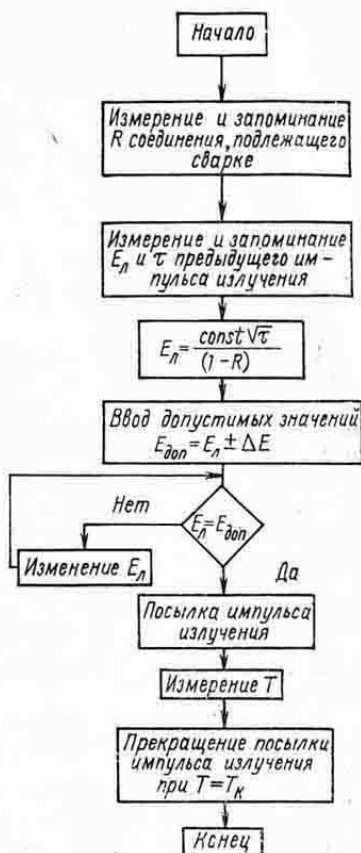


Рис. 25. Блок-схема алгоритма управления процессом лазерной сварки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибкое автоматическое производство (В. О. Азбель, В. А. Егоров, А. Ю. Звоницкий и др.; Под общ. ред. проф. С. А. Майорова и канд. техн. наук Г. В. Орловского. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. 376 с.
2. Давыдов В. А., Маслов Г. А. Сварка плавлением в электронике. М.: Машиностроение, 1979. 100 с.
3. Иванов В. И., Белов В. М. Акустикоэмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
4. Исследование возможности повышения эффективности использования лазерного излучения в металлообработке (Ю. В. Лакиза, А. А. Малащенко, А. В. Мезенов, В. И. Пустоварин. — Техники средств связи. Сер: «Техника проводной связи», 1982, вып. 5, с. 103—112.
5. Климов Ю. М. Основы расчета оптикоэлектронных приборов с лазерами. М.: Сов. радио, 1978. 264 с.
6. Лазеры в технологии. (Под ред. М. Ф. Стельмаха. М.: Энергия, 1975: 216 с.
7. Новицкий М. Лазеры в электронной технологии и обработке материалов: Пер. с польск. (Пер. Д. И. Юренкова. М.: Машиностроение, 1981. 152 с.
8. Оптическое регулирование энергии импульса технологических лазеров (А. А. Климов, А. А. Малащенко, В. Д. Хлыстов. — Техника средств связи: Сер. «Техника проводной связи», 1982, вып. 5, с. 113—115.
9. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 295 с.
10. Справочник по лазерам (Под ред. акад. А. М. Прохорова. Т. II. М.: Советское радио, 1978. 400 с.