



Ю. В. Лакиза, А. А. Малащенко,
А. В. Мезенов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ



Ленинград
1984

ОБЩЕСТВО «ЗНАНИЕ» РСФСР
Ленинградская организация
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ

УДК 621.791.38:621.373.826

Ю. В. Лакиза, А. А. Малащенко, А. В. Мезенов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Серия—Прогрессивная технология обработки конструкционных
материалов и изделий (механические, электрофизические и
другие методы обработки, сварка, защитные покрытия)

Ленинград
1984

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Отражение лазерного излучения при импульсном нагреве и плавлении металлов	4
Физико-технические основы лазерной металлообработки с возвратом отраженного излучения	9
Лазерная сварка с возвратом отраженного излучения в изделиях приборостроения	21
Литература	22

ВВЕДЕНИЕ

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» указывается на необходимость широкого использования лазерных методов обработки материалов и изделий с целью существенного улучшения их свойств. Интенсификация процессов лазерной обработки материалов — одна из важных задач в повышении эффективности использования лазеров в технологии.

Расширение сферы применения лазеров для обработки материалов обусловлено созданием технологических установок, реализующих основные преимущества лазерного излучения перед другими источниками нагрева. Малая расходимость излучения, широкий диапазон изменения плотности мощности и времени воздействия на обрабатываемый объект позволяют осуществлять лазерную сварку металлов, получать отверстия в различных материалах, выполнять скрайбирование и резку, лазерную маркировку, обработку тонких пленок, упрочнение инструментальных стальей, отжиг полупроводников и другие операции.

Среди известных способов применения лазеров для обработки материалов широко распространена в настоящее время лазерная сварка металлов. Процессы лазерной сварки относительно просты в осуществлении, легко управляемы, а локальность воздействия излучения позволяет вести монтаж малогабаритных деталей и узлов, в том числе и вблизи термоочувствительных элементов. Примером использования лазерной технологии в производстве может служить лазерная импульсная сварка деталей и узлов миниатюрных реле [1].

Однако в ряде случаев эффективность лазерной обработки металлов невелика из-за низкого КПД лазеров, высокой отражающей способности металлов, влияния неоднородности оптических свойств обрабатываемого материала на качество и воспроизводимость процесса. Относительно низкий КПД процесса лазерной сварки металлов, особенно металлов с высокой отражательной способностью, ограничивает ее применение при монтаже энергоемких соединений и обуславливает значительные эксплуатационные расходы на ее осуществление.

Разработаны и внедряются различные способы повышения эффективности лазерной металлообработки: легирование зоны сварки [2], комбинированные методы [3—5], предварительная механическая обработка поверхности материала [6], а также способы, основанные на использовании термооптических и термохимических явлений [7].

Кроме того, был предложен способ обработки металлов, который основан на дополнительном использовании энергии лазерного излучения, отраженного от зоны воздействия пучка [8]. Способ обработки с возвратом отраженного излучения, как будет показано ниже, может быть весьма эффективно использован в различных процессах лазерной технологии, например в сварке, пайке, упрочнении поверхности и т. д.

Однако данный метод интенсификации лазерной металлообработки пока широко не применяется в промышленности, что можно объяснить отсутствием необходимых сведений о характере отражения лазерного излучения от зоны обработки, а также отсутствием исследований, подтверждающих эффективность этого метода. Разработка этих вопросов и посвящена данная брошюра.

ОТРАЖЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ И ПЛАВЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Отражение лазерного излучения от зоны обработки металла характеризуется коэффициентом отражения R , равным отношению интенсивности излучения, отраженного поверхностью обрабатываемого металла, к интенсивности излучения, падающего на эту поверхность. Измеряемый коэффициент отражения R' в общем случае может быть не равен коэффициенту отражения R , так как падающее и отраженное излучение может, например, частично поглощаться и рассеиваться продуктами разрушения металла. При сварке этим эффектом можно пренебречь [9] и считать, что коэффициент поглощения $A=1-R$.

Исследование характеристик отраженного лазерного излучения целесообразно проводить с использованием зеркальной полусферы [10]. При расположении облучаемой мишени вблизи центра зеркальной высокоотражающей полусферы с отверстием для ввода лазерного излучения отраженное мишенью излучение будет перефокусировано в пятно, расположенное симметрично (относительно центра полусферы) пятну излучения, сфокусированному на мишень. Приемник, регистрирующий отраженное излучение, располагается так, что центр его приемной площадки (входного зрачка) совмещен с центром перефокусированного пятна излучения.

Зеркальная полусфера может иметь высокоотражающую, например металлическую, поверхность или быть выполнена из материала с большим значением коэффициента пропускания (стекло, кварц, германий и другие материалы в зависимости от длины волны излучения лазера). В этом случае одновре-

менно с измерением R можно исследовать и пространственно-временные характеристики отраженного излучения, облучая мишень с различных направлений.

Схема установки для исследования характера отражения лазерного излучения при импульсном нагреве и плавлении металлов представлена на рис. 1. Источником излучения 1 служит сварочный технологический лазер. Часть излучения лазера ответвителями 2 и 5 отражается в направлении фотоприемника 15 и калориметра 3. Калориметр служит для контроля энергии импульса излучения. Запоминающий осциллограф 16, на вход которого подаются сигналы с фотоэлектрического приемника, регистрирует временную форму импульса излучения, генерируемого лазером. Излучение лазера, прошедшее ответвители, фокусируется объективом 6 на поверхность мишени 8, расположенной таким образом, что центр зоны облучения мишени смещен относительно центра О полусфера 7 на некоторое расстояние и находится в диаметральной плоскости полусферы. Излучение, отраженное от поверхности мишени, перефокусируется полусферой на поверхность светорассеивающего ослабителя 10, расположенного так, что центр приемной площадки его симметричен относительно точки О центру зоны облучения мишени. Излучение, прошедшее ослабитель, регистрируется приемником 9, соединенным с осциллографом 11. Часть излучения, отраженного от поверхности мишени в апертуру фокусирующего объектива, ответвителем 5 отражается в направлении фотоприемника 12, который соединен со вторым входом двухлучевого осциллографа. Объективы 4, 13 и 14 используются для направления пучков лазерного излучения во входные зрачки соответствующих приемников 3, 12 и 15.

В установке использована зеркальная полусфера с высокоотражающим металлическим покрытием. Радиус зеркальной поверхности полусфера равен 75 мм. Пучок излучения направляется на

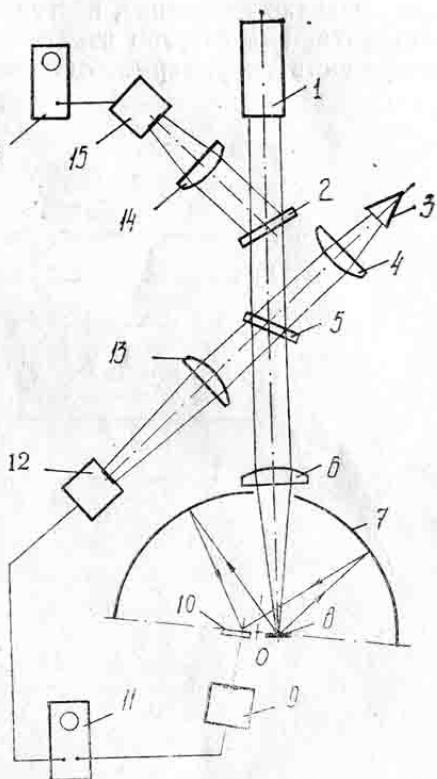


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

мишень через отверстие в полусфере, имеющее диаметр 25 мм. Мишени устанавливаются таким образом, чтобы облучаемая поверхность была расположена нормально к оси падающего пучка.

Эксперимент позволяет для каждого случая облучения мишени получить осциллограммы изменения мощности падающего пучка и соответствующих изменений мощности зеркально и диффузно отраженного излучения. Зеркально отраженным излучением здесь названо излучение, поступающее в апертуру фокусирующего объектива, а диффузно отраженным — излучение, отраженное на поверхность полусферы. Значение измеряемых коэффициентов

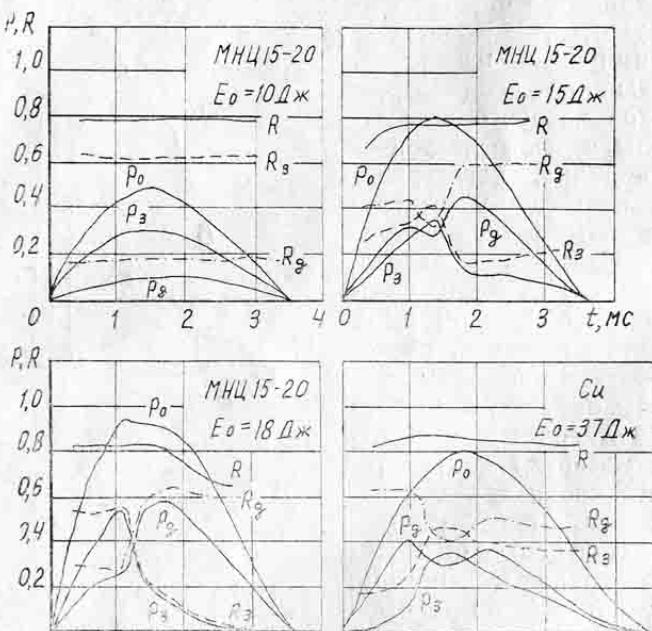


Рис. 2. Осциллограммы изменения мощности падающего излучения P_0 , зеркальной P_z и диффузной P_d составляющих отраженного излучения для МНИ 15-20 и Си при различных режимах облучения (временные зависимости коэффициентов отражения R , R_z , R_d рассчитаны по осциллографам)

отражения в каждый момент времени определяется как отношение «мгновенных» интенсивностей отраженного и падающего излучений. Таким образом находятся диффузная $R_d(t)$ и зеркальная $R_z(t)$ доли отражения. Суммарный коэффициент отражения определяется как $R(t) = R_d(t) + R_z(t)$.

Интегральный за время импульса коэффициент отражения определяется как отношение энергии импульса отраженного излучения (находится путем графического интегрирования соответ-

вующих осцилограмм) к энергии импульса излучения, падающего на мишень (измеряется калориметром и для калибровки осциллографа определяется интегрированием осцилограмм). Для калибровки измерительной установки применяются мишени с известными коэффициентами отражения (médные полированные пластинки, интерференционные зеркала), что обеспечивает измерение с погрешностью не хуже $\pm 10\%$.

На рис. 2 приведены осцилограммы мощности падающего излучения $P_0(t)$, зеркальной $P_z(t)$ и диффузной $P_d(t)$ составляющих отражения, полученные при обработке мишеней из сплава МНЦ 15-20 и меди при различных режимах облучения. Здесь же

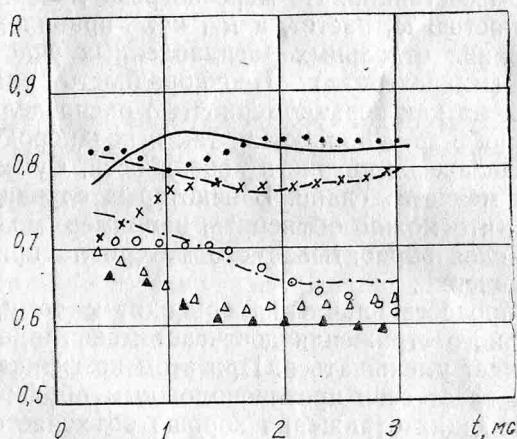


Рис. 3. Изменения коэффициента отражения R во времени при воздействии импульса излучения в режимах, характерных для сварки:
 — Cu; — Al; - - Ni;
 ··· MН19; △ — 47 НД; ▲ — Ст; ×× —
 МНЦ 15-20; ○ — 29 НК

представлены вычисленные временные зависимости коэффициентов отражения $R_z(t)$, $R_d(t)$ и $R(t)$. Источником излучения в эксперименте служила лазерная установка «Квант-10». В этом случае «мгновенная» мощность излучения относится к огибающей импульса с хаотическим чередованием пиков.

На рис. 3 показаны изменения коэффициентов суммарного отражения $R(t)$ мишеней из различных металлов и сплавов при обработке их в режимах, характерных для сварки и упрочнения [10]. Как следует из представленных зависимостей, общей закономерностью для лазерного нагрева металлов импульсами миллисекундной длительности является то, что при отсутствии плавления материала (вплоть до начала «очагового» плавления) кривые $P_z(t)$ и $P_d(t)$ подобны кривой $P_0(t)$, а коэффициенты отражения R_z , R_d и R в течение импульса изменяются слабо.

По мере увеличения энергии импульса излучения, направляемого на обрабатываемую поверхность, наблюдаются изменения в ходе кривых $P_3(t)$, $P_d(t)$, $R_3(t)$, $R_d(t)$, что может быть объяснено изменением характера процесса обработки, вследствие чего может измениться микрорельеф облучаемой зоны и начаться плавление материала. Дальнейшее увеличение энергии импульса вызывает увеличение количества жидкого металла, его перемешивание и вытеснение из зоны облучения с образованием кратера и окисной пленки в конце действия импульса.

Различия в ходе кривых R_3 , R_d , P_3 , P_d в начале облучения объясняются прежде всего различием оптических свойств 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 (микрозеркал). Неоднородность плавления может быть обусловлена как неравномерностью распределения интенсивности излучения в зоне обработки, так и 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, а затем начинает уменьшаться. При этом коэффициент диффузного отражения ведет себя противоположным образом. Такое поведение составляющих 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 актов повторного отражения и значительным перегревом поверхностного слоя расплавленного металла. В общем случае уменьшение суммарной доли отражения может быть вызвано также поглощением и рассеянием излучения факелом. Однако, как было отмечено выше, в рассматриваемых режимах обработки этот механизм несуществен.

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

При обработке сплавов, имеющих в своем составе легкоплавкие составляющие (нейзильбер, латунь, бронза), наблюдается монотонное снижение коэффициентов R и R_3 , что можно объяснить образованием сильно шероховатой поверхности как к концу действия импульса, так и после его окончания (наблюдаются мелкие кратеры, выплески, сильное загрязнение зоны облучения).

Приведенные результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

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

2. Коэффициент суммарного отражения излучения технологических лазеров от зоны облучения различных металлов при различных режимах обработки (включая нагрев без плавления и сильное расплавление) изменяется слабо (на 0,05—0,1), что соответствует изменению доли поглощенного излучения не более, чем в 1,2—1,5 раза.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ С ВОЗВРАТОМ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наличие при лазерной обработке металлов значительной доли отраженного излучения свидетельствует лишь о возможности повторного использования этого излучения при выполнении различных процессов лазерной технологии. Однако для оценки эффективности лазерной металлообработки с возвратом отраженного излучения необходимо рассмотреть ряд вопросов, связанных как с особенностями его применения, так и с пространственно-временными характеристиками отражаемого и возвращаемого излучений.

КПД обработки с возвратом отраженного излучения

При использовании многократного возврата отраженного излучения в зону обработки выражение для энергии, вводимой в металл при n -кратном возврате, имеет вид

$$E_n = (1-R)(E_{\text{л}} + E_{\text{л}}Rk + \dots + E_{\text{л}}R^nk^n) = E_{\text{л}}(1-R)\frac{1-(Rk)^{n+1}}{1-Rk}, \quad (1)$$

где $E_{\text{л}}$ — 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 охарактеризовать КПД лазерной обработки η_n , равным отношению поглощенной металлом энергией излучения при n -кратном возврате к энергии излучения лазера $E_{\text{л}}$. В соответствии с формулой (1) выражение для η_n имеет вид

$$\eta_n = \frac{E_n}{E_{\text{л}}} = (1-R)\frac{1-(Rk)^{n+1}}{1-Rk}. \quad (2)$$

Эффективность использования отраженного излучения можно охарактеризовать также коэффициентом β_n , равным отношению

энергии E_n , поглощенной металлом при n возвратах отраженного излучения, к энергии E_0 , поглощенной при однократном (первичном) воздействии излучения:

$$\beta_n = \frac{E_n}{E_0} = \frac{1 - (Rk)^{n+1}}{1 - Rk} = \frac{\eta_n}{1 - R}. \quad (3)$$

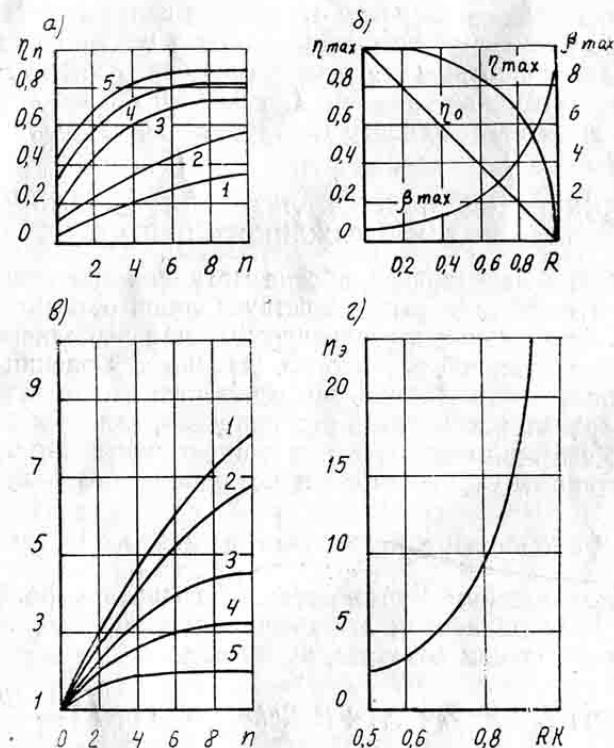


Рис. 4. Расчетные зависимости характеристик эффективности лазерной металлообработки при возврате отраженного излучения:

а — КПД обработки η_n от числа возвратов n ; б — максимального КПД η_{\max} и коэффициента β_{\max} от коэффициента отражения R ; в — коэффициента β_n от числа возвратов n ; г — эффективного числа возвратов n от параметра Rk . Кривые, обозначенные цифрами 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют значениям параметра $Rk=0,95; 0,9; 0,8; 0,7$ и $0,5$ соответственно

При разработке конкретных схем возврата для обработки материала с известными характеристиками отражения важно знать эффективное число возвратов, при котором обеспечивается использование определенной части первоначально отраженного излу-

чения. За такую величину может быть принято число возвратов n_0 , обеспечивающее ввод в металл 0,9 $E_{n \rightarrow \infty}$:

$$n_0 = -\left(\frac{2,303}{\ln(Rk)} + 1\right). \quad (4)$$

На рис. 4 приведены расчетные зависимости характеристик эффективности возврата отраженного излучения в зону обработки. Анализ зависимостей показывает, что эффективный КПД лазерной сварки металлов с коэффициентами отражения R от 0,6 до 0,9 может быть увеличен в 2—10 раз и более. Причем эффективность использования отраженного излучения возрастает с ростом коэффициента отражения металла.

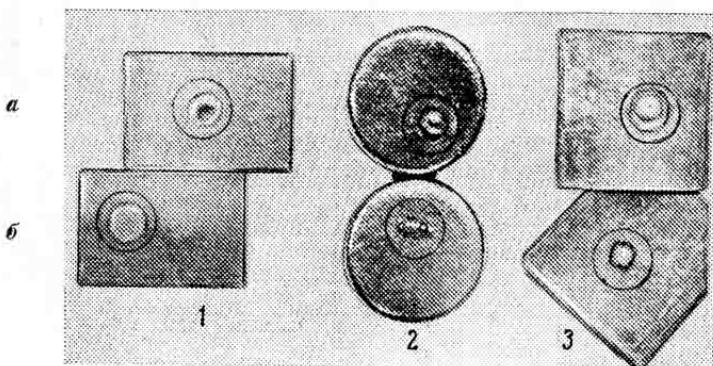


Рис. 5. Фотография зон облучения образцов из меди ($E_L=20$ Дж), мельхиора ($E_L=10$ Дж) и никеля ($E_L=10$ Дж)

Для реальных систем возврата времени, за которое происходит n_0 (<20) возвратов, менее 10^{-8} с. Следовательно, при обработке металлов импульсами излучения с длительностью импульсов $\tau_i \gg 10^{-8}$ с можно пренебречь удлинением импульсов поглощенной и направляемой на металл энергии лазерного излучения. Приведенное выше рассмотрение для энергии лазерного излучения остается в этом случае справедливым и для мощности.

На рис. 5 для практической иллюстрации эффективности возврата приведена фотография зон облучения на воздухе образцов из меди (1), мельхиора (3) и никеля (2). Возврат отраженного излучения осуществлялся зеркальной полусферой, характеризуемой $k=0,9$. Образец устанавливали таким образом, чтобы центр зоны его обработки был совмещен с центром полусферы, а нормаль к поверхности образца составляла некоторый угол с осью излучения лазера для обеспечения однократного возврата зеркальной составляющей отражения. Диффузная составляющая отражения при этом

возвращалась многократно (до затухания). Обработка велась импульсами лазерного излучения с одинаковой для каждого материала энергией (Cu — 20 Дж; МН19 и Ni — 10 Дж), как с применением системы возврата (*a*), так и без нее (*b*).

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 наблюдается слабое (очаговое) плавление поверхностного слоя металла. Применение системы возврата обеспечивало 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 являться количественной характеристикой эффективности сварки указанных металлов с возвратом отраженного излучения с помощью зеркальной полусфера.

Стабилизация энерговложения при обработке с возвратом

Невоспроизводимость результатов лазерной обработки металлов может быть вызвана изменением оптических свойств участков облучаемой поверхности. При обработке без возврата отраженного излучения результат обработки может сильно зависеть от изменения поглощательной способности металла как по поверхности обработки, так и в течение импульса воздействия.

Установлено, что результат воздействия лазерного излучения на металл в значительной мере определяется исходным состоянием поверхности. Так, например, по осциллограммам изменения P_3 и P_d может быть определено время начала плавления металла, которое для металла с шероховатой поверхностью наступает раньше, чем для того же металла с гладкой поверхностью. Сварка образцов с шероховатой поверхностью в режиме облучения, соответствующем нормальному плавлению металла с гладкой поверхностью, приводит к сильным выплескам и испарению металла.

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

Основная причина нестабильной сварки многих соединений, даже при условии стабильных параметров лазерного излучения, заключается в нерегулируемом изменении энерговложения, вызванном изменением оптических свойств зоны обработки. Эти свойства могут быть охарактеризованы коэффициентом отражения R .

Оценку влияния изменения коэффициента R на характер процесса нагрева можно выполнить с помощью уравнения, описывающего изменение скорости нагрева v_n металла, которое вызвано изменением коэффициента отражения R :

$$\Delta v_n = \frac{q V \sqrt{a/t}}{\sqrt{\pi} \lambda} \frac{\Delta R}{1-R}, \quad (5)$$

где Δv_n — изменение скорости нагрева; ΔR — изменение коэффициента отражения; λ — коэффициент теплопроводности; t — время нагрева; q — плотность мощности лазерного излучения.

Анализ уравнения (5) показывает, что для металлов, обладающих высоким значением R , даже небольшие его изменения приводят к значительным изменениям скорости нагрева, что в конечном итоге обуславливает невоспроизводимость процесса сварки.

Для повышения воспроизводимости результатов обработки можно, например, изменять мощность лазерного излучения в соответствии с изменением R . Однако техническая реализация автоматического регулирования параметров лазерного излучения оказывается задачей весьма сложной и в настоящее время практически нереализованной. Легко осуществимым способом повышения воспроизводимости процессов лазерной обработки металлов является использование возврата отраженного излучения в зону обработки. В этом случае уменьшение или увеличение доли поглощаемого излучения приводит к противоположному изменению доли излучения, отражаемого и возвращаемого в зону обработки. Иначе говоря, процесс лазерной обработки с возвратом отраженного излучения при изменении оптических свойств материала обладает саморегулированием.

Нестабильность энерговложения лазерного излучения в обрабатываемый металл при осуществлении n возвратов отраженного излучения можно охарактеризовать коэффициентом нестабильности

$$\gamma_n = \frac{\Delta E_n}{E_n}, \quad (6)$$

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

Выражение для коэффициента нестабильности при $n \rightarrow \infty$ имеет вид

$$\gamma_{n \rightarrow \infty} = \frac{(1-k) \Delta R}{(1-R)(1-Rk)}. \quad (7)$$

Оценку уровня стабилизации энерговложения лазерного излучения в металл можно проводить с помощью коэффициента стабилизации $\delta_n = \frac{\gamma_{n=0}}{\gamma_n}$.

Максимальное значение коэффициента стабилизации достигается при многократном (до затухания) возврате отраженного излучения ($n \rightarrow \infty$)

$$\delta_{n \rightarrow \infty} = \frac{\gamma_{n=0}}{\gamma_{n \rightarrow \infty}} = \frac{1 - Rk}{(1 - R)(1 - k)}. \quad (8)$$

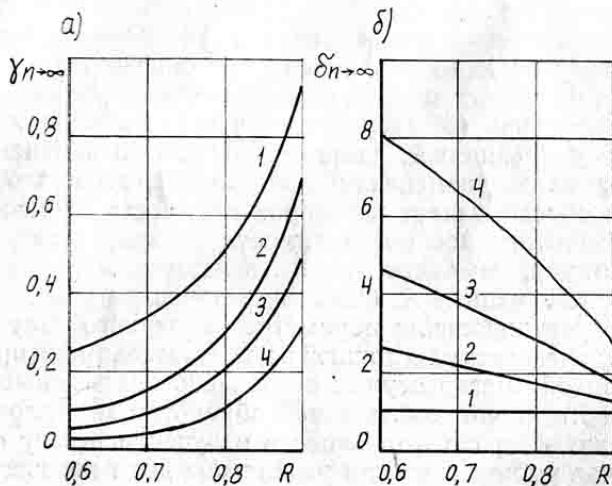


Рис. 6. Расчетные зависимости параметров стабильности энерговложения от R для значений коэффициента возврата k , равных 0; 0,8; 0,9; 0,95 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

а — минимальное значение коэффициента нестабильности; б — максимальное значение коэффициента стабильности

На рис. 6 приведены зависимости параметров стабильности энерговложения от R для различных значений k , показывающие возможность получения высокого уровня стабилизации энерговложения за счет возврата отраженного излучения. Экспериментальное подтверждение процесса саморегулирования демонстрирует рис. 7, где показан внешний вид зон облучения мельхиоровой пластины, поверхность которой имеет два участка с разницей в коэффициенте отражения $\Delta R = 0,1 - 0,15$. Цепочка зон проплавления, обозначенная на рисунке цифрой 1, соответствует обработке без возврата отраженного излучения. Ряд зон проплавления под номером 2 демонстрирует результат проплавления с возвратом отраженного излучения, осуществляемым зеркальной полусферой. Видно, что изменение оптических свойств поверхности в исходном (до облучения) состоянии практически не влияет на проплавление пластины при обработке с возвратом отраженного излучения. Таким образом, приведенные экспериментальные ре-

зультаты исследования подтверждают возможность компенсации изменений оптических свойств материалов в случае их обработки с возвратом отраженного излучения.

Качество различных процессов лазерной обработки в значительной степени зависит и от формы импульса $P(t)$, определяющей режим нагрева и плавления облучаемого объекта. Поскольку серийные технологические установки в ряде случаев не обеспечивают требуемого режима обработки, возникает необходимость изменения формы импульса. Эта задача может быть решена целенаправленным изменением временной зависимости возвращаемого



Рис. 7. Внешний вид зон облучения пластины из сплава МН19:

1 — обработка без возврата; 2 — обработка с возвратом отраженного излучения

в зону обработки отраженного излучения путем использования, например, только зеркальной или только диффузной составляющих отраженного излучения.

Так, при осуществлении n возвратов зеркальной составляющей отраженного излучения выражение для мощности излучения, направляемого на обрабатываемую поверхность, имеет вид

$$P(t) = P_0 \frac{1 - (R_3 k)^{n+1}}{1 - R_3 k}. \quad (9)$$

На рис. 8 показаны кривые изменения мощности излучения, падающего на поверхность пластины из сплава МНЦ15-20 при обработке без возврата (P_1) и с однократным возвратом (P_2) в зону обработки зеркальной составляющей отражения для $k=0,95$.

Для случая обработки с возвратом мощность лазерного импульса P'_0 уменьшена по сравнению с P'_0 в $\beta_{n=1}=1,5$ раза при P'_0 , рассчитанной для нагрева до начала плавления с образованием лунки ($R_3=\text{const}$).

Как видно из хода кривых $P_1(t)$, $P_2(t)$, возврат зеркальной составляющей отражения приводит к тому, что передний фронт импульса $P_2(t)$ совпадает с передним фронтом импульса $P_1(t)$ до начала плавления с образованием лунки. После этого R_3 уменьшается и форма $P_2(t)$ изменяется, как показано на рис. 8, приближаясь к форме, требуемой для поддержания постоянной температуры на поверхности металла.

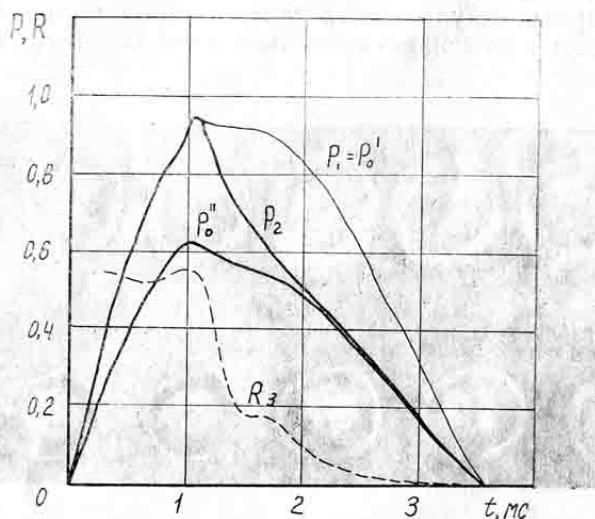


Рис. 8. Кривые изменения мощности излучения, падающего на поверхность пластины из сплава МНЦ 15-20, при обработке без возврата ($P_1 = P'_0$) и с однократным возвратом (P_2) в зону обработки зеркальной составляющей отраженного излучения мощностью P''_0 . Кривая $P_3(t)$ показывает изменения коэффициента зеркального отражения

Аналогичный анализ может быть проведен для возврата диффузной составляющей отражения. Выбор же того или иного способа регулирования формы импульса излучения, направляемого на обрабатываемый объект, осуществляется в зависимости от конструктивно-технологических особенностей объекта обработки и исходной формы лазерного импульса.

Оптические схемы световозвращающих устройств

В качестве примера рассмотрим схемы устройств для возврата в зону обработки зеркальной и диффузной составляющих отражения.

Однократный возврат зеркально отраженного излучения не представляет особых трудностей при наклонном падении первич-

ного пучка лазерного излучения. Такой возврат может осуществляться простыми световозвращателями, устанавливаемыми на пути отраженного пучка.

На рис. 9 приведена схема устройства, в котором обработка материала ведется пучком поляризованного излучения, падающего нормально к поверхности материала. Эта схема была предложена для защиты оптики излучателя лазера от отраженного излучения [11]. Ее можно использовать для возврата зеркально отраженного излучения в зону обработки.

Работа устройства заключается в следующем. Излучение лазера 1 P -поляризации (относительно светоотражающей грани поляризатора 2) проходит поляризатор и четвертьволновой пластинкой 3 преобразуется в излучение с круговой поляризацией. Это излучение фокусируется объективом 4 на поверхности объекта обработки 5. Отраженное в апертуру фокусирующего объектива излучение круговой поляризации пластинкой 3 преобразуется в излучение S -поляризации, которое отражается светоотражающей гранью поляризатора и не проходит в направлении лазера. Излучение, отвергнутое поляризатором, может быть обратно возвращено в зону обработки. Представленная схема обеспечивает однократный возврат непрерывного и импульсного излучений и многократный возврат коротких ($\tau < 10^{-8}$ с) импульсов лазерного излучения.

Для многократного возврата коротких импульсов четвертьволновая пластинка выполняется в виде модулятора поляризации.

Для возврата в зону обработки диффузно отраженного излучения может быть использована зеркальная полусфера. Схема устройства для лазерной обработки с применением такой полусферы представлена на рис. 10. Излучение лазера 1 объективом 2 фокусируется через отверстие в полусфере 3 на поверхность объекта обработки 4, установленного так, что центр его зоны обработки совпадает с центром полусферы. Излучение, диффузно отраженное поверхностью объекта обработки, многократно возвращается в зону обработки.

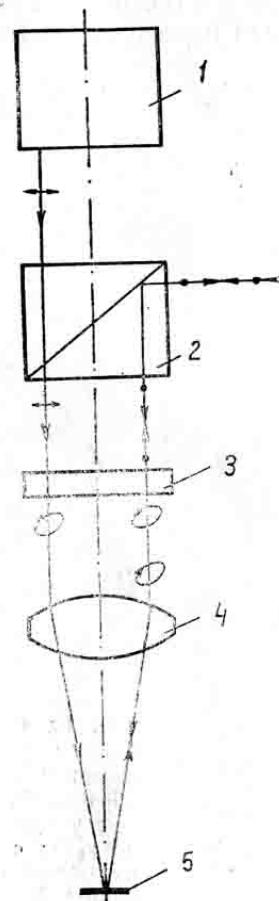


Рис. 9. Схема устройства для лазерной обработки с поляризационной связью лазерного излучения

Анализ эффективности применения зеркальной полусферы необходимо проводить с учетом диаграмм направленности отраженного излучения от конкретных объектов обработки и эффектов размытия светового пятна при перефокусировке.

Оценка расфокусирующего действия зеркальной полусферы радиуса ρ выполнялась ранее [12] путем расчета изменения границ первоначального радиуса пятна излучения r_0 в зависимости от числа переотражений n и плоского угла рассеяния 2Θ .

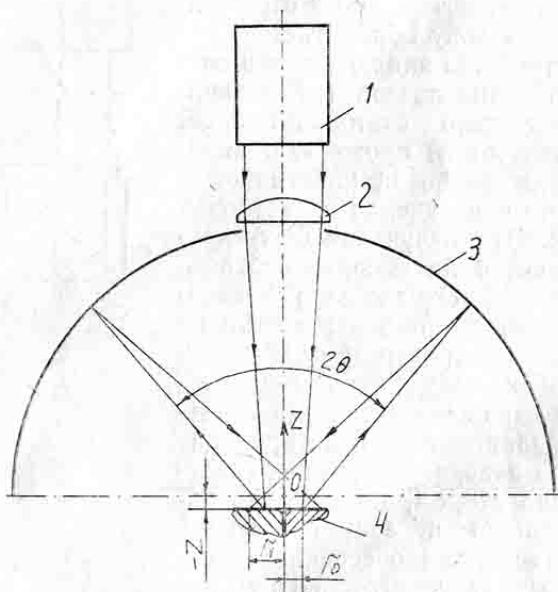


Рис. 10. Схема устройства для лазерной обработки с применением зеркальной полусферы (1 — лазер; 2 — объектив; 3 — полусфера; 4 — объект обработки), ход лучей в зеркальной полусфере при увеличении радиуса пятна излучения от r_0 до r_1 за счет однократного возврата диффузно отраженного излучения для плоского угла рассеяния 2Θ и смещения плоскости обработки от диаметральной плоскости полусферы на $-z$

Для определения целесообразности применения зеркальной полусферы в качестве устройства возврата отраженного излучения при лазерной обработке различных объектов необходимо учитывать размытие пятна из-за смещения облучаемой поверхности от диаметральной плоскости полусферы.

На рис. 10 показан ход лучей, поясняющий размытие светового пятна. Лучи, выходящие под различными углами из точки пятна, расположенной на расстоянии r_1 от оси полусферы в плоскости обработки (облучения), которая смешена относительно диамет-

ральной плоскости полусфера на расстояние z , будут пересекать плоскость обработки в различных точках, что и приводит к размытию пятна.

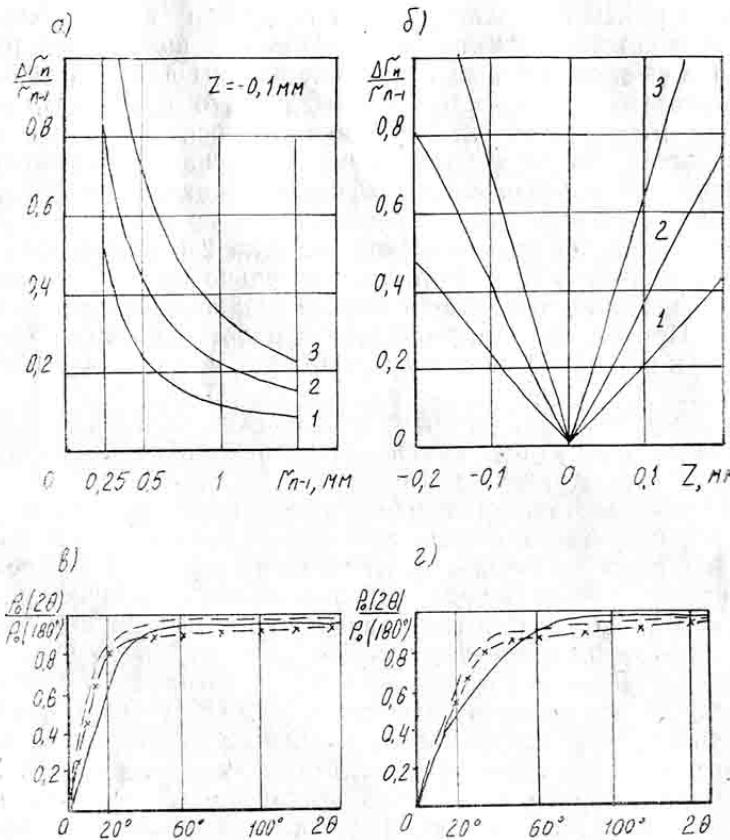


Рис. 11. Расчетные зависимости $\Delta r_n / r_{n-1}$ от r (а) и z (б) для плоских углов рассеяния $2\theta=60^\circ, 90^\circ$ и 120° (кривые 1, 2 и 3 соответственно) и экспериментальные зависимости $P_0(2\theta)/P_0(180^\circ)$ от θ для гладкой (в) и диффузной (г) поверхности материала (— $\tau=1$ мс; —·— $\tau=2$ мс; —×— $\tau=3$ мс)

Расчет радиуса пятна после облучения в плоскости обработки r_n для n -го возврата зеркальной полусферой отраженного излучения может быть сделан с использованием зависимости

$$r_n = [\rho \cos(\Theta \mp z) \mp z] [\pm \operatorname{tg}(\Theta \mp \operatorname{tg}(\Theta \pm 2x))] - r_{n-1}, \quad (10)$$

где $x = \arcsin \left[\frac{\sqrt{r_{n-1}^2 + z^2}}{\rho} \cos(\Theta - \alpha) \right]$, $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{z}{r_{n-1}}$.

Верхние знаки в выражении (10) соответствуют смещению

объекта обработки внутрь полусферы ($z > 0$), а нижне — смещению в противоположном направлении ($z \leq 0$).

На рис. 11 (а и б) приведены расчетные зависимости, характеризующие размытие пятна радиуса r_{n-1} при последующем n -м возврате отраженного излучения зеркальной полусферой радиуса 75 мм (зависимости $\Delta r_n/r_{n-1}$ от Z рассчитаны для $r_{n-1} = 0,5$ мм).

Анализ этих зависимостей показывает, что при фиксированном значении смещения объекта обработки относительно диаметральной плоскости полусферы размытие уменьшается с увеличением радиуса пятна первоначально сфокусированного излучения лазера.

Размытие пятна сильно зависит от угла 2Θ и от смещения облучаемой поверхности объекта относительно диаметральной плоскости полусферы, что требует точной установки обрабатываемых деталей. Причем смещение объекта обработки внутрь полусферы приводит к несколько меньшему размытию, чем при обратном смещении.

Оценка размытия пятна при многократном возврате должна производиться с учетом изменения угла 2Θ и радиуса пятна r_n после n -го акта отражения и возврата.

Характер пространственного распределения отраженного излучения в различные моменты времени импульса исследовали на установке, схема которой представлена на рис. 1. В эксперименте использовали частично прозрачную стеклянную полусферу.

Внутри полусферы устанавливали осесимметричные светопоглощающие экраны, обеспечивающие перефокусировку излучения, отражаемого мишенью в телесные углы, которые соответствуют углам 2Θ на поверхность ослабителя '10. Облучению нормально падающим пучком подвергались различные плоские мишени. Параметры излучения соответствовали режиму сварки этих мишеней. Для каждого экрана облучалось несколько однотипных (имеющих одинаковое качество поверхности зоны обработки) мишеней.

На рис. 11 (в, г) приведены результаты измерений отношения мощности излучения $P(2\Theta)$, отражаемого в угол 2Θ , к мощности излучения $P(180^\circ)$, отражаемого в угол 180° , при облучении плоских алюминиевых мишеней с гладкой (в) и матированной (г) поверхностью для различных моментов времени.

Из представленных данных видно, что наиболее резкое изменение в ходе кривых $P(2\Theta)/P(180^\circ)$ наблюдается при малых углах ($2\Theta \leq 40 - 60^\circ$). Наибольшие различия между величинами $P(2\Theta)/P(180^\circ)$ в зависимости от момента времени наблюдаются при углах $2\Theta = 20 - 60^\circ$. Однако при $2\Theta > 60 - 80^\circ$ рост кривых замедляется, и они практически совпадают для любых моментов времени в течение импульса. Как следует из приведенных зависимостей, а также результатов, полученных на других мишенях, основная доля излучения, отраженного при сварке деталей с плоской облучаемой поверхностью, распространяется в конусе с плоским углом при вершине около 90° .

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА С ВОЗВРАТОМ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЗДЕЛИЯХ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

В конструкциях многих деталей приборостроения применяются осесимметричные сварные соединения, которые обычно представляют собой тонколистовые детали, закрепленные на тонких стержнях, например на выводах цоколя. Наиболее распространенной схемой крепления деталей осесимметричных соединений является одноимпульсная лазерная сварка сплошным световым пучком, направляемым вдоль оси стержня. Обычно сварка таких соединений на серийных установках характеризуется следующими особенностями:

низким КПД сварки, обусловленным высокой отражательной способностью свариваемых материалов;

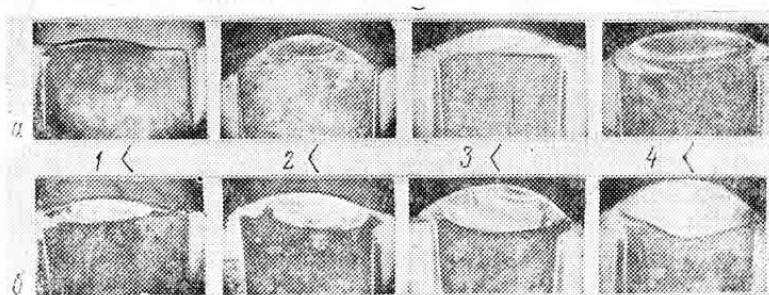


Рис. 12. Фотографии шлифов сварных соединений, полученных при различных энергиях импульса без возврата (а) и с возвратом (б) отраженного излучения в зону сварки (увеличено в 20 раз) при значениях $E_d=3,8$ Дж (1), 5,5 Дж (2), 7,7 Дж (3) и 10 Дж (4)

неравномерностью нагрева свариваемых деталей с различными отражательными свойствами;

низкой воспроизводимостью результатов сварки, обусловленной наличием зазора между свариваемыми деталями;

повреждением лазерным излучением стеклоизолятора вывода или других элементов прибора, расположенных вне зоны сварки.

Указанные дефекты в значительной степени уменьшаются при сварке с возвратом отраженного излучения. Для осесимметричных соединений может быть рекомендована схема, представленная на рис. 10.

По этой схеме на установке «Квант-10» проводили сварку контактов из серебра и бронзы с коваровыми выводами. На рис. 12 показаны фотографии шлифов сварных соединений, полученных при различных режимах облучения без возврата отраженного излучения (а) и с возвратом излучения (б).

Анализ шлифов показал, что при использовании в качестве световозвращателя зеркальной полусферы энергия импульсов ла-

зерного излучения должна быть уменьшена в 2 раза по сравнению с энергией импульса при сварке без возврата при равном объеме расплавленного металла для сварки указанных конструкций. Кроме того, сварка с возвратом позволила избежать нежелательных выплесков металла, обеспечить стабильность энерговложения и повысить воспроизводимость обработки вследствие стабилизации энерговложения.

Достигнуто значительное уменьшение степени воздействия лазерного излучения на термоочувствительные детали цоколя как за счет уменьшения энергии импульса излучения лазера, так и вследствие увеличения угла расходимости излучения, проходящего на термоочувствительные элементы, расположенные за зоной сварки по ходу пучка.

Одним из важных направлений повышения эффективности лазерной металлообработки является повышение ее производительности. Известно, что лазерные технологические установки имеют предельно допустимую среднюю мощность излучения, ограничивающую их производительность [13].

Использование возврата отраженного излучения позволяет уменьшить энергию импульсов лазерного излучения, увеличить частоту посылок импульсов в η_n раз и таким образом увеличить скорость лазерной обработки.

Л и т е р а т у р а

1. Рудык А. Р., Любинский Д. Л. Технология миниатюрных реле.—Л.: Энергоиздат, 1982.
2. Климов А. А., Малащенко А. А. Лазерная сварка деталей из бескислородной меди.—В сб.: Применение пайки и сварки при монтаже и сборке аппаратуры.—Л.: ЛДНТП, 1975.
3. Геречихин Л. И., Минько Л. Я. Однополярный импульсный плазменный генератор в сочетании с ОКГ как источник получения плазменных струй.—ЖПС, 1966, № 4.
4. Способ сварки с использованием квадратных импульсов тока, вызывающих резонанс в расплавленном металле / Пат. США № 3781511 от 23.03 1972.
5. Коваленко В. С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров.—Киев: Выща школа, 1977.
6. Баткин Е. С., Башеню В. В., Гольцова В. П. Влияние параметров шероховатости поверхности материала на эффективность процесса импульсной лазерной сварки.—Электротехническая промышленность, сер. Электросварка, 1982, № 5, с. 11—13.
7. Бонч-Бруевич А. М., Либенсон М. Н. Использование термооптических и термохимических явлений для интенсификации процессов лазерной технологии.—В сб.: Использование лазеров в современной науке и технике.—Л.: ЛДНТП, 1980.
8. Устройство для перефокусировки отраженного излучения / Пат. США № 3757078 от 19.01.1971.
9. Гагарин А. П., Иванова И. Н., Либенсон М. Н., Пудков С. Д. Изменение отражающих свойств металла под действием мощного светового потока.—ЖТФ, 1977, т. 47, № 7.
10. Лакиза Ю. В., Малащенко А. А., Мезенов А. В., Пустовойт В. И. Исследование возможности повышения эффективности использования лазерного излучения в металлообработке.—Техника средств связи, 1982, сер. ТПС, вып. 5, с. 103—112.

11. Пат. Швейцарии № 550646 кл. В28Д5/06.
 12. Лакиза Ю. В., Малащенко А. А., Мезенов А. В. Эффективность электронно-лучевой и лазерной обработки металлов — Изв. ЛЭТИ/Научн. тр. Ленингр. электротехн. ин-та им. В. И. Ульянова (Ленина), 1982, вып. 303.
 13. Климов А. А., Малащенко А. А. Повышение производительности и качества лазерной шовной сварки элементов реле. — Техника средств связи, 1978, сер. ТПС, вып. 5.
-