

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию
в области приборостроения и оптотехники
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки 200200 «Оптехника»*

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 621.7.048.7:621.378.826(075.8)

ББК 34.58я73

Л79

Лосев В.Ф.

Л79 Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 199 с.

ISBN 978-5-4387-0052-4

В пособии изложены физические основы лазерных технологических операций, связанных с обработкой материалов (сварка, резка, термоупрочнение, и др.), в том числе биотканей (коагуляция, резание, силовая и низкоэнергетичная терапия). Анализируются физические процессы, протекающие в материалах, принципы моделирования нагрева вещества лазерным излучением, режимы лазерной обработки материалов на технологических установках, приводятся примеры применения лазеров в медицине и соответствующая лазерная медицинская техника.

Предназначено для студентов направления 200400 «Оптотехника».

УДК 621.7.048.7:621.378.826(075.8)

ББК 34.58я73

Рецензенты

Доктор технических наук
профессор СПб НИУ ИТМО

Л.А. Губанова

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник ИСЭ СО РАН

В.М. Орловский

ISBN 978-5-4387-0052-4

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2011

© Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П.,
2011

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1	
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ, СПЛАВОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ	8
1.1. Тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с материалами	8
1.1.1. Процессы передачи энергии лазерного излучения веществу	8
1.1.2. Приближенные оценки температуры нагрева	12
1.2. Феноменология нагрева и разрушения металлов при неподвижном источнике теплоты	15
1.2.1. Диаграмма режимов лазерной обработки металлов и критические потоки	15
1.2.2. Уравнения теплового баланса для неподвижного источника	19
1.2.3. Простейшая модель нагрева металлов при низких и высоких плотностях потоков лазерного излучения	20
1.3. Модель нагрева и разрушения металлов при движущемся источнике теплоты	23
1.3.1. Характерные зоны разогрева материала и распределение энергии	23
1.3.2. Уравнения теплового баланса для движущегося источника	25
1.3.3. Глубокое проплавление	26
1.3.4. Объемное испарение	27
1.4. Способы повышения эффективности лазерного воздействия	27
1.4.1. Эффективный коэффициент поглощения	27
1.4.2. Поглощающие покрытия	29
1.4.3. Глубина проплавления	30
1.4.4. Влияние плазмы на эффективный коэффициент поглощения	30
1.4.5. Влияние струи газа	31
1.4.6. Влияние условий фокусировки и режима обработки	35
1.5. Физические процессы при лазерной обработке неметаллических материалов	37
РАЗДЕЛ 2	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	41
2.1. Уравнение теплопроводности при лазерном источнике теплоты	42
2.1.1. Закон Фурье	42

2.1.2. Уравнение теплопроводности	43
2.1.3. Уравнение теплопроводности при лазерном источнике теплоты	44
2.1.4. Постановка краевых задач теории теплопроводности	45
2.2. Методы решения уравнения теплопроводности	46
2.2.1. Метод преобразования Лапласа	47
2.2.2. Метод мгновенных источников	48
2.2.3. Метод конечных разностей (метод сеток)	50
2.3. Инженерные расчеты задач нагрева материалов лазерным излучением	52
2.3.1. Нагрев материала поверхностным источником теплоты	53
2.3.2. Нагрев материала объемным источником теплоты	56
2.3.3. Нагрев в окрестности поглощающего включения, присутствующего в матрице прозрачного материала	58
2.4. Следствия и выводы из частных решений уравнения теплопроводности	63
2.4.1. Определение глубины прогретого слоя	63
2.4.2. Определение критических потоков	64
2.4.3. Определение скоростей нагрева и остывания	64
2.5. Роль гидродинамических, газодинамических и плазменных явлений	65
2.5.1. Моделирование гидродинамических, газодинамических и плазменных явлений	65
2.5.2. Оценки воздействия по методу баланса энергий	67
РАЗДЕЛ 3	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ	
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	69
3.1. Лазерное термоупрочнение (закалка) материалов	69
3.2. Лазерное легирование и газопорошковая наплавка	76
3.3. Лазерная сварка материалов	79
3.3.1. Энергетические характеристики лазерной сварки	79
3.3.2. Технико-экономические характеристики лазерной сварки	79
3.3.3. Сварка деталей малых толщин	81
3.3.4. Сварка с глубоким проплавлением	82
3.3.5. Технологические особенности лазерной сварки конструкционных материалов	84
3.4. Резка металлических и неметаллических материалов	86
3.4.1. Лазерная резка металлов	86
3.4.2. Лазерная резка неметаллов	91
3.5. Размерная обработка	95
3.5.1. Сверление отверстий в металлах одиночным импульсом	95
3.5.2. Сверление отверстий в металлах в импульсно-периодическом режиме излучения твердотельных лазеров	97

3.5.3. Сверление отверстий в диэлектриках	100
3.5.4. Технологические особенности размерной обработки	103
3.6. Маркировка и аморфизация поверхности	105
3.6.1. Лазерная аморфизация (остекловывание)	105
3.6.2. Лазерная маркировка (гравировка и надписи)	106
РАЗДЕЛ 4	
УСТАНОВКИ И КОМПЛЕКСЫ	
ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	108
4.1. Общая характеристика технологического лазера и систем на его основе	108
4.2. ЛТУ для размерной обработки в массовом машиностроении	110
4.2.1. Многофункциональные установки	110
4.2.2. ЛТУ для резки и раскроя	113
4.2.3. ЛТУ для сварки и поверхностного термоупрочнения	114
4.3. ЛТУ для прецизионной обработки в приборостроении, электронике, специальном машиностроении, ювелирной промышленности и т. п.	115
4.4. ЛТУ для маркировки и гравировки	121
4.5. Другие лазерные технологические установки	124
РАЗДЕЛ 5	
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ И ХИРУРГИИ	131
5.1. Действие излучения на биологические ткани	131
5.2. Теплофизические и термодинамические свойства ткани	139
5.3. Термическое действие ЛИ	144
5.4. Нетермическое действие ЛИ на биологические ткани	147
5.5. Физические основы лазерной терапии	149
5.5.1. Процессы при низкоэнергетическом воздействии ЛИ на биоткани	149
5.5.2. Механизмы терапевтического действия НЛИ	151
5.6. Физические основы лазерной хирургии	155
5.6.1. Тепловая хирургия	155
5.6.2. Нетепловая лазерная микрохирургия	158
5.7. Лазеры, применяемые в хирургии	158
РАЗДЕЛ 6	
ЛАЗЕРНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ УСТАНОВКИ	162
6.1. Установки лазерной хирургии и силовой терапии	162
6.1.1. Универсальные и многоцелевые установки для лазерных хирургических операций и силовой терапии	162
6.1.2. Специализированные лазерные хирургические установки для дерматологии и косметологии	166

6.1.3. Специализированные лазерные установки для кардиохирургии	168
6.1.4. Специализированные лазерные установки для онкологии	169
6.1.5. Специализированная лазерная аппаратура для офтальмологии	171
6.1.6. Лазерные перфораторы кожи (скарifikаторы) и установки для транскутанного введения лекарств	175
6.1.7. Специализированные лазерные установки для стоматологии	176
6.2. Лазерная терапевтическая аппаратура	177
6.2.1. Терапевтические аппараты на основе He-Ne-лазеров	177
6.2.2. Терапевтические аппараты на основе других газовых лазеров	179
6.2.3. Терапевтические аппараты на основе полупроводниковых лазеров и светодиодов	180
6.2.4. Терапевтические аппараты на основе твердотельных лазеров и лазеров на красителях	183
6.2.5. Лазерные аппараты для облучения крови	184
6.2.6. Лазерные лечебные аппараты и тренажеры для офтальмологии	185
6.2.7. Лазерная аппаратура для диагностики крови, кровотока и прочих биоструктур	187
6.3. Системы доставки излучения (аппликаторы) и оптические наконечники при обработке биоткани	188
6.3.1. Шарнирные и оптоволоконные манипуляторы	188
6.3.2. Фокусирующие наконечники для YAG:Nd ³⁺ -лазеров	191
6.3.3. Контактные аппликаторы	192
6.3.4. Контактные наконечники	193
6.3.5. Наконечники для рассеечения	194
6.3.6. Наконечник для испарения ткани	195
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	197
ПРИЛОЖЕНИЕ	198

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная обработка материалов – резка, сверление, сварка, модификация поверхностного слоя, маркировка – не только обеспечила новый уровень качества и скорости в традиционных технологических операциях, но и создала предпосылки для принципиально новых конструкторских и технологических решений в машиностроении, электронике, авиакосмической технике и других областях.

Возможности повышения производительности труда, экономии материалов и энергоресурсов, обеспечения быстрой переналадки производств при выпуске широкой номенклатуры продукции малыми сериями или даже в единичных экземплярах, развития ремонтно-восстановительных мощностей в машиностроении, судостроении, авиастроении делают задачу массового внедрения лазерных технологий чрезвычайно актуальной.

Лазерные технологии обработки материалов нашли сегодня широчайшее применение в следующих направлениях:

- раскрой, резка и сверление;
- точечная и шовная сварка, пайка;
- размерная обработка;
- поверхностное упрочнение металла;
- гравировка и маркировка;
- скрайбирование;
- изготовление трафаретов;
- формирование пленок;
- фотолитография;
- подгонка номиналов;
- отжиг и легирование полупроводников;
- быстрое изготовление объемных форм любой сложности;
- очистка поверхностей.

Опыт грамотного внедрения лазерных технологий обработки промышленных материалов свидетельствует о том, что именно сегодня они могут дать существенный и быстрый технико-экономический эффект предприятиям за счет повышения качества и, соответственно, конкурентоспособности выпускаемой продукции и обеспечения гибкости производства.

Об опыте внедрения, особенностях лазерных технологий обработки материалов, установках и комплексах, существующих на данный момент, а также моделировании процессов, происходящих в материалах под воздействием лазерного излучения, пойдет речь в данном издании.

РАЗДЕЛ 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ, СПЛАВОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

1.1. Тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с материалами

1.1.1. Процессы передачи энергии лазерного излучения веществу

При воздействии лазерного излучения (ЛИ) на вещество часть потока в конечном итоге либо отражается, либо проходит сквозь него, а оставшаяся – поглощается. Основным результатом поглощения ЛИ является повышение температуры на поверхности и в объеме вещества, т. е. его нагрев, плавление, испарение. Другими словами, на поверхности и/или в объеме вещества действует источник теплоты.

Рассмотрим кратко процесс передачи энергии ЛИ твердому телу. Энергия световых квантов передается его электронной подсистеме в результате так называемого тройного взаимодействия – взаимодействия электрона, фотона и, например, дефекта решетки или другого электрона. При этом температура электронной подсистемы начинает увеличиваться и за время $10^{-14} \dots 10^{-13}$ с выравнивается. Дальнейшее ее взаимодействие с ионной подсистемой приводит к общему выравниванию температуры. Этот процесс происходит за время $\sim 10^{-11}$ с. Таким образом, понятие температуры вещества справедливо спустя $10^{-10} \dots 10^{-9}$ с после начала воздействия излучения.

Поскольку в лазерных технологиях длительность воздействия излучения составляет более 10^{-8} с и плотность потока не превышает 10^9 Вт/см², ЛИ можно рассматривать как источник теплоты, а процесс распространения тепла в веществе описывать законами теплопроводности.

Процесс воздействия источника теплоты на вещество можно разделить условно на следующие стадии:

1. Передача энергии ЛИ веществу.
2. Прогрев объема вещества по теплопроводностному механизму.
3. Развитие в прогреваемом объеме процессов плавления, испарения, ионизации и разлета вещества.
4. Остывание вещества после окончания воздействия ЛИ.

Характер протекания этих стадий определяет различие и разнообразие технологических процессов.

При рассмотрении тепловых процессов, происходящих в материалах под воздействием ЛИ, необходимо знать следующие характеристики источника теплоты:

- максимальную плотность потока на поверхности q_{max} [Вт/см²];
- функции распределения излучения в радиальном направлении $\varphi(r)$, по глубине $\psi(z)$ и во времени $\xi(t)$;
- плотность потока, падающего на поверхность вещества $q_s = q_{max} \cdot \varphi(r)$;
- поглощенную долю потока $A = 1 - \rho_\lambda$, где ρ_λ – коэффициент отражения вещества (в общем случае необходимо учитывать еще коэффициент пропускания);
- длительность лазерного импульса τ_i [с];
- длину волны излучения λ_0 ;
- диаметр лазерного пучка на поверхности образца $d_b = 2 \cdot r_b$ [см], где r_b – радиус лазерного пучка;
- теплопроводность материала λ_T [Вт/(см·К)];
- удельную теплоемкость материала c [Дж/(г·К)];
- плотность материала ρ [г/см³];
- температуропроводность материала $\alpha = \lambda_T / (c \cdot \rho)$ [см²/с];
- показатель поглощения материала μ [см⁻¹];
- эффективную глубину проникновения света z_{ef} [см].

Коэффициент отражения ρ_λ зависит от λ_0 и q_s , причем в видимой и ближней инфракрасной области у металлов он увеличивается с ростом λ_0 . При плотностях потока на поверхности $q_s < 10^6$ Вт/см² коэффициент отражения металлов можно считать не зависящим от длины волны. Помимо этого, очевидно, что ρ_λ зависит от чистоты поверхности материала.

Пространственно-временное распределение поглощенного потока $q(r, z, t)$ определяет характеристики источника теплоты и записывается следующим образом:

$$q(r, z, t) = A \cdot q_{max} \cdot \varphi(r) \cdot \psi(z) \cdot \xi(t). \quad (1.1)$$

В общем случае функции $\varphi(r)$, $\psi(z)$ и $\xi(t)$ имеют сложный вид, однако для простейших случаев они могут быть определены простыми формулами. Так, $\varphi(r)$ для гауссова пучка (рис. 1.1), введенного в нерассеивающую среду, запишется в виде:

$$\varphi(r) = \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (1.2)$$

где r_0 – размер пучка на уровне $1/e^2$ от максимума.

При однородной освещенности по сечению пучка функцию $\varphi(r)$ можно задать в виде:

$$\varphi(r) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r < r_b, \\ 0, & r_b < r < \infty. \end{cases} \quad (1.3)$$

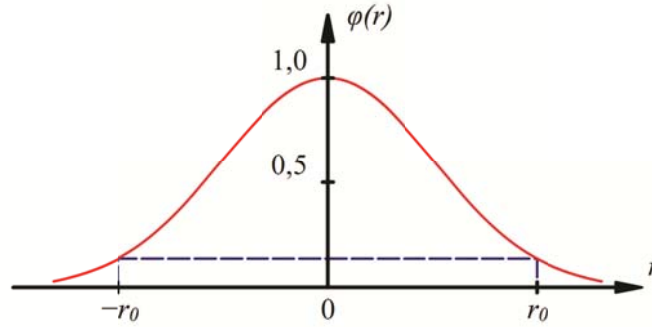


Рис. 1.1. Распределение плотности мощности по сечению гауссова пучка

Функция $\psi(z)$ для нерассеивающей (рис. 1.2) среды запишется в виде закона Бугера–Ламберта–Бера:

$$\psi(z) = \exp(-\mu \cdot z) = \exp(-z/z_{ef}), \quad (1.4)$$

где z – текущая координата по глубине вещества. Как видно из (1.4), $z_{ef} = 1/\mu$.

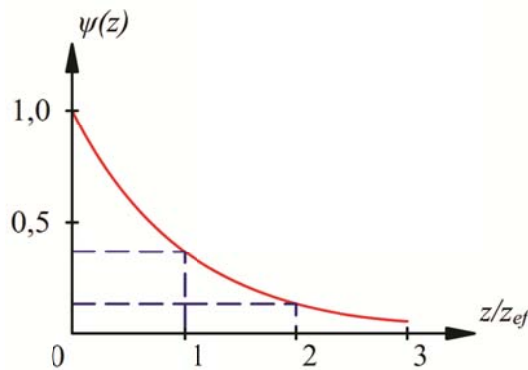


Рис. 1.2. Распределение освещенности по глубине однородной среды

При этом объемная поглощаемая плотность мощности $\omega(r, z)$:

$$\omega(r, z) = A \cdot q_{\max} \cdot \varphi(r) \cdot \mu \cdot \exp(-z \cdot \mu). \quad (1.5)$$

Если среда оптически неоднородна, например, рассеивающая, то вид $\psi(z)$ определяется соотношением между показателем поглощения μ [см⁻¹] и показателем рассеяния β [см⁻¹]. В данном случае реализуются две характерные ситуации:

1. Если $d_b \ll 1/(\mu + \beta)$, то $\psi(z) = \exp(-z(\mu + \beta)) = \exp(-z/z_{opt})$, где $z_{opt} = 1/(\mu + \beta)$ – оптическая толщина диффузно рассеивающей среды (ДРС); $1/z_{opt}$ – показатель ослабления среды в ДРС.

2. Если $d_b \gg 1/(\mu + \beta)$, то $\psi(z)$ приобретает сложный вид: начинает зависеть от r -координаты, слабо поддается анализу. Однако можно рассмотреть два крайних случая. При $\mu \gg \beta$ рассеяние незначительно и функция $\psi(z)$ имеет тот же вид, что и для оптически однородной среды. При $\mu \ll \beta$ рассеяние преобладает над поглощением и $\psi(z)$ может в несколько раз превышать единицу (рис. 1.3).

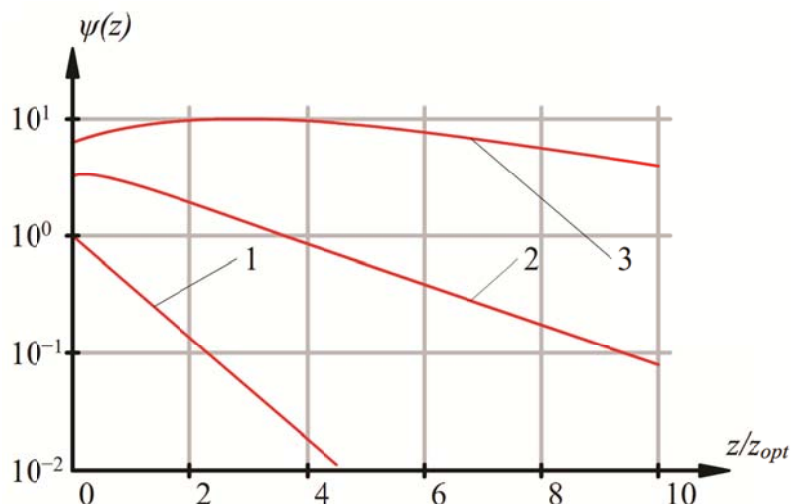


Рис. 1.3. Относительное увеличение освещенности¹ на оси пучка в объеме нерассеивающей (1) и рассеивающей среды при облучении $r_b = 4 \cdot z_{opt}$ (2) и $r_b = 50 \cdot z_{opt}$ (3)

Функция $\varphi(t)$ в случае импульса П-образной формы задается в виде:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < \tau_i, \\ 0, & t > \tau_i. \end{cases}$$

Для одномодового одночастотного излучения с модулированной добротностью резонатора

$$\varphi(t) = \exp\left(-\frac{(t - 0,5\tau_i)^2}{\tau_i^2}\right).$$

Для режима свободной генерации (пиковый режим твердотельных лазеров) аналитическая запись $\varphi(t)$ практически невозможна.

Поглощенная энергия ЛИ распространяется в среде за счет механизмов теплопроводности. Для металлов и вырожденных полупровод-

¹ Расчет выполнен методом Монте-Карло и подробно обсужден в работе Е.И. Александрова и В.П. Ципилева «Особенности светового режима в объеме полубесконечного слоя ДРС при освещении направленным пучком конечной апертуры» (Известия вузов. Физика. 1988. Т. 31. № 10).

ников основой является электронная теплопроводность, а для невырожденных полупроводников и диэлектриков – фононная.

Диэлектрики обычно сильно поглощают в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, а в видимой области они частично или полностью прозрачны. Поглощение в таких средах примесное, т. е. происходит на оптических неоднородностях (ОН). В результате локализации лазерного импульса на ОН в окрестности и объеме ОН возникают тепловые очаги («горячие точки»). Поглощение в этом случае носит нелинейный характер и растет с увеличением температуры в окрестности примеси. Если ОН представляет собой металлические включения (например, частички платины в стекле), то в их окрестностях возможен оптический пробой и микроразрушения материала. Характерный размер поглощающих включений составляет $10^{-6} \dots 10^{-4}$ см.

Для длины волны излучения CO_2 -лазера (10,6 мкм) большинство диэлектриков имеют высокий показатель поглощения. Излучение поглощается в поверхностном слое толщиной в несколько микрометров, что позволяет считать источник тепла поверхностным. Имеется ограниченное число диэлектриков, прозрачных для излучения CO_2 -лазера. Некоторые диэлектрики поглощают излучение CO_2 -лазера в достаточно толстом слое (до миллиметра), для них источник тепла можно считать объемным.

В металлах поглощение происходит в тонком скин-слое толщиной $10^{-5} \dots 10^{-6}$ см, т. е. $\mu \approx 10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$ на электронах проводимости.

Полупроводники имеют низкую концентрацию свободных электронов. Если энергия светового кванта меньше ширины запрещенной зоны ($h\nu < E_g$), то оптические свойства полупроводников подобны свойствам диэлектриков. Если $h\nu > E_g$, то за счет внутреннего фотоэффекта электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости. Они ведут себя как электронный газ: поглощают излучение и передают энергию кристаллической решетке.

1.1.2. Приближенные оценки температуры нагрева

Зная параметры поглощенного веществом потока ЛИ (источника теплоты), а также теплофизические константы материала, можно оценить температуру нагрева вещества. В простейшем случае, при равномерном разогреве, температура нагрева объема вещества V (т. е. увеличение температуры относительно начальной T_0) определяется по следующей формуле:

$$T = \frac{W_0}{V \cdot c \rho}; \quad (1.6)$$

$$W_0 = A \cdot q_s \cdot \pi r_b^2 \cdot \tau_i, \quad (1.7)$$

где W_0 – энергия источника теплоты, выделившаяся в объеме, W_0/V – объемная плотность энергии.

Для определения величины прогретого объема рассмотрим рис. 1.4.

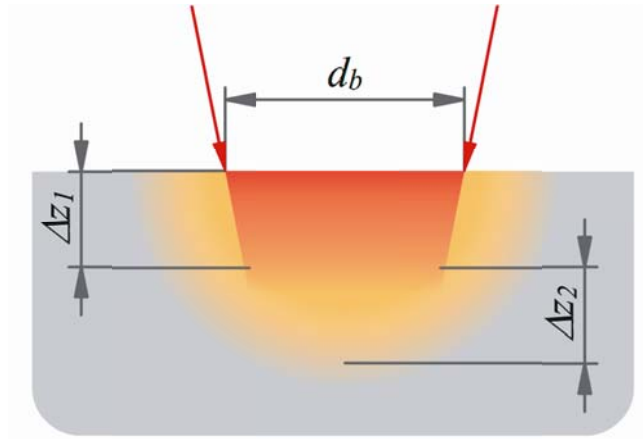


Рис. 1.4. Упрощенная модель нагрева однородной среды для плоского случая

Здесь $\Delta z_1 = z_{ef} = 1/\mu$ – характерная глубина проникновения света, а $\Delta z_2 = \sqrt{\alpha \tau_i}$ – характерная глубина прогретого слоя за время действия лазерного импульса.

При $\Delta z_2 \ll d_b$ можно пренебречь уходом тепла в радиальном направлении и определить объем V прогретой области как:

$$V = \frac{\pi d_b^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \sqrt{\alpha \tau_i} \right). \quad (1.8)$$

При этом объемная плотность энергии составит:

$$\frac{W_0}{V} = A \cdot \frac{q_s \cdot \tau_i}{1/\mu + \sqrt{\alpha \tau_i}}. \quad (1.9)$$

Если $\Delta z_1 \ll \Delta z_2$, реализуются условия поверхностного нагрева с отводом тепла в объем вещества при большой длительности воздействия. В таком случае температуру можно определить как

$$T = A \cdot \frac{q_s}{c\rho} \cdot \sqrt{\frac{\tau_i}{\alpha}} = \frac{q_s \cdot \sqrt{\alpha \tau_i}}{\lambda_T}. \quad (1.10)$$

Если же импульс короткий, а μ мало, т. е. $\Delta z_1 \gg \Delta z_2$, то температура будет определяться как

$$T = A \cdot \frac{q_s \cdot \tau_i \cdot \mu}{c\rho}. \quad (1.11)$$

Для металлов показатель поглощения составляет $\mu \approx 10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$ и при длительности лазерного импульса порядка $\tau_i \leq 10^{-3} \text{ с}$ глубина проникновения излучения $1/\mu$ велика по сравнению с уходом тепла за это время $\sqrt{a\tau_i}$, поэтому оценки температуры можно делать по выражению (1.10).

Для полупрозрачных диэлектриков показатель поглощения μ составляет примерно $10^{-2} \dots 10^0 \text{ см}^{-1}$ и оценки температуры можно проводить по выражению (1.11). Необходимо отметить, что оценки по (1.10) и (1.11) дают приближенные значения средней температуры нагретого объема.

Прозрачные диэлектрики имеют показатель поглощения порядка $10^{-3} \dots 10^{-6} \text{ см}^{-1}$. Нагрев таких материалов происходит за счет имеющихся в объеме примесей и дефектов, показатель поглощения которых отличается от основного состава вещества. Модель нагрева оптической неоднородности (ОН) в прозрачных диэлектриках показана на рис. 1.5.

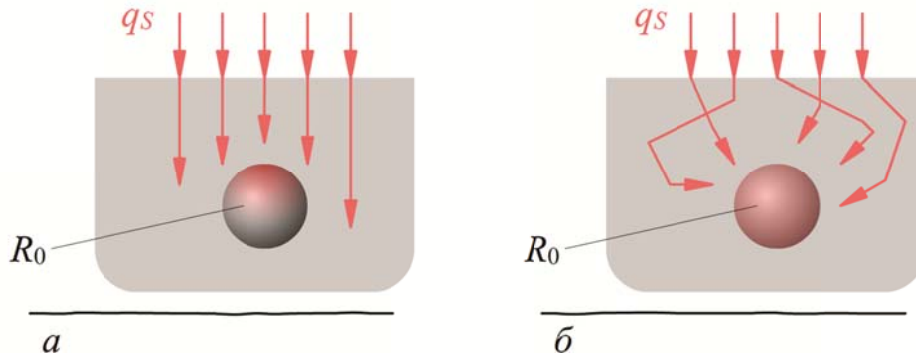


Рис. 1.5. Упрощенная модель нагрева оптической неоднородности в прозрачной нерассеивающей (а) и диффузно-рассеивающей среде (б), где R_0 – радиус неоднородности

В прозрачных по отношению к воздействию потоку ЛИ диэлектриках разогрев происходит за счет теплоотдачи ОН, температуру нагрева которой можно оценить как

$$T = A \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{q_s \cdot \psi(z) \cdot \tau_i}{R_0 \cdot c \rho}. \quad (1.12)$$

Оценка (1.12) справедлива для случая адиабатического нагрева ОН, т. е. когда $\sqrt{a_1 \tau_i} \gg R_0 \gg \sqrt{a_2 \tau_i}$, где индекс «1» относится к оптической неоднородности, а индекс «2» – к среде.

Коэффициент A определяется при близком к нормальному ($< 0,1$ рад) падению лазерного пучка на вещество по формуле

$$A = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$

где n – относительный показатель преломления среды.

Верхняя оценка коэффициента $\psi(z)$, отвечающего за увеличение падающей на ОН плотности потока q_s , в диффузно-рассеивающих средах, по сравнению с прозрачными, составляет порядка $4n^2$.

Отметим также, что чем меньше размер неоднородности R_0 , тем выше температура и тем лучше нагреваются частички малого размера.

В случае если $\tau_i > R_0/\alpha_2$, но по-прежнему $R_0 \ll \sqrt{\alpha_1 \tau_i}$, оценка температуры нагрева внутри сферы с центром в ОН и радиусом $R_0 + \sqrt{\alpha_2 \tau_i}$ осуществляется по формуле

$$T = A \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{q_s \cdot \psi(z) \cdot \tau_i}{c\rho} \cdot \frac{R_0^2}{\left(R_0 + \sqrt{\alpha_2 \tau_i}\right)^3}.$$

При непрерывном нагреве ($\tau_i \rightarrow \infty$) температуру поверхности частицы можно определить следующим образом:

$$T = A \cdot \frac{q_s \cdot R_0}{4\lambda_r}.$$

Таким образом, зная плотность воздействующего потока, длительность воздействия и размер облучаемой зоны, можно оценить температуру вещества, знание которой является неотъемлемой частью при проектировании и разработке технологических операций обработки материалов с использованием лазерного излучения.

1.2. Феноменология нагрева и разрушения металлов при неподвижном источнике теплоты

1.2.1. Диаграмма режимов лазерной обработки металлов и критические потоки

Из выражений (1.10) и (1.11) видно, что, меняя величины q_s , τ_i , μ , α и ρ , можно получить разные режимы нагрева вещества. Для металлов эти режимы исследованы достаточно хорошо. Существуют диаграммы, по которым приближенно определяют режим нагрева для конкретной технологической операции. Из выражений (1.10) и (1.11) следует, что для конкретного материала температура нагрева определяется только значениями q_s и τ_i .

Напомним, что для металлов показатель поглощения μ составляет примерно $10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$ и глубина прогретого слоя определяется только передачей тепла из приповерхностного слоя, т. е. величиной коэффициента температуропроводности:

$$z_{heat} \approx 2\sqrt{\alpha\tau_i}. \quad (1.13)$$

Очевидно, что при неизменной τ_i температура нагрева пропорциональна изменению q_S . Если температура слоя не достигла температуры плавления T_{liq} , то по окончании воздействия разрушения материала не происходит. Одновременно, если температура нагрева превысила температуру заковки T_{hard} , произойдет термоупрочнение.

С ростом величины q_S температура слоя может достигать температуры плавления вещества. Во время плавления температура практически не повышается, а поглощаемая лазерная энергия идет на расплавление вещества.

При увеличении q_S начинает нагреваться расплавленный слой вещества. Расплав перегревается и деформируется, образуется лунка, а излучение лазера плавит дно лунки (пучок заглубляется). За счет этого глубина расплавленного слоя z_{liq} быстро растет и становится $z_{liq} \gg 2\sqrt{\alpha\tau_i}$ (глубокое расплавление). После снятия воздействия ЛИ переплав заполняет лунку, остывает и кристаллизуется.

Еще большее увеличение плотности мощности q_S приводит к росту температуры до температуры кипения T_{boil} . При этом глубокое проплавление происходит с послойным испарением дна лунки. Если q_S будет так велико, что температура всего расплавленного слоя достигнет T_{evap} , то возникнет объемное кипение (испарение), и в лунке жидкой фазы практически не будет, т. е. вещество будет под лучом лазера практически сразу же превращаться в пар, который покидает лунку. После окончания воздействия лунка остается пустой.

При очень высоких значениях q_S пар перегревается, происходит его ионизация (возникает плазма). При этом в парах и окружающем материале газе возможен электрооптический разряд.

Для металлов методы лазерной обработки основаны на нагреве, плавлении, испарении и ударном нагружении материала в зависимости от q_S и τ_i . Рассмотрим эти режимы обработки металлов на рис. 1.6.

В области I интенсивно образуется плазма за счет разогрева поверхностного слоя (очень тонкого, поскольку длительность воздействия мала, а μ – велико). Поверхностный слой удаляется с большой скоростью, на вещество действует реактивный импульс отдачи, а вглубь вещества распространяется ударная волна. В этой области можно удалять поверхность, удалять пленки, производить маркировку и ударное упрочнение.

В областях II и III длительность воздействия тоже мала. Прогретый слой составляет величину $z_{heat} \approx 2\sqrt{\alpha\tau_i} \approx 10^{-3}$ см, и поэтому можно ис-

парять поверхность, тонкие пленки и производить маркировку, и пробивать отверстия в тонких слоях.

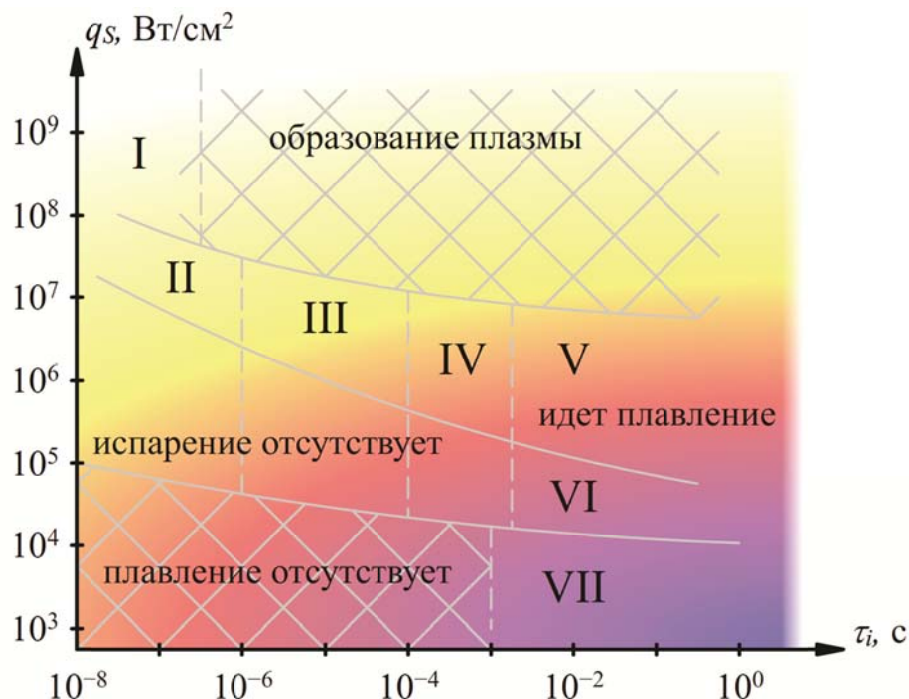


Рис. 1.6. Приблизительные диапазоны плотности мощности и длительности ЛИ для различных режимов обработки металлов при неподвижном источнике теплоты:

I – испарение пленок, ударное упрочнение, маркировка;
II и *III* – испарение пленок, маркировка, глазурирование;
IV – сверление отверстий, перфорация; *V* – резка

В области *IV* испаряется достаточно толстый слой материала, который удаляется при расширении паров в свободное пространство. Это слой порядка $z_{heat} \approx 2\sqrt{\alpha\tau_i} \approx 0,5$ мм. За счет проникновения излучения на дно образующейся лунки толщина удаленного слоя больше, чем z_{heat} . В этом режиме эффективно сверление отверстий (размерная обработка).

Область *V* характеризуется эффективным испарением и глубоким проплавлением вещества за счет большой глубины прогрева, выдавливания и удаления расплава. Ей соответствует режим резки материала.

В области *VI* образуется глубокий проплав вещества с незначительным испарением (или его отсутствием). В этих режимах эффективны сварка и термоупрочнение на большую глубину с переплавом поверхностных слоев.

В области *VII* фазовые переходы (плавление, испарение) отсутствуют. В таких режимах возможно термоупрочнение в широком диапазоне глубин (от единиц микрометров до нескольких сантиметров в зави-

симости от длительности воздействия) без переплава поверхности – только благодаря структурной перестройке материала на стадии разогрева и охлаждения. Необходимо отметить, что скорость нагрева и остывания при лазерном воздействии зависит от q_s и τ_i и может меняться в широких пределах, достигая величины 10^6 град/с, что невозможно обеспечить другими способами.

В оставшейся на рис. 1.6 непронумерованной области возможны операции термоупрочнения, в основе которых лежит переплав разогретого слоя, толщина которого в зависимости от τ_i также может меняться в широких пределах (но возможности ограничены малым временем воздействия).

Таким образом, в самом грубом представлении сверление отверстий возможно при плотностях потока $q_s = 10^6 \dots 10^8$ Вт/см² и длительности воздействия $\tau_i = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ с. Сварка и резка возможны при $q_s = 10^5 \dots 10^7$ Вт/см² и $\tau_i \approx 10^{-3}$ с. Лазерное упрочнение, основанное на фазовых превращениях в слое, требует минимальной плотности потока $q_s = 10^4 \dots 10^5$ Вт/см² при максимальном времени воздействия $\tau_i = 10^{-3}$ с.

На рис. 1.6 нижняя линия определяет значения q_s , при которых нагрев не приводит к разрушению материала, т. е. $q_s < q_{liq}$, где q_{liq} – это уровень q_s , после превышения которого начинается плавление вещества. Для различных металлов q_{liq} различно в зависимости от A и T_{liq} . На рисунке приведено усредненное значение. При $q_s > q_{liq}$ образовывается канал проплавления, так называемая *глубокая воронка*.

Глубокая воронка, или глубокое (кинжальное) проплавление вещества, происходит не за счет теплопроводности, а за счет заглубления лазерного пучка на дно расплавленного слоя с течением времени все глубже. Этот процесс проплавления идет с большой скоростью и только вглубь вещества. В радиальном направлении фронт плавления расширяется только по механизму теплопроводности по формуле $z_{heat} \approx 2\sqrt{\alpha\tau_i}$. Поскольку $z_{heat} > \sqrt{\alpha\tau_i}$, образуется узкий и глубокий проплав вещества.

Средняя кривая на рис. 1.6 соответствует потокам $q_s < q_{evap}$, где q_{evap} – плотность потока, превышение которого приводит к интенсивному испарению и разрушению материала.

При $q_s > q_{evap}$ скорость фронта испарения соизмерима со скоростью теплоотвода и возникает режим объемного кипения материала, при котором объем жидкой фазы мал. Основная доля поглощенной энергии расходуется на испарение и увеличение внутренней энергии разлетающихся паров и капель, а теплота, затрачиваемая на плавление относительно мала, поэтому жидкая фаза почти отсутствует. Это режим резки или прошивки отверстий, тогда как при $q_{liq} < q_s < q_{evap}$ реализуется ре-

жим сварки (объем парогазовой фазы мал). При $q_s < q_{liq}$ можно проводить термообработку материала.

1.2.2. Уравнения теплового баланса для неподвижного источника

В предыдущем параграфе были рассмотрены режимы разогрева металлов при действии неподвижного источника с плотностью воздействующего потока на поверхность q_s . Количественная связь между глубиной прогрева до заданной температуры и параметрами пучка определяется уравнениями теплового баланса:

$$\begin{aligned} A \cdot W_0 &= W_T; \\ W_0 &= q_s \cdot \tau_i \cdot \frac{\pi d_b^2}{4}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

где W_T – теплосодержание разогретого объема вещества.

При этом глубина прогретого слоя $z_T \gg \sqrt{\alpha \tau_i}$, а его температура (в плоской геометрии нагрева) определяется формулой

$$T = A \cdot \frac{q_s}{2 \cdot c \rho} \cdot \sqrt{\frac{\tau_i}{\alpha}}. \quad (1.15)$$

Но по формуле (1.15) можно определить только среднюю температуру по слою, поскольку известно, что поверхностные слои должны быть нагреты до более высоких температур, нежели глубокие.

Более точная оценка, учитывающая распределение по глубине z имеет вид:

$$T = A \cdot \frac{q_s \cdot 2\sqrt{\alpha \tau_i}}{\lambda_T} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha \tau_i}}\right), \quad (1.16)$$

где $ierfc(x)$ – функция интеграла вероятности, которая обычно табулируется (приведена в прил.).

При нагреве материала до температур больших, чем температуры плавления, теплосодержание в объеме вещества определяется как

$$W_T = \rho \cdot \left[c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq} \right] \cdot \frac{\pi d_b^2 \cdot z_T}{4}, \quad (1.17)$$

где H_{liq} [Дж/г] – скрытая теплота плавления.

С учетом радиального распространения тепла $d_b + 2\sqrt{\alpha \tau_i}$ теплосодержание будет определяться как

$$W_T = \rho \cdot \left[c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq} \right] \cdot \frac{\pi \left(d_b + 2\sqrt{\alpha \tau_i} \right)^2 \cdot z_T}{4}. \quad (1.18)$$

Из выражения (1.18) можно при известной энергии лазерного импульса W_0 , длительности импульса τ_i и размере пятна фокусировки d_b определить глубину проплавления z_{liq} .

При $q_S > q_{evap}$ большая часть поглощенной энергии уходит на испарение вещества. Для определения глубины испаренного слоя z_{evap} можно привести уравнение баланса в следующий вид:

$$W_0 \cdot A = \rho \cdot \left[c \cdot (T_{evap} - T_0) + H_{liq} + H_{evap} \right] \cdot \frac{\pi (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2 \cdot z_T}{4}. \quad (1.19)$$

Чаще всего $H_{evap} \gg [c \cdot (T_{evap} - T_0) + H_{liq}]$ и выражение (1.19) упрощается:

$$W_0 \cdot A = \rho \cdot H_{evap} \cdot \frac{\pi (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2 \cdot z_{evap}}{4}. \quad (1.20)$$

В плоской геометрии при $d_b \gg 2\sqrt{\alpha\tau_i}$ выражение (1.20) приобретает вид:

$$q_S \cdot A = \frac{\rho \cdot H_{evap} \cdot z_{evap}}{\tau_i}, \quad (1.21)$$

т. е. глубина испарения определяется только плотностью воздействующего потока q_S и длительностью воздействующего импульса τ_i .

1.2.3. Простейшая модель нагрева металлов при низких и высоких плотностях потоков лазерного излучения

При малых значениях плотности потока источника q_S происходит разогрев приповерхностного слоя вещества. Если $q_S < q_{liq}$, то переплавленного слоя не образуется, и после снятия воздействия слой остывает, при этом в сплавах возможна закалка прогретого слоя. При $q_S > q_{liq}$ образуется зона переплава вещества. В любом случае толщина прогретого слоя будет определяться как $z_T = 2\sqrt{\alpha\tau_i}$.

В зависимости от диаметра пятна воздействующего луча d_b и прогретого им слоя вещества тепло в материале будет распространяться различно. На рис. 1.7 представлена геометрия нагрева материала при различных режимах воздействия. В случае если диаметр пятна много больше, чем толщина прогретого слоя ($d_b \gg z_T$, рис. 1.7, а), прогретый слой имеет форму цилиндра, и его объем вычисляется по формуле

$$V \approx \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} \sqrt{\alpha\tau_i}.$$

При $d_b \ll z_T$ (рис. 1.7, б) образуется полусферическая геометрия нагрева, а прогретый объем определяется как

$$V \approx \frac{4\pi}{3} (\sqrt{\alpha\tau_i})^3.$$

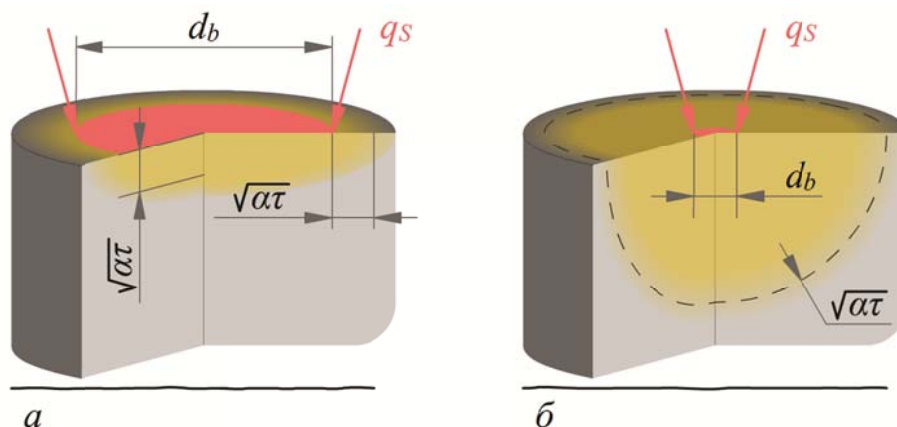


Рис. 1.7. Форма прогреваемого объема материала (источника тепла) при воздействии широким (а) и узким (б) лазерным пучком

Физические процессы при действии неподвижного источника в основном такие же, что и при движущемся. Схематически модель нагрева и остывания материала с последующим увеличением плотности потока q_s лазерного излучения показана на рис. 1.8.

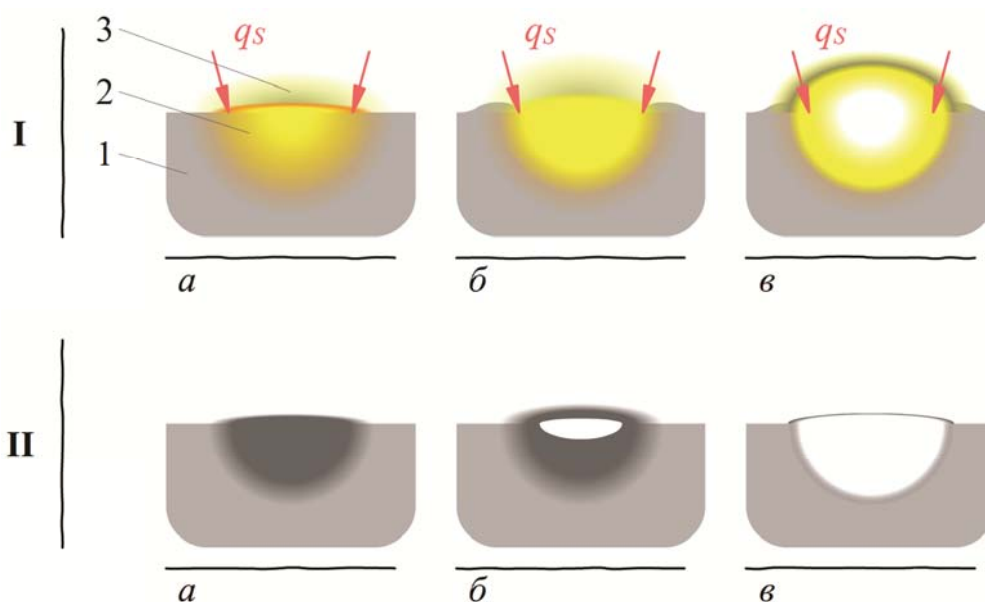


Рис. 1.8. Нагрев металла при действии ЛИ (I) и после воздействия (II) в зависимости от плотности мощности лазерного излучения:

$a - q_s < q_1$; $b - q_1 < q_s < q_2$; $в - q_s > q_2$;
1 – металл, 2 – расплав, 3 – продукты разрушения

При повышении плотности потока начинается плавление металла, далее при превышении первой критической плотности потока q_1 начинается глубокое проплавление материала. Продукты разрушения в виде парогазовой струи разлетаются в окружающее пространство, а жидкий металл оттесняется на стенки лунки и выдавливается на ее края. Часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения. Особенно сильно поглощает и рассеивает паровая фаза, представляющая собой при потоках $q_s \sim 10^8$ Вт/см² слабоионизованную плазму. Луч лазера подогревает плазму. Если импульс излучения лазера имеет пиковую временную структуру, то свечение плазмы носит соответствующий пиковый характер. Однако поглощение излучения плазмой существенно влияет на баланс энергий только при потоках $q_s > 10^9$ Вт/см². Поэтому эта величина является верхней границей диапазона рабочих плотностей потока при получении отверстий в металлах. Движущаяся парожидкостная струя плавит и размывает стенки лунки. Как и при движущемся источнике, доля жидкой фазы определяется потоком q_s . Обычно при получении отверстий она составляет от 30 до 80 % и тем больше, чем выше теплопроводность материала λ_T и разница между температурой плавления T_{liq} и температурой кипения T_{evap} вещества.

Необходимо отметить, что расплав движется вверх по стенкам лунки. При достижении q_s второй критической плотности потока увеличивается скорость плавления, в расплаве возникают турбулентности, а также происходит отрыв капель и их разлет. Капли могут застывать вокруг лунки, на ее стенках и дне. В продуктах разрушения могут иметься частицы твердой фазы (за счет разрушения импульсом отдачи дна лунки и термоупругих напряжений, поскольку градиенты температур в различных точках могут достигать $10^5 \dots 10^6$ К/см). Возникновение застывающих капель в лунке возможно из-за конденсации паров.

Если длительность импульса велика, то термические напряжения могут привести к растрескиванию материала вокруг лунки. При потоках излучения $q_s > 5 \cdot 10^7$ Вт/см² лунка после окончания воздействия ЛИ уже не содержит расплава.

Итак, при плотностях потока, меньших q_1 , возникает только проплавление поверхностного слоя на незначительную глубину. Движение расплава почти отсутствует (рис. 1.8, а). После окончания импульса расплав застывает, лунка не образуется, профиль обработки имеет сферическую геометрию с поперечным размером $2r_b \approx 2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b$.

При $q_s > q_1$ начинается глубокое проплавление вследствие испарения и вытеснения парами жидкой фазы. Движение жидкости может быть ламинарное. Жидкость не распадается на отдельные капли, не увлекается струей пара, а удерживается силами поверхностного

натяжения на краю лунки в виде валика. Глубина проплава в этом случае значительно больше глубины проплава по механизму теплопроводности. После окончания импульса не успевший застыть металл стекает в лунку и образует зону переплавленного материала (рис. 1.8, б).

При $q_s > q_2$ начинается объемное кипение и объемное испарение. Движение жидкости полностью турбулентно, от нее отрываются капли и увлекаются плазменно-паровым потоком. Однако расплав может сохраниться в небольшом количестве к концу импульса и частично заполнить лунку вблизи входа в нее.

Как и в случае движущегося источника, если толщина пластины меньше глубины проплавления, то образуется сквозное отверстие. Возникновение отверстия меняет условия в кратере, поскольку давление резко падает и выдавливаемый кольцевой расплав стекает под действием сил тяжести в нижнюю часть кратера и может перекрыть его. Сразу же увеличивается поглощение луча в нижней части кратера, возрастают температура и импульс отдачи, что через определенное время приводит к новому прорыву канала. Этот процесс может повторяться, пока канал не расширится за счет размывания жидкой фазой стенок и выдавливания расплава. При достаточном расширении канал уже не закрывается.

При потоке $q_s > 10^7$ Вт/см² качество обработки повышается, однако значительное повышение q_s ($> 10^9$ Вт/см²) приведет к поглощению излучения продуктами выброса и экранировке излучения. При этом возможно затекание отверстия на дне канала. Существует оптимальная величина плотности потока и длительности импульса для наиболее эффективного пробивания отверстий для пластин из различного материала.

1.3. Модель нагрева и разрушения металлов при движущемся источнике теплоты

1.3.1. Характерные зоны разогрева материала и распределение энергии

Распределение энергии лазерного излучения в наиболее общем случае установившегося режима проплавления представлено на рис. 1.9. При изменении q_s меняется форма проплава, соотношение компонент в плазменно-паровом факеле, доля расплава и парогазовой струи, а также значения параметров в уравнениях баланса, т. е. характер распределения энергии.

На рис. 1.9 используются следующие обозначения:

- q_s – плотность мощности лазерного пучка;
- Q_{pl} – энергия, поглощенная в объеме плазменно-парового факела, который внутри кратера и над его поверхностью;

- Q_{rad} – энергия, рассеиваемая в окружающую среду излучением из плазменного факела;
- Q_w – часть энергии факела, поглощаемая стенками канала в результате конвективного и лучистого теплообмена;
- Q_{ref} – энергия лазерного луча, отраженная от поверхности металла и дна кратера;
- Q_{vap} – полная энергия продуктов разрушения, уносимая реактивной парогазовой струей;
- Q_{las} – энергия лазерного луча, поглощенная на стенках канала (в процессе фотон-электронных соударений);
- Q_{liq} – полное теплосодержание жидкого металла в ванне расплава;
- Q_T – энергия, отводимая вглубь исходного и переплавленного металла вследствие теплопроводности.

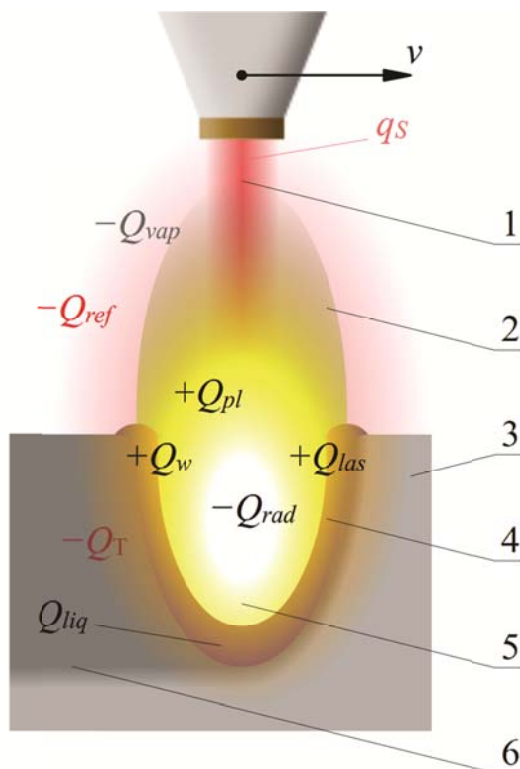


Рис. 1.9. Схема энергозатрат в установившемся режиме проплавления металла сфокусированным движущимся лазерным источником:

1 – сфокусированный луч лазера; 2 – плазменный факел;

3 – обрабатываемый металл; 4 – расплав;

5 – кратер (парогазовая лунка); 6 – переплав (сварочный шов)

В соответствии с рис. 1.9 энергия лазерного излучения поглощается плазменно-паровым факелом, частично уносится реактивной парогазовой струей, а оставшаяся часть поглощается на стенках канала. Баланс энергии можно записать в следующем виде:

$$k \cdot q_s - (Q_{pl} + Q_{ref} + Q_{vap}) = Q_{las}, \quad (1.22)$$

где k – коэффициент пропорциональности между размерностью энергии и плотностью мощности.

Баланс излучения для плазменно-парового факела выглядит следующим образом:

$$Q_{pl} = Q_{rad} + Q_w.$$

Энергия, поглощенная стенками лунки, идет на плавление, разогрев сплава, отводится теплопроводностью в исходный и переплавленный (остывший) материал:

$$Q_{las} + Q_w = Q_{liq} + Q_T.$$

Таким образом, эффективность передачи энергии лазерного излучения обрабатываемому материалу характеризует КПД процесса лазерной обработки. Его можно представить эффективным коэффициентом поглощения A_{ef} :

$$A_{ef} = \frac{Q_{las} + Q_w}{Q_s}. \quad (1.23)$$

Для различных режимов обработки A_{ef} будет различным.

1.3.2. Уравнения теплового баланса для движущегося источника

При движущемся источнике теплоты (поверхность или пучок движутся) теплосодержание в объеме определяется как

$$W_T = c\rho \cdot V \cdot \Delta T = c\rho \cdot \tau_i \cdot v \cdot d_p \cdot z_T \cdot \Delta T, \quad (1.24)$$

где v – скорость движения источника.

Уравнение баланса в этом случае имеет вид (с учетом радиального расширения тепла):

$$A_{ef} \frac{W_0}{\tau_i} = c\rho \cdot \Delta T \cdot (d_p + 2\sqrt{\alpha\tau_i}) \cdot v \cdot z_T, \quad (1.25)$$

где $W_0/\tau_i = P_0$ – мощность излучения.

Выражение (1.25) справедливо в режиме непрерывного излучения лазера с мощностью P_0 . В этом случае время воздействия определяется как $\tau_i = d_b/v$.

При высоких плотностях потока и в случае движущегося источника теплоты может осуществляться плавление и испарение вещества. Соответственно, уравнение баланса будет иметь следующий вид:

- в режиме плавления

$$A_{ef}P_0 = v \cdot z_T \cdot (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i}) \cdot \rho \cdot [c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq}];$$

- в режиме испарения

$$A_{ef}P_0 = v \cdot z_T \cdot (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i}) \cdot \rho \cdot [c \cdot (T_{evap} - T_0) + H_{liq} + H_{evap}]; \quad (1.26)$$

- в импульсно-периодическом режиме излучения

$$A_{ef}P_0 = v \cdot z_T \cdot \left(d_b + 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{G}} \right) \cdot \rho \cdot [c \cdot (T_{evap} - T_0) + H_{liq} + H_{evap}],$$

где $G = T_i/\tau_i$ – скважность импульсов излучения, T_i – период следования импульсов.

По выражениям (1.26) можно вычислять глубину проплавленного или испаренного слоя при движущемся с определенной скоростью лазерном пучке по поверхности металла.

1.3.3. Глубокое проплавление

Механизм образования лунки (каверны), или механизм глубокого проплавления материала, состоит в следующем. При достижении плотности потока q_s значения, большего критической величины q_1 для данного материала, над расплавом образуется пар. Величина q_1 соответствует такому значению плотности потока, при котором скорость подвода энергии превышает скорость отвода по механизму теплопроводности. Испарение носит поверхностный характер.

На поверхности раздела жидкость–пар действует реактивное давление паров, вычислить которое можно как

$$p = \frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot T}{M \cdot \rho(T)}, \quad (1.27)$$

где R – универсальная газовая постоянная; $\rho(T)$ – плотность пара при температуре T ; M – молярная масса обрабатываемого металла.

Вследствие этого давления происходит деформация свободной поверхности расплава и образуется воронка / канал проплавления. Образование канала приводит к заглублению лазерного пучка в материал и формированию кинжального проплавления. Расплав оттесняется на стенки и удерживается давлением паров и силами поверхностного натяжения. При перемещении луча расплавленный материал оттесняется по боковым стенкам канала в хвостовую часть. За лучом образуется ванна расплава, которая остывает и кристаллизуется. Образуется переплавленный глубокий узкий шов. При сварке деталей это и будет сварное соединение.

1.3.4. Объемное испарение

При достижении плотности потока q_S верхнего порога q_2 , при котором скорость фронта испарения соизмерима со скоростью теплоотвода, начинается режим кипения и объемного испарения материала. По краям и в хвосте парогазового канала практически отсутствует жидкая фаза. Ее остатки и конденсат пара уносятся парогазовой струей. В уравнениях баланса энергии значение q_{vap} возрастает, а Q_{liq} – уменьшается (рис. 1.9). За лучом остается рез, который при незначительном превышении q_S над порогом частично заполняется стекающим с боковых стенок расплавом, а при больших значениях q_S (в отсутствии жидкой фазы) рез остается незаполненным. По-видимому, при больших q_S и v после прохождения луча на стенках реза не появляется расплава, поскольку перегретый слой на границе пар–твердое вещество достаточно тонок. В этом режиме должно быть высокое качество реза. Глубина реза будет соответствовать глубине лунки проплавления и испарения, тогда как при меньших q_S глубина реза меньше глубины проплавления.

Если толщина материала меньше глубины кинжального проплавления, т. е. глубины лунки, то материал разрезается. При этом меняется баланс энергий, да и сама феноменология процесса, поскольку парогазовая струя и продукты разрушения имеют выход на тыльную сторону пластины (заднюю поверхность), что меняет условия разгрузки, т. е. меняется давление паров на боковые стенки. Кроме того, меняются условия поглощения луча в канале.

При плотностях q_S , меньших нижнего порога q_1 , лунка не образуется, плазменно-паровой факел отсутствует. При малых длительностях лазерного импульса τ_i реализуется плоская геометрия нагрева, а при больших – сферическая.

Отличием является и то, что без расплава глубина прогрева не связана с q_S и пропорциональна $\sqrt{\tau_i}$. При глубоком проплавлении глубина проплава пропорциональна q_S и обратно пропорциональна v , т. е. пропорциональна τ_i .

1.4. Способы повышения эффективности лазерного воздействия

1.4.1. Эффективный коэффициент поглощения

Ранее мы выяснили, что поглощение излучения характеризуется в общем случае коэффициентом A_{ef} , который определяет, какое количество излучения пошло на разогрев материала, т. е. A_{ef} является КПД процесса:

$$A_{ef} = \frac{Q_{las} + Q_w}{k \cdot q_s} = \frac{k \cdot q_s - (Q_{ref} + Q_{rad} + Q_{vap})}{k \cdot q_s};$$

$$A_{ef} = \frac{Q' + Q_T}{k \cdot q_s},$$
(1.28)

где Q' – энергия, идущая на переплав.

В выражениях (1.28) A_{ef} – отношение количества теплоты, введенной в металл, к энергии лазерного излучения.

В случае поверхностной термообработки A_{ef} совпадает с коэффициентом поглощения A , который приблизительно зависит от температуры:

$$A = A_0 + b \cdot \Delta T, \quad (1.29)$$

где A_0 – начальный коэффициент поглощения, b – коэффициент, связанный с температурой.

Очевидно, что с повышением q_s температура поверхности повышается и величина A растет.

При обработке с глубоким проплавлением и испарением A_{ef} зависит от состояния баланса энергий. В силу сложности протекающих процессов точно определить A_{ef} достаточно трудно, однако в первом приближении можно утверждать, что A_{ef} растет линейно вплоть до значений $q_s \sim 10^8$ Вт/см², т. е. КПД энергопровода растет.

Представленный на рис. 1.10 график позволяет для соответствующего вида лазерной обработки провести предварительную оценку тепловой эффективности по значению плотности мощности излучения, т. е. ориентировочно определить КПД энергопровода.

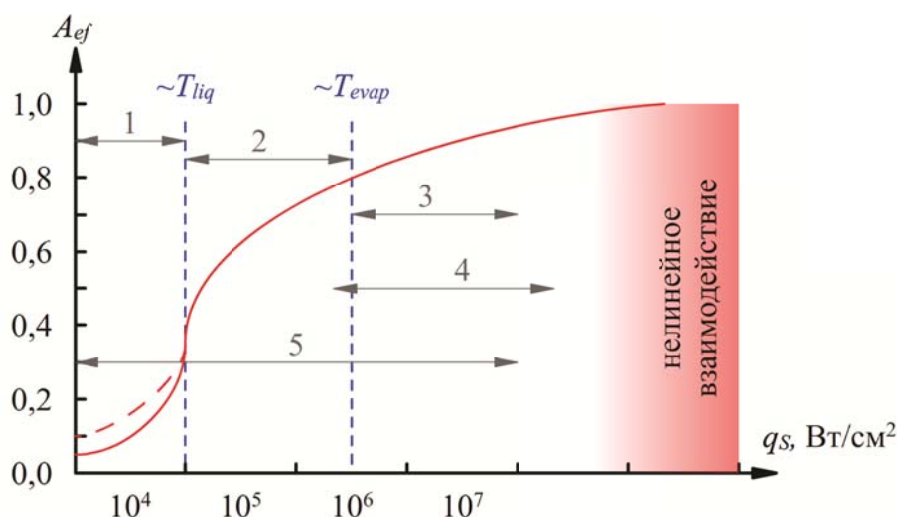


Рис. 1.10. Упрощенная температурная диаграмма лазерной обработки:

1 – термообработка; 2 – сварка; 3 – газолазерная резка;

4 – прошивка отверстий; 5 – размерная обработка; 6, 7 – прочие виды

Анализ кривой показывает, что эффективность энерговвода при $q_s \sim 10^7 \dots 10^8$ Вт/см² достаточно высока, а при газолазерной резке приближается к 100 %. При $q_s < 10^5$ Вт/см² (термообработка) A_{ef} в отсутствии поглощающих покрытий мало, а при поглощающих покрытиях может превышать 75 % (см. заштрихованную область рис. 1.10).

Опытным путем установлено, что при лазерной сварке с глубоким проплавлением эффективность поглощения составляет:

- до 100 % при мощности лазера ~20 кВт;
- до 50 % при мощности 3,8...8,0 кВт;
- ниже 20 % при мощности 250 Вт.

Таким образом, эффективность поглощения низка в режимах термообработки и при применении маломощных лазеров.

1.4.2. Поглощающие покрытия

Известно, что отражательная и, соответственно, поглощательная способности материалов сильно зависят от длины волны воздействующего на них излучения. В табл. 1.1 представлены коэффициенты отражения некоторых металлов.

Таблица 1.1

Коэффициенты отражения некоторых металлов

Лазер	Au	Cu	Mo	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
Аргоновый 0,488 мкм	0,415	0,437	0,445	0,952	0,850	–	–	0,597
Рубиновый 0,694 мкм	0,930	0,831	0,498	0,961	0,820	0,575	0,575	0,676
YAG:Nd 1,064 мкм	0,981	0,901	0,582	0,964	0,733	0,570	0,650	0,741
CO ₂ 10,6 мкм	0,975	0,984	0,945	0,989	0,970	0,930	–	0,941

Также на поглощение будет влиять плотность воздействующего потока. При малых значениях q_s температура поверхности металлов низка, а отражательная способность высока (особенно для CO₂-лазеров).

С ростом температуры уменьшается электрическая проводимость металлов и возрастает коэффициент поглощения. Состояние поверхности также влияет на поглощательную способность (шероховатость, загрязнение). В окислительной среде (например, воздухе) на поверхности металла образуется оксидная пленка, которая увеличивает поглощательную способность (иногда в несколько раз).

Однако при лазерной обработке гладких полированных (шлифовальных) поверхностей необходимо применение поглощающих покрытий.

При этом главным условием при выборе покрытия является его высокая поглощательная способность, высокая теплопроводность и адгезия к покрываемому металлу.

Основные требования к покрытиям следующие:

- простота изготовления и нанесения;
- высокая адгезивная способность;
- высокая температура плавления и теплопроводность.

Широкое применение находят следующие типы покрытий:

- химические покрытия (оксидирование, сульфидирование, фосфатирование цинком, марганцем);
- красящие составы, содержащие оксиды металлов Al_2O_3 , ZnO ;
- растворы углерода в ацетоне и спирте;
- сажа при сжигании (закопчение).

Очевидно, что применение поглощающих покрытий при лазерной сварке и резке нецелесообразно.

1.4.3. Глубина проплавления

Этот параметр напрямую связан с плотностью мощности ЛИ q_s . Если канал достаточно узкий и глубокий, то эффективность ввода увеличивается за счет поглощения излучения стенками лунки. При формировании кратера на поглощательную способность влияют распределение интенсивности в фокальном пятне и углы схода лучей (угловое распределение). Так, при малых углах схода растет отражение от боковых стенок и, соответственно, растет поглощение и нагрев дна лунки, что увеличивает глубину проплава (испарения). Источник как бы коллимируется и заглубляется.

1.4.4. Влияние плазмы на эффективный коэффициент поглощения

Наличие плазмы оптического разряда вблизи поверхности материала вызывает рефракцию излучения, его поглощение, передачу энергии излучения в окружающую среду, в том числе в обрабатываемый материал. Эти явления могут привести к увеличению A_{ef} , особенно для материалов с низкой поглощательной способностью.

Приповерхностная плазма может существовать в виде: эрозионного факела (ЭФ) продуктов разрушения мишени; оптического разряда в парах мишени (ОРП); оптического разряда в газе (ОРГ), окружающем мишень. Каждый вид плазмы возникает при определенных условиях и имеет свои особенности.

ЭФ представляет собой струю слабоионизированных паров материала. Температура эрозионной плазмы близка к температуре кипения (разрушения) материала ($\leq 0,37$ эВ), а спектр излучения состоит из молекулярных полос. ЭФ прозрачен для лазерного излучения.

Пары имеют низкий потенциал ионизации. Увеличение плотности мощности до определенного порога вызывает лавинообразный рост поглощения и температуры плазмы – возникает ОРП. Этот разряд поддерживается излучением за счет поглощения свободными электронами плазмы. Плазма имеет температуру ~ 1 эВ, плотность электронов составляет $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а показатель поглощения $\mu \approx 3 \text{ см}^{-1}$.

При очень больших интенсивностях оптический разряд может перейти из области паров в окружающий газ. Пороговая интенсивность возникновения ОРГ в присутствии мишени ниже на 2–3 порядка по сравнению с пробоем и разрядом в чистом газе без мишени. Показатель поглощения плазмы ОРГ почти на порядок ниже, чем у ОРП, и составляет $\mu \approx 0,5 \text{ см}^{-1}$.

ОРГ далеко удален от фокальной области (поверхности мишени). Он слабо излучает, а выделяющаяся мощность отводится за счет теплопроводности материала. Поэтому влияние ОРГ в основном экранизирующее.

Напротив, ОРП расположен вблизи мишени (в области фокуса). Он поглощает большую часть лазерного излучения, его излучательная способность высока, а излучение сосредоточено в УФ-области спектра. Поэтому ОРП может нагревать мишень как излучением, так и через тепловой контакт с мишенью.

Экранировка излучения лазера плазмой ОРГ может приводить к развитию колебательной неустойчивости (например, к изменению глубины проплава с частотой $10^2 \dots 10^4$ Гц при непрерывном облучении). Таким образом, плазменные процессы в общем случае снижают эффективность использования энергии при обработке мощным излучением. Кроме того, в плазменном факеле может возникать как рефракция лазерного пучка, так и его фокусировка – в зависимости от того, где плотность плазмы выше – в центре или на периферии факела. В свою очередь, это зависит от распределения плотности мощности в фокальном пятне.

1.4.5. Влияние струи газа

Обычно при лазерной обработке окружающий мишень газ является защитным (защищает мишень от окисления) или «рабочим» (способствует окислительным реакциям). В качестве защитных газов для высокоактивных металлов и сплавов используют аргон или гелий. Низколегированные стали могут защищаться углекислым газом, азотом и воздухом. В среде защитных газов проводится термообработка и сварка, а в среде рабочего газа – газолазерная резка. Обычно для резки используют кислород, поскольку окислительная реакция горения дает дополнительное тепло, идущее на разрушение материала.

Защитные и рабочие газы подаются через специальное сопло коаксиально лазерному пучку, т. е. по его оси в зону обработки. Поток газа стабилизирует разряд, т. е. передний фронт плазмы находится постоянно на одном расстоянии от мишени, определяемом скоростью потока газа и плотностью мощности q_s . Чем выше скорость потока газа, тем ближе к поверхности мишени находится фронт горения. Чем выше давление газа (выше плотность), тем меньше нужна плотность потока для поддержания горения, поскольку выше поглощение. Пороговая плотность потока для возникновения и поддержания разряда различна для различных газов. Так, при обработке высокоактивных металлов и сплавов применяемые защитные газы – аргон и гелий – требуют следующие для поддержания разряда минимальные потоки излучения:

- $P_{min}(\text{Ar}) = 800 \text{ Вт}$;
- $P_{min}(\text{He}) = 8000 \text{ Вт}$.

Таким образом, в атмосфере гелия при мощностях $< 8000 \text{ Вт}$ процесс обработки можно осуществлять в отсутствие ОРГ. При этом эффективность энерговклада при прочих равных условиях в гелии выше, чем в аргоне. Для поддержания разряда в ОРГ необходима не плотность мощности, а мощность, т. к. потери в плазме идут только за счет механизма теплопроводности. Эта мощность не зависит от диаметра пятна фокусировки.

В табл. 1.2 приведены результаты лазерной обработки образцов из коррозионно-стойкой стали проплавлением в среде различных защитных газов. Использовался лазер ЛТ-1 мощностью 5 кВт.

Таблица 1.2

*Влияние различных газов на эффективность обработки
коррозионно-стойкой стали*

Защитный газ	h , мм	h/b	ρ_0 , кг/м ³	U_i , эВ	λ_T , Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)
He	6,1	2,8	0,178	24,58	0,17	5,2
CO ₂	5,1	1,8	1,98	13,8	0,02	0,92
воздух	4,9	2,1	1,29	11,7	0,025	1,01
N ₂	4,2	1,9	1,25	15,58	0,023	1,04
Ar	1,0	0,6	1,78	15,76	0,02	0,52

В таблице обозначены: h – глубина проплавления, b – ширина реза, ρ_0 – плотность газа, U_i – потенциал ионизации, λ_T – теплопроводность газа, c – теплоемкость газа.

Из табл. 1.2 видно, что эффективность поглощения в среде различных газов различна. Для максимальной эффективности необходимо подбирать расход газа так, чтобы плазма разряда находилась ближе

к поверхности материала и температура газа, вышедшего из зоны поглощения, была высокой. Тогда будет происходить нагрев поверхности газом и лучом. При проникновении луча через плазму ОРГ к фокальной точке объектива его плотность мощности, с одной стороны, нарастает из-за схождения лучей, а с другой – убывает из-за поглощения. За счет расширения газового потока после прохождения плазменного облака количество тепла, доставляемого к поверхности, уменьшается.

На рис. 1.11 представлена упрощенная схема нагрева материала с учетом потока газа.

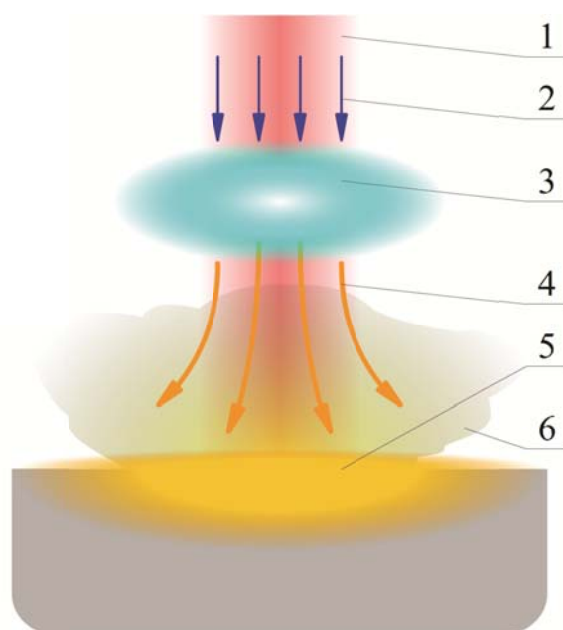


Рис. 1.11. Схема передачи лазерного излучения с учетом газового потока:

- 1 – лазерное излучение; 2 – набегающий холодный газ;
3 – ионизированный газ (ОРГ); 4 – нагретый газ;
5 – пограничный слой; 6 – пары металла

Оптимальным является такой расход газа (скорость потока), когда плазменный факел находится в каустике пучка, расположенной или на поверхности, или с заглублением в материал. Если плазма 3-одно-родна, то преломление лучей приводит к смещению фокусного расстояния. Показатель преломления плазмы ОРГ (n_{liq}) зависит от концентрации электронов:

$$n_{liq} \approx \sqrt{1 - 10^{-19} \cdot n_e}, \quad (1.29)$$

где n_e – концентрация (плотность) электронов. Обычно n_{liq} находится в пределах 0,85...1,00.

Таким образом, преломление пучка в плазме ОРГ приводит к перемещению каустики пучка к объективу (укорочению его фокусного рас-

стояния). Для гауссова пучка плотность электронов в ОРГ может иметь нормальное распределение. С учетом выражения (1.29) нетрудно увидеть, что показатель n_{nl} на оси пучка меньше, чем на периферии, и пучок расфокусируется.

При определенных условиях эрозионный факел, а также плазма ОРП достигают области ОРГ. Потенциал ионизации газа резко уменьшается, и поглощение пучка плазмой ОРГ резко возрастает. Это приводит к экранировке и остыванию поверхности и исчезновению факела. Прозрачность плазмы ОРГ возрастает, лучи достигают поверхности, и проплав и испарение возрастают. Такая колебательная неустойчивость при движущемся источнике приводит к тому, что глубина проплава в различных участках шва разная (периодические колебания глубины). Частота колебаний при мощности ЛИ порядка 3 кВт составляет ~ 100 Гц. Колебательный процесс возникает при выходе волны горения на границу сред (например, из аргона в воздух). Волна (фронт) горения распадается с характерным хлопком, и после распада у поверхности мишени зарождается новая волна горения.

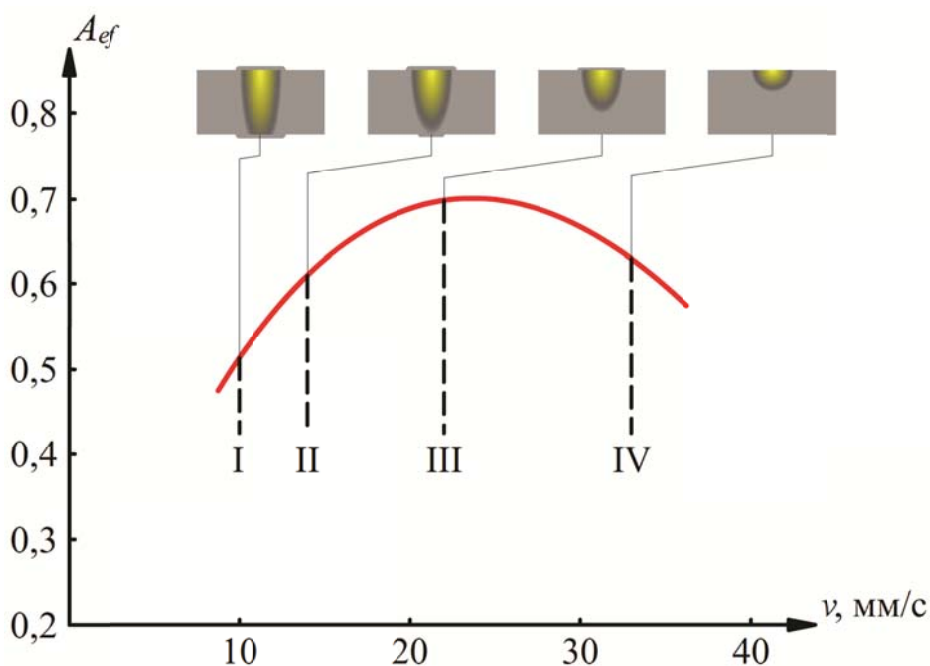


Рис. 1.12. Зависимость A_{ef} и состояния поверхности от скорости сварки образца толщиной 3,5 мм из стали Ст3 при $P = 5$ кВт (защитный газ — CO_2 , фокусное расстояние объектива $f' = 215$ мм)

Обычно не вся поглощенная энергия идет на полезную работу (переплав, испарение). Существует термический КПД (η_T) процесса. В физическом смысле термический КПД определяет долю энергии, затраченной на расплав металла, и характеризует сумму потерь, обу-

словленных теплопереносом и перегревом расплава (пара). Очевидно, что термический КПД возрастает с ростом скорости обработки. При лазерной сварке он достигает значений 0,45, а в традиционных способах не превышает 0,22. Высокая скорость обработки благоприятно сказывается на A_{ef} . Это связано с влиянием размеров и формы парогазового канала (и, по-видимому, прозрачности ОРГ) на поглощательную способность лазерного излучения. С увеличением скорости сварки канал сужается и носит ярко выраженный характер кинжального проплавления. При очень большой скорости проплавление мало и поглощение в лунке уменьшается (рис. 1.12).

Таким образом, при заданной мощности можно подобрать скорость обработки, при которой процесс наиболее экономичен. Если же с увеличением скорости сварки одновременно увеличивать мощность излучения, то глубина проплавления остается постоянной. Величина A_{ef} также почти не меняется. По-видимому, условия поглощения в лунке, в плазменно-паровом канале (ОРП) и в ОРГ не меняются. Величина η_T в этом случае растет с ростом скорости.

1.4.6. Влияние условий фокусировки и режима обработки

На A_{ef} оказывает влияние положение фокальной плоскости объектива относительно обрабатываемой поверхности. Максимальный A_{ef} и, соответственно, максимальное проплавление получаются при некотором заглублении перетяжки пучка под поверхность детали (рис. 1.13).

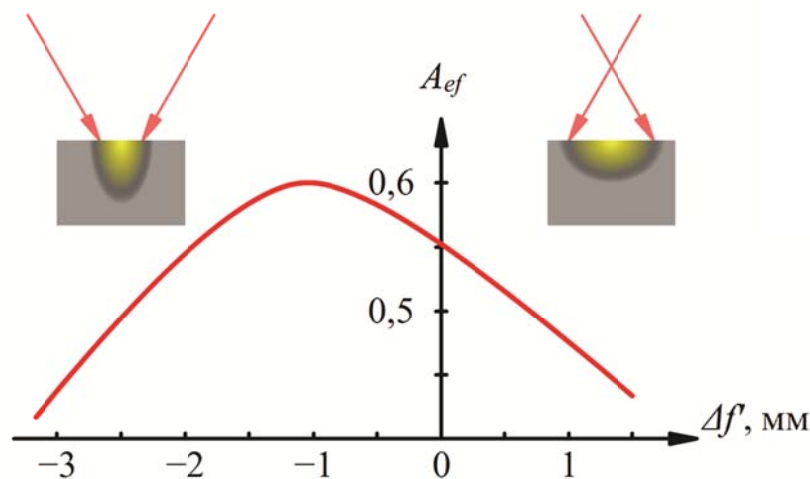


Рис. 1.13. Зависимость A_{ef} лазерной сварки от положения фокальной плоскости оптической системы относительно поверхности образца ($P = 5 \text{ кВт}$, $v = 16 \text{ мм/с}$, фокусное расстояние объектива $f' = 230 \text{ мм}$)

Подбором величины заглубления фокуса $\Delta f'$ и скорости обработки можно добиться режима устойчивого проплавления. В общем же случае

канал проплавления не устойчив из-за колебаний A_{ef} , особенно в нижней части (рис. 1.14).

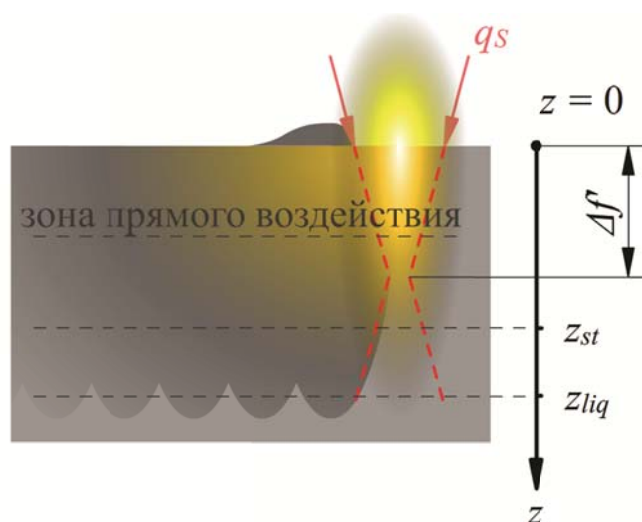


Рис. 1.14. Геометрия канала проплавления и зоны расплава в продольном сечении по оси шва

Фронт заглупления луча и, соответственно, проплав осциллируют с некоторой частотой (несколько десятков Гц). Скорость фронта заглупления ~ 200 мм/с. Перенос жидкой фазы в заднюю часть носит дискретный характер, т. е. порциями. В нижней части канала образуются пики проплавления. Выше z_{st} (граница устойчивого и неустойчивого проплавления) проплавление устойчиво.

При импульсно-периодическом нагреве с частотой > 100 Гц парогазовый канал после импульса не успевает схлопываться и проплавление идет, как в непрерывном режиме, только с большей глубиной проплавления, т. к. при средней мощности в 1 кВт импульсная мощность может превышать 100 кВт. Глубина проплавления увеличивается в 3–4 раза по сравнению с непрерывным режимом, η_T возрастает в 2–3 раза.

Возникновение плазмы и перемещение жидкого металла по стенкам канала идет с частотой импульсов. Если $\tau_i < \tau_1$ (τ_1 – задержка образования плазмы), а период следования импульсов $T_i > \tau_2$ (τ_2 – время релаксации плазмы), то можно достичь условий полного устранения влияния факела на режим проплавления (проплавляющую способность).

Мы подробно рассмотрели гидродинамические, газодинамические и плазменные процессы. Сейчас остановимся подробнее на режиме, когда $q_s < q_1$. В этом режиме, как мы выяснили ранее, отсутствует движение расплава или расплав не существует. Величина A_{ef} мала, и ее можно увеличить за счет поглощающих покрытий. Это типичные режимы термоупрочнения материала.

Рассмотрим, что происходит в глубине металла (сплава) при нагревании и остывании по окончании воздействия ЛИ. Особенностью лазерного нагрева является то, что он носит поверхностный характер с очень малыми временами и высокими скоростями. При этом практически отсутствует выдержка при температуре нагрева.

При закалке без оплавления решающей стадией является нагрев. При этом в железоуглеродистых сплавах происходит превращение перлита в аустенит, а высокая скорость нагрева способствует измельчению зерен аустенита. На этапе охлаждения аустенит превращается в мартенсит. Для этого необходимы скорости охлаждения $\sim 10^2$ К/с. Охлаждение при лазерном термоупрочнении характеризуется гораздо большими скоростями ($\sim 10^6$ К/с). В результате остывания получаются следующие структуры – мартенсит, цементит (карбиды) и остаточный аустенит. Образующийся мартенсит более дисперсный, чем при обычных способах закалки, а микротвердость на 200 МПа выше. Для увеличения глубины упрочненного слоя лазерную обработку выполняют с оплавлением поверхности.

1.5. Физические процессы при лазерной обработке неметаллических материалов

Особенностью неметаллических материалов является их низкая температуропроводность по сравнению с металлами. Поэтому при высоких скоростях обработки (> 10 мм/с) и диаметре пучка в фокусе объектива $d_b > 1$ мм слой диэлектрика толщиной $h > 1$ мм в теплофизическом отношении можно считать одномерным и полубесконечным, т. е. пороговые плотности мощности не зависят от толщины материала.

Второй особенностью является поглощательная способность. Излучение СО₂-лазера в большинстве диэлектриков поглощается в приповерхностном слое толщиной порядка длины волны (коэффициент поглощения составляет $A = 0,9$).

Для лазеров видимого и ближнего инфракрасного диапазонов некоторые диэлектрики прозрачны, например стекло, кварц, стеклопластик, дерево (для ближнего ИК). Для них источник теплоты – объемный. Некоторые из них (пластик, керамика, дерево и др.) представляют собой рассеивающие среды с плотной упаковкой рассеивателей. Для них закон Бугера не применим, т. е. распределение источника теплоты в объеме не описывается простыми функциями.

Третьей особенностью является то, что некоторые неметаллические материалы могут быть хрупкими и раскалываться при возникновении термоупругих напряжений. Часто это осложняет обработку и требует применения сложных технологических приемов.

Помимо плавления и испарения, при воздействии лазерного пучка в диэлектриках могут происходить различные химические реакции, термическая диссоциация с выделением газов. При резке дерева, каучука, бумаги и некоторых пластиков происходит образование сажи. В ряде случаев образуется аэрозоль в виде мелкодисперсных частиц испаренного вещества, а в зоне обработки – шлак.

Разогрев и испарение вещества возможны при потоках $10^3 \dots 10^5$ Вт/см². При этом образуется эрозионный факел, который экранирует обрабатываемую поверхность (в отличие от эрозионного факела в металлах). При воздействии на металлы $q_s \sim 10^5 \dots 10^7$ Вт/см² образуется пробой в газовой среде (ОРП), а затем ОРГ над обрабатываемой поверхностью, что приводит к ее экранировке. При этих же потоках в факеле неметаллов имеются твердые поглощающие частицы и экранировка выражена сильнее.

С целью повышения A_{ef} в зону взаимодействия подается активный или нейтральный газ. Главная функция газа – удаление испарившихся частиц, плазмы, аэрозоля, расплава, окислов, т. е. продуктов разрушения. Струя газа разогревается в плазме, смешивается с газообразными продуктами разрушения и, раскаленная, глубоко прорезает материал. Ширина реза при этом может быть меньше диаметра фокального пятна. Газовая струя защищает поверхность объектива.

При обработке некоторых материалов (например, текстолита) в канале разрушения образуется вязкая, спекшаяся масса, которая не удаляется газовой струей. Ее необходимо дополнительно испарять, что увеличивает энергозатраты. В результате η_T становится невысоким.

При резке материалов существует удельная теплота (энергия) резания:

$$Q_{cut} = c \cdot (T_{dest} - T_0) ,$$

где T_{dest} – температура разрушения, которая сильно различается у разных веществ (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Значения удельной теплоты резания для некоторых веществ

Обрабатываемый материал	Удельная теплота резания, кДж/г
Сосна	0,9
Оргстекло	2,0
Резина	2,5
Дуб	5,4
Стекло	31
Кварц	45
Текстолит	50

Важным обстоятельством для резки является подбор диаметра сопла. Малая ширина шва затрудняет выдувание продуктов реза, а малый диаметр сопла не обеспечит достаточный поток газа. По этой причине параметры канала реза должны быть согласованы с параметрами потока газа из сопла.

Разрушение неметаллов идет в основном в режиме испарения. Для удаления аэрозоля (продуктов разрушения) работа струи газа должна быть больше кинетической энергии продуктов разрушения. Скорость потока должна составлять несколько чисел Маха (т. е. в несколько раз превышать скорость звука в воздухе; на практике же этого достичь не могут, доводя скорость подачи газа до 1 М). Тогда рез очистится и экранировки не будет. Для этого и применяют сопло. Для получения скорости звука на выходе сопла необходимо давление газа в сопле P_{gas} :

$$P_{gas} = \frac{P_A}{\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}, \quad (1.30)$$

где γ – показатель адиабаты (для одноатомных газов $\gamma \approx 1,66$, для двухатомных газов $\gamma = 1,4$, для многоатомных газов $\gamma \approx 1,33$), p_A – давление окружающей среды.

Критическая скорость истечения воздуха (скорость звука) в атмосферу достигается при давлении внутри сопла $P_{gas} = 0,19$ МПа.

При давлении газа в сопле большем, чем на срезе сопла, скорость газа равна скорости звука, а за срезом превышает его, т. е. на поверхность материала набегает сверхзвуковой поток. Но перед поверхностью возникает скачок уплотнения, поскольку ширина реза мала и поток набегает, как на стенку. Здесь, на скачке уплотнения, выполняется условие:

$$k_1 \cdot k_2 = 1,$$

где k_1 – отношение скорости потока к скорости звука до скачка уплотнения, а k_2 – то же за скачком.

Из этого условия видно, что за скачком уплотнения скорость потока меньше или равна скорости звука при любом давлении внутри сопла.

С уменьшением ширины канала реза увеличивается газодинамическое сопротивление потоку газа и скорость последнего уменьшается. При ширине канала меньшей критической величины (зависит от толщины материала и составляет $\sim 0,2$ мм) струя газа не продувает канал, а повышение давления в сопле приводит к уменьшению глубины реза. Лучший результат достигается при $p_{gas} \approx 0,2$ МПа (для воздуха и азота). Схема истечения газового потока приведена на рис. 1.15.

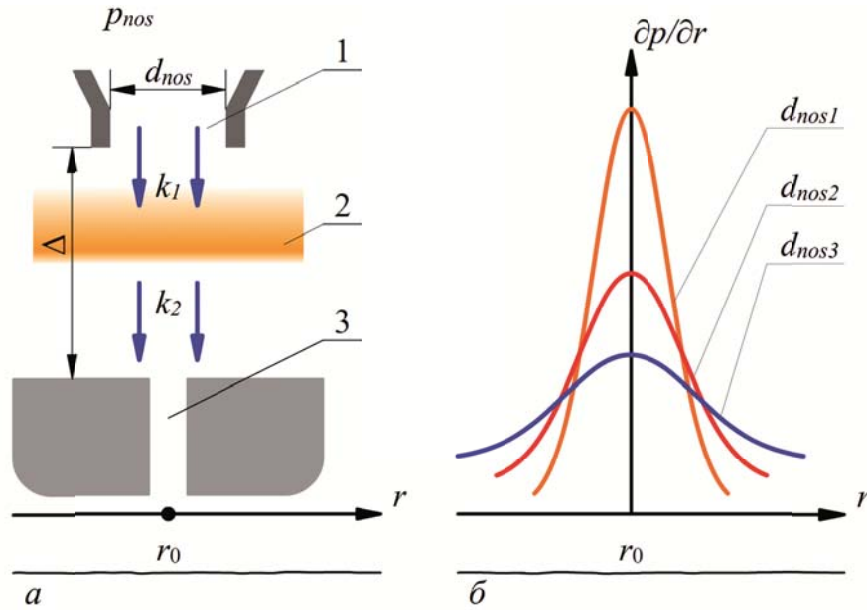


Рис. 1.15. Истечение газа из сопла и формирование скачка уплотнения – а, распределение давления в газовой струе при различных диаметрах сопла d_{nos} – б ($d_{nos1} < d_{nos2} < d_{nos3}$):
 1 – сопло; 2 – скачок уплотнения; 3 – канал реза;
 p_{nos} – давление в сопле; Δ – высота сопла над поверхностью

Как видно из рисунка, при малых d_{nos} газовая струя расширяется, при больших d_{nos} недостаточно давление p_{gas} . Для определенного сочетания p_{gas} и Δ существует оптимальный размер d_{nos} .

РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Общеизвестно, что если в разных местах какого-либо тела температура различна, например, изменяется от слоя к слою, то через некоторое время температура во всем теле выравнивается. Этот самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температуры называется теплообменом.

Перенос теплоты может осуществляться тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводностью называется процесс переноса теплоты посредством теплового движения микрочастиц (молекул, атомов, электронов) в среде. Такой теплообмен может происходить в любых средах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества. Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передается другому телу при их взаимодействии или переходит из более нагретых областей тела к менее нагретым. Иногда теплопроводностью называется также количественная оценка способности конкретного вещества проводить тепло.

Конвекцией называется процесс переноса теплоты в среде с неоднородным распределением температуры (характерно для жидкостей, газов, сыпучих сред), осуществляемый макроскопическими элементами среды при их перемещении, т. е. потоками самой среды. Естественная конвекция возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения. Естественной конвекции обязаны многие атмосферные явления, в том числе образование облаков. При вынужденной (принудительной) конвекции перемещение вещества обусловлено действием внешних сил (это может быть насос, лопасти вентилятора и т. п.).

Тепловое излучение представляет собой процесс переноса тепла в среде при помощи электромагнитных волн. Например, в вакууме из-за низкой концентрации материальных частиц тепло может передаваться только за счет излучения. Поэтому для уменьшения теплопотери стенки термоса делают двойными и серебрят (такая поверхность хуже излучает и лучше отражает), а воздух между ними откачивают.

В настоящем разделе внимание сконцентрировано на основном механизме переноса тепла – теплопроводности. Задачей теории теплопроводности является определение и изучение пространственно-временного изменения главной физической величины, характеризующей процесс теплопроводности, – температуры $T=f(x, y, z, t)$, где x, y, z – пространственные координаты, а t – время. Или, другими словами, задача теории теплопроводности состоит в определении температурного поля – совокупности значений температуры для всех точек пространства в любой момент времени.

По мере развития лазерной техники и технологические возможности, и сферы применений лазеров для обработки материалов непрерывно расширяются. Такие лазерные технологические операции, как получение отверстий, резка и скрайбирование материалов, обработка тонких слоев и пленок, невозможно правильно оценить без знания процессов теплообмена. Другими словами, изучение процессов теплообмена всегда играло важную роль в развитии техники и естествознания.

Сложность экспериментальных исследований перечисленных процессов часто связана с малостью зон воздействия лазерного излучения на материалы, высокими температурами и их градиентами, а также кратковременностью протекания процессов. Поэтому во многих ситуациях основным источником информации являются расчетные данные, полученные при моделировании.

Несмотря на то, что в моделировании учитываются далеко не все особенности процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом, а теплофизические и оптические характеристики реальных материалов известны для высоких температур с невысокой точностью, выполненные расчеты часто дают исходные данные для последующего, более детального, анализа и к тому же экономят средства и время.

2.1. Уравнение теплопроводности при лазерном источнике теплоты

2.1.1. Закон Фурье

Перенос теплоты может происходить только при условии, что в различных точках тела температурное поле неоднородно, т. е., для того чтобы внутри тела возникал тепловой поток, необходимо наличие градиента температуры, отличного от нуля.

Согласно предположению Фурье, тепловой поток через элемент поверхности определяется значением температурного градиента в рассматриваемой точке.

Опытные данные показали, что плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda_T \cdot \text{grad}(T), \quad (2.1)$$

где q [Вт/м²] – плотность теплового потока.

2.1.2. Уравнение теплопроводности

Теория теплопроводности основана на дифференциальном уравнении теплопроводности. Физический смысл его заключается в том, что им связывается пространственное распределение температуры с изменением ее во времени. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности основан на применении закона сохранения энергии, сочетаемого с законом теплопроводности Фурье.

Предположим, что имеется одномерное температурное поле (тепло распространяется в одном направлении, например в направлении оси x). Термические коэффициенты считаем независимыми от координат и времени.

Выделим в однородной и изотропной неограниченной пластине элементарный параллелепипед, объем которого равен $(dx \cdot dy \cdot dz)$, рис. 2.1.

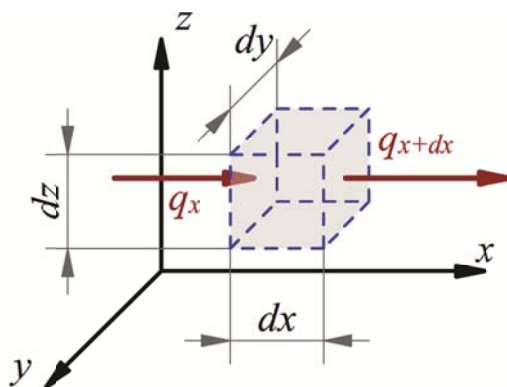


Рис. 2.1. Поток тепла через элементарный объем

Количество тепла, втекающего через левую грань $dy \cdot dz$ в параллелепипед в единицу времени, равно $q(x) \cdot dy \cdot dz$, а количество тепла, вытекающего через противоположную грань в единицу времени, равно $q(x + dx) \cdot dy \cdot dz$.

Если $q(x) > q(x + dx)$, то элементарный объем будет нагреваться, и тогда разница между этими потоками тепла по закону сохранения энергии равна теплу, аккумулярованному данным элементарным параллелепипедом:

$$q(x) \cdot dy \cdot dz - q(x + dx) \cdot dy \cdot dz = c \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz. \quad (2.2)$$

Величина $q(x + dx)$ есть неизвестная функция. Если ее разложить в ряд Тейлора и ограничиться двумя первыми членами ряда, то можно записать:

$$q(x + dx) \approx q(x) + \frac{\partial q(x)}{\partial x} \cdot dx.$$

Тогда из равенства (2.2) получится:

$$-\frac{\partial q(x)}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz.$$

Применяя уравнение теплопроводности $q(x) = -\lambda_T \cdot \partial T / \partial x$, получим:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ или } \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) есть дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного потока тепла.

В прямоугольной системе координат уравнение (2.3) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2.4)$$

где $\alpha = \lambda_T / c\rho$ – температуропроводность вещества.

2.1.3. Уравнение теплопроводности при лазерном источнике теплоты

В простейшем случае без учета гидродинамических, газодинамических и плазменных процессов температурный профиль при нагреве лазерным источником теплоты определяется только процессами теплопередачи за счет теплопроводности.

Для неподвижного источника теплоты нагрев вещества описывается обычным дифференциальным уравнением теплопроводности.

Решение уравнения теплопроводности в общем случае очень сложно, даже без учета фазовых переходов. Поэтому обычно задачу упрощают, принимая теплофизические параметры c , ρ и λ_T не зависящими от температуры T , а поток тепла принимают одномерным, т. е. переходят к решению одномерной задачи.

Для лазерного пучка одномерная модель справедлива при условии $d_b \gg \sqrt{\alpha \tau_i}$. В таком случае уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\omega}{c\rho}, \quad (2.5)$$

где ω [Вт/м³] – объемная плотность внутреннего источника теплоты.

Рассмотрим, что означают составные члены уравнения теплопроводности при лазерном источнике, т. е. его физический смысл:

- $\omega/c\rho$ – изменение температуры в единицу времени за счет притока тепла от источника в заданной точке пространства;
- $\alpha(\partial^2 T/\partial x^2)$ – изменение температуры в единицу времени за счет оттока тепла из заданной точки пространства за счет теплопроводности, т. е. уменьшение температуры;
- $\partial T/\partial t$ – результат изменения температуры из-за процессов притока и оттока тепла в выбранной точке пространства.

При обработке металлов и некоторых диэлектриков с большим значением показателя поглощения μ источник нагрева является не объемным, а поверхностным. В этом случае внутренний объемный источник теплоты $\omega = 0$ и необходимо вводить краевые условия задачи.

2.1.4. Постановка краевых задач теории теплопроводности

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет в общем случае бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выбрать решение, характеризующее конкретный рассматриваемый процесс, и дать полное математическое описание этого процесса, необходимо к основному дифференциальному уравнению присоединить дополнительные условия, включающие геометрические (форма и линейные размеры тела), физические (теплофизические параметры) и краевые условия.

Краевыми условиями называют совокупность начального и граничных условий.

Начальные условия задаются только при изучении нестационарных процессов и состоят в том, что для некоторого момента времени t (обычно полагают $t = 0$) должна быть известна функция $T(x, y, z, t) = f(x, y, z)$ пространственных координат. Простейшее начальное условие имеет вид $f(x, y, z) = T_0 = \text{const}$. К такому условию, например, относятся начальные условия вывода системы из установившегося режима (например, разогрев из «холодного» состояния) и др. Возможны предельные случаи, когда можно пренебречь начальными условиями.

Граничные условия отображают условия теплового взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела. Граничные условия для изучаемой задачи могут быть заданы несколькими способами, и обычно в теории теплопроводности различают граничные условия I, II, III и IV родов.

Граничное условие I рода – закон изменения температуры на поверхности тела S как функции координат и времени:

$$T_s = T_0 \cdot f(x, y, z, t).$$

Частный случай, когда температура на поверхности поддерживается постоянной $T(x, y, z, t) = T_0 = \text{const}$.

Граничное условие II рода (условие Неймана) состоит в задании для каждой точки поверхности тела плотности потока как функции координат и времени:

$$q_s \cdot f(x, y, z, t) = -\lambda_T \cdot \text{grad}(T).$$

Граничное условие III рода (закон Ньютона–Рихмана) характеризует конвективный теплообмен между поверхностью тела и окружающей средой:

$$q_s = \alpha_T \cdot (T_s - T_C),$$

где $\alpha_T [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ – коэффициент теплоотдачи (теплообмена), T_s – температура поверхности, T_C – температура среды.

Граничное условие IV рода (также называют граничным условием сопряжения) характеризует теплообмен между соприкасающимися поверхностями твердых тел (сред), когда температура соприкасающихся поверхностей одинакова:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\lambda_{T2}}{\lambda_{T1}} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x}.$$

Таким образом, уравнение теплопроводности для поверхностного источника теплоты с граничным условием II рода выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \infty; \\ -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} &= A_{ef} \cdot q_s, \quad x = 0. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности вместе с заданными дополнительными условиями полностью определяет краевую задачу теплопроводности, подлежащую решению.

2.2. Методы решения уравнения теплопроводности

Исследованию и методам решения классического уравнения теплопроводности в математической физике посвящено большое количество работ. В предложенном разделе приводятся основные аналитические и численные методы решения; главное внимание уделяется выяснению физической сущности соответствующих преобразований.

2.2.1. Метод преобразования Лапласа

Данный аналитический метод решения состоит в том, что изучается не сама функция (оригинал), а ее видоизменение (изображение). Это преобразование осуществляется при помощи умножения на некоторую экспоненциальную функцию и интегрирования ее в определенных пределах. Поэтому преобразование Лапласа является интегральным преобразованием.

Интегральное преобразование функции $f(t)$ определяется следующей формулой:

$$f_L(S) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-St} dt, \quad (2.7)$$

где $f(t)$ является оригиналом функции, S – некоторая комплексная переменная, $f_L(S)$ – изображение функции.

Метод решения дифференциальных уравнений по методу Лапласа состоит из следующих этапов:

1. Применяя данное преобразование к дифференциальному уравнению, вместо уравнения для оригинала функции получаем уравнение для изображения, т. е. алгебраическое уравнение относительно изображения.
2. Полученное алгебраическое уравнение решаем относительно изображения функции, причем S рассматривается как число, т. е. находится решение для изображения функции.
3. При помощи известных соотношений между изображением и оригиналом находится решение для оригинала функции.

Таким образом, вначале применяется прямое преобразование, а затем обратное. Преимущество этого метода состоит в том, что решается не дифференциальное уравнение для оригинала функции, а алгебраическое уравнение для изображения.

Интерес представляют аналитические решения данным методом для простейших случаев: определение температурного профиля во время нагревания и остывания вещества.

Рассмотрим одномерный случай лазерной поверхностной обработки материала ($d_b \gg 2\sqrt{\alpha\tau_i}$) короткими импульсами длительностью $\tau_i \leq r_b^2/\alpha$. При однородном освещении в пятне и $0 < t \leq \tau_i$ данный случай описывается выражением:

$$T(z, t) = 2 \cdot \frac{A_{ef} \cdot q_s}{\lambda_T} \cdot \sqrt{\alpha\tau_i} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau_i}}\right), \quad (2.8)$$

где z – расстояние от поверхности материала до точки нагрева, t – время нагрева материала, $ierfc(x)$ – табулированная функция интеграла вероятности (приведена в прил.).

Эффективная толщина теплового влияния по формуле (2.8) ограничена параметром $z/2\sqrt{\alpha\tau_i} = 2$, т. к. $ierfc(2) = 10^{-3}$, т. е., когда глубина прогрева становится $z = 4\sqrt{\alpha\tau_i}$, нагрев вещества будет уже незначительным.

Для определения температуры на поверхности тела следует в выражение (2.8) подставить $z = 0$:

$$T(0, t) = 2 \cdot \frac{A_{ef} \cdot q_s}{\lambda_T} \cdot \sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{\pi}}.$$

В случае объемного лазерного источника теплоты и адиабатических условий нагрева (мгновенный нагрев) решение представляется в виде:

$$T(z, t) = \frac{A_{ef} \cdot q_s \cdot \mu \cdot \tau_i}{c\rho} \cdot e^{-\mu z}. \quad (2.9)$$

Процесс остывания материала наступает при условии, что $t > \tau_i$, и будет определяться по формуле²:

$$T(z, t) = \frac{2q_s\sqrt{\alpha}}{\lambda_T} \left[\sqrt{t} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau_i}}\right) - \sqrt{t - \tau_i} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha(t - \tau_i)}}\right) \right]. \quad (2.10)$$

Представленные выражения просты, их удобно использовать в относительно несложных схематизированных случаях, а также для установления качественных зависимостей в упрощенных постановках тепловых задач.

2.2.2. Метод мгновенных источников

В случае лазерной обработки отдельным сфокусированным импульсом или непрерывным сфокусированным излучением в течение короткого промежутка времени можно использовать решения, полученные для мгновенных сосредоточенных источников.

Физическая сущность данного метода состоит в том, что любой процесс распространения тепла в веществе за счет теплопроводности можно представить как совокупность процессов выравнивания температуры от множества элементарных тепловых источников, распределенных в пространстве и времени.

Действие элементарного источника в неограниченном теле при одномерном потоке тепла характеризуется формулой³:

² Рыкалин Н.Н. и др. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.

³ Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

$$T(z, \zeta, t) = \frac{Q}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha t}} \cdot \exp\left[-\frac{(z - \zeta)^2}{4\alpha t}\right], \quad (2.11)$$

называемой функцией источника на бесконечной прямой, где ζ и z – координаты источника, Q [Дж/см²] – плотность энергии, мгновенно выделенной на плоскости с координатой ζ в момент времени t . На рис. 2.2 представлен график данной функции $T(z, \zeta, t)$.

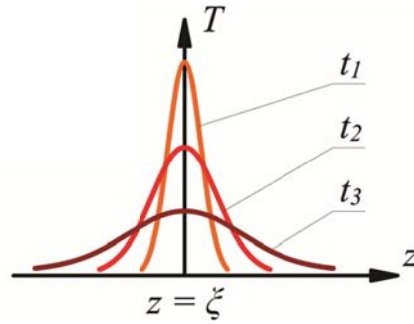


Рис. 2.2. Распределение температуры в неограниченной среде при мгновенном плоском импульсе тепла с координатой ζ ($t_1 > t_2 > t_3$)

Функцию (2.11) обычно называют фундаментальным решением уравнения теплопроводности. В одномерном случае процесс лазерного нагрева поверхности материала будет происходить с распространением тепла в глубь материала (без учета ухода тепла в окружающую среду) и, следовательно, описываться следующей формулой:

$$T(z, \zeta, t) = 2 \frac{Q}{c\rho\sqrt{\pi\alpha t}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha t}\right]. \quad (2.12)$$

Если в слое, например, в сечении цилиндра с координатой ζ выделяется тепло Q за время t , то интегрирование ведется по координате z . Время t разбиваем на множество отрезков Δt , за которые источник можно считать мгновенным. Действие мгновенного источника описывается функцией Пуассона, как показано на рис. 2.2.

Из рис. 2.2 видно, что за отрезок времени Δt мгновенно выделенная теплота будет сосредоточена в малой окрестности точки с координатой ζ . Результат действия следующего мгновенного источника описывается таким же распределением температуры по слою, а действие от первого импульса будет уже иметь другой профиль, т. к. за отрезок времени $2\Delta t$ тепло распространится в глубь материала.

Таким образом, последовательно складывая результаты действия от каждого мгновенного импульса Δt (суммируя в определенной точке

пространства температуру от каждой кривой), мы получим температурный профиль в пространстве для любого момента времени.

2.2.3. Метод конечных разностей (метод сеток)

Метод основан на замене производных их приближенными значениями, выраженными через разности значений функции в отдельных дискретных точках – узлах сетки. Дифференциальное уравнение в результате таких преобразований заменяется эквивалентным соотношением в конечных разностях, решение которого сводится к выполнению несложных алгебраических операций. Окончательный результат решения дается выражением, по которому значение «будущего» потенциала (в нашем случае – температуры) в данной точке (узле) является функцией времени ее «настоящего» потенциала и «настоящего» потенциала смежных узловых точек.

Рассмотрим это на примере одномерного уравнения теплопроводности, потенциал (температура) которого зависит от двух переменных:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq L. \quad (2.13)$$

Для того чтобы записать это уравнение в виде приращений, используют сетку прямоугольного типа (рис. 2.3).

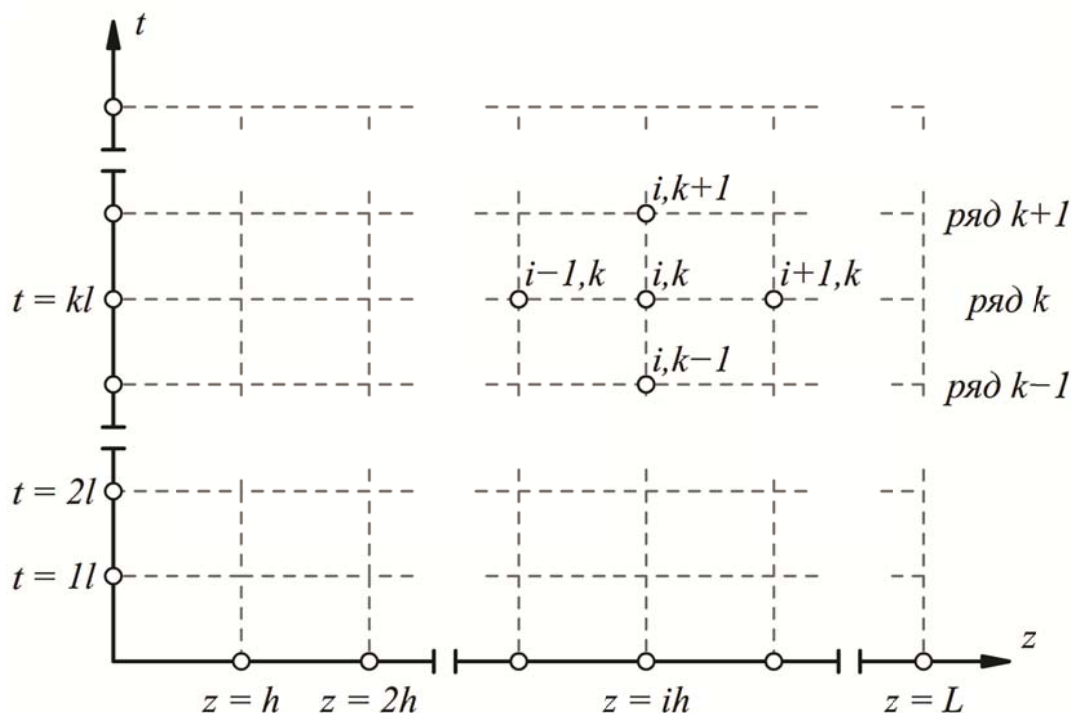


Рис. 2.3. Схема расчета по сетке прямоугольного типа

На оси абсцисс откладываем отрезок длиной L и делим его на n равных частей. Полученный шаг на оси абсцисс обозначим через $h = L/n$. Точки деления (узлы) на оси x имеют абсциссы $x = 0, x = h, x = 2h, \dots, x = L$.

По оси ординат откладываем значения времени t через равные промежутки l . Проводим через полученные узлы на осях координат прямые, параллельные координатным осям, которые образуют прямоугольную сетку. Задача численного интегрирования по методу сеток состоит в нахождении приближенного значения функции $T(x, t)$ в каждом узле сетки.

Заменим дифференциальное уравнение (2.13) эквивалентным соотношением в конечных разностях. Для этого обозначим через $T_{i,k}$ истинное значение температуры в точке $x = ih$ в момент времени $t = kl$, т. е. в узле, отмеченном на рис. 2.3 символом (i, k) .

Заменим частные производные $\frac{\partial T}{\partial t}$ и $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ в точке (ih, kl) через разностные отношения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_{i,k}}{\partial t} &= \frac{T_{i,(k+1)} - T_{i,k}}{l} + \varepsilon_1; \\ \frac{\partial T_{i,k}}{\partial x} &= \frac{T_{(i+1),k} - T_{(i-1),k}}{2h}; \\ \frac{\partial^2 T_{i,k}}{\partial x^2} &= \frac{T_{(i+1),k} - 2T_{i,k} + T_{(i-1),k}}{h^2} + \varepsilon_2,\end{aligned}\tag{2.14}$$

где ε_1 и ε_2 – ошибки (остаточные члены), стремящиеся к нулю при $l \rightarrow 0$ и $h \rightarrow 0$.

Тогда уравнение (2.13) после эквивалентных преобразований соотношениями в конечных разностях запишется следующим образом:

$$\frac{T_{i,(k+1)} - T_{i,k}}{l} = \alpha \cdot \left(\frac{T_{(i-1),k} - 2T_{i,k} + T_{(i+1),k}}{h^2} \right).\tag{2.15}$$

Для удобства вычисления выражение (2.15) преобразуем:

$$T_{i,(k+1)} = T_{i,k} + \frac{\alpha \cdot l}{h^2} \cdot (T_{(i-1),k} - 2T_{i,k} + T_{(i+1),k}).\tag{2.16}$$

Таким образом, с помощью уравнения (2.16) в конечных разностях можно найти значения температуры в узлах первого горизонтального ряда (при $t = l$). Получив значения температуры в первом ряду, по тем же формулам находим значения в узлах второго горизонтального ряда (при $t = 2l$). Этот процесс построения можно продолжать как угодно далеко.

Значения температуры T в узлах, лежащих на оси ординат $(0, k+1)$ и на прямой, параллельной оси ординат и расположенной от нее на расстоянии $L(L, k+1)$, находятся из граничных условий:

ГУ I рода: $T_0(k+1) = T_S = \text{const}$, где T_S – температура поверхности;

$$\text{ГУ II рода: } T_{0,(k+1)} = T_{1,(k+1)} + \frac{A_{ef} \cdot q_s \cdot h}{\lambda_T}. \quad (2.17)$$

Если среда полубесконечна ($L \rightarrow \infty$), то в дальней зоне $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ и $T_{i(k+1)} = T_{(i-1)(k+1)}$.

При выполнении расчетов между шагом по пространственной координате h и шагом по времени l должно выполняться соотношение⁴

$$\frac{h^2}{\alpha \cdot l} \geq 2n, \quad (2.18)$$

где n – мерность пространства.

Если в среде есть объемный источник тепла ω [Вт/м³], то в каждую точку $(k+1)$ -го ряда прибавляется температура

$$\Delta T = \omega \cdot \frac{l}{c\rho} = A_{ef} \cdot \frac{q_s \cdot l}{c\rho} \cdot \mu \cdot e^{-\mu z}. \quad (2.19)$$

Описанный выше метод расчета дифференциальных уравнений носит название *явного*, поскольку выражает значение температуры в момент времени $tk+1$ через значение температуры в момент времени tk .

Повторяемость одинаковых операций при расчете полей температуры создает большие удобства для применения современной вычислительной техники, благодаря чему эффективность работы во много раз увеличивается.

2.3. Инженерные расчеты задач нагрева материалов лазерным излучением

Лазерный луч применяется для резания и сверления отверстий, сваривания материалов и термообработки, обработки тонких металлических и неметаллических пленок, получения на них рисунков и микросхем. В зависимости от температуры, достигаемой на поверхности, могут применяться вышеперечисленные технологические операции обработки материалов. Поэтому так важно знать температурный профиль нагрева, формирующийся в материале к концу длительности воздействия лазерного излучения.

При рассмотрении процессов воздействия излучения лазера на материалы необходимо знать характеристики падающего потока: долю поглощения потока материалом, максимальную плотность излучения, длительность импульса, длину волны и условия фокусировки. Эти параметры зависят от типа лазера, а также от оптических и теплофизических свойств обрабатываемого материала.

⁴ Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

К особенностям постановки задач для исследования тепловых процессов при лазерной обработке относятся многомерность, нелинейность, необходимость учета фазового перехода и поглощательной способности материала. Однако при постановке задач нагрева часто пользуются условиями (упрощениями), когда изменение фазового состояния материала не рассматривается, а теплофизические параметры среды считаются независимыми от температуры. Например, при воздействии на материал излучения лазера с продолжительностью импульса порядка миллисекунд и плотностью мощности $q_s \sim 10^4 \dots 10^6$ Вт/см² характерно следующее.

- В большинстве случаев потерями теплоты с нагреваемой поверхности из-за лучеиспускания и конвекции можно пренебречь.
- В ряде случаев учет температурной зависимости теплофизических и оптических постоянных не вносит большого изменения в конечное положение зоны обработки, что позволяет рассматривать более простые задачи с не зависящими от температуры постоянными.
- Учет теплоты фазовых переходов (плавление, кристаллизация, испарение) наиболее важен только в тех задачах, где испарение и движение продуктов выноса газообразной и конденсированной фаз являются определяющими с энергетической точки зрения.
- Теплофизическая постановка задачи по описанию воздействия излучения лазера справедлива только для плотностей мощности излучения $\sim 10^8 \dots 10^9$ Вт/см². При дальнейшем росте плотности мощности одним из основных методов рассмотрения явлений в зоне воздействия излучения становится теория взрыва, сопровождающегося генерацией ударных волн, проходящих через объем материала.

2.3.1. Нагрев материала поверхностным источником теплоты

Нагрев материала поверхностным источником теплоты (рис. 2.4) будет происходить при условии:

$$1/\mu \ll \sqrt{\alpha\tau_i} \ll d_b, \quad (2.20)$$

где $1/\mu$ – глубина проникновения излучения в материал.

Постановка задачи. Имеется полуограниченное тело (нержавеющая сталь) при начальной температуре $T_0 = 300$ К, на поверхность которого действует излучение лазера с параметрами: энергия в импульсе 10 Дж, длительность импульса $\tau_i = 10^{-3}$ с, пятно диаметром $d_b = 1,15$ см (сечением 1 см²). Параметры обрабатываемого материала: теплопроводность $\lambda_T = 0,16$ Вт/(см·К) ($\alpha = 0,04$ см²/с), показатель поглощения $\mu = 10^5$ см⁻¹, теплоемкость $c = 0,5$ Дж/(г·К), плотность $\rho = 8$ г/см³. Необходимо определить распределение температурного профиля в образце к концу действия лазерного импульса.

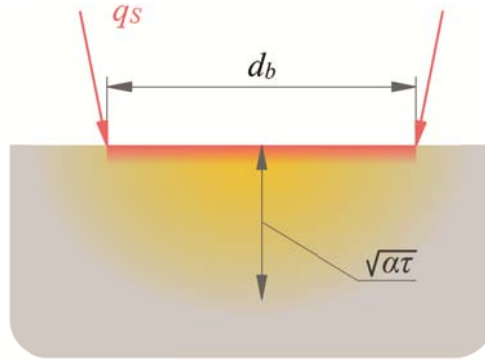


Рис. 2.4. Модель нагрева однородной среды
поверхностным источником теплоты

Анализ задачи. Находим характерный пробег тепла за время воздействия импульса излучения, который составляет $\sqrt{\alpha\tau_i} \approx 6 \cdot 10^{-3}$ см. Из условия (2.20) определяем, что нагрев имеет поверхностный характер, а распространение тепла можно условно считать одномерным (плоский случай). Значение коэффициента $A_{ef} = 0,5$ (находим из рис. 1.10).

Решение задачи методом преобразования Лапласа сводится к вычислению температурного профиля в конце импульса по выражению (2.8). Строится интерполяционная зависимость $ierfc(x)$, по которой находятся значения функции интеграла вероятности для любых значений z .

Решение задачи методом конечных разностей. Данную постановку задачи описывает одномерное уравнение теплопроводности, потенциал которого зависит от двух переменных $T(x, t)$, и граничное условие второго рода (2.6). Соответствующие уравнения в конечных разностях представлены выражениями (2.16) и (2.17).

Для решения задачи с указанными параметрами материала и источника излучения целесообразно задать значение шага по пространственной координате меньше, чем расстояние, на которое уходит тепло из зоны облучения за время действия ЛИ $h = \sqrt{\alpha\tau_i}/10 \approx 6 \cdot 10^{-4}$ см. Шаг по времени определяем из соотношения (2.18), который (при мерности пространства $n = 1$) составит $l \approx 10^{-8}$ с.

Блок-схема для расчета по методу конечных разностей к рассматриваемой задаче приведена далее.

Решение задачи методом мгновенных источников сводится к интегрированию функции (2.11) по интервалу времени от 0 до $\tau = 10^{-3}$ с. Интеграл от выражения (2.11) имеет следующий вид:

$$T(z, t) = \int_0^{\tau} \frac{2A_{ef}}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha t}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha t}\right] \cdot dt, \quad (2.21)$$

который при программировании данного метода заменяется суммой (2.22).

$$T(z, t) = \sum_l^m \frac{2A_{ef} \cdot q_s \cdot l}{c\rho\sqrt{4\pi\alpha t \cdot ml}} \cdot \exp\left[-\frac{(nh)^2}{4\alpha \cdot ml}\right], \quad (2.22)$$

где m меняется от 1 до 10000; n – номер шага по координате, меняется от 0 до 20; шаг по времени $l = 10^{-8}$ с; шаг по координате $h = 6 \cdot 10^{-4}$ см.

Алгоритм расчета задачи методом мгновенных источников следующий. Лазерный импульс разбивается на 10000 мгновенных импульсов (длительностью 10^{-8} с). Задается первый шаг по времени ($m = 1$), затем последовательно устанавливаются значения $n = 0, 1, 2, \dots, 20$ и рассчитываются значения функции. На втором шаге устанавливается значение $m = 2$ и расчет повторяется и суммируется с первым шагом. Затем к вновь полученным значениям функции прибавляются полученные ранее для каждой точки пространства z . Далее рассчитываются значения при $m = 3$ и прибавляются к полученной ранее сумме и т. д. При $m = 10000$ вычисления останавливаются. Результаты расчета задачи по всем трем методам приведены на рис. 2.5.

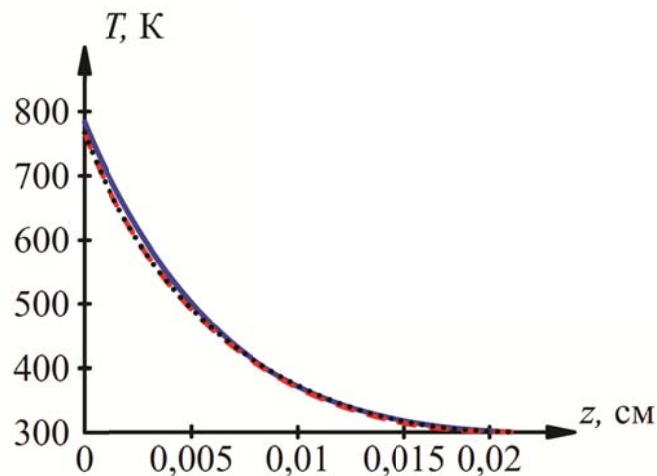


Рис. 2.5. Распределение температуры в образце к концу воздействия ЛИ:
сплошная линия – метод конечных разностей;
штриховая – метод Лапласа; точечная – метод мгновенных источников

Таким образом, из рис. 2.5 можно определить температуру на поверхности материала к концу воздействующего импульса, а также распределение температуры по глубине материала. В общем все перечисленные методы дают качественно одинаковую зависимость, различие состоит лишь в определении температуры на поверхности материала. В сравнении с аналитическими методами, численные определяют среднюю температуру нагрева материала и при малых значениях шагов сетки – точность возрастает. Аналитические методы достаточно просты и удобны, однако недостаток их в том, что функция интеграла вероят-

ности $ierfc(x)$ является табулированной и точность вычислений определяется дискретностью этой таблицы.

2.3.2. Нагрев материала объемным источником теплоты

Нагрев материала объемным источником теплоты (рис. 2.6) будет происходить при условии:

$$\sqrt{\alpha\tau_i} \ll 1/\mu \ll d_b,$$

т. е. теплоотводом за время воздействия ЛИ можно пренебречь.

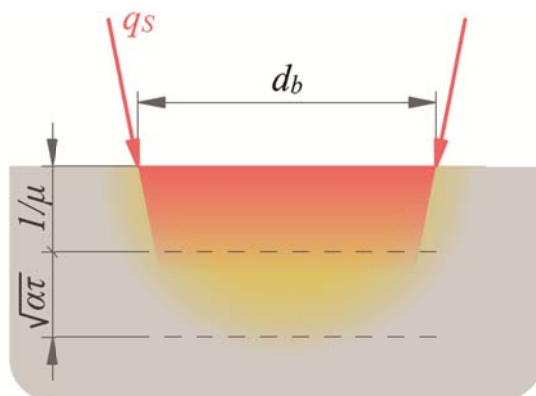


Рис. 2.6. Модель нагрева однородной среды объемным источником теплоты

Постановка задачи. Имеется полуограниченное, полупрозрачное тело (например, цветное стекло) при начальной температуре $T_0 = 300$ К. Среда является оптически однородной, поглощение света подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бера. На поверхность тела действует излучение лазера с параметрами: энергия в импульсе 10 Дж, длительность импульса $\tau_i = 10^{-3}$ с, пятно диаметром $d_b = 1,15$ см, сечением 1 см^2 . Параметры обрабатываемого материала: теплопроводность $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)}$ ($\alpha = 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$), показатель поглощения $\mu = 100 \text{ см}^{-1}$, теплоемкость $0,75 \text{ Дж/(г} \cdot \text{К)}$, плотность 2 г/см^3 . Необходимо определить распределение температурного профиля в объеме образца к концу длительности лазерного импульса.

Анализ задачи. Характерная глубина пробега тепла к концу воздействующего ЛИ $\sqrt{\alpha\tau_i} \approx 10^{-3} \text{ см}$, что на порядок меньше глубины проникновения света $1/\mu$ и на 4 порядка меньше диаметра лазерного пучка d_b . Из этого следует, что в простейшей постановке задача сводится к адиабатическому нагреву объема, ограниченного глубиной проникновения света (одномерная задача).

Решение задачи методом преобразования Лапласа сводится к построению графика функции (2.9). Результаты расчета приведены на рис. 2.7.

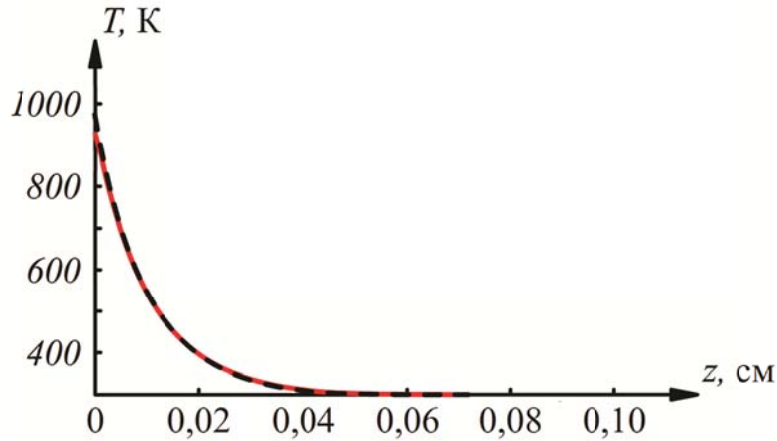


Рис. 2.7. Распределение температурного профиля в образце к концу длительности ЛИ
(сплошная линия – расчет по методу конечных разностей, штриховая линия – расчет по методу Лапласа)

Решение задачи методом конечных разностей. Для решения задачи с указанными параметрами материала и источника излучения целесообразно задать значение шага по пространственной координате меньше, чем расстояние, на которое уходит тепло из зоны облучения за время действия ЛИ, $h = \sqrt{\alpha \tau_i} / 10 \approx 10^{-4}$ см. Шаг по времени определяем из соотношения (2.18), который (при мерности пространства $n = 1$) составит $l \approx 10^{-8}$ с.

Задача в данной постановке интересна с точки зрения практики, если объемный источник будет образовываться в двухслойной системе, где первый слой является прозрачным для ЛИ, а поглощение излучения происходит вторым слоем по закону Бугера–Ламберта–Бера. В данной постановке можно определить температурные поля, например, в солнечных батареях, где на поглощающий слой наносится прозрачный слой для защиты от повреждений.

Алгоритм программы для расчета нагрева поглощающего слоя объемным источником теплоты в двухслойной системе аналогичен однослойной системе, необходимо только учитывать теплоотвод в прозрачный слой. Уравнения для решения задачи по методу конечных разностей представлены ниже.

Уравнение для расчета температуры в прозрачном для воздействующего излучения слое:

$$T_{i,(k+1)} = T_{i,k} + \frac{\alpha \cdot l}{h^2} \cdot (T_{(i-1),k} - 2T_{i,k} + T_{(i+1),k}). \quad (2.23)$$

Уравнение для расчета температуры в поглощающем слое:

$$T_{i,(k+1)} = T_{i,k} + \frac{\alpha \cdot l}{h^2} \cdot (T_{(i-1),k} - 2T_{i,k} + T_{(i+1),k}) + \\ + l \cdot \frac{A_{ef} \cdot q_s \cdot \mu}{c\rho} \cdot e^{-\mu \cdot h(i-x)}, \quad (2.24)$$

где x – ширина (количество столбцов) прозрачного слоя при совместном решении системы уравнений.

Условие на границе раздела прозрачной и поглощающей сред имеет вид:

$$T_{0,k} = \frac{\lambda_{T1} T_{1,k} + \lambda_{T2} T_{1,k}}{\lambda_{T1} + \lambda_{T2}}, \quad (2.25)$$

где λ_{T1} – теплопроводность прозрачного слоя, а λ_{T2} – поглощающего.

В случае нагрева материала объемным источником теплоты без теплоотвода в прилегающий слой (рис. 2.7) решение, соответственно, нужно выполнять по выражению (2.24), а граничные условия имеют вид, как и для задачи с поверхностным источником теплоты.

Как видно, результаты решений практически повторяют друг друга. Отличие состоит лишь в значении температуры на поверхности материала, что определяется граничным условием.

2.3.3. Нагрев в окрестности поглощающего включения, присутствующего в матрице прозрачного материала

Главная особенность этого процесса заключается в возможности нагрева материала излучением лазера, соответствующим области прозрачности вещества (область спектра, в которой вещество практически не поглощает излучение).

На практике нагрев прозрачных диэлектриков лазерным излучением с большой плотностью мощности приводит к оптическому пробоем таковых. Также оптический пробой может иметь место не только в твердых прозрачных диэлектриках, но и в жидких и газообразных средах (например, лазерная искра в воздухе).

Как правило, в материале неизбежно присутствуют посторонние неоднородности, например при выращивании кристаллов создаются различного рода дислокации, а при варке стекла или окрашивании светофильтров достаточно сложно добиться однородности стекло-массы.

Таким образом, неоднородности, содержащиеся в прозрачных материалах, имеют иной показатель поглощения μ по сравнению с показа-

телем поглощения самого вещества. Существует математическая модель нагрева и разрушения прозрачных диэлектриков лазерным импульсом⁵, которая гласит, что за время действия импульса энергия излучения локализуется в объеме поглощающих неоднородностей, что и приводит к созданию тепловых очагов в их окрестности, а вследствие этого и к разогреву всего вещества.

Постановка задачи. Имеется полуограниченное тело, прозрачное для данного излучения. Оно разогревается в течение конечного времени сферической неоднородностью (рис. 2.8). Все теплофизические характеристики материала и оптической неоднородности в процессе нагрева постоянны. Влияние газодинамических процессов и фазовых переходов, а также потери за счет лучеиспускания не учитываются.

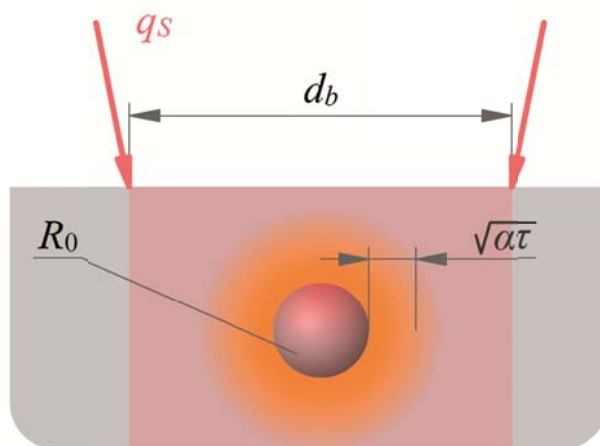


Рис. 2.8. Модель нагрева неоднородности в прозрачном веществе (где R_0 – радиус частицы)

Параметры обрабатываемого материала: начальная температура $T_0 = 300$ К, температуропроводность $\alpha_2 = 1,138 \cdot 10^{-3}$ см²/с, теплоемкость $c_1 = 0,126$ и $c_2 = 0,377$ Дж/(г·К), плотность $\rho_1 = 11,4$ и $\rho_2 = 4,1$ г/см³. Индекс 1 относится к материалу, индекс 2 – к оптической неоднородности. Необходимо определить максимальный нагрев в окрестности включения в зависимости от длительности воздействующего импульса ЛИ.

Анализ и решение задачи методом конечных разностей. Соответствующая математическая модель нагрева сферического включения и прилегающей окрестности материала в сферической системе координат определяется уравнением баланса тепла для средней температуры частицы:

⁵ Александров Е.И., Сидонский О.Б., Ципилев В.П. Влияние выгорания в окрестности поглощающих включений на процесс лазерного зажигания конденсированной среды // Физика горения и взрыва. Т. 27. № 3. 1991.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_2 \cdot \frac{3c_2\rho_2}{R_0 \cdot c_1\rho_1} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{3A_{ef} \cdot q_s(t)}{c_1\rho_1 \cdot 4R_0}, \quad r = R_0, \quad (2.26)$$

и уравнением теплопроводности для матрицы вещества:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad r > R_0. \quad (2.27)$$

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} T_2(r, 0) &= T_1(r, 0) = T_0; \\ T_2(R_0, t) &= T_1(R_0, t); \\ \frac{\partial T_2(\infty, t)}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Форма лазерного импульса определяется следующим выражением:

$$q(t) = \begin{cases} q_s, & t \leq \tau_i; \\ 0, & t > \tau_i. \end{cases} \quad (2.29)$$

Система уравнений после эквивалентных преобразований соотношениями в конечных разностях запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{i,k+1} &= T_{i,k} + \frac{\alpha_2 \cdot l}{h^2} \cdot \left(T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k} + \frac{T_{i+1,k} - T_{i-1,k}}{i} \right), \quad r \geq R_0; \\ T_{1,k+1} &= T_{1,k} + \frac{3\alpha_2 \cdot c_2\rho_2}{R_0 \cdot h \cdot c_1\rho_1} \cdot (T_{2,k} - T_{1,k}) + \frac{3q_s \cdot l \cdot A_{ef}}{4c_1\rho_1 \cdot R_0}, \quad r = R_0. \end{aligned}$$

Первое уравнение в полученной системе позволяет узнать, как распространяется тепло в глубину вещества по значениям температуры, находящимся только в предшествующем ряду k . Второе уравнение позволяет вычислять значения температуры на границе частица/вещество.

В данной постановке шаг по координате выбран из расчета $h = R_0/100$, а шаг по времени определен из выражения (2.18). Блок-схема к рассматриваемой задаче приведена на рис. 2.9.

На рис. 2.10 представлены температурные профили, характеризующие процесс нагрева вещества в окрестности поглощающего включения в различные моменты времени. Зависимость на рис. 2.10 (вставка) показывает процесс нагрева и остывания вещества в окрестности включения в зависимости от времени (во время нагрева и после окончания воздействия излучения).

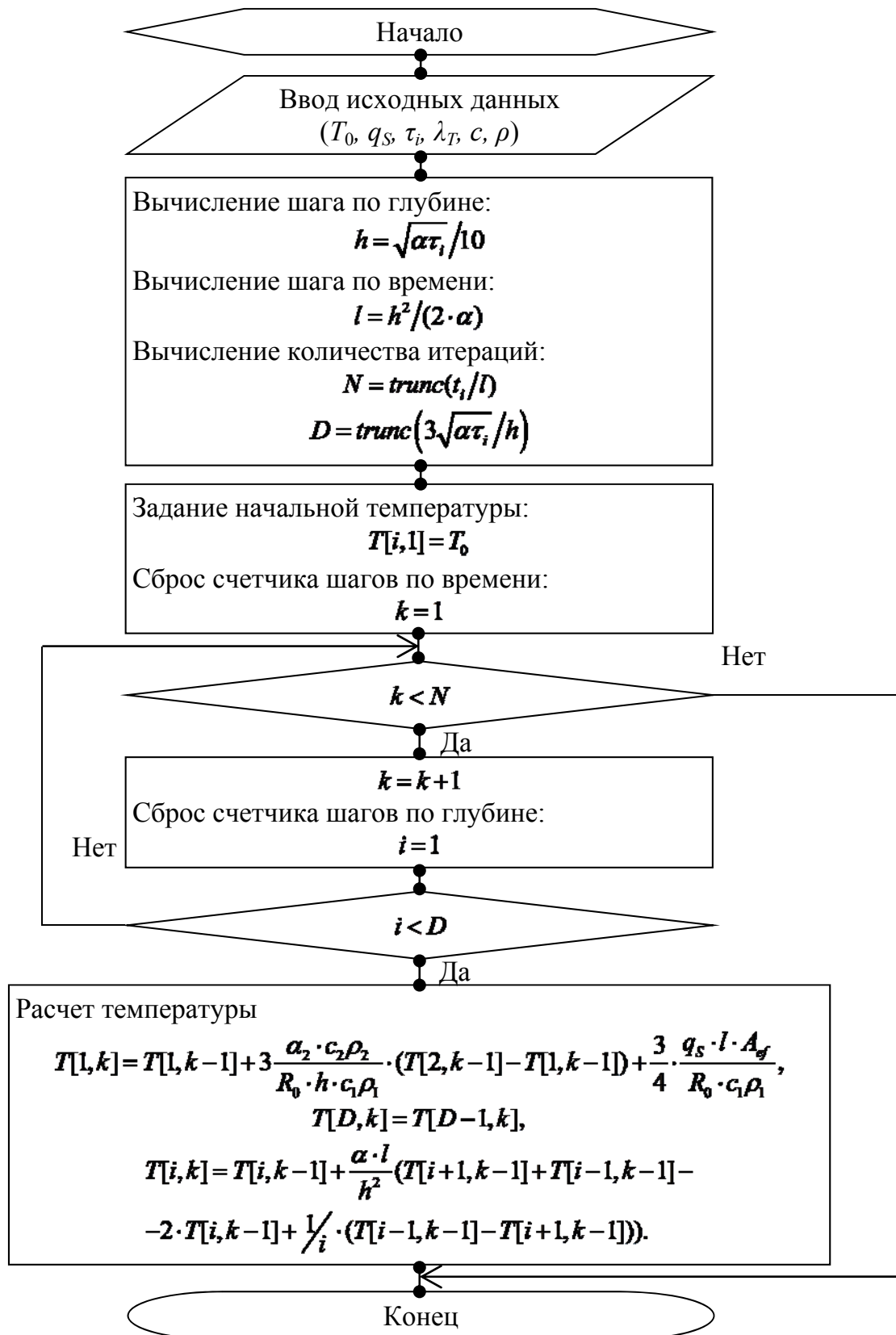


Рис. 2.9. Блок-схема для расчета задачи нагрева прозрачного материала в окрестности поглощающего включения по методу конечных разностей

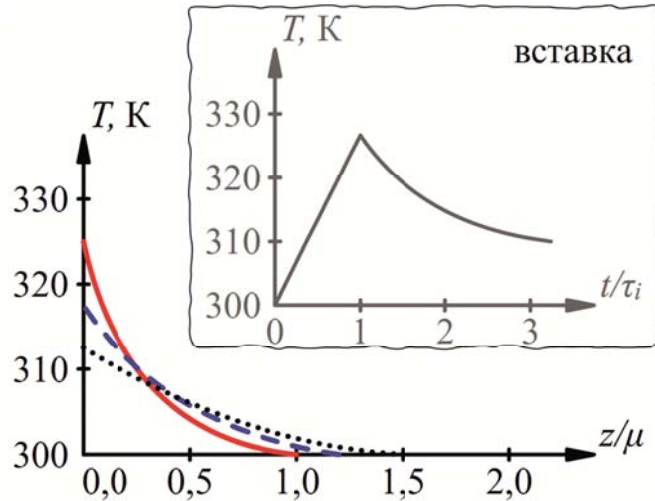


Рис. 2.10. Температурное поле в окрестности включения
в различные моменты времени:
сплошная линия – $1,0\tau_i$, пунктирная линия – $1,5\tau_i$, точечная линия – $2,0\tau_i$;
на вставке – процесс нагрева и остывания включения
($\tau_i = 10$ нс, $R_0 = 10^{-5}$ см, $q_S = 10^5$ Вт/см²)

На рис. 2.11 представлена зависимость температуры нагрева включений различных размеров от длительности воздействующего импульса.

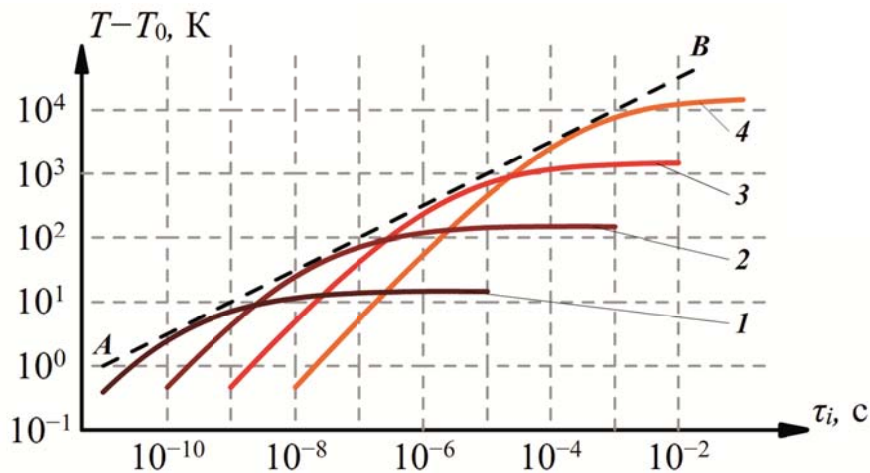


Рис. 2.11. Зависимость температуры нагрева включений
от длительности ЛИ (R_0 : 1 – 10^{-6} см, 2 – 10^{-5} см,
3 – 10^{-4} см, 4 – 10^{-3} см) при $q_S = 10^5$ Вт/см²;
AB – огибающая для семейства температурных кривых

Как видно из рис. 2.11, при коротких длительностях ЛИ эффективно нагреваются частицы малых размеров, а при воздействии длинным импульсом – крупные. Таким образом, каждой длительности импульса соответствует определенный размер включения, которое будет нагре-

ваться максимально. Далее за счет теплопроводности будет разогреваться весь материал.

2.4. Следствия и выводы из частных решений уравнения теплопроводности

2.4.1. Определение глубины прогретого слоя

Если справедливо условие $\mu\sqrt{\alpha\tau_i} \gg 1$, то источник теплоты можно считать поверхностным. Для металлов это практически всегда выполняется, кроме случаев, когда длительность воздействующего импульса очень мала.

Для приближенного определения глубины слоя, прогретого до температуры T при лазерном нагреве поверхности материала, используется следующая формула:

$$z_T \approx 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{\pi}} - \frac{T \cdot \lambda_T}{q_S}. \quad (2.30)$$

Например, если $T = T_{hard}$ (T_{hard} – температура закалки материала), то по формуле (2.30), при известной величине q_S , можно определить z_{hard} (глубину закалки). При известной величине z_{hard} можно вычислить плотность потока q_S , поглощаемую поверхностью, откуда можно найти параметры пучка.

Если глубина проникновения ЛИ $1/\mu \gg 2\sqrt{\alpha\tau_i}$, источник излучения считается объемным.

При нагреве объемным источником тепла (в одномерной постановке задачи) решение уравнения теплопроводности будет следующим:

$$T(z,t) \approx A_{ef} \cdot \frac{\mu \cdot q_S \cdot \tau_i}{c\rho} \cdot e^{-\mu z}. \quad (2.31)$$

По выражению (2.31) температура на поверхности будет расти линейно с ростом времени воздействия τ_i , а по глубине – в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера.

Соответственно, на поверхности тела (при $z = 0$) температура будет определяться как

$$T(0,t) \approx A_{ef} \cdot \frac{\mu \cdot q_S \cdot \tau_i}{c\rho}. \quad (2.32)$$

Расчеты по данным формулам являются приближенными оценками. Точные результаты расчета можно получить только с учетом зависимости изменения теплофизических параметров от температуры (например, учет $A_{ef}(T)$ и нелинейности граничных условий).

2.4.2. Определение критических потоков

Знание температурного поля материала при воздействии излучения лазера позволяет определить критические плотности потока, требуемые для достижения за данный промежуток времени (длительность импульса) в некоторой точке поверхности или объема материала заданной температуры.

Используя одномерную модель нагрева полубесконечного тела $2\sqrt{\alpha\tau_i} \ll d_b$ тепловым источником с постоянной во времени плотностью потока, можно получить соотношения для расчета интенсивности, требуемой для достижения на поверхности температуры плавления и испарения:

$$\begin{aligned} q_s^{liq} &= \frac{0,885 \cdot T_{liq} \cdot \lambda_T}{A_{ef} \cdot \sqrt{\alpha\tau_i}}; \\ q_s^{evap} &= \frac{0,885 \cdot T_{evap} \cdot \lambda_T}{A_{ef} \cdot \sqrt{\alpha\tau_i}}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

2.4.3. Определение скоростей нагрева и остывания

Используя простые соотношения одномерной модели нагрева полубесконечного тела источником тепла постоянной интенсивности, можно оценить скорости нагрева и охлаждения материала. Выражение для определения скорости имеет следующий вид:

$$v = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{A_{ef} \cdot q_s}{\lambda_T} \cdot \left(\sqrt{\frac{\alpha}{t}} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + \frac{z}{2t} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right). \quad (2.34)$$

На поверхности нагрева $z = 0$ при $\tau_i = t$:

$$v = \frac{A_{ef} \cdot q_s}{\lambda_T} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi\tau_i}} = \frac{q_s}{\sqrt{\lambda_T \cdot c\rho \cdot \pi \cdot t}}. \quad (2.35)$$

Из уравнения (2.35) следует, что скорость нагрева линейно возрастает с увеличением плотности потока, уменьшается – с ростом теплопроводности λ_T , объемной теплоемкости материала $c\rho$ и при увеличении времени действия источника тепла.

Выражение для скорости охлаждения поверхности $z = 0$ после окончания действия импульса получим при $\tau_i = t$:

$$v = \frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{A_{ef} \cdot q_s}{\sqrt{\lambda_T \cdot c\rho \cdot \pi}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t - \tau_i}} \right). \quad (2.36)$$

Все оценки даны для одномерной задачи и без учета нелинейностей (без учета зависимости величин, относящихся к процессу переноса тепла от температуры), поскольку при учете нелинейностей рассмотренные выше задачи становятся неразрешимо сложны.

2.5. Роль гидродинамических, газодинамических и плазменных явлений

2.5.1. Моделирование гидродинамических, газодинамических и плазменных явлений

Все ранее рассмотренные способы нахождения температурного профиля в результате решения уравнения теплопроводности справедливы при нагревах только до температуры плавления вещества. С началом процесса плавления температура вещества не растет, а подводимая энергия (мощность) лазерного пучка идет на переплав, т. е. тратится на разрыв связей в материале. Эту энергию называют скрытой теплотой плавления H_{liq} . Уравнение теплопроводности эту величину не учитывает, как и возможные явления перемешивания расплава. При глубоком проплавлении возникают гидродинамические процессы в связи с деформацией расплава.

Известно, что температура плавления T_{liq} на поверхности тела достигает к концу лазерного импульса ≥ 1 мс при плотности потока $q_S \approx 10^4 \dots 10^5$ Вт/см². При дальнейшем увеличении q_S фронт плавления будет перемещаться в глубь тела.

Скорость фронта расплава можно оценить из выражения:

$$A_{ef} \cdot q_S = \rho \cdot H_{liq} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\tau_i}},$$

где $\sqrt{\alpha/\tau_i} \approx v_{liq}$ – скорость фронта плавления (в первом приближении).

Для обработки материалов ЛИ (например, сварки) важным является нахождение объема расплава и формы границы расплав–твердая фаза. В общем виде моделирование движения этой границы весьма затруднительно.

Основные приближения при постановке задачи – это постоянство температуры по объему жидкой фазы за счет турбулентного перемешивания. Тогда распределение температуры по жидкой фазе можно считать неизменным и рассматриваемая двухфазная задача сводится к однофазной задаче относительно температуры в твердой фазе с нелинейным граничным условием.

Используется стандартное уравнение теплопроводности, что и ранее, но граничное условие (II рода) должно выполняться на границе

раздела жидкой и твердой фазы, учитывать изменение площади границы и скрытую теплоту плавления.

Следующей сложностью является расчет деформации поверхности расплава давлением паров:

$$\rho(T) = \frac{kT \cdot \rho_0(T)}{2},$$

где $\rho_0(T)$ – плотность пара при температуре T .

$$\rho_0(T) = \left(\frac{2\pi \cdot m v_0^2}{kT} \right)^{3/2} \cdot \exp \left(-\frac{H_{\text{evap}}}{kT} - 1 \right),$$

где m – масса атома, H_{evap} – удельная теплота испарения [Дж/г], v_0 – эйнштейновская частота колебаний. Оценки определения глубины деформации расплава в литературе существуют, и поэтому мы их не приводим.

Еще более сложным является математическое моделирование процесса парогазового канала в расплаве. Определить критическую плотность потока для глубокого проплавления можно, приравняв скорости движения изотерм испарения и нагрева твердой фазы:

$$A_{\text{ef}} \cdot q_S = \rho \cdot H_{\text{evap}} \cdot v_{\text{evap}}.$$

Скорость фронта испарения также должна учитываться в граничных условиях.

Предложены предпосылки для моделирования процесса глубокого проплавления:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_T \cdot \text{grad}(T)) + Q,$$

т. е. обычное уравнение теплопроводности, только Q берется из теплового баланса, записываются условия на границе раздела фаз с применением третьей краевой задачи. Решение задачи проводилось численно, поэтому не получено выражения, связывающего поверхностную плотность потока с глубиной проплавления. Однако выявлены закономерности:

- в зоне прямого облучения (в канале проплава) тепловыделение не велико и составляет ~10 % от энергии луча;
- основная энергия (до 80 %) поступает от пароплазменной среды, заполняющей канал;
- потери энергии связаны с выходом паров и излучением факела;
- при испарении вещества необходимо учитывать газодинамические явления в модели лазерного разрушения.

Учет объемного парообразования, расширения пара, нагрева пара излучением и экранировки излучения частицами исключительно сложен, и модели практически отсутствуют.

Плазменные и термохимические процессы носят в литературе описательный характер, и математические модели практически не разработаны. Что касается термохимических явлений, то можно отличить возникновение окисной пленки в ряде случаев, которая чаще всего приводит к увеличению коэффициента поглощения. Часто образуются окислы, которые слабо поглощают излучение. Это Cu_2O , Al_2O_3 , TiO_2 – примесные полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,5...3,0 эВ.

2.5.2. Оценки воздействия по методу баланса энергий

Поскольку учет газа и гидродинамических явлений при моделировании нагрева практически невозможен, используют приближенные решения, полученные из баланса энергий.

При этом предполагается, что гидродинамические, газодинамические и плазменные явления в конечном счете приводят к изменению эффективности энерговклада, который и определяет результат нагрева в виде средней температуры слоя либо глубины расплава, или глубины испаренного вещества.

При неподвижном источнике теплоты:

$$A_{ef} \cdot W = \rho \cdot \left[c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq} + H_{evap} \right] \cdot \frac{(d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2}{4} \cdot \pi h, \quad (2.37)$$

где h – глубина испарения.

Выражение (2.37) является полным уравнением баланса, когда разрушение вещества происходит в испарительном режиме. В режиме проплавления в уравнении отсутствует член H_{evap} , а в режиме до начала плавления – H_{liq} . При этом вместо T_{evap} необходимо брать значение T_{liq} .

Левая часть уравнения (2.37) определяет энергию, вводимую в материал, т. е. пошедшую на нагрев и разрушение материала. Множитель $\rho \cdot \left[c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq} + H_{evap} \right]$ – это энергия, необходимая для нагрева единицы объема до температуры кипения, переплава и испарения. Множитель $(d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2 \cdot \pi h / 4$ определяет нагретый и разрушенный объем материала.

В плоской геометрии при $d_b \gg 2\sqrt{\alpha\tau_i}$ можно пренебречь $2\sqrt{\alpha\tau_i}$, и, разделив уравнение на $\pi d_b^2 / 4$ и на τ_i (без учета T_{evap} и H_{liq}), получим следующие выражения:

$$A_{ef} \cdot q_s \approx \rho \frac{H_{evap} \cdot h}{\tau_i};$$

$$V_{evap} = \frac{h}{\tau_i} = A_{ef} \frac{q_s}{\rho \cdot H_{evap}}.$$

Таким образом, легко получается выражение для скорости фронта испарения.

При движущемся лазерном источнике:

$$A_{ef} \cdot P_0 = h \cdot v \cdot \left(d_b + 2\sqrt{\frac{\alpha \tau_i}{G}} \right) \cdot \left[c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq} + H_{evap} \right], \quad (2.38)$$

здесь v – скорость движения луча (детали), G – скважность (в непрерывном режиме $G = 1$), $\tau_i = d_b/v$ – время воздействия.

Очевидно, что уравнение баланса можно применять и к расчету средней температуры нагрева при малых плотностях потока.

РАЗДЕЛ 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Лазерное термоупрочнение (закалка) материалов

Для того чтобы произвести лазерную закалку, необходимо разогреть вещество до определенной температуры – температуры закали T_{hard} , а затем быстро охладить. При этом увеличивается твердость поверхности материала, а следовательно, и его износостойкость.

При закалке очень важна скорость нагрева и охлаждения материала. При лазерной закалке она составляет $10^6 \dots 10^7$ К/с, и поэтому качество закали данным способом несколько другое, чем при обычных методах.

Лазерное поверхностное термоупрочнение может производиться как непрерывным, так и импульсно-периодическим лазером. Особенностью лазерного термоупрочнения являются не только малые времена нагрева и охлаждения и их высокие скорости, но также глубина закали. Глубина закали зависит от плотности мощности потока и длительности воздействия лазера. Поэтому в различных режимах работы лазера глубина закали различна. Так, при импульсно-периодическом воздействии она малая, а при непрерывном, соответственно, – большая. Еще одна особенность в том, что отсутствует выдержка при температуре закали.

Для определения глубины закали используют формулу Лапласа для нагрева вещества:

$$T(z, t) = A_{ef} \cdot \frac{q_s \cdot 2\sqrt{\alpha\tau_i}}{\lambda_T} \cdot ierfc\left(\frac{z_{hard}}{2\sqrt{\alpha t}}\right), \quad (3.1)$$

где $ierfc(x)$ – табулированная функция (см. прил.).

Температура на поверхности материала (при $z = 0$) в таком случае будет определяться по выражению:

$$T_s = A_{ef} \cdot \frac{q_s \cdot 2\sqrt{\alpha\tau_i}}{\lambda_T \sqrt{\pi}}. \quad (3.2)$$

Типичный температурный профиль, из которого можно найти глубину закали z_{hard} , показан на рис. 3.1.

По температурному профилю можно определить глубину закали z_{hard} по известной температуре закали T_{hard} . При этом изменение плотности потока лазерного излучения будет влиять на амплитуду данного

распределения, а изменение длительности воздействия – как на амплитуду, так и на распределение температуры по глубине материала.

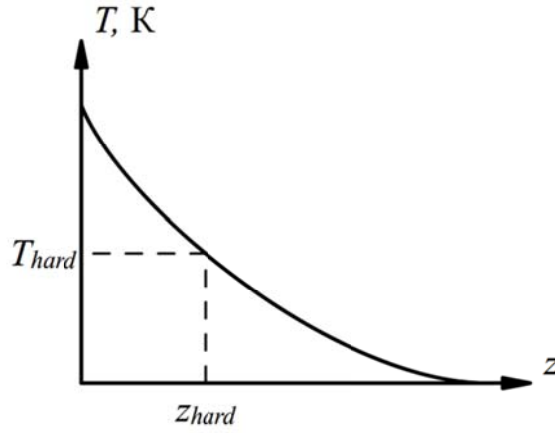


Рис. 3.1. Распределение температуры по глубине образца

Используя выражения (3.1) и (3.2), можно получить глубину распределения любой заданной изотермы, например, найти глубину закаленного слоя z_{hard} в центре светового пятна:

$$\frac{T_{hard}}{T_s} = \sqrt{\pi} \cdot ierfc\left(\frac{z_{hard}}{2\sqrt{\alpha\tau_i}}\right). \quad (3.3)$$

Если закалка происходит с оплавлением поверхности, то $T_s = T_{liq}$, а необходимая плотность потока равна

$$A_{ef} \cdot q_{liq} = T_{liq} \cdot \lambda_T \sqrt{\frac{\pi}{4\alpha\tau_i}}. \quad (3.4)$$

Скорость нагрева в общем случае в зоне воздействия (на глубине z) к концу импульса ЛИ и без существенного разрушения поверхности материала можно получить из выражения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A_{ef} \frac{q_s}{\lambda_T \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\tau_i}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{(2\sqrt{\alpha\tau_i})^2}\right). \quad (3.5)$$

Из выражения (3.5) можно найти скорость нагрева на поверхности ($z = 0$) и на глубине закаленного слоя, придавая z значения z_{hard} .

Распределение градиента температуры по глубине z прогретого слоя задается выражением:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = A_{ef} \frac{q_s}{\lambda_T} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau_i}}\right). \quad (3.6)$$

Для приближенного определения глубины слоя, прогретого до температуры закали, можно использовать выражение:

$$z_{hard} \approx \frac{2\sqrt{\alpha\tau_i}}{\sqrt{\pi}} - \frac{T_{hard} \cdot \lambda_T}{A_{ef} \cdot q_s}. \quad (3.7)$$

Для увеличения коэффициента поглощения A_{ef} используют поглощающие покрытия. Коэффициент поглощения A_{ef} для хороших покрытий достигает 80 %.

При лазерной обработке материалов формируется несколько характерных зон:

- оплавления – основная структура мартенсит, но при закатке без оплавления слой отсутствует;
- закатки в твердой фазе – находится ближе к поверхности слоя (мартенсит и остаточный аустенит), а ближе к концу слоя появляются элементы исходной структуры (феррит и цементит);
- переходная – зона отпуска, характеризующаяся низкой микротвердостью.

Такое строение характерно при обработке материала импульсно-периодическим лазером и лазером непрерывного действия.

Распределение микротвердости H_μ по глубине z при обработке импульсным Nd-лазером ($\tau_i \sim 1$ мс) показано на рис. 3.2 (данные эксперимента для стали Ст 45).

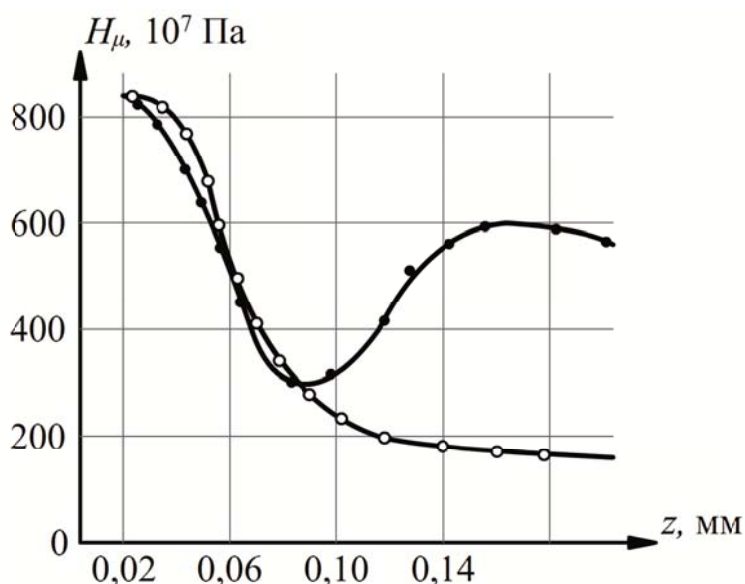


Рис. 3.2. Распределение микротвердости по глубине зоны обработки в незакаленных (—○—) и предварительно закаленных обычным способом до 6000 МПа (—●—) образцах

Распределение микротвердости в стали Ст 45 при обработке CO_2 -лазером непрерывного действия показано на рис. 3.3.

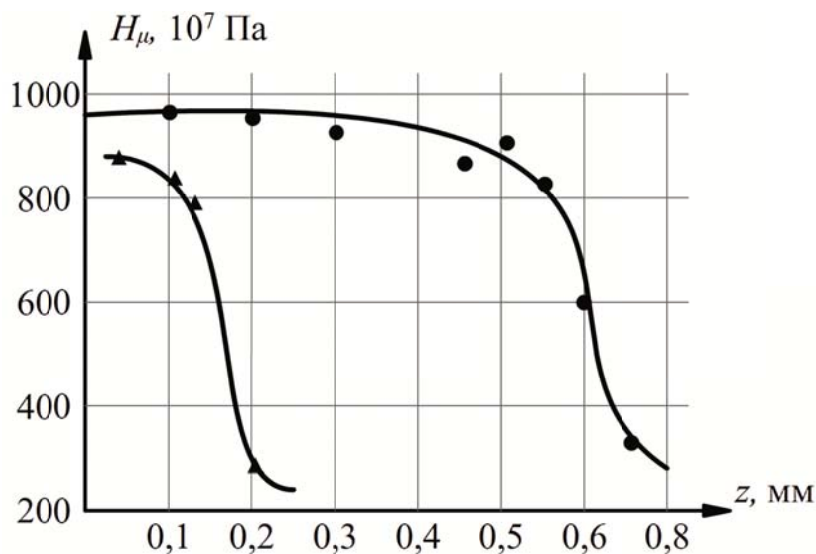


Рис. 3.3. Распределение микротвердости по глубине зоны обработки Ст_{45} при различных скоростях перемещения образцов ($q_s = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$).
Скорость обработки: ● – 0,6 м/мин; ▲ – 4,2 м/мин

Глубина закалки z_{hard} при обработке лазером непрерывного действия, как правило, больше, чем при обработке импульсно-периодическим лазером.

Наблюдаемое упрочнение сплавов объясняется формированием дефектов большой концентрации при скоростном нагреве и их фиксации при быстром охлаждении. Поверхностный слой в основном состоит из мартенсита. Характерная особенность мартенсита – высокая твердость, прочность и низкая пластичность. Остаточный аустенит вносит элементы пластичности.

Результат термоупрочнения сталей зависит от содержания углерода. Чем больше углерода, тем выше микротвердость после лазерной обработки (рис. 3.4).

На углеродистых сталях микротвердость после обработки достигает порядка 12000 МПа. Легированные стали обычно имеют низкое содержание углерода (ШХ-15, 9Х), однако и они закаливаются до ~ 12000 МПа. Высоколегированные стали (штамповые и быстрорежущие) упрочняются до $H_\mu \approx 10500$ МПа. Обработка ведется с небольшим оплавлением поверхности. Легирование обеспечивает повышение микротвердости после лазерной закалки по сравнению с нелегированной сталью с таким же содержанием углерода.

Высокая микротвердость обеспечивается в результате закалки структуры, состоящей из мартенсита, карбидов и небольшого количества

остаточного аустенита. Скорость охлаждения при лазерной обработке значительно превосходит критическую (которая для сплавов железа составляет 50...200 К/с), поэтому структура мартенсита после лазерной закалики более мелкозернистая, чем при обычной закалке. Лазерная закалка позволяет повысить микротвердость по сравнению с обычной закалкой на ~2000 МПа (рис. 3.2). Исходная микротвердость сталей различна. Нормализованная сталь Ст 45 имеет H_μ порядка 2000 МПа.

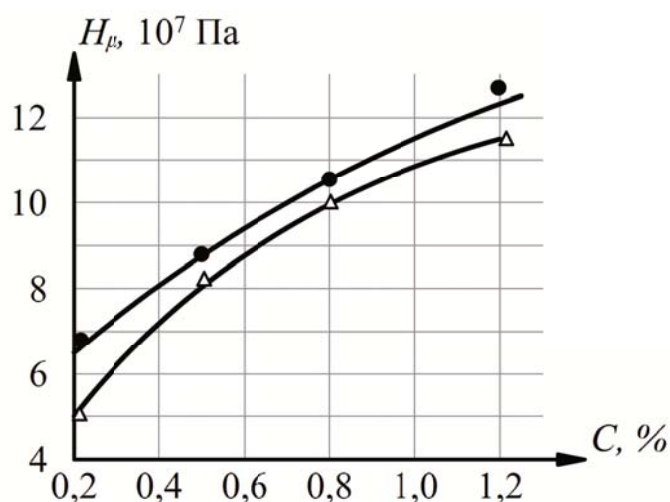


Рис. 3.4. Зависимость микротвердости от содержания углерода в стали при обработке образца CO_2 -лазером. Скорость обработки: $\bullet$ – 0,6 м/мин; Δ – 4,2 м/мин

Во многих случаях закалка с оплавлением поверхности предпочтительнее. Однако в зоне оплавления после закалки возможно появление трещин. Это явление нежелательно, поэтому при выборе режима обработки и типа лазера (импульсно-периодический или непрерывного действия) необходимо учитывать, какой будет результат по микротвердости, структуре зерен, глубине закалки и наличие микротрещин. Общий результат или критерий – это износостойкость.

Износостойкость при лазерном термоупрочнении увеличивается в несколько раз. Особенно она высока у чугунов (увеличивается до 5 раз). Микротвердость у чугунов в зоне оплавления и зоне термического влияния доходит до 10000 МПа (чугун ВЧ-60) и определяется структурой цементита. Износостойкость образцов из Ст 45 значительно выше (в несколько раз) при обработке лазером по сравнению с закалкой в печи.

На рис. 3.5 показана износостойкость закаленных образцов из стали Ст 45. Видно, что износостойкость увеличивается до 80 раз по сравнению с незакаленным образцом.

Из рис. 3.6 видно, что с уменьшением скорости обработки наблюдается увеличение глубины закалки z_{hard} . Вид зависимости z_{hard} от v

предсказать несложно, пользуясь выражением характерного пробега теплового фронта $z_{hard} \approx 2\sqrt{\alpha\tau_i}$.

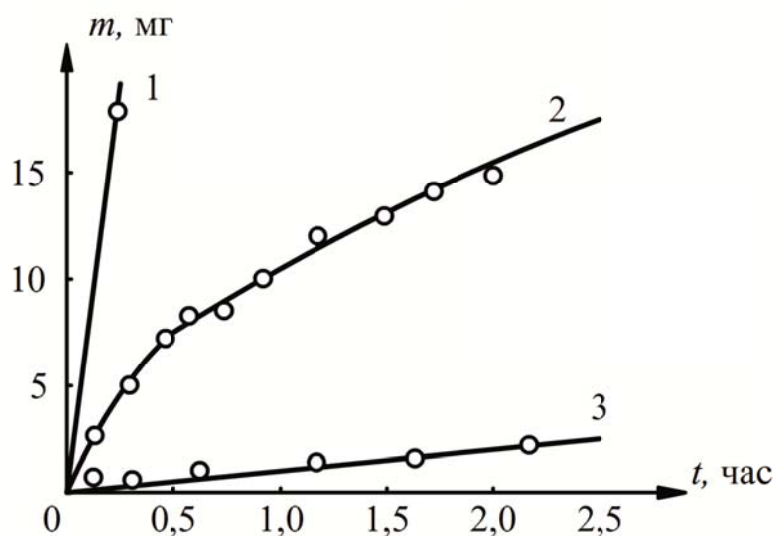


Рис. 3.5. Зависимость износа от времени для стали Ст 45.
Образцы: 1 – незакаленный, 2 – закаленный в печи, 3 – обработанный ЛИ

Поскольку $t = d_b/v$, то $z_{hard} \approx 1/\sqrt{v}$, что и подтверждает зависимость, полученная экспериментально (рис. 3.6).

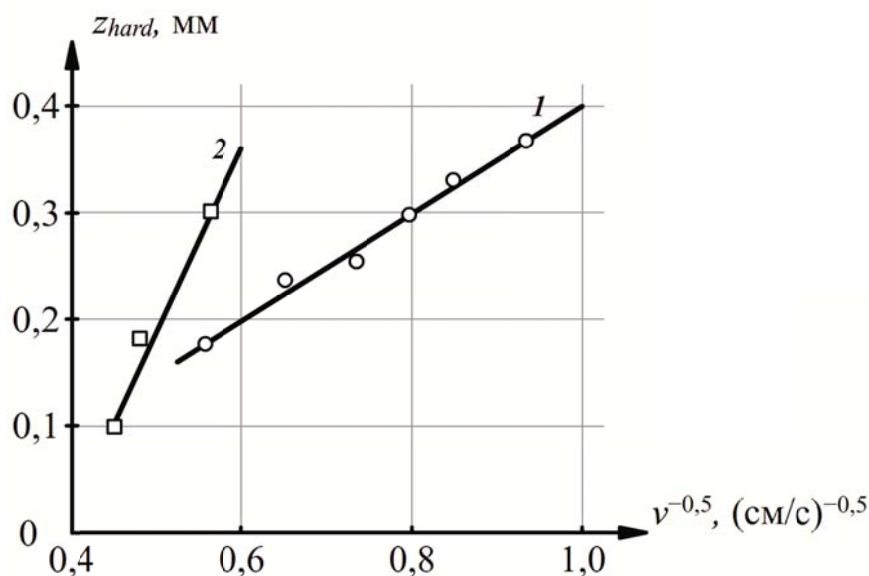


Рис. 3.6. Зависимость глубины закалки от скорости:
1 – Ст 40Х ($P_0 = 1 \text{ кВт}$; $d_b = 3,4 \text{ мм}$); 2 – Ст 35 ($P_0 = 5 \text{ кВт}$; $d_b = 5 \text{ мм}$)

Зависимость глубины закалки от мощности лазерного пучка достаточно сложна (выражения (3.1) и (3.7)). Однако экспериментальные

результаты указывают на практически логарифмическую зависимость z_{hard} от воздействующей мощности ЛИ.

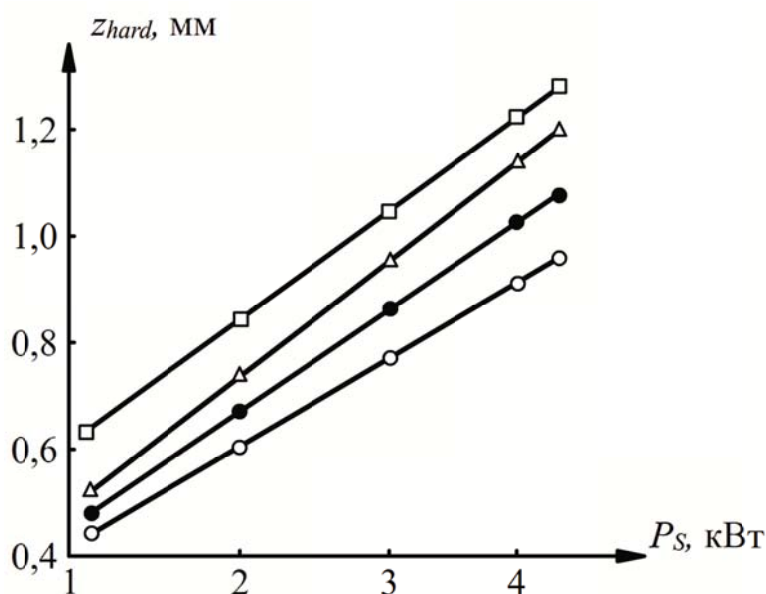


Рис. 3.7. Зависимость глубины закалки чугуна ВЧ-60 от мощности при различных покрытиях (□ – фосфат марганца; Δ – черная гуашь; ● – полиграфическая краска; ○ – без покрытия)

Термоупрочнение титановых сплавов зависит от среды, в которой ведется обработка (табл. 3.1).

Таблица 3.1
Некоторые характеристики упрочненного титанового сплава ВТ-6

Сплав	Тип лазера	Скорость воздействия	Среда	h , мм	Микротвердость, МПа		
					Исх.	Зона оплавления	Зона терм. влияния
ВТ-6	CO ₂ 2 кВт	14 мм/с	Воздух	0,77	3500	до 16000	до 4600
			Гелий	0,43		до 75000	

Обработка титановых сплавов ведется преимущественно с оплавлением. При этом образуются две зоны: зона оплавления и зона термического влияния. Обработка в атмосфере воздуха более эффективна, чем в атмосфере инертных газов.

Циркониевые сплавы обрабатываются аналогично титановым. Типичный сплав Н-1 при обработке CO₂-лазером на воздухе в зоне оплавления имеет H_μ порядка 6000 МПа, что уступает по твердости титановым сплавам.

Лазерное упрочнение алюминиевых и медных сплавов отличается наличием лишь одной зоны – зоны оплавления. Остальные зоны отсутствуют. Исходная микротвердость алюминиевых сплавов ~ 1000 МПа. После лазерной обработки сплавы типа АК упрочняются до ~ 2000 МПа, а дюралюминиевые типа Д16 и Д18 практически не упрочняются.

Бронза Бр НХК в исходном состоянии имеет микротвердость $1500 \dots 1800$ МПа. После лазерной обработки $H_\mu \approx 1900$ МПа, т. е. практически не увеличивается. Сплав Fe + 30 % Cu имеет исходную $H_\mu \approx 1400$ МПа. После обработки непрерывным излучением доходит до 4000 МПа, а импульсным – до 4300 МПа. Бронза Бр ОЦС с исходной $H_\mu \approx 1000$ МПа после обработки импульсным лазером повышает микротвердость до 1700 МПа.

Таким образом, к достоинствам лазерного термоупрочнения можно отнести следующие:

- высокую микротвердость поверхности и высокую износостойкость;
- возможность локальной обработки как по глубине, так и на поверхности;
- обработку труднодоступных участков;
- возможность менять глубину закалки в широких пределах.

К недостаткам можно отнести сложность подбора режима обработки и возможные деформации при обработке достаточно больших участков.

Применение лазерной термической обработки при использовании лазеров непрерывного действия мощностью выше 1000 Вт с автоматизированной системой управления лазерным технологическим процессом в машиностроении наиболее эффективно.

3.2. Лазерное легирование и газопорошковая наплавка

В общем лазерное легирование (рис. 3.8) схоже с лазерным термоупрочнением с оплавлением поверхности. Отличие состоит лишь в том, что перед термической обработкой на поверхность наносится слой, который после оплавления поверхности меняет ее химический состав (поверхностный слой).

Преимущество лазерного легирования состоит в том, что деталь изготавливается из легкообрабатываемого недорогого материала, а дорогие и дефицитные элементы расходуются только в тонком слое и на локальном участке изделия. Легирующая обмазка, наносимая на поверхность обрабатываемой детали, расплавляется лучом лазера совместно с поверхностным слоем изделия. Затем легирующие компоненты переходят в объем жидкой ванны металла, которая затем кристаллизуется.

Размер зоны обработки d_{proc} находится из соотношения:

$$\frac{d_b}{f} = \frac{d_{proc}}{\Delta f} \Rightarrow d_{proc} = \frac{d_b}{f} \cdot \Delta f. \quad (3.8)$$

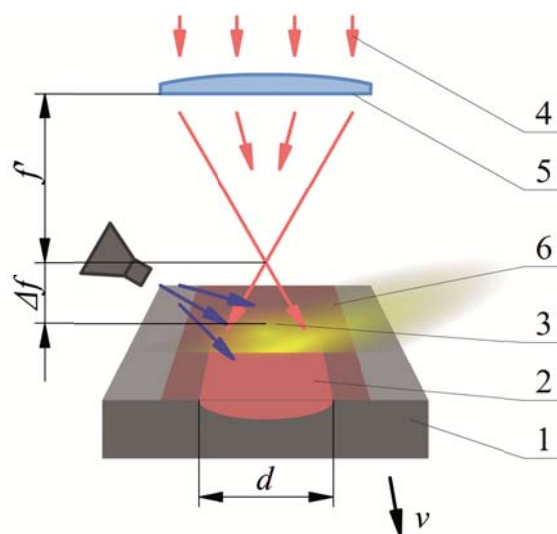


Рис. 3.8. Схема процесса лазерного легирования:

- 1 – образец, движущийся со скоростью v ; 2 – легированный слой (дорожка);
 3 – ванна расплава; 4 – лазерный пучок; 5 – технологический объектив;
 6 – защитный газ; 7 – легирующая обмазка; f – фокусное расстояние объектива (5);
 Δf – расстояние от поверхности образца до задней фокальной плоскости

Средняя глубина легированных слоев составляет 0,3...0,4 мм при импульсной обработке и 0,3...1,0 мм при обработке непрерывным лазером. Обработка чаще всего проводится в атмосфере инертных газов.

Типы легирования.

- **Лазерная цементация** осуществляется на основе растворов графита или сажи в ацетоне или спирте. При большом содержании углерода в обмазке микротвердость после цементации повышается до 9000...14000 МПа. Лазерную цементацию целесообразно использовать для повышения твердости углеродистых сталей.
- **Лазерное азотирование** выполняется с использованием паст на основе аммиачной соли. Для титана, циркония и их сплавов азотирование легко осуществить при лазерном оплавлении поверхности с обдувом струей азота. При этом в слое образуются нитриды с высокой микротвердостью 17000...20000 МПа.
- **Силицирование** проводится на основе обмазок, содержащих порошок кремния. Осуществляется из твердой фазы. Микротвердость сталей повышается до 8000...15000 МПа. Кроме того, повышается их коррозионная стойкость и стойкость при нагреве.
- **Борирование** осуществляется с применением обмазок, содержащих порошок бора. Бор можно напылять плазменным способом, тогда

поверхность лазером оплавляют. При борировании сталей образуются бориды железа, обеспечивающие микротвердость до 21000 МПа.

- *Легирование металлическими компонентами.* Металл предварительно наносится на поверхность, и осуществляется лазерное оплавление. Чугуны и стали легируются хромом и углеродом. Алюминиевые и титановые сплавы легируются Fe, Ni, Cr и др. Микротвердость алюминиевых сплавов после лазерного легирования достигает 10000 Мпа, что значительно выше, чем при обыкновенной лазерной закалке. Если легирующее покрытие наносится высокотемпературным напылением, то лазерное оплавление таких покрытий приводит к увеличению прочности их сцепления с основой.
- *Газопорошковая лазерная наплавка* (рис. 3.9) осуществляется принудительной подачей порошка газовым потоком в зону лазерного оплавления поверхности. При этом частицы порошка достигают поверхности уже нагретыми до температуры плавления.

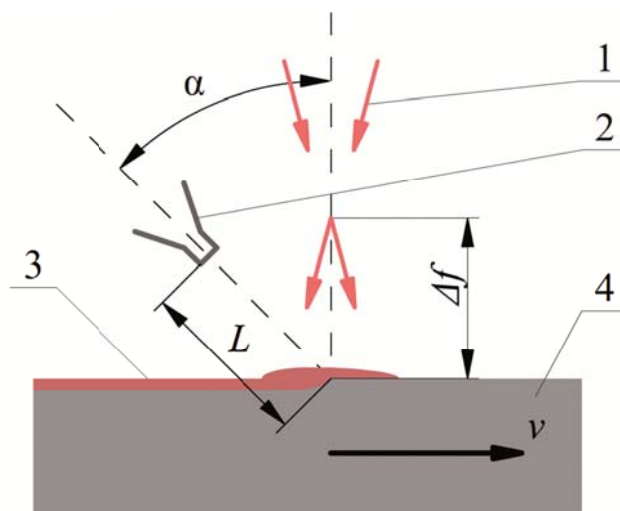


Рис. 3.9. Схема газопорошковой лазерной наплавки с подачей порошка вслед движению образца:

1 – луч лазера, 2 – питатель с расходом порошка,
3 – наплавленный металл, 4 – движущаяся со скоростью v пластина;
 L – расстояние от сопла питателя до зоны наплавки,
 Δf – степень дефокусировки, α – угол наклона сопла к оси лазерного пучка

Этот метод требует расчета, который связывает мощность лазера с размерами и расходом порошка, скоростями его подачи, скоростями движения, шириной и высотой валика наплавки и геометрией рисунка.

Подача порошка осуществляется с помощью таких газов, как воздух, азот, гелий, аргон. Для защиты от окисления используют инертный газ. Прочность сцепления высока, достигает прочности покрытия или детали.

3.3. Лазерная сварка материалов

3.3.1. Энергетические характеристики лазерной сварки

Плотность мощности излучения q_S при лазерной сварке ограничена по верхнему пределу пороговым значением, соответствующим началу объемного кипения в расплаве. На практике $q_S = 10^5 \dots 10^7$ Вт/см². При $q_S < 10^5$ Вт/см² режим плавления может не возникнуть.

При лазерной сварке результат определяется сочетанием плотности мощности q_S и длительности воздействия τ_i . Существуют три группы сочетаний.

Первая группа: $q_S = 10^5 \dots 10^6$ Вт/см², $\tau_i > 10^{-2}$ с. В эту группу входят методы сварки непрерывным излучением. Изменение q_S и τ_i в указанных пределах позволяет проводить сварку разнообразных конструкционных материалов малых и больших толщин.

Вторая группа: $q_S = 10^5 \dots 10^6$ Вт/см², $10^{-3} < \tau_i < 10^{-2}$ с. В этом режиме сварка в основном осуществляется импульсно-периодическим излучением. При действии импульса образуется точечное сварное соединение. В основном используется для сварки малых толщин, т. к. глубина проплавления формируется за счет механизмов теплопроводности.

Третья группа: $q_S = 10^6 \dots 10^7$ Вт/см², $\tau_i < 10^{-3}$ с. Применяются импульсно-периодические лазеры. Суммарное действие повторяющихся импульсов (частота десятки и сотни Гц) приводит к глубокому проплавлению. Режим позволяет проводить сварку больших толщин при меньших энергозатратах, чем при сварке непрерывным излучением.

3.3.2. Техничко-экономические характеристики лазерной сварки

К технико-экономическим характеристикам лазерной сварки относятся такие параметры, как скорость сварки v_{weld} , экономия материала, степень локальности (прецизионности) сварки.

Скорость лазерной сварки значительно превышает скорость сварки традиционными методами, особенно при сварке малых толщин. Кроме того, при сварке больших толщин встык обычной сваркой удастся проварить шов за 2–3 прохода с разделкой кромок. Лазерная сварка на глубину 20...30 мм методом глубокого проплавления осуществляется за 1 проход без разделки кромок и без присадочного материала.

Лазерная сварка пригодна для получения прецизионных конструкций благодаря малым размерам сварного шва и околошовной зоны. После сварки не нужны правки и механическая обработка.

Сварка с глубоким проплавлением (для толщин > 1 мм) выполняется в непрерывном и импульсно-периодическом режимах облучения при $q_s > q_{boil}$. При сварке малых толщин (толщиной < 1 мм) используются более мягкие режимы без перегрева до температур интенсивного испарения.

Лазерная сварка с глубоким проплавлением осуществляется в большинстве случаев с защитой шва. Сварка деталей малых толщин из низкоуглеродистой стали может выполняться без подачи защитного газа, что упрощает технологический процесс.

В зависимости от конструкции сварка стыка может проводиться как со сквозным проплавлением, так и без него.

В мягком режиме облучения (без глубокого проплавления) глубина прогрева $z_T = 2\sqrt{\alpha\tau_i}$. Соответственно, длительность лазерного импульса для прогрева стыка будет определяться по выражению:

$$\tau_i = \frac{\delta^2}{4\alpha}. \quad (3.9)$$

При толщине пластины $\delta > 1$ мм и $\alpha \approx 0,1$ см²/с длительность воздействия τ_i превышает $2,5 \cdot 10^{-2}$ с. Поэтому сварка импульсным излучением в этом режиме затруднена. Здесь необходимо применять лазеры непрерывного действия.

В жестком режиме облучения скорость подвода тепла превышает скорость теплоотвода, поэтому образуется лунка, развивающаяся по глубине. При передвижении источника образуется канал, на дне которого поглощается лазерное излучение. На передней стенке канала происходит плавление материала, а на задней стенке – остывание и затвердевание. Образуется узкий глубокий шов. При импульсно-периодическом действии с достаточно большой частотой образуется более узкий и глубокий канал (если частота достаточна, чтобы расплав не остывал к приходу следующего импульса), чем при непрерывном воздействии (при равенстве средних мощностей).

В импульсно-периодическом режиме соответствующим подбором длительности импульса и частоты можно добиться полного устранения влияния плазменного факела на снижение проплавляющей способности ЛИ. Для этого необходимо выполнение условий:

$$\tau_i < \tau_1, \quad T > \tau_2,$$

где τ_1 – время образования факела, τ_2 – время релаксации факела, T – период следования импульсов.

3.3.3. Сварка деталей малых толщин

Для сварки малых толщин лучше использовать Nd-лазеры, поскольку здесь выше поглощательная способность по сравнению с CO₂-лазерами и меньше габариты установки. Так, сварка фольги толщиной до 30 мкм из Al и Cu Nd-лазером (200 Вт) идет со скоростью 1 м/с. CO₂-лазер той же мощности при скорости 0,1 м/с не может даже оплавить поверхность.

При импульсной сварке длительность воздействия определяется из выражения (3.9). При непрерывном излучении используется следующая формула:

$$\tau_i = \frac{d_b}{v_{wel}}, \quad (3.10)$$

где v_{wel} – скорость сварки.

При импульсной сварке энергия импульса, обеспечивающая проплавление материала, описывается формулой:

$$W \approx 0,2 \frac{T_{liq} \cdot \lambda_T \cdot \tau_i \cdot \pi d_b^2}{\sqrt{\alpha \tau_i}}. \quad (3.11)$$

Оптимальный диапазон длительностей импульса (в секундах) для сварки различных материалов следующий:

- Медь $10^{-4} < \tau_i < 5 \cdot 10^{-4}$;
- Алюминий $5 \cdot 10^{-4} < \tau_i < 2 \cdot 10^{-3}$;
- Стали $5 \cdot 10^{-3} < \tau_i < 8 \cdot 10^{-3}$.

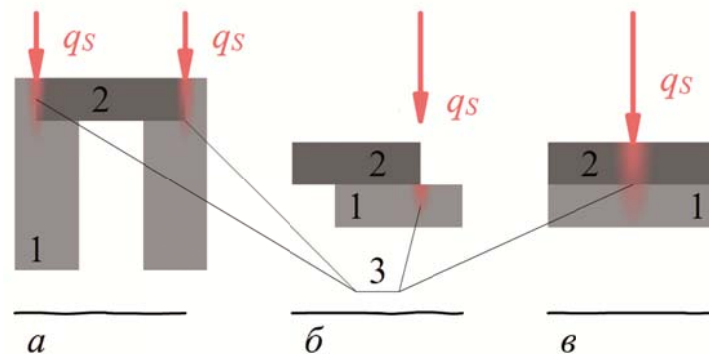


Рис. 3.10. Сварка деталей малых толщин:

а – приварка шайбы к массивной детали; б – сварка внахлест;

в – сварка с проплавлением (сквозным) верхней пластины;

1, 2 – детали; 3 – сварные соединения

Скорости охлаждения при сварке малых толщин материала $\sim 10^5 \dots 10^6$ К/с, что вызывает образование мелкодисперсных дендритных

структур. Размеры околошовной зоны термического влияния не превышают 100 мкм.

Необходимая плотность мощности для расплава поверхности следующая:

$$q_{liq} = \frac{T_{liq} \cdot \lambda_T \cdot \sqrt{\pi}}{A_{ef} \cdot 2\sqrt{\alpha\tau_i}}. \quad (3.12)$$

Сварка деталей малых толщин может быть шовной и точечной, может быть выполнена встык или внахлест. На рис. 3.10 показаны некоторые конструкции сварки.

3.3.4. Сварка с глубоким проплавлением

Глубокое проплавление возможно при плотностях мощности

$$q_S = \frac{T_{boil} \cdot \lambda_T \cdot \sqrt{\pi}}{A_{ef} \cdot 2\sqrt{\alpha\tau_i}}. \quad (3.13)$$

Для сварки с глубоким проплавлением чаще используют СО₂-лазеры большой мощности, т. к. они имеют высокий КПД, а коэффициент поглощения A_{ef} при высоких q_S значительно возрастает. Диаметр сфокусированного пучка выбирается в пределах 0,5...1,0 мм. При меньших диаметрах идет интенсивное испарение, приводящее к дефектам шва, а при больших чем 1 мм снижается эффективность сварки.

Глубина проплавления z_{liq} – основной параметр сварки. Максимальная глубина проплавления достигается при расположении фокуса под поверхностью материала. Величину заглубления нужно подбирать экспериментально.

Если глубина проплавления z_{liq} задана, то энергетика процесса находится из уравнения баланса для сварки:

$$A_{ef} \cdot P_S = z_{liq} \cdot v_{wel} \cdot \left(d_b + 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{G}} \right) \cdot \rho \cdot \left[c \cdot (T_{liq} - T_0) + H_{liq} \right], \quad (3.14)$$

где $G = T/\tau_i$ – скважность излучения, P_S – средняя мощность излучения лазера, A_{ef} – коэффициент эффективности энерговклада (в импульсно-периодическом режиме $A_{ef} \approx 0,55$, в непрерывном режиме $A_{ef} \approx 0,7$).

Из уравнения (3.14) видно, что в импульсно-периодическом режиме (ИПР) сварки глубина проплавления увеличивается, а ширина шва уменьшается:

$$b_{liq} = d_b + 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{G}}, \quad (3.15)$$

где b_{liq} – ширина шва расплава.

Необходимо отметить, что при глубоком проплавлении возможен оптический пробой (разряд) вблизи поверхности образца, который может уменьшить проплавляющую способность. Это можно учесть через уменьшение A_{ef} . На практике этот нежелательный эффект можно снизить подачей защитного газа через сопло. Применяются специальные сопла и составы газов для эффективной защиты шва от окисления и обеспечения эффективного проплавления.

Различные газы по-разному влияют на экранирующее действие факела. Максимальную эффективность проплавления обеспечивают газы, имеющие высокий потенциал ионизации и высокую теплопроводность.

Качество защиты шва обеспечивается расходом газа. При недостаточном расходе защита неэффективна, а излишний расход приводит к экономическим потерям, а при очень сильном давлении газа – к переходу в режим резки. Необходимо ориентироваться на следующие расходы: $50...60 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ – He; $15...20 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ – Ar.

В табл. 3.2 приведено влияние газов на глубину проплавления коррозионно-стойкой стали (нержавеющей) при $P_S = 5 \text{ кВт}$; $v_{wel} = 3,3 \text{ см/с}$ и $f' = 230 \text{ мм}$.

Таблица 3.2

*Влияние некоторых газов
на глубину проплавления нержавеющей стали*

Газ	Z_{liq} , мм	Плотность газа, кг/м^3	Расход газа, $\cdot 10^4 \text{ м/с}$
He	6,1	0,178	5,0
CO ₂	5,1	1,98	2,83
Воздух	4,9	1,29	–
N ₂	4,2	1,25	2,83
Ar	1,0	1,78	2,83

В режиме глубокого проплавления глубина z_{liq} пропорциональна мощности излучения P_S (рис. 3.11, а). С повышением скорости сварки глубина z_{liq} и ширина шва b_{liq} уменьшаются (рис. 3.11, б). Форма и размеры сварочной ванны весьма сильно зависят от степени фокусировки излучения и от положения фокального пятна лазерного пучка относительно поверхности образца (рис. 3.11, в).

Сварка с глубоким проплавлением перспективна в ИПР. Эксперименты показывают, что в ИПР глубина проплавления z_{liq} увеличивается (при правильном подборе параметров) в 3–4 раза по сравнению с непрерывным режимом при одинаковой средней мощности.

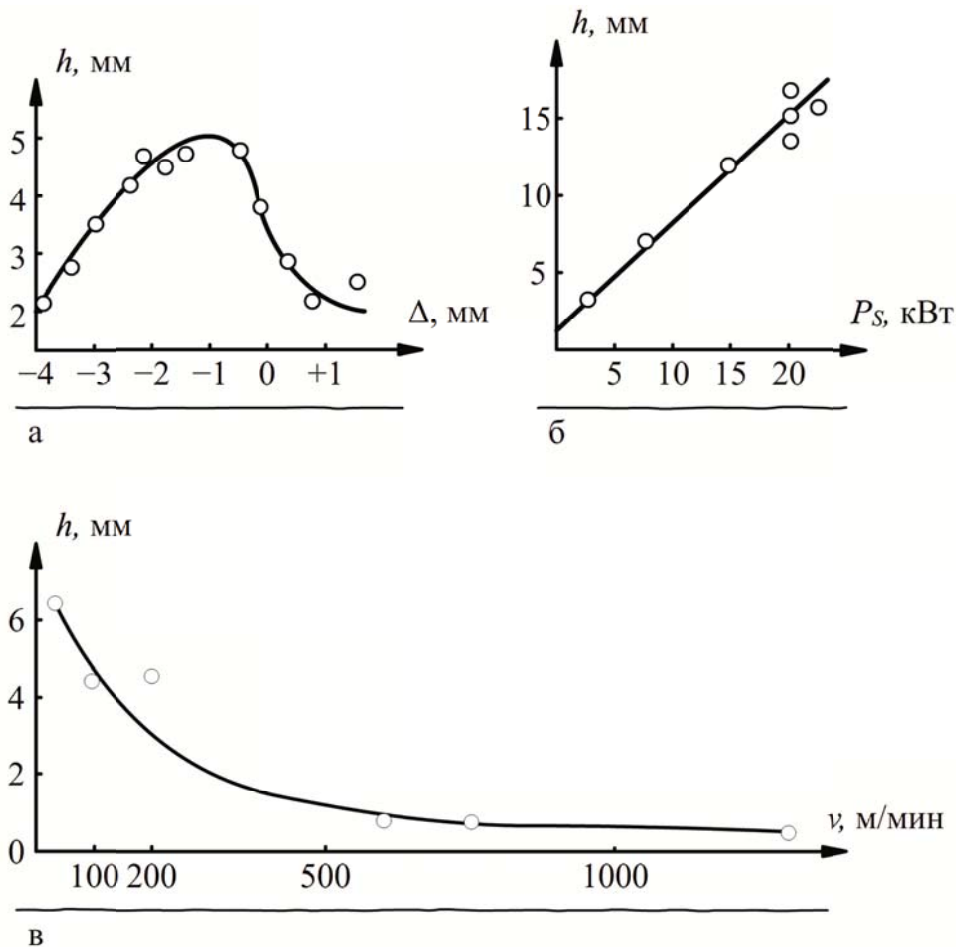


Рис. 3.11. Экспериментальные зависимости глубины сварочного шва на низколегированной стали:
 а – от заглубления фокуса пучка Δf при $P_s = 5$ кВт, угле схождения лучей 10° ;
 б – от мощности лазерного луча при скорости сварки $v_{wel} = 2$ см/с;
 в – от скорости сварки при $P_s = 5$ кВт

3.3.5. Технологические особенности лазерной сварки конструкционных материалов

Перспективу для лазерной сварки представляют такие случаи, когда применение традиционных способов сварки не дает желаемых результатов, а именно:

- прецизионные конструкции точных размеров, исключаящие доработку;
- высокие скорости сварки > 50 мм/с;
- крупные конструкции малой жесткости;
- соединение трудносвариваемых материалов, в том числе разнородных.

В последнем случае можно так смещать луч на стыке, что одновременно доводить до T_{liq} совсем разнородные материалы. Этому способствует большая скорость нагрева и малая длительность импульса.

Лазерная сварка сталей. Низкоуглеродистые и низколегированные стали (содержание $C < 0,25 \%$, легирующих добавок $< 4 \%$) обладают хорошей свариваемостью. Сварное соединение равнопрочно с основным металлом. Если сталь термически упрочнена, то при лазерной сварке не происходит разупрочнения из-за жесткого термического цикла. Рекомендуются высокие скорости сварки $v_{wel} > 40$ мм/с. Хорошая прочность сохраняется при толщинах 15...20 мм за один проход сварки.

В средне- (0,26...0,45 % C) и высокоуглеродистых (0,46...0,75 % C) легированных сталях (добавки до 10 % в сумме) при обычной сварке шов склонен к хрупким разрушениям в результате холодных и горячих трещин при сварке, т. е. нужен подогрев. Лазерная сварка обеспечивает повышение механических свойств сварных соединений. Повышается прочность и ударная вязкость за счет значительного измельчения вторичной структуры металла шва и околошовной зоны (возможна металлургическая очистка и дегазация).

Высоколегированные стали содержат более 10 % легирующих элементов. При лазерной сварке стали 12X18H10T структура шва мелкодисперсная, с пониженным количеством вредных примесей. Прочность сварного соединения находится на уровне основного металла, а пластичность выше, т. е. нержавейка хорошо сваривается.

Лазерная сварка алюминиевых сплавов. Эти сплавы имеют малую плотность, высокую удельную прочность, высокую коррозионную стойкость. Алюминиевые сплавы (Al) интенсивно окисляются при температуре плавления и выше. Окисная пленка обладает $T_{liq} = 2273$ К и в процессе сварки не расплавляется. Частицы пленки попадают в расплав и ослабляют соединение. Пленки адсорбируют пары воды и газы. Магний-алюминиевые сплавы захватывают расплавом водород и образуют пары.

Алюминиевые сплавы характеризуются высокой теплопроводностью, вследствие чего для сварки требуется большее количество энергии, чем для сварки сталей. Из-за высокого коэффициента линейного расширения и низкого модуля упругости велики остаточные деформации (больше, чем у сталей).

Для получения качественного сварного соединения необходима тщательная подготовка поверхности под лазерную сварку и газовая защита. Максимальная глубина проплавления z_{liq} и высокое качество сварки достигаются применением гелия в качестве защитного газа.

При сварке алюминиевых сплавов существует ярко выраженный порог q_{liq} . Например, CO₂-лазер с $P_s = 2$ кВт проплавляет сплав АМгб на глубину до 2 мм, а при чуть меньшей мощности проплавление вообще отсутствует. Это связано с высоким начальным коэффициентом отра-

жения ($\rho_\lambda = 0,97$) и резким уменьшением его при температуре, близкой к температуре плавления T_{liq} .

Хорошая (прямоугольная) форма шва обеспечивается на скоростях сварки более 22 мм/с. На пластинах из сплава АМгб толщиной $\delta = 2$ мм шов с параллельными кромками имеет ширину $b_{liq} = 2$ мм. С увеличением P_s глубина z_{liq} увеличивается без заметного увеличения b_{liq} . Дуговыми методами сварки получить такую форму проплавления невозможно.

Структура шва мелкозернистая, причем размеры дендритов значительно меньше, чем при аргонодуговой сварке. Зона термического влияния в 5–6 раз меньше, чем при аргонодуговой сварке, и имеет малый размер зерна, что обеспечивает высокие механические свойства.

Лазерная сварка магниевых сплавов. Магниевого сплавы склонны к окислению. Окисная пленка термостойка и имеет плотность в 2 раза большую плотности сплава. При сварке магниевых сплавов необходима тщательная защита шва.

Технология сварки магниевых сплавов принципиально не отличается от сварки алюминиевых сплавов. Перед сваркой кромки нужно протравить или зачистить шабером до блеска. Качественный шов образуется на скоростях 16...35 мм/с, требуемая мощность несколько ниже, чем при сварке алюминиевых сплавов, защита шва осуществляется гелием.

Лазерная сварка титановых сплавов. Титановые сплавы характеризуются высокой прочностью, коррозионной стойкостью, малой плотностью, имеют очень высокую химическую активность в расплавленном состоянии к кислороду и водороду. Данные свойства создают трудности при сварке.

Свариваемые кромки тщательно очищаются (вплоть до фрезерования), травятся и т. д. Высокие эксплуатационные свойства шва достигаются очисткой и защитой зоны шва. Применяется гелий высокой степени чистоты. Защищается не только расплав, но и остывающие участки шва и околошовной зоны. Рекомендуется вести сварку на высоких скоростях (более 25 мм/с). Удельные энергозатраты при этом порядка 1 мм глубины проплава на 1 кВт.

3.4. Резка металлических и неметаллических материалов

3.4.1. Лазерная резка металлов

При лазерной резке можно использовать лазеры непрерывного действия и импульсно-периодического (ИПР).

В ИПР необходимая мощность значительно снижается, расплав удаляется дискретно и частично за счет механического импульса отдачи паров. Расчет уравнения баланса обычно проводят в испарительном режиме:

$$A_{ef} \cdot P_S = z_{liq} \cdot v_{wel} \cdot \left(d_b + 2\sqrt{\frac{\alpha \tau_i}{G}} \right) \cdot \rho \cdot [c(T_{boil} - T_0) + H_{evap} + H_{liq}]. \quad (3.16)$$

Структура реза даже при непрерывном режиме лазера в общем случае бороздчатая (рис. 3.12).

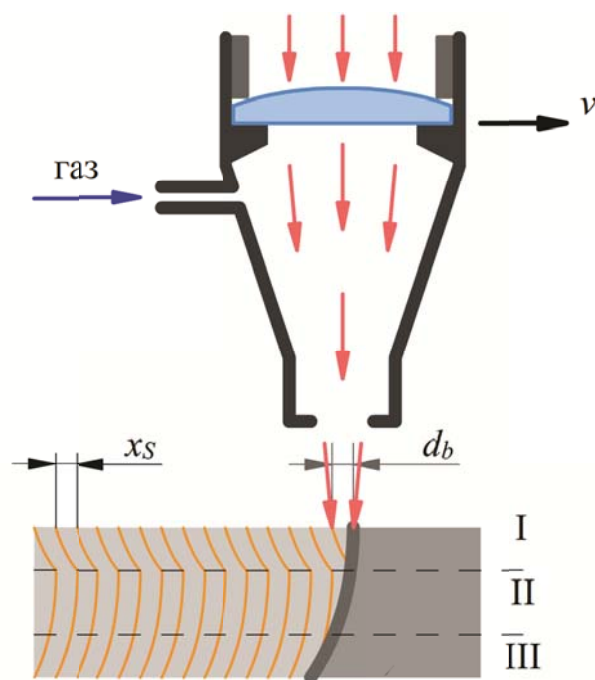


Рис. 3.12. Схема газолазерной резки (I, II, III – зоны реза)

В зоне I борозды образуются из-за периодичности возникновения расплава. В зоне II расплав идет непрерывно под действием проникающей части пучка, но удаление продуктов струей кислорода дискретно. Наличие зоны III указывает на процесс резки только за счет окисления в струе кислорода. Во всех зонах наблюдаются борозды, которые ухудшают качество реза. Это нестационарный режим. Существует стационарный режим, при котором борозды отсутствуют. Здесь скорости плавления металла в направлении реза и скорости его удаления равны. Это достигается подбором мощности, скорости и глубины реза. Высокое качество реза получается в диапазоне некоторых скоростей. При скоростях реза < 10 мм/с невозможно получить гладкий (без борозд) рез.

Качество резки оценивается по следующим показателям: ширина реза, шероховатость (борозды), наличие грата, ширина зоны термического влияния, перпендикулярность кромок.

С точки зрения практики интерес представляет область режимов качественной резки и область максимальной производительности при любом (даже плохом) качестве реза. Для металлов наибольшее влияние

на глубину реза z_{cut} оказывает скорость, затем мощность излучения и давление продуваемого газа, что подтверждают экспериментальные зависимости (рис. 3.13–3.16).

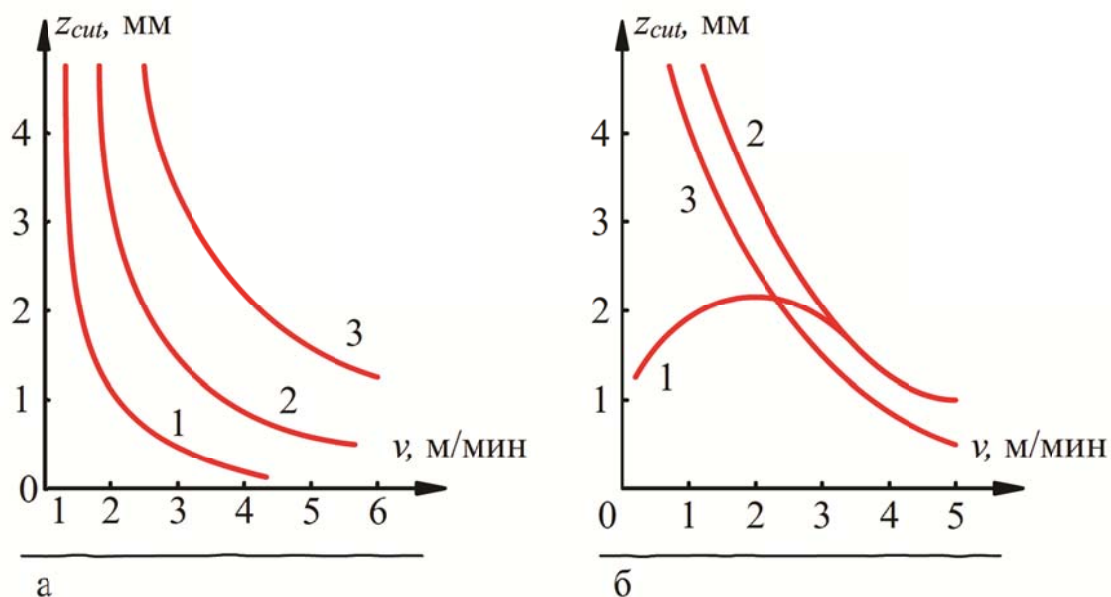


Рис. 3.13. Влияние скорости обработки на глубину и качество реза при различных условиях фокусировки:

а – качественная резка углеродистой стали;
 б – резка коррозионно-стойкой стали;
 1 – $d_b = 0,4$ мм; 2 – $d_b = 0,4$ мм; 3 – $d_b = 0,65$ мм

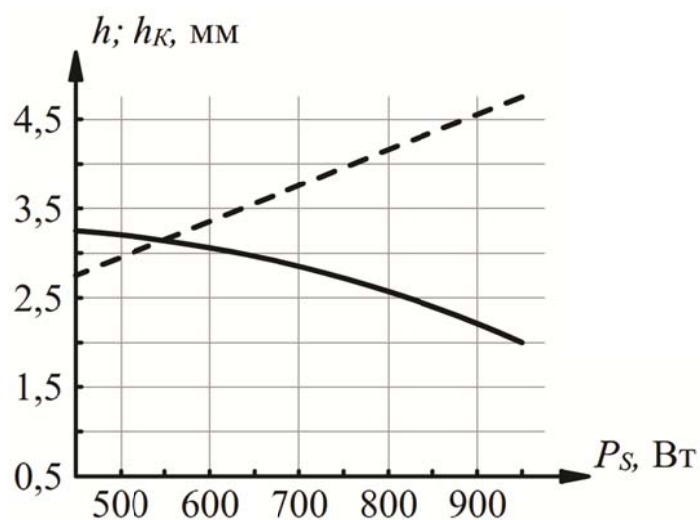


Рис. 3.14. Зависимость глубины реза коррозионно-стойкой стали от мощности лазера при скорости 0,5 м/мин.

Сплошная линия – качественный рез,
 пунктирная линия – максимально глубокий рез

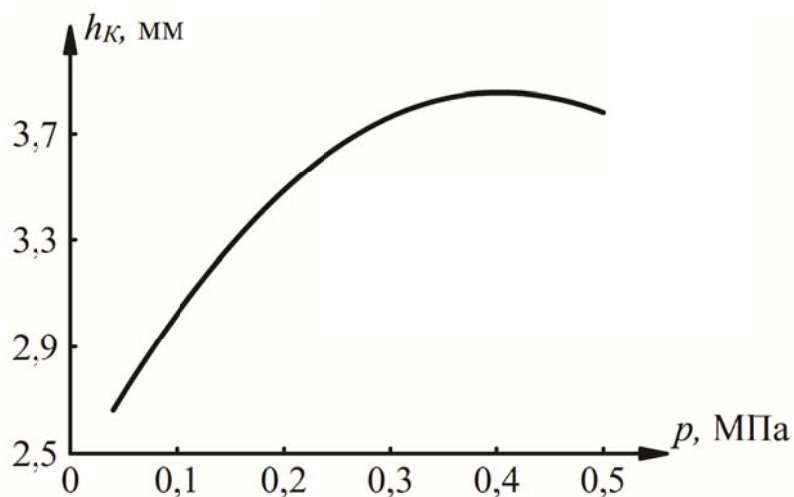


Рис. 3.15. Влияние давления подаваемого в резак кислорода на глубину реза в углеродистой стали

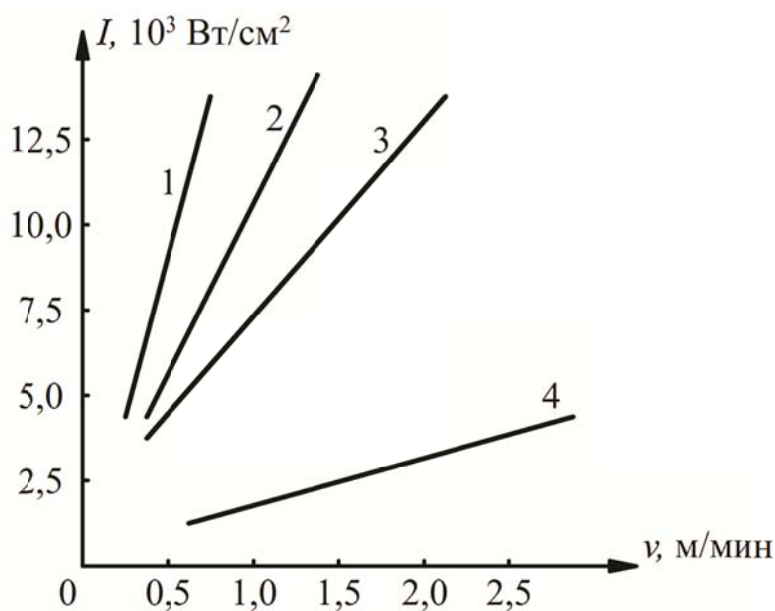


Рис. 3.16. Зависимость верхнего предела интенсивности излучения от скорости резки, обеспечивающей качественную резку различных материалов: 1, 3 и 4 – углеродистые, коррозионно-стойкие стали и титановые сплавы в среде кислорода; 2 – титановые сплавы в среде инертных газов

Газолазерная резка ИПР имеет особенности. Например, чем выше частота следования, тем меньше шероховатость. В ИПР бороздки должны быть больше выражены из-за дискретности переноса расплава.

При раскрое тонких листов качество высокое и ширина реза не зависит от скорости. При частоте порядка 400 Гц; $0,5 < \tau_i < 2,5$ мс; $0,5 < W < 5,0$ Дж; $G > 2$ скорость реза тонкой пластины $v = 20$ мм/с. Производительность можно повысить увеличением частоты.

С увеличением v и d_b глубина z реза уменьшается. Это справедливо при резке углеродистых сталей. При резке нержавеющей стали повышение q_s не всегда целесообразно. Заглубление фокуса $\Delta f = \pm 1$ мм ($f \approx 100$ мм) существенно не влияет на параметры резания, но при толстых образцах лучше заглублять на 1...2 мм. Наличие грат на нижней кромке реза сильно снижает его качество (грат образуется из застывших капель и окислов). На углеродистых сталях в режимах качественного реза (малая шероховатость, без бороздок) грат почти не наблюдается, а в высокопроизводительных режимах его много. При резке нержавеющей стали и титана грат образуется на любых режимах резки, но при качественной резке его меньше.

В табл. 3.3 представлены режимы лазерной резки металлов в среде различных газов.

Таблица 3.3

Режимы резки металлов

Газ	Материал	Мощность лазера, кВт	Скорость резки, м/мин	Толщина материала, мм	Ширина реза, мм
O ₂	Низкоуглеродистая сталь	0,1	1...1,6	1	—
		1,0	1,5...1,8	3	—
		2,0	5,0...7,0	2	—
		0,9	1,0...1,3	6	—
	Углеродистая сталь	1,5	1,0	5,2	0,51
		1,5	8,0	1,0	0,37
	Коррозионно-стойкая сталь	0,9	1,2...1,6	3	—
		0,3	2,3...2,7	0,5	—
		2,0	1,5...2,0	6,5	—
O ₂	Алюминиевый сплав	3,0	1,5	5,0	1,0
N ₂		4,0	2,7	4,0	0,5
Воздух	Титаниевый сплав ОТ-4	2,0	12,0	1,2	—
O ₂		0,6	2,5	15,0	—
		0,25	2,8	6,3	1,02
O ₂	Ni-сплав	2,0	7,9	1,0	—
O ₂	Вольфрам	4,0 (3...5)	0,3 (0,5)	3,0 (3,0)	1,0 (1,0)
Ar 0,3 МПа	Титан	1,5	2,2 (0,5)	2,0 (2,0)	0,4 (0,34)
O ₂	Алюминий	1,5	0,5	2,0	0,34
O ₂	Медь	2,0	1,1 (0,21)	1,0 (3)	0,46 (0,67)

Общая оценка газолазерной резки металлических материалов показывает, что прочность и качество выполняемых резов при обработке на оптимальных режимах соответствует высшему классу.

3.4.2. Лазерная резка неметаллов

Особенностью неметаллических материалов является их низкая температуропроводность, которая по сравнению с металлами составляет $\sim 10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$. Если длительность воздействия порядка $10^{-1} \dots 10^{-2} \text{ с}$, то глубина прогрева $2\sqrt{\alpha\tau_i} \sim 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ см}$.

Поглощательная способность A_{ef} для излучения CO_2 -лазеров практически для всех неметаллов высока (то же и для Nd-лазеров при полубесконечном слое), показатель поглощения для CO_2 -лазеров составляет $\sim 10^3 \text{ см}^{-1}$, а глубина проникновения света $z_{ef} \approx 1/\mu = 10^{-3} \text{ см}$.

Резка проводится преимущественно в испарительном жестком режиме, но в продуктах разрушения могут быть окислы, сажа, аэрозоль, шлак. Разогрев и испарение вещества возможны при потоках $q_s \sim 10^3 \dots 10^4 \text{ Вт/см}^2$.

Над поверхностью образуется эрозионный факел, который экранирует обрабатываемую поверхность. Поэтому при резке необходима подача газа, который разогревается факелом и углубляет рез, а также выдувает продукты разрушения из реза. Сопло изготавливается так, что скорость газа на его выходе близка к звуковой.

При резке большинства диэлектриков для поддува используется сжатый воздух. Применение инертных газов неэффективно. Применение кислорода приводит к обгоранию кромок реза.

Уравнение баланса имеет вид:

$$A_{ef} \cdot P_s = z_{liq} \cdot v_{wel} \cdot \left(d_b + 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{G}} \right) \cdot c\rho \cdot T_{distr}, \quad (3.17)$$

где T_{distr} – температура разрушения материала.

Обычно $H_{distr} = c \cdot T_{distr}$ называют удельной теплотой разрушения. Для многих материалов она известна (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Режимы резки неметаллов

Материал	текстолит	сосна	дуб	оргстекло	стекло
H_{distr} , кДж/г	50,0	0,9	5,4	2,0	31,0

Для излучения неодимового лазера некоторые диэлектрики прозрачны, точнее μ может достигать значений $10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ см}^{-1}$, а проникно-

вание луча $\sim 10^4 \dots 10^5$ см. Резка таких материалов затруднена без специальных мер, а то и невозможна. Кроме того, некоторые материалы (стеклопластик, керамика) могут рассеивать свет, некоторые хрупки и их резка также осложняется. Однако отсутствие механического контакта при лазерной обработке позволяет проводить раскрой мнущихся материалов (кожа, ткани).

При резке слоистых пластиков (это в первую очередь текстолит и гетинакс) по краям реза возникает зона обугливания (рис. 3.17).

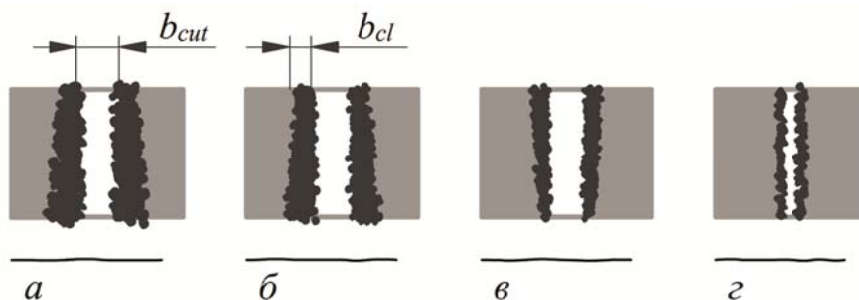


Рис. 3.17. Зависимость ширины реза b_{cut} и зоны обугливания b_{cl} в стеклотекстолите ($h = 5$ мм; $P_S = 2$ кВт) от скорости резки:
а – 6,6 мм/с; б – 16,6 мм/с; в – 25 мм/с; г – 33 мм/с

Влияние мощности излучения на глубину реза z_{cut} приведено на рис. 3.18.

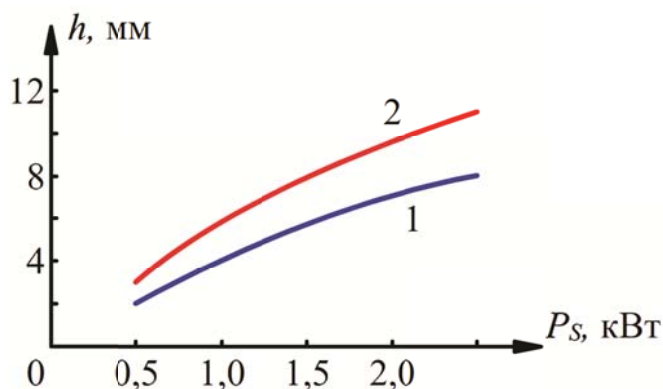


Рис. 3.18. Зависимость глубины реза материала от мощности излучения ($v = 10$ мм/с; $f' = 160$ мм):
1 – стеклотекстолит; 2 – гетинакс

При возрастании мощности лазерного излучения увеличивается не только глубина реза z_{cut} , но и его ширина b_{cut} и ширина зоны обугливания b_{cl} (рис. 3.19).

Качественный рез получается при определенных мощностях P_S и скоростях резки v_{cut} , которая должна быть не менее 5 мм/с.

Резка кварцевого стекла не вызывает затруднений. При разрушении идет возгонка окиси кремния и жидкая ванна расплава практически отсутствует, т. е. $H_{distr} = c \cdot T_{distr} \approx 45$ кДж/г. При $P_S = 200$ Вт, $d_b = 0,3$ мм, $z_{cut} = 4$ мм ширина реза составит $b_{cut} \approx 1$ мм. Кварцевое стекло имеет высокую теплопроводность и режется, как металл.

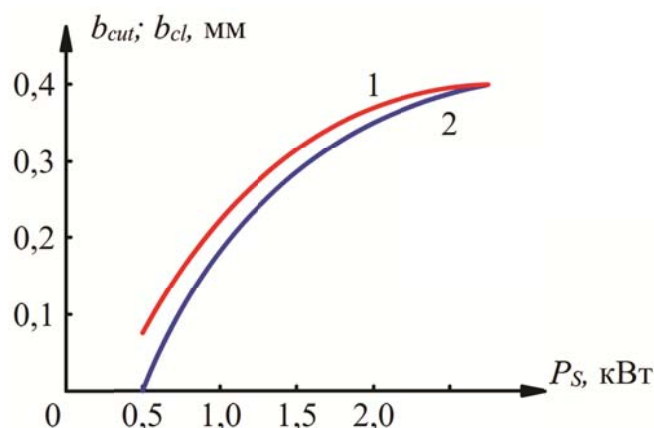


Рис. 3.19. Зависимость ширины реза (1) и зоны обугливания (2) от мощности излучения для стеклотекстолита

Оргстекло (ПММА – полиметилметаакрилат) режется достаточно легко, т. к. $H_{distr} = 2$ кДж/г. Как и для других диэлектриков, отражение от боковых стенок невелико, и волноводный эффект отсутствует. Поэтому, чем меньше угол схода лучей, тем глубже рез. Однако применение длиннофокусных линз приводит к увеличению d_b .

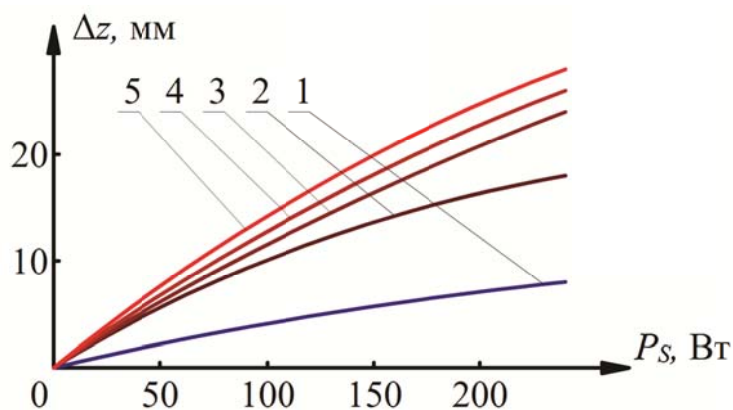


Рис. 3.20. Зависимость глубины реза z_{cut} в оргстекле от мощности лазера и фокусного расстояния объектива:
 $1 - f' = 50$ мм; $2 - f' = 100$ мм; $3 - f' = 150$ мм; $4 - f' = 200$ мм; $5 - f' = 250$ мм

Резка горных пород сложна, поскольку μ колеблется в больших пределах. Поглощающий слой от 0,1 до 1,0 мм, а H_{distr} достаточно высока.

Далее в табл. 3.5 приведены данные по режимам резания некоторых неметаллических материалов.

Таблица 3.5

Режимы резания некоторых неметаллов

Материал	P_s , кВт	z_{cut} , мм	v_{cut} , м/мин	b_{cut} , мм
Оргстекло	0,4	9,0	1,3	—
	0,9	3,0	0,5	—
Винипласт	0,5	4,0	2,0	1,5
Фанера	0,5	5,0	2,0	1,5
	0,85	6,4	5,4	—
Стеклоткань	0,8	0,8	6,5	1,0
	4,0	10,0	3,0	2,0
	0,8	5,0	0,75	—
Стекло	0,2	3,0	0,006	1,8
	5,0	3,2	4,56	—
	0,015	2,5	0,1	—

Резка обычного стекла значительно сложнее резки кварцевого. Используется два способа резки.

В первом стекло нагревается до температуры $\sim 600^\circ\text{C}$ в печи, приобретает пластичность и проводится газолазерная резка без заметной возгонки материала (расплав выдувается струей газа). Затраты при этом составляют $\sim 80 \text{ кДж/см}^3$ (с возгонкой – до 400 кДж/см^3). Газолазерной резкой можно резать стекло толщиной 4 мм со скоростью 23 мм/с при $P_s = 0,4 \text{ кВт}$.

Второй способ – термораскалывание. Это локальный нагрев поверхности, когда термонапряжения превышают предел прочности материала. При определенных условиях возникшая трещина следует на некотором расстоянии за лучом лазера. Отставание трещины от луча определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{v_{cut} \cdot z_{cut}}{4\alpha}. \quad (3.18)$$

Качественное термораскалывание обеспечивается, когда Δl по порядку величины равно толщине z_{cut} разделяемого материала.

Скорость реза зависит как от толщины материала, так и от мощности ЛИ (рис. 3.21).

Мощность, необходимая для термораскалывания со скоростью v_{cut} при $A_{ef} = 1$, определяется из следующего соотношения:

$$P_s = 2,85 \cdot T_g \sqrt{z_{cut}^3 \cdot \lambda_T \cdot c \rho \cdot c_{cut}}, \quad (3.19)$$

где T_g – температура стеклования.

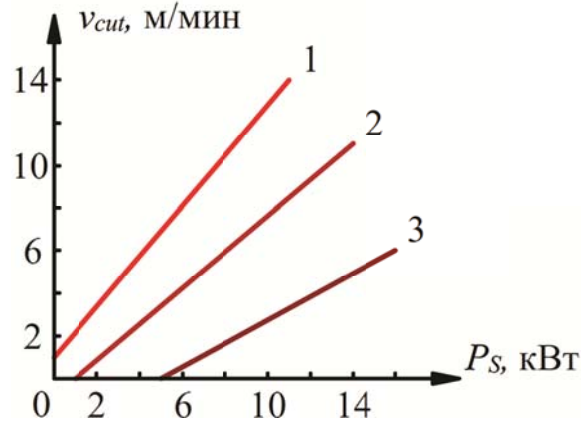


Рис. 3.21. Зависимость максимальной скорости резки листового стекла от мощности лазерного излучения:
1 – толщина 1,6 мм; 2 – толщина 2,3 мм; 3 – толщина 3,25 мм

3.5. Размерная обработка

Размерная обработка – это прошивка отверстий или углублений. Она происходит при очень высоких q_S . Применяется для создания подшипников, фильер, перфорирования, скрайбирования и пр. Размерная обработка металлов и неметаллических материалов имеет, как и при резке, свои особенности.

3.5.1. Сверление отверстий в металлах одиночным импульсом

При $q_S \sim 10^6 \dots 10^7$ Вт/см² в продуктах разрушения достаточно много жидкой фазы (особенно при большой теплопроводности материала и большой разнице между T_{evap} и T_{liq}). Расплав и конденсат в виде капель забрасывают вход лунки, ухудшая качество.

Уравнение баланса для этого случая имеет вид:

$$A_{ef} \cdot P_S \cdot \tau_i = \frac{\pi z_{hole} \cdot (d_b + 2\sqrt{\alpha \tau_i})^2}{4} \cdot \rho \cdot [c \cdot (T_{boil} - T_0) + H_{liq}], \quad (3.20)$$

где z_{hole} – глубина отверстия. В данном режиме энергозатраты минимальны.

При повышении q_S до 10^7 Вт/см² и более процесс происходит в испарительном режиме. Чем выше q_S , тем выше качество процесса. Однако при $q_S > 10^8$ Вт/см² возникает экранировка плазмой канала. Возможны высокие термические напряжения, которые могут привести к растрескиванию лунки. При высоких q_S уравнение баланса видоизменяется:

$$A_{ef} \cdot W_S \cdot \tau_i = \frac{\pi z_{hole} \cdot (d_b + 2\sqrt{\alpha \tau_i})^2}{4} \cdot \rho H_{evap}. \quad (3.21)$$

Пренебрегая $2\sqrt{\alpha\tau_i}$ по сравнению с d_b , можно приближенно оценить скорость фронта испарения:

$$\begin{aligned}\frac{A_{ef} \cdot W_S}{\tau_i \cdot d_b \cdot \pi/4} &= \frac{z_{hole}}{\tau_i} \cdot \rho \cdot H_{evap}; \\ A_{ef} \cdot q_S &= \frac{z_{hole}}{\tau_i} \cdot \rho \cdot H_{evap}; \\ \frac{z_{hole}}{\tau_i} &\approx v_{evap} = \frac{A_{ef} \cdot q_S}{\rho \cdot H_{evap}}.\end{aligned}\quad (3.22)$$

Из уравнений баланса видно, что глубина отверстия z_{hole} пропорциональна энергии импульса, т. е. произведению мощности P_S на длительность τ_i . Экспериментальные зависимости этот вывод не подтверждают (рис. 3.22).

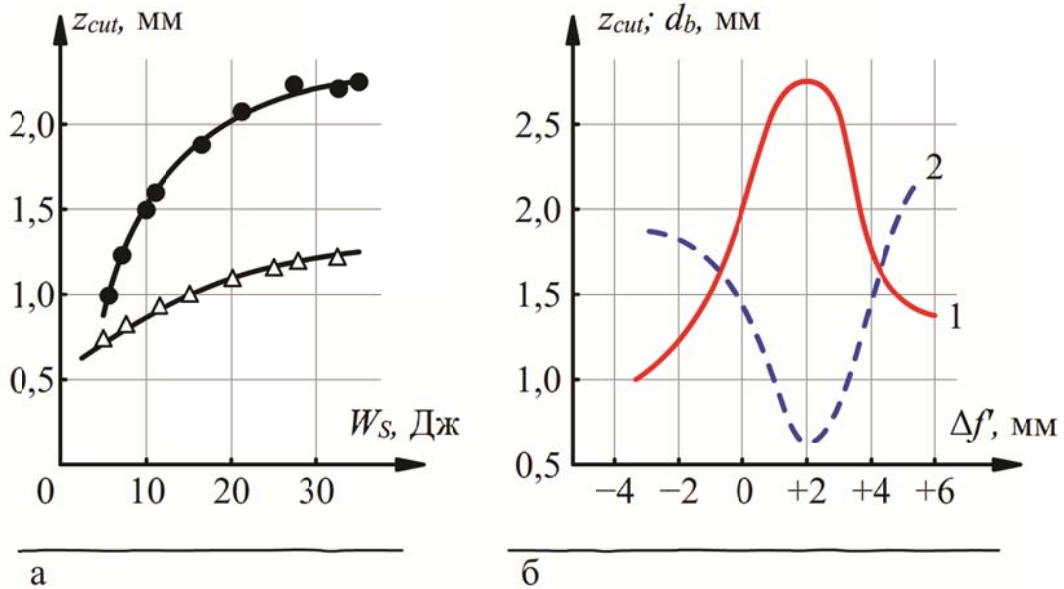


Рис. 3.22. Зависимости глубины отверстия z_{hole} (●) и ширины b_{hole} (Δ) от энергии импульса (а) и заглубления фокуса $\Delta f'$ (б) при действии излучения твердотельного лазера

Как правило, при прошивке отверстий не используется удаление продуктов разрушения газовым потоком, особенно если отверстие не сквозное. Возникает проблема эффективности энергозатрат. Если τ_i достаточно мало и оптический разряд в окружающем газе за время τ_i не возникает, то A_{ef} может достигать высоких значений. Это возможно в ИПР воздействий.

Важным параметром является отношение длины отверстия l_{hole} к его диаметру d_{hole} . Глубину z_{hole} определяет не энергия, а ее плотность,

поэтому выгоднее для увеличения l_{hole}/d_{hole} воздействовать пятном малого диаметра.

Таблица 3.6

Размеры отверстий при селекции угловых мод дифракмированием для Ст45

W_s , Дж	d_b , мм	l_{hole} , мм	d_{hole} , мм	l_{hole}/d_{hole}
42,2	12	2,2	0,8	2,3
21,4	6	2,3	0,6	3,8
6,0	3	2,1	0,25	8,4

Таблица 3.7

Зависимость глубины отверстия z_{hole} и диаметра d_{hole} от τ_i для материала Ст 45

W_s , Дж	τ_i , мм	z_{hole} , мм	d_{hole} , мм	z_{hole}/d_{hole}
5,4	0,25	1,2	0,452	2,9
5,7	0,75	1,8	0,36	4,4
5,0	1,15	1,6	0,26	6,1

На рис. 3.23 показан профиль отверстия в Ст3 при различных положениях линзы с $f' = 39$ мм.

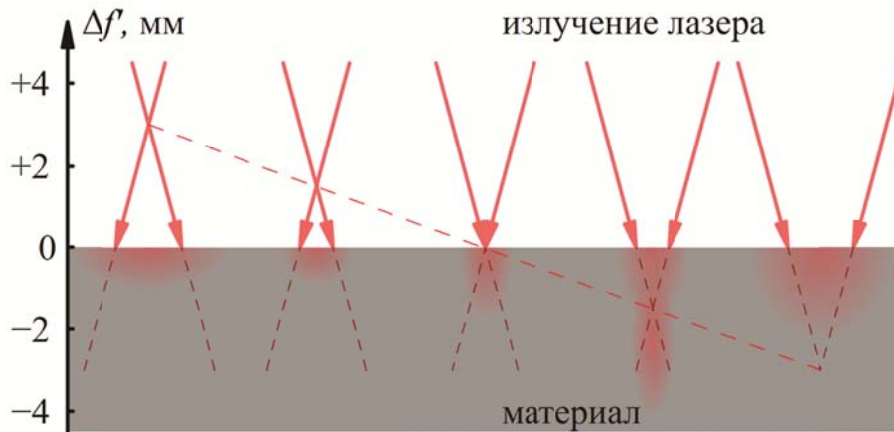


Рис. 3.23. Изменение профиля отверстий в Ст3 в зависимости от фокусирования излучения при обработке импульсами ЛИ

3.5.2. Сверление отверстий в металлах в импульсно-периодическом режиме излучения твердотельных лазеров

При ИПР лунка растет в глубину постепенно в результате послойного испарения материала каждым импульсом. Глубина z_{hole} определяется суммарным действием (энергией) серии импульсов, а диаметр — параметрами

отдельного импульса. Если импульс достаточно короткий, то толщина снимаемого слоя мала, нет растрескивания, а диаметр отверстия d_{hole} приближается к d_b . Особенно это важно, когда материал хрупкий.

Различают два режима обработки в ИПР. В первом стараются получить наиболее глубокое отверстие. Во втором – высокое качество отверстия.

В первом случае длительность импульса выбирают такой, чтобы максимально глубоко проплавить материал. Экспериментальные данные по параметрам полученных в углеродистой стали отверстий приведены для ИПР на рис. 3.24.

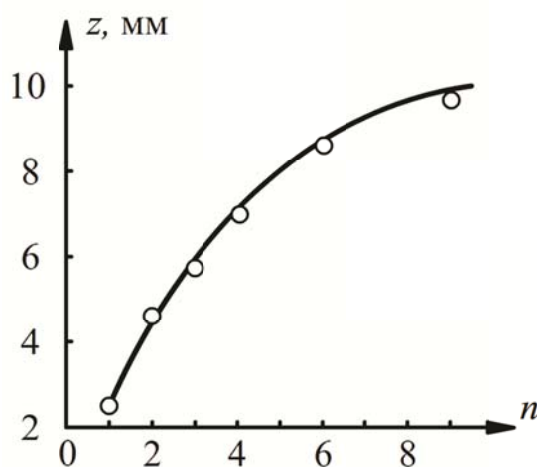


Рис. 3.24. Зависимость глубины отверстия z от количества импульсов n (твердотельный лазер: $W = 40$ Дж, $\tau_i = 1,3$ мс, материал – Ст45)

Во втором случае требуемая энергия и длительность ЛИ значительно меньше и находятся из условия:

$$\tau_i \leq \frac{d_b^2}{4\alpha}, \quad z_{hole}(t) \leq d_b, \quad (3.23)$$

т. е. уход тепла в боковые стенки незначителен и снимаемый слой меньше d_b (плоский случай). Всегда в ИПР глубина z_{hole} оказывается большей при равных энергетических затратах (за счет роста кинжалности).

На рис. 3.25 приведена зависимость глубины z_{hole} от d_b для ИПР CO_2 -лазера при сверлении нержавеющей стали.

Поскольку частота следования определяет среднюю мощность излучения (при заданной W), то зависимость z_{hole} лучше строить от частоты F или P_s (рис. 3.26, 3.27).

Из рисунков видно, что глубина сверления определяется не только средней мощностью, но и скважностью. Чем больше скважность (энергия импульса), тем больше z_{hole} .

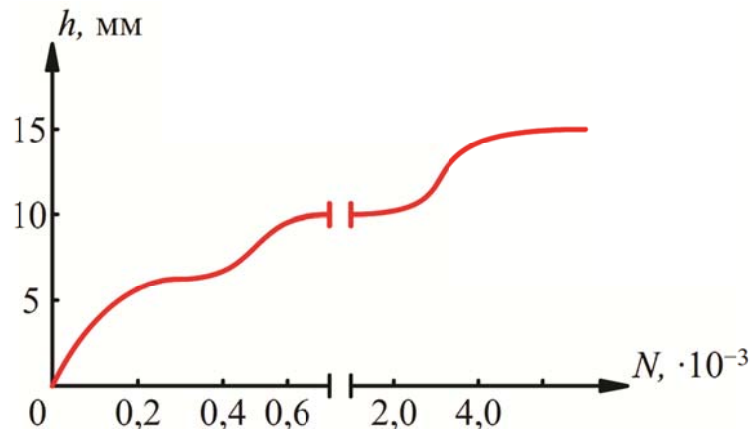


Рис. 3.25. Зависимость глубины отверстия z_{hole} в коррозионно-стойкой стали от числа импульсов при частоте 200 Гц, $W = 2$ Дж, $\tau_i = 80$ мкс

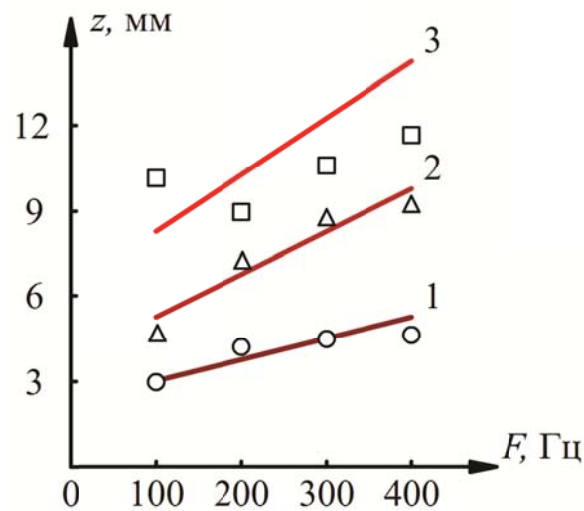


Рис. 3.26. Зависимость максимальной глубины отверстия от частоты для различных энергий импульса:
1 – $W = 1$ Дж; 2 – $W = 2$ Дж; 3 – $W = 3$ Дж

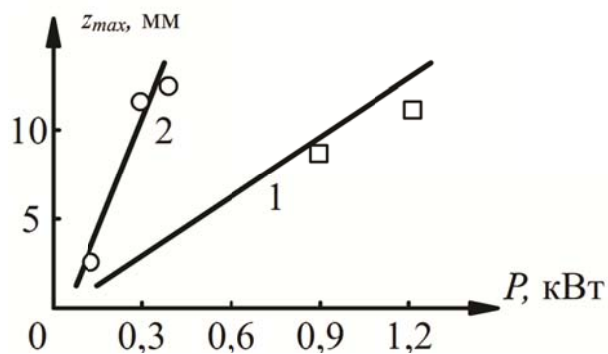


Рис. 3.27. Зависимость максимальной глубины отверстия от средней мощности ЛИ при сверлении в атмосфере гелия при 100 Гц (1) и 400 Гц (2)

В ИПР становится реальным получение отверстий с соотношением $z_{hole}/d_{hole} \geq 50$ при диаметре отверстия $d_{hole} = 4 \dots 100$ мкм (для алюминия, кремния, германия, цинка, молибдена, рубина и керамики).

Для получения отверстий большого диаметра ($d_{hole} > 1$ мм) необходимо применять аксиконные системы. Это особенно эффективно на тонких пластинах. Для повышения точности обработки образец располагают в плоскости изображения выходного зрачка лазера. Хорошее качество получается при облучении в режиме световой трубки.

3.5.3. Сверление отверстий в диэлектриках

При сверлении отверстий в диэлектриках наблюдаются известные по газолазерной резке особенности физической картины нагрева и технологического режима. Так же легко возникает оптический разряд, возможно проникновение луча на большую глубину (прозрачные диэлектрики), диффузное рассеяние, хрупкость образцов и пр.

Однако лазерное сверление часто бывает выгодно или незаменимо в очень твердых материалах, таких как стекло, рубин, алмаз. Плотности мощности могут достигать значений $10^7 \dots 10^8$ Вт/см² (например, при сверлении алмаза). Рассмотрим виды лазерного сверления.

Сверление одиночными импульсами. Уравнение баланса записывается в испарительном режиме и в пренебрежении к уходу тепла в материал $2\sqrt{\alpha\tau_i}$:

$$A_{ef} \cdot P_s \cdot \tau_i = z_{dril} \cdot \frac{\pi d_b^2}{4} \cdot \rho \cdot H_{evap}. \quad (3.24)$$

Чаше вместо H_{evap} применяется удельная теплота разрушения $H_{distr} = c \cdot T_{distr}$. Отсюда глубина отверстия определяется как

$$z_{dril} = \frac{4A_{ef} \cdot P_s \cdot \tau_i}{\pi d_b^2 \cdot \rho \cdot H_{distr}}. \quad (3.25)$$

В общем случае диаметр отверстия d_{dril} не равен d_b , поскольку в некоторых веществах возможно обгорание боковых стенок, а также влияние расходимости пучка в фокальной области $2\varphi_1$ (рис. 3.28). При этом если толщина пластины h_1 меньше длины каустики лазерного пучка, то отверстие имеет цилиндрическую форму. Если толщина пластины h_2 больше длины каустики, то на выходе появляется раструб.

Однако в некоторых материалах возможна автоканализация лазерного излучения по каналу разрушения, позволяющая получать глубокие отверстия (отражение от стенок лунки приводит к световодному эффекту). Автоканализация легко наблюдается в кварце, а в стекле затруднена

из-за жидкой ванны в лунке расплава (в кварце температуры плавления и возгонки близки). Эффект автоканализации позволяет получать сквозные отверстия в кварцевых пластинах толщиной до 100 мм.

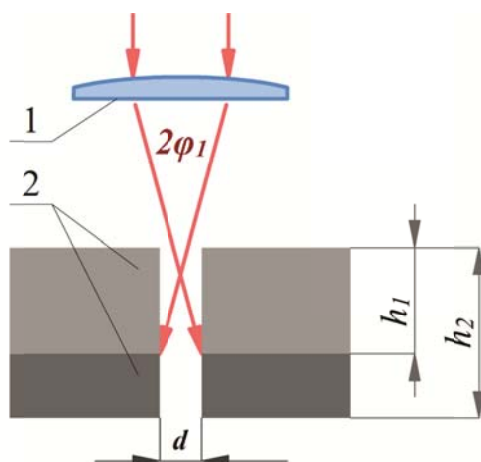


Рис. 3.28. Формирование отверстия и обгорание стенок в отсутствие отражения в диэлектрике (1 – объектив; 2 – материал)

В режиме одиночного импульса эффективность и точность сверления снижается из-за большого наличия жидкой фазы (особенно в мягком режиме). Высокое качество обеспечивается при сверлении испаряющихся (сублимирующих, возгоняющихся) материалов в жестком режиме.

Многоимпульсный метод обработки. Сверление одиночным импульсом, кроме низкого качества, может привести к растрескиванию и расколу образца (хрупкие материалы). Эффективным путем уменьшения нежелательных факторов является многоимпульсный метод обработки. Суть его в том, что отверстие формируют серией коротких импульсов, послойно испаряя материал. При этом полная глубина z_{dril} определяется суммарной энергией импульсов, а диаметр – параметром отдельного (усредненного) импульса.

Важная особенность многоимпульсной обработки – период следования импульсов больше времени остывания. Поэтому размер зоны термического влияния определяется длительностью отдельного короткого импульса. В этом режиме меньше доля расплава.

При очень коротких отдельных импульсах уменьшается влияние плазмы разряда в окружающем газе. Снимаемый слой Δz очень тонкий и термические напряжения в нем не способны образовать трещины.

Известно два режима многоимпульсного метода обработки:

- $\Delta z > d_b = d_{dril}$; $\Delta \tau_i > d_b^2 / (4\alpha)$ – режим для получения больших значений d_{dril} и высокой производительности;

- $\Delta z < d_b$; $\Delta \tau_i < d_b^2/(4\alpha)$ – режим высокого качества, где производительность увеличивают частотой следования импульсов.

Влияние энергетических параметров. Скорость роста лунки определяется величиной $A_{ef} \cdot q_s$. Поэтому обрезание диафрагмой периферии пучка и, следовательно, уменьшение энергии не приводит к уменьшению d_{dril} , а улучшает качество.

Влияние условий фокусировки приведены на рис. 3.29.

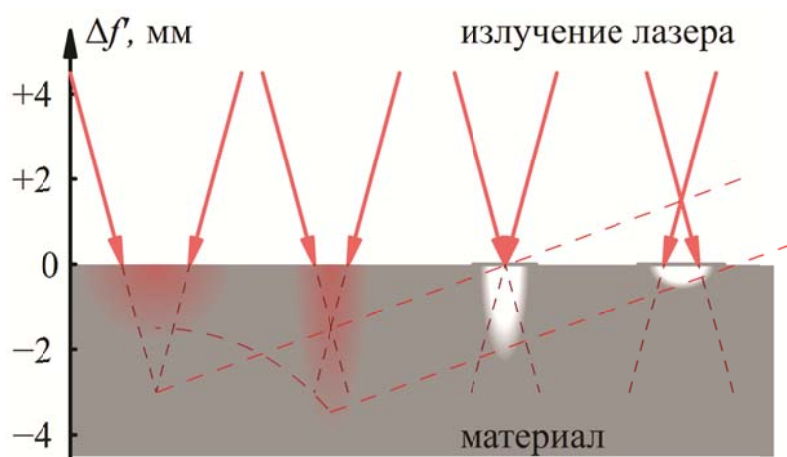


Рис. 3.29. Зависимость глубины отверстия от положения перетяжки пучка

Влияние временных параметров. В плавящихся материалах $\Delta \tau_i \approx 0,1 \dots 0,3$ мс. Если основной механизм разрушения – испарение, то $\Delta \tau_i \sim 1 \dots 3$ мс. Пиковый режим излучения благоприятен для сверления отверстий (выше A_{ef}).

Методы повышения точности и качества:

- улучшение параметров (оптимизация) лазерного пучка;
- оптимальное расположение детали в каустике пучка (достижение наибольшей равномерности плотности потока по поперечному сечению и по оси oz).

Установка линзы может быть в ближней и дальней зонах. Используются три основные схемы фокусировки:

- расположение поверхности детали в фокальной плоскости объектива;
- в плоскости изображения начала пучка (маски, диафрагмы);
- в цилиндрической световой трубке (рис. 3.30).

В световой трубке $d_b = d_f$, $z'_p = 2\varphi_0 \cdot f/d_0 = f/z_p$, $z_p = z_0 = d_0/2\varphi_0$. Таким образом, перетяжка является цилиндром, и толщина пластины обрабатываемого материала не должна превышать величину z'_p .

В некоторых случаях для повышения качества используют струю газа, особенно в случае возгорающихся материалов (древесина и пр.).

В этом случае обеспечивается защита оптики от действия продуктов разрушения.



Рис. 3.30. Формирование световой трубки

3.5.4. Технологические особенности размерной обработки

Лазерная прошивка позволяет получить отверстия диаметром до 0,5 мм и высотой до 5 мм. В зависимости от области поглощения можно использовать различные лазеры:

- рубиновым лазером пробивать отверстия в керамике, кремнии и германии с параметрами $d_{hole} = 10 \dots 100$ мкм и $z_{hole}/d_{hole} = 20 \dots 50$;
- CO_2 -лазером пробивать отверстия в большинстве материалов, включая кварц, ШГК и полупроводники;
- неодимовым лазером (при наличии пяти гармоник) можно обрабатывать также большой круг материалов.

Для получения отверстий больших диаметров используют следующие способы обработки:

- вращение детали по кругу со смещением оси вращения с осью пучка на величину радиуса отверстия;
- вращение линзы со смещением оси вращения относительно центра линзы;
- использование оксиконной схемы фокусировки (рис. 3.31).

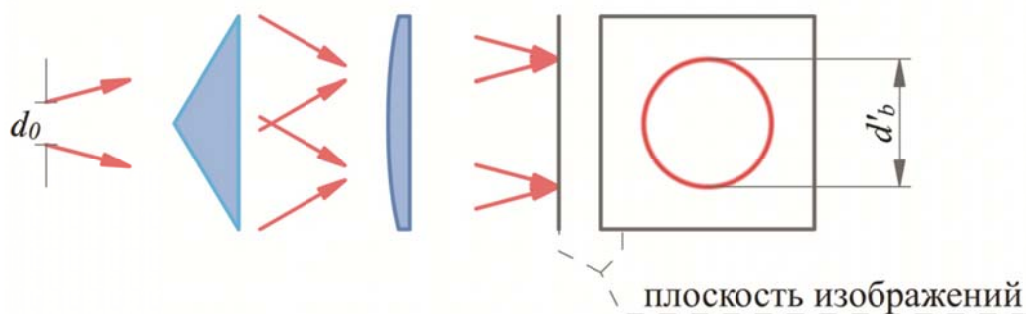


Рис. 3.31. Схема формирования световой нити диаметра d'_b для прошивки отверстия

Одним из важных параметров лазерной обработки является скорость сверления, которая различна для разных способов:

- электроэрозионный – 0,02 мм/с;
- электрохимический – 0,1 мм/с;
- ультразвуковой – 0,01...0,1 мм/с;
- лазерный – 1,0 мм/с.

Точные отверстия в алмазе сверлятся с помощью YAG:Nd-лазеров. Для сверления отверстий диаметром 0,01...2 мм необходим лазерный импульс с параметрами $W \sim 1$ Дж; $\tau_i \sim 0,2$ мс; $F = 5 \dots 10$ Гц.

Таблица 3.8

Параметры получаемых алмазных волок

Диаметр отверстия, мм	Толщина алмаза, мм	Число вспышек (импульсов)	Время обработки, мин
0,1	1	600	2,0
0,4	1	1200	6,3
0,95	1,5	3500	11,7

Для примера, механическая обработка (полное изготовление фильеры) требует времени от 2 до 7 часов.

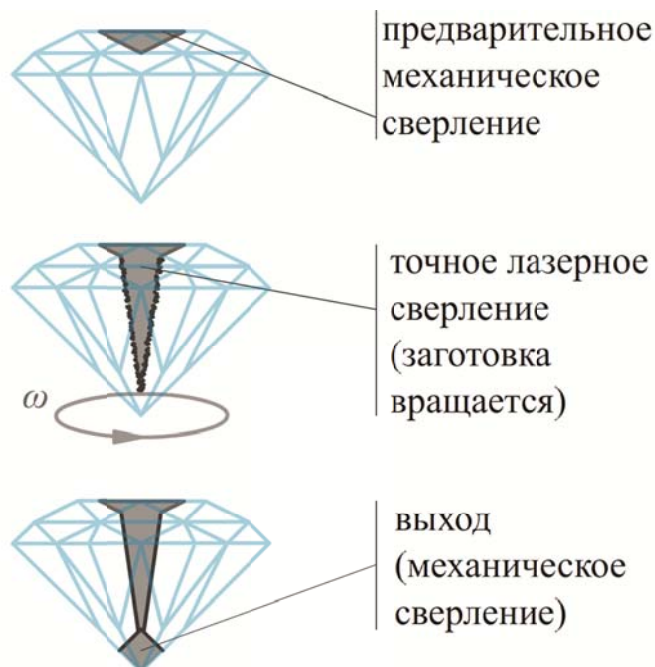


Рис. 3.32. Последовательность операций сверления алмазных волок

Лазерная обработка алмаза многоимпульсная. В зоне разогрева (рис. 3.33) образуется графит, что обеспечивает хорошее поглощение.

Данный режим обработки требует следующих параметров: $W \sim 0,1 \dots 1$ Дж; $F \sim 1$ Гц; $\omega \sim 10 \dots 20$ об/мин.

Можно обрабатывать входную и выходную распушки лазером (без механической обработки). Для верхней распушки глубиной 0,7 мм и входным диаметром 0,6 мм требуется 50...100 импульсов. Для рабочего отверстия (канала) диаметром 0,05 мм и глубиной 0,2 мм требуется 1–2 импульса.

Сверление часовых камней. Эта операция освоена и автоматизирована. На одно отверстие диаметром 0,05...0,08 мм в рубиновой заготовке часового камня толщиной 0,45 мм требуется 4–5 импульсов с параметрами $W = 0,2 \dots 0,3$ Дж, $F = 5$ Гц или 7–8 импульсов с параметрами $W = 0,1$ Дж; $F = 10$ Гц.

В керамике (глиноземной) для прошивки отверстий используются СО₂-лазеры. Сверление производят после обжига.

3.6. Маркировка и аморфизация поверхности

3.6.1. Лазерная аморфизация (остекловывание)

Эта технологическая операция близка по сути к лазерной закалке с той разницей, что при закалке после нагрева структура сплава имеет кристаллическое строение, а при аморфизации структура иная. Сравнительный анализ свойств кристаллических и аморфных сплавов показывает, что у аморфных сплавов выше прочность, коррозионная стойкость, пластичность и радиационная стойкость.

Аморфные металлические сплавы получают в существенно неравновесных условиях, которые достигаются путем охлаждения расплава с большими скоростями ($\sim 10^6$ °С/с и более). При лазерном воздействии скорости нагрева и охлаждения тем выше, чем жестче воздействие (высокие q_s и малые τ_i). При таком воздействии скорости охлаждения составляют $> 10^7$ К/с.

Аморфизацию можно осуществлять на сплавах, у которых отсутствует дальний порядок. Используются лазеры как с непрерывным режимом излучения, так и с импульсно-периодическим. В последнем случае скорости нагрева и охлаждения выше и легко достигают значений $> 10^{10}$ К/с при плотностях потока $q_s > 10^8$ Вт/см².

Основная особенность процесса аморфизации – за время остывания кристаллическая структура не успевает образоваться. Эксперименты показали, что такой режим можно обеспечить, применяя лазеры непрерывного излучения и импульсные от миллисекундного до наносекундного диапазона и подбирая определенные сплавы.

Следует отметить, что аморфная мелкодисперсная структура при аморфизации одновременно и упрочняется с тем отличием, что здесь закалка всегда происходит из жидкой фазы.

Положительные результаты получены на инструментальной стали (2,1 % С и 12 % Cr) с добавкой ниобия. Использовался CO₂-лазер с мощностью $P_s = 3$ кВт и диаметром пучка $d_b = 3$ мм. Скорость обработки составила $v = 20$ см/с.

Получены результаты по аморфизации поверхности чугуна. Использовался неодимовый лазер с энергией $W = 100$ Дж и длительностью импульса $\tau_i = 1,8$ мс. На поверхности наблюдался расплав и небольшой кратер. Это достаточно жесткий режим.

И, наконец, получена аморфизация на чистом Al в атмосфере воздуха под действием рубинового лазера при $\tau_i = 15$ нс, $H = 3,5$ Дж/см², $h = 15$ мкм (где h – толщина аморфного слоя).

Типичный профиль микротвердости при аморфизации приведен на рис. 3.33.

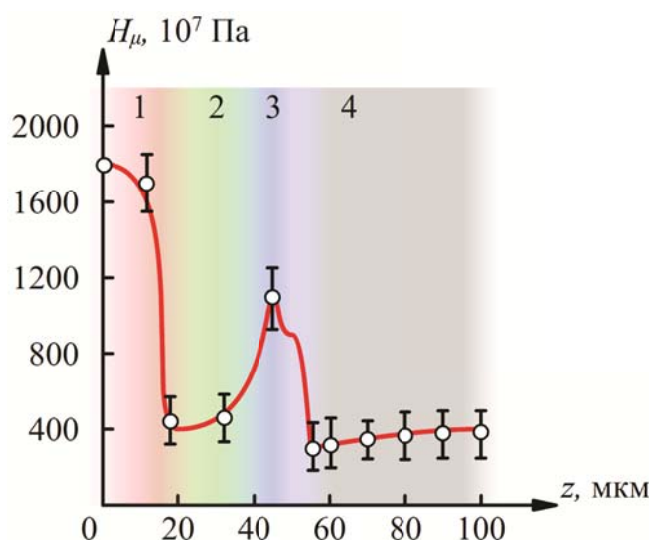


Рис. 3.33. Распределение микротвердости по глубине образца из инструментальной стали после лазерного оплавления: 1 – аморфная зона; 2 – дендритная зона; 3 – зона закалки; 4 – исходная структура

3.6.2. Лазерная маркировка (гравировка и надписи)

Для обозначения (маркировки) корпусов из пластмассы, пластинок из кремния, часов, нержавеющей стали, поршневых колец, подшипников, деталей машин и самолетов, рисунков на бронзе и прочего применяются лазерные системы выполнения надписей.

Для получения видимых надписей необходимо провести удаление поверхностного слоя образца толщиной от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Удаление желательно производить в испарительном режиме. В этом случае под удаленным слоем обнажается поверхность с диффузно-рассеивающими свойствами (белый цвет).

В то же время подбором интенсивности и длительности воздействия можно изменять цвет обрабатываемого участка (изменяя цвета побежалости за счет изменения температуры). Это дает возможность получать цветные надписи и рисунки.

При маркировке металлов используются импульсно-периодические YAG:Nd-лазеры с высокой частотой следования импульсов и модуляцией добротности резонатора ($q_s \approx 10^8 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau_i \sim 10^{-8} \dots 10^{-6}$ с).

Толщина снятого слоя за один импульс может находиться из следующего уравнения баланса:

$$A_{ef} \cdot P_s \cdot \tau_i \approx \frac{h \cdot \pi d_b^2}{4} \cdot \rho H_{evap} \cdot \quad (3.26)$$

Величина h в действительности может быть и большей за счет разрушения дна лунки ударными волнами, поскольку развиваемое давление на дно при $q_s = 2 \cdot 10^8$ Вт/см² составляет $p = 10^4$ МПа. При этом поверхность под удаленным слоем упрочняется (термоупрочнение + ударное упрочнение).

Технология процесса гравировки следующая: ИПР-лазер соединен с манипулятором или изделия, или пучка так, что рисунок получается в виде последовательности точек (пятен определенного размера). Маркировка может осуществляться и в непрерывном режиме в виде линейного раstra. Перспективным является проекционный способ, где формируется изображение маски за время действия одиночного импульса. Этот метод широко применяется в микроэлектронике.

Маркировка полупроводниковых материалов может производиться YAG-лазером. Для маркировки органических материалов эффективны СО₂-лазеры, с помощью которых получается эффектная гравировка на стекле, фарфоре, дереве.

Отечественная промышленность выпускала маркировочный комплекс «Квант-60». Это YAG:Nd³⁺-лазер с непрерывной накачкой и акусто-оптической модуляцией добротности резонатора. Режим работы односторонний, импульсный. Дефлектор электромеханический с неподвижным ТО. Параметры:

$\lambda_0 = 1,06$ мкм;

РП = 16 Вт;

скорость – 20 знаков/с;

размер шрифта – 0,5...100 мм;

поле маркировки – 100×100 мм².

Ассортимент маркировки: кремниевые пластины, фотошаблоны, микросхемы, транзисторы, кристаллы, шарикоподшипники, детали автомобилей и самолетов, инструмент.

4.1. Общая характеристика технологического лазера и систем на его основе

```
graph TD; A[Внешний запуск] --> B[Блок поджига]; B --> C[Квантрон]; C --> D[Блок измерения параметров импульса]; E[Внешнее охлаждение] --> F[Блок охлаждения]; F --> G[Пульт управления]; G --> H[Линия задержки]; H --> B; G --> I[Блок накопления энергии]; I --> J[Блок заряда]; J --> F; I --> K[Блок разряда]; K --> L[Квантрон]; G --> M[Линия задержки]; M --> N[Генератор модулирующих импульсов]; N --> L;
```

The diagram illustrates the control system for a laser with a quantum generator. It features several interconnected blocks: 'Внешний запуск' (External start) initiates the process, leading to 'Блок поджига' (Ignition block), which then connects to the 'Квантрон' (Quantum generator). The 'Квантрон' outputs to the 'Блок измерения параметров импульса' (Impulse parameter measurement block). 'Внешнее охлаждение' (External cooling) feeds into the 'Блок охлаждения' (Cooling block), which in turn controls the 'Пульт управления' (Control console). The 'Пульт управления' manages multiple components: it sends signals through 'Линия задержки' (Delay line) to the 'Блок поджига'; it controls the 'Блок накопления энергии' (Energy storage block), which is further divided into 'Блок заряда' (Charging block) and 'Блок разряда' (Discharging block), both influencing the cooling block and the 'Квантрон'; it also sends signals through another 'Линия задержки' to the 'Генератор модулирующих импульсов' (Modulating impulse generator), which also feeds into the 'Квантрон'.

Технологические лазеры должны отличаться гибкостью (необходима перестраиваемость на различные виды обработки), безотходностью, малыми размерами производственной линии, бесшумностью, надежностью и воспроизводимостью обработки, возможностью полной автоматизации.

108

в работе (высокий ресурс – не менее 10^4 ч), стабильность параметров излучения.

В импульсном режиме работы лазера стабилизация накачки задана обратной связью пульта управления с блоком заряда. В непрерывном режиме – с блоком разряда. В газовых лазерах используется другая блок-схема, а вместо квантрона используется газоразрядная камера с возможной прокачкой рабочего газа.

Лазерная технологическая установка (ЛТУ) – это ТЛ с внешним оптическим трактом, компонентом внешней оптики и запчастями.

Лазерный технологический комплекс (ЛТК) – это ЛТУ, снабженная манипулятором изделий или оптики, вспомогательной технологической оснасткой (ВТО) и общей системой управления для проведения технологических операций. В случае применения автоматизированного манипулятора и связи между системами управления лазером и манипулятором комплекс считается автоматизированным ЛТК (АЛТК). ЛТК и АЛТК разделяются на универсальные и специализированные.

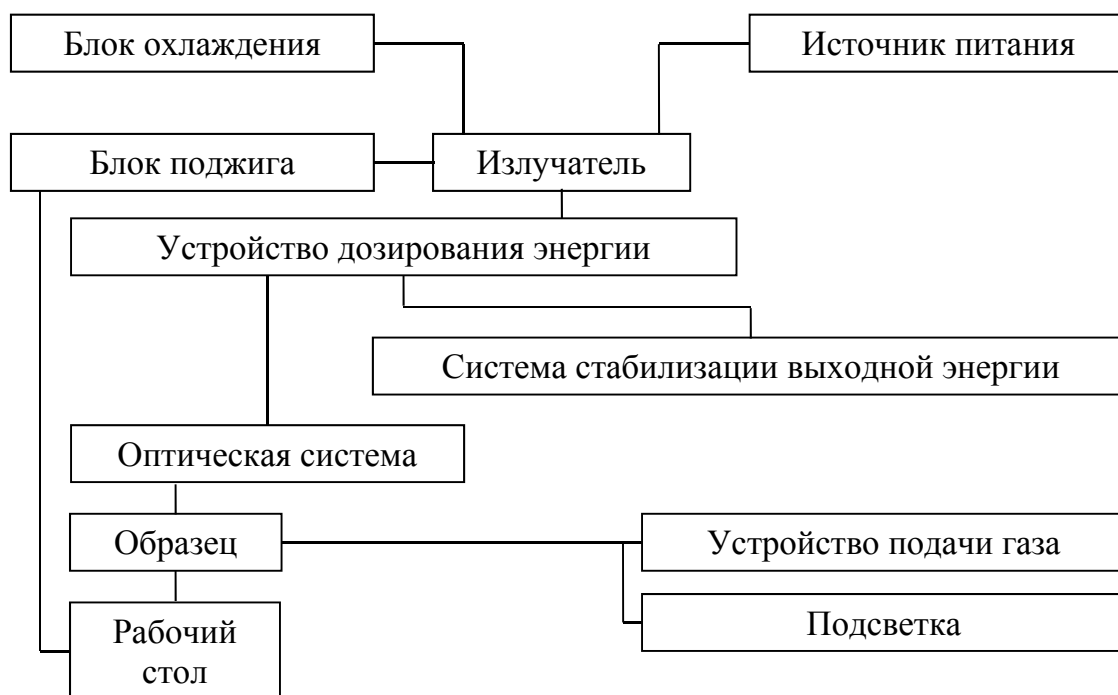


Рис. 4.2. Структурная схема ЛТК

ВТО может включать:

- оборудование для подготовки технологических операций (устройства нанесения покрытий, легирующих порошков, загрузчики деталей);
- датчики и устройства для контроля за ходом технологического процесса (визуализаторы ЛИ, пирометры, датчики зазора между обрабатываемым материалом и оптико-фокусирующей головкой);

- оборудование для подачи защитного или рабочего газа, водяного или воздушного охлаждения, зажимы, фиксаторы и др.;
- средства защиты и техники безопасности;
- системы контроля качества обрабатываемых изделий (твердомеры, микроскопы и др.).

Упрощенная структурная схема ЛТК приведена на рис. 4.2.

Основными параметрами, характеризующими ЛТК, следует считать энергию (мощность), длительность импульса и диаметр светового пятна на обрабатываемой поверхности. ЛТК может быть снабжена системой формирования и транспортировки пучка, системой расщепления пучка на несколько позиций и системой манипулирования (сканирования) пучка. Можно выделить два канала в оптике ЛТК – энергетический и канал визуального наблюдения.

Обычно в ЛТК используются мощные твердотельные или газовые лазеры, которые обеспечивают лазерные пучки с мощностью от 100 Вт до 5 кВт. Далее будет более подробно говориться именно об этих лазерах и их применении.

4.2. ЛТУ для размерной обработки в массовом машиностроении

4.2.1. Многофункциональные установки

*Лазерные комплексы для резки, сварки, термообработки и наплавки
(на основе CO₂-лазеров мощностью 1...5 кВт)*

Производитель: ИТПМ СО РАН – ГУ НИУ «Институт теоретической и прикладной механики СО РАН», РФ, г. Новосибирск.

Состав комплекса:

- лазер мощностью 1...5 кВт;
- технологический стол;
- автоматическая система управления.

Комплексы изготавливаются под конкретные задачи потребителя. Предлагаются промышленные лазерные технологии резки листовых материалов, сварки, термообработки и лазерно-порошковой наплавки.

Технологические возможности комплексов:

1. *Лазерная резка листовых материалов.* Обрабатываемые материалы: металлы, древесина, пластик, паронит, стекло, керамика и т. п. Площадь раскроя до 2,5 × 6 м. Точность обработки до 10 мкм при скоростях реза до 20 м/мин. Характерные толщины листов и режимы обработки для мощности лазера 1,5 кВт представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характерные толщины и скорости реза различных материалов

Материалы	Толщина, мм	Скорость резки, м/мин
Сталь	0,5...10,0	1...10
ДВП	5	6
ДСП	20	1,5
Высушенная сосна	20	2
Фанера	10	3,0...4,5
Паронит, асбест	4	1,5
Пластмасса	25	2
Стекло	1...8	0,5...5,0

2. *Лазерная сварка.* Комплекс позволяет сваривать с минимальным тепловым влиянием стальные детали с толщиной стенки до 10 мм при скорости до 5 м/мин.
3. *Лазерная термообработка.* Технология применяется преимущественно для получения самозатачивающегося инструмента. Лазерная термообработка применяется также в комплексе с механической обработкой после восстановления изношенных поверхностей валков прокатных станов методом лазерно-порошковой наплавки.
4. *Лазерно-порошковая наплавка.* Технология применяется для изготовления режущего инструмента с рабочими поверхностями высокой твердости. Технология изготовления режущего инструмента включает предварительную лазерную термическую обработку корпуса инструмента из конструкционной стали, наплавку твердого покрытия (до 10 мм), придание лазерным лучом нужной формы режущему инструменту. Твердость наплавляемого слоя 66...72 HRC.

*Лазерный комплекс «Славянка»
(на основе CO₂-лазера мощностью 13 кВт)*

Производитель: НИИЭФА – Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Ефремова, РФ, г. Санкт-Петербург.

Комплекс предназначен для размерной и разделительной резки, а также сварки и термоупрочнения.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 10,6 мкм;
- мощность излучения до 13 кВт;
- размеры зоны обработки 3200 × 6300 × 800 мм;
- погрешность позиционирования 200 мкм;
- потребляемая мощность 350 кВт.

Таблица 4.2

Технологические возможности комплекса

Вид обработки	Материал	Толщина, мм	Скорость, м/мин
Размерная резка	Сталь	5...25	0,3...1,2
	Дерево	30...70	0,6...2,4
	Оргстекло	10...40	2,4...9,0
Разделительная резка	Сталь	20...50	0,06...0,36
	Медь	2...10	0,06...0,6
	Al-сплавы	3...10	0,06...0,6
Сварка	Сталь + сталь	10...12	0,9...1,2
	Сталь + медь	8...12	0,6...0,9
	Медь + медь	6...10	0,3...0,6
Термоупрочнение	Сталь		50 мм ² /м

*ТУЛО-01 и ТУЛО-01М – технологические установки
лазерной обработки (на основе ТТЛ мощностью до 1 кВт)*

Производитель: Акционерная компания «Туламашзавод», РФ, г. Тула.

Технологические установки лазерной обработки ТУЛО-01 и ТУЛО-01М предназначены для контурной резки сложнопрофильных деталей из различных материалов и сплавов, а также сварки, термоупрочнения.

Основной технологической особенностью установок является возможность обработки листового материала больших нестандартных размеров (благодаря консольной компоновке станка).

Наличие программно-адаптивного следящего устройства позволяет вести обработку сложнопрофильных деталей с высокой точностью и качеством обработки по контуру.

Установки имеют оригинальную систему отсоса газов из рабочей зоны обработки. Наличие подвижного защитного устройства от ЛИ позволяет безопасно вести работу. Могут оснащаться технологическими лазерными модулями с непрерывным или импульсным режимами работы (по заказу).

Технические характеристики:

- твердотельный тип лазера;
- длина волны излучения 1,064 мкм;
- режим работы непрерывный и импульсный;
- мощность излучения 400...500 Вт для ТУЛО-01 и 500...1000 Вт для ТУЛО-01М;
- система управления – ЧПУ типа IBM PC;
- 3 управляемых координаты;
- рабочая зона 2000 × 1000 мм для ТУЛО-01 и до 3000 × 1500 мм для ТУЛО-01М;

- точность обработки $\pm 0,05$ мм;
- точность позиционирования 0,01 мм;
- толщина обрабатываемой детали при резке: 4...10 мм для стали и 2...7 мм для Al.

4.2.2. ЛТУ для резки и раскроя

Транспортируемый лазерный технологический комплекс для разделки металла (на основе CO₂-лазера мощностью 20 кВт)

Производитель: компания «Реновация», РФ, Москва.

Комплекс предназначен для резки металлических деталей толщиной до 0,3 м, разделки объемных металлоконструкций, резки неметаллических материалов (камень, бетон). Комплекс может применяться в атомном энергомашиностроении, судостроении, автомобилестроении, промышленности строительных материалов и в металлургическом производстве. Гибкость управления позволяет полностью автоматизировать технологический процесс резки, а также транспортировать ЛИ на расстояние до 150 м и распределять излучение на несколько технологических постов. Габариты комплекса позволяют размещать его на железнодорожной платформе.

Технические характеристики:

- мощность излучения 205 кВт;
- расходимость излучения 1 мрад;
- рабочая зона $150 \times 5 \times 5$ м;
- диаметр сфокусированного луча 2 мм;
- потребляемая мощность 150...260 кВт;
- расход воды для охлаждения 1200 л/мин.

Лазерные комплексы на основе CO₂-лазеров мощностью 0,1 и 2 кВт

Производитель: НИИЭФА – Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Ефремова, РФ, г. Санкт-Петербург.

Предназначены для резки различных материалов. Управление комплексами осуществляется от IBM PC-совместимого компьютера.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 10,6 мкм;
- размеры зоны обработки 520×700 мм и 1700×1200 мм;
- мощность излучения 0,1 и 0,8 кВт (одномодовый), 2,2 кВт (многомодовый);
- погрешность позиционирования 10 и 60 мкм;
- потребляемая мощность 4 и 24 кВт.

Таблица 4.3

Технологические возможности при резке материалов

	Модель 1		Модель 2	
Материал	Толщина, мм	Скорость, м/мин	Толщина, мм	Скорость, м/мин
Сталь	–	–	1...5	0,6...1,8
Дерево	10...15	0,18...0,3	18...20	1,8...2,1
Оргстекло	1...20	0,12...0,9	3...20	0,9...7,2

4.2.3. ЛТУ для сварки и поверхностного термоупрочнения*Светолучевые и светолазерные установки для пайки и сварки*

Производитель: ОАО «НИИ технологии автомобильной промышленности», РФ, Москва.

Принцип работы установок основан на плавлении материалов под действием сфокусированного пучка света от мощного светового излучателя – дуговой ксеноновой лампы. При диаметре светового пятна 2...3 мм температура в зоне нагрева достигает 2500 °С.

Базовый универсальный комплекс состоит из светового излучателя, источника питания, блоков управления и водяного охлаждения.

Технологические возможности:

- сварка встык тонколистовых (0,5...1,0 мм) однородных и разнородных металлов и материалов (углеродистые и нержавеющие стали, Ni, Ti, Al, Cu и др. сплавы, неметаллические материалы – стекло, пластмасса, керамика и т. д.);
- наплавка износостойких и жаропрочных покрытий;
- пайка и термообработка металлов и материалов.

Таблица 4.4

Технические характеристики лазерной установки

Тип установки	Светолучевая	Светолазерная
Назначение	Пайка, термообработка	Сварка, наплавка
Диапазон регулирования температуры, °С	до 1000	до 2600
Электропитание (трехфазная сеть), В (Гц)	380/440 (50/60)	
Блок охлаждения	DELTATHERM-Тип LT	
Потребляемая мощность, кВт	15	45
Масса, кг	400	600
Среднее время безотказной работы, час	1000	1000
Срок службы, лет	6	6
Продолжительность нагрузки, %	85	85
Занимаемая площадь, м ²	3,5	12,5

4.3. ЛТУ для прецизионной обработки в приборостроении, электронике, специальном машиностроении, ювелирной промышленности и т. п.

Автоматизированная технологическая установка «Каравелла-1» на основе лазера на парах меди средней мощностью 15 Вт

Производитель: ФГУП «НПП “Исток”», РФ, г. Фрязино.

Установка предназначена для прецизионной обработки тонколистовых (0,5...1,0 мм) материалов. Спектр обрабатываемых материалов: тугоплавкие металлы (W, Mo, Ta), теплопроводные металлы (Cu, Ag, Al, Au), сплавы, полупроводники (Si, Ge, GaAs, SiC), диэлектрики, графиты, алмазы и пр.

Установка позволяет выполнять: сверление микроотверстий, прецизионную контурную резку, скрайбирование, фрезерование, модификацию приповерхностного слоя, формирование изображений в объеме прозрачных материалов (стекла, кварца, сапфира).

Состав установки:

- лазер на парах меди «Кулон-15»;
- система движения и управления с персональным компьютером;
- технологическая камера;
- оптическая система доставки и фокусировки пучка в зону обработки;
- система поддува технологического газа в зону обработки;
- система удаления продуктов разрушения из зоны обработки.

Технические характеристики:

- длины волн излучения 0,51 и 0,58 мкм;
- мощность излучения на выходе 2...15 Вт;
- частота повторения импульсов излучения 12...16 кГц;
- длительность импульса излучения по 0,5-уровню 10...15 нс;
- диаметр пучка излучения на выходе 141 мм;
- нестабильность средней мощности излучения в установившемся режиме за 1 час наблюдения < 5 %;
- энергия импульсов излучения ≥ 1 мДж;
- расходимость пучка излучения 0,1...0,3 мрад;
- фокусное расстояние объектива 70 мм;
- перемещение координатного стола в ху плоскости 150×150 мм;
- перемещение координатного стола по вертикальной оси 60 мм;
- максимальная скорость перемещения координатного стола ≥ 20 мм/с;
- погрешность позиционирования каждой оси при $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 1 мкм;

- увеличение комбинированной лазерной системы наблюдения до 800 крат;
- время готовности 60 мин;
- время непрерывной работы 16 ч;
- потребляемая мощность от сети (380 ± 38 В, $50 \pm 0,5$ Гц), 5 кВт;
- расход воды ≥ 25 л/мин;
- общие габаритные размеры $3000 \times 1700 \times 1350$ мм;
- масса ≤ 1150 кг;
- наработка на отказ ≥ 1000 ч;
- среднее время восстановления при замене активного элемента ≤ 4 ч;
- технический ресурс 5 лет;
- срок сохраняемости 5 лет.

Малогабаритная CO₂-лазерная технологическая установка «КВАРЦ»

Производитель: ФГУП «НПП “Исток”», РФ, г. Фрязино.

Установка предназначена для прецизионной размерной обработки диэлектрических (поликор, сапфир, керамика и т. п.) пластин толщиной до 1,5 мм. Состоит из CO₂-лазера, работающего в непрерывном или импульсно-периодическом режиме (модуляция тока разряда, модуляция добротности или их комбинация), двухкоординатного стола и системы ЧПУ.

Конструктивно установка разделена на 3 модуля: основной модуль, источник электропитания и система ЧПУ. В состав основного модуля входит излучатель лазера, координатный стол, система фокусировки, газовакуумная система, двухконтурная система охлаждения и контрольно-измерительная аппаратура.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 10,6 мкм;
- модовый состав излучения TEM₀₀;
- поляризация круговая;
- мощность излучения: средняя 60 Вт, пиковая до 300 Вт;
- минимальный диаметр прошиваемого отверстия 50 мкм;
- расходимость излучения 0,8 мрад;
- рабочая зона 140×140 мм;
- рабочая скорость до 0,9 м/мин;
- потребляемая мощность 6 кВА;
- габариты основного модуля $870 \times 1065 \times 1890$ мм, модуля электропитания $550 \times 570 \times 1600$ мм, модуля ЧПУ $535 \times 690 \times 1600$ мм;
- вес оборудования: основного модуля 350 кг, модуля электропитания 250 кг, модуля ЧПУ 145 кг.

*«Квант-155» – установка лазерной сварки
(на основе ТТЛ с энергией импульса до 25 Дж)*

Производитель: ФГУП «НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха», РФ, Москва.

Установка предназначена для прецизионной точечной или шовной сварки металлических изделий (сталь, серебро, золото), металлов с высоким коэффициентом отражения (платина, молибден, тантал) и различных сплавов толщиной до 3 мм, а также резки металлов толщиной до 1 мм.

Установка оборудована стереоскопическим каналом наблюдения, при этом выполняемые технологические операции сварки могут быть объединены со сборочными операциями при визуальном контроле качества сварных изделий. Импульсный режим работы установки гарантирует сварку металлических изделий с их минимальным нагревом и без термических деформаций – детали остаются практически холодными во время технологического процесса. Возможна сварка в труднодоступных местах и через оптически прозрачное стекло.

Установка требует стандартного сетевого питания 220 В, содержит водяную систему охлаждения со сбросом тепла во внешний водяной контур, занимает мало места и требует минимального технического обслуживания в период эксплуатации.

Технические характеристики:

- YAG:Nd тип лазера;
- длина волны излучения 1,064 мкм;
- энергия импульса излучения 1...25 Дж (плавная регулировка);
- частота повторения импульсов 1...30 Гц;
- длительность импульсов 0,5...10 мс;
- размер пятна 0,25...1 мм (плавная регулировка);
- глубина сварки 0,3...3 мм;
- увеличение в канале наблюдения в 16 крат;
- электропитание 220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность не более 2,5 кВт;
- срок службы лампы накачки $5 \cdot 10^6$ импульсов;
- масса не более 60 кг.

МЛП-1 – машина лазерная для прецизионной микрообработки

Производитель: НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», РФ, Москва.

Машина предназначена для размерной обработки тугоплавких и труднообрабатываемых материалов (вольфрам, твердые сплавы, серебро и др.), тонких листов черных и цветных металлов (медь, латунь, алюминий и др.), керамики, поликора, ситалла, сапфира, корунда,

включая изготовление паяльных масок, подложек микросхем, микроотверстий и т. д.

Отличительные особенности:

- одномодовый (маломодовый) импульсный YAG:Nd-лазер с повышенной пиковой мощностью импульса;
- управляемая амплитудно-временная структура излучения;
- прецизионный $\chi\chi$ координатный стол;
- специальная оптическая система;
- виброустойчивая компоновка;
- современное программное обеспечение.

Технические характеристики:

- энергия импульса излучения до 50 мДж;
- частота повторения импульсов 200...1000 Гц;
- размер пятна излучения в зоне обработки не более 30 мкм;
- точность позиционирования 5 мкм

Установка для резки кремниевых пластин и пластин из арсенида галлия на основе полупроводникового лазера

Производитель: ОАО «Московский завод “Сапфир”».

Технические характеристики:

- мощность полупроводникового лазера 100...200 Вт;
- система позиционирования – линейные шаговые двигатели;
- скорость резки до 500 мм/с;
- размер кремниевой пластины до 350 мм;
- толщина кремниевых пластин 50...650 мкм;
- точность резки 25 мкм.

ЭМ-260 – установка лазерной обработки алмазов

Производитель: ООО «Прецизионные технологические системы», Белоруссия, г. Минск.

Установка предназначена для автоматической вырезки (обточки) заготовок природного или синтетического алмаза и других сверхтвердых материалов по запрограммированному контуру маркировки контура обточки, распиловки заготовок. Установка обеспечивает автоматический расчет размера оптимального контура обточки или маркировки и его местоположение на заготовке, исходя из формы и размеров конкретной обрабатываемой заготовки, определение оптимальных форм, размеров и веса будущего бриллианта для различных видов круглой огранки, а также «фантазийных» форм. Установка предусматривает также вырезку нестандартного контура, т. е. контура, создаваемого непосредственно оператором в графическом редакторе установки.

Определение формы и размеров исходной алмазной заготовки производится автоматически методом компьютерной съемки всей поверхности заготовки. Компьютерная съемка обеспечивает построение математической и графической модели обрабатываемой заготовки. После определения формы и размеров заготовки программное обеспечение автоматически производит центрирование заготовки, оптимальное вписывание выбранного контура (круг, груша и т. д.), выбор алгоритма обточки и непосредственно операцию обточки.

В режиме распиловки установка обеспечивает автоматическое определение формы поверхности в плоскости распиловки заготовки. Обточка и распиловка производятся с автоматическим поддержанием фокуса на обрабатываемой поверхности, что исключает перегрев заготовки.

В установке применен пятикоординатный прецизионный привод и система управления на базе IBM PC Pentium, твердотельный YAG:Nd-лазер с акустооптической модуляцией добротности.

Во время обработки заготовка алмаза находится в замкнутом объеме, чтобы избежать потерь алмазного сырья. Для удаления продуктов сгорания в установке предусмотрено подключение пылесоса (при отсутствии централизованной системы). В установке работает специальная система защитных кожухов и блокировок.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 1,064 мкм;
- рабочая мода TEM₀₀;
- средняя мощность излучения 15 Вт (при 3 кГц);
- частота модуляции 1...25 кГц;
- длительность импульсов 85 нс (при 3 кГц);
- потребляемая мощность 6,5 кВт;
- расход сжатого воздуха (давление 0,5...0,6 МПа) 1,5 м³/ч;
- расход оборотной воды (давление 0,1...0,2 МПа, температура не более 18 °С) не менее 10 л/мин;
- габаритные размеры 2000 × 850 × 1400 мм;
- занимаемая площадь 10 м².

Система управления и ПО выполнена на базе РС и обеспечивает:

- управление всеми приводами в автоматическом режиме обработки и режиме ориентации;
- хранение и автоматический выбор режимов обработки по заданным технологическим параметрам;
- редактирование топологии обточки внутри собственной программы;
- проведение контроля лазерного излучения средней мощности с выводом пиктограммы на экран компьютера;
- вывод на экран компьютера изображения поверхности заготовки при ее компьютерной съемке и ориентации по углу и положению;

- вывод на экран компьютера оперативной информации (абсолютные и относительные координаты стола, стадии процесса, подсказки последовательности действий, время обработки, предупреждения о сбойных ситуациях и т. п.);
- проведение специальных наладочных операций (нахождение фокуса луча, совмещение его с нулем координатной сетки, масштабирование координатной сетки и т. п.);
- создание и хранение библиотеки программ работ, включающих в себя виды работ (маркировка, обточка, распиловка), топологический рисунок и перечень технологических параметров обработки;
- диагностику исполнительных механизмов.

ЭЛЛ-270М – установка лазерной обработки

Производитель: ООО «Прецизионные технологические системы», Белоруссия, г. Минск.

Установка лазерной обработки предназначена для прошивки профильных каналов в твердых и сверхтвердых материалах, таких как природный и синтетический алмазы, рубин, твердые сплавы, алюмооксидная керамика и т. п.

Используя настоящую технологию, профильные каналы (отверстия), отвечающие строгим требованиям по геометрии и чистоте стенок, выполняют в одном полностью автоматизированном цикле лазерной обработки, в котором нет необходимости переустанавливать обрабатываемую деталь.

Область применения – прошивка профильных каналов в алмазных и алмазоподобных материалах волок, используемых для получения металлокорда, проводников кабелей и других изделий, получаемых методом протяжки через калиброванные фильеры. Технологические возможности установки перекрывают практически весь диапазон диаметров промышленных алмазных волок диаметров от 0,1 мм до 5 мм. Достижимая точность обработки – 2 % от диаметра волокна, достигаемая точность обработки в режиме доводки – 3 мкм.

Установка может быть использована также для ремонта волок (расточки профильного канала), обработки изделий по внутренним и внешним контурам. В установке предусмотрена возможность проведения операции лазерной маркировки поверхности оправы волокна. Логотип маркировки формируется при помощи собственного редактора или редактора AutoCAD.

В установке использован шаговый пятикоординатный привод, позволяющий достичь высокой прецизионности обработки. Система управления установки базируется на IBM PC Pentium. Создание рабочей

программы производится с использованием собственного графического редактора. Совмещенные лазерный и TV-каналы позволяют получить на экране SVGA-монитора живое видеоизображение объекта для ориентации заготовки, последующего контроля качества обработки и диаметра полученного отверстия.

Технические характеристики:

- YAG:Nd-лазер с акустооптической модуляцией добротности;
- длина волны излучения 1,064 мкм;
- рабочая мода TEM₀₀;
- средняя мощность излучения 15 Вт (при 3 кГц);
- частота импульсов излучения 1...25 кГц;
- электропитание 380/220 В, 50/60 Гц;
- потребляемая мощность 6,5 кВт;
- расход проточной воды охлаждения не менее 10 л/мин;
- габариты 1500 × 900 × 1400 мм;
- масса 550 кг;
- занимаемая площадь 10 м².

4.4. ЛТУ для маркировки и гравировки

ТЕГРА-МВ – волоконный лазерный маркер

Производитель: ООО «Тета», РФ, г. Москва.

Тегра-МВ отличается простотой технического обслуживания, экономичностью и надежностью. Потребляемая электрическая мощность снижена до 0,1 кВт. В источнике лазерного излучения отсутствуют какие-либо юстируемые оптические детали. Весь излучатель залит компаундом. Отсутствует водяное охлаждение, нет необходимости проводить какие-либо профилактические работы (замены ламп накачки, отражателей и пр.). Ресурс такого излучателя превышает 100 тыс. часов.

Технические характеристики установки позволяют проводить маркировку разнообразных материалов: пластиков, сталей, цветных металлов и сплавов, резины, окрашенных поверхностей, создавать цветные изображения (маркировка изделий с многослойным покрытием).

Технические характеристики:

- тип лазера волоконный;
- регулируемая мощность излучения до 10 Вт;
- частота следования импульсов (регулируемая) 20...100 кГц;
- длительность импульсов (при 20 кГц) 40 нс;
- размер фокального пятна 60 мкм;
- размер поля маркировки 100 × 100 мм;
- скорость движения луча по полю до 2500 мм/с;

- габаритные размеры: маркировочного узла $250 \times 250 \times 400$ мм, блока управления $170 \times 480 \times 480$ мм.

Управление всеми параметрами излучения и процессом маркировки производится от компьютера, возможна маркировка в векторном и растровом режимах, использование любых шрифтов, языков, библиотек рисунков.

МЛТ-100 – технологический лазерный комплекс для гравирования

Производитель: АО «Туламашзавод», РФ, г. Тула.

Технологический лазерный комплекс для гравирования на основе YAG:Nd-лазера МЛТ-100 предназначен для выполнения операций сложнопрофильной резки, сварки, гравирования различных материалов толщиной до 1 мм, изготовления фотоформ, фотошаблонов, офсетных форм, флексоформ, штампов, печатей, этикеток и др.

Состав комплекса:

- основание (каркас);
- плоттерный двухкоординатный механизм;
- ребристый стол для крепления заготовок с вакуумным зажимом;
- комплект ПО, включая контроллер, персональный компьютер с периферией и программным обеспечением;
- вытяжное устройство для удаления продуктов горения;
- механизм перемещения зеркал;
- излучатель YAG:Nd-лазера с модуляцией добротности резонатора;
- оптическая насадка для выполнения технологических операций с устройством подвода технологических газов в зону обработки;
- блок питания и управления лазером и процессором;
- блок охлаждения (вода–вода).

Технические характеристики:

- размер обрабатываемой поверхности 300×300 мм, 600×800 мм, 1000×2000 мм;
- скорость перемещения каретки до 200 мм/с;
- управление IBM PC;
- длина волны излучения 1,064 мкм;
- средняя мощность 100 Вт;
- расходимость не более 3 мрад;
- охлаждение двухконтурное вода–вода;
- частота 15...20 кГц;
- длительность импульса 15...20 мкс;
- питание 380/220/110 В, 50/60 Гц;
- потребляемая мощность не более 6 кВт.

*Лазерная система для формирования объемных изображений
в прозрачных материалах «КРИСТАЛАС КВЛ-3Д»
(CRYSTALAS CVL-3B)*

Производитель: научно-производственная группа «Мехатрон – лазерная техника и оптика», Белоруссия, г. Минск.

Технология формирования внутренних объемных изображений основана на изменении оптических свойств прозрачного материала (кристалл, стекло, кварц, акрил) под действием лазерного излучения. Объемное изображение сначала создается при помощи 3-мерной компьютерной графики, а потом формируется из массива точек и линий в 3-мерном пространстве при помощи фокусировки лазерного излучения внутри прозрачного объекта. Поставляемые компоненты: хуз-координатный стол, оптический блок.

Применяется установка для изготовления уникальных 3D-сувениров, маркировки внутри материала, формирования сетки или шкалы внутри материала, нанесения меток в стекле, изготовления реальных портретов внутри прозрачных материалов.

Технические характеристики:

- обрабатываемые материалы: стекло, кварц, прозрачные монокристаллы и прозрачный акрил;
- CVL-10/CVL-30-лазер на парах меди;
- размер точки 50...500 мкм;
- скорость 100 точек/с;
- максимальный размер объекта 100 × 100 × 100 мм;
- минимальный размер объекта 3 мм;
- потребляемая мощность 3 кВт;
- габариты 1100 × 250 × 500 мм;
- масса 75 кг.

*Лазерные установки для маркировки
на основе твердотельных лазеров
J-30, LC106*

Производитель: ЗАО «Солар – лазерные системы», Белоруссия, г. Минск.

Таблица 4.5

Сравнительные характеристики ЛУ J-30 и LC-106

Модель	J-30	LC106
Тип лазера	Nd:YAG с модуляцией добротности и диодной накачкой	Nd:YAG с модуляцией добротности и ламповой накачкой

Окончание табл. 4.5

Модель	J-30	LC106
Режим работы	Непрерывный, импульсно-периодический	
Длина волны излучения	1,064 мкм	
Мощность излучения в непрерывном режиме при частоте импульсов 10 кГц	35 Вт 25 Вт	50 Вт 30 Вт
Частота повторения импульсов	1...30 кГц	1...50 кГц
Длительность импульсов излучения (при частоте повторения 10 кГц)	120 нс	
Диаметр пучка	4 мм	
Расходимость	7 мрад	
Нестабильность энергии излучения	не хуже $\pm 3\%$	
Электропитание (50/60 Гц)	Однофазное, 200 ± 20 В	
Потребляемая мощность	< 1 кВт	3,5 кВт
Охлаждение	Вода/вода	Вода/воздух
Габариты: излучатель блок питания	125 × 155 × 357 мм 535 × 760 × 640 мм	108 × 80 × 485 мм 535 × 550 × 555 мм
Масса	75 кг	65 кг

4.5. Другие лазерные технологические установки

Лазерные комплексы для резки (на основе CO₂-лазеров)

Производитель: ЗАО «Технософт», РФ, г. Москва.

Установки комплектуются технологическими столами для лазерного раскроя, производимыми ЗАО «Технософт», и лазерами (отечественными или зарубежными), наиболее подходящими для технологического процесса заказчика.

Дополнительное оснащение комплексов: автофокус, синхронная 3D-координата, ножи, платформа на рельсах для загрузки материала, устройство для впрыскивания масла в зону реза, объектив высокого давления, специальное программное обеспечение для резки металла, интерфейс управления к ЭВМ верхнего уровня (линия, цех). Лазерные технологические комплексы оснащаются ПО.

Технические характеристики координатных столов для лазерного раскроя листовых материалов:

- максимальная скорость 40 м/мин;

- диапазон рабочих скоростей 0,06...15 м/мин;
- точность позиционирования 0,02 мм;
- повторяемость 0,02 мм;
- подводимая мощность ≤ 2 кВт;
- зона обработки 1200×1700 мм или 840×1200 мм;
- габаритные размеры (без рельсов) $2300 \times 1800 \times 1400$ мм или $1500 \times 1200 \times 1400$ мм;
- вес 700 кг или 500 кг.

Таблица 4.6

*Максимальная толщина материала при резке типовыми CO₂-лазерами
(в миллиметрах)*

Материал	ТЛ-1,5	ТЛ-5
Углеродная сталь	10	40
Нержавеющая сталь	6	20
Сплавы цветных металлов	3	12
Пластмассы	40	150
Дерево	50	150
Фанера	25	60
Картон	20	50
Паранит	10	40
Резина	15	40
Кожа	15	50

*Лазерный технологический комплекс
для резки неметаллических материалов (на основе CO₂-лазера)*

Производитель: ЗАО «Технософт», РФ, г. Москва.

Предназначен для резки неметаллических материалов, в том числе для изготовления витражей, световой рекламы и других декоративно-оформительских работ.

Таблица 4.7

*Технологические возможности
(скорость резки материалов, мм/с)*

Материал	Толщина материала, мм	Лазер «Корд»	Лазер «Камея»
Оргстекло	3	23	60
	6	10	25
	18	1	4
Коматекс	3	37	80
	6	18	40
	10	10	25

Окончание табл. 4.7

Материал	Толщина материала, мм	Лазер «Корд»	Лазер «Каменя»
Полистирол	3	18	30
	6	9	14
Хвойная древесина	10	3	15
	20	–	8
Лиственная древесина	10	–	8
Нержавеющая сталь	0,5	–	20
	1,0	–	10

ЛТК комплектуется технологическим столом, управляющим компьютером и лазером типа ИЛГН-802 «Корд» или ИЛГН-802 «Каменя». Лазерные технологические комплексы оснащаются программным обеспечением.

*«МиниМаркер-Д7» – компактная система
прецизионной лазерной маркировки
на базе YAG:Nd-лазера с диодной накачкой*

Производитель: ООО «Лазерный центр», РФ, г. Санкт-Петербург.

Система предназначена для прецизионной маркировки разнообразной продукции в ювелирном и промышленном производстве, рекламном бизнесе. МиниМаркер-Д7 может быть интегрирован в производственную линию для работы в автоматическом режиме.

К особенностям можно отнести: прецизионное качество изображений, компактность, надежность, низкое электропотребление, отсутствие расходных материалов, расширенные возможности программного обеспечения.

Технические характеристики:

- YAG:Nd-лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности;
- длина волны лазерного излучения 1,06 мкм;
- мощность лазера 7 Вт (ТЕМ₀₀);
- частота модуляции излучения (регулируемая) до 100 кГц;
- охлаждение автономное, воздушное;
- электропитание 220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность ≤ 500 Вт;
- поле обработки (сменные объективы) 50 × 50 мм и 100 × 100 мм;
- диаметр пятна фокусировки 35 и 50 мкм;
- скорость перемещения луча (регулируемая) до 2,5 м/с;
- маркируемые материалы: металлы и сплавы, окрашенные и покрытые металлические поверхности, резина, пластмасса и др.

*«LRS 150 AS» – установка прецизионной
лазерной сварки и наплавки на основе
импульсно-периодического ТТЛ мощностью 150 Вт*

Производитель: ООО «Особое конструкторское бюро “Булат”»,
РФ, г. Москва.

Установка предназначена для прецизионной лазерной сварки и наплавки как в ручном, так и в автоматическом режиме на деталях и узлах весом до 25 кг.

Возможности широкого диапазона регулирования параметров излучения позволяют производить сварку и наплавку на конструкционных сталях, цветных металлах и сплавах.

Отличительной особенностью установки является автоматизированный ху-координатный стол с возможностью обучения. Управление координатным столом осуществляется микроконтроллером, позволяющим вводить в память контур сложного шва в пошаговом режиме и работать по программе с ПК.

Наблюдение за процессом осуществляется с помощью бинокулярного микроскопа и параллельно через видеокамеру высокого разрешения на цветном видеомониторе. Защита глаз оператора от действия лазерного излучения и свечения двухступенчатая: с помощью отсекающего фильтра и жидкокристаллического затвора, работающего синхронно с излучателем лазера.

Виды обработки: импульсная лазерная сварка, наплавка, пайка, термообработка, резка.

Технические характеристики:

- YAG:Nd³⁺-лазер;
- режим работы импульсно-периодический;
- длина волны излучения 1,06 мкм;
- энергия импульса излучения 60 Дж;
- длительность импульса излучения 0,2...20 мс;
- частота следования импульсов излучения 0,5...20 Гц;
- средняя мощность излучения 150 Вт;
- расходимость менее 10 мрад;
- диаметр сфокусированного пучка 0,3...2,0 мм;
- расход воды 0,35 м³/час;
- электропитание 3-фазное 380 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность 6 кВт;
- габариты 1215 × 540 × 1200 мм;
- масса установки 150 кг.

*«HTS-Fibre» – универсальная лазерная установка с
волоконной системой доставки излучения на основе
импульсно-периодического ТТЛ мощностью 100...150 Вт*

Производитель: ООО «Особое конструкторское бюро “Булат”»,
РФ, г. Москва.

Лазерная установка с волоконной системой доставки излучения используется для прецизионной лазерной сварки, наплавки, поверхностного термоупрочнения.

Таблица 4.8

Технические характеристики

Модель	100 Вт	150 Вт
Тип активного элемента	YAG:Nd ³⁺	
Режим работы	импульсно-периодический	
Длина волны излучения	1,06 мкм	
Энергия импульса излучения	до 40 Дж	до 60 Дж
Длительность импульса	0,2...20 мс	
Частота следования импульсов	0,5...20 Гц	
Средняя мощность излучения	до 100 Вт	до 150 Вт
Пиковая мощность излучения	4 кВт	6 кВт
Диаметр волнового кабеля	600 мкм	
Числовая апертура излучения на входе кабеля	≤ 0,1	
Размер пятна в фокусе	0,35...2,0 мм	
Охлаждение двухконтурное водо-водяное	0,3 м ³ /час	0,35 м ³ /час
Нестабильность энергии излучения	2 %	
Электропитание 3-фазное	380 В, 50 Гц	
Габариты	520 × 750 × 790 мм	
Масса	80 кг	80 кг

Особенностью конструктивного исполнения данного аппарата является применение закрытой волоконной системы доставки излучения. По сравнению с традиционными, системы волоконной доставки лазерного излучения имеют значительные преимущества при перемещении луча относительно детали по нескольким координатам. Связано это с малой массой системы волоконной доставки и небольшими габаритами лазерного инструмента. Гибкость системы подвода излучения позволяет относительно легко интегрировать лазерный инструмент в технологическую линию. Также важным преимуществом является высокая степень лазерной безопасности при передачах излучения на расстояния свыше 1...2 метров. Основные неудобства, возникающие при работе с волоконными системами доставки, связаны с процессами лазерного

разрушения торца волокна и ухудшением качества лазерного излучения, вносимого волокном. В представленном оборудовании за счет оригинальных технических решений удалось свести вероятность разрушения торца волокна к минимуму, что делает его надежным и удобным в работе. Виды обработки: сварка, наплавка, пайка, термообработка и резка.

Семейство маркеров на волоконных лазерах (серия FLM)

Производитель: ООО НТО «ИРЭ-Полнос», РФ, г. Москва.

Лазерные маркеры серии FLM предназначены для маркировки и гравировки изделий из пластмассы, резины, керамики, металлов, нанесения декоративных покрытий, надписей и рисунков на стекло.

Надписи и изображения наносятся на поверхность обрабатываемого изделия с помощью сфокусированного лазерного пучка от волоконного лазера ближнего инфракрасного диапазона.

Сканирование луча по поверхности производится двухкоординатным гальванометрическим дефлектором. Дефлектор с фокусирующим объективом вынесены в отдельный блок, который соединен с основным блоком гибким кабелем длиной до 3 м.

Особенности:

- высокая надежность и долговечность благодаря применению непрерывного или импульсного волоконного лазера собственного производства;
- встроенный компьютер с ОС Windows 2000;
- необслуживаемый лазерный блок с воздушным охлаждением;
- низкие эксплуатационные расходы;
- красный пилот-лазер для точного позиционирования луча на изделии.

Технические характеристики маркеров представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Технические характеристики

Модель	FLM-C	FLM-P
Тип обрабатываемых материалов	Пластмассы, резина, термоперенос металла на стекло и т. п.	Металлы, керамика, термоперенос металла на стекло и т. п.
Рабочее поле маркировки, мм	100 × 100	100 × 100
Фокусное расстояние объектива, мм	160	160
Диаметр пятна в фокусе (по уровню 90 % мощности), мм	30	50

Окончание табл. 4.9

Модель	FLM-C	FLM-P
Скорость сканирования луча, мм/с	0...5000	0...5000
Тип волоконного лазера	Yb, одномодовый	Yb, маломодовый
Режим работы лазера	Непрерывный с модуляцией мощности	Импульсный
Длина волны излучения, мкм	1,07	1,06
Средняя мощность излучения, Вт	0...50	0...20
Длительность импульсов, нс	—	50
Пиковая мощность в импульсе, кВт	—	> 20
Энергия в импульсе, мДж	—	≤ 1
Длина волны пилот-лазера, мкм	0,67	0,67
Габаритные размеры, мм • основной блок • блок дефлектора	520 × 200 × 450 350 × 170 × 200	520 × 200 × 450 350 × 170 × 200
Электропитание, В/Гц	220/50	220/50
Энергопотребление, Вт	< 500	< 500
Рабочий диапазон температур, °С	0...50	0...50
Ресурс лазера, ч	> 30 тыс.	> 30 тыс.

РАЗДЕЛ 5

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ И ХИРУРГИИ

5.1. Действие излучения на биологические ткани

Оптические аспекты. При взаимодействии ЛИ с биологическими тканями, как и с любыми другими материалами, происходят процессы отражения, поглощения и рассеяния света (рис. 5.1). Эти процессы характеризуются коэффициентом отражения ρ_λ , коэффициентом поглощения A , показателем поглощения μ и показателем рассеяния β . В зависимости от вида ткани и длины волны излучения λ_0 значения A , μ , β сильно различаются. Соответственно, сильно различается и распределение интенсивности в объеме биообъекта.

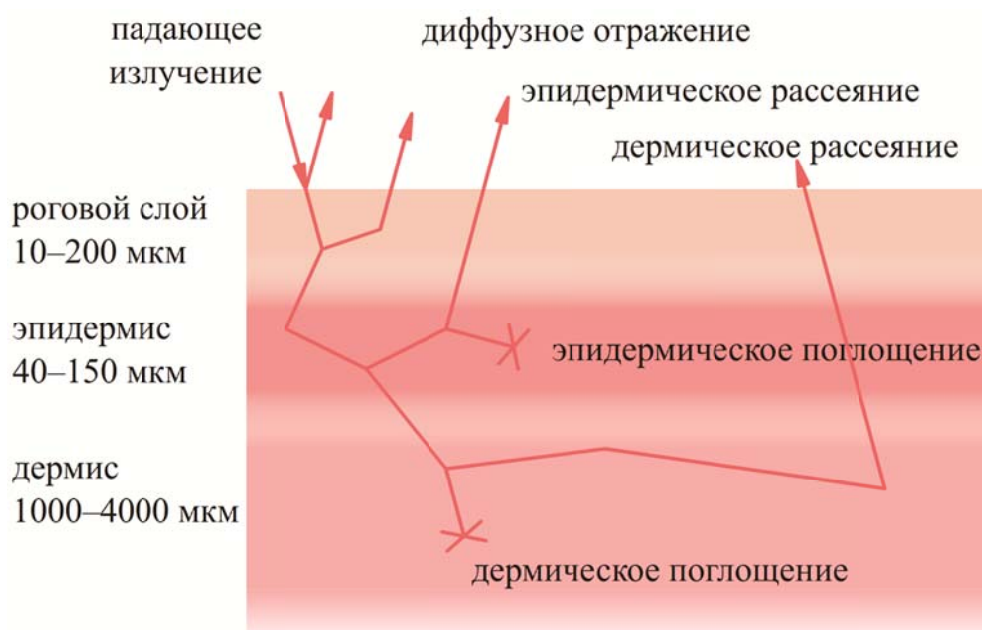


Рис. 5.1. Взаимодействие лазерного пучка с кожей

В простейшем случае, когда поперечным размером лазерного пучка $2r_b$ на поверхности объекта можно пренебречь (бесконечно тонкий пучок), распределение интенсивности по глубине z подчиняется экспоненциальному закону, а характерная глубина проникновения излучения в ткань определяется значениями μ и β :

$$z_{opt} \approx \frac{1}{\mu + \beta}. \quad (5.1)$$

Чем больше μ и β , тем меньше z_{opt} . При больших размерах лазерного пучка экспоненциальный закон не выполняется и светорассеяние приводит к увеличению глубины проникновения. Если рассеяние мало ($\beta \ll \mu$), то экспоненциальный закон преобразуется в закон Бугера для любого размера пучка.

На рис. 5.2 приведено характерное распределение пространственной освещенности q_S в объеме рассеивающей среды (которой являются биоткани) по ее глубине при различных радиусах пучка r_b , поглощающих и рассеивающих свойствах среды. Поскольку μ и β однозначно связаны с коэффициентом диффузного отражения ρ_{dif} , который является основным измеряемым параметром, то построение зависимостей выполнено относительно него.

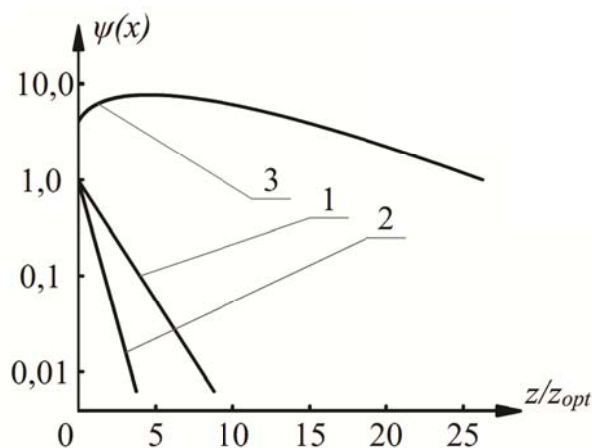


Рис. 5.2. Освещенность пространства по глубине z рассеивающей среды
 $1 - r_b = 100\tau, \rho_{dif} = 0,1$; $2 - r_b = 1\tau, \rho_{dif} = 0,95$; $3 - r_b = 100\tau, \rho_{dif} = 0,95$

Обращает на себя внимание тот факт, что в зависимости от поглощающих и рассеивающих свойств среды изменяется не только глубина проникновения, но и пространственная освещенность в ее объеме, которая при больших значениях r_b и ρ_{dif} может превосходить поверхностную в несколько раз. Этот факт необходимо учитывать при анализе нагрева ткани, поскольку температурный профиль в объеме ткани соответствует распределению света. Некоторые характерные картины распределения света в тканевой среде приведены на рис. 5.3.

С учетом светового режима находится распределение поглощенной (утилизованной) доли светового потока ω :

$$\omega(r, z) = q_S(r, z) \cdot \mu, \quad (5.2)$$

где ω – объемная плотность мощности теплового источника на глубине z и на расстоянии r от оси. По этой величине можно вычислить распределение температуры $T(r, z)$ в объеме ткани.

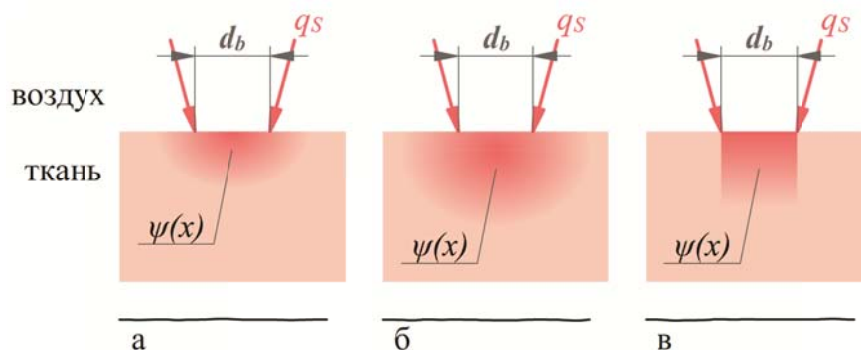


Рис. 5.3. Режим освещенности в глубине биоткани
с различными оптическими свойствами
а – $1/\mu \ll r_b \ll 1/\beta$; б – $1/\mu \approx r_b \approx 1/\beta$; в – $1/\beta \ll r_b \ll 1/\mu$

Глубина проникновения ЛИ. Глубина проникновения определяется как поглощением, так и рассеянием излучения. В зависимости от длины волны падающего излучения отражается до 60 % излучения. Рассеяние зависит от неомогенных структур ткани и определяется разными показателями преломления у разных ячеек, разницей между ячейками и окружающей их средой. Волны с длиной намного большей, чем размер рассеивателя-ячейки (≥ 10 мкм), рассеиваются ими в незначительной степени. Но, так как электромагнитный спектр используемых лазеров простирается от ИК- (10 мкм до 0,78 мкм) до УФ- (0,38 мкм до 0,1 мкм) диапазона длин волн, на практике с рассеянием приходится считаться. Для длин волн более 1 мкм глубину проникновения излучения в первом приближении можно рассчитать на основе закона Бугера.

При применении монохроматического излучения с длиной волны λ_0 для показателя поглощения действительно следующее отношение:

$$\mu = 4\pi \cdot \frac{n \cdot k}{\lambda_0},$$

причем показатели преломления n среды и коэффициент k являются константами для данной среды.

Наилучшим образом соотношение поглощения и рассеяния описано в теории Кубелки–Мунка. Уравнение, описывающее распространение излучения в средах с учетом поглощения и рассеяния, имеет вид:

$$\frac{dL_C(r, z)}{dz} = -\gamma \cdot L_C(r, z),$$

где $L_C(r, z)$ – плотность мощности излучения коллимированного луча в месте r (вектор места) в направлении z ; γ – показатель ослабления ($1/z_{opt}$).

Рассеяние в биологической ткани зависит от длины волны лазерного луча. Излучение эксимерных лазеров (193, 248, 308, 351 нм), излуче-

ние эрбиевого лазера (2,69 мкм) и CO₂-лазера (10,6 мкм) имеют глубину проникновения от 1 до 20 мкм. Здесь рассеяние играет второстепенную роль. Для света с длиной волны 450...590 нм, что соответствует линиям аргона, глубина проникновения составляет в среднем 0,5...2,5 мм. Как поглощение, так и рассеяние играют здесь значительную роль. Лазерное излучение такой длины волны, хоть и остается в ткани коллимированным на оси, окружено рассеянным излучением (15...40 %). В области спектра между 590 и 1500 нм, в которую входят линии YAG-лазера 1,06 и 1,32 мкм, доминирует рассеяние. Глубина проникновения составляет от 2,0 до 8,0 мм.

В то время как в УФ-диапазоне поглощение зависит от содержания белка в биоткани, в ИК-диапазоне существенное значение имеет содержание воды. Кроме того, гемопротейны, пигменты, другие макромолекулы, такие как нуклеиновые кислоты и ароматические системы, поглощают лазерное излучение с различной интенсивностью в зависимости от длины волны.

Большинство органических молекул, как и протеины, интенсивно поглощают в УФ-диапазоне (100...300 нм). Оксигенированный гемоглобин интенсивно поглощает начиная с УФ-области, включая зеленую и желтую области видимого света, и вплоть до 600 нм. Меланин, важнейший эпидермальный хромофор, поглощает во всей видимой области спектра до УФ-области. В диапазоне от 600 до 1200 нм излучение глубже проникает в ткань с минимальными потерями на рассеяние и поглощение. В этом диапазоне можно достигнуть глубоко расположенные объекты (органы). Такие лазеры, как аргоновый лазер, лазер на красителе, YAG:Nd-лазер с удвоением частоты, действуют преимущественно на гемоглобин, меланин и другие органические вещества и поэтому имеют коагуляционный эффект. CO₂-лазер, генерирующий на длине волны 10,6 мкм, или YAG:Er-лазер с длиной волны генерации 2,9 мкм из-за высокого поглощения водой подходят только для рассеивания ткани. Значение глубины проникновения излучения указано в табл. 5.1.

В табл. 5.1 сравнивается количественно средний путь распространения излучения в воде и крови для различных лазеров. Как следует из таблицы, CO₂-лазер проникает в ткань на 1/1000 см. Вся его мощность поглощается в поверхностных слоях. Напротив, излучение аргонового лазера может беспрепятственно распространяться в воде, но в крови оно полностью поглощается в верхних десятых долях миллиметра. Nd:YAG-лазер занимает в данном случае промежуточное положение.

Спектральные аспекты. Для расширения областей применения лазеров в медицине важной предпосылкой является хорошее знание спектральных характеристик поглощения различных тканей. Основываясь на

этом, можно предсказать для определенного типа ткани относительную эффективность существующих лазерных систем. Для этого используются методы оптической спектроскопии, с помощью которой регистрируются и исследуются электронные, колебательные и вращательные спектры.

Таблица 5.1

Поглощение лазерного излучения в воде и крови

Длина волны	Показатель поглощения, см ⁻¹		Средняя глубина проникновения, см	
	вода	кровь	вода	кровь
10600 нм CO ₂ -лазер	1000	1000	0,001	0,001
1064 нм YAG:Nd-лазер	0,1	4	10	< 0,2
488 / 514 нм Ar-лазер	0,001	330	1000	0,003

Влияние рассеяния должно быть обязательно учтено, как показывает пример с кровью: незначительная глубина проникновения излучения Nd:YAG-лазера объясняется не поглощающими свойствами гемоглобина, а интенсивным рассеянием на отдельных компонентах крови.

Так как часто невозможно (а для практической оценки и не требуется) установить различие между долями рассеяния и поглощения при ослаблении излучения, то спектры пропускания следует предпочесть спектрам поглощения. Абсолютное масштабирование при этом невозможно вследствие различной техники подготовки образцов, которая зависит от типа ткани и свойств биологических образцов.

Количественными характеристиками процесса ослабления излучения являются пропускание T и оптическая плотность A :

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0}; \quad D = \lg\left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right) = \lg\left(\frac{1}{T}\right) = z \cdot (\mu + \beta),$$

где z – толщина слоя.

Показатель поглощения μ тканей сильно зависит от длины волны ЛИ, поэтому более полную информацию о глубине проникновения излучения различных длин волн можно получить из спектров поглощения, отражения и рассеяния. Нахождение спектров связано с измерениями ослабления потока слоем ткани, при этом должно быть учтено влияние рассеяния.

При малых значениях показателя рассеяния β показатель поглощения определяется как $\mu \approx D/z$. Некоторые из спектров приведены далее на рис. 5.4–5.8.

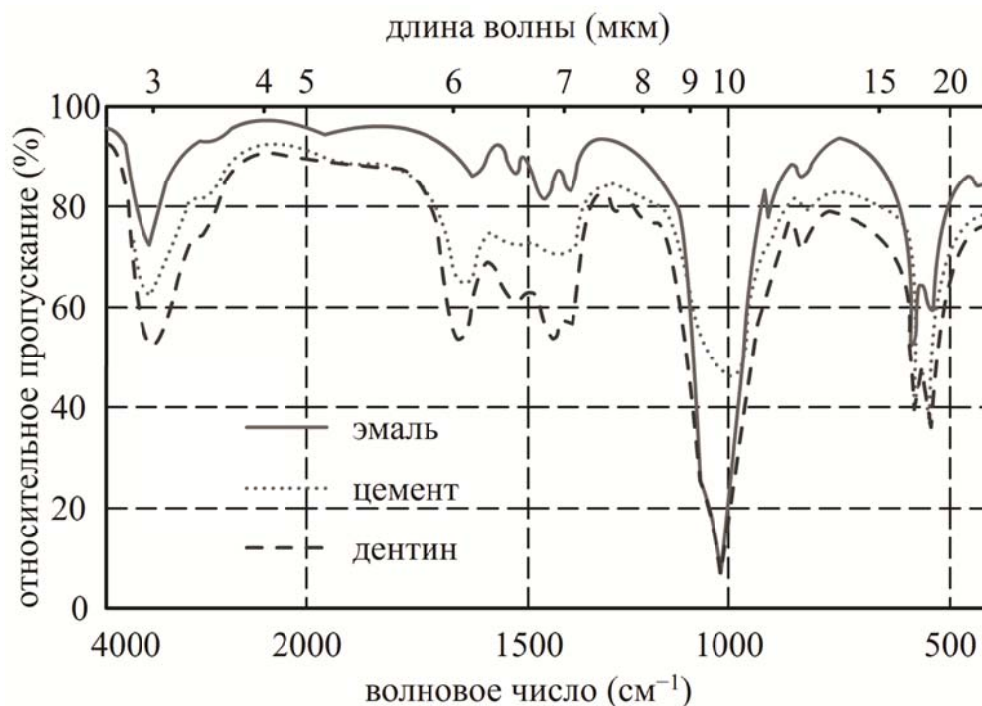


Рис. 5.4. Зависимость коэффициента пропускания тканей зуба от длины волны

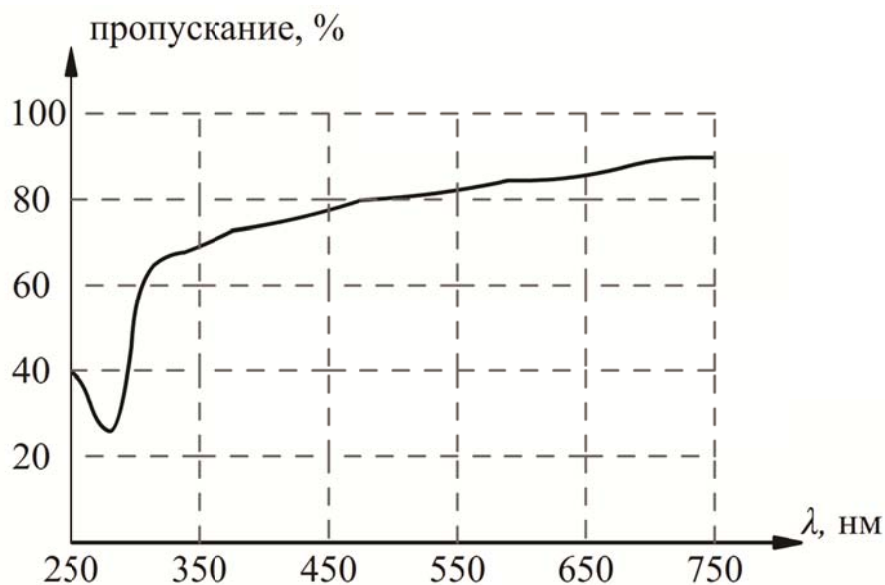


Рис. 5.5. Спектр пропускания мышечной ткани свиньи

Особенностью рассеивающих сред является то, что излучение от широкоапертурного источника проникает вглубь намного больше оптической толщины $z_{opt} = 1/(\mu + \beta)$.

В некоторых случаях глубина проникновения света превосходит оптическую толщину в 10 и даже в 100 раз, поэтому ее разумнее определять экспериментально.

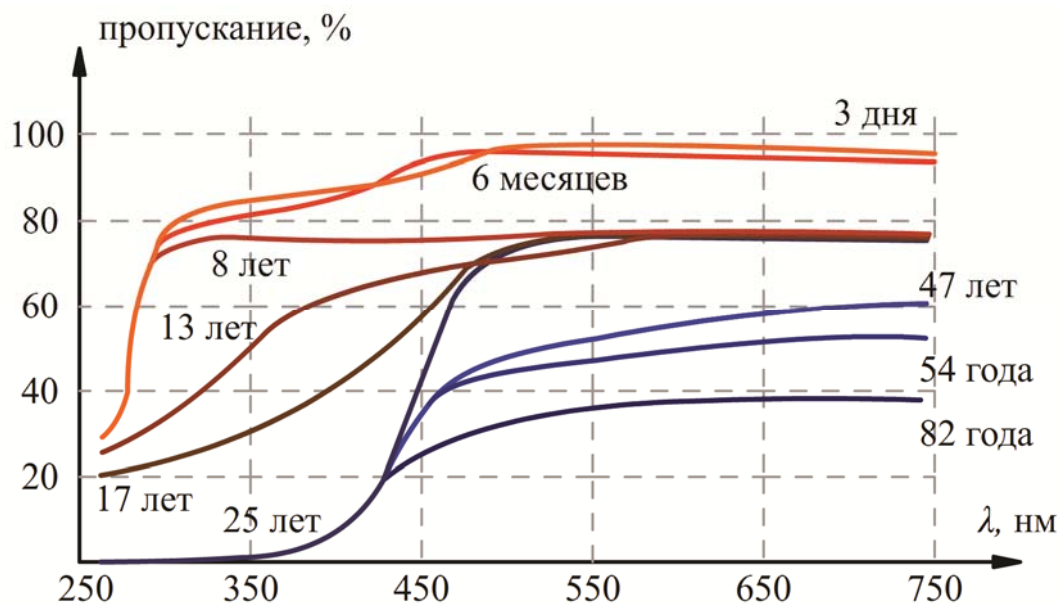


Рис. 5.6. Изменение пропускания хрусталика глаза при старении

Экспериментально установлено, что проникающая способность излучения от ультрафиолетового до оранжевого диапазона (300...600 нм) постепенно увеличивается от 1 мкм до 2,5 мм и резко увеличивается до 20...30 мм в красном диапазоне (600...700 нм). Пик проникающей способности приходится на ближний инфракрасный диапазон (до 70 мм на $\lambda_0 = 950$ нм). В диапазоне длин волн 800...1200 нм пропускание кожи достаточно высокое. Для излучения CO_2 -лазера проникающая способность составляет ~50 мкм.



Рис. 5.7. Зависимость условной оптической плотности тканей руки светлокжего человека от длины волны

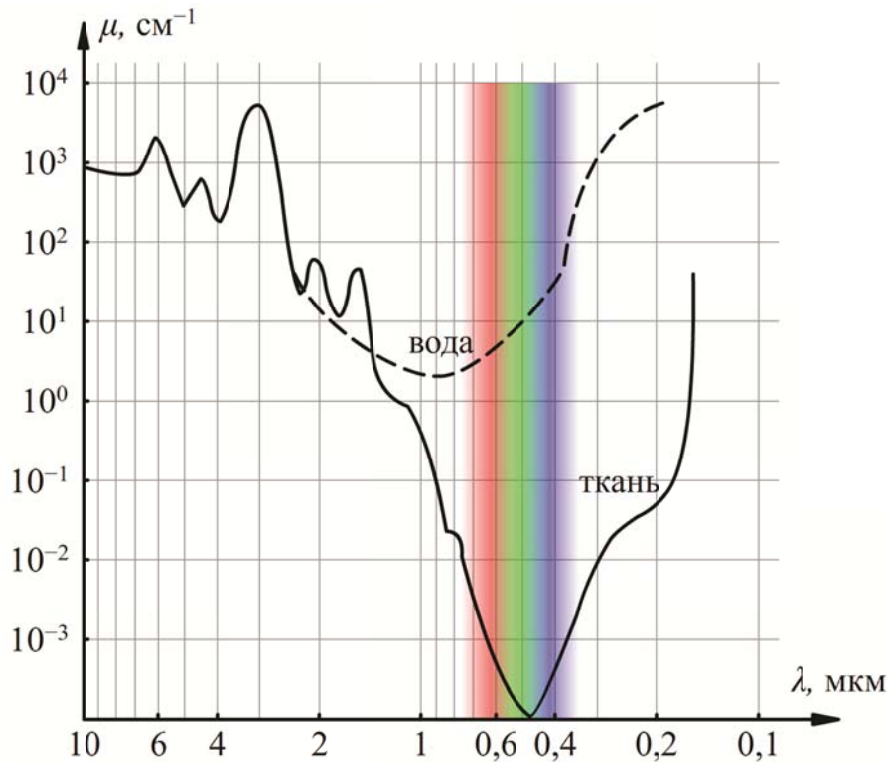


Рис. 5.8. Схема сравнения поглощения в воде и водосодержащей ткани

Поглощение ЛИ. Поглощение излучения, безусловно, зависит от состава биологической ткани организма. В диапазоне 600...1400 нм кожа поглощает 25...40 % излучения ($A_{ef} = 0,25...0,45$), мышцы и кости поглощают до 30...80 % ($A_{ef} = 0,3...0,8$), печень, почки, селезенка и сердце – до 100 % ($A_{ef} = 1,0$).

Отражение ЛИ. При действии ЛИ на биообъект часть излучения отражается. Коэффициент отражения кожи в оптическом диапазоне достигает 43...55 % (рис. 5.9) и зависит от ряда причин – возраста, пола, температуры тела.

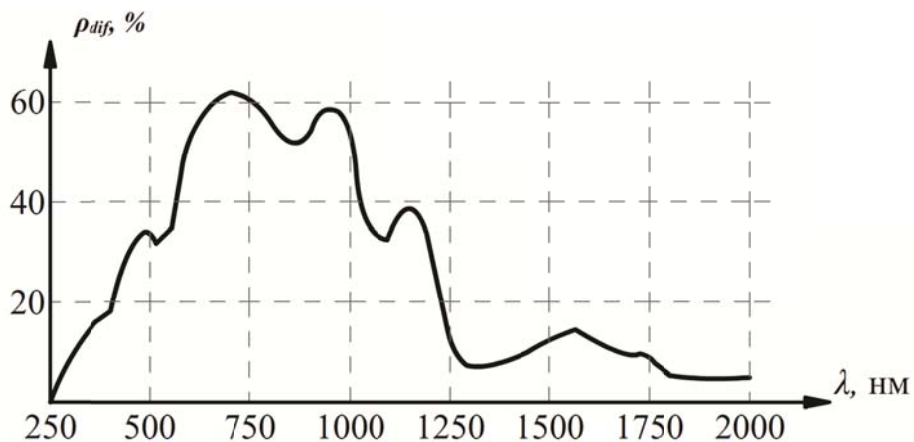


Рис. 5.9. Диффузное отражение от руки светлой кожи человека

При увеличении угла падения коэффициент отражения возрастает в несколько раз. На пигментированных участках тела он низок ($\rho_\lambda = 6 \dots 8 \%$). Отражение тканей уменьшается с увеличением длины волны: для азотного, гелий-кадмиевого, аргонного и гелий-неонового лазеров $\rho_\lambda = 30 \dots 40 \%$; для неодимового $\rho_\lambda \sim 20 \dots 35 \%$; для CO_2 -лазера $\rho_\lambda \sim 5 \%$.

5.2. Теплофизические и термодинамические свойства ткани

Хирургическое действие лазера (скальпель, коагулятор) основывается на превращении энергии лазерного пучка в теплоту, которая вызывает в облученном объеме локальное повышение температуры. Если не происходит фазовых переходов (преобразование твердых составных частей в жидкость или газ, испарение жидкостей), то температура T повышается пропорционально плотности энергии q_s . Часть тепла отводится, в зависимости от температурного градиента, путем теплопроводности в более холодный окружающий участок. Из-за этого ограничивается максимально достижимая температура облучаемого участка при данной интенсивности излучения, т. е. с определенной интенсивностью облучения связана определенная максимальная температура. Напротив, для каждой ткани существует специфический порог интенсивности, который необходимо перейти, чтобы достичь требуемой локальной температуры. Так, в случае поверхностного нагрева $T \sim \sqrt{\tau}$, т. е. динамика нагрева биологической ткани схожа с динамикой лазерного нагрева металлов.

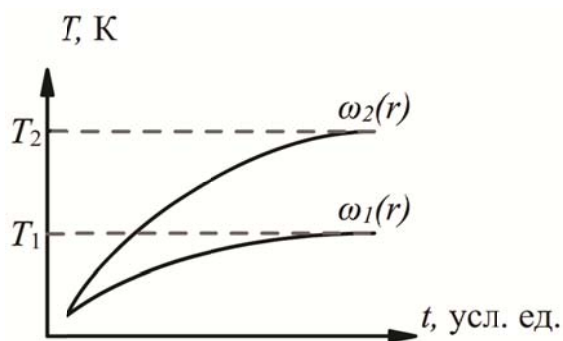


Рис. 5.10. Динамика нагрева ткани в условиях эффективного теплоотвода

Так как часть энергии из-за теплопроводности и других процессов транспортируется в соседние области, то нагревается не только облученный объем, но и окружающие его участки. Кроме того, тепло отводится от облученной ткани и локальным кровотоком. Термические свойства живой ткани определяются в основном тремя процессами:

- теплопроводностью;
- накоплением тепла;

- отводом тепла сосудистой системой.

Теплопроводность. Как известно, тепло переходит от более теплых к более холодным участкам ткани. Поток тепла dQ/dt прямо пропорционален температурному градиенту, т. е. в одномерном случае в идеальном однородном образце ткани тепловая энергия dQ за время dt переходит с места с высокой температурой T_1 к месту с более низкой температурой T_2 в соответствии со следующей формулой:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda_T \cdot \frac{dT}{dz}.$$

Типичные значения коэффициентов теплопроводности указаны в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Теплопроводность различных материалов при нормальных условиях

Материал	λ_T , Вт/(м·К)
Воздух	0,02
Этанол	0,16
Жировая ткань	0,3
Ткань водосодержащая	0,5
Вода	0,58
Кровь	0,62
Сталь	46,02
Медь	418,0

Теплопроводность жидкостей и твердых тел слабо зависит от температуры. Она повышается, например, у воды от 0,62 Вт/(м·К) при 37 °С до 0,64 Вт/(м·К) при 57 °С. Что касается биоткани, то значения составляют 0,3...0,5 Вт/(м·К) в зависимости от содержания воды. Для определения теплопроводности ткани справедлива приближенная формула:

$$\lambda_T = 0,06 + 0,57 \cdot \frac{\rho_w}{\rho},$$

где ρ [кг/м³] – плотность ткани, ρ_w [кг/м³] – содержание воды в ткани.

Таким образом, теплопроводность ткани слабо зависит от температуры вплоть до температуры коагуляции.

При превращении световой энергии в тепловую ускоряется хаотическое движение атомов и молекул ткани (броуновское движение). Более быстрые молекулы передают кинетическую энергию менее быстрым при столкновениях. Так продолжается до тех пор, пока между ними не установится статистическое равновесие.

Накопление тепла. Способность ткани принимать и накапливать тепло описывается через удельную теплоемкость c . Эта величина численно равна количеству тепла Q , которое приводит к повышению температуры единицы массы на 1 К. Типичные значения приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Удельная теплоемкость некоторых материалов

Материал	c , кДж/(кг·К)
Медь	0,385
Сталь	0,477
Воздух	1,005
Жир	1,930
Этанол	2,430
Кровь	3,22
Вода	4,183

Для определения удельной теплоемкости материала справедлива следующая приближенная формула:

$$\lambda_T = 1,55 + 2,8 \cdot \frac{\rho_w}{\rho}.$$

При достижении температур, приводящих к фазовым переходам (плавление, испарение), тепловое движение усиливается так, что сил взаимного притяжения уже недостает для удержания атомов и молекул: твердые тела утрачивают внутреннюю упорядоченность в пользу свободного движения частиц жидкости; в газообразном агрегатном состоянии все частицы движутся с большой скоростью независимо друг от друга. Поскольку вся тепловая энергия использована для преодоления межмолекулярных сил, температура рассматриваемого объема по достижении температуры фазового перехода остается константой даже при непрерывном поступлении тепла, пока не закончится смена фаз.

В качестве меры для количества тепла, проникающего в объем ткани за определенное время после мгновенного повышения температуры поверхности тела, применяется коэффициент тепловой активности b [Вт·с/(К·м²)], объединяющий теплопроводность и удельную теплоемкость:

$$b = \sqrt{\lambda_T \cdot c \rho}.$$

Динамическая характеристика образца (коэффициент температуропроводности) ткани также обобщенно выражается через отношение теплопроводности к удельной теплоемкости на единицу объема:

$$\alpha = \frac{\lambda_T}{c\rho}.$$

Определенная таким образом температуропроводность одинакова для большинства тканей (около $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$), т. к. снижение теплопроводности из-за незначительного содержания воды, как правило, компенсируется сопровождающимся уменьшением удельной теплоемкости.

Общая пространственная и временная характеристика температурного распределения в облученном объеме ткани определяется общим уравнением теплопроводности (выражение (5.6) ниже). Однако аналитическое решение уравнения для конкретных случаев может быть очень сложным. В виде примера можно назвать температурное распределение, имеющее место в одномерном случае, если в момент времени t' в точке x' выделяется количество тепла Q :

$$T(z, t) = \frac{Q \cdot \exp\left[-\frac{(z - z')^2}{4\alpha \cdot (t - t')}\right]}{2c\rho \cdot \sqrt{\pi\alpha(t - t')}}.$$

Для поля излучения с пространственным и временным изменением при плотности распределения тепла $q(x', t')$ получаем:

$$T(z, t) = \frac{1}{c\rho \cdot \sqrt{\pi \cdot \lambda_T}} \cdot \int_0^t \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q(z', t')}{\sqrt{t - t'}} \cdot \exp\left[-\frac{(z - z')^2}{4\lambda_T \cdot (t - t')}\right] \cdot dz' \cdot dt'.$$

Для практического расчета временной характеристики распространения локального нагревания как параметр подходит время термической релаксации τ_{rel} :

$$\tau_{rel} = \frac{l^2 \cdot c\rho}{\lambda_T} = \frac{l}{\alpha}.$$

Значение τ_{rel} можно наглядно интерпретировать следующим образом: отрезок ткани в виде кубика с длиной кромки l , который на dT теплее своего окружения, по истечении времени охладился почти до температуры окружающей среды, т. е. перепад температур выровнялся благодаря нагреванию всей ткани. Если на поверхность ткани подается короткий импульс тепла, то проходит время τ_{rel} , пока на глубине $l = \sqrt{\alpha\tau_i}$ не наступит заметного нагревания.

Отвод тепла кровотоком и другие механизмы. Тепловая энергия из облученного участка отводится не только путем теплопроводности,

но и через сосудистую систему. Исходить можно из того, что кровь поступает в облученный объем с нормальной артериальной температурой и сразу же локально нагревается до высокой температуры в капиллярной области.

Можно или нельзя в конкретном случае пренебречь влиянием сосудов на температурное распределение, проще всего рассчитать, образуя обратное значение произведения величины кровотока v_B (табл. 5.4) и плотности ρ ткани.

Таблица 5.4

Интенсивность кровотока в различных тканях и органах человека

Биоткань	v_B , мл/мин
Жировая ткань	0,012...0,015
Мышца руки	0,02...0,07
Кожа	0,15...0,5
Мозг	0,46...1,0
Почка	3,4
Щитовидная железа	4,0

Полученное таким образом время перфузии t_B указывает на то, за какое время заменяется вся кровь в единице объема ткани. Влияние, которым нельзя пренебречь, наблюдается только тогда, когда время облучения порядка t_B или больше.

Перенос тепла кровотоком может стать доминирующим фактором при установлении стационарного температурного распределения, особенно при непрерывном облучении. В то время как температура без кровотока при термическом равновесии убывает с увеличением расстояния от локального источника тепла ($T \sim 1/r$), охлаждение за счет кровотока дает дополнительный экспоненциально убывающий множитель.

Профиль температуры в этом случае описывается выражением:

$$T \sim \frac{1}{r} \cdot \exp\left(-\frac{l_{th}}{r}\right),$$

где глубина термического проникновения определяется как $l_{th} = \sqrt{\alpha \cdot t_B}$.

Влияние кровотока на стационарное температурное распределение имеет значение только в том случае, если протяженность облученной области ткани больше, чем глубина термического проникновения. Если же, напротив, облученная область явно меньше l_{th} , то перенос тепла определяется коэффициентом теплопроводности. Впрочем, тепло от облучаемого объема может быть отведено путем метаболических процес-

сов, испарения воды с поверхности и конвекции. Эти процессы играют большую роль в первую очередь при непрерывном лазерном облучении, т. к. соответствующие характерные времена относительно велики.

5.3. Термическое действие ЛИ

Энергия ЛИ может преобразовываться следующим образом:

- переизлучение и рассеяние (резонансное, комбинированное, Рэлея, в результате флюоресценции и фосфоресценции);
- поглощение и превращение в тепло;
- возбуждение молекул и активация химических реакций.

При облучении ткани при достаточной плотности мощности возникает ожог. Дальнейшее увеличение плотности энергии приводит к усилению повреждения. Это линейное соответствие между облученностью и поражением сохраняется до момента закипания жидкой фазы с последующим взрывообразным испарением. Это все относится к физике процесса. Далее вмешивается биология (ответная реакция организма).

Нахождение теплового действия на биоткань состоит из следующих задач:

- описание распределения энергии ЛИ;
- получение абсорбционных характеристик материала;
- анализ распределения температур;
- анализ развивающихся биологических изменений.

Для вычисления температуры необходимо знать теплофизические свойства материала и различные механизмы переноса тепла. При коротких лазерных импульсах основным из них является диффузия тепла, или теплопроводность. При большой длительности облучения (например, минуты) приобретает значение охлаждение тканей за счет циркуляции крови и испарения.

При очень коротких τ_i , когда теплопроводностью можно пренебречь за время τ_i :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\omega}{c_p \rho}, \quad (5.3)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Из выражения (5.3) можно найти температуру. Если скачок температуры велик, то возможно возникновение высокого давления, вызванного термическим расширением материала ткани.

При больших τ_i , например при воздействии лазером с непрерывным режимом воздействия, нагревание ткани идет медленно и параллельно ему идет термическое расширение материала. Возникающее давление

незначительно, и им можно пренебречь. Скорость роста температуры в этом случае определяется уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\omega}{c\rho} + \frac{\lambda_T}{c\rho} \cdot \Delta^2 T. \quad (5.4)$$

Определить температурные профили можно аналитически для ряда случаев. Для коротких длительностей τ_i :

$$T = \frac{\omega \cdot \tau_i}{c\rho} = \frac{A_{ef} \cdot q_s \cdot \exp(-(\mu + \beta) \cdot z)}{c\rho} \cdot \mu \cdot \tau_i,$$

или

$$T = \frac{A_{ef} \cdot q_s(r, z) \cdot \mu \cdot \tau_i}{c\rho}. \quad (5.5)$$

При больших τ_i и больших μ (поверхностное поглощение) из (5.3) получаем выражение для определения температурного профиля для плоского случая:

$$T(z) = \frac{A_{ef} \cdot q_s \cdot 2\sqrt{\alpha\tau_i}}{\lambda_T} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha\tau_i}}\right).$$

Типичные теплофизические параметры для слизистых оболочек:

- $c\rho = 4,19 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{см}^3)$;
- $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$;
- $\lambda_T \approx 5,46 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$ – без учета охлаждения кровотоком.

В более общем случае уравнение приобретает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{W}{c\rho} + \frac{\lambda_T}{c\rho} \cdot \Delta^2 T - p \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{x}{c\rho} \cdot \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_k}, \quad (5.6)$$

где p – давление, v – удельный объем, v_i – скорость частиц, x – коэффициент сдвиговой вязкости.

Наиболее важный результат теплового воздействия ЛИ – ускорение протекания биохимических реакций. Для рассмотрения этого вопроса обратимся к уравнению химической кинетики для простейшего случая одноударных процессов:

$$\frac{df}{dt} = -K' \cdot f, \quad (5.7)$$

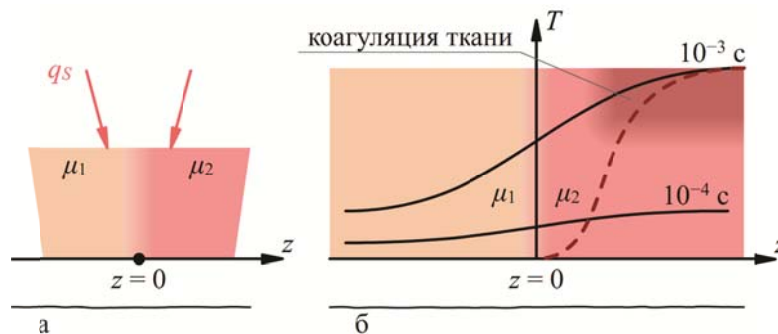
где f – исходное количество облучаемого материала, df – изменение этого количества за время dt , K' – коэффициент скорости реакции, определяемый как

$$K' = \frac{k \cdot T}{h} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H + T \cdot \Delta S}{RT}\right). \quad (5.8)$$

Здесь k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, h – постоянная Планка, ΔH – изменение свободной энергии, ΔS – изменение энтропии, R – универсальная газовая постоянная.

Экспоненциальная зависимость коэффициента K' приводит к тому, что многие биологические эффекты приобретают критическую температуру. Например, для белка существует температура коагуляции ($\sim 45^\circ\text{C}$) и денатурации белка ($\sim 55^\circ\text{C}$). Следовательно, зная распределение температуры в объекте, можно определить размеры области термического повреждения материала (например, зону коагуляции ткани).

Можно предположить, что температурный профиль в тканях с разным μ различен, как будет различен и термический эффект. На рис. 5.11 показан результат расчета температуры для двух тканей: одна – опухолевая пигментированная с $\mu_2 = 10 \text{ см}^{-1}$, вторая – здоровая с $\mu_1 = 1 \text{ см}^{-1}$. В расчете теплопроводностью пренебрегали, поскольку проникновение света в ткани большое, теплоемкость принимали равную теплоемкости воды.



*Рис. 5.11. Температурные профили
для лазерных импульсов различной длительности
в нормальной ткани (слева от оси) и опухолевой ткани (справа от оси)*

На рис. 5.11 кривая скорости коагуляции показана пунктиром. Она круче температурного профиля, то есть небольшие изменения температуры в облучаемой ткани (за счет изменения μ , q_s , τ_i) приведут к существенным сдвигам в скорости коагуляции вещества. Так как скорость коагуляции чувствительна к малым изменениям показателя поглощения (изменение на 10 % ведет к изменению скорости реакции почти на порядок), возможно селективное разрушение патологических очагов даже при небольших отличиях μ между ними и нормальной тканью. Однако в то же время экспоненциальная зависимость скорости коагуляции от температуры требует осторожности с дозировкой в процессе облу-

чения, поскольку небольшие отклонения от требуемой плотности энергии (или плотности мощности), например за счет неоднородности лазерного пучка по сечению, могут привести к непредвиденной коагуляции здоровой ткани.

Отметим наиболее характерные особенности облученных лазером тканей. В отличие от других термических повреждений ожог лазера имеет резкую границу (за счет малой длительности). Первоначально резкие границы в дальнейшем могут быть смазаны за счет развития вторичных процессов (воспаления, регенерации и др.). Наиболее интенсивные повреждения возникают вокруг пигментированных структур, которые являются центрами повышенного светопоглощения.

При повышении q_s термические повреждения приобретают качественно отличный характер. Последовательно могут возникать следующие эффекты:

- ускорение физиологических процессов при росте температуры;
- дегидрирование с обычно обратимым сморщиванием ткани;
- необратимая денатурация белка (и коагуляция);
- взрывное испарение воды ткани с разрушением структуры ткани;
- термолиз (обугливание);
- испарение материала ткани (возгонка).

5.4. Нетермическое действие ЛИ на биологические ткани

Нетермическое действие возможно в результате оптического пробоя при высоких плотностях мощности q_s . При этом напряженность электрического поля:

$$E = \sqrt{120 \cdot \pi \cdot q_s}.$$

Электрический пробой может приводить к возникновению ударных волн и ионизации клеток, что приводит к их разрушению. Возникновение ударных волн и звуковых колебаний высокой амплитуды возможно и вследствие поглощения излучения, и возникновения термических напряжений. При этом давление в акустической волне:

$$p = -B \cdot \varepsilon \cdot \text{grad}(T),$$

где B – модуль упругости, ε – коэффициент теплового расширения.

Давление p в акустической волне велико при высоких значениях μ и коротких длительностях импульса излучения τ_i . Так, при $\mu = 1000 \text{ см}^{-1}$ (сетчатка глаза), $W_s = 0,1 \text{ Дж}$ и $\tau_i \approx 100 \text{ нс}$ давление p может превысить $\sim 100 \text{ атм}$ (свыше 10^7 Па).

В пределе в режиме модулированной добротности резонатора давление может достигать значения

$$p \approx \Gamma \cdot \frac{W_s}{V} = \Gamma \cdot q_s(r) \cdot \mu \cdot \tau_i,$$

где V – объем, в котором выделилась энергия, Γ – коэффициент пропорциональности (коэффициент Гренайзена).

Опыты показывают, что в таких режимах ткани поражаются далеко от места воздействия. Например, при облучении головы морской свинки рубиновым лазером ($W_s = 100$ Дж, $\tau_i \sim 1$ мс) кровотечения обнаружены в стволе мозга, т. е. на участках, далеко отстоящих от черепных костей.

Существует много других механизмов нетеплового действия ЛИ, например:

- давление света;
- электрострикция (возникновение электрического дипольного момента и механического вращающего момента);
- импульс отдачи (в результате извержения частиц с поверхности);
- механический импульс в результате внутреннего парообразования;
- фотохимические и фотодинамические эффекты.

Большая плотность мощности может привести к многофотонному поглощению. Например, при четырехфотонном поглощении излучения неодимового лазера ($\lambda_0 = 1,06$ мкм) действие будет соответствовать действию УФ-излучения с $\lambda_0 = 265$ нм. Это означает, что излучение неодимового лазера при достаточной q_s может вызвать прямую альтерацию нуклеиновых кислот и белков, несмотря на отсутствие у них полос поглощения в этой спектральной области. В опытах наблюдалось возбуждение и люминесценция в УФ-области при действии рубинового лазера с модуляцией добротности; при действии неодимового лазера – в области 500...600 нм.

Следует отметить, что процессы, связанные с образованием свободных радикалов и многофотонным поглощением, маловероятны при минимальных, пороговых повреждениях лазерным излучением. Роль вынужденного комбинационного рассеяния в этих случаях тоже незначительна, поскольку переизлучение идет на близких длинах волн.

Фотохимические процессы. В отличие от неспецифичных термохимических изменений, выражающихся в тепловом ускорении различных реакций (в первую очередь денатурационных альтераций белков), фотохимические процессы связаны с возбуждением определенных светопоглощающих структур (соединений) и избирательным влиянием на компоненты клетки.

В связи с тем, что индукция фотохимических реакций определяется присутствием в клетке светоабсорбирующих веществ, а ее основные биохимические компоненты (белки и нуклеиновые кислоты) имеют максимум поглощения в ультрафиолетовой части спектра, именно эта спектральная область обуславливает наибольший фотохимический эффект.

Фотодеструкция белков вызывается УФ-излучением с $\lambda_0 < 290$ нм, причем в области 230...290 нм поглощение обусловлено наличием в белковой макромолекуле ароматических аминокислот (фенилалин, тирозин, триптофан), а также цистина. Воздействие на нуклеиновые кислоты ЛИ с $\lambda_0 < 280$ нм приводит к повреждениям, из которых важным является образование димеров пиримидиновых азотистых оснований.

Помимо прямого воздействия светового излучения на компоненты клетки, которое определяется их собственным поглощением (фотоабсорбцией), возможны повреждения, опосредованные фотосенсибилизаторами (фотодинамический эффект). В зависимости от полосы поглощения сенсибилизатора, разрушения можно производить излучением в видимой области спектра.

В самой общей форме процессы прямого и сенсибилизированного фотоповреждения биологического материала могут быть записаны как:



Выражение (5.9) описывает прямое фотоповреждение, а выражение (5.10) – сенсибилизированное; M – облучаемый материал; M^* – возбужденная система; P – продукт реакции; S – сенсибилизатор; S^* – реакционно-способный фотосенсибилизатор.

Опытами показано, что с применением фотосенсибилизаторов возможно повреждение клеток опухолевой ткани при мощности излучения значительно более низкой, чем необходимая для тепловой активации биологических объектов.

В заключение следует отметить, что особенностью применения лазеров для индукции фотохимических процессов, по сравнению с другими световыми источниками, является возможность создания высоких плотностей потоков в узких спектральных участках, что важно при узких полосах поглощения биохимических соединений. Это позволяет избежать побочных реакций, которые возможны при облучении широким спектром.

5.5. Физические основы лазерной терапии

5.5.1. Процессы при низкоэнергетическом воздействии ЛИ на биоткани

Существует четыре направления воздействия:

- лазерная диагностика, основывающаяся на невозмущающем воздействии (низкоинтенсивное воздействие);

- лазерная терапия – воздействие неповреждающего характера на фотофизические и фотохимические процессы, происходящие в живом организме (также низкоэнергетичное воздействие);
- высокоэнергетичное воздействие, приводящее к контролируемым повреждениям (силовая терапия);
- высокоинтенсивное локальное действие, приводящее к разрушению участков тканей (хирургия).

Термин «низкоэнергетичное излучение» относится к лазерам, имеющим малую импульсную мощность. При этом критерием выступает степень воздействия на биоткань.

В фазе поглощения света действуют физические законы и происходят физические процессы, основные из которых:

- внутренний и внешний фотоэффект;
- электролитическая диссоциация молекул.

При внутреннем фотоэффекте поглощение фотона переводит атом или молекулу в возбужденное состояние. Изменяется электропроводимость, и возникает разность потенциалов между различными участками освещаемого объекта, т. е. возникает фото-ЭДС. Наибольшая фото-ЭДС (несколько десятков вольт) возникает при освещении полупроводника, помещенного в магнитное поле, что применяется в магнитолазерной терапии.

При внешнем фотоэффекте электрон, поглотив фотон, покидает вещество. Однако, поскольку ткани представляют собой диэлектрики или полупроводники, внешний фотоэффект незначителен. По-видимому, он существенен в УФ-области, и результат его нам известен (загар, ожог и т. д.).

Электролитическая диссоциация происходит при разрыве слабых ионных или водородных связей. Появляются свободные ионы.

После того как произошло электронное возбуждение, энергия возбуждения реализуется в виде:

- тепла;
- испускания кванта света (флюоресценции или фосфоресценции);
- фотохимической реакции;
- передачи возбуждения другой молекуле.

Образование электронных возбужденных состояний приводит к изменению энергетической активности клеточных мембран, образованию продуктов фотолиза и прочего, что приводит к запуску целого комплекса биофизических и биохимических процессов. Повышение энергетической активности биологических мембран приводит к увеличению активности транспорта веществ через мембрану, усиливает некоторые процессы, в частности окислительные.

Установлено, что действие низкоэнергетичного излучения He-Ne-лазера инициирует в жидкокристаллической многокомпонентной системе биоткани структурные изменения – структурную альтерацию, что тоже приводит к активизации процессов в водной матрице биожидкости, т. е. биостимуляции.

Установлено, что под действием низкоэнергетичного лазерного излучения (НЛИ) в тканях происходят следующие изменения:

- ускоряется синтез нуклеиновых кислот (ДНК, РНК);
- ускоряются окислительно-восстановительные реакции: ткани поглощают больше кислорода;
- увеличивается скорость кровотока в тканях организма;
- в процессе облучения увеличивается число функционирующих капилляров в патологической ткани;
- уменьшается внутриклеточный отек, что связано с повышением кровотока в тканях и активацией транспорта веществ через сосудистую стенку, а также с интенсивным формированием сосудов, особенно капилляров;
- укорачиваются фазы воспалительного процесса при облучении патологического очага;
- понижается рецепторная чувствительность тканей вследствие действия луча на нервные окончания.

На рис. 5.12 изображена схема взаимодействия НЛИ с биотканями.

5.5.2. Механизмы терапевтического действия НЛИ

Эти механизмы изучены слабо. Точно определено, что биологический эффект вызывает излучение такой длины волны, при которой оно поглощается молекулами или фотоакцепторами тех или иных структурных компонентов клеток. Спектры поглощения различных компонентов различны и могут находиться как в УФ-области, так и в ИК. В то же время биологические эффекты при воздействии ЛИ с различными λ_0 очень сходны. И это не очень ясно. Вообще-то максимумы биостимуляции электромагнитными волнами лежат в красной (633 нм), зеленой (500 нм) и фиолетовой (415 нм) области спектра.

Спектры поглощения биополимеров (белки, ферменты, биологические мембраны, фосфолипиды, пигменты) и биологических жидкостей (лимфа, кровь, плазма, внутриклеточная вода) зависят от сложности структуры. Элементарные белковые структуры (аминокислоты) и различные остатки белковых молекул поглощают в УФ-диапазоне, но чем длиннее система двойных сопряженных связей, тем более длинноволновой максимум поглощения.

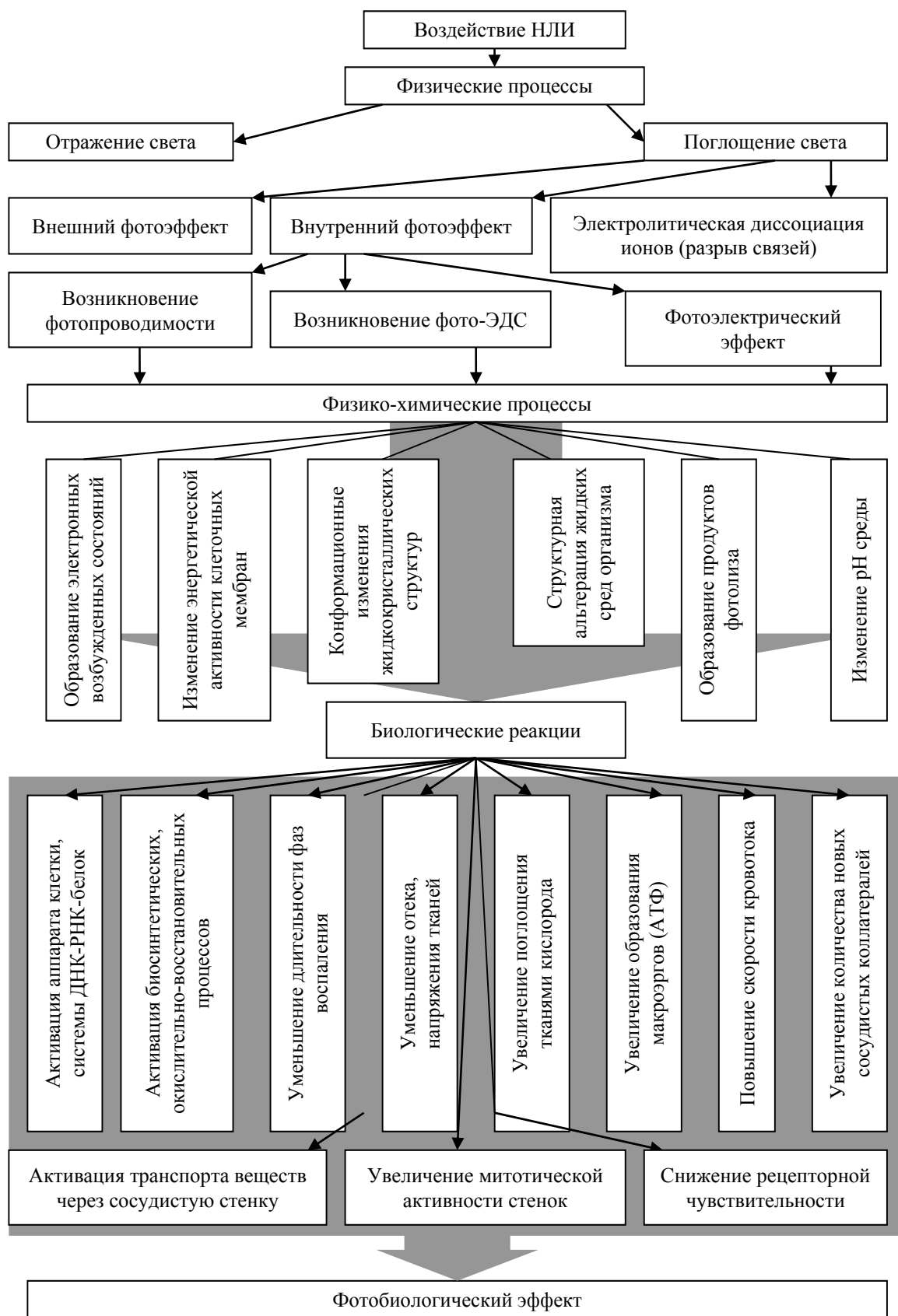


Рис. 5.12. Схема взаимодействия низкоэнергетичного ЛИ с биообъектом

Фосфолипиды и клеточные мембраны — жидкокристаллические структуры, обладающие неустойчивым состоянием при температуре тела 37 °С, весьма чувствительны к воздействию во всем оптическом диапазоне. Биологические жидкости, являясь сложными многокомпонентными системами и обладая свойствами жидких кристаллов, реагируют структурной альтерацией вещества даже на очень слабые внешние физические воздействия. А наличие в их составе, в частности в крови, форменных элементов (эритроциты, лейкоциты, тромбоциты) повышает их восприимчивость, в том числе и к лазерному излучению. В биожидкостях имеются специфические фотоакцепторы, реагирующие на ЛИ определенной λ_0 , а энергии фотонов даже в ИК-области достаточно для их структурной альтерации.

Действие НЛИ на ткани разделяют на непосредственное и опосредованное. Непосредственное действие проявляется в объеме тканей, подвергшихся облучению. При этом ЛИ взаимодействует с фотоакцепторами, запуская комплекс фотофизических и фотохимических реакций.

Опосредованное действие связано с передачей энергии возбуждения или эффекта от ее действия на другие участки. Это может быть переизлучение клетками на той же λ_0 (расстоянием до 5 см), что и возбуждение, передача эффекта через жидкие среды организма или передача энергии по каналам и меридианам рефлексотерапии.

Живые организмы являются неравновесными, диссипативными, самоструктурирующимися и самоорганизующимися системами. В человеческом организме все элементы тесно взаимосвязаны и изменение каждого может изменять состояние других или системы в целом.

При оптимальных дозах воздействия НЛИ осуществляется энергетическая подкачка. В ответ на это в системах и органах происходит активизация саморегуляции. Конечный фотобиологический эффект лазерного облучения проявляется в ответной реакции организма в целом, комплексным реагированием органов и систем, что и приводит к клиническому эффекту.

Предполагаемая схема механизма терапевтического действия представлена на рис. 5.13.

Таким образом, основой механизма взаимодействия НЛИ с биообъектом являются фотофизические и фотохимические реакции, связанные с резонансным поглощением тканями света и нарушением слабых межмолекулярных связей, а также восприятие и перенос эффекта лазерного облучения жидкими средами организма. При этом в зависимости от организменного уровня последовательно или одновременно происходят следующие процессы или реакции.

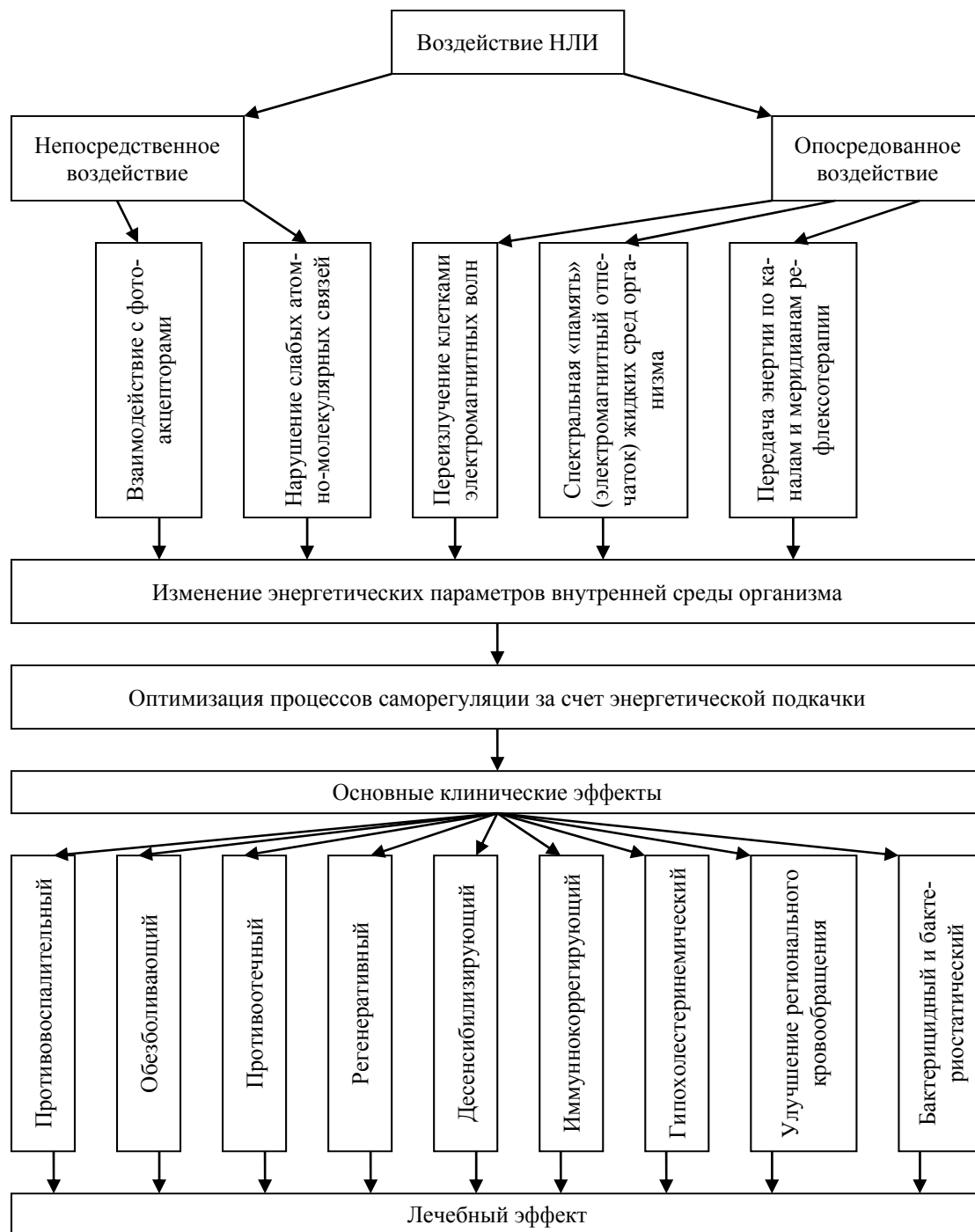


Рис. 5.13. Механизм терапевтического действия НЛИ

На атомно-молекулярном уровне:

- поглощение света тканевым фотоакцептором;
- внешний и внутренний фотоэффект;
- электролитическая диссоциация ионов (разрыв слабых связей);
- электронное возбуждение и его миграция;

- первичный фотофизический акт;
- появление первичных фотопродуктов.

На клеточном уровне:

- изменение энергетической активности клеточных мембран;
- активизация ядерного аппарата клеток, системы ДНК/РНК-белков;
- активация окислительно-восстановительных процессов, биосинтетических;
- увеличение активности клеток, активация процессов размножения.

На уровне отдельных органов:

- понижение рецепторной чувствительности;
- уменьшение длительности фаз воспаления;
- уменьшение отека и напряжения тканей;
- увеличение поглощения тканями кислорода;
- повышение скорости кровотока;
- активация транспорта веществ через сосудистую стенку.

На уровне целостного механизма клинические эффекты:

- противовоспалительный;
- обезболивающий;
- противоотечный;
- регенераторный;
- десенсибилизирующий;
- иммунокорректирующий;
- улучшение кровообращения;
- бактерицидный.

5.6. Физические основы лазерной хирургии

5.6.1. Тепловая хирургия

Лазерная хирургия основана на тепловом действии излучения на биологическую среду. В общих чертах процессы, протекающие при действии концентрированного источника теплоты на биоткани, схожи с действием при лазерной обработке материалов, в частности неметаллов, поскольку компоненты биологической среды являются диэлектриками и полупроводниками.

Передача тепла из зоны поглощения (или зоны действия теплового источника) происходит по механизмам теплопроводности, поэтому применимы известные нам подходы и методы оценки температурных профилей, а также теплового баланса в зоне разогрева. Разрушение материала биоткани происходит по механизму испарения или по механизму ударного разрушения.

Рассечение тканей. В медицинской практике чаще всего ткани необходимо рассекать, т. е. использовать луч лазера в роли скальпеля. Механизм рассечения тканей испарительный. Испарение тканей происходит при объемной плотности мощности порядка 500 кВт/см^3 ($\omega \sim 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^3$). Поскольку глубина проникновения света в биоткань сильно зависит от длины волны, то поверхностная плотность мощности q_s , необходимая для испарения, также различна на разных длинах волн, т. е. для лазеров различного типа. Так для CO_2 -лазера, излучение которого проникает на глубину $\sim 50 \text{ мкм}$, $q_s \sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$, что достигается при мощности лазера $\sim 20 \text{ Вт}$ и фокусировке излучения в пятно диаметром $\sim 1 \text{ мм}$. При фокусировке в пятно $0,5 \text{ мм}$ мощность лазера можно снизить до 5 Вт . Глубина реза зависит от скорости резания и составляет $\sim 2 \dots 3 \text{ мм}$.

Благодаря относительно невысокой плотности потока при лазерном рассечении тканей, а также возможности механически (руками) раскрывать рез подача рабочего (защитного) газа в канал реза не так актуальна. Лазерный луч делает относительно бескровный разрез, т. к. одновременно с рассечением ткани ее края коагулируют, встречающиеся на пути реза кровеносные сосуды завариваются, если они достаточно мелкие. При разрезании возможно отсутствие оптического разряда в окружающем (атмосферном) газе.

Сварка биотканей. Механизм сварки биотканей несколько иной по сравнению со сваркой материалов. При биологической сварке происходит коагуляция жидкости, содержащейся в стенках свариваемой ткани и специально выдавливаемой в шовный промежуток.

Если объемная плотность мощности составляет $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^3$, то вместо испарения будет коагуляция (заваривание) тканей. Этот процесс используется для сшивания разрезанной ткани. Сшитые участки ткани стерильны, как и разрезы. Они быстро (через 25–30 суток) заживают с образованием ровных рубцов, мало отличимых от окружающих тканей.

С помощью ЛИ можно проводить операции резки, сварки, прижигания гнойных ран и язв. Последние операции можно проводить без вскрытия, если осуществлять транспортировку пучка через оптическое волокно, встроенное в эндоскоп. Такие операции можно проводить на пищеводе и желудке, а также и других полостях (аргоновый лазер).

В офтальмологии ЛИ используется для приварки отслоившихся участков сетчатки (рубиновый лазер или иной импульсный миллисекундного диапазона). При лечении глаукомы используется механизм ударного разрушения (пробивка отверстия в радужной оболочке глаза). Используется лазер (рубиновый) с длительностью импульса $\tau_i \sim 10^{-8} \text{ с}$. Механизм пробивки – микровзрыв с образованием ударных волн. Про-

бивка возможна и серией импульсов, что должно увеличивать качество путем послойного удаления.

В онкологии ЛИ используют в трех режимах действия:

- облучение с малой плотностью мощности, приводящее к гибели раковых клеток;
- облучение слабосфокусированным пучком, приводящее к коагуляции (разрушение опухоли);
- облучение с острой фокусировкой, приводящее к иссечению или испарению.

Механизм лечения зубов заключается в разрушении (испарении) участков, пораженных кариесом. ЛИ поглощается пораженным участком и отражается (рассеивается) от здоровых. Механизм разрушения – испарительный. Режим облучения – импульсно-периодический. Энергия импульса ~ 1 Дж, длина волны $\lambda_0 = 2,79$ мкм. Сейчас используют эрбиевый лазер ($\lambda_0 = 2,9$ мкм), поскольку он не разрушает мягких тканей зуба. Идея метода достаточно проста, однако разработка лазерной бор-машины испытывает трудности, связанные с передачей длинноволнового излучения через оптическое волокно.

Использовать лазеры в хирургии нужно по принципу целесообразности. Например, успешно применять ЛИ можно в хирургии паренхиматозных органов (печень, почки, селезенка), желудочно-кишечного тракта, при гнойно-септических заболеваниях и в онкологии. Он незаменим в приварке сетчатки, лечении глаукомы, испарении патологических очагов, при пересечении поджелудочной железы, щитовидки. Нет смысла вырезать лазером грыжу, отрезать ногу и т. д.

Фотодинамическая терапия злокачественных образований. Желаемый эффект – терапевтический. Селективное разрушение ткани достигается путем светового облучения в комбинации с подходящей фотосенсибилизацией. Молекулы фотосенсибилизатора возбуждаются излучением и затем вступают в химические реакции с биомолекулами клеточной системы, что приводит к разрушению последних.

В качестве фотодинамического сенсibilизатора используют производное гематопорфирина, поскольку оно накапливается в опухолях и меньше откладывается в здоровых тканях. Путем облучения светом ($\lambda_0 \approx 610 \dots 635$ нм для данного сенсibilизатора) достигается селективное разрушение фотосенсибилизированной опухоли без повреждения здоровой ткани. Скорость разрушения определяется мощностью источника.

Применяются:

- ртутные или ксеноновые лампы высокого давления (с фильтрами);
- лазеры на красителях;
- лазеры на парах золота ($\lambda_0 = 628$ нм).

Лазеры здесь имеют преимущество перед лампами, поскольку возможно применение световодов.

5.6.2. Нетепловая лазерная микрохирургия

Разрушение ткани методом оптического пробоя. С помощью острой фокусировки излучения импульсного лазера можно получить плотности мощности $q_S \sim 10^{10}$ Вт/см². В облучаемой ткани в каустике происходит оптический пробой (даже в случае прозрачной для излучения среды). Возникает плазма и нелинейное поглощение ЛИ. Процесс протекает в виде взрыва и связан с образованием радиально расширяющейся ударной волны (УВ) и механическим разрушением ткани. Этот метод не связан с поглощательной способностью объекта и используется при обработке прозрачных биологических сред.

Метод используется при микрохирургических вмешательствах в передней части глаза, т. е. в области хрусталика и передней части стекловидного тела (пробивка дренажных отверстий для лечения глаукомы, рассечения спаек стекловидного тела, измельчение твердого ядра хрусталика). Используются неодимовые лазеры. Пучок, как и в коагуляторе, фокусируется с большим углом сходимости (10...16°). Размер фокального пятна составляет 10...25 мкм. Энергия излучения 1...20 мДж, $\tau_i \sim 10...15$ нс. Используются также пикосекундные лазеры в режиме цуга импульсов.

Фотодинамическое (фотохимическое) разрушение опухолей. Метод и механизмы описаны ранее. Отметим, что выбор лазера определяется полосой поглощения сенсibilизатора. Преимущество метода – лечение опухолей на ранней стадии. Если опухоль просвечивается вся, то все опухолевые клетки разрушаются в результате коагуляции. Недостаток – ограниченная глубина проникновения света в ткани в полосе $\lambda_0 = 610...635$ нм (полоса используемых сенсibilизаторов).

5.7. Лазеры, применяемые в хирургии

Для коагуляции или некроза обширных участков ткани используют лазеры, излучение которых слабо поглощается (μ мало). При этом из-за рассеяния возможно действие на участки, расположенные вне действия пучка.

Для резания и испарения должен использоваться лазер, излучение которого сильно поглощается (μ велико).

Применяемые лазеры:

- газовый CO₂-лазер;
- твердотельный YAG:Nd-лазер (в том числе высшие гармоники основной длины волны излучения);

- ионные лазеры (аргоновый, криптоновый);
- жидкостные лазеры;
- эрбиевый лазер;
- лазер на парах меди;
- эксимерные лазеры.

Для неодимового, аргонового и жидкостных лазеров разработаны оптоволоконные светопроводы для локального воздействия в труднодоступных участках. Для CO₂-лазера и эрбиевого лазера световолокна еще не разработаны.

Лазер на углекислом газе (CO₂-лазер, $\lambda_0 = 10600$ нм). Ткани, состоящие на 80 % из воды сильно поглощают излучение CO₂-лазера, поэтому CO₂-лазер применяется исключительно как скальпель для резания и иссечения тканей. Режущее действие основано на взрывном испарении внутри- и внеклеточной воды в области фокусировки. После испарения воды температура растет выше 100 °С, что приводит к обугливанию и испарению. Некротическое уширение реза имеет толщину 30...40 мкм. На расстоянии 300...600 мкм ткань не повреждается. Сосуды диаметром 0,5...1 мм спонтанно закрываются. Кровопотери очень малы, особенно это заметно при операциях на печени, легких, сердце. При рассечении стенок желудка кровотечения отсутствуют. Легко иссекаются ожоги и удаляются некротические ткани. В гнойной хирургии лазер незаменим, поскольку полностью очищает рану от инфекции (обычным путем не удастся).

Удаление струпа при гнойно-воспалительных заболеваниях и ожогах идет методом иссечения (испарения). При этом скорость обработки CO₂-лазером мощностью 60 Вт сравнима со скоростью обработки обычным скальпелем.

Основные преимущества:

- стерильность и локальность действия;
- спонтанная коагуляция разрезанных тканей и сосудов (уменьшение во много раз потери крови);
- отсутствие раздражения при операциях на мозге и сердце;
- возможность разрезания мягких тканей без фиксирования;
- минимальная травматизация тканей.

Недостатки:

- более низкая скорость резания по сравнению с обычным скальпелем;
- глубина реза плохо контролируется.

Поэтому CO₂-лазер в основном применяется в случаях:

- оперативного вмешательства при кровотечениях и плохой свертываемости крови;
- хирургии и микрохирургии в полости тела и на внутренних органах.

В микрохирургии луч CO_2 -лазера наводится в поле зрения операционного микроскопа. Для этого используется «пилотный» луч. Для общей хирургии мощность CO_2 -лазера составляет 50...100 Вт, для микрохирургии 10...20 Вт.

YAG:Nd-лазер ($\lambda_0 = 1064 \text{ нм}$). Под действием интенсивного излучения неодимового лазера образуется достаточно глубокий коагуляционный очаг. Режущее действие по сравнению с CO_2 -лазером незначительно. Поэтому неодимовый лазер применяется преимущественно для коагуляции кровотечения и для некротизирования патологически измененных областей ткани (опухолей) почти во всех областях хирургии. Применение моножильного кварц-полимерного волокна для передачи пучка дает большие возможности для хирургии в полостях тела.

Наиболее важные области применения Nd-лазера.

- Эндоскопическая фотокоагуляция желудочно-кишечных кровотечений. Для остановки острого кровотечения в верхнем желудочно-кишечном тракте можно использовать аргонный лазер, но глубина проникновения излучения неодимового лазера в 4–5 раз больше. С помощью Nd-лазера лучше закрываются крупные сосуды и останавливаются большие кровотечения (например, при варикозном расширении вен пищевода). Кварц-полимерное волокно (или полимер-полимерное) устанавливается в эндоскоп, торец световода обдувается потоком газа. Оптимальная для коагуляции доза облучения составляет 600...2000 Дж/см² при $\tau_i = 1...2 \text{ с}$.
- Эндоскопохирургия. С помощью волокна и эндоскопа некротируются опухоли в желудочно-кишечном тракте, трахеобронхиальной и мочеполовой системах.
- Офтальмология. Относится к нетепловой микрохирургии и будет изложена позднее.
- Преобразование гармоник позволяет значительно расширить области применения лазеров данных типов.

Ионный (аргонный) лазер ($\lambda_0 = 480 \text{ нм}$). Большая поглощательная способность гемоглобина в сине-зеленой области излучения аргонного лазера позволяет осуществить остановку кровотечения или закрыть обильно кровоснабжаемую ткань. Излучение аргонного лазера слабо поглощается водой, поэтому коагуляция возможна за слоем воды (например, на глазном дне).

Основные области применения.

- Фотокоагуляция в офтальмологии. Ранее здесь использовались ксеноновые коагуляторы (ксеноновые дуговые лампы). Затем появились рубиновые лазеры – для приварки сетчатки (в режиме свободной генерации), для лечения глаукомы (режим модулированной

добротности). В первом случае осуществляется термическое действие, во втором – ударное. Но красный свет рубинового лазера плохо поглощается кровью, и они малоэффективны при сосудистых поражениях органа зрения. Позднее появился аргоновый лазер. В большинстве случаев достаточно ксенонового коагулятора, но аргоновый лазер незаменим при локальных операциях. Мощность излучения аргонного лазера – несколько Вт. Воздействие происходит на задний полюс глаза для коагуляции малых очагов (размер ~50 мкм за время 50...100 мс). С его помощью осуществляется лечение диабетической ретинопатии, тромбозов вен, сетчатки и др.

- Эндоскопическая фотокоагуляция кровотечения желудочно-кишечного тракта. Действие аналогично действию неодимового лазера, только глубина проникновения меньше (~0,2 мм). Оптимальная коагуляционная доза составляет 150...500 Дж/см² при τ_i несколько секунд. При обильном кровотечении лучше использовать Nd-лазер. Аргоновым лазером можно не только разрушать, но и стимулировать зрительные функции сетчатки низкоэнергетичным потоком.
- Лечение поражений кожи. Лечение происходит путем целенаправленного запустения кровеносных сосудов. Применяется оптический кабель. Типичная доза составляет 12 Дж/см² при $\tau_i = 0,5$ с, $d_b = 3$ мм. Хорошо лечится гемангиома.

Лазер на парах меди ($\lambda_0 = 512; 570$ нм). Лазер излучает в зеленой области спектра. Мощность до 10 Вт. Используется в качестве скальпеля при резекции внутренних органов. При резе печени показывает преимущество по сравнению с СО₂-лазерами.

Эксимерные лазеры ($\lambda_0 = 308$ нм, $\lambda_0 = 193$ нм и т. д.). Основное применение – офтальмология. Используются для коррекции дефектов зрения – дальнозоркости, близорукости, астигматизма и пр.

РАЗДЕЛ 6

ЛАЗЕРНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ УСТАНОВКИ

Оборудование для лазерной хирургии производится с 1975 года. Первоначально это были лазеры на CO_2 - и рубине. Второе поколение лазеров включает в себя неодимовые лазеры, импульсные и непрерывные и более совершенную оснастку. Третье поколение – более универсальные машины с моножилными световодными приставками для большого круга операций. Большие успехи связаны с фокусировкой пучков медицинских лазеров. Например, излучение лазера «Ятаган-4» ($\lambda_0 = 1,79$ мкм, $W = 10$ мДж, $\tau_i = 8$ нс) фокусируется в пятно диаметром 50 мкм.

6.1. Установки лазерной хирургии и силовой терапии

6.1.1. Универсальные и многоцелевые установки для лазерных хирургических операций и силовой терапии

Лазерный эндоскопический скальпель

Производитель: Институт лазерной физики ФГУП «НПК «ТОИ им. С.И. Вавилова»», РФ, г. Санкт-Петербург.

Область применения: хирургия и ортопедия с использованием кварцевого световода.

Особенности: использование одновременно двух надежных твердотельных лазеров на YAG:

- YAG:Nd³⁺ (1,06 мкм) – для глубокой коагуляции;
- YAG:Ho/Tm/Cr (2,09 мкм) – для прецизионного разрезания.

Таблица 6.1

Технические характеристики

Длина волны, мкм	1,06	2,09
Мощность излучения, Вт	40	30
Длительность импульса, мкс	250	400
Частота следования, Гц	40	30
Габаритные размеры, м	0,5 × 0,6 × 1,2	
Диаметр световода, мкм	400...600	
Электропитание, В/Гц/кВт	380/50/8	
Охлаждение	Водяное, 2-контурное; 10 л/мин.	

Л100 – универсальный YAG:Nd-лазер для хирургии

Производитель: ЗАО «СОЛАР – лазерные системы», Белоруссия, г. Минск.

Работает в непрерывном и импульсно-периодическом режимах при выходной мощности до 100 Вт. Не требует водяного охлаждения или каких-либо специальных условий эксплуатации. Врач может задавать выбранные им режимы воздействия, используя до 8 установок параметров.

Предназначен для использования в урологии, гинекологии, общей хирургии, дерматологии, пластической хирургии, гастроэнтерологии и пульмонологии.

Технические характеристики:

- режим работы – непрерывный (1...100 Вт $\pm$ 5 %); импульсно-периодический (0,02...60 с; 0,02...10 с); одиночные импульсы;
- вывод излучения через охлаждаемое оптоволокно;
- длина волны лазера 532 нм;
- электропитание (однофазное) 220 $\pm$ 22 В, 50/60 Гц;
- потребляемая мощность не более 4 кВт;
- охлаждение автономное, вода–воздух;
- диапазон рабочих температур 15...27 °С;
- габариты 920 $\times$ 495 $\times$ 620 мм;
- масса 76 кг.

Лазерный скальпель СЛ-2 (SL-2)

Производитель: Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО («Лазеры в экологии, медицине, технологии»), Белоруссия, г. Минск.

Скальпель на основе твердотельного гольмиевого лазера, генерирующего излучение с длиной волны 2,09 мкм. Предназначен для открытополостных и эндоскопических операций.

Особенностью данного прибора является использование двух лазерных источников, излучение которых вводится в один и тот же световод. Использование двух излучателей позволяет повысить среднюю мощность в два раза.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 2,09 мкм;
- режим работы лазера – импульсно-периодический;
- длительность импульса генерации 200...500 мкс;
- энергия в импульсе до 1,5 Дж;
- максимальная частота следования импульсов 30 Гц;
- максимальная средняя мощность излучения 30 Вт;
- габаритные размеры 500 $\times$ 500 $\times$ 1300 мм;

- масса 90 кг;
- электропитание (трехфазное/однофазное при 50 Гц) 380/220 В;
- потребляемая мощность не более 4 кВт.

Лазерные хирургические аппараты «Ланцет-1» и «Ланцет-2»

Производитель: ОАО «Конструкторское бюро приборостроения (КБП)», РФ, г. Тула.

Лазерные аппараты «Ланцет» позволяют проводить бесконтактные, практически бескровные операции рассечения, коагуляции и соединения тканей. Аппараты данной серии выпускаются в двух модификациях:

- «Ланцет-1» – горизонтальной компоновки, портативный, имеет оригинальную упаковку в виде кейса;
- «Ланцет-2» – вертикальной компоновки, имеет повышенный радиус операционного пространства.

Таблица 6.2

Технические характеристики

	«Ланцет-1»	«Ланцет-2»
Тип лазера	отпаянный волноводный СО ₂ -лазер с ВЧ-возбуждением	
Длина волны излучения, мкм	10,6	
Мощность излучения на биоткани (регулируемая), Вт	0,1...20	
Диаметр пятна на биоткани (регулируемый), мм	0,2; 0,3; 0,5	
Наведение основного излучения	Диодный лазер	
Режим работы	Непрерывный, импульсно-периодический, суперимпульсный*	
Радиус операционного пространства, мм	1000	1200
Система охлаждения	Автономная	
Электропитание, В/Гц/Вт	220/50/700	
Габариты в сложенном состоянии, мм	555 × 410 × 225	955 × 305 × 270
Масса, кг	25	32

Медицинская лазерная система МЕТАЛАЗ-3

Производитель: научно-производственная группа «Мехатрон – лазерная техника и оптика», РФ, г. Зеленоград.

Обеспечивает коагуляцию, деструкцию, выпаривание патологических участков тканей и сосудов, реализует фотодинамическую терапию.

Используется в дерматологии, косметологии, гинекологии, оториноларингологии, офтальмологии, гастроэнтерологии, стоматологии, урологии, онкологии и хирургии сосудов.

Таблица 6.3

Технические характеристики

Модификации «Металаз-М»	CVL-10M		AVL-1.50M
Тип лазера	на парах меди		на парах золота
Длина волны, нм	510,6	578,2	627,8
Мощность на выходе световода, Вт	6	4	1,5
Тип оптического разъема	SMA-905		
Электропитание однофазное, В/Гц	220/50-60		
Потребляемая мощность, кВт	3		3,5
Размеры, мм	1100 × 970 × 410		
Вес, кг	70		

Может дополнительно комплектоваться системой сканирования, обеспечивающей эффективное управление временем и площадью обработки.

Установка с лазерами на парах меди и на красителе «Яхрома»

Производитель: ФГУП «НПП «Исток»», РФ, г. Фрязино.

Установка предназначена для применения в хирургии и фотодинамической терапии.

Технические характеристики:

- длина волны излучения: лазер на парах металлов – 0,51 мкм и 0,58 мкм; лазер на красителях – 0,53...0,67 мкм;
- средняя мощность излучения на дистальном конце световода до 2 Вт: ЛПМ зеленая линия 5 Вт; ЛПМ желтая линия 5 Вт; ЛК 0,5...3 Вт;
- длительность импульса 10 нс;
- частота следования импульсов 10 кГц;
- диаметр светопроводящей жилы 0,4...0,8 мм;
- длина световода 2...5 м;
- охлаждение водопроводное, 4 л/мин, 2 атм.;
- электропитание трехфазное/однофазное 380/220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность 5 кВт;
- габариты: блока лазерных излучателей 370 × 830 × 1645 мм; источника питания 600 × 600 × 1700 мм.

6.1.2. Специализированные лазерные хирургические установки для дерматологии и косметологии

Портативный лазерный эпилятор «Добрый свет-Неодим»

Производитель: ООО «Медицинские лазерные технологии», РФ, г. Москва.

Портативный эпилятор создан на основе АИГ:Nd-лазера, предназначен для удаления нежелательных волос.

Технические характеристики:

- тип лазера YAG:Nd³⁺;
- режим работы импульсный;
- длина волны 1,06 мкм;
- частота повторения импульсов 1...2 Гц (с дополнительным блоком охлаждения);
- плотность энергии, подводимой к ткани, 30...150 Дж/см²;
- энергия в импульсе 0,4...4 Дж;
- размеры пятна 0,8...4,0 мм;
- электропитание 220 В/50 Гц (110 В/60 Гц);
- охлаждение воздушное;
- габариты 360 × 490 × 160 мм;
- масса около 10 кг.

Лазерная установка для дерматологии «Лафсан-Си»

Производитель: ТГУ – Томский государственный университет, РФ, г. Томск.

Технические характеристики:

- лазер на парах меди;
- выходная мощность излучения на конце световода: желтого (578,2 нм) > 1,5 Вт; зеленого (510,6 нм) > 2,0 Вт; суммарного (желтого и зеленого) > 4,0 Вт;
- время выхода на рабочий режим 55 мин;
- охлаждение воздушное;
- потребляемая мощность от 3-х фазной сети 2 кВт.

Лазерная система для эстетической медицины DeLight

Производитель: ЗАО «Солар – лазерные системы», Белоруссия, г. Минск.

За счет перестройки режимов излучения и, соответственно, изменения параметров излучаемых лазерных импульсов эффективно осуществляет 3 операции:

- удаление нежелательных волос;

- заживление поврежденных кровеносных сосудов;
- неинвазивное отбеливание и омолаживание кожи.

Таблица 6.4

Технические характеристики

Тип лазера	Nd:YAG с регулируемой длительностью импульсов		
Длина волны излучения, нм	1064		
Максимальная энергия импульсов, Дж	80		
Применение	удаление нежелательных волос	заживление поврежденных кровеносных сосудов	неинвазивное отбеливание и омолаживание кожи
Длительность импульсов, мс	10...50	10...50	0,3
Максимальная плотность энергии, Дж/см ²	100	300	18
Размер пятна фокусировки, мм	7, 10, 13	5	5
Частота повторения импульсов, Гц	0,5...2 одиночные импульсы	0,5...2 одиночные импульсы	1...10 одиночные импульсы
Вывод излучения	оптоволокно Ø800 мкм, длина 2,5 м		
Прицельный лазер	красный диодный лазер		
Калибровка	встроенная система калибровки		
Аксессуары	термоэлектрический охладитель кожи, воздушный охладитель кожи, встроенный в наконечник воздушный или термоэлектрический охладитель кожи		
Охлаждение	автономная система вода–воздух		
Диапазон рабочих температур, °С	15...27		
Электропитание	Однофазное (220 ± 20) В, 50/60 Гц, < 9 А		
Габариты, мм	775 × 330 × 650		
Масса, кг	70		

*Портативная лазерная дерматологическая установка
«Добрый свет-Эрбий»*

Производитель: ООО «Медицинские лазерные технологии», РФ, г. Москва.

Портативная дерматологическая установка на основе эрбиевого лазера предназначена в первую очередь для удаления морщин с лица, рук, шеи, а также для устранения таких дефектов кожи, как бородавки, родимые пятна, килоидные рубцы, шрамы от угрей. Прибор также может использоваться при лечении целлюлита.

Технические характеристики:

- тип лазера YAG:Er;
- режим работы импульсный;
- длина волны 2,94 мкм;
- частота повторения импульсов 0,3...1,0 Гц;
- плотность энергии, подводимой к ткани, 2...20 Дж/см²;
- энергия в импульсе 0,4...1 Дж;
- длительность импульса 300 мкс;
- диаметр пятна облучения 2,5...5,0 мм;
- форма лазерного луча – сфокусированный/несфокусированный;
- направляющий луч – красный;
- электропитание 220 В/50 Гц (110 В/60 Гц);
- охлаждение воздушное;
- габариты 360 × 490 × 160 мм;
- масса около 10 кг.

6.1.3. Специализированные лазерные установки для кардиохирургии

Лазерный хирургический аппарат «Пульсар»

Производитель: НИЦ «ЛЭМТ» БелОМО («Лазеры в экологии, медицине, технологии»).

Лазерный аппарат предназначен для выполнения операций трансмиокардиальной лазерной реваскуляризации миокарда на работающем сердце у больных с ишемической болезнью сердца с дистальными формами поражения коронарных артерий.

Технические характеристики:

- длина волны 1,064 мкм;
- частота следования импульсов 1...100 Гц;
- максимальная энергия в импульсе 1,5 Дж;
- мощность излучения 5...100 Вт (шаг 1 Вт);
- длительность импульса излучения 100...300 мкс;
- доставка излучения: кварцевый световод (диаметр 0,4 мм, длина 2,5 м);
- прицельный лазер диодный $\lambda_0 = 0,63$ мкм;
- система охлаждения жидкостная, встроенная;
- управление микропроцессором;

- электропитание 220 В, 50 Гц;
- габариты 340 × 570 × 920 мм;
- масса 90 кг.

*Медицинский лазерный аппарат для лечения ишемии сердца
«Кардиолазер»*

Производитель: ФГУП «НПП «Исток»», РФ, г. Фрязино.

Предназначен для хирургического лечения тяжелых форм ишемической болезни сердца методом лазерной трансмиокардиальной реваскуляризации.

Таблица 6.5

Технические характеристики

Энергия импульса на биоткани, Дж	8...80
Импульсная мощность на биоткани, Вт	400...900
Длительность импульса (регулируемая, с шагом 10 мкс), мс	10...100
Задержка импульса относительно R-пика кардиограммы, мс	10...70
Длина волны, мкм	10,6
Режим излучения	TEM ₀₀
Расходимость лазерного пучка, мрад	менее 1,3
Визуализация зоны воздействия; мощность на биоткани, мВт; длина волны, нм; диаметр пучка видимого излучения на биоткани, мм	п/п лазер 3 650 ± 5 0,5
Система доставки лазерного излучения в операционную зону	7-зеркальный манипулятор с фокусирующей линзой и сменным защитным окном
Фокусное расстояние линзы, мм	125
Орган управления	ножная педаль
Потребляемая мощность, кВт	менее 3,5
Габаритные размеры, м	2,3 × 1,9 × 0,7

6.1.4. Специализированные лазерные установки для онкологии

*Лазерный аппарат для лечения онкологических заболеваний
методом фотодинамической терапии АТКУС-2*

Производитель: ЗАО «Полупроводниковые приборы», РФ, г. Санкт-Петербург.

Современный компактный лазерный аппарат для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии, а также для лечения пародонтоза, гайморита и долго заживающих ран. При лечении онкологических заболеваний аппарат используется совместно с новым противоопухолевым препаратом – фотосенсибилизатором 2-го поколения, обладающим свойствами и характеристиками, существенно отличающимися его от наиболее известных зарубежных и отечественных аналогов.

Технические характеристики:

- излучатель – полупроводниковый лазерный диод;
- длина волны излучения 661 нм;
- режимы работы импульсный или непрерывный;
- выходная мощность (перестраиваемая) 0,5...2 Вт;
- длительность импульсов 0,05...10 с;
- скважность 2...99;
- экспозиция 1...1800 с;
- диаметр транспортного волокна 600 мкм;
- охлаждение внутреннее, термоэлектрическое;
- электропитание 220 В, 50 Гц;
- диапазон рабочих температур от 10 до 30 °С;
- габариты 370 × 600 × 170 мм;
- вес не более 15 кг.

*Лазерная медицинская установка
для фотодинамической терапии*

Производитель: Томский государственный университет, РФ, г. Томск; ФГУП «НПП “Исток”», РФ, г. Фрязино.

Установка состоит из лазера на парах меди с блоком питания, лазерного преобразователя на красителе и набора сервисных устройств: измерителя мощности, лазерного спектрального измерителя, приставки с объективом, световодным разъемом и световодами.

Технические характеристики (лазер на парах меди):

- длина волны излучения 510,6...578,2 нм;
- средняя мощность излучения 12...15 Вт;
- частота следования импульсов 25...30 кГц;
- охлаждение воздушное;
- электропитание 220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность 2 кВт.

Технические характеристики (лазер на красителе):

- накачка лазером на парах меди;
- область перестройки длины волны 585...710 нм;
- КПД преобразования 10...20 %;

- выход лазерного излучения через моноволокно диаметром 400...600 мкм;
- потери в моноволокне не более 20 %;
- потребляемая мощность 300 Вт.

*Лазерный комплекс для лечения рака
методом фотодинамической терапии «Лафсан-Аи»*

Производитель: Томский государственный университет, РФ, г. Томск.

Лазерный автоматизированный комплекс «Лафсан-Аи» предназначен для лечения злокачественных опухолей методом фотодинамической терапии.

Состав комплекса:

- излучатель на парах золота;
- источник питания;
- блок коммутации;
- измеритель мощности лазерного излучения;
- выносной пульт.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 627,8 нм;
- частота следования импульсов 15...20 кГц;
- средняя мощность излучения 0,5...1,0 Вт;
- диаметр оптической жилы 0,4 мм;
- электропитание 220 В;
- потребляемая мощность 1,2 кВт;
- габаритные размеры 1050 × 500 × 150 мм;
- масса не более 50 кг.

6.1.5. Специализированная лазерная аппаратура для офтальмологии

*Офтальмологический зеленый лазерный коагулятор
с диодной накачкой АЛЮД-01*

Производитель: ООО «Алком-медика», РФ, г. Санкт-Петербург.

Применение:

- эндолазерная коагуляция сетчатки и цилиарного тела;
- панретиальная лазеркоагуляция при диабетической ретинопатии, тромбозах центральной вены сетчатки, сосудистой и другой патологии глазного дна;
- локальная ретиноплексия при ретинальных разрывах, внутриглазных инородных телах;
- коагуляция опухолей;
- лазерное лечение в сложных условиях: при помутнении оптических сред, при узком зрачке, у постели больного, в детской практике.

Комплектуется адаптерами к налобному офтальмоскопу и щелевой лампой, существенно расширяющими возможности применения прибора.

Таблица 6.6

Технические характеристики

Длина волны лазерного излучения, мкм	0,532
Мощность излучения, Вт	0,1...2
Режим работы	непрерывный, импульсный
Длительность импульса излучения, с	0,05...3
Диапазон частоты автоповтора импульсов, Гц	0,5...10
Маркерный луч	красный
Потребляемая мощность от сети 220 В, Вт	200
Габариты, мм	170 × 220 × 390
Масса, кг	10

*Ультрафиолетовая офтальмологическая лазерная установка
«Медилекс»*

Производитель: Межотраслевая научно-техническая ассоциация «Сибирский лазерный центр», РФ, г. Новосибирск.

Ультрафиолетовая лазерная (эксимерная) офтальмологическая установка «Медилекс» предназначена для микрохирургии роговицы глаза.

Применяется для выполнения следующих офтальмологических операций:

- коррекции близорукости $-(2...25)$ диоптрий;
- коррекции дальнозоркости $+(1...10)$ диоптрий;
- лечения астигматизма, включая миопический и сложный миопический;
- лечения глаукомы;
- поверхностного терапевтического лечения некоторых патологий роговицы глаза.

Система полностью компьютеризирована, обеспечивает возможность дистанционного наблюдения за ходом операции.

Установка «Медилекс» позволяет осуществлять коррекцию близорукости как методом фоторефракционной кератектомии, так и методом LASIK с применением микрокератома. При коррекции аномалий рефракции глаза изменяется радиус кривизны поверхности роговицы.

Принцип действия установки «Медилекс» основан на импульсном послойном фотоиспарении (абляции) тонких субмикронных слоев рого-

вицы без ее термического повреждения. Использование коротковолнового ультрафиолетового лазерного излучения обеспечивает безопасность внутренних тканей глаза. После лазерной операции сохраняются высокое качество и прозрачность поверхности роговицы.

Контроль параметров установки и режима выполнения операции осуществляет компьютерная система с программным обеспечением. Установка характеризуется низкой стоимостью рабочей газовой смеси и экономична в работе.

Технические характеристики:

- тип лазера эксимерный на ArF;
- длина волны излучения 193 нм;
- энергия в импульсе до 250 мДж;
- частота повторения импульсов 1...10 (max 20) Гц;
- длительность импульса 12 нс;
- диаметр области испарения 0,5...7 мм;
- плотность энергии на поверхности роговицы 120...200 мДж/см²;
- электропитание 220 В, 6 А, 50 Гц;
- потребляемая мощность 1,2 кВт;
- охлаждение воздушное;
- габариты 1718 × 1260 × 1416 мм;
- масса 400 кг.

В комплект системы входит:

- эксимерный лазерный излучатель ArF;
- операционный микроскоп Carl Zeiss с коаксиальным освещением, со световодом и осветителем;
- оптическая система «Медилекс», включающая набор масок для миопии, астигматизма, миопического астигматизма, гиперметропии, а также устройства фиксации и центровки таза;
- компьютеризованная система с программным обеспечением работы и контроля лазера и процесса операций, а также банком данных о пациентах;
- компьютер с монитором и принтером;
- рабочая газовая смесь с возможностью использования отечественных газов;
- хирургический трехкоординатный стол с точной регулировкой;
- микрокератом для выполнения процедур методом LASIK;
- кресло хирурга с регулировкой по высоте;
- набор хирургических инструментов;
- цифровая видеосистема;
- оптический томограф для анализа поверхности роговицы с выводом изображения на монитор, совмещенный с микроскопом.

*Лазерный офтальмокоагулятор
на основе диодного лазера МЛ-200*

Производитель: АО «НПО «Петролазер»», РФ, г. Санкт-Петербург.

Лазерный офтальмокоагулятор МЛ-200 предназначен для профилактической коагуляции ретинальных дистрофий при миопии, лечебной коагуляции ретинальных дистрофий при разрывах сетчатки, транссудативных макулодистрофиях различного генеза, хориоретините, диабетической ретинопатии, тромбозе вен сетчатки и других заболеваниях.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 0,81 мкм;
- мощность 0,1...1,0 Вт;
- длительность импульса 0,01...0,5 с;
- диаметр пятна в плоскости фокусировки 100 мкм;
- питание от сети переменного тока 220 В;
- потребляемая электрическая мощность 40 Вт;
- охлаждение естественное воздушное;
- масса 10 кг.

Комплект поставки: лазерный модуль, микропроцессорный пульт, блок питания лазера, ножной выключатель, базовый офтальмологический прибор ЩЛ-3Г, щелевая лампа ЩЛ-3Г, блок питания лампы, стол, комплект документации, паспорт.

Установка для лечения глаукомы «Офтальмолог-1»

Производитель: ООО «ИТ-ЛАГРАН», РФ, г. Москва.

В установке используется YAG:Nd³⁺-лазер с каскадным преобразованием частоты.

Технические характеристики:

- длина волны 266 нм;
- энергия импульса до 10 мДж;
- средняя мощность 10 Вт;
- длительность импульса 10 нс;
- частота следования импульсов 10 Гц.

Офтальмологическая лазерная установка «Профиль-500»

Производитель: ЦФП ИОФАН – Центр физического приборостроения Института общей физики РАН, РФ, г. Троицк.

Установка может быть использована для хирургической коррекции миопии, гиперметропии, астигматизма.

В установке «Профиль-500» используется специализированная формирующая оптическая система, создающая идеально гладкое рас-

пределение излучения на глазу пациента, что позволяет получать идеально гладкий профиль абляции тканей роговицы.

Установка создана совместно и на базе практического опыта «Межотраслевого научно-технического комплекса “Микрохирургия глаза”».

Технические характеристики:

- длина волны генерации 193 нм;
- максимальная энергия в импульсе 200 мДж;
- частота повторения импульсов до 20 Гц;
- нестабильность энергии в импульсе $\pm 5\%$;
- охлаждение воздушное;
- диаметр рабочей зоны от 1 до 10 мм;
- плотность энергии на глазе от 150 до 250 мДж/см²;
- габариты установки 1700 × 800 × 1300 мм;
- установка полностью компьютеризирована.

6.1.6. Лазерные перфораторы кожи (скарifikаторы) и установки для транскутанного введения лекарств

Лазерный перфоратор ЭРМЕД-303

Производитель: АО «Инженерный центр новых технологий», РФ, г. Троицк (Московская область).

Лазерный перфоратор обеспечивает не менее миллиона перфораций, безопасен, прост и надежен в эксплуатации, не требует длительного обучения персонала.

Лазерный перфоратор ЭРМЕД-303 разработан на основе импульсного лазера на алюмоиттриевом гранате, легированном эрбием. Он предназначен для бесконтактной и стерильной перфорации кожи пальца при взятии крови для анализа.

Прибор обеспечивает абсолютную стерильность, бесконтактность, минимальное повреждение мягких тканей пальца, резкое уменьшение болевых ощущений.

Лазерный перфоратор имеет возможность регулирования мощности лазерного излучения, что позволяет контролировать глубину перфорации кожного покрова и дает преимущество при использовании прибора в детских медицинских учреждениях.

Перфоратор полностью исключает инфицирование вирусами СПИДа, гепатита и другими инфекционными заболеваниями.

Технические характеристики:

- длина волны лазерного излучения 2,94 мкм;
- энергия импульса лазерного излучения 0,1...1,5 Дж;
- ширина пучка лазерного излучения 0,5 мм;
- длительность импульса лазерного излучения 100...300 мкс;

- питание лазерного перфоратора от сетевого адаптера 5В, 2А;
- потребляемая мощность в режиме зарядки 10 Вт;
- масса лазерного перфоратора 900 г;
- габаритные размеры 305 × 120 × 115 мм.

6.1.7. Специализированные лазерные установки для стоматологии

Лазерная стоматологическая установка «Доктор»

Производитель: ОАО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов “Плазма”», РФ, г. Рязань.

Портативная установка на основе волноводного лазера на углекислом газе. Предназначена для лечения парадонтоза, гингивитов и других стоматологических заболеваний.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 10,6 мкм;
- мощность на выходе световода до 5 Вт;
- время экспозиции до 99 с;
- диаметр луча: с фокусирующей насадкой 0,2 мм; с рассеивающей насадкой 10 мм;
- питание 220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность 360 В;
- средний ресурс 2000 часов;
- габариты 400 × 300 × 160 мм;
- масса 16 кг;
- передача излучения по зеркальному световоду.

Лазерный стоматологический аппарат МЕЛАЗ-С

Производитель: Межотраслевая научно-техническая ассоциация «Сибирский лазерный центр», РФ, г. Новосибирск.

Обеспечивает безболезненное и комфортное лечение, в т. ч. в самых труднодоступных местах ротовой полости. Работает бесконтактно, бесшумно, не дает вибраций, снижает психологическую нагрузку на пациента.

Мелаз-С органично соединяет в одном аппарате функциональные возможности бормашины, скальпеля, коагулятора и позволяет осуществлять:

- удаление пораженных кариесом твердых тканей зуба;
- формирование и стерилизацию зубной полости для пломбирования;
- разрезание дентина и цемента;
- модификацию эмали;
- удаление зубного камня;
- десенные разрезы;

- коагуляцию мягких тканей;
- лечение афтоидных язв.

Прибор свободно перемещается, легко устанавливается у стоматологического кресла в наиболее удобное для работы положение. Процессорная система управления контролирует все блоки аппарата, содержит в памяти выставленные режимы для различных процедур и поддерживает их в процессе работы.

Особенности лазерного излучения обеспечивают высокую точность обработки кариозной полости. Лазерное излучение полностью поглощается поверхностью зуба, не проникая в глубоко лежащие слои, и не вызывает перегрева прилежащих зубных тканей. Импульсный характер излучения позволяет устранить раздражающее воздействие на пульпу зуба, вскрытие зубного канала не сопровождается резкой болью.

Лазерное излучение за счет своих коагулирующих свойств позволяет осуществлять практически бескровные десенные разрезы. Стерилизующее действие лазерного излучения сокращает сроки заживления, а также позволяет проводить терапию оральных инфекций и лечение пародонтита.

Технические характеристики:

- тип лазера твердотельный YAG:Er;
- энергия в импульсе до 1 Дж;
- длина волны излучения 2,94 мкм;
- средняя мощность излучения от 0,1 до 10 Вт;
- длина волны лазера визуализации 0,65...0,67 мкм;
- частота следования импульсов 1...10 Гц;
- автономная система охлаждения вода–воздух;
- длительность импульса 400 мкс;
- потребляемая мощность 2,2 кВт;
- источник питания 220 В, 60 Гц.
- габариты 550 × 300 × 700 мм;
- масса 50 кг.

6.2. Лазерная терапевтическая аппаратура

6.2.1. Терапевтические аппараты на основе He-Ne-лазеров

Физиотерапевтический лазерный аппарат ЛА-1

Производитель: ИМФ – Институт медицинской физики имени У.Х. Копвиллема Российской академии технологических наук, РФ, г. Владивосток.

Предназначен для профилактики и лечения заболеваний в различных областях медицины посредством воздействия электромагнит-

ным лазерным излучением с длиной волны 632,8 нм. Разработан для оснащения поликлиник, больниц, клиник, санаториев, профилакториев, медчастей.

К аппарату ЛА-1 разработан комплект светодиодов для чрезкожного и внутреннего облучения крови и комплект специализированных насадок, а также удобное для работы универсальное крепежное устройство, позволяющее фиксировать светодиод в нужном положении.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 632,8 нм;
- мощность излучения до 32 мВт;
- специализированный терапевтический световод – 1 шт.;
- внутривенные световоды – 1 шт.;
- универсальное крепежное устройство – 1 шт.;
- питание от сети 220 В, 50 Гц;
- относительная нестабильность средней мощности лазерного излучения в течение 8 часов непрерывной работы не более 2 %;
- время непрерывной работы не более 8 ч;
- потребляемая мощность не более 60 Вт;
- средний срок сохраняемости 8 лет;
- габариты прибора 680 × 170 × 110 мм;
- масса 5 кг.

Лазерная портативная терапевтическая установка ЛАЗТЕР-05

Производитель: ООО «Оптика», РФ, г. Саратов.

Внутрисосудистая и внутриполостная терапия, лазероакупунктура, наружное облучение при системных заболеваниях сердечно-сосудистой системы, гиперкоагуляционных синдромах, патологии желудка и поджелудочной железы, сахарном диабете, отитах, ринитах и других заболеваниях.

Особенности:

- небольшие габаритные размеры;
- полное соответствие медико-техническим требованиям;
- наличие универсальных световодов и съемных наконечников разного пользования;
- установка комплектуется акупунктурным наконечником, ушными и нозальными насадками;
- длина волны излучения 0,63 мкм;
- мощность излучения на выходе основного световода не менее 1,0 мВт;
- диапазон задания времени излучения 1...98 мин;
- питание от сети переменного тока 220 В, 50 Гц;

- потребляемая мощность не более 30 Вт;
- габаритные размеры $335 \times 240 \times 71$ мм;
- масса 4,5 кг;
- художественная выразительность прибора.

Терапевтический He-Ne-лазерный аппарат МАКДЭЛ-08N

Производитель: МГТУ – Московский государственный технологический институт им. Н.Э. Баумана, РФ, г. Москва.

Предназначен для лечения и профилактики широкого круга заболеваний воспалительного генеза, кожных покровов и сосудов, иммунокоррекции, рефлексотерапии, транскутанной гемомодификации. Область применения: дерматология, гнойная и ожоговая хирургия, кардиология, неврология, гинекология, андрология, урология, стоматология и др.

Преимуществами аппарата являются световодный подвод облучения, высокие энергетические характеристики на выходе световода, разнообразие рабочего инструмента, наличие гибкой цифровой системы управления мощностью.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 0,63 мкм;
- потребляемая мощность до 50 Вт;
- выходная мощность 8 мВт;
- напряжение питания 220 В, 50 Гц.

Установка АФДЛ-1 на базе гелий-неонового лазера ЛГН-111

Мощность на выходе световода 15 мВт. Предусмотрена модуляция 10...100 Гц. Диаметр сердечника световода 400 мкм.

6.2.2. Терапевтические аппараты на основе других газовых лазеров

Лазерная установка для лечения туберкулеза «Мария»

Производитель: фирма Genesto, Эстония, г. Таллин.

Предназначена для лечения кавернозных и фобро-кавернозных форм туберкулеза.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 248 нм;
- средняя мощность излучения 10 мВт;
- частота следования импульсов 100 Гц;
- ресурс работы до смены газового баллона 10000 сеансов;
- сеть 220 В, 50 Гц;
- габаритные размеры $1470 \times 600 \times 450$ мм;
- масса 70 кг.

6.2.3. Терапевтические аппараты на основе полупроводниковых лазеров и светодиодов

Комплект лазерной терапии «Колокольчик»

Производитель: ФГУП «НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха», РФ, г. Москва.

В состав комплекта «Колокольчик» входят устройства на основе полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 0,85 или 1,3 мкм, измеритель мощности лазерного излучения, устройство для зарядки аккумуляторов, пять сменных насадок для подвода лазерного излучения к биоткани. Имеется стоматологическая насадка для эндоскопического и акупунктурного применения на световодах с сердцевиной 400 и 500 мкм.

В комплект может быть также включено диагностическое устройство, которое обеспечивает измерение проводимости в точках акупунктуры в диапазоне токов 2...12 мкА при напряжении 2 В.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 0,85 мкм, 1,3 мкм;
- мощность непрерывного излучения: на длине волны 0,85 мкм 0...30 мВт; на длине волны 1,3 мкм 0...3 мВт;
- частота модуляции 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 Гц;
- время экспозиции 10...60 с;
- длительность непрерывной работы 1...3 ч;
- габариты 180 × 80 × 40 мм;
- масса 200 г;
- питание: аккумуляторная батарея Д-0,26 (5 шт.) или сеть 220 В, 50 Гц.

Лазерный многоканальный многофункциональный аппарат МАКДЭЛ-00.00.05

Производитель: МГТУ – Московский государственный технологический институт им. Н.Э. Баумана, РФ, г. Москва.

МАКДЭЛ-00.00.05 позволяет реализовать все известные методики лечения низкоинтенсивным лазерным лучом и представляет возможности исследования и создания новых методик в области электро- и лазерной биорезонансной терапии. Система управления совместима с IBM PC, что позволяет объединить лазерный аппарат и компьютер в единый лечебно-диагностический комплекс, благодаря чему обеспечивается возможность задания параметров исполнительных устройств с компьютера, создания программ управления любой сложности, обработки информации от БАТ, ведения базы данных пациентов.

Применяется в медицине катастроф, хирургии, рефлексотерапии, пульмонологии, артрологии, гинекологии, проктологии, урологии, гастроэнтерологии, стоматологии, оториноларингологии, терапии, педиатрии, неонатологии.

Число каналов физиотерапевтического воздействия – 4:

- красный лазер, непрерывное и модулированное излучение;
- ИК-лазер, импульсно-периодическое излучение;
- ИК-лазер, импульсно-периодическое излучение;
- щуп электропунктуры с автоматизированным поиском БАТ.

Технические характеристики красного лазера:

- длина волны непрерывного излучения 0,67 мкм;
- частота повторения импульсов в режиме модуляции 0...200 Гц;
- мощность излучения на выходе световода: в непрерывном режиме 80 мВт; в импульсном режиме 80 мВт; средняя в режиме модуляции не менее 40 мВт.

Технические характеристики ИК-лазера:

- длина волны излучения 0,89 мкм;
- частота повторения импульсов 1...9999 Гц;
- мощность излучения на выходе световода: импульсная 3...15 Вт; средняя 7...18 мВт;
- диаметр световода 0,6...1,0 мм;
- время экспозиции 1...9999 с.

Лазерные и светодиодные терапевтические аппараты «Барва»

Производитель: Международная ассоциация «Лазер и здоровье», РФ, г. Москва.

Таблица 6.7

Технические характеристики

Тип аппарата	Длина волны излучения, нм	Мощность, не менее, Вт
Фотонная матрица Коробова «Барва-Флекс/К»	629...660	144
Фотонная матрица Коробова «Барва-Флекс/КИк»	632 + 840	120
Фотонная матрица Коробова «Барва-Флекс/Ж»	595	144
Фотонная матрица Коробова «Барва-Флекс/З»	502, 565, 574	144
Фотонная матрица Коробова «Барва-Флекс/С»	430	120

Окончание табл. 6.7

Тип аппарата	Длина волны излучения, нм	Мощность, не менее, Вт
Аппарат для цвето-рефлексотерапии «Барва-Рефлекс»	470, 565, 595, 630, 940	5 (для каждого излучателя)
Фотонный зонд Коробова «Барва-ГПУ»	629...660, 840	36
Лазерный массажер Коробова «Барва-ЛМК»	650	25
Фотонно-вакуумный массажер «Барва-Пневмо»	629...660	36
Бальнео-фотонная система для ванн «Барва-Бальнео»	575, 660	6 излучателей по 0,1
Цветомузыкальная установка для бассейна «Барва-ЦМБ»	470 + 525 + 595 + 650	4 блока излучателей по 4 цвета

Лазерный терапевтический аппарат «УЗОР-А-2К»

Производитель: ОАО «Восход» – Калужский радиоламповый завод», РФ, г. Калуга.

Новая двухканальная модификация АЛТ серии «Узор». Имеет два взаимосвязанных канала лазерного излучения, микропроцессорное управление. Предусмотрена электронная подстройка установленной выходной мощности излучения по каждому каналу отдельно.

Технические характеристики:

- длина волны излучения $0,89 \pm 0,05$ мкм;
- максимальная мощность лазерного излучения не менее 2 Вт;
- частота излучения (устанавливается дискретно) 5, 80, 150, 300, 600, 1500, 3000 Гц;
- длительность импульса лазерного излучения 110...160 нс;
- режимы работы аппарата: автоматический или непрерывный;
- время работы в автоматическом режиме 1, 3, 5, 10 мин;
- питание от сети переменного тока 220 В;
- потребляемая мощность не более 10 Вт;
- габаритные размеры $240 \times 220 \times 90$ мм;
- масса не более 2,6 кг.

Предназначен для лазерной и (с применением магнитных насадок) магнитолазерной терапии.

Области применения: фурункулы, карбункулы, абсцессы и флегмоны, заболевания опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистые заболевания, стенокардия, гипертоническая болезнь, воспалительные

инфильтраты, ишемические болезни сердца, предынфарктное состояние, лимфодениты, оториноларингология, гастроэнтерология, урология, дерматология, пульмонология, стоматология, проктология, гинекология, ангиология.

Аппарат магнитолазерной терапии – АМТЛ

Длина волны $\lambda_0 = 0,8 \dots 0,88$ мкм. Мощность излучения (3 лазерных диода) не менее 10 мВт. Режим непрерывный. Индукция магнитной насадки 10...40 мТл. Время облучения 1, 2, 4 мин. Не зависимо от типа лазера лечит все! Габаритные размеры – не более $375 \times 250 \times 90$ мм.

6.2.4. Терапевтические аппараты на основе твердотельных лазеров и лазеров на красителях

Лазерная установка для лечения туберкулеза ЛАЗУЛЕТ

Производитель: Институт общей физики Российской академии наук им. А.М. Прохорова, РФ, г. Москва; Научно-производственная фирма «Лагран», РФ, г. Москва.

В установке применен твердотельный УФ-лазер с длиной волны 260 нм, который уничтожает микробактерии туберкулеза (палочки Коха).

Установка работает в максимуме биологического эффекта (в области длин волн 258...280 нм), что позволяет снизить дозу облучения и полностью заменяет применяемый в медицинской практике газоразрядный лазер с длиной волны 337 нм, который, обеспечивая аналогичный эффект, требует значительных доз и времени воздействия.

Таблица 6.8

Технические характеристики

Длина волны излучения, нм	260
Режим работы	импульсно-периодический
Частота повторения импульсов, Гц	50
Энергия импульсов, мДж	0,3
Средняя мощность излучения, мВт	15
Длительность импульсов излучения, нс	10
Вывод энергии	через световод
Длина световода, м	2
Диаметр световода, мм	0,6
Потери в световоде, дБ	менее 0,2
Габариты установки	$280 \times 260 \times 450$
в напольном варианте, мм	$230 \times 510 \times 760$

6.2.5. Лазерные аппараты для облучения крови

Лазерные аппараты:

*для внутривенного облучения крови АЛОК-1
и для чрескожного облучения крови АЛОК-2М*

Производитель: ОАО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов “Плазма”», РФ, г. Рязань.

Лазерные аппараты предназначены для внутривенного (одноканальный АЛОК-1 и четырехканальный АЛОК-2) и чрескожного (одноканальный АЛОК-2М) облучения крови.

Внутривенное лазерное облучение крови активизирует энергетические ферменты эритроцитов, что ускоряет обмен веществ в ишемизированных органах и тканях; оказывает гипотензивное действие, обладает анальгезирующим и противовоспалительным эффектом.

Чрескожное облучение может применяться:

- для надвенозного лазерного облучения крови неинвазивным способом;
- лечения верхних дыхательных путей;
- снятия приступов астмы;
- снижения уровня сахара в крови;
- лечения ангиопатии нижних конечностей;
- лечения ишемической болезни сердца путем облучения.

Таблица 6.9

Технические характеристики

	АЛОК-1	АЛОК-2	АЛОК-2М
Количество каналов	1	4	1
Длина волны излучения, мкм	0,63	0,63	0,63
Мощность излучения, мВт	1	1	25
Время экспозиции, мин	30; 60	30; 40; 60	–
Диапазон выдержки, с	–	–	1...9999
Диаметр световода, мм, не более	1,0	0,8	–
Электропитание, В / Гц	220 / 50	220 / 50	220 / 50
Потребляемая мощность, В·А, не более	45	150	100
Средний ресурс, ч	5000	5000	5000
Габариты, мм	410 × 265 × 115	320 × 300 × 845	410 × 320 × 1050
Масса, кг	6,5	15	20

*Установка
для чрескожного лазерного облучения крови*

Производитель: СГУ, СГМУ – Самарский государственный университет, РФ, г. Самара; Самарский государственный медицинский университет.

Облучение проводится через световод, конец которого прижимается к коже. В конструкции установки предусмотрены: возвращение части обратно рассеянного излучения в биоткань с помощью оригинального отражающего устройства, легкая компрессия и иммерсия в области контакта волоконно-оптического световода с кожей. Используя лазерное излучение мощностью (на выходе световода) 25 мВт, можно сообщить крови энергию, эквивалентную таковой при внутрисосудистом облучении крови излучением мощностью 1...2 мВт, не увеличивая длительности процедуры.

Дозиметрия излучения осуществляется по оригинальной программе для ПЭВМ, учитывающей оптические характеристики биотканей в области проекции крупных сосудов и скорости кровотока.

Технические характеристики:

- длина волны излучения 0,63 мкм;
- мощность излучения на выходе световода не менее 20 мВт;
- время экспозиции 1...3600 с;
- габариты 250 × 180 × 720 мм;
- масса не более 8 кг;
- встроенный измеритель мощности 0,1...100 мВт.

**6.2.6. Лазерные лечебные аппараты и тренажеры
для офтальмологии**

*Аппарат ИК-лазерный для коррекции
аккомодационно-рефракционных нарушений зрения
МАКДЭЛ-09*

Производитель: МГТУ – Московский государственный технологический институт им. Н.Э. Баумана, РФ, г. Москва.

Предназначен для лечения и профилактики нарушений аккомодационной способности глаз путем бесконтактного транссклерального лазерного облучения цилиарной мышцы.

Показания к применению: миопия, нистагм, косоглазие, зрительное утомление. Время облучения около 3 мин, необходимое количество процедур 10–15, повторяемость циклов реабилитации по показаниям через 6–8 мес.

Технические характеристики:

- мощность ИК-излучения 1,5 мВт;
- экспозиция 0...9 мин;
- напряжение питания 220 В, 50 Гц;
- габаритные размеры: исполнительный блок 105 × 165 × 60 мм; блок управления 220 × 205 × 70 мм;
- масса 2,3 кг.

*Лазерный офтальмологический аппарат
АОЛ-1*

Производитель: ОАО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов “Плазма”», РФ, г. Рязань.

Аппарат предназначен для лечения заболеваний роговой и сетчатой оболочек глаза с помощью низкоинтенсивного излучения гелий-неонового лазера, которое:

- активизирует пролиферативные и репаративные процессы в роговице, а также нормальные биологические процессы в сетчатке;
- обеспечивает устранение болевого синдрома, купирование воспалительных процессов, ускорение эпителизации;
- способствует восстановлению чувствительности и прозрачности роговицы, улучшению зрительных функций, снижению вероятности осложнений.

Таблица 6.10

Технические характеристики

Длина волны излучения, мкм	0,63
Мощность излучения, мкВт	10...360
Частота модуляции, Гц	0,5; 1,0; 2,5 (в зависимости от метода лечения)
Диаметр пятна излучения, мм	5; 10; 15*
Время экспозиции, мин	1; 2; 3; 5
Питание, В / Гц	220 / 50
Потребляемая мощность, В·А, не более	50
Средний ресурс, ч	5000
Габариты, мм	480 × 292 × 460

Аппарат разработан совместно с МНТК «Микрохирургия глаза». Клинические испытания и медицинская практика показали высокую эффективность аппарата при лечении миопии, ран, ожогов, эрозий и язв

роговицы, эпителиально-эндотелиальных дистрофий, «сухих» макуло-дистрофий, амблиопий, ячменя, заболеваний сетчатки, связанных с нарушением ее кровоснабжения, а также для ускорения приживления трансплантата при пересадке роговицы.

6.2.7. Лазерная аппаратура для диагностики крови, кровотока и прочих биоструктур

Лазерный анализатор крови «Гранат»

Производитель: МГТУ – Московский государственный технологический институт им. Н.Э. Баумана, РФ, г. Москва.

Предназначен для определения параметров клинического анализа крови в гематологических, цитологических лабораториях медицинских учреждений, учебных и исследовательских лабораториях клинической морфологии и т. д.

В состав комплекса входят: когерентно-оптический спектроанализатор проб крови; компьютер Pentium 200MMX / 32 Mb / 3,2 Gb HDD; видеобластер; монитор 15"; Windows 9x, программное обеспечение «ГемоАнализ».

Комплекс работает как с мазками, так и с жидкими пробами крови; использует стандартные реактивы; обеспечивает минимальный забор крови (до 20 мкл); количественно оценивает качество приготовления мазков крови, а также интегральные изменения формы эритроцитов.

Технические характеристики:

- время анализа 3 мин;
- габариты аппарата без системного блока и монитора 650 × 250 × 150 мм;
- длина волны излучения 632,8 нм;
- мощность излучения лазера 1 мВт.

Лазерный поляриметр глюкозы MP-1010

Производитель: ЭКСМА – ЗАО «Эксма», Литва, г. Вильнюс.

Поляриметр предназначен для определения концентрации глюкозы в моче.

Технические характеристики:

- точность 4 ± 1 %;
- электропитание 220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность 10 В·А;
- габариты 190 × 130 × 259 мм;
- калибровка производится на дистиллированной воде.

6.3. Системы доставки излучения (аппликаторы) и оптические наконечники при обработке биоткани

6.3.1. Шарнирные и оптоволоконные манипуляторы

До настоящего времени не имеется волоконных световодов клинического применения для передачи излучения CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм. Система передачи излучения CO_2 -лазера представляет собой многозвеньевой рычаг (манипулятор), в котором излучение передается посредством зеркал в шарнирах. К нему с помощью байонетного или винтового замка присоединяются различные аппликаторы, наконечники, жесткие эндоскопы или переходники для операционного микроскопа, содержащие фокусирующую оптику.

В шарнирном манипуляторе выходящее из резонатора излучение CO_2 -лазера передается с почти неизменной геометрией луча (рис. 6.1).

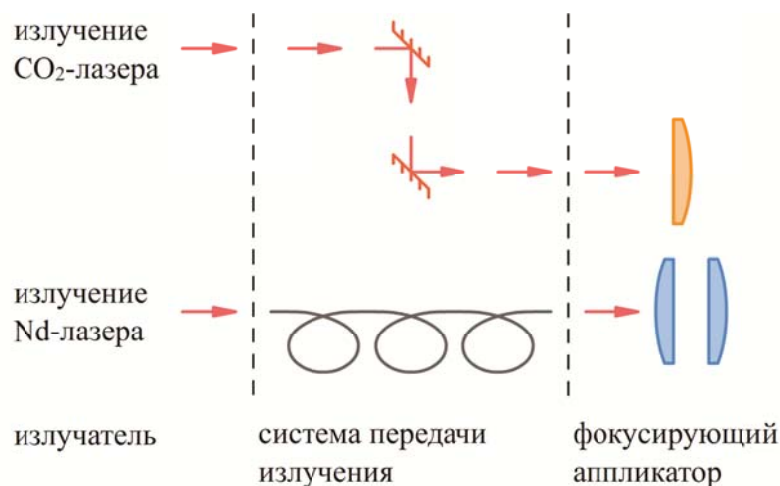


Рис. 6.1. Оптическая система передачи излучения
и фокусирующий аппликатор для CO_2 -лазера и YAG:Nd -лазера

Расходимость излучения, обусловленная конфигурацией резонатора и модовой структурой, влияет на фокусируемость.

Наименьшую расходимость и гауссово распределение интенсивности имеют лазеры, работающие на поперечной основной моде TEM_{00} . Обычно линза с фокусным расстоянием 200 мм обеспечивает диаметр фокуса 350 мкм, а линза с фокусным расстоянием 50 мм — 100 мкм. Соответственно, при равной заданной лазерной мощности достигается более высокая плотность мощности. Выбор линзы для конкретного применения зависит от требуемого минимального диаметра луча, операционной ситуации и фокусного расстояния, необходимого для аппликаторной системы.

Для обеспечения рассекающего эффекта требуется плотность мощности не менее 1000 Вт/см^2 . В табл. 6.11 представлены диаметр пятна и плотность мощности для различных фокусных (рабочих) расстояний при заданной мощности 30 Вт.

Таблица 6.11

*Типичный диаметр луча и плотность мощности
в зависимости от фокусного расстояния f для CO_2 -лазера (30 Вт)*

f , мм	Диаметр луча d_b , мм	Плотность мощности, Вт/см^2
50	0,1	300000
125	0,2	75000
200	0,35	24500
250	0,57	9200
350	0,75	5300
450	1,20	2100

Пока не существует подходящих световодов для многих диапазонов длин волн, например для длины волны 10,6 мкм в ИК-диапазоне. Поэтому доставка излучения от лазера до наконечника или операционного микроскопа либо эндоскопа должна осуществляться посредством шарнирного манипулятора.

Для оптимальной доставки излучения необходимо не менее пяти степеней свободы, три из которых – для позиционирования и две – для угловой ориентации. Дополнительная шестая степень свободы, которая обычно требуется для свободного движения, отпадает вследствие симметрии вращения лучевого пучка. На рис. 6.2 показаны изменения положения и направления лазерного луча.

Для произвольной ориентации луча в пространстве необходимо использовать два поворотных или наклонных зеркала, расположенных друг за другом, или поворотно-наклонное зеркало, перемещающееся по двум осям. Для варианта с наклонным зеркалом требуется высокоточный привод для деления угла поворота (определения средней точки угла наклона), поэтому он не подходит для использования в системе доставки излучения. На практике применяется последовательное соединение друг за другом двух поворотных зеркал согласно рис. 6.2, *е*, каждое с поворотом на 90° , т. к. в этом случае не возникает ограничений для диапазона угла поворота. Постоянный угол поворота зеркал позволяет к тому же использовать оптимальные зеркала для фиксированного угла.

Поэтому в качестве подвижных элементов шарнирного манипулятора в основном применяются линейные направляющие и поворотные подшипники. Чтобы каждый подвижный элемент воплощал по крайней

мере одну механическую степень свободы; две линейные направляющие, или оси вращения, никогда не должны быть ориентированы внутри системы параллельно друг другу. Поэтому две следующие друг за другом линейные направляющие, или поворотные подшипники, всегда разделены посредством отклоняющего устройства. Имеется много возможностей для комбинации линейных направляющих и поворотных подшипников, чтобы получилась подвижная система доставки излучения со всеми необходимыми степенями свободы. В основу этого заложена идея, близкая идее модульной конструкции. На рис. 6.3 показан возможный вариант исполнения с телескопом, на рис. 6.4 – система доставки излучения с шарниром типа локтевого сустава.

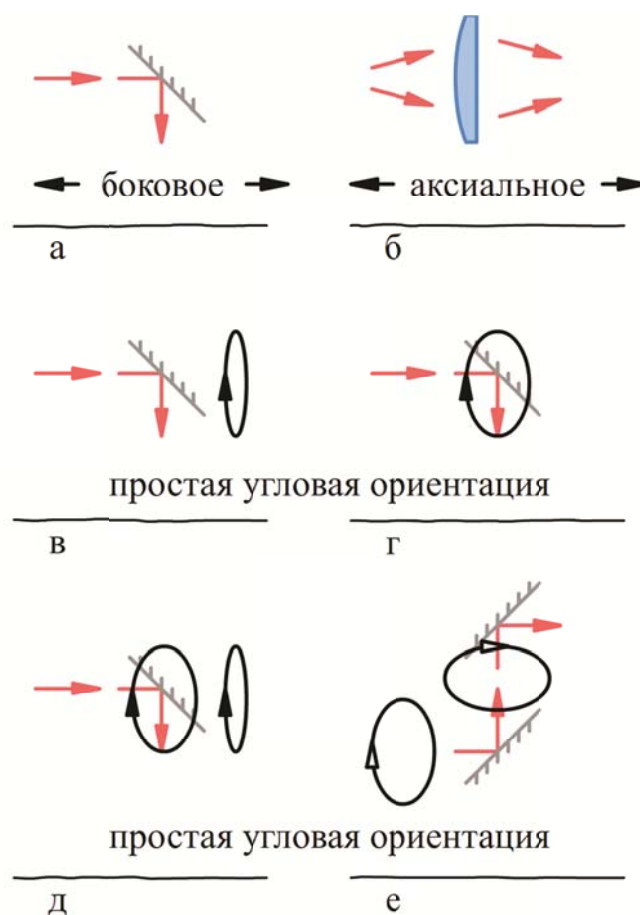


Рис. 6.2. Возможность изменения положения и направления лазерного луча

Качество шарнирного манипулятора в основном характеризуется его весом, а также точностью позиционирования и угловой точностью, с которой луч выходит во всех позициях. Позиционная и угловая точность определяются жесткостью подшипников и прогибом трубок.

При применении CO_2 -лазера в микрохирургии соединение с операционным микроскопом позволяет использовать лазерное излучение ко-

аксиально с направлением наблюдения. Лазерный луч перемещается в поле зрения микроскопа посредством подвижного зеркала и фокусируется в плоскости фокусировки микроскопа линзой, соответствующей рабочему расстоянию микроскопа.

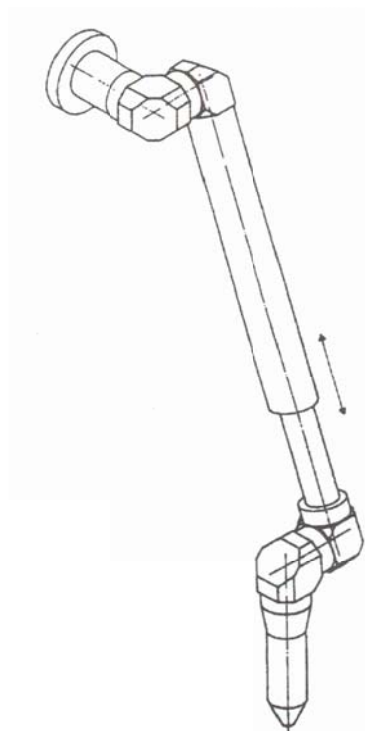


Рис. 6.3. Система доставки излучения с телескопическим соединением

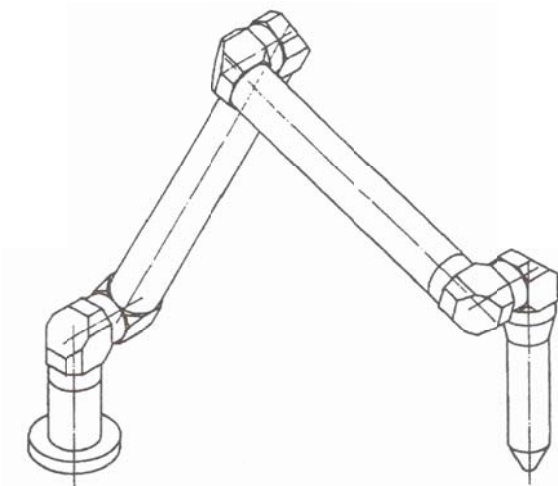


Рис. 6.4. Система доставки излучения с шарниром типа локтевого сустава

6.3.2. Фокусирующие наконечники для YAG:Nd³⁺-лазеров

Фокусирующие наконечники применяются для точечного наружного лечения с помощью YAG:Nd-лазера, например, в дерматологии,

а также для прицельного испарения биоткани при высокой плотности мощности в хирургии на открытых органах. Конструктивно они представляют собой модуль, состоящий из световодной передающей системы и фокусирующей оптики.

Расходимость луча перед фокусирующей оптикой, обусловленная вводом в волоконный световод и составляющая примерно 10° , значительно превышает величину расходимости у CO_2 -лазера (рис. 6.1). Поэтому фокусировка излучения Nd:YAG-лазера в ограниченное фокальное пятно с точки зрения оптики стоит значительно больших затрат.

Для получения в фокусе высокой плотности мощности aberrации должны быть сведены к минимуму. Кроме того, для удобства пользования длина аппликатора не должна быть слишком большой. Этим требованиям оптимально соответствует система с тремя линзами (рис. 6.5). При типичном диаметре сердцевины волокна 600 мкм диаметр фокуса составляет 0,6...0,7 мм.

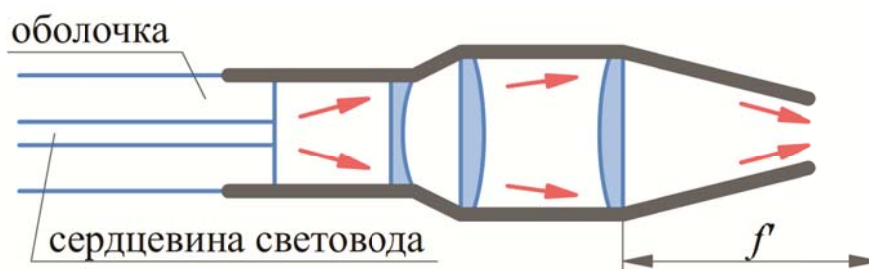


Рис. 6.5. Оптическая схема фокусирующего наконечника для YAG:Nd-лазера

Можно применять оптику с фокусным (рабочим) расстоянием 50 или 70 мм. Увеличивая расстояние до ткани, можно изменять плотность мощности и диаметр луча.

Для защиты оптики от загрязнений при испарении биоткани перед оптикой помещают металлический конус, уменьшающий рабочее расстояние примерно на 25 мм. Кроме того, имеются фокусирующие наконечники с встроенной коаксиальной системой газовой продувки, защищающие оптику от загрязнения и не ограничивающие обзор операционного поля.

6.3.3. Контактные аппликаторы

С целью усовершенствования методов и улучшения контроля за плотностью мощности и желаемым эффектом воздействия на биоткань в последние годы были разработаны различные лазерные аппликаторные системы, с помощью которых работы ведутся в контакте с тканью. Получаемые в результате специальные эффекты в ткани привели к расширению существующих областей показаний, например, в гастроэнте-

рологии и гинекологии, а также к открытию совершенно новых областей применения, таких как реканализация кровеносных сосудов.

6.3.4. Контактные наконечники

Применение контактных наконечников приводит к таким же эффектам в ткани, связанным со спецификой длины волны, как и в случае неконтактного применения. Однако при этом затрагивается область ткани значительно меньшего размера. Контактные наконечники применяются в сочетании с YAG:Nd-лазером, однако их можно использовать и при излучении другой длины волны, например, аргонового лазера.

Контактный наконечник является прозрачным для применяемой длины волны. В принципе, эффективность его применения основывается на концентрации излучаемой энергии на очень маленьком объеме ткани.

Если с помощью контактного наконечника воздействовать на ткань в течение продолжительного времени малой мощностью, то достигается глубокая коагуляция, сравнимая с воздействием неконтактным лазерным методом. Только когда выбирается такая высокая мощность, что плотности мощности достаточно для карбонизации ткани, может начаться процесс испарения, связанный с изменением свойств ткани. В дальнейшем процессы непосредственного поверхностного поглощения и преобразования излучаемой энергии в испарение протекают легче благодаря обуглившимся частицам ткани на контактном наконечнике.

Таким образом, YAG:Nd-лазер может быть использован для точного испарения небольших объемов ткани контактным методом. Он обладает определенной режущей способностью, что в сочетании с хорошими свойствами коагуляции, присущими этой длине волны, дает возможность бескровного рассечения и препарирования.

Таблица 6.12

Характеристики сапфира и кварцевого стекла

Параметр	Сапфир	Кварцевое стекло
Химическая формула	Al_2O_3	SiO_2
Показатель преломления (1064 нм)	1,75	1,45
Твердость (по Моосу)	9	7
Температура плавления	1800...2050 °C	1300...1500 °C
Удельная теплоемкость	0,18 кал/г·К	0,177 кал/г·К
Теплопроводность	8,6 кал/с·м·К	0,35 кал/с·м·К

Как правило, контактные наконечники изготавливают из синтетического монокристалла сапфира. Сапфир (Al_2O_3) прозрачен для широкого диапазона длин волн, физиологически нейтрален, устойчив к воздей-

ствию кислот и щелочей, обладает высокой температурой плавления (около 2000 °С) и очень высокой теплопроводностью среди неметаллических твердых тел. Из-за высокой твердости сапфир можно обрабатывать только алмазом (см. табл. 6.12).

Контактные наконечники устанавливаются с помощью металлического разъема на небольшом, конструктивно обусловленном расстоянии от дистального конца системы передачи излучения (рис. 6.6).

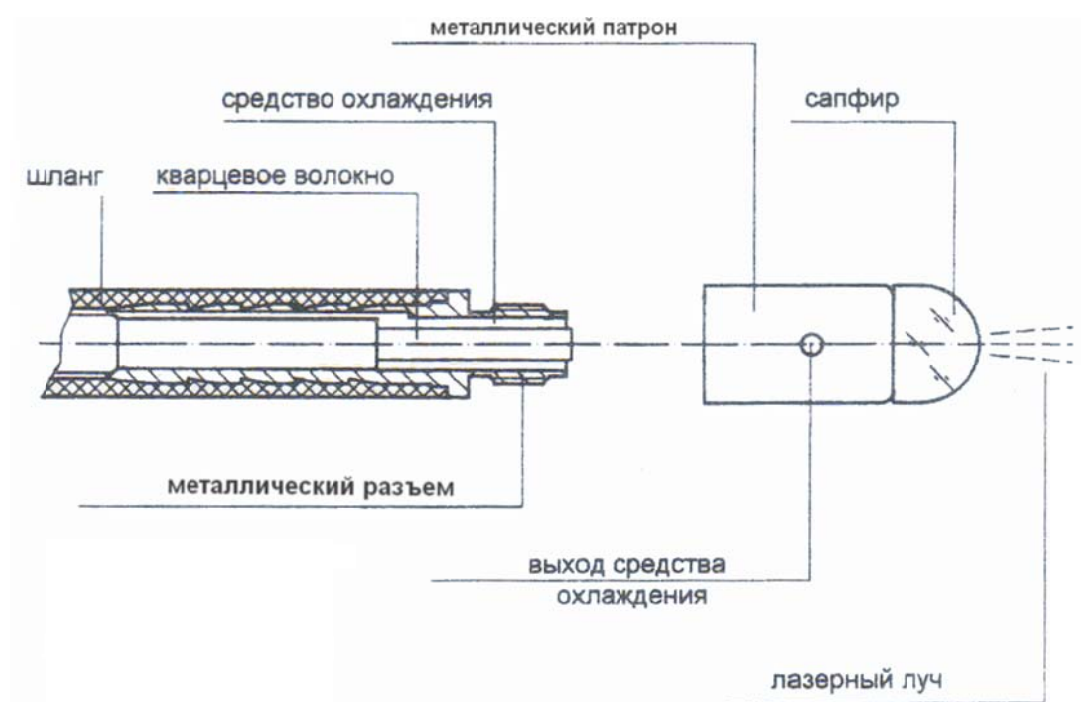


Рис. 6.6. Схематическое изображение световода с контактным наконечником для эндоскопического применения

Так как отражение лазерного излучения на границах раздела может привести к нагреванию разъема, то промежуточное пространство должно постоянно охлаждаться. Средство охлаждения подается коаксиально волоконному световоду и выходит через отверстия в разъеме. В зависимости от показаний может применяться CO_2 , N_2 , сжатый воздух, вода или раствор поваренной соли. Однако при жидкостном охлаждении требуется установка более высокой мощности из-за повышенных потерь на поглощение.

6.3.5. Наконечники для рассечения

Наконечники различной формы обеспечивают различное воздействие на ткань.

Конический контактный наконечник служит для точного рассечения ткани. Ход лучей в наконечнике представлен на рис. 6.7.

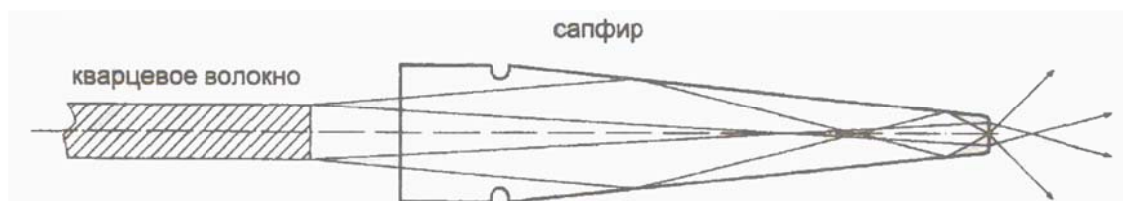


Рис. 6.7. Оптическая схема наконечника для рассечения биоткани

При диаметре на выходе наконечника 0,4 мм и мощности 10 Вт достигается плотность мощности около 7500 Вт/см^2 . Это соответствует мощности 125 Вт при расстоянии до ткани 5 мм и использовании обычного аппликатора. С помощью конического контактного наконечника можно выполнять разрезы ткани, ширина которых лишь немного превосходит диаметр наконечника. Разрез окружает узкая зона коагуляции. Вследствие износа наконечника характеристика выходного излучения изменяется, качество рассечения становится хуже, а размер разрезов увеличивается. Области применения – все точные хирургические операции по препарированию, например, для конизации в гинекологии, при рецидивах рака молочной железы или при раке вульвы, в микронейрохирургии, отоларингологии или в дерматологии для удаления меланомы. Хирургический зонд можно применять также эндоскопическим методом для лапароскопического адгезиолиза или при внутриматочных аномалиях.

6.3.6. Наконечники для испарения ткани

Наконечник полукруглой формы для испарения биоткани действует как собирающая линза и вызывает фокусировку лазерного луча в воздухе.

Если окружающей средой является вода или ткань, то излучение имеет незначительную расходимость вследствие небольшой разницы показателей преломления (рис. 6.8).

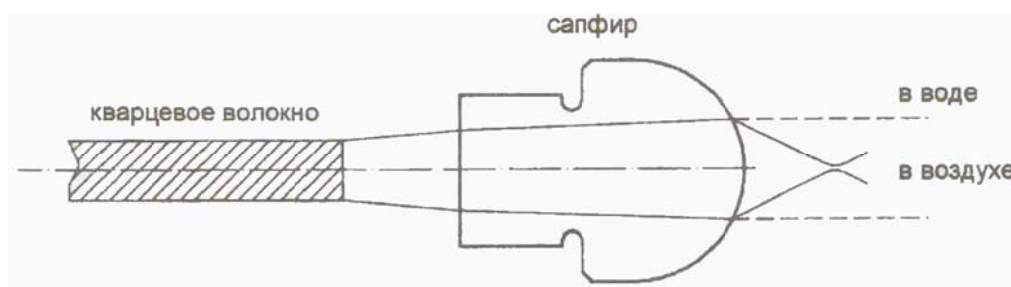


Рис. 6.8. Оптическая схема наконечника для испарения биоткани

Меньшая расходимость излучения обеспечивается наконечником в форме пули (Bullet probe), геометрическая форма которого представ-

ляет собой комбинацию конуса и полукруга. Однако у наконечников такой формы могут возникать потери при передаче излучения из-за неконтролируемого общего отражения на поверхности выхода луча. Эти контактные наконечники подходят для испарения небольших объемов ткани. В гастроэнтерологии они применяются при разрастании опухолей на эндопротезы или при стенозах кишечника. Но основной областью применения контактных наконечников в последнее время стала ангиопластика, где они применяются для реканализации периферийных сосудов с некальцифицированными стенозами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 300 с.
2. Абильсиитов Г.А. Технологические лазеры: в 2 т. – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1. – 432 с.: ил.; Т. 2. – 544 с.: ил.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / под ред. Н.Н. Рыкалина. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Илларионов В.Е. Основы лазерной терапии. – М.: Изд-во «Респект», 1992. – 122 с.
6. Прикладная лазерная медицина: учеб. пособие / под ред. Х.П. Берлиена и Г.Й. Мюллера. – М.: Интерэксперт, 1977. – 356 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Значения функции интеграла вероятности $\text{ierfc}(x)$

x	$\text{ierfc}(x)$	x	$\text{ierfc}(x)$	x	$\text{ierfc}(x)$	x	$\text{ierfc}(x)$
0,0	0,5642	0,22	0,3713	0,44	0,2300	0,80	0,0912
0,01	0,5542	0,23	0,3638	0,45	0,2247	0,82	0,0861
0,02	0,5444	0,24	0,3564	0,46	0,2195	0,84	0,0813
0,03	0,5350	0,25	0,3491	0,47	0,2144	0,86	0,0767
0,04	0,5251	0,26	0,3419	0,48	0,2094	0,88	0,0724
0,05	0,5156	0,27	0,3348	0,49	0,2045	0,90	0,0682
0,06	0,5062	0,28	0,3278	0,50	0,1996	0,92	0,0642
0,07	0,4969	0,29	0,3210	0,52	0,1902	0,94	0,0605
0,08	0,4878	0,30	0,3142	0,54	0,1811	0,96	0,0569
0,09	0,4787	0,31	0,3075	0,56	0,1724	0,98	0,0535
0,10	0,4698	0,32	0,3010	0,58	0,1640	1,0	0,0503
0,11	0,4610	0,33	0,2945	0,60	0,1559	1,1	0,0365
0,12	0,4523	0,34	0,2882	0,62	0,1482	1,2	0,0260
0,13	0,4437	0,35	0,2819	0,64	0,1407	1,3	0,0183
0,14	0,4352	0,36	0,2758	0,64	0,1407	1,4	0,0127
0,15	0,4268	0,37	0,2722	0,66	0,1335	1,5	0,0086
0,16	0,4186	0,38	0,2637	0,68	0,1267	1,6	0,0058
0,17	0,4104	0,39	0,2579	0,70	0,1201	1,7	0,0038
0,18	0,4024	0,40	0,2521	0,72	0,1138	1,8	0,0025
0,19	0,3944	0,41	0,2465	0,74	0,1077	1,9	0,0016
0,20	0,3856	0,42	0,2409	0,76	0,1020	2,0	0,0010
0,21	0,3789	0,43	0,2354	0,78	0,0965		

Учебное издание

ЛОСЕВ Валерий Федорович
МОРОЗОВА Елена Юрьевна
ЦИПИЛЕВ Владимир Папилович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Выпускающий редактор *Т.С. Савенкова*
Редактор *Е.А. Тетерина*
Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 04.05.2012. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 11,57. Уч.-изд. л. 10,47.
Заказ 582-12. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru