

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ:

новые грани света

Лекция 9

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Основные физические процессы при лазерной микрообработке. Закон Буггера. Плавление. Абляция. Влияние длительности импульса. Термоупрочнение. Сварка. Резка. Сверление микроотверстий. Маркировка. Фотолитография. Аддитивные технологии. 3D печать.

Немного истории...



В 1964 г. на экраны вышел 3-ий фильм бондиады «Goldfinger». В книге Я. Флеминга Джеймс Бонд был привязан к циркулярной пиле. Продюсеры заменили пилу на лазер, разрезающий металлическую плиту «лучом смерти» – научно-фантастическое явление для современников.

А в это время... Кумар Патель (*Kumar Patel*) в Лабораториях Белла работал над усовершенствованием CO_2 лазера, изобретенного в 1964 г. Резка стали толщиной 0,1' излучением CO_2 лазера была произведена в 1967 г



Вехи

1960 г. – рубиновый лазер, Т. Мейман

1963 г. – создание установки СУ-1 для лазерной сварки на основе рубинового лазера. Сообщения о сварке, плавке, сплавлении, сверлении, испарении, термоупрочнении с помощью лазера.

1964 г. – CO₂ лазер, 1 мВт, К. Патель, позднее 200 мВт при добавлении азота. Запуск Nd:YAG лазера. Запуск волоконного лазера.

1965 г. – CO₂ лазер длиной 2 м с добавлением воздуха – 12 Вт,

1966 г. – коммерческая модель CO₂ лазера с осевым протоком, 75 Вт, 1967 г. – резонатор CO₂ лазера увеличен до 54 м, 2,5 кВт. Транспортировка лазерного излучения кварцевым волокном.

1968 г – резонатор CO₂ лазера увеличен до 229 м, 8,8 кВт

1968-1970 гг – усовершенствование схемы накачки CO₂ лазера и доведение мощности до десятков кВт.

1970 г – Запуск Н.Г. Басовым эксимерного (Xe₂) лазера (170 нм)

1977 г. – запущен лазер на свободных электронах

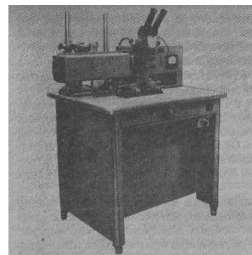
1980 г – запущен рентгеновский лазер (20 нм)

1982 г – запущен Ti:Sapphire лазер (фс)

1992 г – эффективный теплоотвод от диодных линеек, в конце 90-х стали доступны диодные лазеры 6 кВт

1997 г – представлен 4 кВт Nd:YAG cw лазер для замены CO₂ лазера

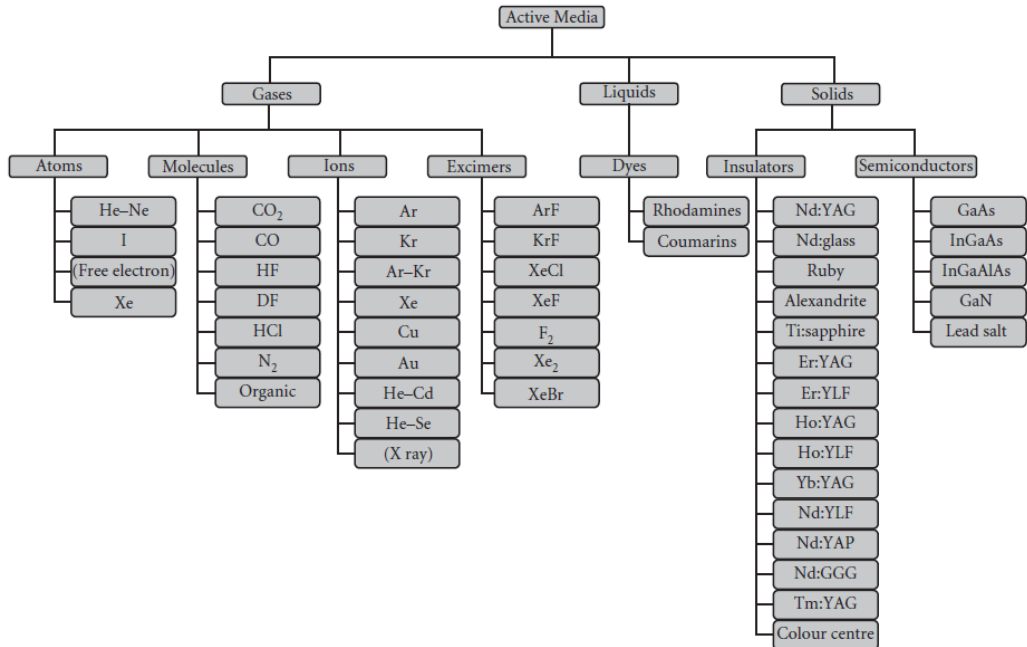
2010 г – представлен 10 кВт Yb непрерывный одномодовый волоконный лазер



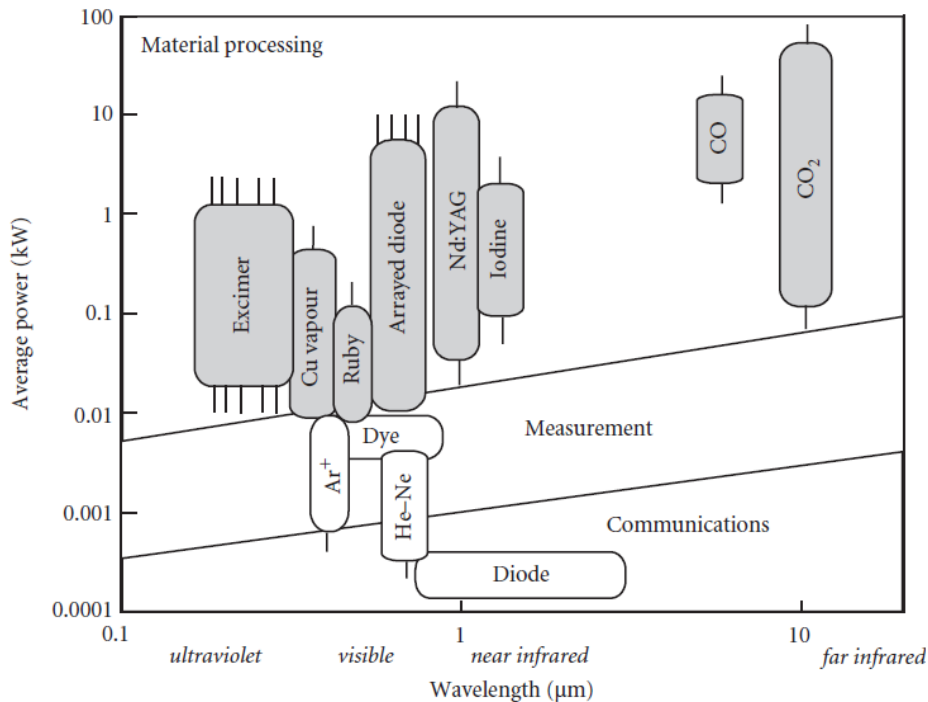
Широчайший спектр возможностей обработки материалов с участием лазеров

- Использование различных видов лазеров:
 - *активная среда*
 - *длина волны*
 - *мощность/энергия*
 - *непрерывный/импульсный режим генерации*
 - *нс/пс/фс длительность импульса*
- Обработка любых материалов:
 - *металлы/сплавы*
 - *стекла/керамика*
 - *полимеры/композиты*
- Режим обработки:
 - *тепловой – нагрев, плавление, испарение, взаимодействие излучения и вещества в макромасштабе*
 - *нетепловой – создание/разрушение химических связей, взаимодействие излучения и вещества в масштабе атомов*
- Мириады приложений, в основу которых положен ограниченный набор механизмов обработки

Систематизация лазеров по типу активной среды

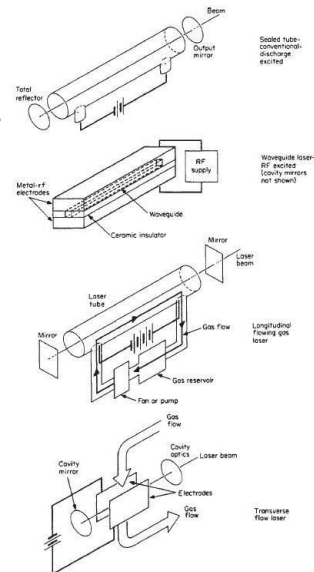


Лазеры для обработки материалов



Характеристики СО₂ лазера

Property		Types of CO ₂ lasers				Waveguide
		Slow flow or sealed	Axial flow	Transverse flow	Transverse excited atmospheric pressure	
Wavelength (μm)		10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
Standard beam operating mode	CW	•	•	•		•
	Pulsed				•	•
	Q-switched					
Average output power (W)		3–100	50–5,000	2,000–25,000		0.1–40
Output stability (percentage variation)			0.25–5	0.25–5	0.25–5	0.25–5
Pulse energy (J/pulse)					0.03–75	
Repetition rate (pulses/s)					1–300	
Beam diameter (mm)		3–4	5–70	5–70	5–100	1–2
Beam divergence (mrad)		1–2	1–3	1–3	0.5–10	10
Wall plug efficiency (%)		5–15	5–15	5–15	1–10	5
Most suitable applications	Cutting	•	•	•		
	Drilling				•	
	Part marking				•	•
	Welding		•	•		
	Cladding		•	•		
	Alloying		•	•		
	Microsoldering	•				•
	Heat treatment		•	•		
	Cleaning				•	

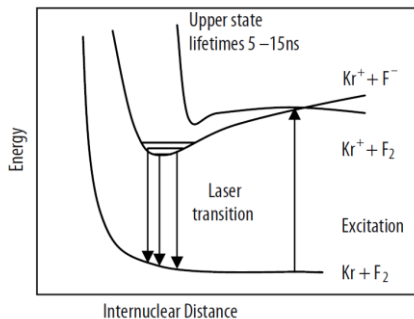


Характеристики твердотельных лазеров

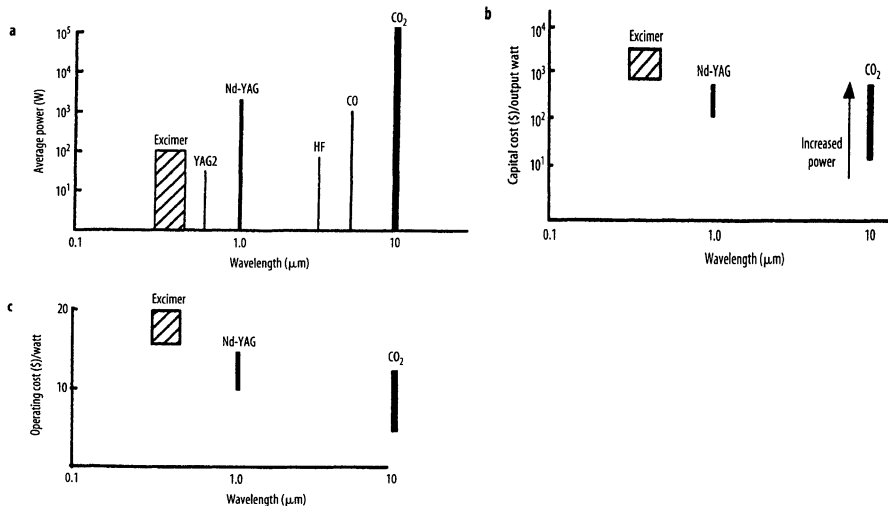
Property		Types of solid-state lasers					
		Ruby	Nd:glass	Nd:YAG (CW)	Nd:YAG (pulsed)	Yb:fibre	Er:fibre
Wavelength (μm)		0.694	1.06	1.06	1.06	1.03–1.1	1.5–1.6
Standard beam operating mode	CW Pulsed Q-switched	•	•	•	•	•	•
Average output power (W)		10–20		0.04–800	0.04–400	0.01–20,000	0.01–500
Output stability (percentage variation)		1–5	1–5	1–5	1–5	1–2	1–2
Pulse energy (J/pulse)		0.3–100	0.15–100		0.01–100		
Repetition rate (pulses/s)		0.01–4	0.1–1		0.05–300	10 ¹⁰	
Beam diameter (mm)							
Beam divergence (mrad)		0.2–10	3–10	2–18	0.3–10		
Wall plug efficiency (%)		0.1–0.5	1–5	0.1–2	0.1–2	12.5	
Price range (\$)		15,000–70,000	8,000–110,000	3,000–90,000	3,500–110,000		
Most suitable applications	Cutting Drilling Part marking Welding Cladding Alloying Microsoldering Heat treating Cleaning	•	•	•	•	•	•

Характеристики эксимерных лазеров

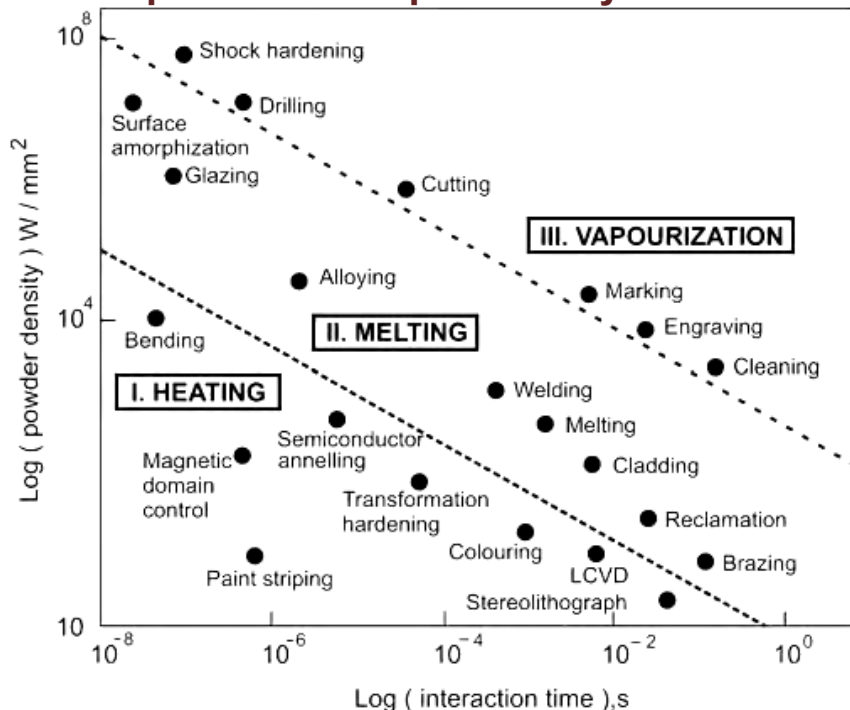
Property	Types of excimer lasers			
	ArF	KrCl	KrF	XeCl
Wavelength	193	222	248	308
Average output power (W)	0.3–100	2–4	2–100	0.02–150
Output stability (percentage variation)	5		5	5
Pulse energy (MJ/pulse)	0.2–500	0.1–250	20–15,000	1.2–5,000
Repetition rate (pulses/s)	1–250	10–500	1/60–1,000	1–1,000
Pulse width (ns)	1.2–65	1.2–6	1.5–1,200	1.2–80
Beam diameter (width × height, mm ²)	1 × 30 to	1 × 3 to	5 × 20 to	1 × 3 to
	30 × 10	8 × 30	100 × 100	45 × 45



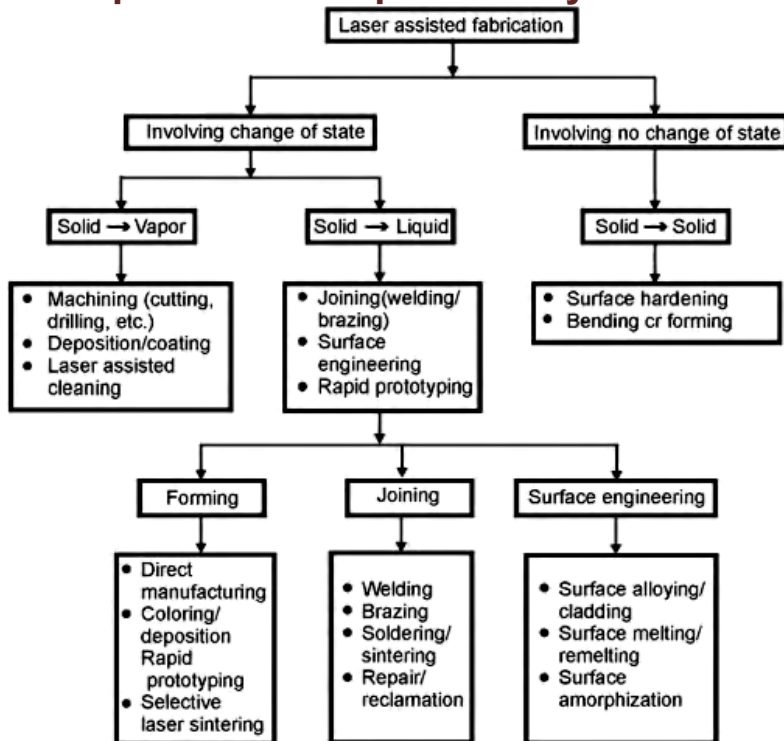
Сравнение распространенных типов лазеров, используемых для обработки материалов



Тепловая обработка материалов с участием лазеров



Тепловая обработка материалов с участием лазеров



Нетепловая обработка материалов с участием лазеров

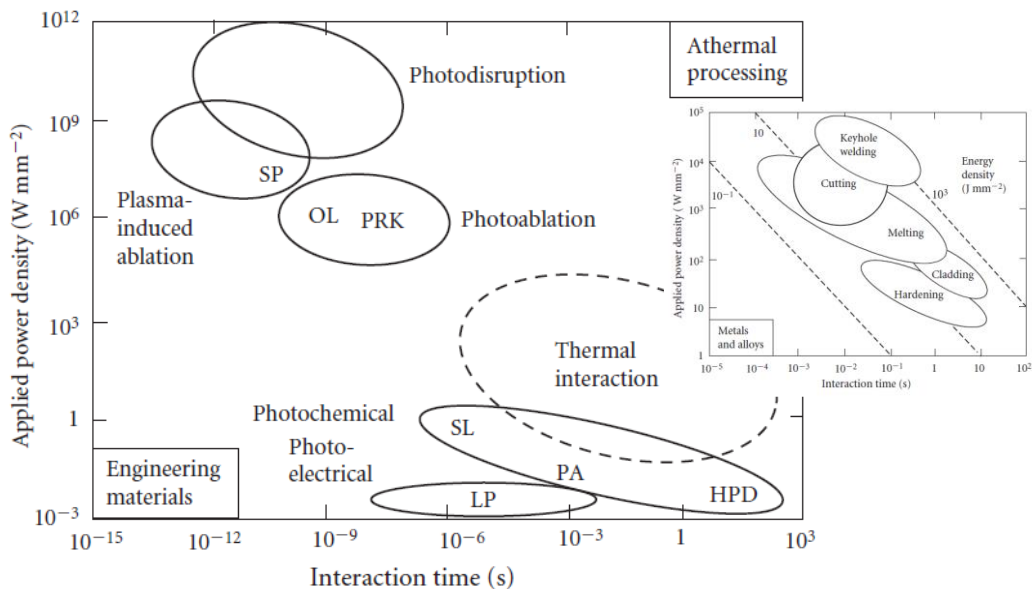
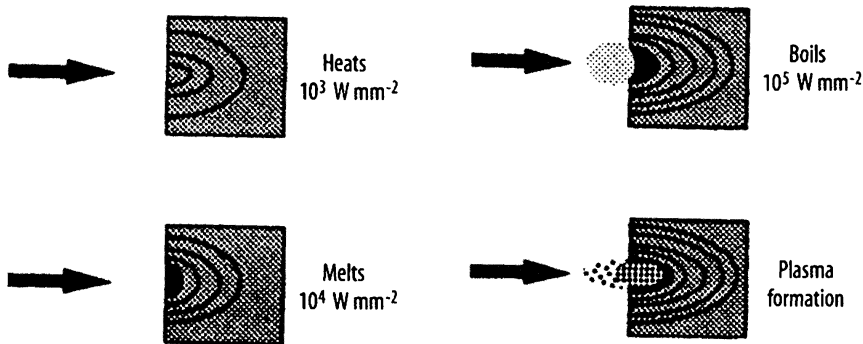


Figure 7.1 Athermal mechanisms of laser material processing: photophysical, photochemical and photo-electrical mechanisms are regions bounded by solid lines; LP: laser printing; HPD: haematoporphyrin derivative; PA: photochemical annealing; SL: stereolithography; OL: optical lithography; PRK: photorefractive keratectomy; SP: shock processing (the region of thermal processing is shown with a broken boundary for comparison)

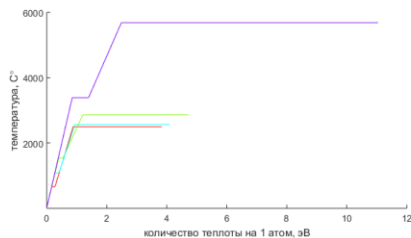
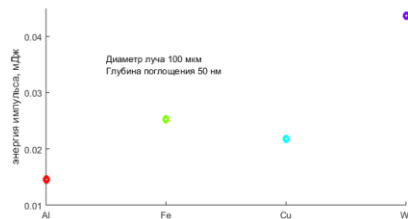
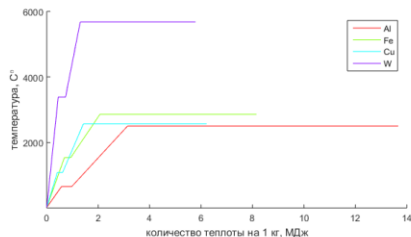
Физические процессы при тепловой лазерной обработке

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

Характер протекания этих стадий определяет различие и разнообразие технологических процессов



Нагрев, плавление и испарение



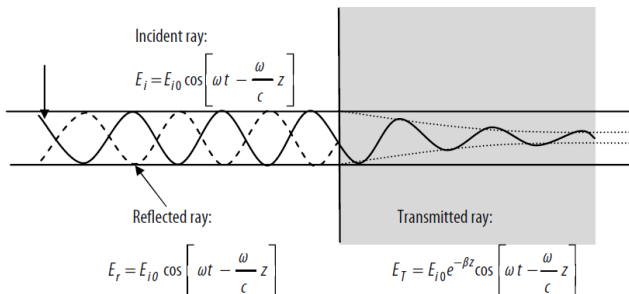
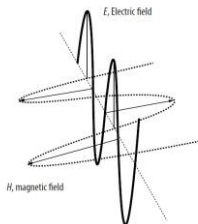
Передача энергии излучения веществу

В металлах и вырожденных (с примесной проводимостью) полупроводниках энергия излучения передается электронам проводимости.

В вырожденных (собственных) полупроводниках и диэлектриках преобладает передача энергии излучения фононам – колебаниям кристаллической решетки.

Проникновение излучения вглубь вещества описывается законом Бугера:

$$I(z, t) = I_0(t)(1 - R)e^{-\beta z}$$



Отражение и поглощение излучения

Для непрозрачных материалов

$$R = 1 - A$$

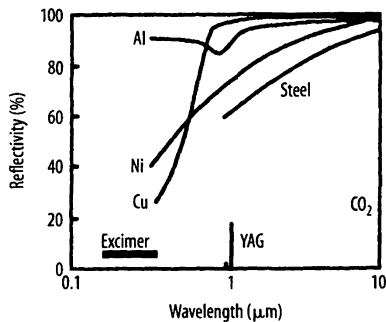
Для прозрачных материалов

$$R = 1 - (A + T)$$

Если излучение падает из воздуха ($n_{air}=1$) нормально на поверхность металла с коэффициентами преломления n и экстинкции k , коэффициенты отражения и поглощения будут:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$

$$A = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2}$$



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

Отражение и поглощение излучения

Material	λ (μm)	Refractive index	
		k	n
Al	1.06	8.5	1.75
	10.6	34.2	0.108
Fe	1.06	4.49	3.81
	10.6	32.2	5.97
Ti		3.48	2.88
Glass		–	1.5

$$I(z, t) = I_0(t)(1 - R)e^{-\frac{4\pi k}{\lambda}z}$$

Для железа

$$z_{87\%} = \frac{2\lambda}{4\pi k} = \begin{cases} \frac{10,6 \text{ мкм}}{2 \cdot 3,14 \cdot 32,2} = 52 \text{ нм} \\ \frac{1,06 \text{ мкм}}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,49} = 38 \text{ нм} \end{cases}$$

Время воздействия

Металлы можно представлять состоящими из двух подсистем:
свободные электроны и ионы кристаллической решетки.

Электронная подсистема характеризуется очень быстрым откликом на внешнее воздействие поля световой волны: $10^{-14} \dots 10^{-13}$ с [$10 \dots 100$ фс]. За это время устанавливается температура [*мера средней кинетической энергии хаотического движения*] электронов.

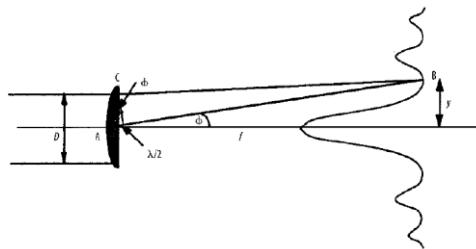
Передача энергии от электронов ионной подсистеме происходит на масштабе 10^{-11} с [10 пс].

Понятие «температура вещества» можно применять спустя $10^{-10} \dots 10^{-9}$ с [100 пс... 1 нс] после начала воздействия. За это время устанавливается тепловое равновесие между двумя подсистемами.

Если время передачи электронной подсистеме энергии, требуемой на испарения вещества, короче времени обмен с кристаллической решеткой [< 10 пс], то вещество совершит быстрый переход из твердого состояния в газообразное [*абляция*] в области воздействия излучения без заметного теплообмена с окружающим материалом.

При увеличении времени воздействия поглощаемую световую волну можно считать просто источником тепла.

Дифракционный предел. Глубина фокусировки



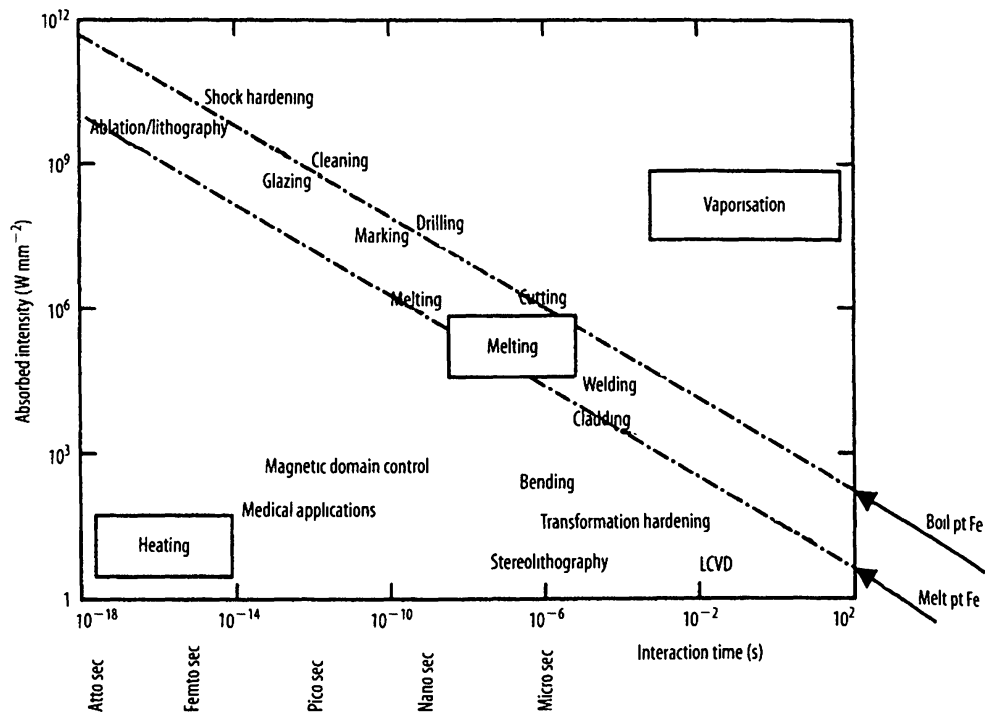
$$d_{\min} = M^2 \frac{4}{\pi} \frac{f}{D} \lambda$$

$$M^2 = \frac{\Theta_{act}}{\Theta_{id}} \text{ – параметр качества}$$

Wavelength (μm)	F number Mode (f/D)		Diffraction, $d_{\min}$ (mm)	Depth of focus, Δz_f (mm)
10.6	2	Top hat	0.26	0.08
	5	TEM00	0.13	0.5
	5	TEM01*	0.26	1.0
	5	TEM20	0.65	2.5
	10	TEM00	0.26	2.0
1.06	2	Top hat	0.026	0.008
	5	TEM00 ^b	0.013	0.05
	5	TEM01 ^b	0.026	0.1
	5	TEM20 ^b	0.065	0.25
	5	Multi	-0.4	-2.0
	10	TEM00	0.026	0.2

		Angular zero fields — l		
		0	1	2
Radial zero fields — p	0	 TEM00	 TEM01	 TEM02
	1	 TEM10	 TEM11	 TEM12
	2	 TEM20	 TEM21	 TEM22

Диаграмма процессов лазерной обработки

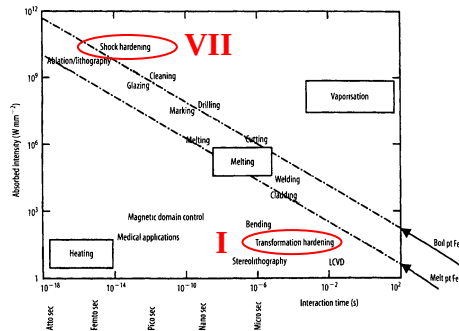


Лазерное термоупрочнение

В области I фазовые переходы (плавление, испарение) отсутствуют. В таких условиях возможно термоупрочнение в большом диапазоне глубин: от единиц микрометров до нескольких сантиметров – в зависимости от длительности воздействия – без переплава поверхностного слоя, только благодаря структурной перестройке материала на стадиях разогрева и охлаждения. Скорость разогрева можно менять в широких пределах, вплоть до 10^6 град/с, что нельзя обеспечить другими способами.

Результатами лазерного термоупрочнения являются:

- увеличение твердости, прочности, износостойкости
- создание поверхностных карбидов – твердых тугоплавких соединений с углеродом
- создание уникальных пространственных «рисунков» износостойкости
- поверхностная закалка



Лазерное термоупрочнение

1. Heating Processes

	Advantages	Disadvantages
Laser	Minimum part distortion Selective hardening No quenchant required Thin case capability Case depth controllable Eliminates post-processing Improves fatigue life	High equipment cost Coverage area restricted Absorbent coatings necessary Multiple passes give local tempering
Induction	Fast process rates Deep case obtainable Lower capital cost than laser Coverage area	Downtime for coil change Quenchant required Part distortion Coil placement critical Large thermal penetration EM forces may spoil surface Fabrication of complex coils for specific processes
Flame	Cheap, flexible and mobile process	Poor reproducibility Lacks rapid quench Component distortion likely Environmental problems
Arc (TIG)	Relatively cheap and flexible process	Section thickness limited Large thermal penetration Stirring takes place Poor control to avoid melting
Electron beam	Minimal distortion, selective hardening and no quenchant required	High equipment cost Requires vacuum Low production rate High processing costs

Лазерное ударное упрочнение

В области VII интенсивно образуется плазма за счет разогрева очень тонкого поверхностного слоя, поскольку длительность воздействия мала, а плотность мощности велика. Поверхностный слой удаляется с большой скоростью, а на вещество действует реактивный импульс отдачи, вглубь вещества распространяется ударная волна. Давление достигает $10^3 \dots 10^4$ атм.

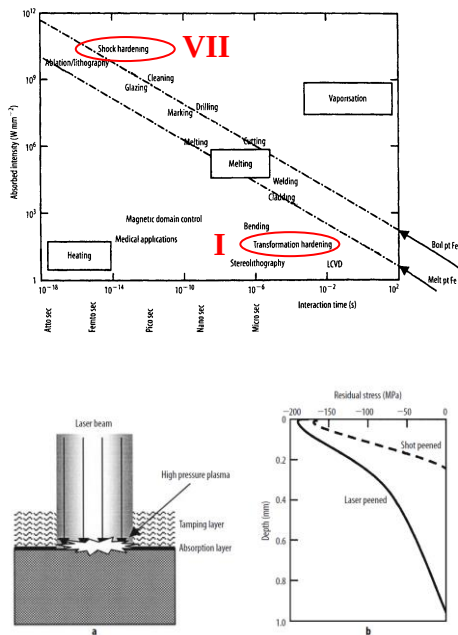


Figure 6.44 a The laser peening process. Short pulses of 10–100 ns and 100 J cm^{-2} create plasma pressures of 1,000–10,000 atm, and b comparison of depth of hardening between shot peening and laser peening. (Data taken from Hammersley *et al.* [109] for INCONEL® 718)

Лазерная сварка

В области II образуется глубокий проплав вещества с незначительным испарением (или его отсутствием). Эффективно идет сварка и термоупрочнение на большую глубину с переплавом поверхностных слоев.

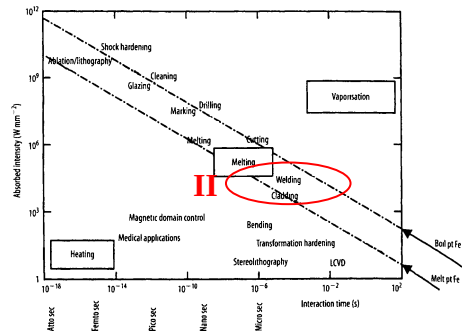


Table 4.1 Relative power densities of different welding processes

Process	Heat source intensity (W m^{-2})	Fusion zone profile
Flux-shielded arc welding	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Gas-shielded arc welding	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Plasma	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	
Laser or electron beam	$10^{10} - 10^{12}$	

Сравнение разных способов сварки

Table 4.2 Relative joining efficiencies of different welding processes

Process	Approximate joining efficiency (mm ² kJ ⁻¹)
Oxyacetylene flame	0.2–0.5
Manual metal arc	2–3
TIG	0.8–2
Submerged arc welding	4–10
High-frequency resistance welding	65–100
Electron beam	20–30
Laser	15–25

TIG tungsten–inert gas

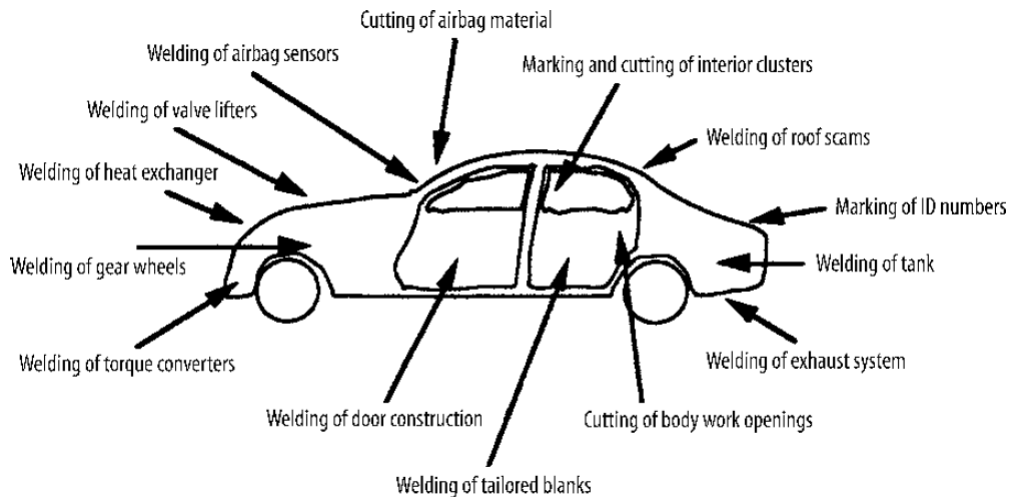
Т а б л и ц а 23.1. Энергетические характеристики сварочных источников теплоты

Виды сварки	Минимальная площадь пятна нагрева, м ²	Максимальная плотность энергии, Вт/м ²	Погонная энергия, Дж/м
Газовая сварка	10 ⁻⁶	5·10 ⁸	52·10 ⁵
Ручная дуговая сварка	10 ⁻⁷	10 ¹¹	23·10 ⁵
Аргондуговая плавя- щимся электродом	10 ⁻⁷	10 ¹¹	13·10 ⁵
Ионно-лучевая	10 ⁻⁷ —10 ⁻⁸	—	—
Микроплазменная	10 ⁻¹⁰	10 ¹²	8·10 ⁵
Электронно-лучевая	10 ⁻¹¹	10 ¹³	1,5·10 ⁵
Лазерная	10 ⁻¹²	10 ¹⁴	0,4·10 ⁵

Преимущества лазерной сварки

Characteristic	Comment
High energy density – “keyhole” type weld	Less distortion
High processing speed	Cost-effective (if fully employed)
Rapid start/stop	Unlike arc processes
Welds at atmospheric pressure	Unlike electron beam welding
No X-rays generated	Unlike electron beam
No filler required (autogenous weld)	No flux cleaning
Narrow weld	Less distortion
Relatively little HAZ	Can weld near heat-sensitive materials
Very accurate welding possible	Can weld thin to thick materials
Good weld bead profile	No clean-up necessary
No beam wander in magnetic field	Unlike electron beam
Little or no contamination	Depends only on gas shrouding
Relatively little evaporation loss of volatile components	Advantages with Mg and Li alloys
Difficult materials can sometimes be welded	General advantage
Relatively easy to automate	General feature of laser processing
Laser can be time-shared	General feature of laser processing

Лазерная сварка в автопроизводстве

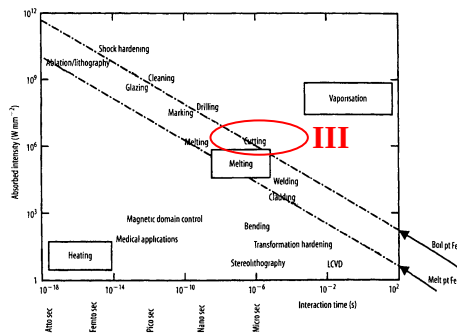


Лазерная резка

Область III, соответствующая режиму резки материала, характеризуется эффективным испарением и глубоким проплавлением вещества за счет большой глубины прогрева, выдавливания и удаления расплава.

Ключевые характеристики лазерной резки:

- один из наибоыстрейших способов
- материал, в принципе, не требует фиксации
- отсутствует износ режущего инструмента
- резка осуществляется в любом направлении
- процесс резки легко автоматизируется и роботизируется
- можно резать практически любые материалы
- маленькая ширина реза
- минимальная зона нагрева



Сравнени лазерной и других способов резки

	Laser	Abrasive water jet	Plasma arc	Oxyfuel
Materials	All homogeneous	All	Metallic	Metallic
Max. thickness (steel, mm)	30	100	50	300
Kerf width (mm)	0.1–1.0	0.7–2.5	>1	>2
HAZ width (mm)	0.05	0	>0.4	>0.6
Edge quality (relative)	Square, smooth	Square, smooth	Bevelled (<i>c.</i> 17°)	Square, rough
Edge roughness (R_a , μm)	1–10	2.0–6.5	–	–
Smallest hole diameter (mm)	0.5	>1.5	>1.5	20
Energy input (relative)	Low	Low	High	Medium
Capital cost (relative)	1	1	0.1	0.01
Productivity (relative)	High	Medium–low	Medium	Low

Сверление микроотверстий

В области IV испаряется достаточно толстый слой материала [$\sim 0,5 \text{ мм}$], который удаляется при расширении паров в свободное пространство. Увеличение длительности импульсов и уменьшение энергии ведет к увеличению количества расплава, наличию брызг.

Короткие и интенсивные импульсы обеспечивают удаление материала в виде пара, в результате отверстия имеют аккуратный вид.

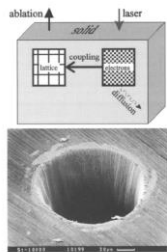
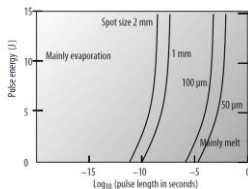


Fig. 1. Schematic of femtosecond-pulse laser ablation and a SEM photograph of a hole drilled in a 100 μm thick steel foil with 200 fs, 120 pJ, $F = 0.5 \text{ J/cm}^2$ laser pulses at 780 nm.

Fig. 2a, b. Schematic of nanosecond-pulse laser ablation and holes drilled in a 100 μm thick steel foil with up to 40 pJ, 900 pJ, $F = 3.7 \text{ J/cm}^2$, and $F = 25 \text{ J/cm}^2$ laser pulses at 780 nm.

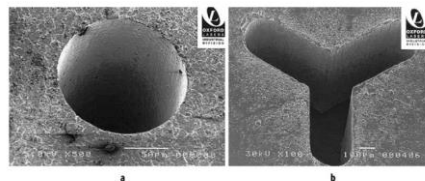
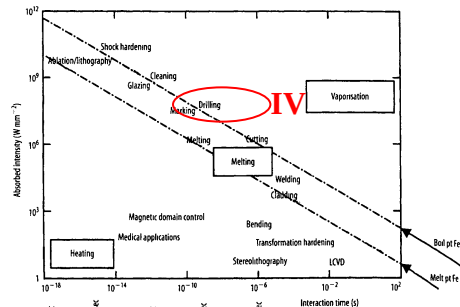
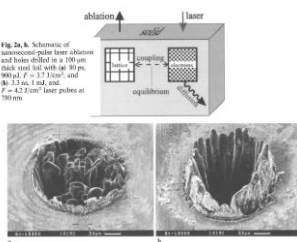
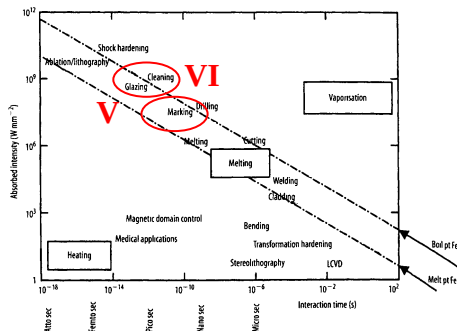


Figure 3.20 Examples of the quality of trepanned holes made by laser: as an example of a laser-trepanned hole as used in diesel fuel injectors (the typical diameter is 40–150 μm through 1-mm steel), and b a spinner hole showing the versatility of trepanned laser holes, which can be of almost any required shape. (Courtesy of AILU through <http://www.designforlasermanufacture.com> and Oxford Lasers)

Лазерная маркировка

В областях V и VI длительность воздействия мала. Прогретый слой составляет величину ~ 100 нм, что позволяет испарять поверхностный слой, производить маркировку, пробивать отверстия в тонких пленках.



Фотолитография

Один из основных приемов **планарной** технологии, позволяющей модифицировать свойства поверхности материала на микро- и наномасштабе. Широко используется в микроэлектронике при производстве полупроводниковых приборов и печатных плат, а, также, в других областях микро- и нанотехнологий.

Фотолитография включает несколько стадий, в числе которых:

- нанесение на модифицируемую поверхность фоторезиста – светочувствительного материала
- экспонирование фоторезиста путем облучения **светом** либо через маску-фотошаблон, либо путем сканирования поверхности лучом.
- проявление – удаление облученных участков фоторезиста
- модификация поверхности в образовавшихся «окнах»
- удаление остатков фоторезиста

При экспонировании используются, в том числе, эксимерные лазеры. Минимально достижимый пространственный масштаб определяется длиной волны.

Аддитивные технологии

Аддитивные технологии или Additive Manufacturing (АМ-технологии) – обобщенное название способов производства, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой (или CAD) модели методом послойного добавления [add] материала.

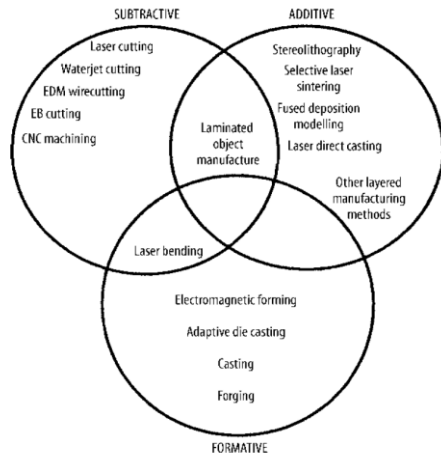
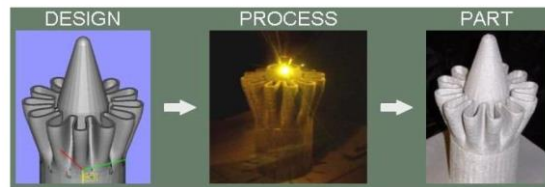


Figure 7.2 Automated fabrication techniques. EDM electric discharge machining, EB electron beam

Date	SLA	LOM	SLS	FDM	LDC
1993	—	—	Sinter station 200	FDM 1000	Invented
1992	—	—	SLS 125 β test	Patent granted 3D modeller β test	—
1991	—	LOM-1015	SLS 125	3D modeller	—
1990	SLA-500	—	—	—	—
1989	SLA-250	—	—	Invented	—
1988	SLA-1 β testing SLA-1	—	—	—	—
1987	—	—	Patent granted Invented	—	—
1986	Patent granted	—	Invented	—	—
1985	—	—	—	—	—
1984	Patent application	—	—	—	—

Figure 7.1 History of rapid prototyping. SLA stereolithography, LOM laminated-object manufacture, SLS selective laser sintering, FDM fused-deposition modelling, LDC laser direct casting.



(Источник: www.optomec.com)

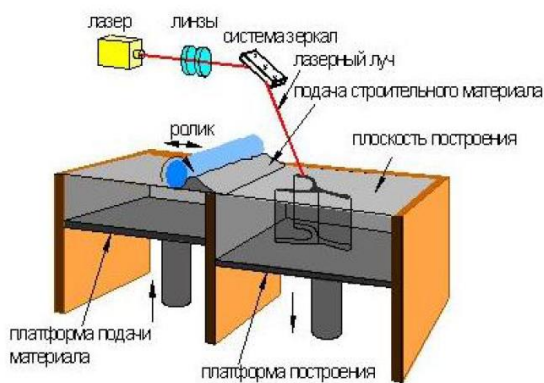
CAD-модель

АМ-машина

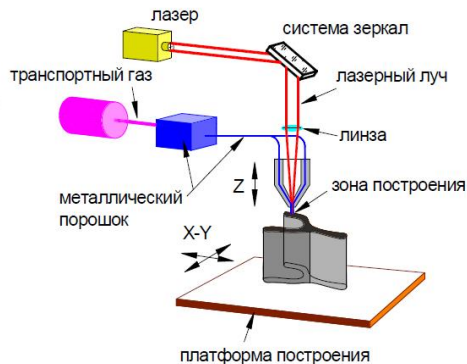
Деталь

Классификация аддитивных технологий

Классификация: по методу формирования слоя



a – Bed Deposition



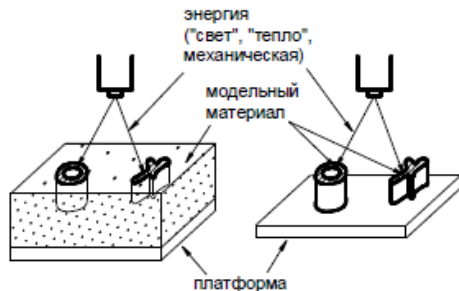
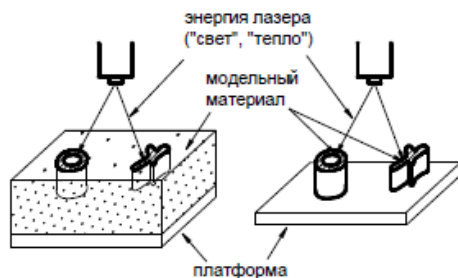
б – Direct Deposition

Классификация аддитивных технологий

Классификация: по ключевой технологии

лазерные

нелазерные



а

б

в

г

Bed Deposition

Direct Deposition

Bed Deposition

Direct Deposition

а

б

в

г

жидкости
(SLA-технология)

сыпучие
(SLS-технология)

листовые
(LOM-технология)

сыпучие
(LENS-, DMD-технология)
нитевидные
(металл. проволока);
(Laser based wire-feed process)

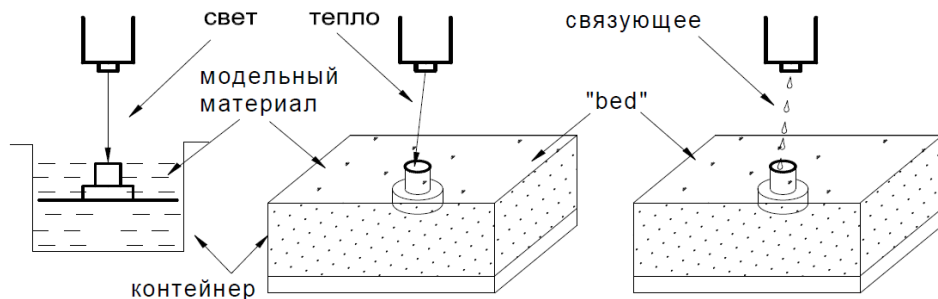
жидкости
(DLP-технология)
сыпучие
(Ink-Jet-технология)
Листовые
(LOM-технология)

сыпучие
(Poly-Jet-, Ink-Jet-технология)
нитевидные
(FDM-технология)

Классификация аддитивных технологий

Аддитивные технологии

Классификация: по методу фиксации слоя



а – фотополимеризация
«свет»

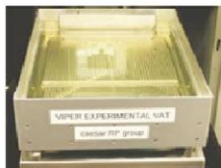
б – сплавление
«тепло»

в – склеивание
«связующее»

Классификация аддитивных технологий

Классификация: по типу строительных материалов

жидкие



Фотополимеры

акриловые (эпоксидные)

сыпучие



Полимеры

полиамид, полистирол
PMMA (polymethyl methacrylate)

Пески

кварцевые, циркониевые

Металлопорошки

Al, Cu, Ti-Al, Ti, Ag, Au

Co-Cr, Inconel, Ni-Fe

инструментальные стали

нитевидные,
прутковые



Полимеры

ABS-подобные
PU-подобные

Металлы

(feedstock в виде
прутка или
проволоки)

листовые,
плёночные



Полимеры

ПВХ-плёнки

Металлы

фольга
листовой прокат