

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В АВИАСТРОЕНИИ

**Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к курсовому проектированию**

Составленные в соответствии с программой курса «Лазерная обработка материалов» указания определяют задачи и содержание курсового проектирования процессов изготовления деталей летательных аппаратов и двигателей с использованием лазерной технологии. Рассмотрена методика расчета температурно-скоростных режимов операций пробивки отверстий малого диаметра, газолазерной резки листовых материалов, сварки металлов импульсным и непрерывным излучением, поверхностного легирования и наплавки, лазерной термообработки. Приведены описание оптических систем, применяемых в технологических операциях, рекомендации по выбору защитной среды. Даны характеристики структурных превращений при лазерной обработке конструкционных материалов.

Методические указания предназначены для студентов факультета «Двигатели летательных аппаратов», обучающихся по специальности 0537 (специализация «Конструирование и эксплуатация энергетических установок»), и слушателей ФПК.

Составители: *В. П. Шорин, В. И. Мордасов, Е. А. Изжуев*

Рецензенты: *О. П. Кирсанов, Н. Д. Быстров*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Сложность и длительность подготовки технологического процесса лазерной обработки, высокая стоимость технологической оснастки обуславливают необходимость выбора оптимального варианта технологии изготовления деталей в соответствии с заданной программой выпуска.

Конструктивно-технологический анализ детали. Под технологичностью понимается сочетание конструктивных элементов детали, обеспечивающее выбор наиболее простого и экономичного способа изготовления детали в условиях заданной программы выпуска при соблюдении технических и эксплуатационных требований. В процессе анализа выявляются все завышенные требования к конструкции детали. По возможности, если позволяют условия эксплуатации, конструкцию детали заменяют элементами простой формы, менее трудоемкой в изготовлении.

Определение размеров и форм заготовок. Обычно исходные размеры заготовки определяют условиями чертежа и величиной припусков на проведение технологических операций. Учитывается точность выполнения размеров детали после каждой операции, а также возможные перемещения в детали при термическом воздействии. При лазерной резке необходимо выбирать наиболее экономичный раскрой материала: прямой, наклонный, встречный, комбинированный, многорядный. При составлении раскроя нежелательно резать узкие полосы, так как увеличиваются концевые потери и количество полос на партию, ухудшается подача. В массовом производстве листовой материал заменяется холоднокатаной лентой.

Установление количества и последовательности операций. Количество и последовательность операций определяется конфигурацией и соотношением размеров конструктивных элементов детали, требуемой точностью и необходимостью соблюдения баз дальнейшей обработки. Необходимо стремиться к наименьшему количеству операций и увеличению их производительности (исключением является лишь мелкосерийное производство, где уменьшение количества операций приводит к необходимости изготовления дорогостоящей технологической оснастки), совмещению операций лазерной обработки (например, сварка тонкостенных обечаек про-

водится совместно с отжигом околошовной зоны или вырезка по криволинейному контуру детали из листа осуществляется совместно с пробивкой отверстий импульсным лазерным излучением).

Определение мощности излучения и длительности обработки. Для выбора технологического лазера требуется знать величину суммарной мощности излучения, длительности обработки и рабочей длины используемого излучения. Здесь должны найти отражение все подготовительные этапы обработки детали. При выборе технологического лазера следует учитывать режимы генерации излучения. Операции резки и сварки следует проводить в одномодовом режиме, а упрочнение и локальный отжиг — при многомодовом излучении. Номинальная мощность технологического лазера должна быть достаточной для обеспечения заданной производительности при выполнении совмещенных операций. При этом необходимо учитывать потери мощности излучения, проходящего через оптические системы. Рабочее пространство технологического модуля должно обеспечивать размещение технологической оснастки.

Выбор средств механизации и автоматизации. Степень возможной автоматизации процессов лазерной обработки зависит прежде всего от типа производства и определяется экономической целесообразностью ее применения. В массовом и крупносерийном производстве однотипных деталей осуществляется полная комплексная автоматизация всех звеньев производственного процесса в виде поточных линий. В серийном и мелкосерийном производстве применяется частичная автоматизация. В случае проведения опасных работ механизация и автоматизация проводится независимо от экономической целесообразности.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

К распространенным процессам лазерной обработки материалов относятся: пробивка отверстий импульсным лазерным излучением, газолазерная резка листовых материалов, сварка металлов импульсным и непрерывным излучением, лазерная термообработка, поверхностное легирование и наплавка. Эти процессы позволяют со значительной эффективностью изготовить широкую номенклатуру деталей в заготовительном производстве с высокими эксплуатационными характеристиками.

Пробивка отверстий импульсным лазерным излучением. При получении отверстий в непрозрачных материалах импульсным лазерным излучением следует применить энергию умеренной плотности ($10^6 \dots 10^8$ Вт/см²). Лунка растет в глубину в основном за счет испарения, а по диаметру — за счет плавления стенок и вытеснения

жидкости избыточным давлением паров (рис. 1). Имсет место баланс энергии $dE = dE_1 + dE_2$,

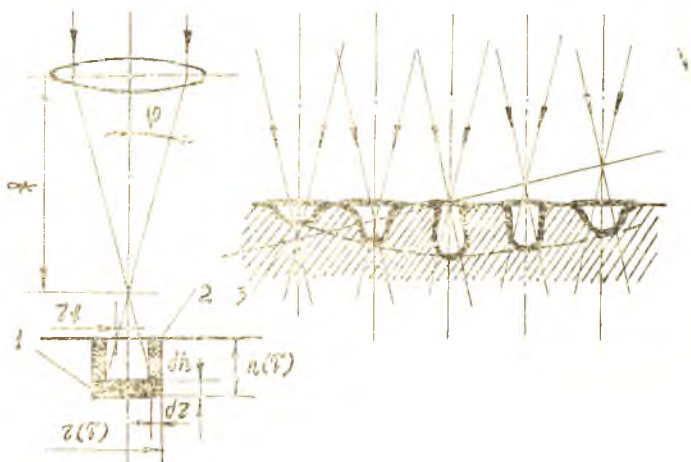


Рис. 1. Механизм образования отверстия импульсным лазерным излучением: 1 — область парообразования, 2 — область расплава, 3 — линия положения фокуса

$$P_s(\tau) d\tau = L_b \pi r^2(\tau) dh + L_m 2\pi r^2(\tau) h(\tau), \quad (1)$$

где dE — изменение энергии в импульсе; dE_1 — теплота образования паров; dE_2 — теплота образования жидкой фазы; L_b — удельная теплота испарения материала; L_m — удельная теплота плавления материала; $r(\tau)$, $h(\tau)$ — соответственно радиус и глубина лунки; τ — длительность импульса; $P_s(\tau)$ — мощность излучения.

При расчете геометрии отверстия принять допущения о постоянстве мощности излучения $P_s(\tau) = \text{const}$, а также о том, что глубина отверстия больше, чем его диаметр $h(\tau) > r(\tau)$. Из условия $dr(\tau) = dh(\tau)$ интегрированием уравнения (1) получаем

$$h = \sqrt[3]{\frac{3 P_s \tau}{\pi \operatorname{tg}^2 \varphi (L_b + 2 L_m)}}, \quad r = r_f + \sqrt[3]{\frac{3 P_s \tau}{\pi (L_b + 2 L_m)}}, \quad (2)$$

где r_f — радиус светового пятна на поверхности материала; φ — угол светового конуса.

При выборе величин P_s и τ следует учитывать, что глубина образования отверстия не пропорциональна энергии импульса, а находится в степени (1/3). Здесь большое влияние играет угол светового конуса, т. е. длина фокуса объектива f . На профиль лунки и характер разрушения материала влияют условия фокусировки лазерного излучения. При обработке в сходящемся световом

пучке характерным является конический профиль лунки, а в расходящемся — цилиндрический (см. рис. 1). Колбообразный профиль — комбинация конуса и цилиндра. За счет неравномерности распределения излучения по сечению светового пятна в течение и во время импульса, а также под влиянием теплопроводности и гидродинамических явлений профиль лунки искажается. На входе появляется характерная воронка и плавный переход от дна к стенкам. Лунка может иметь параболический профиль.

Для получения качественных отверстий следует удалять из лунки всю жидкую фазу. Причиной наличия расплава на поверхности отверстия является уменьшение плотности светового потока на дне лунки как за счет расфокусировки светового пучка по мере роста лунки в глубину, так и вследствие (обычно наблюдаемого у твердотельных лазеров) уменьшения мощности генерации к концу импульса. Уменьшение скорости вылета и давления паров в лунке приводит к частичному выбросу расплава.

При разработке технологии пробивки отверстий следует учесть, что полное заплывание лунок наблюдается при определенном отношении h/r . У глубоких лунок весь расплав, составляющий в среднем $2/3$ объема лунки, после окончания импульса под действием сил поверхностного натяжения переформировывается (рис. 2) и принимает форму некоторого тела вращения с минимальной площадью поверхности

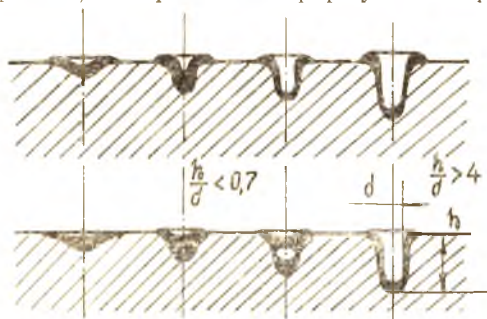


Рис. 2. Заплывание отверстий при лазерной обработке

($h/r < 0,7$ — лунка заплывлена, $h/r > 4$ — не заплывлена, т. к. потоки жидкости турбулентны и происходит значительный вынос расплавленного материала). Заплывание неглубоких отверстий происходит в конце импульса излучения, когда мощность генерации падает.

Для получения глубоких отверстий может быть использована многоимпульсная лазерная обработка. В этом случае необходимое число импульсов и относительная глубина отверстия, которую можно получить в заготовке, определяются следующими выражениями:

$$\frac{h}{r} \approx \frac{0,56 L_0^{1/3} E^{1/6}}{\lg q^{4/3} Q^{1/2}}, \quad n \approx \frac{1,7 L_0^{1/3} E^{1/6}}{\lg q^{1/3} Q^{1/2}}, \quad (3)$$

где E — энергия импульса; Q — предельная плотность энергии, которая вызывает испарение материала.

В первоначальный момент фокус светового пучка должен располагаться над поверхностью детали. С увеличением глубины отверстия его нужно заглубить. Для повышения точности размеров отверстий — устранить чрезмерное образование жидкой фазы на их внутренней поверхности возможно путем пневматического калибрования, накладных экранов и диафрагмирования (рис. 3).

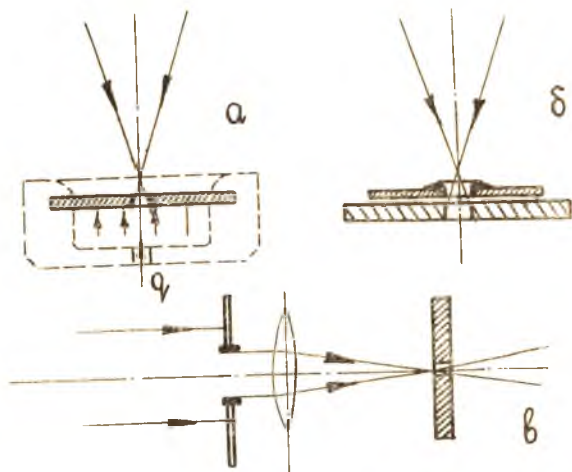


Рис. 3. Применение при импульсной пробивке отверстий пневматического калибрования (а), накладных экранов (б) и диафрагмирования (в)

При назначении дополнительных технологических операций по обработке отверстий в зависимости от условий эксплуатации деталей следует учесть, что воздействие импульсного лазерного излучения на металл приводит к изменению исходной структуры в поверхностном слое. Зона воздействия лазера состоит из двух участков. Характерной особенностью микроструктуры первого участка является ее столбчато-дендритное строение. Вследствие высоких скоростей охлаждения при кристаллизации происходит преимущественный рост главных осей дендритов, направленных перпендикулярно границе раздела участков. Столбчатые кристаллы выглядят как равноосные зерна, состоящие из отдельных блоков, определенным образом ориентированных в пределах каждого зерна. На втором участке микроструктура характеризуется мелкодисперсностью, что объясняется фазовой перекристаллизацией в условиях быстрого охлаждения. Если исходное состояние заготовки являлось закаленным, то второй участок имеет зону отпуска с пониженной микротвердостью. Образование зоны отпуска связано с низкой скоростью охлаждения в периферийных слоях заготовки.

ГАЗОЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МАТЕРИАЛОВ

При анализе технологической операции резки материалов лучом лазера следует выделить две стадии: нагрев металла в объеме реза до температур не ниже температуры плавления и удаление продуктов разрушения из полости реза. От длительности первой фазы зависит производительность процесса. Главным фактором, ограничивающим скорость нагрева, а следовательно и скорость резки, является теплопроводность материала. При сопоставлении с электронно-лучевой и газокислородной лазерная резка материалов обеспечивает наибольшую плотность энергии и наименьший условно-эффективный диаметр нагрева (рис. 4), поэтому при лазерной резке детали имеют незначительную величину зоны термического влияния.

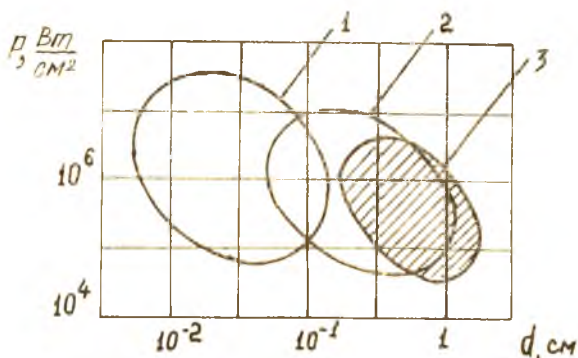


Рис. 4. Область расположения удельной плотности излучения при лазерной резке в зависимости от эффективного диаметра теплового источника: 1 — лазерная резка, 2 — электронно-лучевая резка, 3 — резка газокислородным пламенем

Распределение температуры в зоне нагрева следует рассчитывать по формуле Н. Н. Рыкалина

$$T = \frac{p}{2\pi\lambda s} e^{-\alpha r/2a} K_0(U), \quad (4)$$

где $U = R \sqrt{\frac{\alpha^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}$, $R = \sqrt{x^2 + y^2}$,

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad b = \frac{2\alpha}{c\gamma s},$$

здесь $K_0(U)$ — функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка; λ — коэффициент теплопроводности, c — теплоемкость, γ — удельный вес, s — толщина листа, p — тепловая мощность лазерного

излучения, v — скорость перемещения светового пятна, x, y — координаты, α_0 — коэффициент поверхностной теплопередачи.

Уравнение (4) применяют при описании модели линейного источника тепла лишь в области небольших скоростей резки ($v \sim 1 \dots 1,5$ м/мин).

При увеличении скорости перемещения источника тепла и пропорциональном возрастании его мощности p тепло распространяется лишь в направлении, перпендикулярном оси перемещения источника. В этих условиях скорость резки вычисляют по следующему соотношению:

$$v = \frac{p}{c\gamma s l T_p} \sqrt{\frac{2}{\lambda c}} \quad (5)$$

где l — ширина реза, p — тепловая мощность источника, $c\gamma$ — объемная теплоемкость, s — толщина разрезаемого материала, T_p — температура, при которой происходит интенсивное разрушение (плавление) разрезаемого материала.

Технологические параметры резки v, l выбирают из табл. 1, исходя из условия, что процесс удаления продуктов разрушения материалов оказывает существенное влияние на качество резки, ширину реза, глубину зоны термического влияния. Плохая удаляемость продуктов резки приводит к заметному ухудшению качества резки и может служить причиной замедления и даже прекращения процесса резки. Удаление продуктов осуществляется под действием кинетической энергии струи режущего газа на расплав (приложение 1). В качестве режущего газа может применяться кислород, воздух, а также инертные газы. В случае использования кислорода он окисляет поверхность металла и тем самым способствует повышению коэффициента поглощения тепла. Энергия, выделяемая в процессе экзотермической реакции горения материала, сопоставима с энергией лазерного луча. Выбор режущего газа необходимо проводить с учетом конкретной технологии (табл. 1). Так, при резке алюминиевых сплавов следует использовать гелий, а при обработке титановых сплавов — аргон. С поддувом инертных газов качество реза улучшается, однако несколько снижается производительность процесса.

Неметаллические материалы по способности подвергаться газолазерному резанию делятся на две группы, разлагающиеся или плавящиеся при нагреве. К первой группе относятся пластмассы, ткани, резина, фанера и стекло, ко второй группе — стекло, керамика, асбоцемент. Скорость резки разлагающихся материалов гораздо выше, чем плавящихся. Особенностью резки является выделение значительного количества дыма. Для этих материалов состав газа существенного влияния не имеет, поэтому целесообразно применять недефицитные газы — сжатый воздух и азот.

Таблица 1

Значения скорости v и ширины реза l при газолазерной резке различных листовых материалов

Материал	Толщина листа, мм	Мощность излучения $P = 0,8$ кВт			Мощность излучения $P = 4,9$ кВт		
		v , м/мин	l , мм	Расход режущего газа, $\text{Нм}^3/\text{ч}$	v , м/мин	l , мм	Расход режущего газа, $\text{Нм}^3/\text{ч}$
08Х15Н5Д2Т	1,5	2,5	0,3	Кислород, 2,5	12	0,3	Аргон, 2,5
	3	1,3	0,5	—»—	7	1,5	Кислород, 2,5
	5	0,6	0,6	—»—	4	0,5	Аргон, 2,5
Х18Н10Т	2	3,3		Кислород, 2,5			
	4	1,2		—»—			
	6	0,86		—»—	2,7		Кислород, 2,5
Д16	1,5	0,6		Кислород, 2,5	8	0,3	Гелий, 2,5
	3			—»—	4	0,4	Гелий, 2,5
	5			—»—	1,5	1	Кислород, 2,5
ОТ4 ВТ20 ВТ1-2	1	4,4		Кислород, 2,5			
	1,5	4		—»—			
	2	5		Аргон, 2			
Стеклопластик	0,8	6,5	1	Воздух, 1,5	4	2	Азот, 1,5
	2	3	1	—»—			
	5	1	1	—»—			
Резинопластик	1,5	5	0,3	Кислород, 1,5	3,9	1	
	4,5	1,6	0,5	—»—	2,5	1,4	Азот, 1,5
	7	1	0,5	—»—			

Как и в случае пробивки отверстий лазерным излучением при газолазерной резке зона термического влияния состоит из двух слоев. Первый слой имеет мелкозернистую дендритную структуру в условиях высокой скорости кристаллизации. Второй слой имеет мелкозернистую структуру с высокой величиной микротвердости из-за протекания фазовой перекристаллизации. Однако в отличие от процесса пробивки отверстий при газолазерной резке наблюдается уменьшение глубины первого слоя вследствие принудительного удаления расплавленного материала направленной струей режущего газа. Значения ширины реза и зоны термического влияния, а также шероховатости поверхности при обработке углеродистых сталей приведены в табл. 2—4.

Таблица 2

*Шероховатость поверхности реза R_z , мкм
углеродистой стали при различной скорости резки*

v , м/мин	Мощность излучения, кВт		
	$p = 0,53$	$p = 0,75$	$p = 0,98$
0,5	46	48	50
1,5	25	29	32
2,5	12	17	21
3,5	17	21	26

Таблица 3

*Ширина реза l , мм углеродистой стали при различных
значениях давлений режущего газа (воздуха)*

Q , кгс/см ²	Скорость резки, м/мин		
	$v = 0,5$	$v = 2,5$	$v = 3,5$
0,75	0,7	0,68	0,62
1,25	0,82	0,75	0,65
1,75	0,78	0,72	0,58

Таблица 4

*Ширина зоны термического влияния b , мм
при различной скорости резки v углеродистой стали*

v , м/мин	Мощность излучения, кВт		
	$p = 0,53$	$p = 0,75$	$p = 0,98$
0,5	0,68	0,7	0,72
1,5	0,64	0,66	0,68
2,5	0,58	0,6	0,62
3,5	0,56	0,58	0,6

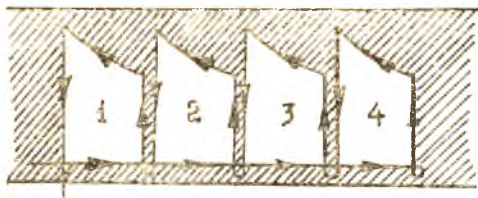


Рис. 5. Траектория прохождения светового пятна при групповом раскрое листовой заготовки

Для повышения производительности газолазерной резки следует применять групповой раскрой листовых заготовок с использованием непрерывной траектории прохождения светового пятна (рис. 5). В табл. 5 приводятся данные о производительности машин при газолазерной резке

в различных условиях производства.

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

При построении технологических процессов изготовления деталей летательных аппаратов и их двигателей способами лазерной сварки следует учитывать такие преимущества, как отсутствие контакта излучателя и детали, возможность управления распределением плотности мощности в световом пятне, высокий КПД энергии, падающей на металл (при проведении лазерной сварки $\eta_t = 0,30 \dots 0,42$, традиционные способы имеют $\eta_t = 0,18 \dots 0,22$). Из-за большой скорости охлаждения сварной шов и околошовная зона имеют мелкозернистое строение, соединения характеризуются высокой сопротивляемостью холодному растрескиванию и низким уровнем остаточной деформации (продольные остаточные напряжения в 3...5 раз меньше, чем при дуговой сварке, поперечные снижаются в 5...6 раз), высокой скоростью сварки стальных и титановых конструкций. При шовной сварке используют непрерывные и импульсные лазеры.

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

Качество лазерной сварки необходимо устанавливать путем подбора параметров лазерного излучения (длины волны, скорости прохождения светового пятна, зазора заготовками, величины заглубления фокуса) и свойств свариваемых образцов (температуропроводности, коэффициента поглощения). Высокая темпе-

Таблица 5.

Производительность машин при газоплазменной резке листового углеродистой стали толщиной $s = 3$ мм с использованием CO_2 — излучения мощностью $p = 1$ кВт

Показатели	Разновидность машин				
	автономия	автономная с высокой точностью	в составе механизированных производственных линий	в составе ГАПС	в составе автоматических производственных линий
Тип производства	Индивидуальное	Индивидуальное	Серийное	Мелкосерийное	Крупносерийное
Вид детали	Плоские или объемные	Плоские или объемные	Плоские или объемные	Плоские или объемные	Плоские или объемные
Коэффициент загрузки машины	0,5	0,5	0,7	0,8	0,9
Сменность работы	1 ... 2	1 ... 2	1 ... 2	2 ... 3	2 ... 3
Количество резакон	1 ... 2	1 ... 2	1 ... 2	1 ... 2	1 ... 2
Количество одновременно работающих машин	1	1	2 ... 3	1	3 ... 4
Количество обслуживающего персонала	3 ... 4	3 ... 4	3 ... 4	1 ... 2	2 ... 3
Производительность машины при вырезке деталей средней сложности (шт/мин)	0,36 ... 0,48	1,43 ... 1,9	2 ... 3,1	2,29 ... 3,81	2,58 ... 4,68
Производительность выработки работ (шт/мин)	0,1 ... 0,14	0,41 ... 0,54	1,33 ... 2,1	1,53 ... 2,54	3,69 ... 6,69

ратуропроводность гарантирует эффективную передачу тепла и обеспечивает большую глубину проплавления. При низком коэффициенте поглощения затрудняется передача тепла, а следовательно, для сварки требуется больше энергии, чем для соединения металлов с меньшей отражающей способностью. Отражение лазерного луча от поверхности снижают нанесением покрытий, которые могут также играть роль легирования зоны сварного шва. Оптимальная величина заглупления фокуса составляет 0,3...0,5 s от толщины свариваемого материала.

Сварку импульсным излучением следует применять при соединении тонких материалов путем непродолжительного плавления с последующей их кристаллизацией. Здесь различают шовную и точечную сварку (рис. 6). Для получения литой зоны с заданными размерами требуется определенная энергия

$$E = \frac{K}{\eta_t} mc (T_{пл} - T_0), \quad (6)$$

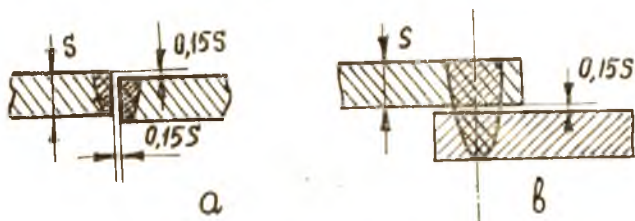


Рис. 6. Схемы расположения заготовок при лазерной сварке стык (а) и внахлест (б)

где K — коэффициент, учитывающий теплоту плавления материала, η_t — термический КПД лазерной сварки, m — масса точечного расплавления свариваемых деталей, c — удельная теплоемкость, $T_{пл}$, T_0 — температура плавления и начальная температура образца.

Время импульса τ и плотность мощности q выбирают из условия, чтобы не допустить значительного испарения металла и обеспечить заданную глубину проплавления (рис. 7). При этом лазерное излучение поглощается тонким поверхностным слоем толщиной менее $\delta \approx 1$ мкм. Если время импульса τ и плотность мощности q недостаточны для интенсивного испарения металла $q = 10^5 \dots 10^6$ Вт/см², то передача тепла в глубину свариваемых материалов осуществляется за счет теплопроводности. При этом зона проплавления имеет форму, близкую к сферической. Для увеличения глубины проплавления h значения времени импульса τ и плотности энергии q следует повысить, не допуская интенсивного испарения металла. При установлении необходимой плотности мощности q с целью получения заданных свойств сварного соеди-

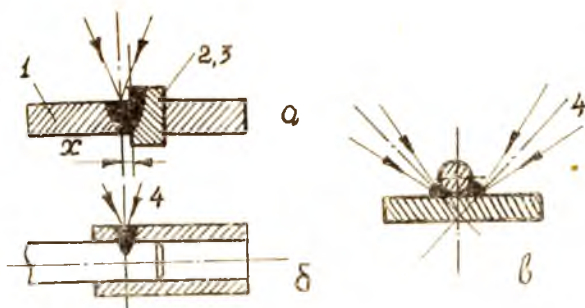


Рис. 7. Образование сварных соединений импульсным лазерным излучением: стыковое соединение разнородных материалов через вставку (а), соединение трубчатого и пруткового материала (б); 1 — тугоплавкий материал, 2 — технологическая вставка, 3 — легкоплавкий материал, 4 — направление лазерного излучения.

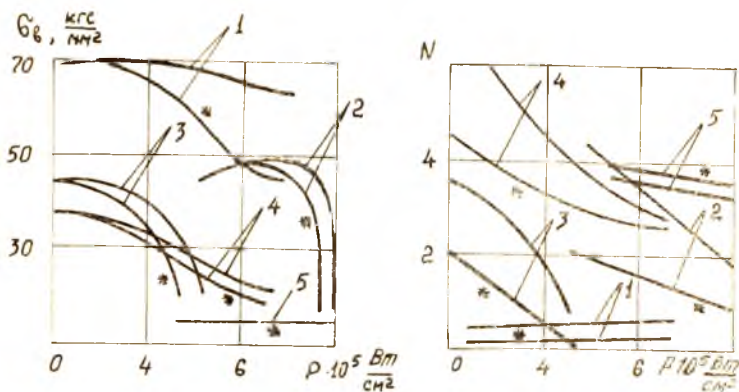


Рис. 8. Предел прочности σ_b и допускаемое число перегибов n сварных соединений при различных уровнях плотности энергии E при сварке листовых материалов в среде аргона: 1 — никель А1, $s = 0,5$ мм; 2 — тантал ТЧ, $s = 0,3$ мм; 3 — титан ВТ, $s = 0,3$ мм; 4 — сталь 08КП, $s = 0,3$ мм; 5 — алюминий А1, $s = 0,3$ мм; * — на воздухе

ления из конкретных сплавов рекомендуется воспользоваться значениями, приведенными на рис. 8, и данными табл. 6, 7.

Сварку непрерывным лазерным излучением следует применять при соединении толстостенных образцов. Глубина образования сварного шва h зависит от скорости перемещения светового пятна v и удельной плотности мощности (табл. 8). Из-за ограничений,

Таблица 6

Свариваемый материал	6 кгс/мм ²	ГЧ	МРН	НЧ	М1	БрБ2	Н1	X18H10T	08кп	ВТ-1	А1
А1	5	100, 110 ш, хр	100, 130 ш, хр	100, 180 ш, хр	40, 60 ш	60, 30 ш	100, М ш, хр			100, М ш, хр	100, М ш, хр
ВТ-1	50	80, 90 ш, хр	45, 5 ш, хр	100, М ш, хр	50, 100 ш, хр	55, 110 ш, хр	ОМ			100, М ш, хр	ОМ
08кп	33	90, 70 ш, хр	50, 90 ш, хр		30, 180 ш	75, 270 ш, хр	65, 45 ш, хр	100, М ш, хр	100, М ш, хр		
X18H10T	57	85, 90 ш, хр	40, 45 ш, хр	75, 100 ш, хр	65, 270 ш, хр	95, 270 ш, хр	100, М ш, хр	100, М ш, хр	100, М ш, хр		
Н1	35	100, 270 ш, хр	90, 200 ш, хр	90, 60 ш, хр	100, 180 ш, хр	100, М ш, хр	100, М ш, хр	ОМ			
БрБ2	50	90, 180 ш, хр	100, 270 ш, хр	100, 150 ш, хр	80, М ш, хр	100, М ш, хр	100, М ш, хр	ОМ			
М1	25	57, 90 ш, хр	35, 60 ш, хр	100, 180 ш, хр	95, М ш, хр						
Н4	27	100, М ш, хр		70, М ш, хр							
МРН	73	75, 0 ш, хр									
Т4	48	60, 11 ш, хр									
ВТ-7	45										

Обозначения

100, М - 100 - отношение предела прочности сварного шва к соответствующему значению для прочного металла, М - угол загиба сварных образцов при разрыве на выжимный лункон 0,7 М, М - многократный загиб, ш - разрыв шва по шву, окш - по оксидной зоне, ОМ - по основному металлу, хр - пластическое разрушение

Таблица 7

Сварочное Электр. Термост.	ВТ-7	Т4	МРН	НЧ	М1	БрБ2	Н1	Х18Н- 10Т	08КП	ВГ1	А1
А1	3,4, ш, ш 2, 1, ш, ш	7, ш, ш 7, 1, ш, ш	8, ш, ш 16, 1, ш, ш	4, ш, ш 13, 1, ш, ш	4, ш, ш 2, 1, ш, ш	3, 1, ш, ш 6, 1, ш, ш	11, ш, ш 14, 1, ш, ш	9, ш, ш 5, ш, ш	10, ш, ш 10, 1, ш, ш	10, 1, ш, ш 14, 1, ш, ш	05, 1, ш, ш
ВТ-1	40, 1, ш, ш 12, 1, ш, ш	33, 1, ш, ш 30, 1, ш, ш	42, 1, ш, ш 21, 1, ш, ш	34, 1, ш, ш 57, ш, ш	19, 1, ш, ш 33, 1, ш, ш	11, 1, ш, ш 15, ш, ш	20, 1, ш, ш 10, 1, ш, ш	7, 1, ш, ш 15, 1, ш, ш	13, ш, ш 21, ш, ш	44, 1, ш, ш	
08КП	13, 1, ш, ш 28, 1, ш, ш	25, 1, ш, ш 17, 1, ш, ш	50, 1, ш, ш 1, 1, ш, ш	10, 1, ш, ш 12, 1, ш, ш	10, 1, ш, ш 18, 1, ш, ш	40, 1, ш, ш 25, 1, ш, ш	32, 1, ш, ш 45, 1, ш, ш	21, 1, ш, ш 67, 1, ш, ш	61, 1, ш, ш		
Х18Н- 10Т	19, 1, ш, ш 23, 1, ш, ш	47, 1, ш, ш 23, 1, ш, ш	39, 1, ш, ш 44, 1, ш, ш	20, 1, ш, ш 20, 1, ш, ш	17, 1, ш, ш 50, 1, ш, ш	32, 1, ш, ш 23, 1, ш, ш	16, 1, ш, ш 36, 1, ш, ш	62, 1, ш, ш			
Н1	35, 1, ш, ш 35, 1, ш, ш	17, 1, ш, ш 28, 1, ш, ш	31, 1, ш, ш 23, 1, ш, ш	25, 1, ш, ш 32, ш, ш	33, 1, ш, ш 45, ш, ш	32, 1, ш, ш 15, ш, ш	45, 1, ш, ш				
БрБ2	25, 1, ш, ш 11, 1, ш, ш	20, ш, ш 35, ш, ш	31, ш, ш 22, 1, ш, ш	30, 1, ш, ш 19, ш, ш	18, ш, ш 18, ш, ш	35, ш, ш					
М1	1, 1, ш, ш 10, 1, ш, ш	9, 1, ш, ш 17, 1, ш, ш	16, 1, ш, ш 11, 1, ш, ш	10, 1, ш, ш 14, 1, ш, ш	14, 1, ш, ш						
НЧ	15, 1, ш, ш 60, 1, ш, ш	30, ш, ш 40, 1, ш, ш	12, 1, ш, ш 23, 1, ш, ш	12, 1, ш, ш							
МРН	21, 1, ш, ш 16, ш, ш	19, ш, ш 13, 1, ш, ш	12, ш, ш								
Т4	15, 1, ш, ш 20, ш, ш	32, 1, ш, ш									
ВТ-7											

Обозначения

Данные верхней строки относятся к соединению, в котором электрод расположен между листом металла перпендикулярной к нему, а нижней — к соединению с боковым расположением электродов. Материалов 1 — разрез по листу электродом, 2 — разрез по листу электродом, 3 — разрез по листу электродом.

Таблица 8

Режимы сварки непрерывным излучением CO₂-лазера
листовых материалов

Свариваемый материал	Толщина s , мм	Мощность излучения P , кВт	Скорость сварки v , м/мин
Н18Н10Г	0,5	0,5	0,65
	0,8	0,75	0,5
	1	2	2
	1,5	2	1,6
	2	2	1
	3	3,8	1,7
08X15H5.12T	1,2	2,8	2
	1,2	3,5	3,3
	2	4	2,5
	2	3,5	1,7
	3	2,8	1,1
	3	4,5	2
XН68ВМТЮК XН60ВТ ОГ1	1,5	4	1,7
	1,8	4,4	1,33
	1,5	4	2
	1,8	4,4	2,5
	1,2	2,8	2,5
	2,0	4,0	3,0

налагаемых теплопроводностью металла, высокие скорости сварки в условиях проплавления всей толщины заготовки возможны лишь у тонких листов. С уменьшением скорости продвижения светового пятна при увеличении глубины зоны проплавления происходит значительное возрастание зоны теплового воздействия. Для получения максимальной глубины зоны расплава следует применять короткофокусные линзы.

При расчете энергетических параметров лазерной сварки непрерывным излучением следует учесть, что вводимая энергия равномерно распределяется по высоте парогазового канала, а источник передачи энергии близок к цилиндрическому. В расчетах требуемой мощности и температуры можно воспользоваться ранее приведенными соотношениями (4) и (5), приняв $W = v(E/d)$, где v — скорость сварки, d — диаметр светового пятна, W — мощность излучения.

ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ И НАПЛАВКА

Операцию лазерного термоупрочнения следует применять как один из перспективных методов упрочнения поверхностных слоев сталей с целью повышения эксплуатационных свойств деталей

механизмов и инструмента. В процессе обработки в зоне лазерного воздействия наряду с формированием структур с высокой твердостью возникают остаточные макронапряжения, которые в зависимости от уровня и знака могут оказывать влияние на эксплуатационные характеристики обработанных изделий. Оценку преимуществ лазерного упрочнения деталей следует проводить с помощью данных табл. 9.

Таблица 9

*Износостойкость сталей, упрочненных различными методами обработки**

Метод упрочняющей обработки	Линейный износ, мкм		Износ по массе, мг		Суммарный износ	
	образца	шарика	образца	шарика	линейный, мкм	по массе, мг
Лазерная обработка («КВАНТ-16», ст. 40X)	2,45	52,5	1,74	0,27	55	2
Азотирование (сталь 3X2B8)	2,66	110,2	2,79	1,16	112,7	3,95
Цементация (сталь 20)	10,50	52,17	3,75	0,26	62,7	4
Закалка, HV 440 (сталь 40X)	23	23,43	12,74	0,05	46,4	12,8
Закалка, HV 250 (сталь 40X)	70	31,25	40,44	0,09	101	40,5

* Испытания проводились на машине трения МП-1М (трение со смазкой, лнд. масло 12, скорость 0,89 м/с, нагрузка — 30 г, диаметр образца — 40 мм, диаметр шарика 7,93 мм из стали ШХ15).

Зона лазерного воздействия состоит из трех слоев: 1 — зоны оплавления, образованной мелкодисперсными дендритами, ориентированными по направлению теплоотвода, 2 — зоны бесструктурного мартенсита с высокой микротвердостью (по сравнению с микротвердостью исходной структуры), 3 — зоны переходного слоя от области с повышенной микротвердостью к исходной структуре. Размеры зоны лазерного влияния определяют такие параметры обработки, как плотность мощности излучения q и скорость движения светового пятна v . При увеличении v возможно исключить появление зоны оплавления, и лазерное упрочнение осуществлять как финишную операцию. Форма зоны лазерного влияния соответствует получаемой при подогреве металла по механизму теплопроводности и механизму так называемого коньжального проплавления. Последнее обусловлено углублением источника тепла внутрь образца вследствие выдавливания жидкого металла под воздействием реактивного давления струи, истекающей из зоны нагрева испаренного вещества.

Глубину зоны упрочнения при импульсной лазерной обработке приближенно определяют по соотношению $z = \sqrt{\frac{a\tau}{2e\delta}}$, где a — температуропроводность, τ — длительность импульса, $\delta = \frac{T_1}{T_{пл}}$ — отношение температуры T_1 , при которой происходит прекращение мартенситного превращения, к температуре $T_{пл}$ плавления металла. Для сталей δ имеет значение $\delta = 0,2 \dots 0,3$. В табл. 10–14 приведены значения микротвердости инструментальных сталей а также показатели качества термоупрочнения их при импульсной обработке. Шероховатость поверхности деталей после обработки следует изменять путем изменения положения фокуса относительно облучаемой поверхности (рис. 9), а также путем применения специальной оптики, обеспечивающей равномерное распределение плотности мощности в световом пятне. В приложении 2 приводятся схемы таких оптических устройств.

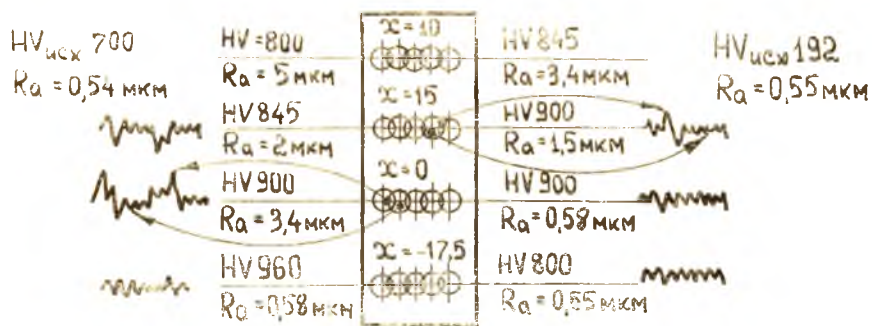


Рис. 9. Изменение шероховатости R_a , мкм от положения фокуса f , мм относительно поверхности обрабатываемого образца из стали V8A ($\lambda = 1,06 \mu m$, $\tau = 10^{-3} c$, $E = 15 Дж$)

Значительного повышения микротвердости поверхности сталей достигают путем лазерного легирования. Перед обработкой на поверхность детали с помощью связующих паст или методом плазменного напыления в защитной среде наносят легирующие порошки. В период лазерной обработки тонкий расплавленный слой стали насыщается легирующим компонентом. В табл. 15 приводятся показатели микротвердостей стальных поверхностей, легированных углеродом и карбидом вольфрама. Обычно толщина легированного слоя не превышает 150...200 мкм.

Для восстановления геометрических параметров изношенных деталей механизмов и машин следует применять способ лазерной наплавки. Различают наплавку либо путем оплавления слоев легирующего порошка, либо путем механического внесения легирующего

Таблица 10

Режимы лазерного упрочнения легированных сталей ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$)

Марка стали	Исходная твердость, HRC	Режимы обработки		Толщина упрочненного слоя, мм		Микротвердость НВ, кг/мм ² в зонах обработки				Состояние поверхности
		Р, кВт	v, мм/с	зона оплав-ления	зона оплав-ления	1	2	3	4	
30XН2МФА	42...44	3	19	0,7	0,5	615	675	410	540	Значительное оплавление Незначительное оплавление
	42...44	3	49	0,25	0,25	645	715	410	540	
	42...44	1,5	49	0,05	0,116	765	765	450	540	
30ХРА	42...44	3	19	0,22	0,66	645	645	330	500	Значительное оплавление Слабое оплавление
	27...28	2	49			645	715	310	320	

Таблица 11

Марка стали	Исходная микротвердость НВ	Микротвердость после лазерной обработки, НВ	Микротвердость в зоне обработки, НВ	Микротвердость в переходной зоне, НВ
X12Ф1 50РА 40Х	740...760 540 540	890...1070 840...890 675...715	765 480	—
ШХ15	700	795...840	—	—
X10	740...760	840...890	—	—

Таблица 12

Марка стали	Исходная твердость, HRC	Режим исходной обработки закалка		Состояние поверхности
		закалка	отпуск	
30XН2МФА X12Ф1	42...44	850±10°C, масло	200±10°C, 2 ч.	отпуск в вакууме, после перекалифования 490°C, 2 ч.
	58...60	1069±10°C, масло	520-500°C, 2 ч.	
30ХРА 50РА	42...44	850±10°C, масло	400±10°C, 1,5 ч	отпуск в вакууме, после перекалифования 490°C, 2 ч.
	27...28	850±10°C, масло	550±10°C, 1,5 ч	
	42...44	850±10°C, масло	400±10°C, 1,5 ч	

щего порошка в расплавленные поверхностные слои детали. На характер микроструктуры в материале покрытия и подложки значительное влияние оказывает длительность лазерного воздействия. Уменьшение трещинообразования в наплавленном слое, а также улучшение качества поверхности обработанной детали достигается путем применения сканирования луча (табл. 16—18). При этом наблюдаются более однородные механические свойства по сечению наплавленного металла.

Таблица 13

Показатели микротвердости HV, кгс/мм² при обработке сталей импульсным лазерным излучением ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau = 10^{-3}$ с)

Энергия импульса, Дж	α -Fe	Марка материала							
		20	45	У8А	9ХС (термо- обработанная)	Р18	18 (термо- обработанная)	Р9	9 (термо- обработанная)
1	110	130	160	200	700	650	350	860	330
2	100	—	—	840	900	800	—	860	—
5	—	—	—	760	980	840	580	900	—
10	—	—	—	820	980	1000	600	900	—
15	320	600	800	1000	1000	950	620	620	620
20	280	500	700	870	960	930	700	620	600
25	260	400	600	820	950	920	750	560	580

Показатели качества термоупрочнения стали У8А импульсным лазерным упрочнением ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau = 10^{-3}$ с)

Показатели	Энергия в импульсе Е, Дж				Зона термического влияния	
	2...5	5...10	10...15	15...30	диаметр, мм	глубина, мм
У8А HV 195 Диаметр упрочненной зоны, мм Глубина упрочненной зоны, мм У8А HV 700 Диаметр упрочненной зоны, мм Глубина упрочненной зоны, мм	Нет	1...1,5	1,5...2	2...2,5	1...3,5	
	Нет	0,3...0,5	0,3...0,35	0,35...0,45		0,15...0,6
	Нет	1,3...1,8	1,8...2,5	2,5...3	1,2...4	
	Нет	0,25...0,35	0,35...0,4	0,4...0,55		0,2...0,7
Шероховатость поверхности	Пленка цвета побежалости	Появляются следы расплава поверхности	Кольцевые отпечатки на поверхности	Следы выделок жидкого металла, рост микротрещин	Шероховатость снижается с 8 до 12 кл.	
Природа упрочнения	Объемная закалка	Частичное оплавление	Образование дендритов	Рост дендритов		

Показатели микротвердости HV, кгс/мм² поверхности сталей, легированных углеродом и карбидом вольфрама

Энергия излучения, Дж	α—Fe		сталь 20		сталь 45		У8А		У8А (тер. обр.)	
	конт-розный	легиро-ванный	конт-розный	легиро-ванный	конт-розный	легиро-ванный	конт-розный	легиро-ванный	конт-розный	легиро-ванный
Исходная	130	+С	150	+С	160	+С	160	+С	840	+С
15	270	320	400	960	800	1100	960	1100	980	1100
20	260	600	620	700	570	900	840	950	840	—
25	320	580	600	680	540	960	800	920	800	1000
Исходная					160	+WC	160	+WC		
15			800	1000	800	1180	960	1180		

Таблица 16

Размеры валков при наплавке порошка ПГ-ХН80СР3 на различные материалы

Материал подложки	Скорость наплавки, м/мин									
	без скапирования					со скапированием				
	0,25		0,5		0,15		0,1		0,15	
	b/h*	n, см ⁻¹	b/h	n, см ⁻¹	b/h	n, см ⁻¹	b/h	n, см ⁻¹	b/h	n, см ⁻¹
Сталь 3	1,5	3,4	0,5	3	1,2	6	1,2	5	2,01	0,7
	1,34		1,97	1,5	1,37	4,4	—	2,5	—	—
У8	2,7	4,6	0,5	1,5	1,5	3,2	0,5	2,3	2,2	1
	2,6		1,8	1,5	4,5	0,4	5,1	—	—	—
СЦ24-44	4,6	4,6	0,2	2,5	—	9,8	—	—	—	—
40Х10С2М	—		—	—	—	—	—	—	—	—

*n — количество трещин на единицу длины валика

Таблица 17

Размеры валиков при наплавке порошка из СЧ-21-40 на различные материалы

Материал подложки	Скорость наплавки без сканирования, м/мин					
	0,1		0,15		0,25	
	b/h	$n, \text{см}^{-1}$	b/h	$n, \text{см}^{-1}$	b/h	$n, \text{см}^{-1}$
Сталь 3	$\frac{4}{0,84}$ — 4,8	0	$\frac{4}{0,76}$ = 5,3	0	$\frac{4}{0,77}$ — 5,2	1,5
Сталь 45	4,1	0	5,5	0	3,9	1,6
У8	5,3	0	4,6	0	5	0,5
65Г	5	0	5	0	4,6	1,25
40Х10С2М	6,5	0,4	6,3	0,5	7,1	1,1

Таблица 18

Характеристики микроструктуры наплавленных на различные материалы валиков из порошка ПГ-ХН80СРЗ

Материал подложки	Наплавка без сканирования, 0,25 м/мин				Наплавка со сканированием, 0,1 м/мин			
	микротвер- дость наплав- ки, НВ, кгс/мм	междендрит- ный параметр, мкм	микротвердость переходной зоны, НВ, кгс/мм	ширина зоны термического влияния, мм	микротвер- дость наплав- ки, НВ, кгс/мм	междендрит- ный параметр, мкм	микротвердость переходной зоны, НВ, кгс/мм	Ширина зоны термического влияния, мм
Сталь 3	840...1010	1,5...2	353...412	0,80	715...940	2,5...3	429...508	1,15
У8	508...615	1,5...2	615...794	1,03	752...940	3...4,8	752...940	1,35
40Х10С2М	583...890	1,5...2,1	644...794	1	557...644	3,5...5	583...980	1,32
СЧ-24-44	677...940	1,5...2,5	—	—	677...940	3...5	—	—

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Рыкалин Н. Н. и др. Лазерная обработка в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1975. — 295 с.
- Реди Д. Промышленные применения лазеров. — М.: Мир, 1981. — 638 с.
- Новицкий М. Лазеры в электронной технологии и обработке материалов. — М.: Машиностроение, 1981. — 151 с.
- Абильситов Г. А. и др. Мощные СО₂-лазеры и их применение в технологии. — М.: Наука, 1985. — 152 с.
- Упрочнение деталей лучом лазера. / Под ред. В. С. Коваленко. — Киев: Техника, 1981. — 129 с.
- Вейко В. П., Либенсон М. Н. Лазерная обработка. — Л.: 1973. — 191 с.
- Лазеры в технологии. / Под ред. М. Ф. Стельмаха. — М.: Энергия, 1975. — 215 с.
- Суминов В. М. и др. Обработка деталей лучом лазера. — М.: Машиностроение, 1969. — 195 с.

Конструкции резаков для газолазерной резки материалов

Назначение конструкции резака	Общий вид
<p>Резка заготовок с ограниченным расходом режущего газа: 1—оптическая система; 2—корпус резака; 3—штуцер режущего газа; 4—штуцер сжатаго воздуха; 5—заготовка; 6—приводные ролики</p>	
<p>Резка заготовок с боковым поддувом режущего газа; 1—оптическая система; 2—штуцер режущего газа; 3—сопловое отверстие</p>	
<p>Резка заготовок с устранением грат на внутренней поверхности детали: 1—оптическая система; 2—корпус резака; 3—штуцер режущего газа; 4—щелевые сопловые отверстия</p>	

ОПТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Поверхность зеркала характеризуется следующими параметрами: геометрической формой (радиусом кривизны в случае сферического зеркала), отклонением поверхности от заданной формы, шероховатостью, качеством обработки (количество и глубина царапин). Отклонение формы поверхности сферических зеркал от параболоида вращения ведет к появлению aberrации. Высота шероховатости полированной поверхности зеркала составляет $R_a = 0,04$ мкм, при суперполировке $R_a = 0,01$ мкм. Требования к качеству обработки зеркал включают в себя ограничение на количество царапин. Зеркало считается хорошим, если на всей его поверхности имеется не более 20...40 царапин длиной не более 2...3 его диаметров и глубиной не более 20...30 Å. Наиболее часто применяемые материалы для изготовления зеркал: Au, Ag, Al, Mg, Mo, W, Be, Cu, ШХ15. Хорошо зарекомендовали себя зеркала на медной основе, на которую нанесен слой Ni (для полировки) и пылеен слой Au (для получения высокого коэффициента отражения). Опыт эксплуатации зеркал показывает, что необлаждаемые зеркала из меди могут выдерживать нагрузки $g \sim 10^4$ Вт/см² ($\tau \leq 1$ с). При эффективном охлаждении можно добиться значения неразрушающих нагрузок до 10^7 Вт/см². В импульсном режиме для хорошо обработанных поверхностей достигнуты неразрушающие значения энергии $E \sim 10^2$ Дж/см² ($q = 10^8$ Вт/см² при $\tau \leq 10^{-6}$ с). Для повышения коэффициента отражения в области длин волн $\lambda = 10$ мкм применяются многослойные интерференцион-

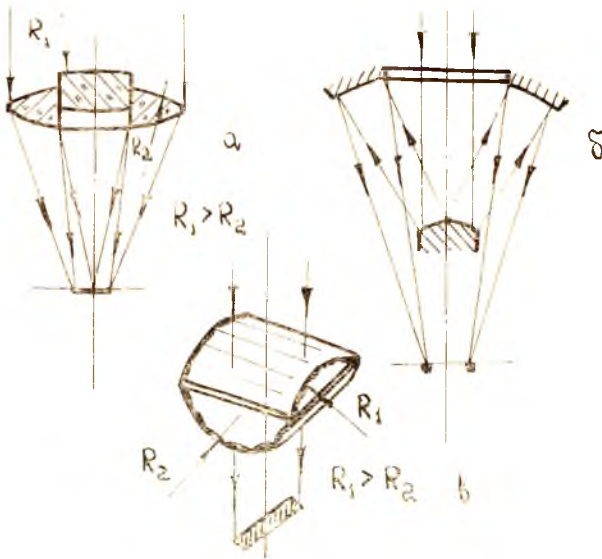


Рис. II. Общий вид оптических систем, применяемых при формировании светового пятна с равномерным распределением плотности излучения (а), с кольцевым распределением (б) и шелевым распределением (в)

ные покрытия в четыре слоя с использованием специальных материалов ($\text{Th F}_4/\text{Zn S}$); ($\text{Th F}_4/\text{Zn Se}$), которые одновременно являются защитными. Покрытия наносят на зеркала после суперполировки методом вакуумного напыления.

Конструкция зеркала мощного технологического лазера определяется техническим решением системы охлаждения. Эффективное охлаждение при малой толщине слоя между поверхностью зеркала и поверхностью теплообмена позволяет использовать зеркала при интенсивностях $q \sim 10^4 \text{ Вт/см}^2$ без повреждений и существенных деформаций.

В качестве материалов для линз технологических лазеров применяют кристаллы из KCl , Ba F_2 , Na Cl , полупроводники Ge , Zn Se , Ga As . На рис. П показан общий вид оптических систем, необходимых для формирования заданного распределения плотности излучения по сечению светового пятна.

Составители: *Владимир Павлович Шорин,*
Василий Иванович Мордасов,
Евгений Александрович Изжеуров

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В АВИАСТРОЕНИИ

Редактор Е. Д. Антипова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Курьянова

Сдано в набор 5.09.86 г. Подписано в печать 21.10.86 г.
Формат 60×84 1/16. Высокая печать.
Литературная гарнитура. Бумага оберточная.
Усл. п. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,5. Т. 400 экз.
Заказ 856. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.
Типография ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.