

Техническая информация

Лазерная обработка

СО₂-лазер

**Техническая
информация**

Лазерная обработка

СО₂-лазер

Издание: **02/2007**

Информация для заказа

Пожалуйста, укажите название, нужный язык и дату выпуска документа.

TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG
Technische Dokumentation
Johann-Maus-Straße 2
D-71254 Ditzingen
Тел.: +49 (0) 71 56/3 03-0
Факс: +49 (0) 71 56/3 03-5 40
Интернет: <http://www.trumpf.com>
Электронная почта: docu.tw@de.trumpf.com

Данный документ составлен **отделом технической документации** фирмы TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG.

Все права на данную документацию, в частности, право на ее размножение и распространение, а также перевод, принадлежат фирме TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, в том числе, в случаях заявления прав на промышленную и интеллектуальную собственность. Воспроизведение, а также переработка, копирование либо распространение с использованием электронных средств какой-либо части документации в какой-либо форме запрещены без предварительного письменного согласия фирмы TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. Отсутствие ошибок не гарантируется. Сохраняется право на внесение технических изменений.

© TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG

Фирма TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG не несет ответственность за возможные ошибки в данной документации. Всякая ответственность за прямой и косвенный ущерб, возникающий в связи с поставкой или использованием данной документации, исключается, если это не противоречит закону.

Прежде чем читать далее...

Данная "Техническая информация" призвана предоставить Вам наиболее существенные сведения, касающиеся CO₂-лазера.

То, как функционирует CO₂-лазер и как лазерный луч становится рабочим инструментом, описано в начале данного документа. То, какую роль лазер играет в обработке материалов и каковы требования к качеству лазерной резки, описывается в последующих главах.

Для быстрого поиска интересующих Вас сведений в конце "Технической информации" имеется предметный указатель, а также глоссарий.

**Серия: Техническая
информация "Лазерная
обработка"**

Техническая информация "Лазерная обработка" относится к серии информационных статей, посвященных теме лазеров и лазерной обработки.

Сборник данных

Особое внимание уделяется сборникам данных, составляемым и выпускаемым фирмой TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG для отдельных станков лазерной резки. В них содержатся нормативные показатели для процессов лазерной резки и прорезания различных материалов.

Содержание

Глава 1 Основные понятия лазерной техники

1.	Принцип лазера	1-2
1.1	Механизмы возбуждения в CO ₂ -лазере	1-3
2.	Свойства лазерного излучения.....	1-5
3.	Качество луча	1-6
3.1	Распределение интенсивности в поперечном сечении луча.....	1-7
4.	Типы лазеров.....	1-9
5.	Устройство источника излучения.....	1-10
6.	Компоненты лазерной установки	1-11
7.	Безопасность лазеров	1-13

Глава 2 CO₂-лазеры фирмы TRUMPF

1.	Инструмент для промышленности.....	2-2
2.	Компактная конструкция CO ₂ -лазера	2-3
3.	Две концепции конструкции CO ₂ -лазеров.....	2-4
3.1	Проточные CO ₂ -лазеры	2-4
3.2	CO ₂ -лазеры с диффузионным охлаждением	2-6
4.	Возбуждение	2-9
5.	Режимы работы.....	2-10

Глава 3 Формирование и проводка луча

1.	Компоненты.....	3-2
2.	Зеркала.....	3-3
3.	Лучевой телескоп.....	3-5
3.1	Адаптивные зеркала	3-7
3.2	Передвижной держатель зеркал.....	3-8
3.3	Смещение фокуса	3-8
4.	Работа на нескольких участках.....	3-9
4.1	Делители луча	3-9
4.2	Отклонители луча.....	3-10

Глава 4 Компоненты для фокусирования

1.	Основы.....	4-2
2.	Оптические устройства обработки.....	4-6
2.1	Линзовые оптические системы	4-7
2.2	Зеркальные оптические системы.....	4-8
2.3	Сканирующие оптические системы	4-10
2.4	Система датчиков контроля	4-12
	Система датчиков контроля линзы.....	4-12
	Система датчиков контроля выходного зеркала (OMS)	4-12
2.5	Поляризация	4-13

Глава 5 Процессы обработки

1.	Области применения CO ₂ -лазеров	5-3
2.	Лазерная сварка	5-6
2.1	Принцип лазерной сварки	5-6

2.2	Способы сварки	5-8
	Глубокая сварка	5-9
	Глубокая сварка с присадочными материалами	5-11
	Гибридный метод сварки	5-11
	Сварка со сканированием	5-12
2.3	Характеристики процесса	5-12
	Геометрия и тип шва	5-13
	Подготовка швов	5-15
	Зажимные устройства	5-17
	Мощность лазера и скорость сварки	5-18
	Качество луча и главное фокусное расстояние	5-19
	Поляризация	5-20
2.4	Преимущества и возможности применения	5-21
2.5	Критерии высокого качества швов	5-24
2.6	Станки и установки	5-27
3.	Лазерная резка	5-28
3.1	Принцип лазерной резки	5-28
3.2	Способы резки	5-30
	Кислородная резка: резка выжиганием	5-30
	Резка с азотом: резка с расплавлением	5-31
3.3	Критерии качества резки	5-33
	Глубина шероховатости	5-33
	Форма и ширина прорези	5-33
	Отсутствие граты	5-35
	Материал и мощность лазера	5-35
	Режим работы	5-35
	Скорость резки	5-36
3.4	Преимущества и возможности применения	5-39
3.5	Станки и установки	5-41
4.	Разметка и кернение лазером	5-42
5.	Лазерная обработка поверхностей	5-43
5.1	Закалка CO ₂ -лазером	5-44
5.2	Переплавка	5-45
5.3	Легирование и диспергирование	5-46
5.4	Нанесение покрытий	5-48
6.	Direct Metal Deposition (DMD)	5-50

Глава 6 Резка труб и профилей

1.	Трубы и профили	6-3
1.1	Определения	6-3
1.2	Поперечные сечения какой формы могут обрабатываться лазером?	6-3
1.3	Качество	6-5
1.4	Возможности и ограничения при обработке труб на двух- и трехмерных установках	6-6
2.	Обработка искривленных поверхностей	6-9
2.1	Полигонализация контуров	6-9
2.2	Обработка контуров "в плоскости"	6-11
2.3	Регулировка расстояния	6-12
2.4	Зазор при резке труб круглого сечения	6-13
2.5	Обработка углов на трубах многоугольного сечения	6-14
	Коррекция зазора для резки	6-14
	Уменьшение подачи	6-16
3.	Влияние противоположной стороны	6-17
4.	Отрезание трубных элементов	6-18

Глава 7 Критерии оценки качества лазерной резки

1.	Каким образом оценивается качество резки?	7-2
2.	Образование грата	7-3
3.	Прорезь	7-4
4.	Лунки	7-5
5.	Усредненная глубина шероховатости	7-6
6.	Желобчатый сбег	7-9
7.	Погрешность прямоугольности и уклона	7-10

8.	Итоговая таблица	7-12
----	------------------------	------

Глава 8 Предметный указатель

Глава 9 Предметный указатель

Глава 1

Основные понятия лазерной техники

1.	Принцип лазера	1-2
1.1	Механизмы возбуждения в CO ₂ -лазере	1-3
2.	Свойства лазерного излучения.....	1-5
3.	Качество луча	1-6
3.1	Распределение интенсивности в поперечном сечении луча.....	1-7
4.	Типы лазеров.....	1-9
5.	Устройство источника излучения.....	1-10
6.	Компоненты лазерной установки	1-11
7.	Безопасность лазеров	1-13

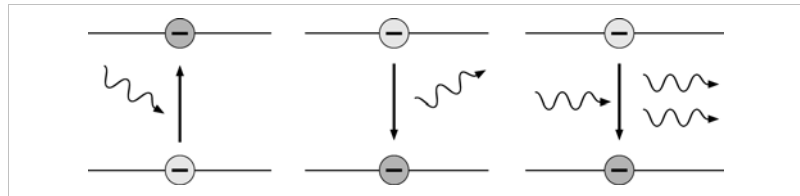
1. Принцип лазера

Понятие "лазер" - американское искусственное слово, образованное от "light amplification by stimulated emission of radiation". В смысловом переводе это означает: усиление света посредством вынужденного испускания излучения.

Лазер является источником, испускающим характерное электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра. Это означает, что не каждое испускаемое лазерами излучение видимо человеческим глазом (видимый диапазон: прибл. 400 – 750 нм). Тем не менее, лазерное излучение зачастую называют "светом".

Вынужденное испускание

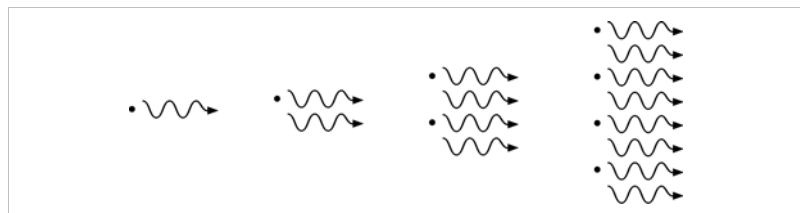
При вынужденном испускании фотон (мельчайшая энергетическая частица электромагнитного излучения) сталкивается с возбужденным атомом или молекулой и вынуждает электрон перейти на более низкий энергетический уровень. В результате образуется новый фотон. Однако необходимо, чтобы прибывающий фотон нес в себе необходимую для данного процесса энергию. Такой энергией он обладает в том случае, если она соответствует разности энергий возбужденного и более низкого энергетических уровней.



Возбуждение (слева), спонтанное испускание (в центре), вынужденное испускание (справа)

Рис. 48000

Новый фотон, образованный в результате вынужденного испускания, имеет точно такую же частоту и фазовую характеристику, что и первый фотон, и движется в том же направлении.



За счет вынужденного испускания происходит лавинообразное усиление лазерного излучения.

Рис. 48001

Световой луч усилен. Там, где до этого был один фотон, теперь продолжают движение два однородных фотона. Когда эти фотоны снова сталкиваются с возбужденными атомами, происходит испускание новых фотонов, и световой луч еще больше усиливается. Поэтому лазеры также называют "усилителями света".

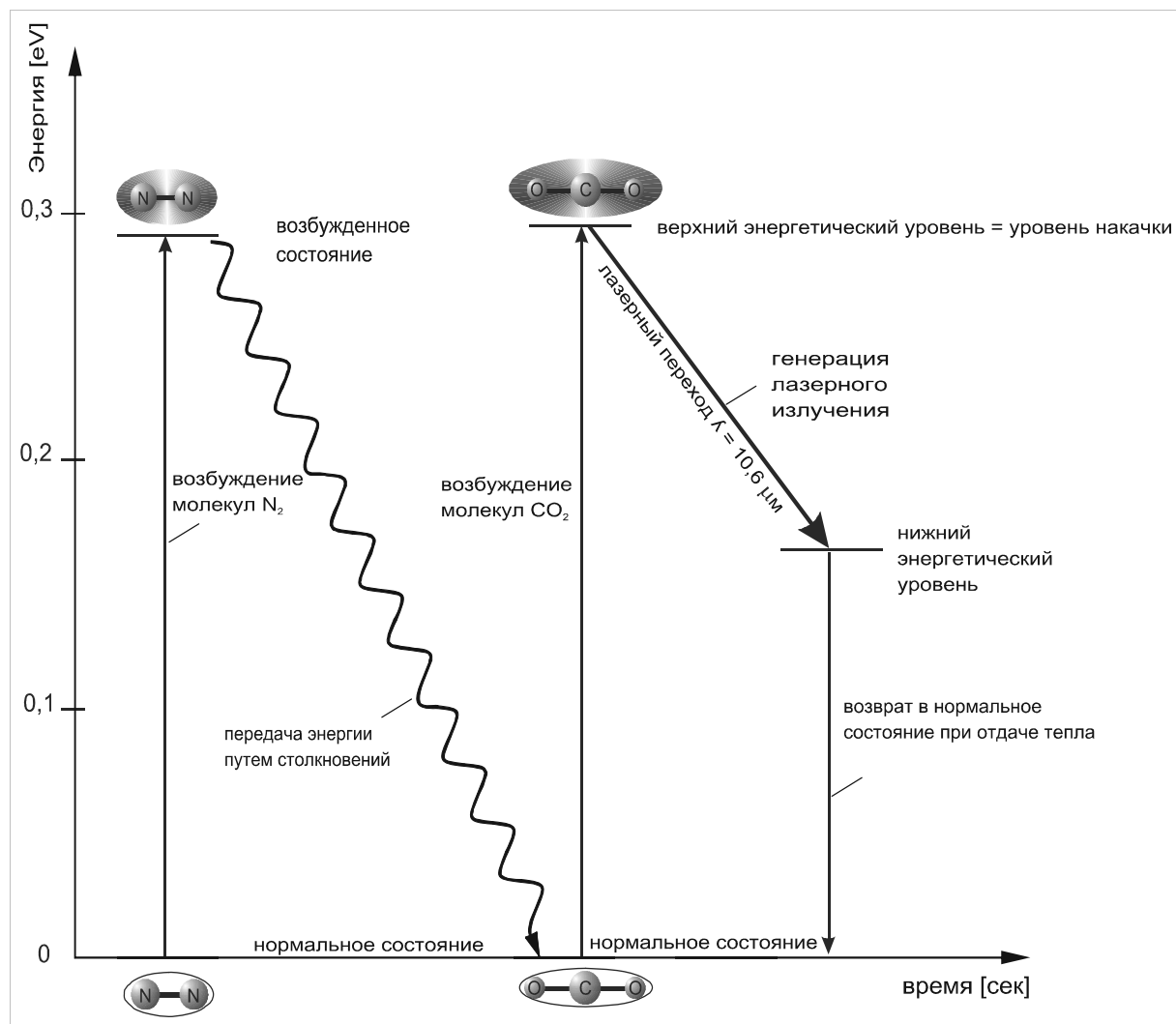
1.1 Механизмы возбуждения в CO₂-лазере

В CO₂-лазере лазерное излучение испускается молекулами CO₂. Молекула CO₂ состоит из одного атома углерода и двух атомов кислорода. Они образуют цепочку, в которой атом углерода располагается между атомами кислорода. Когда молекула возбуждается, она начинает совершать колебания. Различные формы колебаний соответствуют различным по величине энергетическим уровням. Процесс формирования излучения в CO₂-лазере происходит с использованием 4-х энергетических уровней. Уровень накачки и верхний лазерный уровень находятся очень близко друг к другу.

Однако активная среда лазера состоит не только из CO₂. Она представляет собой смесь гелия (He), азота (N₂) и углекислого газа (CO₂). Гелий и азот выполняют роль вспомогательных газов. Они лишь поддерживают процесс непосредственного формирования лазерного излучения в молекулах CO₂.

Подробно За счет разряда электротока высокого постоянного или высокочастотного переменного напряжения в газовой смеси образуются свободные электроны, которые, соударяясь с молекулами азота, возбуждают их. Молекулы азота начинают совершать колебания. Соударяясь, они передают свою энергию молекулам CO₂ и переводят их из основного состояния на верхний лазерный уровень, - в колебательное состояние, при котором все три атома молекулы находятся в движении. При переходе на нижний лазерный уровень молекулы CO₂ испускают лазерное излучение с длиной волны 10.6 микрометра.

С него, выделяя тепло, они снова возвращаются в основное состояние. Теперь вступают в действие атомы инертного газа гелия: соударяясь с молекулами CO₂, они ускоряют рассеяние нижнего лазерного уровня, поглощают и отводят тепло.

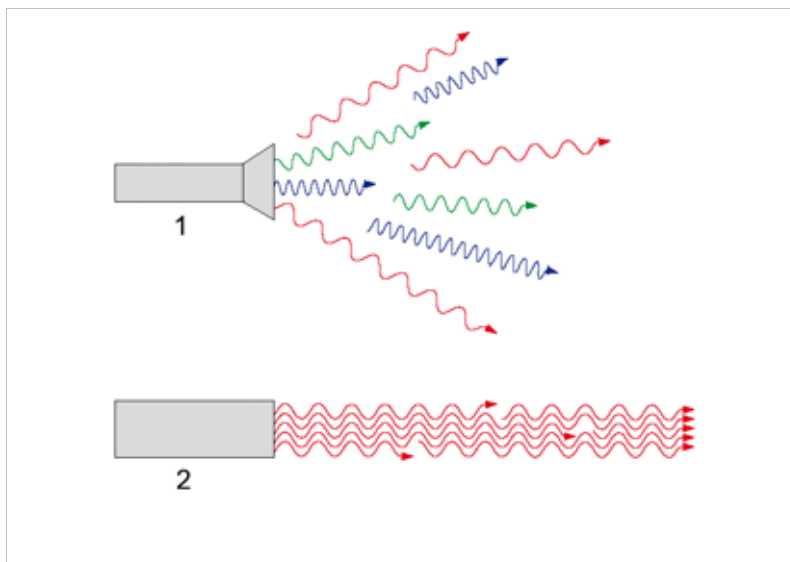


Энергетическая схема

Рис. 24227ru

2. Свойства лазерного излучения

То, что нашу сегодняшнюю жизнь уже невозможно представить без лазера, объясняется особыми свойствами лазерного излучения. В то время как свет естественных источников, например, свечи или солнца, состоит из волн различной длины, лазерное излучение отличается монохроматичностью, когерентностью и направленностью. Эти свойства являются причиной того, что лазер находит столь широкое применение.



Сверху: некогерентное излучение лампы накаливания

Рис. 49057

Снизу: монохроматическое, когерентное лазерное излучение

Монохроматичность

В лазерном луче все фотоны имеют одинаковую длину волны. Она определяется перераспределением энергии в веществах, испускающих лазерное излучение. Монохроматический свет требуется, прежде всего, для операций, при которых используется интерференция, например, для проигрывания компакт-дисков или в измерительной технике.

Когерентность

Все фотоны совершают колебания синфазно. Волновые цуги имеют одинаковую фазовую характеристику. За счет этого образуется связанный лазерный луч. Когерентность также важна везде, где находит техническое применение интерференция. В качестве примеров здесь снова можно упомянуть компакт-диски и измерительную технику.

Направленность

Фотоны имеют одинаковое направление распространения. Они движутся почти параллельно. За счет этого лазерный луч представляет собой компактный, почти не расходящийся световой пучок. Это позволяет особенно хорошо направлять луч и фокусировать его полную мощность в фокальное пятно предельно малого размера, что весьма существенно для обработки материалов.

3. Качество луча

Хотя лазерные лучи и отличаются направленностью, световые волны распространяются не стопроцентно параллельно. Лазерный луч имеет "перетяжку", за которой происходит его постепенное расхождение.

Параметры распространения и фокусируемость

Диаметр луча в месте "перетяжки" (минимальное поперечное сечение) и угол его раствора (расходимость) определяют характер пространственного распространения лазерного излучения. Лучи с малым диаметром "перетяжки" и незначительной расходимостью могут фокусироваться в пятно сравнительно небольшого размера и при этом имеют большую глубину резкости. Благодаря этому, рабочее расстояние между линзой и заготовкой может сохраняться достаточно значительным, что желательно как для пользователя, так и для производителя лазера.

Чем меньше угол раствора, тем выше качество луча. Минимально возможная расходимость лазерных лучей может быть достигнута только при генерации основной моды и зависит от длины волны.

Произведение параметров луча и показатель M^2

Произведение параметров луча (BPP) и значение M^2 (показатель степени дифракции) характеризуют качество луча. Оба этих показателя установлены стандартом DIN EN ISO 11145.

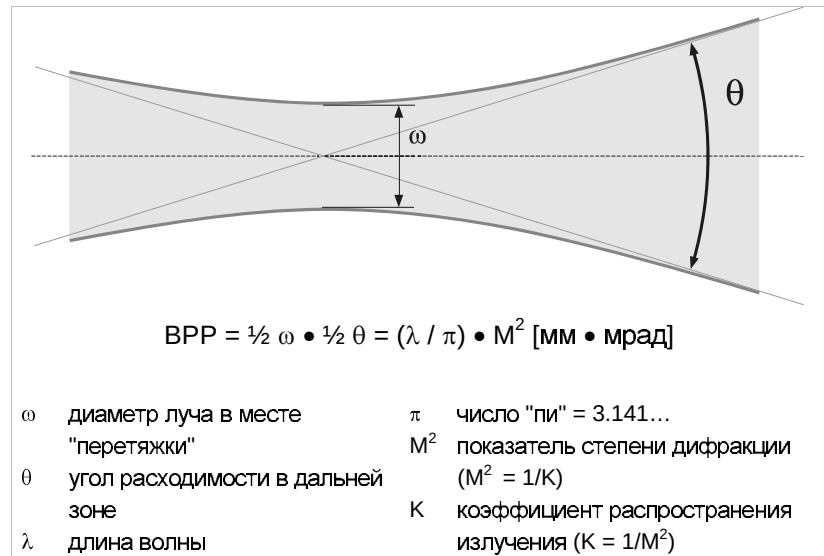


Рис. 48003

Произведение параметров луча является результатом перемножения двух наиболее важных и легко измеряемых величин: радиуса луча в месте "перетяжки" и половины угла раствора (расходимости). При этом считается: чем меньше произведение параметров луча, тем выше его качество. Для CO_2 -лазера достижимым минимумом служит значение 3.4 миллиметров миллирадиан (1 миллирадиан равен углу в 0.057 градуса).

Показатель степени дифракции M^2 показывает, насколько произведение параметров рассматриваемого луча отклоняется от оптимального значения, присущего лазерному лучу при генерации основной моды. Его значения всегда больше или равны 1. Лазерный луч с показателем M^2 , равным 1, может быть оптимально сфокусирован. M^2 и произведение параметров луча могут взаимно перерасчитываться.

Что когда применяется?

Так исторически сложилось, что для характеристики качества лучей CO_2 -лазеров в Европе, как правило, используется число K , а за океаном - показатель степени дифракции M^2 . Число K равняется обратному значению показателя M^2 .

Для сравнения качества лучей лазеров с одинаковой длиной волны могут использоваться две этих величины. Однако, если сравниваются лазеры с различными длинами волн, необходимо использовать произведение параметров луча. Причиной тому служит то, что произведение параметров луча, позволяющее судить о характере распространения и фокусируемости лазерного излучения, не зависит от длины его волны.

3.1 Распределение интенсивности в поперечном сечении луча

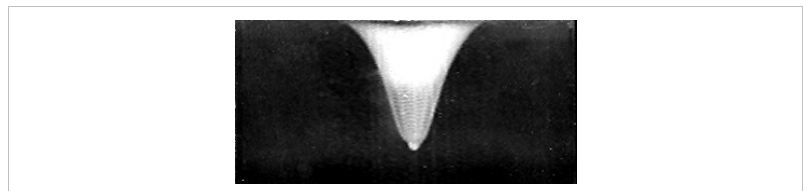
В поперечном и продольном сечении относительно своей оси лазерный луч имеет характерное распределение интенсивности (плотности энергии на см^2). Распределение интенсивности в поперечном сечении называется модой.

Моды лазеров TLF

Двумя важнейшими модами в CO_2 -лазерах являются основная мода TEM_{00} и разновидность TEM_{01} . TEM значит "трансверсальная (поперечная) электромагнитная мода".

Основная мода TEM_{00}

При основной моде TEM_{00} , называемой также гауссовой модой, интенсивность излучения достигает своего пика у оси луча и по мере удаления от нее равномерно ослабевает. Распределение интенсивности соответствует нормальному гауссову распределению. При генерации данной моды лазерный луч обладает наименьшей расходимостью. Подобная разновидность моды встречается, например, в CO_2 -лазерах мощностью от 700 до 3 500 Вт, используемых преимущественно для лазерной резки.



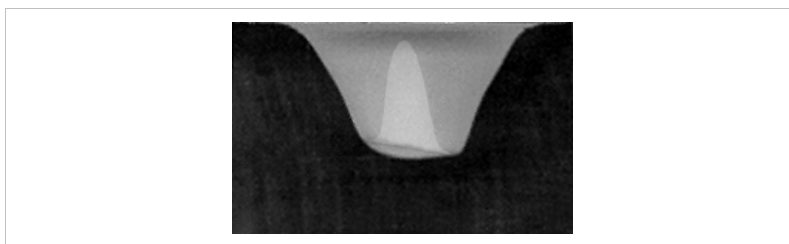
Выстрел мод в квадре из плексигласа: пример основной моды TEM_{00} ($K \approx 0.9$, $M^2 \approx 1.1$)

Рис. 48217

Кольцевая мода TEM_{01*}

При моде TEM_{01*} , называемой также кольцевой модой, интенсивность излучения имеет нулевое значение у оси луча, по мере удаления от нее - сначала достигает максимума, а затем ослабевает. Однако практика показывает, что распределение интенсивности соответствует нормальному, расширенному до своего максимума гауссову распределению. Расширение становится возможным за счет суперпозиции мод TEM_{00} и TEM_{01*} .

Данная разновидность моды находит свое применение при резке либо сверлении, в тех случаях, когда используются лазеры мощностью от 3 000 до 7 000 Вт и зеркальные оптические системы.

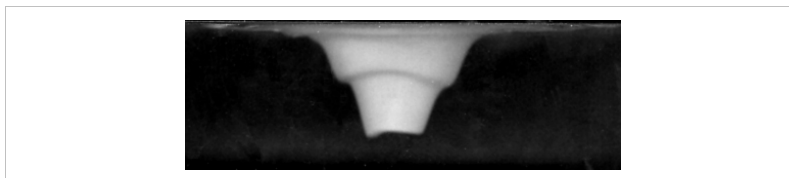


Выстрел мод в квадре из плексигласа: пример кольцевой моды TEM_{01*} (лазер: TruFlow 4000, $K \approx 0.6$, $M^2 \approx 1.8$)

Рис. 48028

комплексная мода

Комплексная мода представляет собой моду более высокого порядка. Она образуется за счет суперпозиции мод нескольких разновидностей, например, в лазерах мощностью от 8 000 до 20 000 Вт. CO_2 -лазеры с данной разновидностью моды используются, как правило, для сварки или обработки поверхностей.



Выстрел мод в квадре из плексигласа: пример комплексной моды (лазер: TruFlow 15000, $K \approx 0.25$, $M^2 \approx 4$)

Рис. 48027

Выстрел мод = наглядная демонстрация распределения интенсивности

Распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного луча становится наглядно видно благодаря так называемому выстрелу мод. Несфокусированный луч направляется на поверхность квадра из плексигласа. В результате этого в последнем образуется характерное углубление, которое соответствует распределению интенсивности в поперечном сечении луча.

4. Типы лазеров

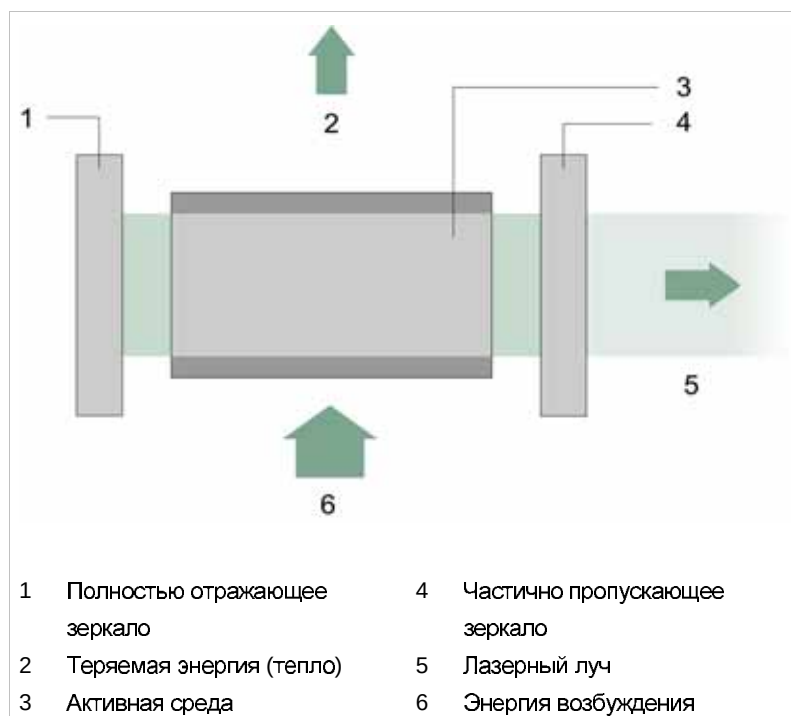
В следующей таблице приведены наиболее важные типы лазеров с указанием длины волны их излучения, а также информацией по их применению.

Типы лазеров	Активный лазерный материал	Длина волны [мкм]	Операции / области применения / примечания
Газовые лазеры	Азот	0.3371	Оптический генератор накачки для лазеров на красителях
	Эксимер (галогенид инертного газа): ArF KrF XeCl XeF	0.1931 0.2484 0.308 0.351	- Оптический генератор накачки для лазеров на красителях. - Обработка пластмасс, стекла и керамики. - Спектроскопия - Медицина - Измерительная техника.
	Гелий-неон (He:Ne)	0.6328	- Измерительная техника. - Голография - Юстировка
	Аргон (Ar) ⁺	0.3511-0.5287	- Оптический генератор накачки для лазеров на красителях. - Измерительная техника. - Голография - Спектроскопия - Медицина.
	Криптон (Kr) ⁺	0.324-0.858	- Оптический генератор накачки для лазеров на красителях. - Спектроскопия - Медицина - Фотолинтография
	Углекислый газ (CO ₂)	10.6	- Обработка материалов. - Спектроскопия - Медицина
Твердотельные лазеры	Рубин (Cr ³⁺ :Al ₂ O ₃)	0.694	- Медицина - Лидары - Обработка материалов. Первый технически реализованный лазер (1960).
	Неодим:стекло (Nd:стекло)	1.062	- Обработка материалов. - Исследования плазмы. - Фотохимия
	Неодим: алюмо-иттриевый гранат (Nd:YAG)	1.063 1.064	- Обработка материалов. - Медицина
	Александрит	0.755	Медицина
Полупроводниковые лазерные диоды	GaAlAs / GaAs	0.635-0.910	- Оптический генератор накачки для Nd:YAG-лазеров. - Оптические средства связи. - Аудиотехника - Лазерные принтеры. - Измерительная техника. - Медицина - При высоких мощностях (в кВт-диапазоне) - также обработка материалов.
	InGaAsP / InP	1.3	
	InGaAlAs	1.5	
Лазеры на красителях	Органические красители в сильно разбавленном растворе	перестраиваемы от 0.31 до 1.28	

Табл. 1-1

5. Устройство источника излучения

Все лазерные лучи образуются по одному и тому же физическому принципу. Поэтому во всех источниках излучения присутствуют аналогичные функциональные элементы.



Основные элементы лазера

Рис. 48002

активная среда Активная среда - это вещество, которое испускает лазерное излучение и в котором происходит его усиление. В ее качестве могут выступать газы, твердые вещества, а также жидкости. Главным условием является то, чтобы при возбуждении эти вещества были способны испускать свет, - точнее говоря, электромагнитное излучение, - с определенной длиной волны, а затем снова переходить на энергетически более низкие уровни.

Резонатор В резонаторе излучение многократно отражается, возвращаясь в активную среду. В простейшем случае это происходит за счет двух зеркал. Резонатор формирует направление распространения излучения и посредством вынужденного испускания обеспечивает необходимое усиление лазерного луча.

возбуждение Для того, чтобы активная среда могла испускать лазерное излучение, для ее возбуждения необходима подача энергии. Этот процесс также называют накачкой. Каждому источнику излучения нужен источник накачки, передающий активной среде оптическую, электрическую или химическую энергию. В CO₂-лазере таковым, например, является высокочастотное напряжение переменного тока.



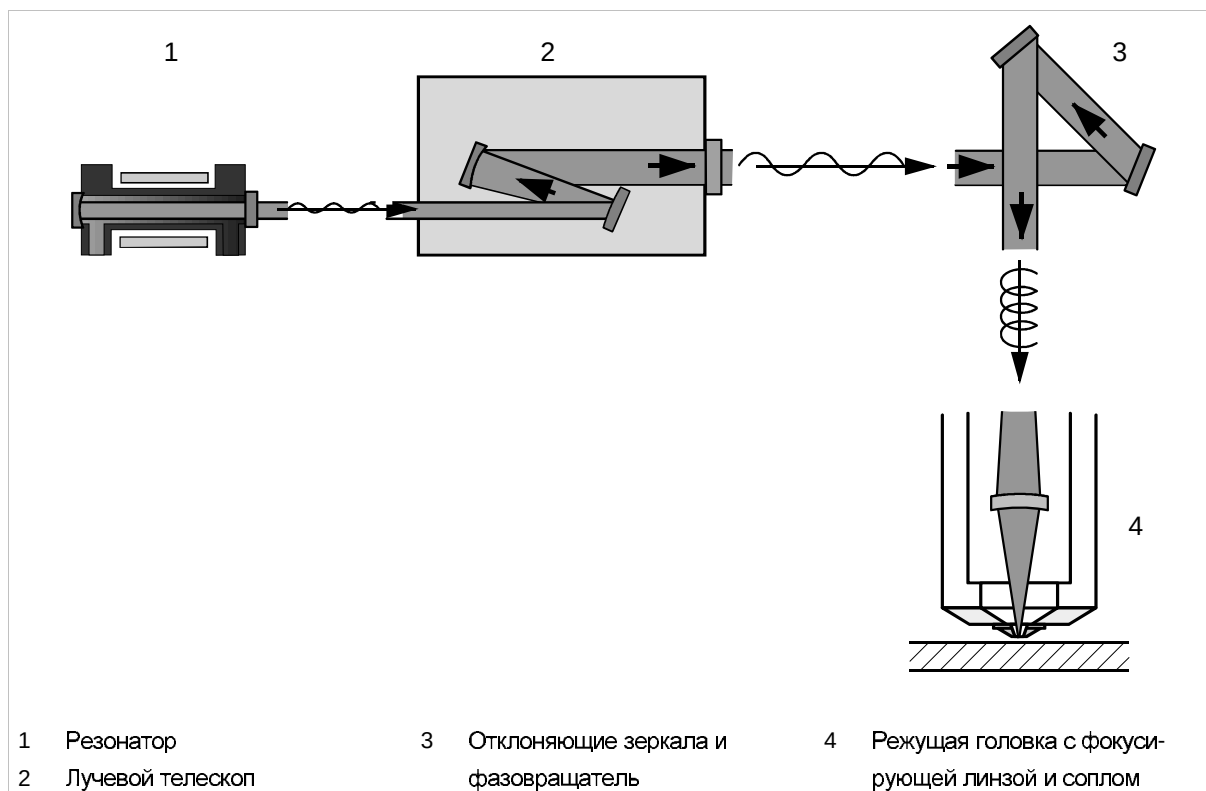
Охлаждение	Так же, как возбуждение, важно и охлаждение активной среды. Большая доля энергии возбуждения преобразуется не в лазерное излучение, а в тепло. Тепло должно отводиться, так как в противном случае будет происходить перегрев активной среды и резонатора.
Прочие компоненты	Для образования лазерного луча источнику излучения, кроме того, нужен еще целый ряд других элементов, снабжающих его энергией и, если необходимо, вспомогательными материалами, такими как газ и охлаждающая вода.

6. Компоненты лазерной установки

Компактность конструкции лазерных установок зачастую не дает представления о том, какое множество различных компонентов необходимо для оптимального выполнения той или иной задачи по лазерной обработке заготовки.

На пути к заготовке лазерный луч формируется, направляется и, в конечном итоге, фокусируется. Для этого, в зависимости от типа лазера и вида обработки, требуются различные рабочие компоненты:

- Защитные трубы и сильфоны, через которые проходит и которыми экранируется лазерный луч.
- Плоские зеркала для изменения направления луча либо его проводки к нескольким рабочим участкам.
- Частично пропускающие зеркала для деления лазерного луча.
- Выпуклые зеркала для формирования и фокусирования луча.
- Формирующие и фокусирующие линзы.
- Фазовращатель для изменения направления колебаний лазерного излучения CO₂.



Проводка луча от резонатора до заготовки

Рис. 25237

Базовый станок

Лазерный луч способен резать метровые, плоские металлические листы так же легко, как и небольшие полупроводниковые пластины либо трехмерные заготовки. Однако это возможно, только если он соответствующим образом фокусируется оптикой и направляющий его станок в состоянии обеспечить все необходимые движения. Конструкция станка либо установки определяет тот спектр заготовок, которые способен резать или сваривать лазер.

В зависимости от того, требуется резка или сварка, используются различные типы станков. Контуры на плоскости вырезаются на двухмерных станках лазерной резки, объемные контуры требуют подвижности трехмерной лазерной установки. Трубы, разрезаемые на отрезки определенной длины, обрабатываются на двухмерных станках. Кроме того, для резки все больше применяются роботы, так как они представляют собой хорошую альтернативу трехмерной установки.

Использование роботов для сварки уже давно практикуется в автомобильной промышленности.

7. Безопасность лазеров

Работа с лазером не совсем безопасна. В первую очередь, он способен повреждать кожу и глаза человека. В целях почти полной минимизации этого риска в лазерных установках предусматриваются различные конструктивные решения, направленные на достижение 1-го класса безопасности:

- Интеграция лазера в станину станка и заключение в кожух лучевода, ведущего к обрабатывающей головке.
- Защита от излучения в зоне обрабатывающей головки (комбинированная защита от излучения и брызг шлама).
- Ограждение зон посредством световых барьеров, связанных с предохранительным контуром станка.
- Размещение участка лазерной обработки в закрытой кабине.

Перечисление всех мер безопасности заняло бы здесь слишком много места. Все важные сведения по теме "Безопасность лазеров" объединены в документе "Техническая информация "Руководство по технике безопасности для лазерных устройств и обрабатывающих станков".



Глава 2

CO₂-лазеры фирмы TRUMPF

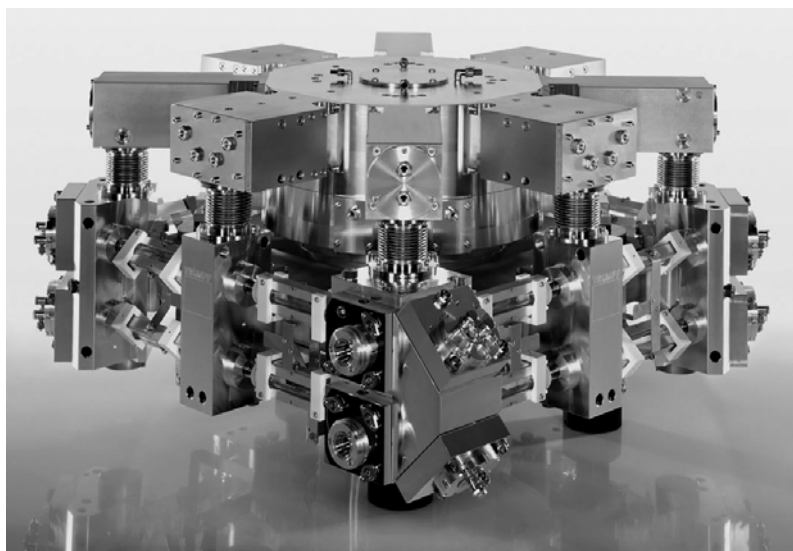
1.	Инструмент для промышленности.....	2-2
2.	Компактная конструкция CO₂-лазера	2-3
3.	Две концепции конструкции CO₂-лазеров.....	2-4
3.1	Проточные CO ₂ -лазеры	2-4
3.2	CO ₂ -лазеры с диффузионным охлаждением	2-6
4.	Возбуждение	2-9
5.	Режимы работы.....	2-10

1. Инструмент для промышленности

CO₂-лазеры зарекомендовали себя как надежные и мощные источники излучения и, благодаря этому, прочно укрепили свои позиции в сфере обработки материалов. По всему миру используется несколько десятков тысяч таких источников излучения. Большинство из них предназначено для резки и сварки. Длина волны CO₂-лазера лежит в дальней зоне инфракрасной области спектра и составляет 10.6 микрометра.

Характеристики

- Большой диапазон мощности, от менее чем 10 ватт до более чем 20 000 ватт.
- Высокое качество луча, M² от 1.1 до 5.0 (значения К от 0.9 до 0.2; произведение параметров луча от 4 до 17 миллиметров миллирадиан).
- Возможность выбора режимов работы: непрерывного или импульсного.
- Технологическая надежность за счет высокой стабильности мощности.
- Применение CO₂-лазера для широкого круга задач благодаря возможности подстройки величины и характеристики изменения (импульсный режим) мощности.
- Равномерная обработка заготовок за счет равномерного распределения интенсивности излучения в поперечном сечении и высокой стабильности мод, т. е. стабильного распределения интенсивности в лазерном луче.
- Низкий расход энергии благодаря высокому квантовому КПД ок. 30 %.
- Компактность конструкции, допускающая простую интеграцию CO₂-лазеров в существующие модели станков.



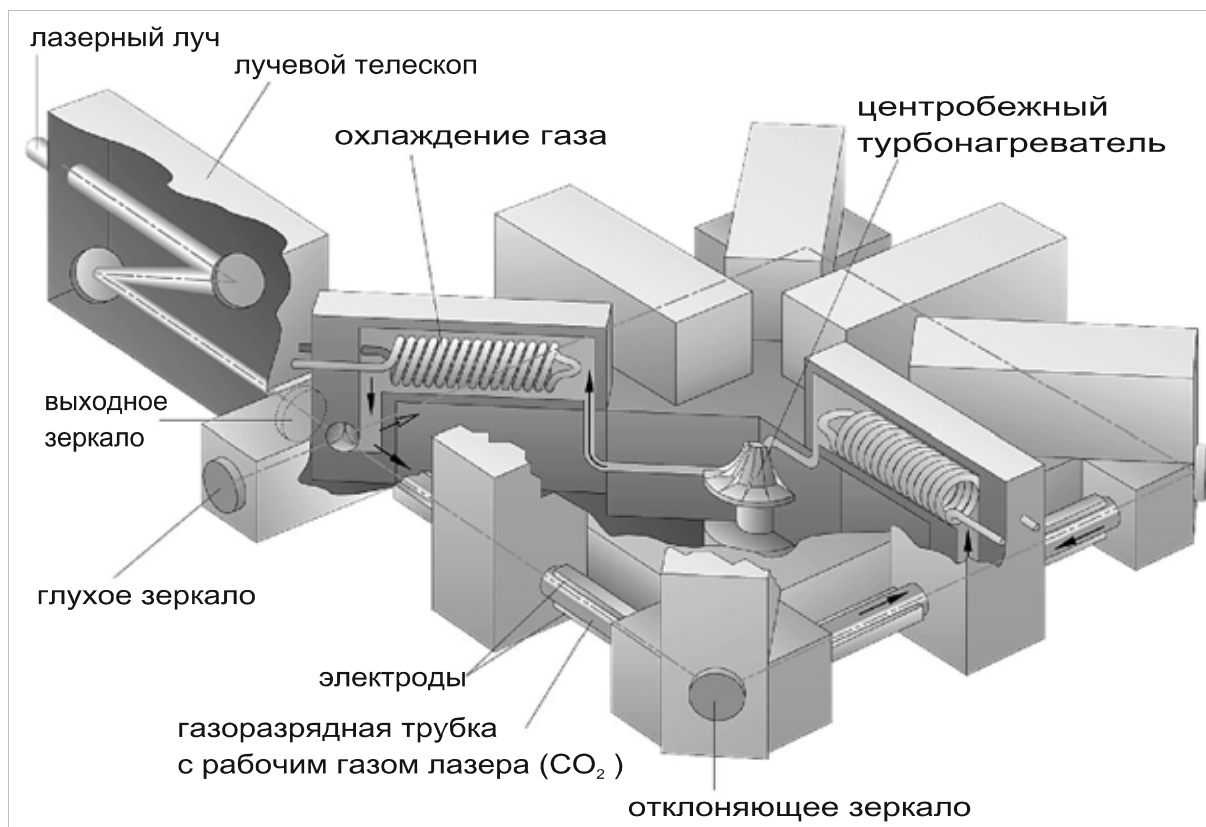
Пример CO₂-лазера

Рис. 48029

2. Компактная конструкция CO₂-лазера

Характеристики

- Сворачивание резонатора.
- Интеграция системы циркуляции лазерного газа.
- Интеграция системы охлаждения лазерного газа.



CO₂-лазер с лучевым телескопом

Рис. 24346ru

Преимущества

- Высокая механическая устойчивость.
- Небольшой вес.
- Небольшая занимаемая площадь.

3. Две концепции конструкции CO₂ лазеров

В данном разделе представлены 2 концепции конструкции CO₂-лазеров. В обеих накачка осуществляется посредством высокочастотного переменного тока. Однако, системы охлаждения и формы резонаторов различны.

3.1 Проточные CO₂-лазеры

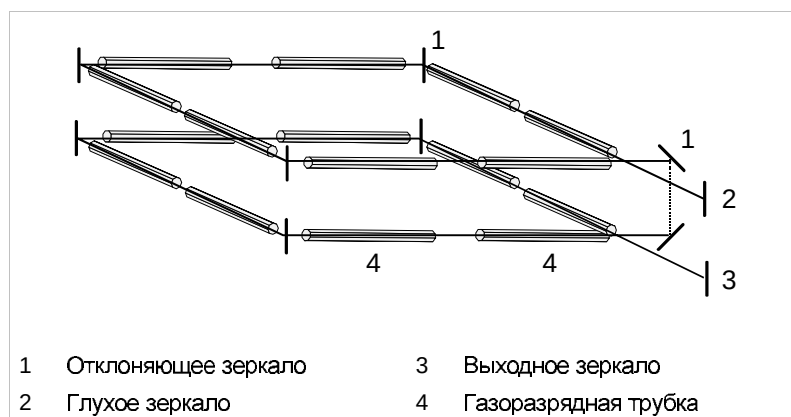
Квадратная конструкция

Проточные CO₂-лазеры фирмы TRUMPF имеют квадратную конструкцию. За счет этого они компактны, прочны и надежны и - в зависимости от модификации - генерируют лазерное излучение мощностью до 20 000 Вт.

Разрядный промежуток состоит из наполненных лазерным газом трубок из кварцевого стекла. Снаружи к трубкам прикреплены электроды, которые бесконтактно передают лазерному газу энергию возбуждения. Для создания многокиловаттного лазерного излучения длина разрядного промежутка должна составлять множество метров. Чтобы, несмотря на это, достичь компактных габаритных размеров, газоразрядные трубки сворачивают и располагают, например, квадратом, а при высоких мощностях лазеров - даже на двух уровнях. Отклоняющие зеркала отражают лазерный луч по углам квадрата и оптически соединяют разрядные промежутки. Дополняют конструкцию резонатора глухое и выходное зеркало.

Свернутый резонатор

Изменение направления луча также называют "сворачиванием", а резонатор в таком случае - "свернутым".



Свернутый квадратом резонатор с двумя разрядными уровнями

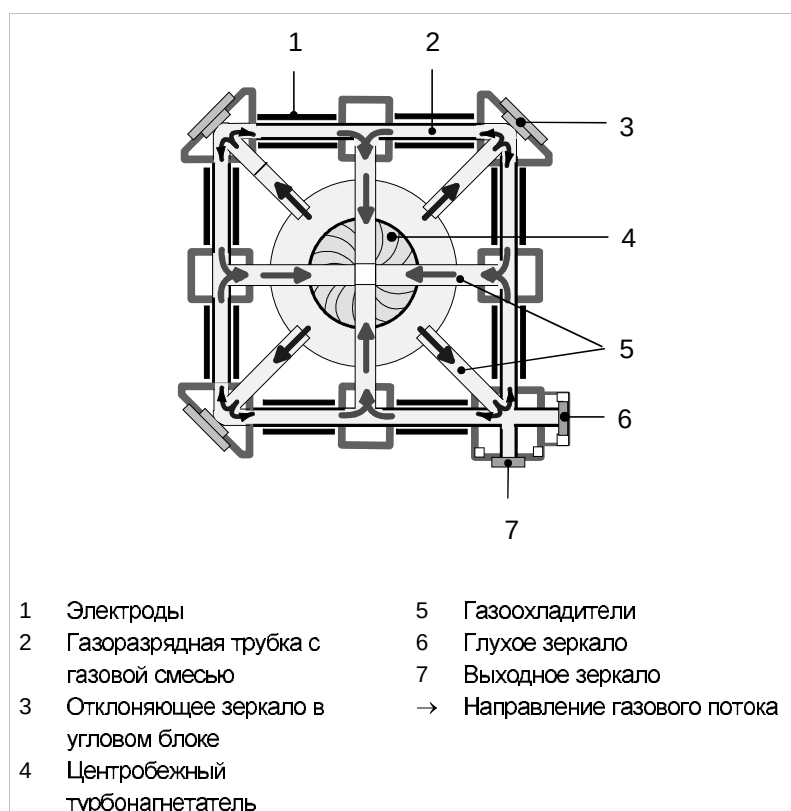
Рис. 24230

Преимущества симметричной конструкции:

- Минимальная чувствительность к изменениям температуры.
- Симметричное движение газа / распределение электро-энергии для достижения максимальной мощности и стабильности излучения.
- Отличное качество луча.

Центробежный турбонагнетатель

В центре источника излучения на магнитном подшипнике установлен центробежный турбонагнетатель. Он создает постоянную циркуляцию лазерного газа. Газ устремляется в газоразрядные трубки в углах квадрата и затем снова отсасывается из них в середине каждой стороны. В подводящих и отводящих камерах он соприкасается с охлаждаемыми водой теплообменниками и охлаждается. Приготовление лазерного газа происходит путем смешивания двуокиси углерода, гелия и азота в газосмесителе. Необходимое рабочее давление создается вакуумным насосом. Он поддерживает давление газа на уровне приблизительно 100 гектопаскаль.



Направление газового потока в CO₂-лазере

Рис. 25238

Преимущества быстропроточных лазеров

- **Более высокая мощность излучения:** При прочих равных исходных условиях больший проток газа в единицу времени позволяет достигать более высокой мощности лазерного излучения.
- **Меньшее охлаждение газа:** В результате увеличения скорости потока сокращается время пребывания газа в разрядном промежутке. Газ меньше нагревается и, следовательно, требует меньшего охлаждения.

Характеристики луча

Выходящий лазерный луч имеет круглое поперечное сечение и высокие качественные характеристики. Генерация мод зависит от диаметра кварцевых трубок в резонаторе, а также формы зеркал: возможно формирование основной, кольцевой либо комплексной мод.

3.2 CO₂-лазеры с диффузионным охлаждением

Лазеры с диффузионным охлаждением, называемые также коаксиальными лазерами, в этом виде присутствуют на рынке с 2003 года. Они всегда применяются в тех случаях, когда при среднем уровне мощности и высоком качестве луча требуется компактность. Пример тому - комбинированные станки с функциями вырубного прессы и лазерной обработки. В них коаксиальный лазер размещается на станине.

Газовый баллон с премиксом

Баллон с заранее смешанным лазерным газом через клапан постоянно соединен с резонатором. Не реже, чем через каждые 72 часа в резонаторе автоматически происходит замена газа. Так как заполняемый объем резонатора очень мал, встроенного в корпус газового баллона хватает приблизительно на 1.5 - 2 года.

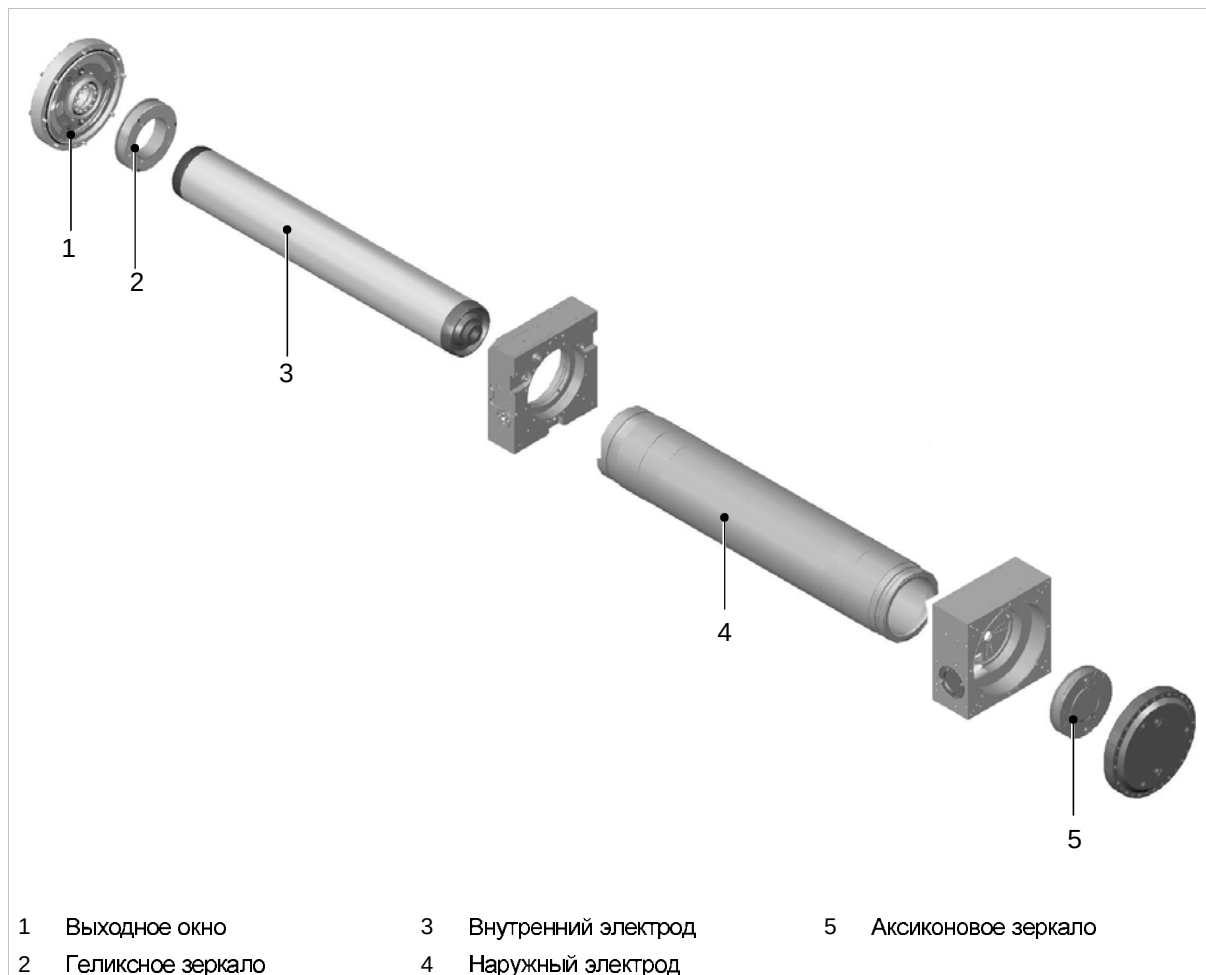
Диффузионное охлаждение

В CO₂-лазере с диффузионным охлаждением отсутствует циркуляция лазерного газа. Вместо этого тепло газа отводится через стенки резонатора (диффузионное охлаждение). Для эффективного теплоотвода расстояние между стенками резонатора должно быть как можно меньше, а площадь стенок - как можно больше. При этом необходим определенный объем газа, позволяющий создавать высокомогущное лазерное излучение.

Компактная конструкция

В коаксиальном лазере сочетаются компактность конструкции и мощности киловаттного диапазона.

Его резонатор состоит из 2-х соосно расположенных одна в другой металлических трубок с водяным охлаждением. Они одновременно выполняют роль высокочастотных электродов. Пространство между трубками служит разрядным промежутком, в котором находится лазерный газ.



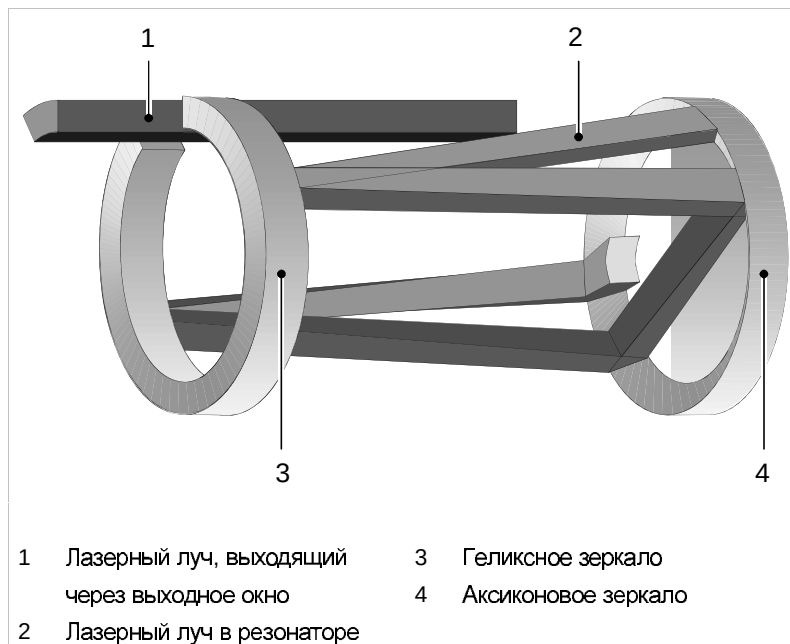
Конструкция резонатора

Рис. 37388

С задней стороны находится глухое, так называемое аксиновое зеркало. Его кольцеобразная отражающая поверхность наклонена под углом 45° к плоскости. Расположенные друг против друга отражающие сегменты образуют угол в 90° . Это означает, что падающий на зеркало лазерный луч отражается в направлении противоположного сегмента кольца и возвращается им обратно в пространство между трубками. Падающий и отраженный лучи проходят параллельно друг другу.

С другой стороны резонатора луч падает на геликсное зеркало. Оно также кольцеобразной формы, имеет наклоненную отражающую поверхность и отверстие, через которое часть поля излучения выходит в виде лазерного луча. За счет наклона геликсного зеркала луч отражается под большим углом и начинает зигзагообразно перемещаться в разных направлениях. Создается стабильное поле излучения.

Ход луча в коаксиальном лазере



Ход луча в резонаторе

Рис. 37401

Характеристики луча

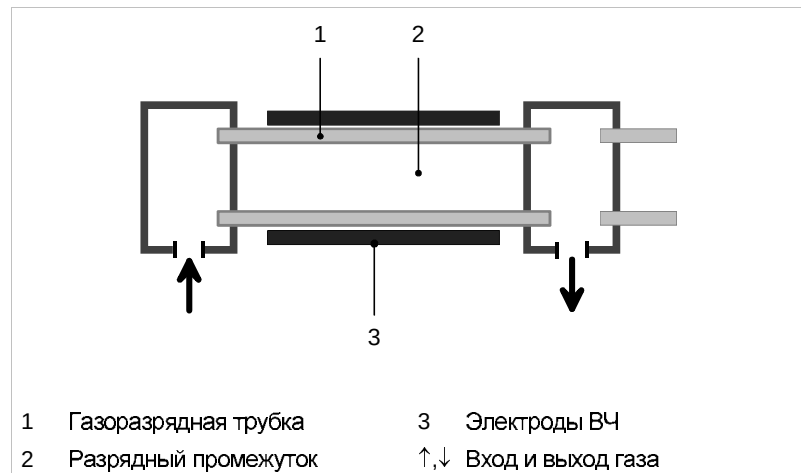
Образуемый луч имеет поперечное сечение кругового сегмента и не может направляться и фокусироваться так, как это требуется при обработке материалов. Поэтому еще внутри источника излучения он формируется при помощи множества цилиндрических выпуклых зеркал. Когда луч покидает источник излучения, он симметричен и имеет высокие качественные характеристики, M^2 равный 1.1 (К равный 0.9).

Для полного описания моды луча необходимо рассматривать два направления в резонаторе: стабильное и нестабильное. В стабильном направлении, между стенками трубок, образуется гауссова мода. В нестабильном направлении, вокруг оси, мода не имеет четко выраженной формы. При выстреле мод несформированного луча наблюдается неупорядоченное образование.

4. Возбуждение

В CO₂-лазерах возбуждение лазерного газа осуществляется за счет электрической энергии. Эту энергию подают генераторы высокой частоты. Они вырабатывают высокочастотное напряжение переменного тока.

Преимущество высокочастотного возбуждения состоит в том, что электроды, передающие энергию лазерному газу, располагаются вне резонатора и, следовательно, не подвергаются износу. Высокие частоты необходимы, чтобы между электродами проходил ток. Его прохождение усиливается с возрастанием частоты. Стандартными являются 13.56 МГц для проточных лазеров и 27.12 МГц для лазеров с диффузионным охлаждением.



Высокочастотное возбуждение

Рис. 25239

Отличия лазерного генератора от прочих генераторов

- Возможность быстрой перемены нагрузки, так как в разных рабочих состояниях ему требуется разное количество энергии.
- Способность работать в импульсном режиме, поскольку так регулируется мощность лазера.
- Возможность приведения в действие через систему управления лазером.

Преимущества возбуждения ВЧ

- **Стабильность мощности:** Возникающий гомогенный газовый разряд служит предпосылкой стабильности мощности лазера.
- **Меньший расход газа:** Для возбуждения газовой смеси требуется меньшее напряжение, чем при подаче энергии от источника постоянного тока. В связи с этим уменьшается распад CO₂ и, следовательно, сокращается расход газа. Одновременно снижается опасность поражения электрическим током.
- **Отсутствие износа электродов:** Так как электроды не имеют непосредственного контакта с активной средой лазера и, следовательно, не подвержены воздействию газового разряда, отпадает проблема износа электродов. Кроме того, материал, из которого изготовлены электроды, не загрязняет резонатор (зеркала, стеклянные трубки), благодаря чему сокращаются затраты на техобслуживание и расход газа.

Другим вариантом является подача напряжения постоянного тока. При возбуждении постоянным током электроды находятся внутри резонатора. На них подается высокое постоянное напряжение. Недостаток: износ электродов.

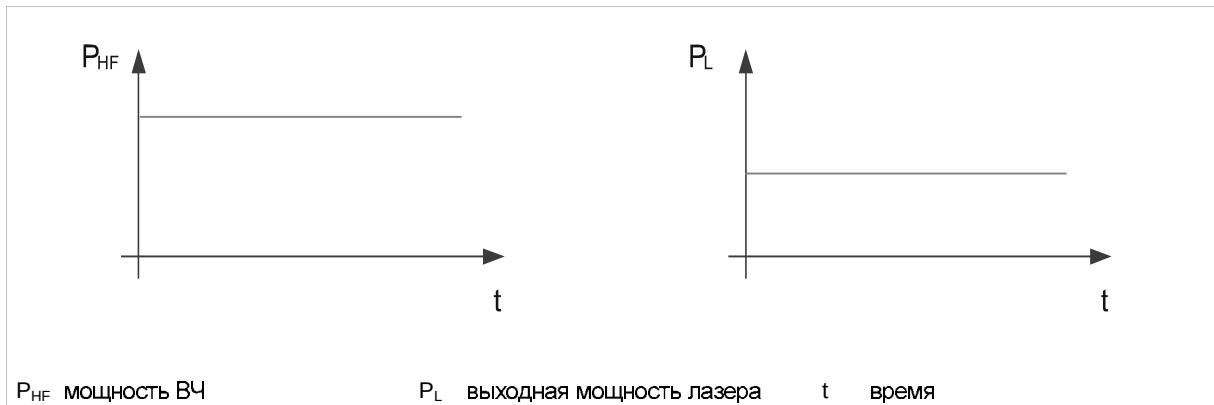
5. Режимы работы

Режимы работы определяются видами выполняемых операций. Например, для сварки длинных швов с глубоким проплавлением требуется непрерывная генерация лазерного луча. Для точечной сварки достаточно коротких импульсов. Применяются следующие режимы работы:

- Непрерывный режим (режим с незатухающей гармонической волной).
- Импульсный режим.
- Ступенчатый режим.

Непрерывный режим

В непрерывном режиме лазерный луч генерируется непрерывно, с постоянной подачей энергии. Лазер испускает излучение постоянной мощности.



Непрерывный режим: временные характеристики мощности возбуждения и выходной мощности лазера

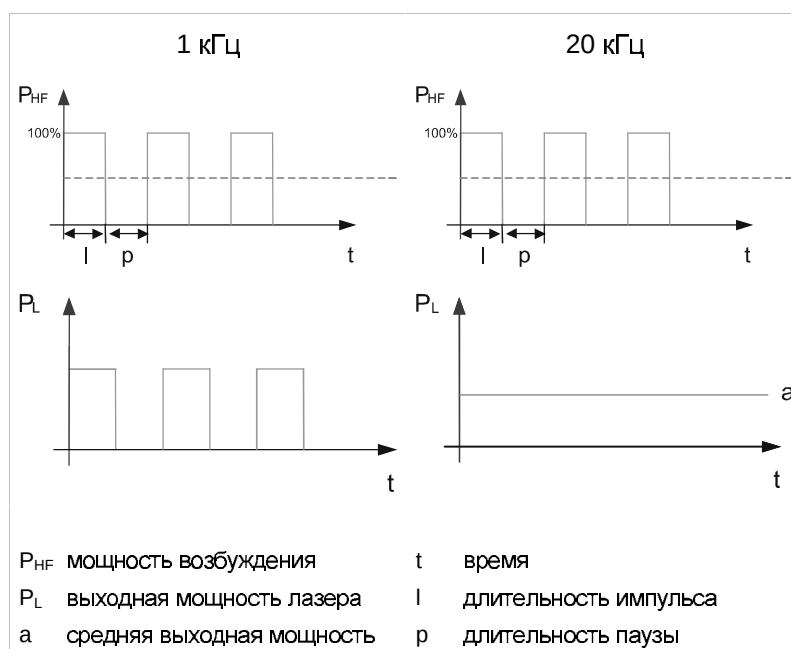
Рис. 25240ru

Импульсный режим

В импульсном режиме активная среда возбуждается и генерирует лазерное излучение короткими импульсами. Фазы возбуждения (длительность импульса) и паузы (длительность паузы) сменяются через короткие интервалы времени. При этом генерируются импульсы максимальной мощности. Средняя выходная мощность лазера регулируется соотношением длительности импульсов и пауз.

Пример:

Выходная мощность составляет 3000 Вт. Лазер вырабатывает 1000 импульсов в секунду, длительность каждого из которых составляет 0.0005 секунды. Пауза между двумя импульсами, когда отсутствует генерация лазерного излучения, составляет 0.0005 секунды. Средняя выходная мощность составляет в таком случае 1500 Вт.



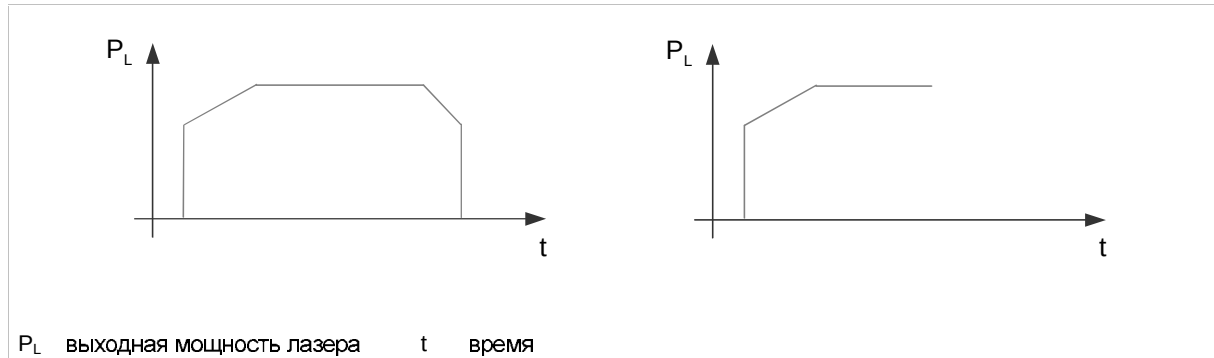
Импульсный режим: временные характеристики мощности возбуждения и выходной мощности лазера Рис. 48254-48256ru

Лазерный газ обладает способностью кратковременно накапливать возбуждающую энергию. Если частота возбуждения высока (ок. 20 кГц), энергии достаточно, чтобы перекрывались паузы и генерировался лазерный луч постоянной мощности. При низкой частоте возбуждения (1 кГц) энергии недостаточно, и генерируются отдельные импульсы.

Таким образом хорошо регулируются величина и характеристика изменения выходной мощности лазера, а импульсы точно подстраиваются под процесс обработки. Это свойство используется, прежде всего, при очень низких значениях мощности лазера. Так, например, в металлических листах могут вырезаться очень мелкие контуры или филигранные перемычки, диаметр и ширина которых меньше толщины листа.

Ступенчатый режим

При ступенчатом режиме работы мощность лазера непрерывно повышается в течение программируемого интервала времени, а затем снова понижается. Амплитуда возбуждения всегда остается на уровне 100 %. При этом выходная мощность лазера варьируется путем изменения соотношения длительности импульсов и пауз.



Слева: ступенчатый режим при лазерной сварке
 Справа: ступенчатый режим при прорезании

Рис. 25242ru

То, насколько быстро должна повышаться и через какой промежуток времени должна снова понижаться выходная мощность, может программироваться в так называемых ступенчатых циклах.

Ступенчатый режим - это важная функция системы управления лазерами TASC 3, используемая при сварке и резке, прежде всего, для цикла прорезания. В начале процесса мощность лазера медленно повышается. Когда начальное отверстие образовано, ступенчатый цикл завершается.

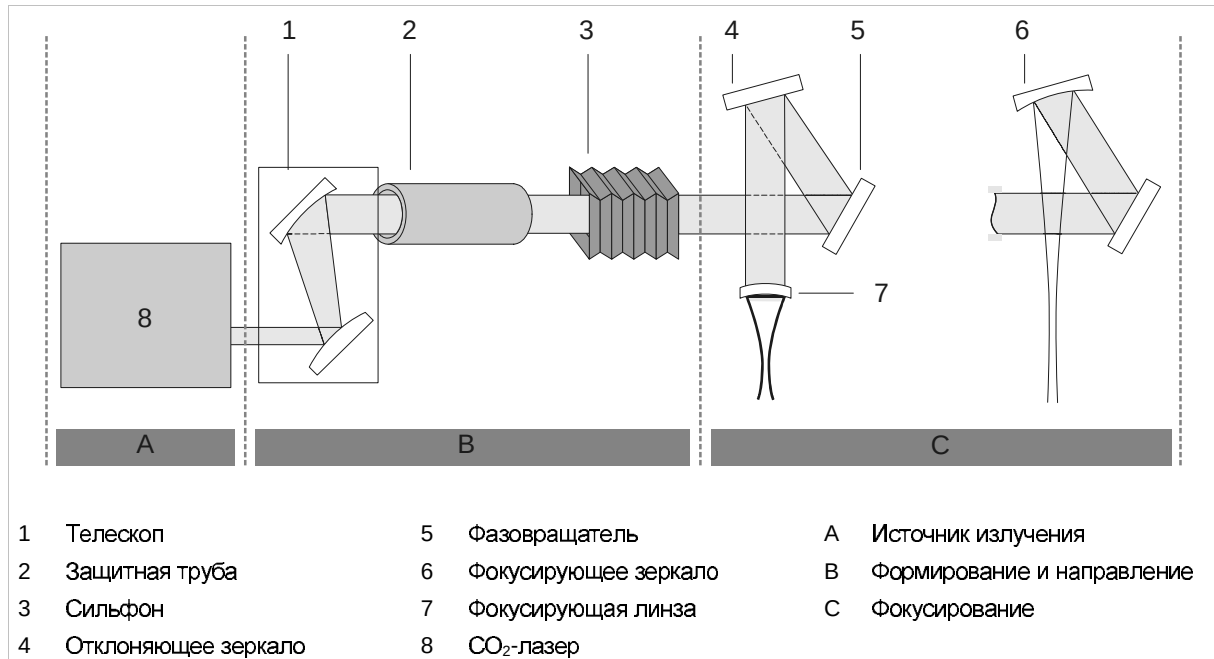
Глава 3

Формирование и проводка луча

1.	Компоненты.....	3-2
2.	Зеркала.....	3-3
3.	Лучевой телескоп.....	3-5
3.1	Адаптивные зеркала	3-7
3.2	Передвижной держатель зеркал.....	3-8
3.3	Смещение фокуса	3-8
4.	Работа на нескольких участках.....	3-9
4.1	Делители луча	3-9
4.2	Отклонители луча.....	3-10

1. Компоненты

Между источником излучения и заготовкой луч CO_2 -лазера, как правило, расширяется, затем свободно проходит внутри труб или сильфонов и, наконец, фокусируется зеркалами либо линзами.



Путь лазерного луча от источника излучения до заготовки

Рис. 48004

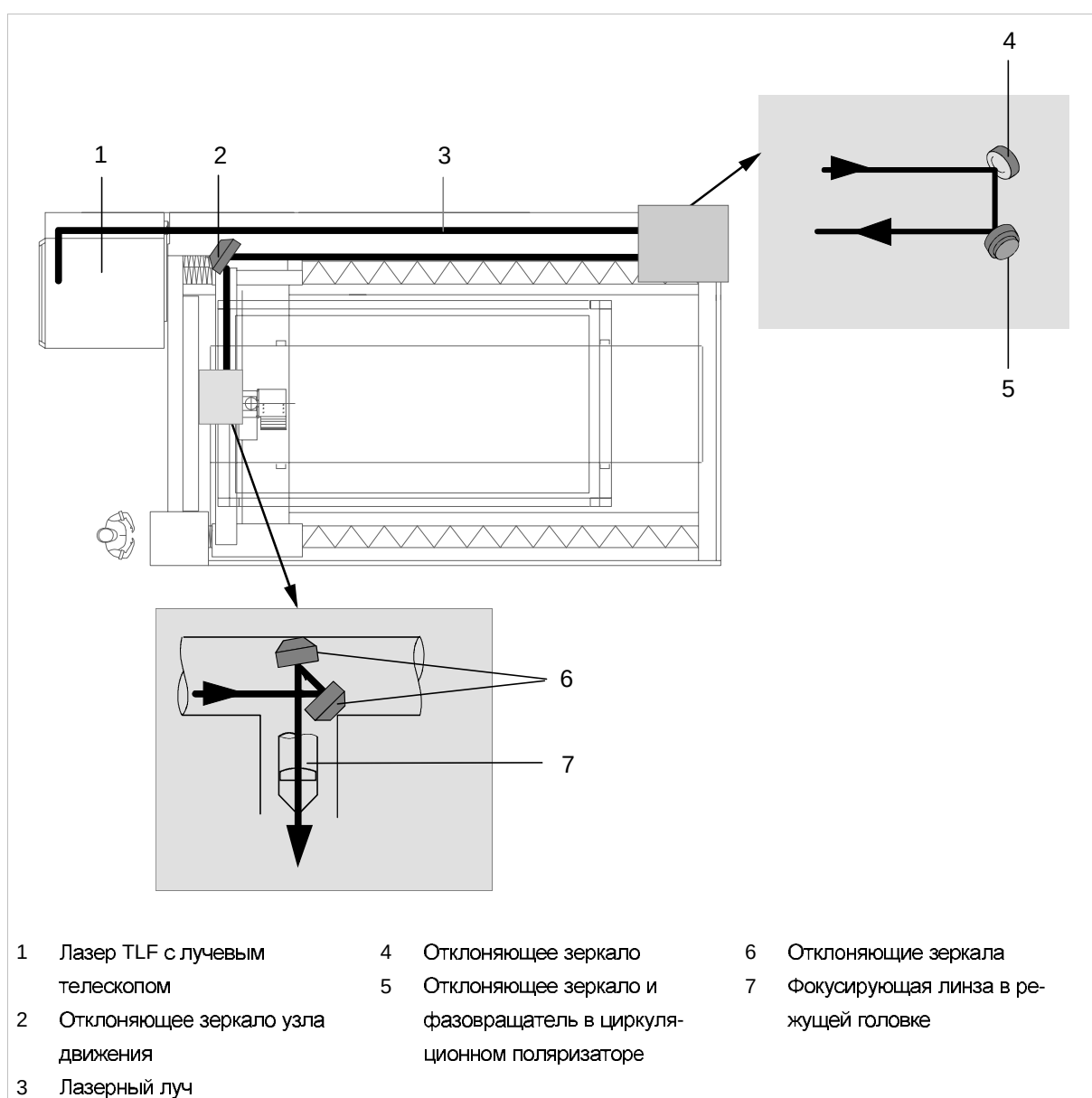
То, какие компоненты и материалы применяются, зависит от длины волны лазерного луча. Кварцевое стекло не может использоваться, так как оно 100 % поглощает излучение CO_2 -лазера. Поэтому в стекловолокне могут проводиться лучи твердотельных, но не CO_2 -лазеров.

2. Зеркала

Отражаясь от зеркал, лазерный луч проводится к участку обработки по неподвижно закрепленным защитным трубам.

Термическое рассеяние

В трубах и сильфонах используется среда, которая не поглощает, не рассеивает и не деформирует лазерный луч. Как правило, это азот или очищенный воздух. Загрязняющие газ примеси поглощают лазерное излучение и приводят к так называемому термическому рассеянию. Газ нагревается, и на пути луча образуется термическая газовая линза. В результате этого происходит расширение лазерного луча и, следовательно, изменение параметров его расходимости и положения фокуса.



Проводка луча на примере TruLaser 3030

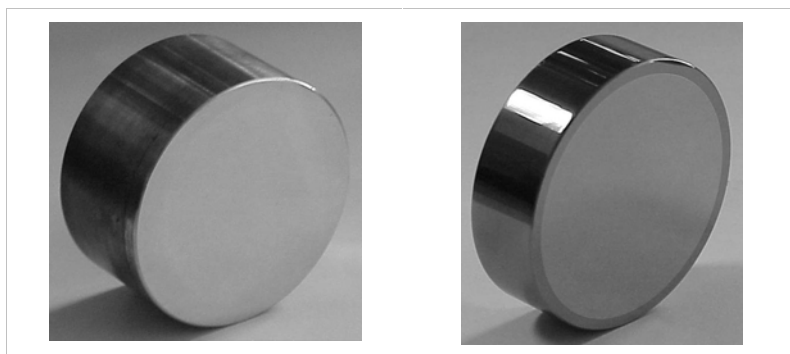
Рис. 25236

Медные зеркала Медные зеркала обладают высокой отражательной способностью и теплопроводностью. Их недостатком является значительное тепловое расширение.

Кремниевые зеркала По сравнению с медными, кремниевые зеркала обладают более низкой отражательной способностью и теплопроводностью. Зато они отличаются значительно меньшим тепловым расширением, что, в свою очередь, обеспечивает их меньшую термическую деформацию.

Во избежание нагревания и, как следствия, разрушения зеркала также должны поглощать как можно меньше излучения. Непокрытые медные зеркала поглощают 0.6 - 1.1 % излучения. Применение на них диэлектрических покрытий (специальных отклонителей) позволяет минимизировать уровень поглощения до 0.1 %. При этом на зеркала сначала наносится слой с высокой отражательной способностью, а затем - антиотражающий слой покрытия.

Загрязнение поверхностей зеркал также усиливает поглощение ими лазерного излучения. Из-за этого зеркала нагреваются и деформируются. Это, в свою очередь, также влечет за собой изменение направления распространения и смещение фокуса лазерного луча.



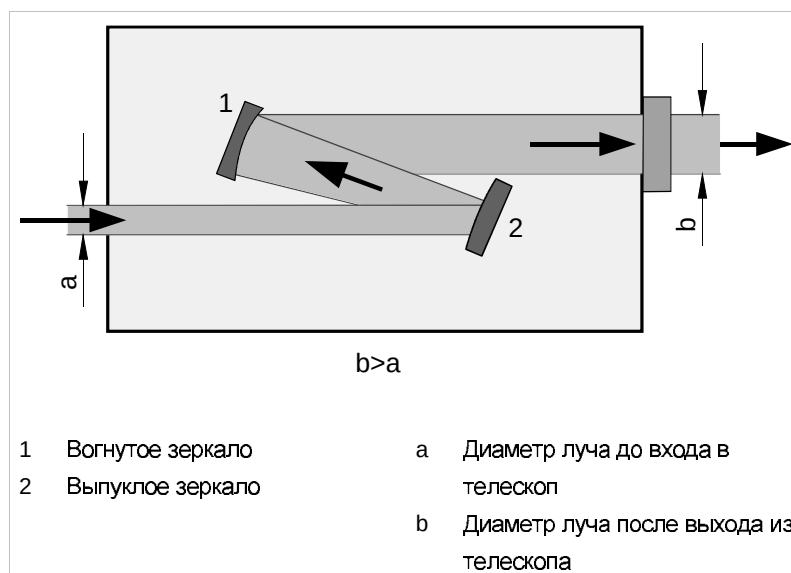
Внешние отклоняющие зеркала: слева - из меди, Рис. 25244, 25245
справа - из кремния

Многослойные покрытия Так называемые многослойные покрытия состоят из множества слоев и выполняют роль фазовращателей. Они обладают степенью поглощения 2 % и очень чувствительны.

3. Лучевой телескоп

Лучевые телескопы используются в станках с подвижной оптикой, чтобы проводить лазерный луч на большие расстояния, сохраняя его почти параллельным. Кроме того, за счет них уменьшается воздействие пиковой интенсивности луча на проводящие его компоненты, в результате чего они меньше нагреваются, и фокус луча не слишком сильно смещается.

Лазерный луч проходит через лучевой телескоп сразу после выхода из источника излучения. В телескопе расположены два зеркала, выпуклое и вогнутое (Рис. 24223). Выпуклое зеркало расширяет лазерный луч до определенного размера. Вогнутое зеркало ориентирует его снова параллельно. Распространенными являются телескопы, увеличивающие диаметр луча в 1.5 - 2 раза.



Схематично: расширение луча в лучевом телескопе Рис. 24223

Лучевой телескоп применяется при мощностях лазера до 3.2 кВт.

Внешний лучевой телескоп

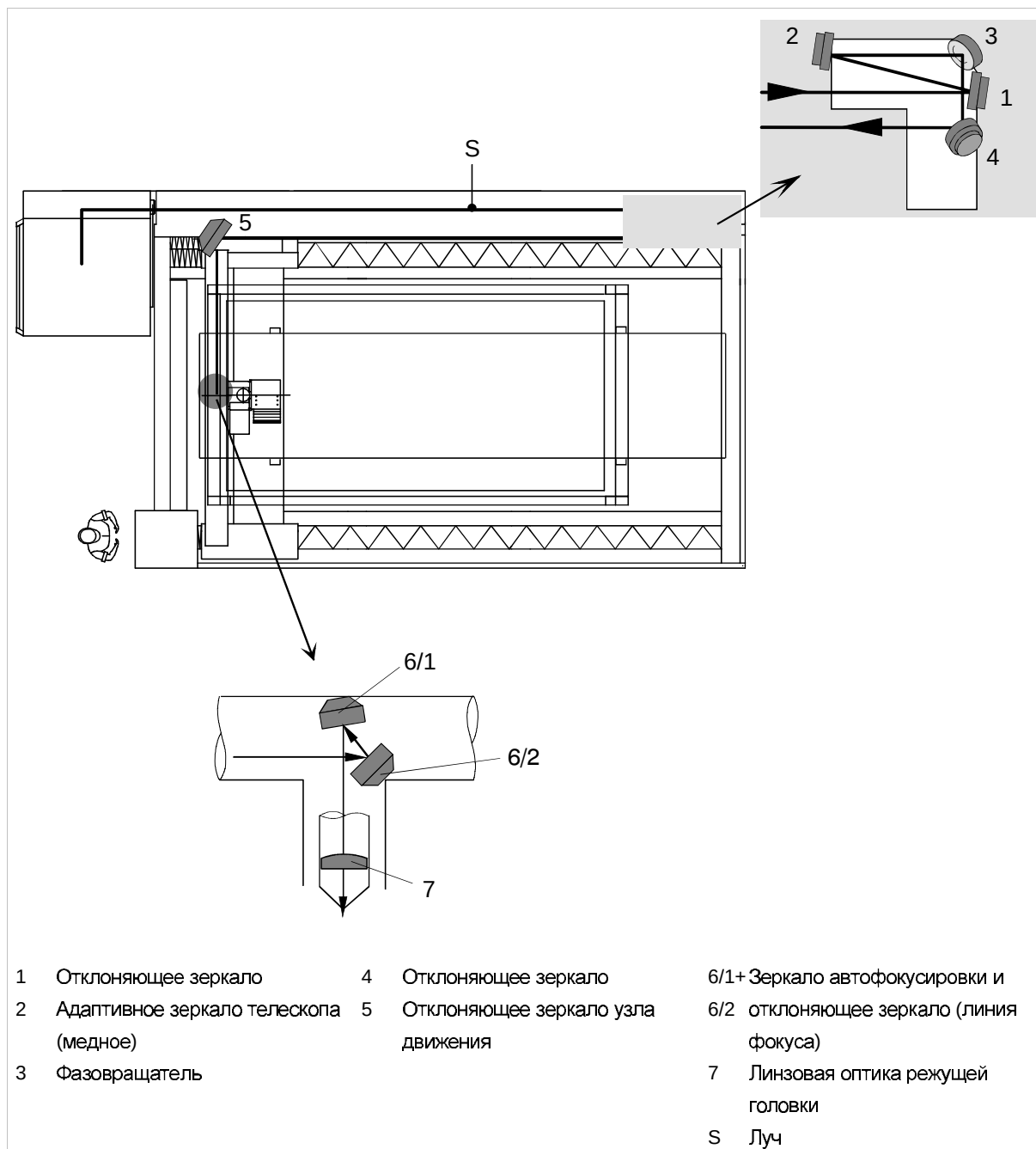
Внешний лучевой телескоп, как правило, применяется с лазерами 4 кВт. В связи с повышенной мощностью в целях обеспечения высокого качества луча к конструкции телескопа предъявляются иные требования.

Лазерный луч покидает лазер и сразу входит в расположенный на станке телескоп. Сначала он проходит адаптивное зеркало, которое его расширяет. Затем отклоняющими зеркалами он направляется на зеркало автофокусировки узла движения.

С помощью зеркала автофокусировки угол расхождения лазерного луча изменяется таким образом, что становится возможным систематическое перемещение фокуса луча вверх либо вниз.

Функции зеркала:

- Автоматическое согласование положения фокуса с видом и толщиной материала.
- Компенсирование смещений фокуса за счет изменения длины луча в рабочей зоне.

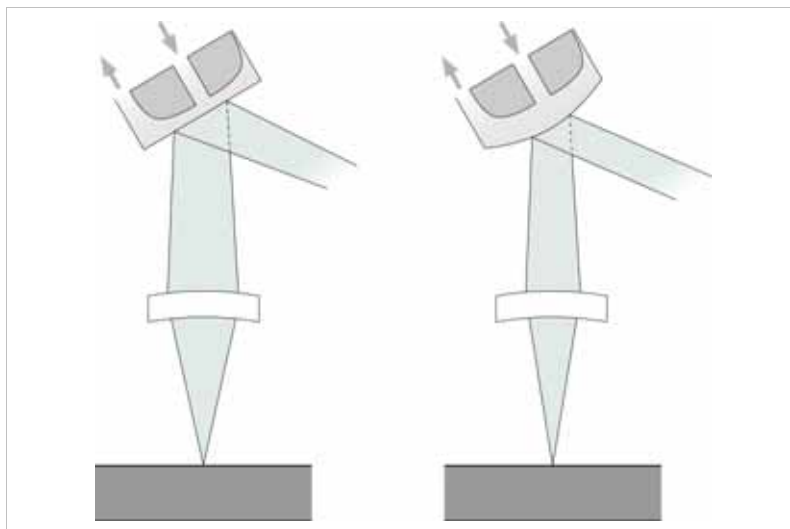


Проводка луча в TruLaser 3030/3040/3060 с TruFlow 4000

Рис. 19061

3.1 Адаптивные зеркала

Адаптивные зеркала используются для целенаправленного изменения расхождения лазерного луча и, тем самым, регулирования положения фокуса. Их кривизна может изменяться за счет давления охлаждающей воды позади отражающей поверхности.



Давление воды выгибает адаптивное зеркало наружу

Рис. 48007

Когда давление воды повышается, зеркало выгибается наружу. Степень такого выгибания составляет микроны. Однако этого достаточно для изменения расхождения лазерного луча настолько, чтобы смещение его фокуса относительно заготовки составляло до 12 мм. Таким образом, может осуществляться как компенсирование смещений фокуса, так и подстройка положения фокуса под различную толщину материала.

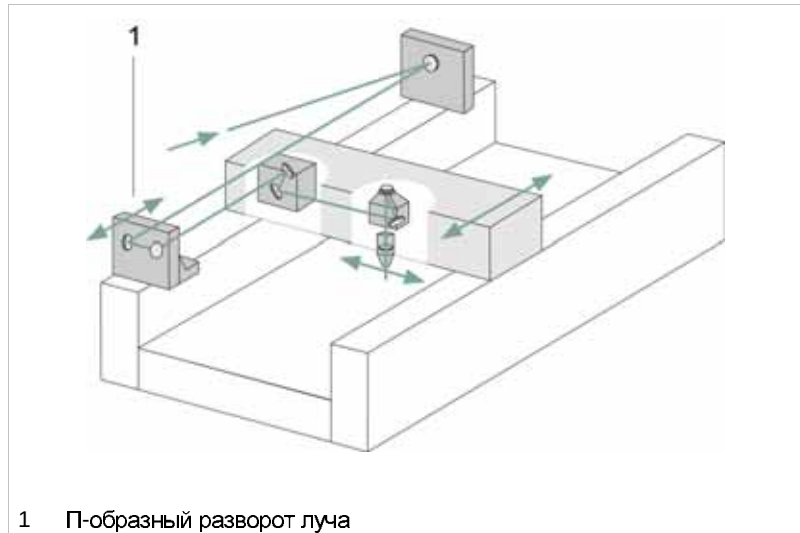
Адаптивные зеркала используются в различных точках оптического тракта:

- В лучевом телескопе для сохранения постоянного диаметра фокуса.
- В качестве первого зеркала, регулирующего диаметр луча.
- В качестве последнего отклоняющего зеркала перед оптикой узла обработки для подстройки положения фокуса.

3.2 Передвижной держатель зеркал

Передвижной держатель зеркал обеспечивает сохранение одинаковых характеристик луча во всей рабочей зоне станка.

Два отклоняющих зеркала, передвигаемых в зависимости от положения режущей головки в рабочей зоне, обеспечивают всегда примерно одинаковую длину хода луча.



Ход луча в планшетной установке лазерной резки

Рис. 48008

Передвижной держатель зеркал, как правило, применяется в лазерах мощностью 5 и 6 кВт.

3.3 Смещение фокуса

Изменение расхождения

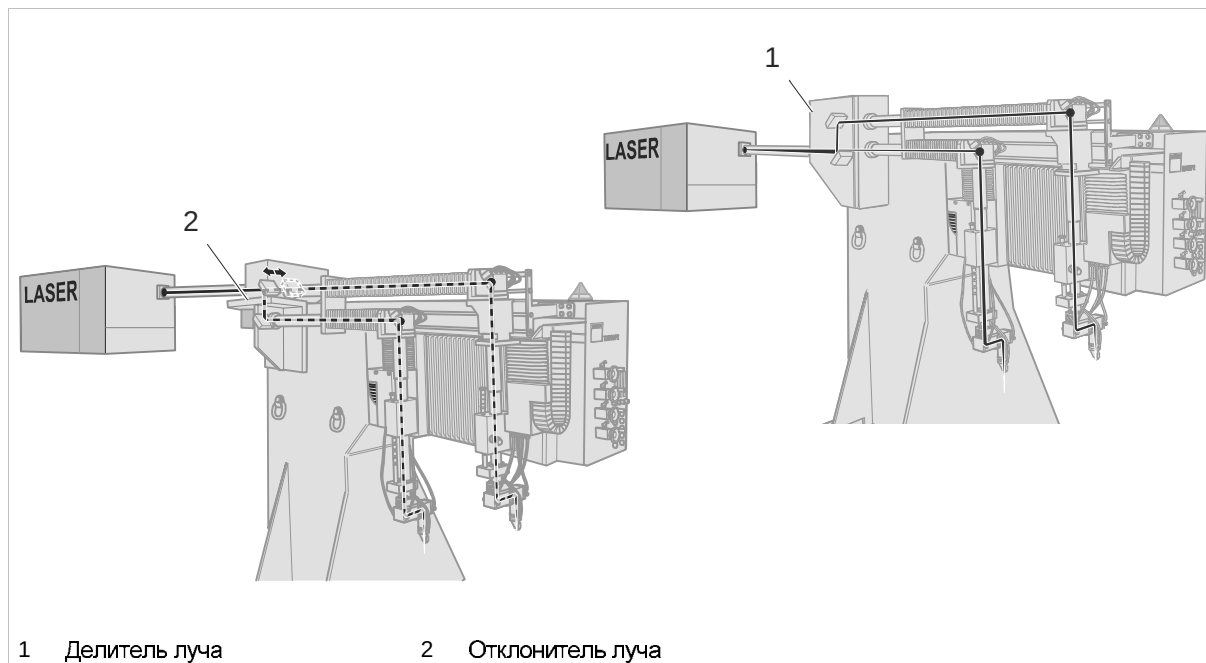
Смещение фокуса происходит из-за изменения расхождения луча. Для последнего, в свою очередь, существуют 2 причины:

- Изменение расстояния между "перетяжкой" луча и оптическим элементом. Оно имеет место в установках лазерной резки с "плавающей" оптикой.
- Нагревание оптических элементов, таких как выходное или отклоняющие зеркала, и связанное с ним дополнительное расширение лазерного луча.

Мерой предотвращения этого явления служит применение адаптивных зеркал и передвижного держателя.

4. Работа на нескольких участках

С помощью делителей лазерный луч может разделяться и одновременно проводиться к двум или более рабочим участкам.



Ход луча в TruLaser Cell 1100 версии P2

Рис. 47182

4.1 Делители луча

Делители луча - это отклоняющие зеркала, которые либо вводятся в луч по линейной направляющей и полностью или частично (в зависимости от положения) отражают его под углом 90 градусов (отражение), либо имеют делящее луч отражающее покрытие. При соприкосновении с такими частично пропускающими зеркалами часть лазерного излучения проходит сквозь них прямолинейно (пропускание), а другая часть, напротив, отражается под углом 90 градусов. При этом деление луча определяется коэффициентом светопропускания зеркала.

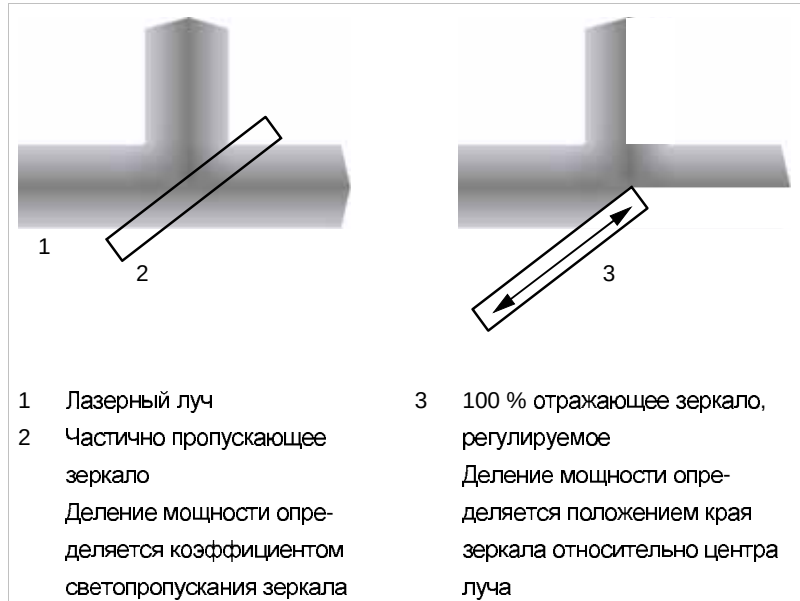


Рис. 47282

После деления в лазерных лучах сохраняется гауссово распределение с максимумом интенсивности в центре. Однако, в результате деления с пропусканием интенсивность лучей, то есть их мощность на см^2 , снижается соразмерно соотношению при делении.

4.2 Отклонители луча

Отклонители оснащены подвижным зеркалом, полностью изменяющим направление хода лазерного луча. В зависимости от положения отклоняющего зеркала лазерный луч направляется к тому или иному рабочему участку.

Когда отклонитель луча не работает, его зеркало располагается вне оптического тракта. Когда отклонитель приводится в действие, зеркало устанавливается на пути луча и полностью отклоняет его в необходимом направлении.

Глава 4

Компоненты для фокусирования

1.	Основы.....	4-2
2.	Оптические устройства обработки.....	4-6
2.1	Линзовые оптические системы	4-7
2.2	Зеркальные оптические системы.....	4-8
2.3	Сканирующие оптические системы	4-10
2.4	Система датчиков контроля	4-12
	Система датчиков контроля линзы.....	4-12
	Система датчиков контроля выходного зеркала (OMS)	4-12
2.5	Поляризация	4-13

1. Основы

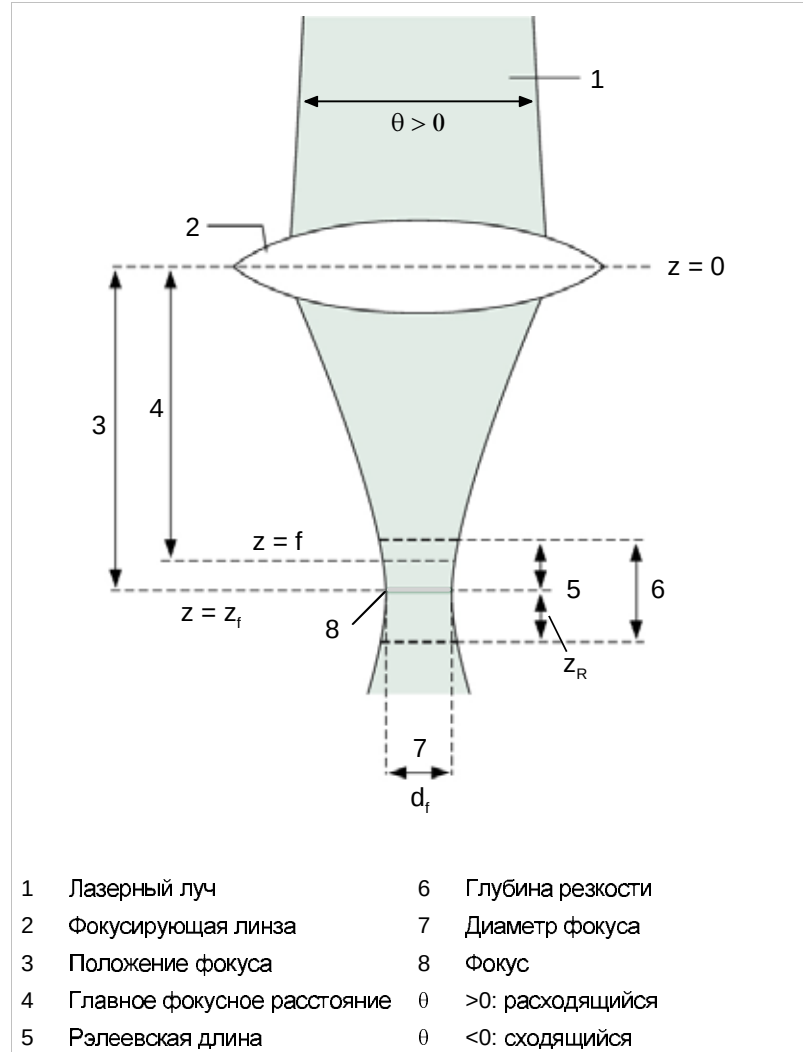
В конце оптического тракта лазерный луч проходит через оптические устройства, предназначенные для обработки материалов. Здесь параметры луча, такие как диаметр фокуса, глубина резкости, сопряженное фокусное расстояние и плотность мощности, приводятся в соответствие с различными способами обработки. После этого может быть начат процесс обработки материала.

Поскольку существует множество технологий обработки, применяются различные виды оптических устройств. Во всех них используются зеркала или линзы, фокусирующие лазерный луч. Их конструкция зависит от технологии обработки и типа станка, на который они устанавливаются.

Физические принципы

При фокусировании лазерный луч сужается. Его участок с самым малым диаметром является фокусом, который также часто называют фокальным пятном. Здесь плотность мощности луча увеличивается на несколько десятичных порядков, и теперь ее хватает, чтобы обрабатывать материал.

Зеркала или линзы фокусируют лазерный луч, рассеивая и сужая его путем отражения либо преломления.



Принцип фокусирования

Рис. 47279ru

Параметры Диаметр фокуса

Чем меньше диаметр фокуса, то есть, чем сильнее сфокусирован луч, тем выше в нем плотность мощности и тем более тонко может обрабатываться материал. Кроме того, обеспечивается высокая скорость процесса обработки.

Рэлеевская длина

После схождения в фокусе луч снова расходится. Рэлеевская длина указывает, на каком расстоянии от фокуса пиковая интенсивность луча уменьшилась вдвое либо площадь поперечного сечения луча удвоилась.

$$I_{ZR} = I_z/2 \rightarrow r_{ZR} = \sqrt{2} \cdot r_F$$

r_{ZR}	Радиус луча на расстоянии рэлеевской длины от фокуса	r_F	Радиус луча в фокусе
----------	---	-------	----------------------

Чем больше рэлеевская длина, тем меньше расхождение луча. Удвоенную рэлеевскую длину часто называют глубиной резкости. Большие значения рэлеевской длины требуются, например, при резке толстых листов металла.

Сопряженное фокусное расстояние

Сопряженное фокусное расстояние - это расстояние между центром линзы и фокусом. Оно приблизительно равно главному фокусному расстоянию. Чем больше сопряженное фокусное расстояние, тем больше удаление линзы от заготовки, так называемое рабочее расстояние.

Большие рабочие расстояния необходимы, прежде всего, при сварке с использованием сканирующей оптики.

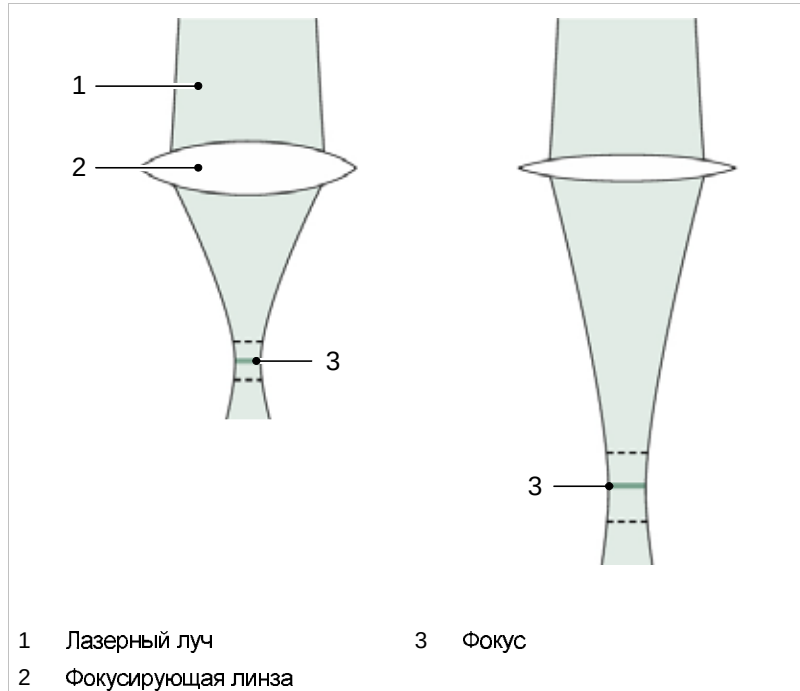
Преимущества больших рабочих расстояний:

- Минимальное загрязнение оптики.
- Улучшенная глубина резкости.
- Большее удобство доступа.

На значениях базовых параметров сказываются многие воздействующие факторы:

Главное фокусное расстояние

Главное фокусное расстояние линзы или фокусирующего зеркала - это расстояние между центром линзы или зеркалом и фокусом идеально параллельного луча. Чем меньше главное фокусное расстояние, тем сильнее фокусируется луч и тем меньше диаметр фокуса, рэлеевская длина и сопряженное фокусное расстояние.

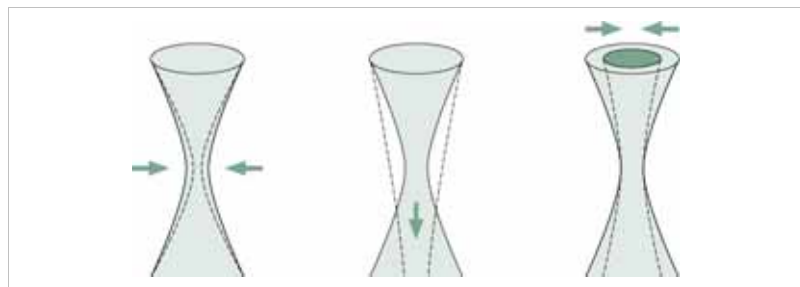


Меньшее главное фокусное расстояние (слева)

Рис. 47280

Качество луча

Качество луча влияет на минимально возможный диаметр фокуса и рэлеевскую длину. Чем выше качество луча, тем меньшие величины диаметра фокуса могут быть достигнуты. Кроме того, при одинаковом диаметре фокуса увеличивается рэлеевская длина.



Увеличение рабочего расстояния и уменьшение диаметра луча на линзе за счет повышения качества луча

Рис. 47281

Расходимость

Расходимость (угол раствора) лазерного луча сказывается на величине сопряженного фокусного расстояния. При положительных углах раствора сопряженное фокусное расстояние превышает главное фокусное расстояние. При отрицательном угле раствора (сходимость) сопряженное фокусное расстояние меньше главного фокусного расстояния.

Диаметр луча

Диаметр луча на линзе влияет на диаметр фокуса. Чем он больше, тем меньшим становится диаметр фокуса.

2. Оптические устройства обработки

В оптических устройствах обработки лазерный луч фокусируется линзами или зеркалами. Однако эти устройства выполняют и другие функции:

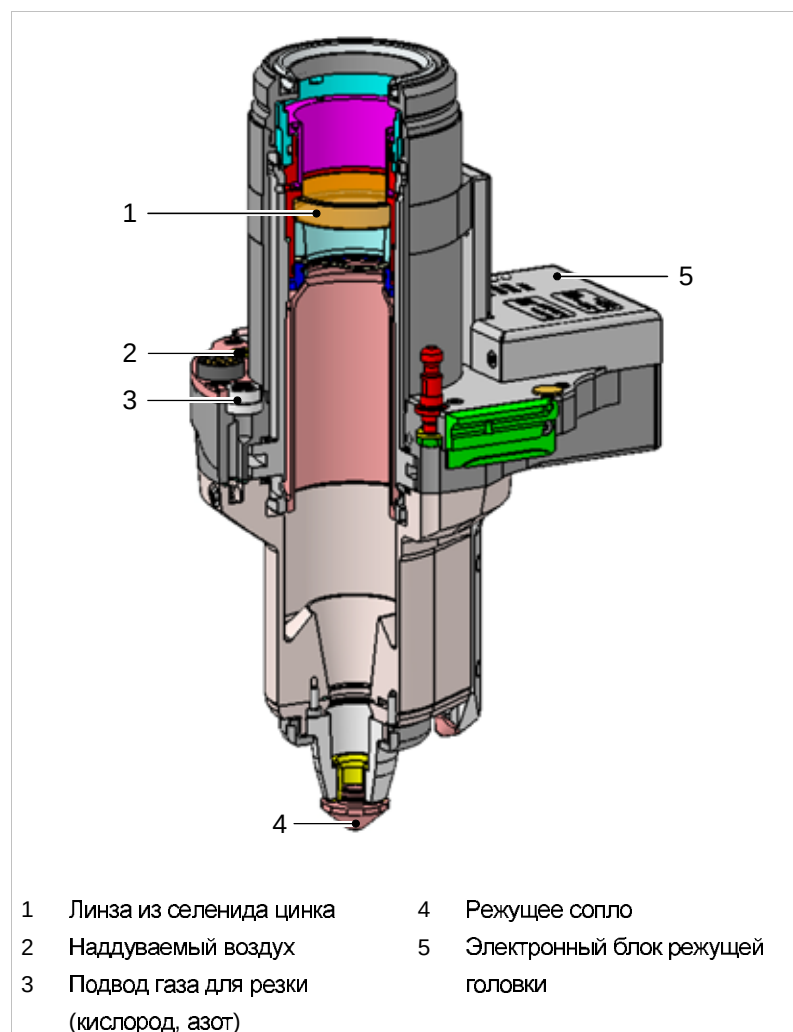
- Подачу дополнительных материалов, необходимых для процесса обработки, например, газа для резки или сварки либо присадок для сварки.
- Для контроля процесса в них встроены датчики, например, регулировки дистанций при резке либо наблюдения за процессом сварки.
- В них имеются устройства связи со станком и его системой управления, например, подключения для подачи электропитания и охлаждающей воды, а также интерфейсы для передачи данных.
- Они имеют защитные устройства и средства, препятствующие попаданию пыли и грязи на чувствительные линзы или зеркала, например, защитные стекла или поперечные струи воздуха, отбивающие брызги.
- На них может устанавливаться вспомогательное наладочное оборудование, такое как измеритель мощности и лампа подсветки.

2.1 Линзовые оптические системы

Линзы должны быть проницаемы для длины волны соответствующего лазерного луча. Иначе они будут поглощать лазерное излучение и нагреваться. Если это происходит, они расширяются и вызывают абберации. В худшем случае термическое напряжение возрастает настолько, что линзы разрушаются.

В CO₂-лазерах не могут использоваться стеклянные линзы, так как они почти полностью поглощают лазерное излучение CO₂-лазера. Линзы из селенида цинка или арсенида галлия, напротив, хорошо фокусируют луч CO₂-лазера. Однако они применяются только при мощностях лазеров макс. 6 кВт. Если они слишком сильно нагреваются, они способны сгорать, выделяя вредные для здоровья продукты разложения.

Через режущее сопло лазерный луч и применяемый для резки газ подаются к заготовке для ее обработки. Охлаждение осуществляется либо прямо через систему технологического газа, либо через водяной контур.



Пример режущей головки установки лазерной резки

Рис. 48908

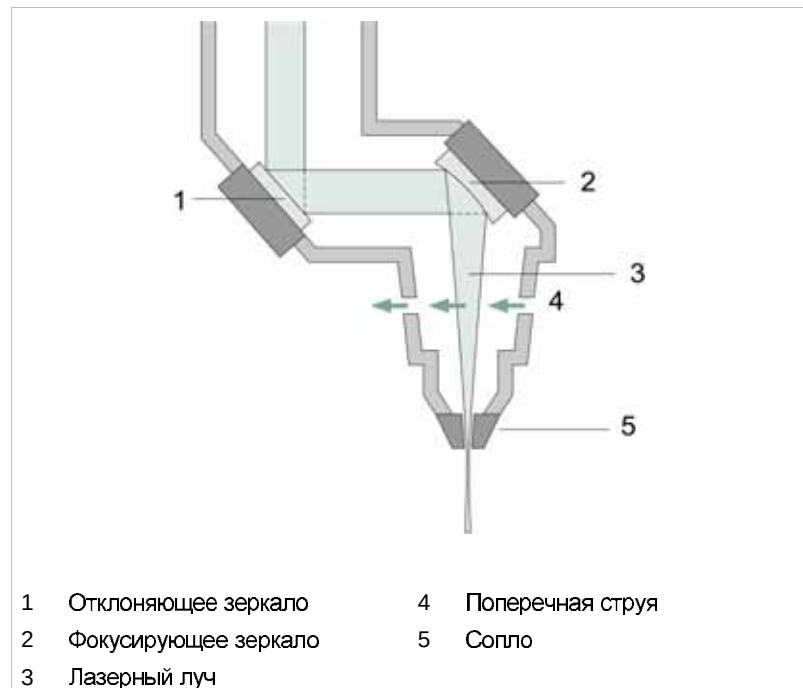
2.2 Зеркальные оптические системы

В лазерах более высокой мощности применяются зеркальные оптические системы. Зеркала могут охлаждаться непосредственно с обратной стороны отражающей поверхности и отличаются более высоким порогом разрушаемости и меньшей деформацией. Кроме того, линзы из селенида цинка достигают предела своих допустимых нагрузок. Поэтому в зеркальных оптических системах используются металлические зеркала. Они не поддаются термическому разрушению и, следовательно, менее восприимчивы к загрязнениям, поглощающим лазерное излучение.

Зеркала способны фокусировать или расширять лазерный луч за счет вогнутых либо выпуклых отражающих поверхностей. Зеркала, выгнутые наружу (выпуклые), расширяют луч, изогнутые внутрь (вогнутые) - фокусируют его. Одновременно они изменяют направление лазерного луча.

В оптических системах, используемых для сварки и резки, применяются параболические зеркала. Они охлаждаются непосредственно через водяной контур.

Оптические системы для сварки



Зеркальная оптическая система CO₂-лазера для сварки. Фокусирующее зеркало одновременно отклоняет лазерный луч на 90 градусов

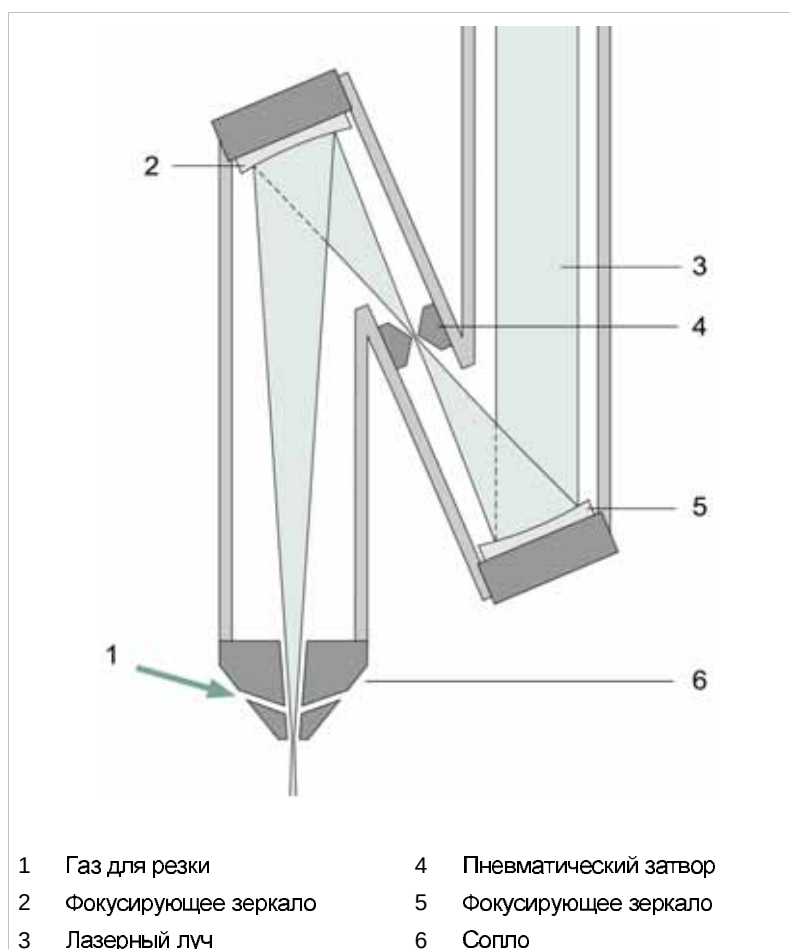
Рис. 48009

В этих оптических системах 2 зеркала располагаются друг против друга с некоторым смещением. Первое, как правило, плоское зеркало так отклоняет лазерный луч, что он под нужным углом падает на вогнутое фокусирующее зеркало. Фокусирующее зеркало сужает луч и направляет его на заготовку.

Зеркала изготовлены из меди и охлаждаются водой, так как поглощают 0.5 - 2 процента лазерной мощности и в результате этого нагреваются настолько, что могут деформироваться. Струя газа, вдуваемая перпендикулярно лазерному лучу, препятствует попаданию на зеркала брызг, образующихся в процессе обработки.

Если обрабатываются трехмерные заготовки, оптическая система должна быть подвижной, чтобы лазерный луч направлялся на заготовку всегда перпендикулярно. Это возможно, если оптическая система имеет 2 оси вращения: одну - перед отклоняющим зеркалом, другую - между отклоняющим и фокусирующим зеркалами.

Оптические системы для резки



Устройство зеркальной оптической системы для резки высокомощного CO₂-лазера

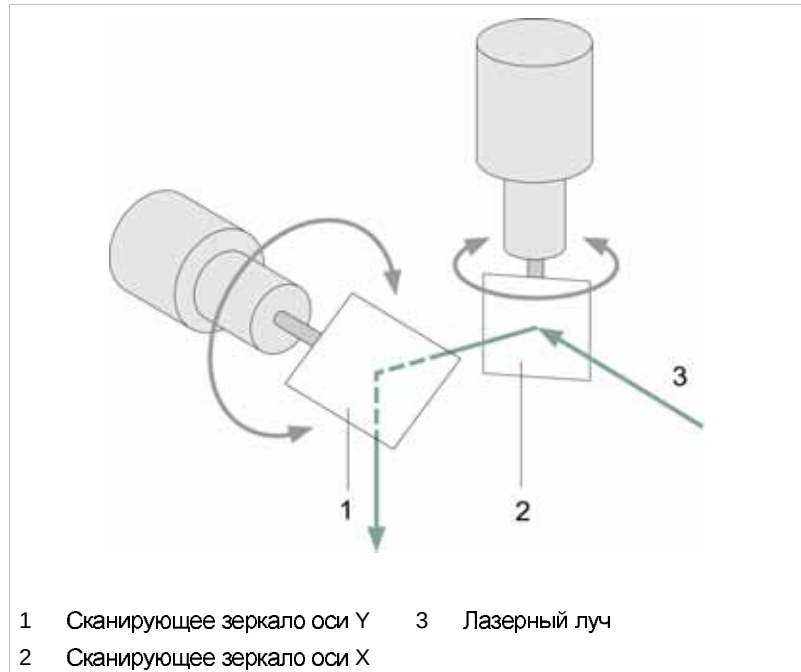
Рис. 48010

При используемых для резки высоких мощностях лазера свыше 8 кВт в планшетных лазерных установках также применяются зеркальные оптические системы. Однако это стало возможным, только когда между двумя фокусирующими зеркалами был предусмотрен пневматический затвор. Он отделяет канал проводки луча от пространства сопла. До этого перепад давлений применяемого для резки газа в камере сопла оптической системы и газа в канале проводки луча был слишком большим.

2.3 Сканирующие оптические системы

Принцип действия

В сканирующих оптических системах лазерный луч отражается 2 поворотными зеркалами и затем фокусируется линзой. Оси вращения зеркал расположены под прямым углом друг к другу. За счет поворота зеркал луч может фокусироваться в любую точку рабочего поля.



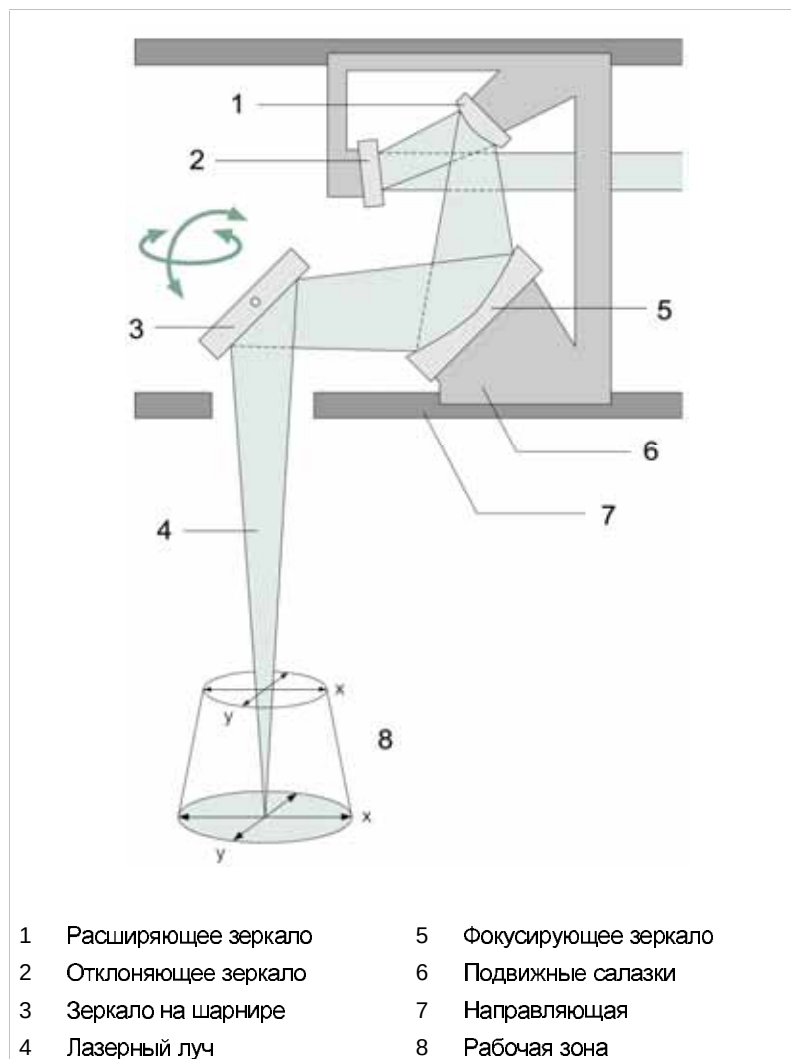
Сканирующая конструкция

Рис. 48011

Однако, сканирующая конструкция имеет один недостаток: относительно фокуса рабочее поле имеет кривизну. Положение фокуса в рабочем поле изменяется, и на крупных заготовках хороший результат обработки может быть достигнут не во всех местах. Чтобы положение фокуса сохранялось постоянным, сканирующая конструкция должна быть изменена.

Зеркальная сканирующая оптическая система

В зеркальной сканирующей оптической системе лазерный луч фокусируется с помощью зеркального телескопа. При этом он сначала направляется отклоняющим зеркалом на выпуклое зеркало. Оно расширяет луч и направляет его на фокусирующее зеркало. Все 3 зеркала установлены на подвижные салазки, которые, перемещаясь, обеспечивают постоянную длину луча между фокусирующим зеркалом и заготовкой.



Зеркальная сканирующая оптическая система с зеркалом на шарнире и подвижными салазками

Рис. 48012

Затем сфокусированный лазерный луч падает на плоское зеркало. Это зеркало, смонтированное на шарнире, имеет 2 оси движения. Поворачиваясь и запрокидываясь, оно точно направляет луч на заготовку. За счет того, что оно способно еще больше отклонять луч, возможен охват больших рабочих зон.

В установке лазерной резки TrumaScan L 4000 зеркало на шарнире также может двигаться по направляющей. Благодаря этому, рабочая зона в направлении X расширяется до 3900 мм.

2.4 Система датчиков контроля

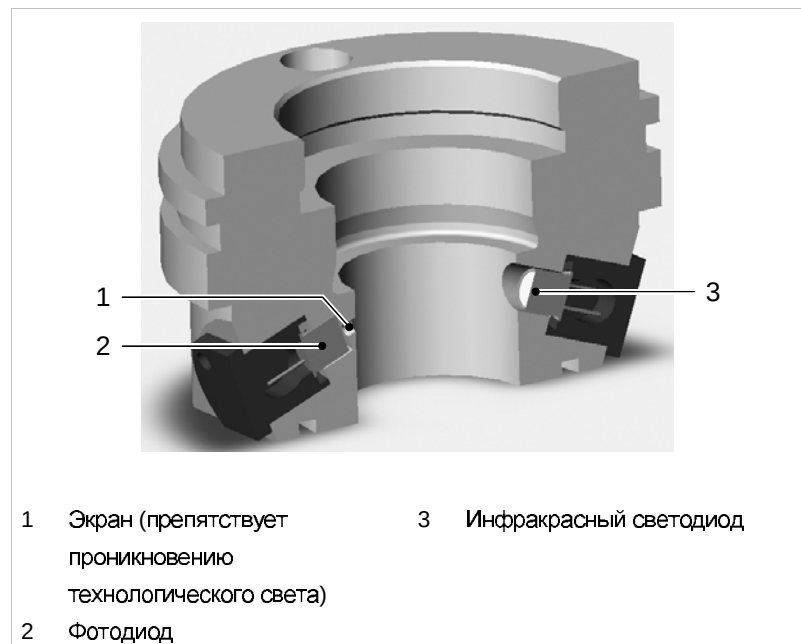
Система датчиков контроля линзы

Высокие показатели плотности мощности предъявляют самые высокие требования к деталям установки, особенно к фокусирующей линзе. Присутствие на ней каких-либо загрязнений ведет к усиленному поглощению лазерного излучения. В результате этого происходит нагревание и, в худшем случае, термическое разложение линзы.

Система датчиков контроля предотвращает полное испарение фокусирующей линзы, в течение нескольких миллисекунд отключая лазер при ее начинающемся термическом разложении. Короткая вспышка линзы, предшествующая началу термического разложения, регистрируется фотодиодом, а встроенный световой барьер распознает возможное дымообразование в зоне над линзой.

Система датчиков контроля выходного зеркала (OMS)

Выходное зеркало также контролируется на предмет повреждений и загрязнений. Для этого в его оправу встроены инфракрасный светодиод и фотодиод. Диоды расположены друг напротив друга и образуют относительно отражающей поверхности зеркала угол в 20°.



Расположение диодов в выходном зеркале

Рис. 40159

Функция	Излучение инфракрасного светодиода отражается выходным зеркалом и падает на фотодиод. Тот вырабатывает пропорциональный интенсивности излучения ток, который анализируется электронной системой и преобразуется в напряжение сигнала.
Повышение напряжение сигнала	Частицы или дефекты на покрытой поверхности выходного зеркала стимулируют повышенное поглощение лазерного излучения и при этом вызывают вспышки и повышение напряжения сигнала. Если его постоянное среднее значение в 2 В превышает на 0.5 В, срабатывают датчики, и лазер отключается.
Понижение напряжения сигнала	Если выходное зеркало сильно повреждено, происходит ослабленное отражение излучения светодиода и понижение напряжения сигнала. Если напряжение опускается ниже 1 В, лазер отключается и не может быть снова включен.

2.5 Поляризация

Хотя сам процесс генерации лазерного излучения и не оказывает никакого влияния на направление поляризации лазерного луча, в свернутом квадрате резонаторе CO₂-лазера усиливается свет лишь одного направления поляризации, так что выходящий лазерный луч поляризован линейно.

Линейно поляризованный свет	Если лазерная резка осуществляется линейно поляризованным лучом, ее результаты зависят от направлений. При совпадении направления движения с направлением колебаний рез получается гладкий и без грата. Скорость резки может быть очень высокой. Однако, если направление световых колебаний оказывается поперечным относительно направления реза, образуется грат. При лазерной сварке наблюдается аналогичный, но не так ярко выраженный эффект. Таким образом, линейно поляризованный лазерный луч подходит только для выполнения операций, предполагающих одно направление движения, например, для отрезки труб.
------------------------------------	--

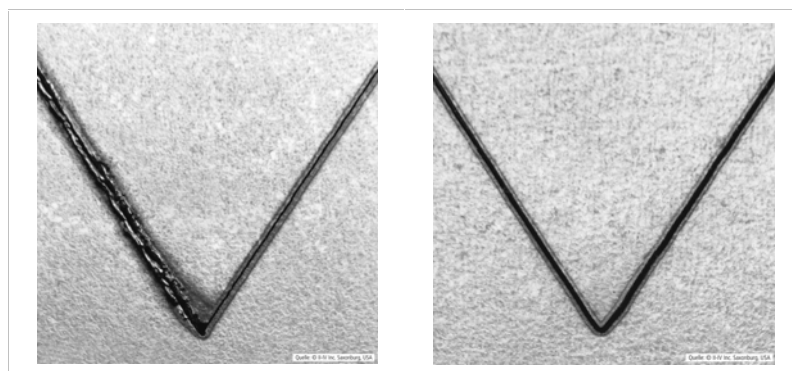
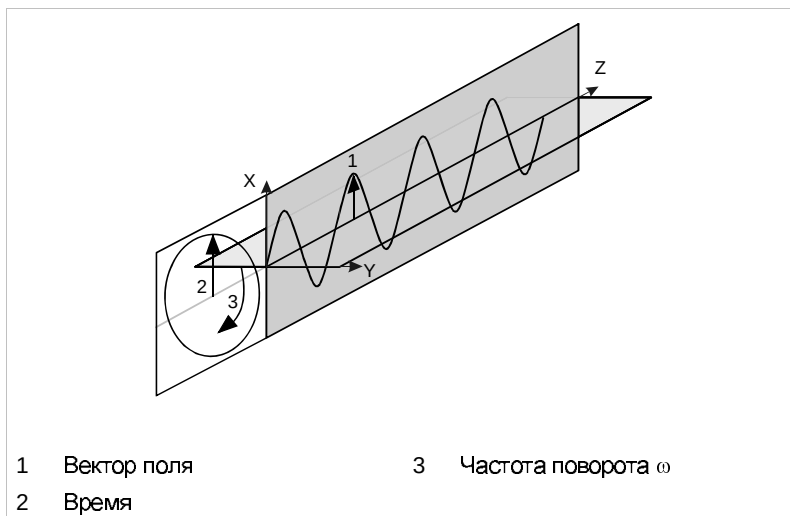


Рис. 061_011, 061_012
 Контур, вырезанный лазерным лучом с плоскостью поляризации, перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) направлению реза

Колебания всех световых волн имеют одно направление. Направление колебаний лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.



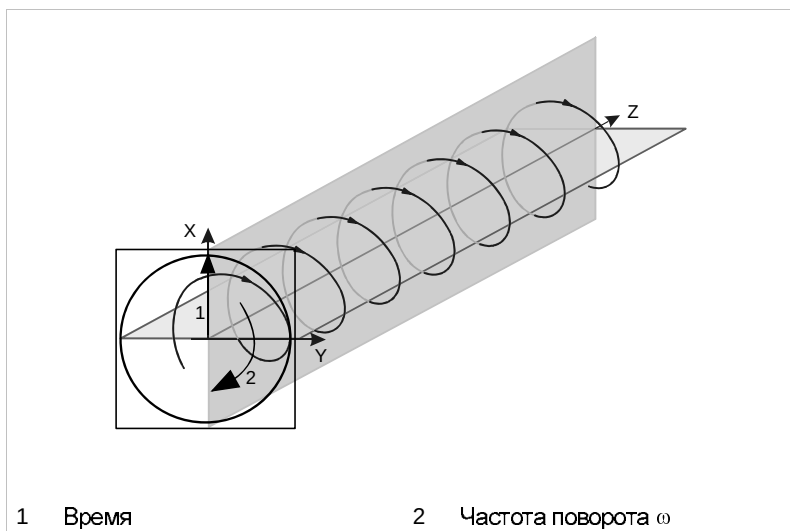
Линейно поляризованный свет

Рис. 48206

На практике, однако, желательно получать одинаково хороший результат резки во всех направлениях. Это достигается путем использования лазерного излучения, в котором колебаниям волн придается круговое направление. В этом случае говорят о циркулярно поляризованном свете.

Циркулярно поляризованный свет

В луче циркулярно поляризованного света вектор поля (см. Рис. 48206) поворачивается вокруг оси распространения волны.



Циркулярно поляризованный свет (электрическое поле)

Рис. 48204

$\lambda/4$ -зеркало для сдвига фаз

С помощью зеркала с многослойным покрытием, так называемого $\lambda/4$ -зеркала, линейно поляризованный свет может быть преобразован в циркулярно поляризованный.

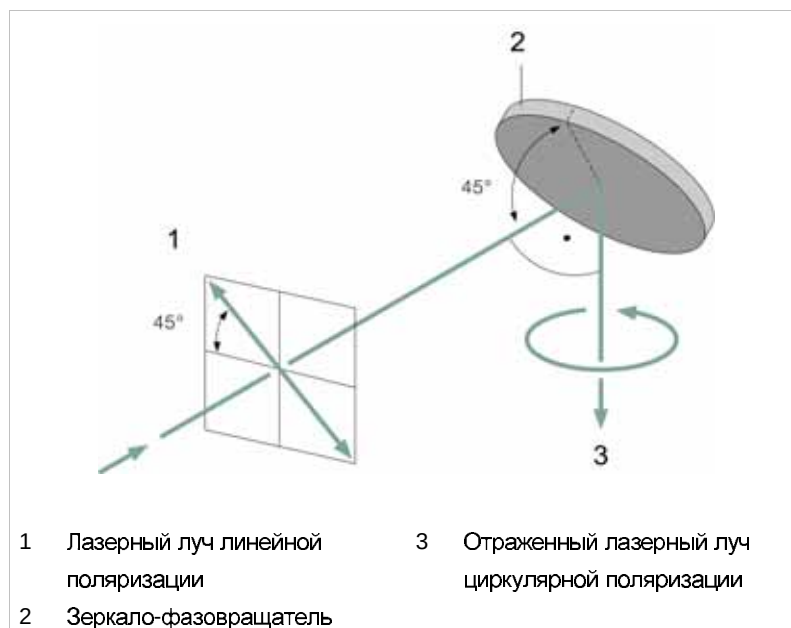


Схема для изменения поляризации

Рис. 48013

$\lambda/4$ -зеркало обладает разными характеристиками отражения для разных направлений колебаний, вертикальных или горизонтальных относительно его поверхности. Одна часть волн отражается нормально, другая часть более глубоко проникает в покрытие зеркала. Из-за этого она отражается с временной задержкой, и волны на 90° сдвигаются по фазе. Одновременно они располагаются под прямым углом друг к другу. Когда происходит наложение отраженных волн, образуется волна, имеющая циркулярную поляризацию. Изменение поляризации возможно только в том случае, если колебания в падающем лазерном луче направлены под углом 45° относительно $\lambda/4$ -зеркала.

После отражения луча $\lambda/4$ -зеркалом его поляризация должна сохраняться. При этом отклоняющие зеркала оптического тракта способны создавать эффекты, сходные с эффектом $\lambda/4$ -зеркала, и несколько изменять поляризацию. Однако эти изменения столь ничтожны, что не сказываются на результате обработки материала.

Глава 5

Процессы обработки

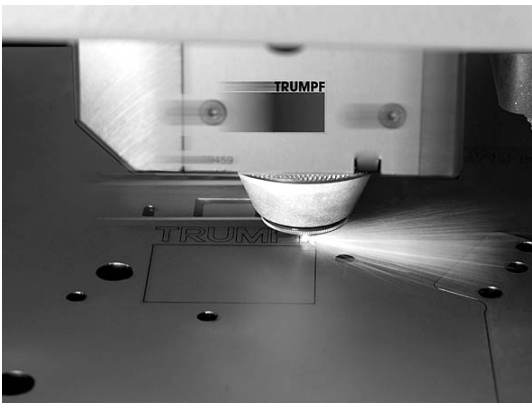
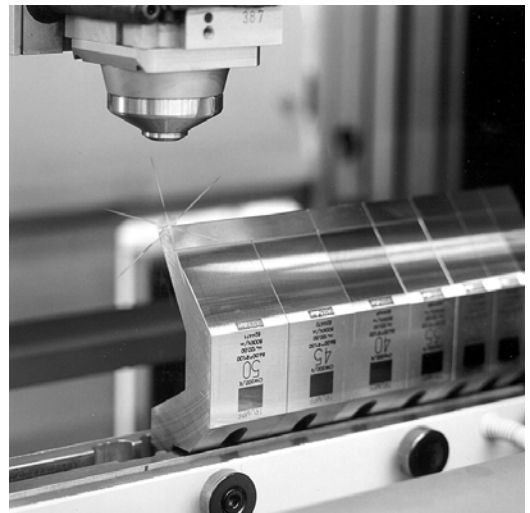
1.	Области применения CO₂-лазеров	5-3
2.	Лазерная сварка	5-6
2.1	Принцип лазерной сварки	5-6
2.2	Способы сварки	5-8
	Глубокая сварка	5-9
	Глубокая сварка с присадочными	
	материалами	5-11
	Гибридный метод сварки	5-11
	Сварка со сканированием	5-12
2.3	Характеристики процесса	5-12
	Геометрия и тип шва	5-13
	Подготовка швов	5-15
	Зажимные устройства	5-17
	Мощность лазера и скорость сварки	5-18
	Качество луча и главное фокусное	
	расстояние	5-19
	Поляризация	5-20
2.4	Преимущества и возможности применения	5-21
2.5	Критерии высокого качества швов	5-24
2.6	Станки и установки	5-27

3.	Лазерная резка.....	5-28
3.1	Принцип лазерной резки.....	5-28
3.2	Способы резки	5-30
	Кислородная резка: резка выжиганием.....	5-30
	Резка с азотом: резка с расплавлением	5-31
3.3	Критерии качества резки	5-33
	Глубина шероховатости	5-33
	Форма и ширина прорези	5-33
	Отсутствие грат	5-35
	Материал и мощность лазера.....	5-35
	Режим работы	5-35
	Скорость резки	5-36
3.4	Преимущества и возможности применения	5-39
3.5	Станки и установки.....	5-41
4.	Разметка и кернение лазером.....	5-42
5.	Лазерная обработка поверхностей	5-43
5.1	Закалка CO ₂ -лазером.....	5-44
5.2	Переплавка	5-45
5.3	Легирование и диспергирование	5-46
5.4	Нанесение покрытий	5-48
6.	Direct Metal Deposition (DMD)	5-50

1. Области применения CO₂-лазеров

Лазер занял прочные позиции в промышленности. В качестве инструмента термической обработки лазерный луч может

- Разогревать (упрочнять или спаивать).
- Расплавлять (резать или сваривать).
- Выпаривать или разрушать (сверлить или структурировать) материал.

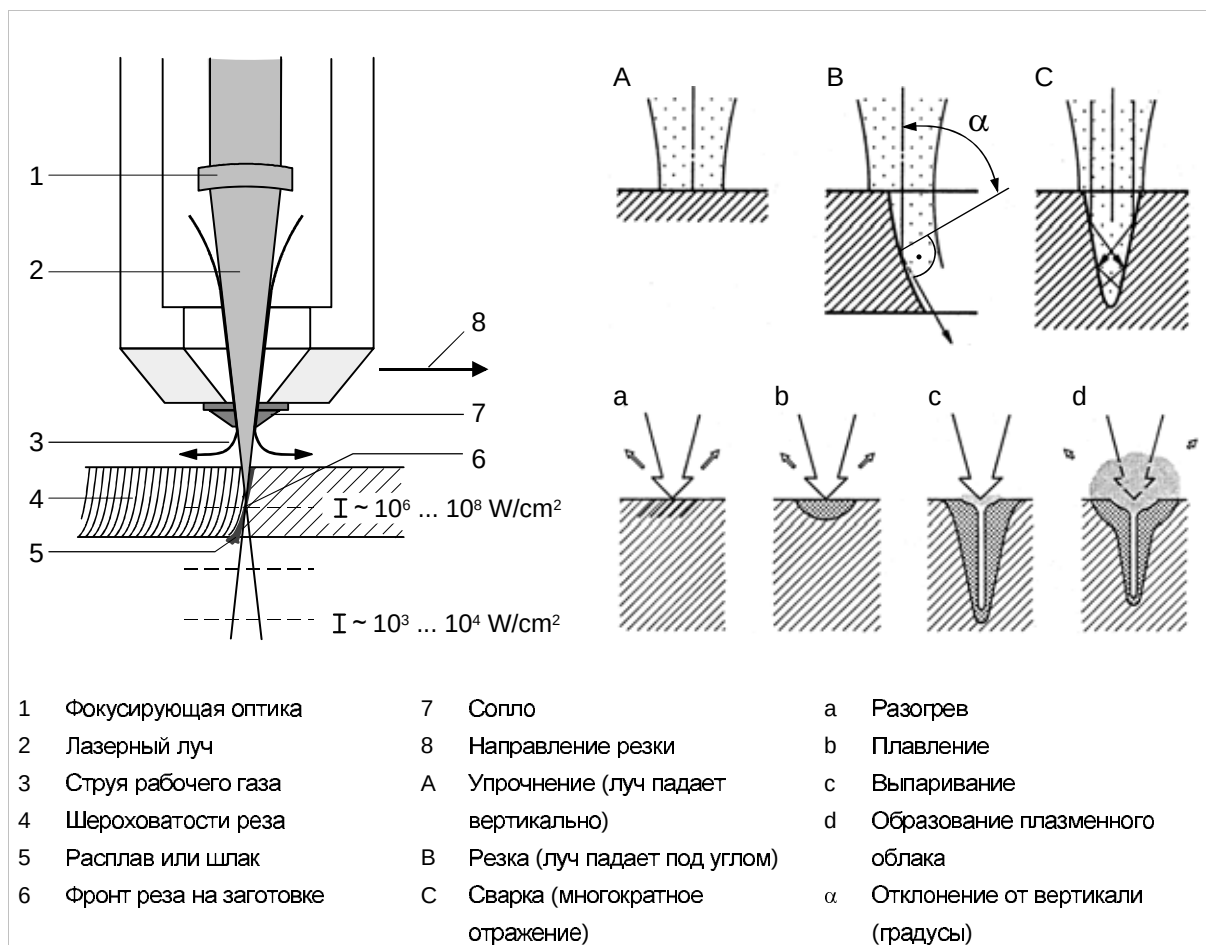
Лазерная сварка	Лазерная резка
 Quello TRUMPF GmbH + Co. Dringem	 Quello TRUMPF GmbH + Co. Dringem
Разметка и кернение лазером	Лазерная обработка поверхностей
 TRUMPF	

Области применения лазеров TruFlow

Рис. 129_034,
069_001, 24626,
24337

Плотность мощности

При этом параметры лазерного луча, его расходимость и фокусировка должны согласовываться друг с другом таким образом, чтобы плотность мощности луча оптимально подходила для того или иного процесса обработки.

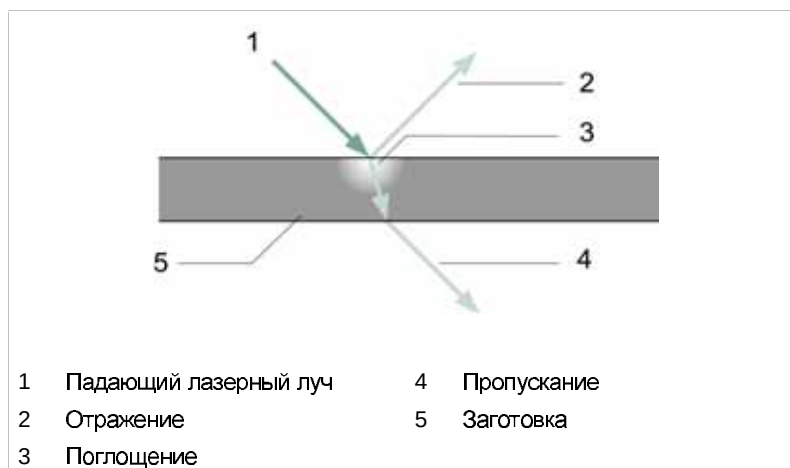


Величины плотности мощности в зависимости от расстояния до фокуса лазерного луча и их применение

Рис. 48221ru

Плотность мощности в фокусе составляет от 10^6 до 10^8 Вт/см². С такой плотностью можно осуществлять резку, сварку и выпаривание материала (c). При ней также образуется плазменное облако (d). При средней плотности мощности ок. 10^5 Вт/см² материал плавится (b). Плотностей мощности ок. $10^3 - 10^4$ Вт/см² хватает лишь для упрочнения и разогрева материала.

При всех видах обработки одна часть лазерного излучения поглощается заготовкой, другая часть отражается, а третья проходит сквозь заготовку без взаимодействия (пропускание). Соотношение поглощения, отражения и пропускания зависит от материала. Например, металлы не пропускают излучения.



Лазерный луч соприкасается с заготовкой

Рис. 48014ru

Степень поглощения

Степень поглощения является решающим показателем. Она зависит от

- Длины волны.
- Поляризации
- Угла падения лазерного луча.
- Материала
- Температуры
- Агрегатного состояния.
- Геометрии заготовки.
- Поверхности заготовки.

Чем выше степень поглощения, тем больше энергии передается заготовке и имеется в наличии для ее обработки.

2. Лазерная сварка

На сегодняшний день помимо газовой и электродуговой существует еще множество других способов сварки, применяемых в специальных областях. Ведь различные материалы требуют различного подхода. Только в области сварки металлов известны бесчисленные технологии. При этом лазер находит в них все большее применение.

Традиционные способы сварки, такие как дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа, дуговая сварка плавящимся электродом в среде активного газа или плазменно-дуговая сварка, не обеспечивают той плотности энергии, которая необходима для эффекта глубокого проплавления металла.

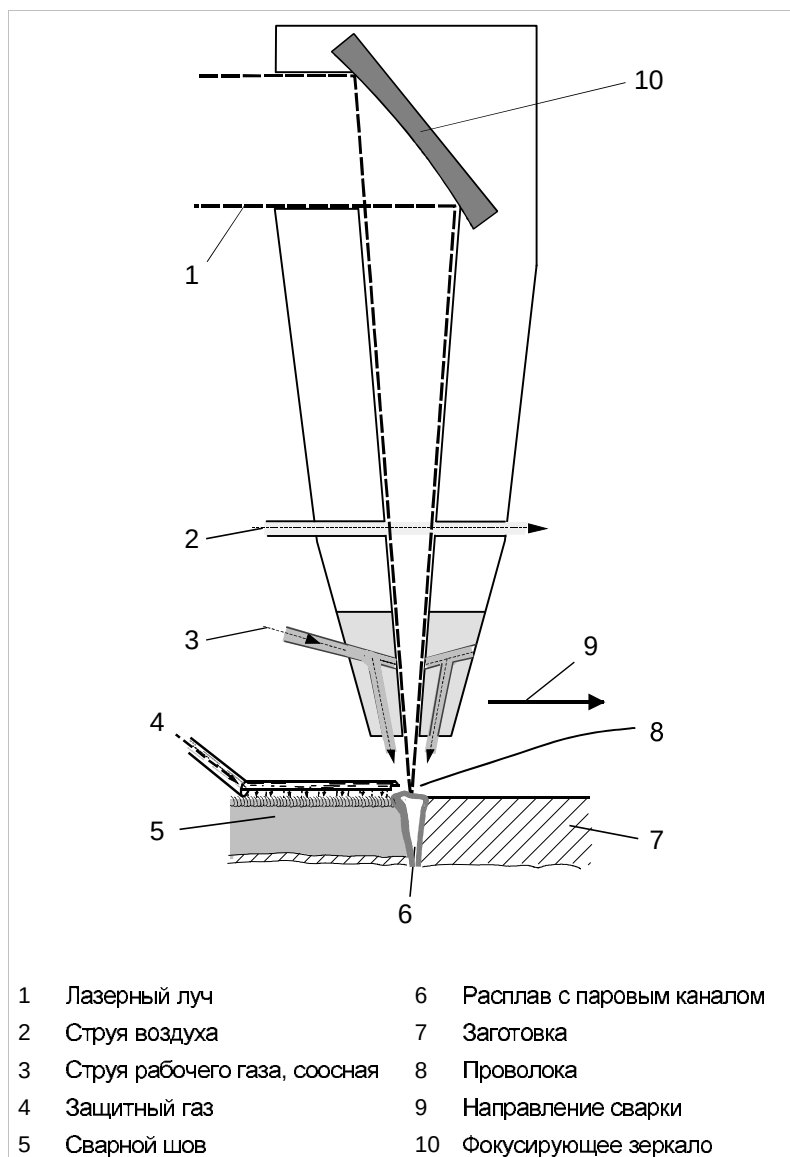
2.1 Принцип лазерной сварки

Лазерным лучом заготовке передается энергия, необходимая для процесса сварки. С помощью отклоняющих зеркал и фокусирующего устройства, например, зеркала, эта энергия направляется туда, где она должна воздействовать, то есть на стык заготовки.

Процесс сварки Заготовка точно позиционируется и фиксируется в зажимном устройстве, чтобы лазерный луч направлялся точно в место стыка. Сварочная головка перемещается над заготовкой вдоль стыка. Огромная плотность энергии лазерного луча в фокусе – около 10^6 Вт/см² – заставляет материал плавиться и частично испаряться.

Давление образующихся паров металла может становиться настолько сильным, что в материале образуется паровой канал, так называемая "замочная скважина" (от англ. "key-hole"). Эта "скважина" – при высокой плотности мощности – может уходить в глубь материала на несколько миллиметров.

Если в это время сварочная головка движется вдоль заготовки, "скважина" снизу движется вместе с ней. Позади нее расплав сливается воедино. Расплавленный и смешанный материал охлаждается, а расплав затвердевает, образуя узкий сварной шов.



Принцип лазерной сварки

Рис. 24697

Защитный и рабочий газ

Во время обработки сварной шов предохраняется от взаимодействия с воздухом защитным газом. Это необходимо, чтобы остывающий металлический расплав в шве не вступал в реакции с кислородом, влагой либо углекислым газом и не окислялся.

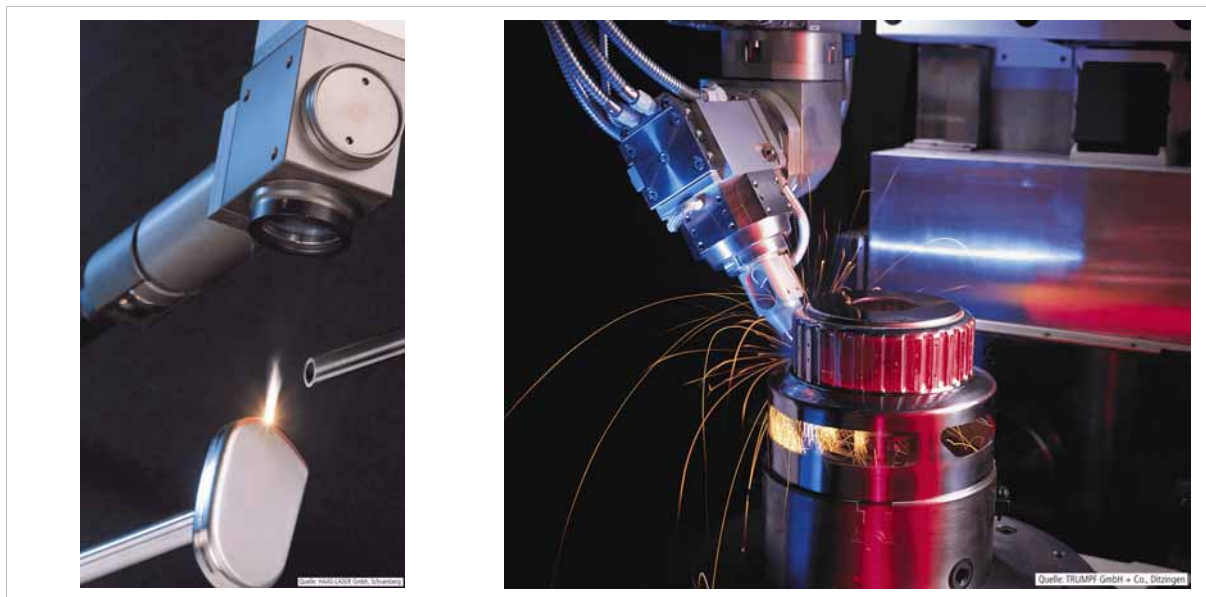
Рабочий газ предотвращает образование плазменного облака, которое, провоцируя термическое рассеяние (см. главу 3, раздел 2), вызвало бы расхождение луча. Направление потока и расход газа должны регулироваться таким образом, чтобы газ не влиял на расплав.

В зависимости от свариваемого материала, в качестве защитного либо рабочего газа используются гелий (He), аргон (Ar), азот (N₂) или газовые смеси. Если газ выходит из того же сопла, что и лазерный луч, говорят о его соосной подаче. При боковой подаче газ подводится к месту обработки через отдельную форсунку. Газовая форсунка может быть смонтирована даже на зажимном устройстве.

2.2 Способы сварки

При сварке лазером различают два ее способа: теплопроводную и глубокую сварку.

При теплопроводной сварке материал расплавляется только в поверхностном слое. При этом образуются сварные швы глубиной в несколько десятых миллиметра. Такой способ характерен для импульсных твердотельных лазеров, которые применяются для сварки деталей в электронной промышленности либо сварки мелких деталей для медицинского оборудования.



Сварка кардиостимулятора с помощью твердотельного лазера
Сварка детали трансмиссии сварочной головкой CO₂-лазера

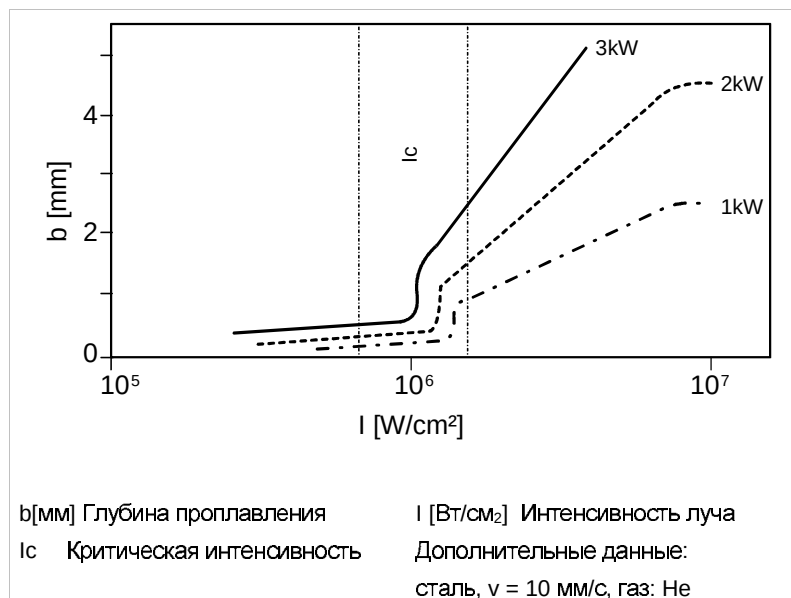
Рис. 123_009, 123_010

При изготовлении деталей трансмиссии, сварке профилей или толстостенных труб требуются очень глубокие и тонкие сварные швы. В таких случаях применяется глубокая сварка CO₂-лазером в непрерывном режиме.

Особой формой глубокой сварки является сварка с использованием присадочных материалов, которая всегда применяется в тех случаях, когда обрабатываются стыки с большой шириной зазора и металлические листы большой толщины.

Глубокая сварка

При очень высокой плотности мощности (около 1 мегаватт на квадратный сантиметр) лазерный луч так раскаляет материал, что его поверхностный слой не только плавится, но и испаряется.



Интенсивность лазерного луча и глубина сварки

Рис. 25389ru

Паровой канал = "замочная скважина"

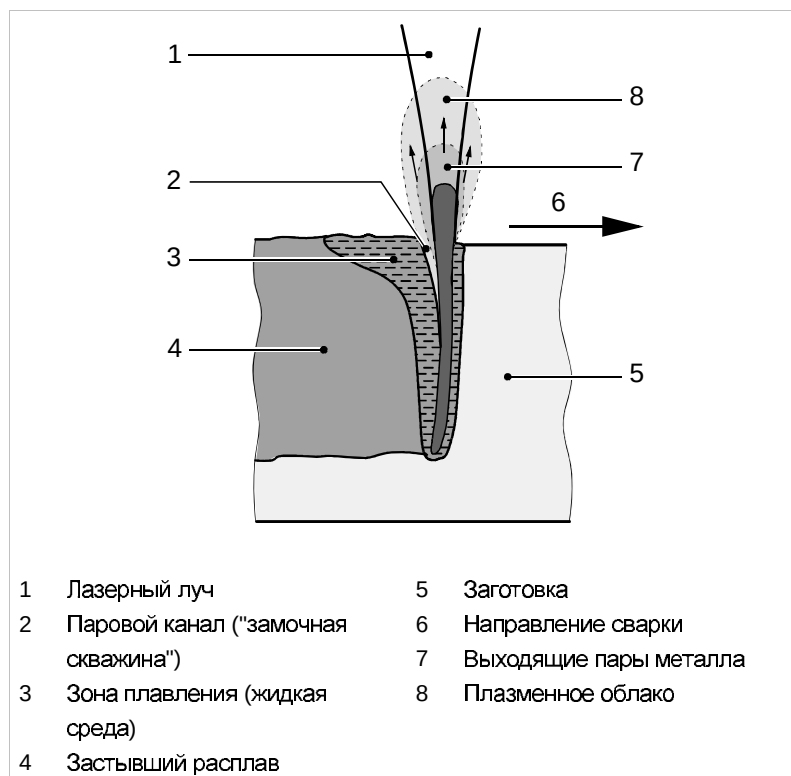
В результате испарения материала и давления образующихся паров металла в заготовке образуется паровой канал, так называемая "замочная скважина" (от англ. "keyhole"). От его расплавленных стенок лазерный луч многократно отражается. При этом расплав почти полностью поглощает луч, и КПД процесса сварки повышается. Выпарившийся материал также поглощает лазерную энергию и ионизируется: образуется индуцированная лазером плазма. Этого по возможности следует избегать, так как плазма "забивает" паровой канал.

В CO_2 -лазере имеет место еще один эффект: Степень поглощения излучения с длиной волны CO_2 -лазера у плазмы выше, чем у расплава. Это приводит к тому, что после образования плазмы энергия почти полностью может передаваться заготовке.

Паровой канал окружен жидкой фазой, в которой из-за огромного перепада температур и давлений энергично циркулирует расплав. Канал повторяет движения сварочной головки, то есть он "протягивается" ею по шву. Расплав постоянно обтекает вокруг парового канала и застывает следом за ним. Так образуется тонкий, глубокий сварной шов с равномерной структурой.

Высокие скорости, практикуемые при глубокой сварке, позволяют сужать зону термического воздействия и, таким образом, способствуют уменьшению тепловых деформаций.

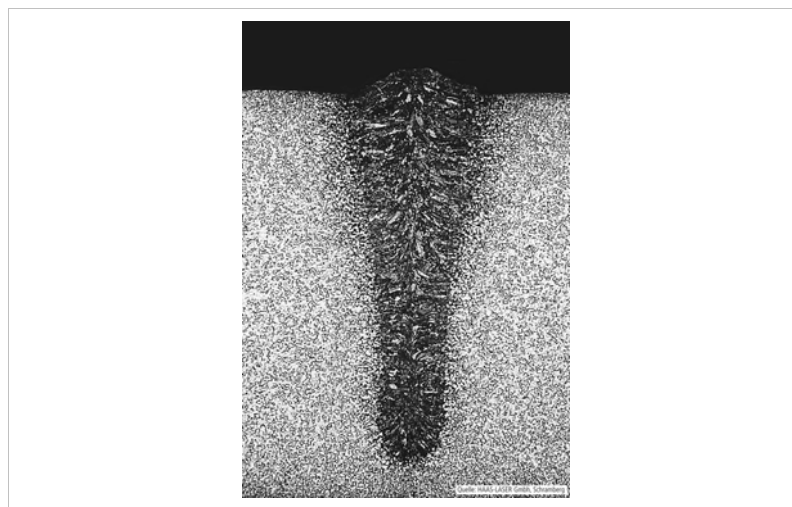
Образование парового канала называют "эффектом глубокой сварки", так как благодаря ему достигается значительно большая глубина сварного шва, нежели при теплопроводной сварке. Пример: При сварке конструкционной стали лучом CO_2 -лазера мощностью 12 кВт со скоростью подачи 0.5 м/мин образуются сварные швы глубиной 19 мм.



Принцип глубокой сварки

Рис. 48225

Пример



Пример сварного шва, выполненного глубокой сваркой

Рис. 125_18

Глубокая сварка с присадочными материалами

Данный метод является одним из вариантов описанной выше глубокой сварки. Если ширина зазора в стыке составляет более 5 % от глубины проплавления, расплавляемого металла не хватает для полного перекрытия зазора между заготовками. Происходит просадка сварного шва, или - в худшем случае - заготовки не соединяются друг с другом.

В таких случаях требуются присадочные материалы, которые в виде проволоки или порошка подаются в зону сварки. Необходимое количество проволоки или порошка зависит от скорости сварки, ширины зазора в стыке и глубины проплавления. Наряду с дозированной подачей, не менее важное значение имеет и точное расположение очень тонкой проволоки (диаметром от 0.8 до 1.2 мм).

Присадочные материалы имеют еще одно назначение. За счет их введения в расплав целенаправленно изменяются металлургические свойства расплава либо сварного шва. Так, например, могут быть улучшены свариваемость, прочность, вязкость, коррозионная стойкость и т. д.

Гибридный метод сварки

Если лазерная сварка комбинируется с другими видами сварки, например, с дуговой сваркой плавящимся электродом в среде инертного либо активного газа, говорят о гибридном методе сварки. Это метод применяется только в специальных областях, например, в судостроении. Там приходится сваривать большие листы металла длиной до 20 м и толщиной до 15 мм. При этом зазоры в стыках настолько велики, что один лишь лазерный луч не в состоянии их перекрыть.

Поэтому лазерную сварку комбинируют с дуговой сваркой плавящимся электродом в среде инертного газа. Лазер обеспечивает высокую плотность мощности для большой глубины шва, допускает высокие скорости сварки и тем самым сокращает время теплового воздействия и снижает риск деформаций. С помощью аппарата дуговой сварки и присадочной проволоки перекрывается зазор и закрывается шов. Преимущества гибридного метода: Он быстрее, чем дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного газа, и детали меньше деформируются.

Сварка со сканированием

При сварке со сканированием лазерный луч проводится к заготовке через сканирующую оптику с большого расстояния. 1 или 2 подвижных зеркала моментально направляют луч на заготовку. Благодаря этому, источник излучения может эксплуатироваться более эффективно, так как время для перехода от одного шва к другому, на которое лазер отключается, сокращается почти до нуля. Поэтому сварку со сканированием предпочитают использовать при наличии множества коротких швов. Оптимальная последовательность такой сварки позволяет минимизировать тепловое воздействие и, следовательно, деформации. С помощью сканирования свариваются швы внахлестку и встык. Защитный газ подводится через зажимное устройство.

2.3 Характеристики процесса

Для того, чтобы с помощью лазерного луча оптимально соединить две заготовки, следует предварительно определить, а затем учитывать те требования, которые предъявляются к соединению:

- Какая геометрия шва лучше всего подходит для заготовки либо каким требованиям она должна отвечать?
- Какие подготовительные работы следует провести, чтобы образовался оптимальный шов?
- Должно ли соединение быть непроницаемым для газов и жидкостей?
- Насколько сильно можно нагревать заготовку?

Геометрия и тип шва

Геометрия шва говорит о том, как должны соприкасаться кромки стыкуемых деталей. Например, они могут располагаться относительно друг друга внахлестку или в стык.

Существуют различные виды геометрии швов (см. таблицу ниже). В данном обзоре описаны их характеристики и отмечены наиболее прочные виды соединений.

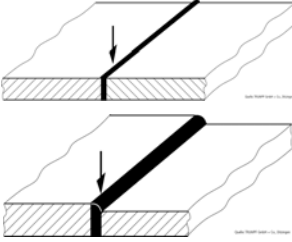
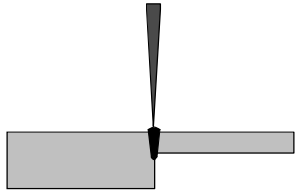
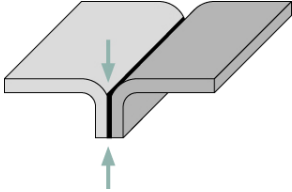
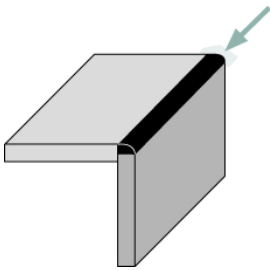
Геометрия шва	Описание	Наилучшая геометрия шва
Бесскосный стыковой шов 	- Возможна различная толщина листов. - Самый благоприятный силовой поток. - Хороший доступ. - Сложная подготовка. - Особенности: Стыковой зазор должен быть очень малым.	
Шов с отбортовкой кромок 	- Очень несложная подготовка. - Высокая жесткость. - Неблагоприятный силовой поток. - Очень хороший доступ. - Особенности: Повышенный расход материалов.	
Угловой шов 	- Несложная разделка. - Сваривается только под углом 90°. - Особенности: Для данной геометрии шва более предпочтителен твердотельный лазер.	

Рис. 128_27G, 128_28G, 48035, 48037

Табл. 5-1

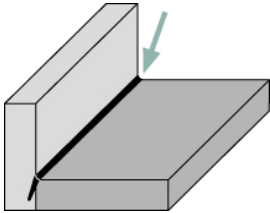
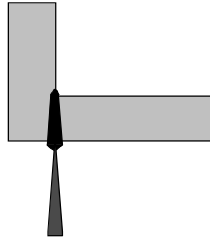
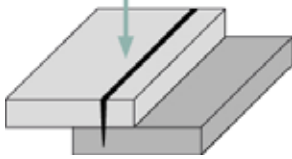
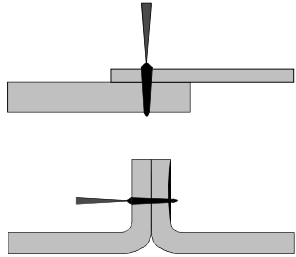
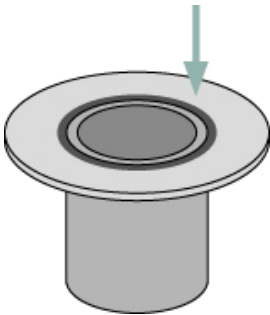
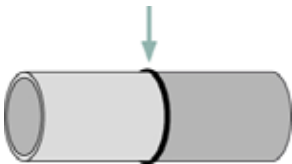
Сварной шов	Описание	Наилучшая геометрия шва
Шов таврового соединения 	• Сложная подготовка. • Благоприятный силовой поток. • Трудный доступ. • Особенности: Из-за трудности доступа возможен непровар.	
Шов внахлестку 	• Несложная подготовка. • Хороший доступ. • Передача сил через сечение шва. • Неблагоприятный силовой поток.	
Осевой круговой шов 	• Соответствует бескосному стыковому шву. • Подготовка: прихватка или посадка с натягом. Причина: расширение зазора с противоположной стороны при поперечной усадке в начале шва. • Благоприятный силовой поток; • Доступ зависит от геометрии заготовки.	
Радиальный круговой шов 	• Соответствует бескосному стыковому шву. • Простая подготовка. • Благоприятный силовой поток. • Хороший доступ. • Отсутствие усадки. • Особенности: Радиальный шов следует предпочитать осевому (возможна лучшая и более простая фиксация).	

Рис. 48036, 48038, 48039, 48040

Табл. 5-2

Тип шва После определения геометрии определяется тип шва. Выполняется ли сплошной шов либо используются отдельные сварные точки? Состоит ли шов из множества коротких штрихов или множества мелких кружков? Важно: Шов должен достичь необходимой прочности и при этом не должен перегреть деталь.

Форма	Изображение	Характеристика
Сплошная линия		- Выполняется быстро и просто. - При нагрузке максимум механического напряжения приходится на начало и конец шва (пики напряжения). - Небольшая глубина провара в начале и в конце шва.
Линия из отдельных точек		- Незначительное нагревание за счет импульсов. - Заготовка остывает в паузах между импульсами.
Прерывистая линия		- Передача тепла меньше, чем при сплошной линии. - Небольшая глубина провара в начале и конце каждого отрезка шва.
Овал		- Высокая прочность при тангенциальной нагрузке. - Двойной слой шва. - Большая передача тепла.
Круги с прерыванием		- Более высокая прочность при тангенциальной нагрузке, чем у прерывистой линии. - Однако, большая передача тепла.
Свободные формы		- Форма подбирается под вид нагрузок. - Передача тепла оптимизируется.

Табл. 5-3

Подготовка швов

При лазерной сварке стыковые кромки и поверхности заготовок требуют более тщательной подготовки, чем при традиционных способах сварки.

Ширина стыкового зазора играет важную роль при выборе метода сварки: глубокой сварки с присадочным материалом или без него.

Стыковые кромки При глубокой сварке образуется лишь небольшая зона плавления, что требует очень точной предварительной подгонки стыкуемых деталей. Стыковые кромки должны быть хорошо пригнаны друг к другу. Величина неровностей не должна превышать ширину зазора. Поэтому очень важно, каким способом были изготовлены стыкуемые детали.

Детали, изготовленные резанием, могут очень хорошо свариваться лазером. Детали, обработанные лазером или водной струей, также, как правило, хорошо подходят для сварки. Детали с высеченными кромками, напротив, не подходят для лазерной сварки, так как имеют слишком большие неровности.

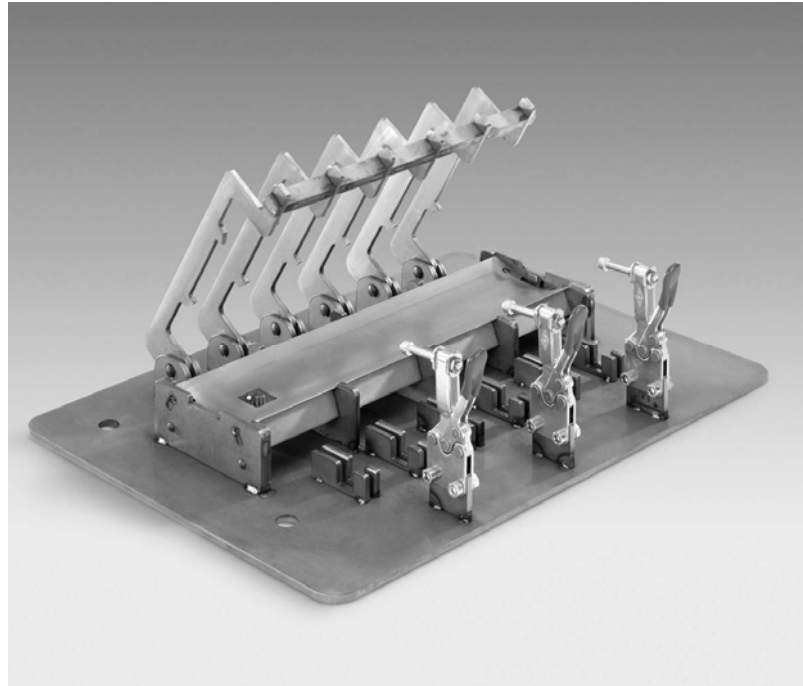
Поверхности Чем чище поверхность, тем лучше сварной шов. Из-за высокой скорости сварки и небольшой зоны плавления образующиеся газы не успевают выходить из расплава.

Так, хорошо свариваются отвечающие параметрам сварки детали со слегка смазанной поверхностью. Сильно смазанные или загрязненные поверхности должны предварительно тщательно очищаться. На металлических листах, имеющих на своей поверхности окалину, слой лака, ржавчину или элосаль, после сварки часто наблюдаются сильное порообразование, выплески расплава и дефекты.

Стыковой зазор Максимальная ширина стыкового зазора зависит от скорости сварки и глубины проплавления. Так, например, при шве внахлестку ширина стыкового зазора может быть приблизительно в 1.5 раза больше, чем при бескосном стыковом шве. Однако, если ширина зазора между двумя свариваемыми деталями составляет более 5 % от их толщины, требуется заполнитель шва. Как правило, заполнитель подается в виде проволоки.

Зажимные устройства

Для достижения хороших результатов сварки все детали конструктивного узла фиксируются подходящими зажимными устройствами. Устройства должны быть предварительно сконструированы.



Зажимное устройство

Рис. 48226

- Задачи**
- Зажимное устройство позволяет всегда одинаковым образом точно позиционировать и фиксировать детали конструктивного узла.
 - Оно гарантирует сохранение узких стыковых зазоров менее 0.1 мм.
 - Оно способно компенсировать производственные допуски, например, отклонения от размеров, которые произошли на предыдущих этапах изготовления деталей.
 - При определенных операциях, например, сварке с использованием сканирующей оптики, оно также может подводить защитный и рабочий газ.

Зажимные устройства имеют опорные поверхности и упоры, удерживающие и ориентирующие заготовку. Некоторые из них имеют очень сложную конструкцию. Зажимные элементы на устройстве фиксируют заготовку.

Вспомогательные средства для стыковки

Затраты на сложные устройства могут быть значительно сэкономлены, если для стыковки заготовок предусматриваются вспомогательные средства. В этом случае заготовки уже пригнаны друг к другу, и зажимное устройство требуется только для их фиксации. К вспомогательным средствам, в частности, относятся:

- Разметка
- Соединение в шип.
- Зацепление
- Центровка.

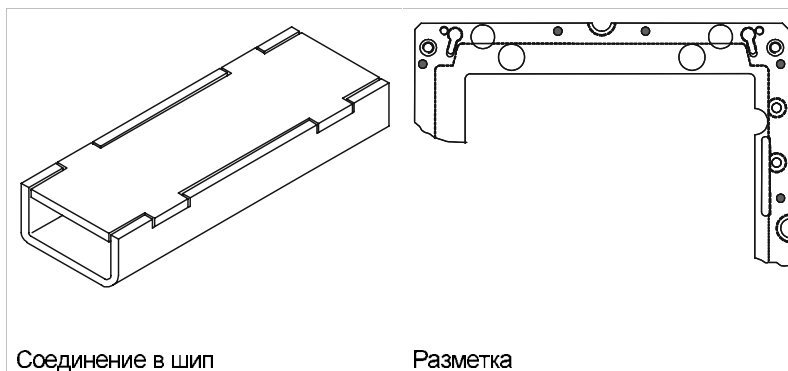
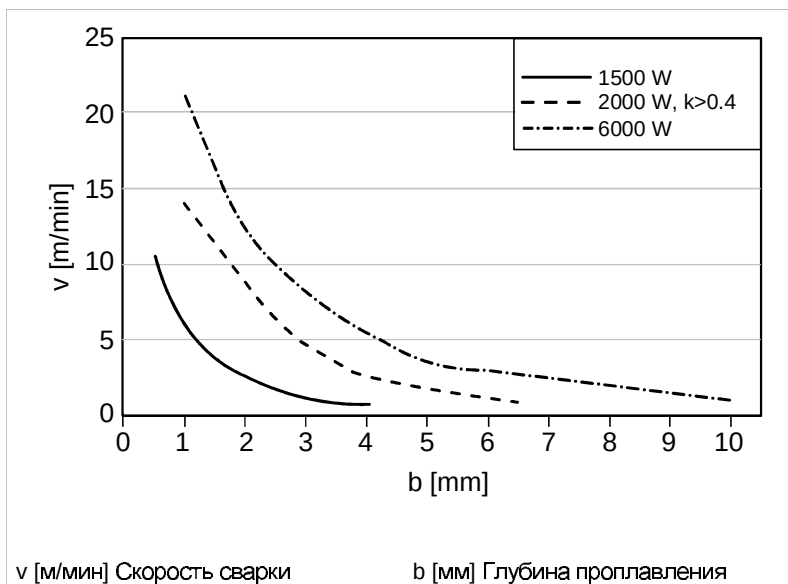


Рис. 48227, 48228

Мощность лазера и скорость сварки



Скорости сварки и глубина проплавления в зависимости от мощности лазера

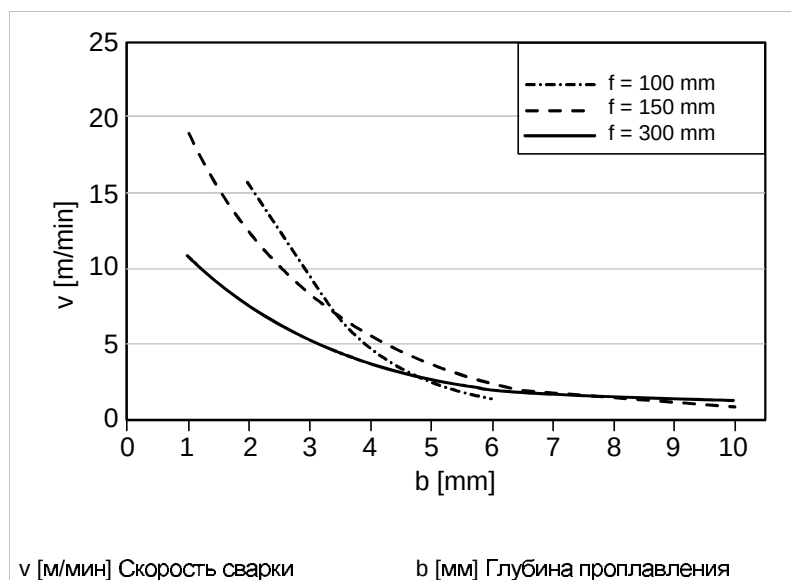
Рис. 25390ru

Мощность лазера должна подстраиваться под толщину заготовки: чем больше толщина материала, тем выше необходимая для сварки мощность лазера.

При высоких показателях мощности лазера могут также достигаться более высокие показатели скорости сварки и глубины проплавления.

Скорость сварки может влиять на глубину и геометрию сварных швов. При высоких скоростях образуются тонкие, но не очень глубокие швы. Кроме того, за счет правильного выбора скорости сварки может улучшаться структура шва. Это важно в тех случаях, когда свариваются материалы, расплав которых при застывании склонен к росту твердости или усиленному растрескиванию.

Качество луча и главное фокусное расстояние



Скорости сварки в зависимости от главного фокусного расстояния

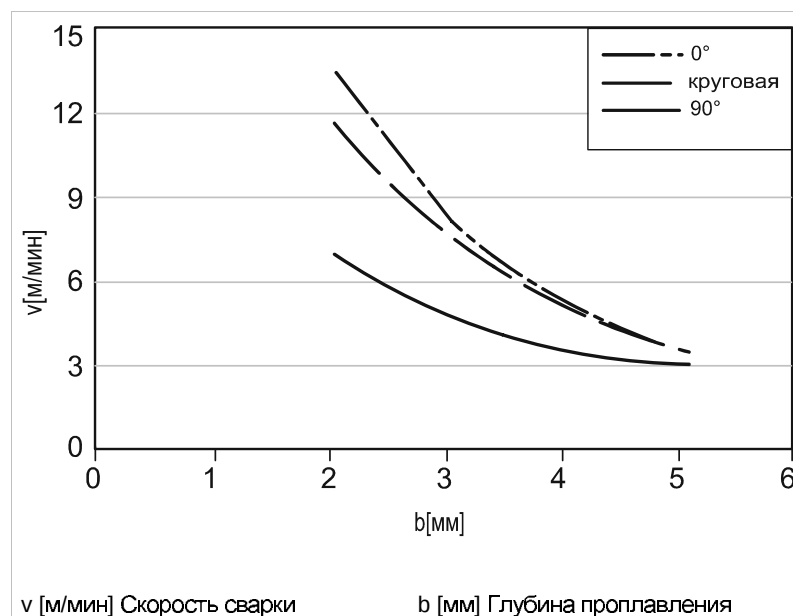
Рис. 25391ru

Под качеством луча подразумевается его способность фокусироваться. Считается, что лазер генерирует лазерный луч хорошего качества, если при большой глубине резкости этот луч способен фокусироваться в фокальное пятно небольшого размера.

С одной стороны, при лазерной сварке имеет преимущество луч с малым диаметром фокуса, способный концентрировать высокую плотность энергии на минимальной площади и тем самым обеспечивать высокие скорости сварки. С другой стороны, глубина резкости должна обеспечивать глубину проплавления. Если главное фокусное расстояние и диаметр фокуса малы, достигаются самые высокие скорости сварки при малой глубине проплавления.

Высокие скорости сварки с большой глубиной сварных швов достигаются только при больших фокусных расстояниях.

Поляризация



Скорость сварки в зависимости от поляризации

Рис. 25392

Поляризация лазерного луча влияет на поперечное сечение глубоких сварных швов. При линейной поляризации максимальная глубина проплавления достигается, если направление колебаний световых волн параллельно направлению подачи и луч направляется на плоскость сварки под плоским углом. Минимальная глубина достигается, если поляризация и направление подачи перпендикулярны друг другу. Этот эффект усиливается с увеличением скорости сварки.

При непрерывной сварке в одном направлении, например, при сварке труб, из этого эффекта извлекается польза. Однако, если сварка выполняется в разных направлениях, он представляет собой помеху. В этих случаях работы проводятся с помощью CO_2 -лазеров с циркулярно поляризованным лучом. Тогда результат сварки не зависит от направления шва.

2.4 Преимущества и возможности применения

Если сравнивать лазерную сварку с традиционными способами сварки, при которых используется световая дуга, ее большим преимуществом является возможность глубокого проплавления материала. При других способах невозможно достичь плотности энергии, требуемой для создания эффекта глубокой сварки.

Прочие преимущества

- Наряду с глубокой сваркой электронным лучом, только лазер способен достигать такой высокой плотности энергии, которая необходима для этой сварки.
- Заготовки свариваются бесконтактно и с высокой скоростью. Это сокращает время на их обработку.
- Образуются очень тонкие швы с оптимальным соотношением глубины и ширины. Их деформации минимальны, а прочность высока.
- Возможно целенаправленное энергетическое воздействие на небольших участках. За счет этого сильно сужается зона теплового влияния, термическая нагрузка на заготовку, а также ее деформация минимальны.
- С помощью лазерной сварки возможна обработка труднодоступных участков внутри заготовки.
- Формирование тонкой, равномерной поверхности сварных швов и незначительное образование брызг позволяют сократить объем последующей обработки или вовсе отказаться от нее.
- Хорошая управляемость лазерного луча допускает высокую степень автоматизации процесса сварки. Кроме того, лазерная сварка может хорошо комбинироваться с другими рабочими операциями.
- Хороший контроль процесса за счет регистрации параметров системой управления станка и датчиками.

Возможности применения

В промышленной практике лазерная сварка применяется преимущественно для соединения различных подверженных деформациям частей, материалов с покрытиями и пакетов металлических листов.

Легирующие элементы определяют свариваемость материалов и, таким образом, те области, в которых может применяться CO₂-лазер.

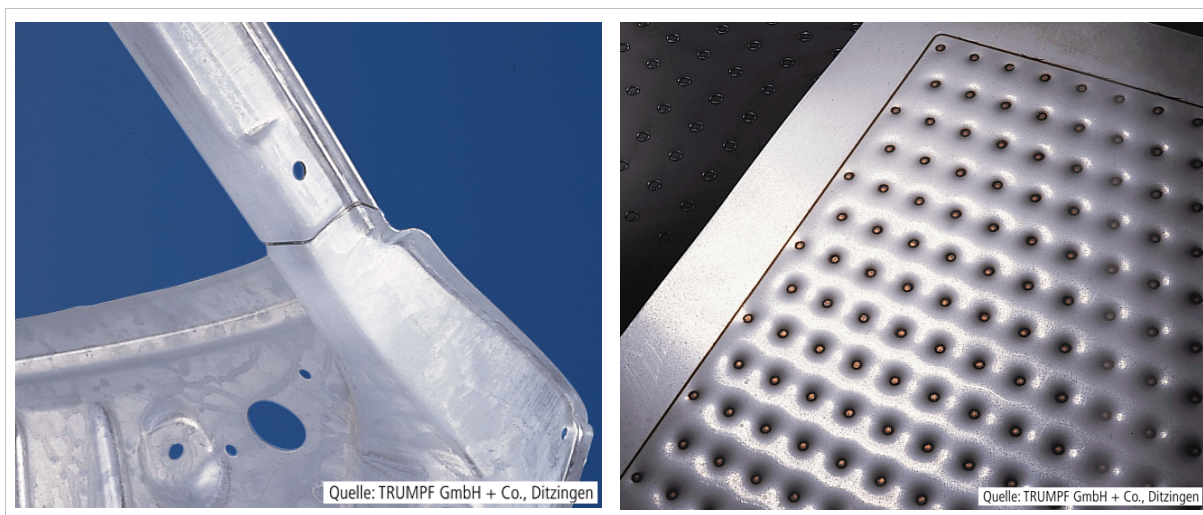
Сталь

Свариваемость стали, из которой состоят заготовки, зависит, в первую очередь, от содержания в ней углерода. Хорошо сваривается конструкционная сталь с содержанием углерода менее 25 %. С повышением содержания углерода до 35 % свариваемость ухудшается. Причина: Углерод влияет на повышение твердости сварного шва. В шве возникают напряжения, которые при охлаждении могут приводить к образованию трещин. В таких случаях хорошо зарекомендовали себя предварительный нагрев заготовок перед сваркой и медленное охлаждение сварного шва при застывании расплава.

Сталь с содержанием углерода свыше 35 % сваривается очень плохо.

Хромоникелевые сорта стали, как правило, хорошо свариваются и, благодаря своей небольшой теплопроводности, допускают сварку с высокими скоростями. Если при сварке подается защитный газ, может образовываться валик сварного шва, не имеющий оксидного слоя.

Примеры:



Слева: Сваренные CO₂-лазером составные заготовки
Справа: Сваренный CO₂-лазером пластинчатый теплообменник

Рис. 126_020, 126_022

Цветные металлы

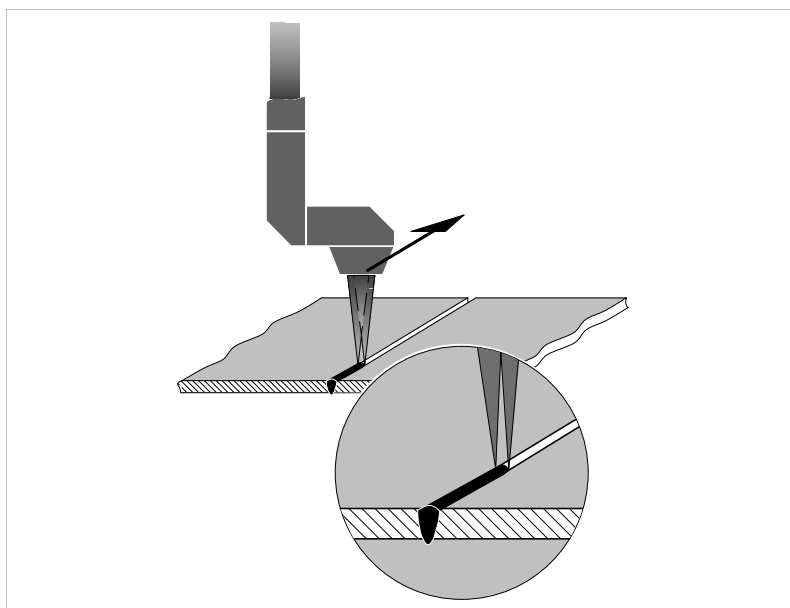
По сравнению со сталью, цветные металлы, как правило, свариваются хуже. Это объясняется тем, что у этих сплавов коэффициент поглощения лазерного излучения ниже, чем у стали.

Здесь принципиальное преимущество перед CO₂-лазером имеет алюмо-иттриевый твердотельный лазер с неодимовым легированием (Nd:YAG): Длина волны Nd:YAG-лазера лучше поглощается цветными металлами, чем длина волны CO₂-лазера. Тем не менее, в настоящее время сварка многих цветных металлов выполняется с хорошими результатами.

Некоторые примеры:

При сварке **алюминия** и **алюминиевых сплавов** из-за образования жидкотекучего расплава необходимо с большой осторожностью осуществлять подачу рабочих и защитных газов. Точное согласование составов газов и скоростей их потоков в процессе сварки обеспечивает образование очень качественных сварных швов.

Лучшее перекрытие стыковых зазоров и уменьшение выплесков из шва возможны при использовании двухлучевой технологии TwistLas. За счет оптимального формирования лучей в фокусирующей оптической системе на заготовке образуются 2 отдельных точки фокуса с регулируемым расстоянием друг от друга. С помощью этого "двойного фокуса" паровой канал расширяется настолько, что выплесков из шва не происходит. Система TwistLas применяется, в основном, для обработки алюминия и алюминиевых сплавов. Крайне высокая жидкотекучесть их расплава очень легко приводит к образованию неравномерного сварного шва.



Сварка с двойным фокусом

Рис. 17271

Титан и титановые сплавы хорошо свариваются лазером. Однако, одно их свойство затрудняет процесс сварки - они активно реагируют с главными составляющими воздуха: кислородом и азотом. В этом случае как при сварке, так и при охлаждении сварного шва необходимо целенаправленно подавать защитный газ или даже работать в защитной газовой атмосфере.

Цветные и благородные металлы практически не поддаются сварке CO₂-лазером. Для них применяется твердотельный Nd:YAG-лазер, так как эти металлы способны поглощать его излучение в большей степени. Это касается, прежде всего, ювелирной промышленности.

2.5 Критерии высокого качества швов

К сварному шву предъявляются высокие требования.

Ширина и глубина

Ширина и глубина шва должны достигать соответствующих значений, так как они определяют прочность шва. Как правило, ширина и глубина должны сохраняться неизменными по всей длине шва.

Металлургические свойства

Для всех металлических сварных швов действует правило: Структура шва должна быть по возможности однородной и мелкозернистой. Прочие свойства шва зависят от компонентов сплава.

В сварном шве смешиваются расплавы стыкуемых деталей. Если соединяются детали из одного и того же материала, свойства шва могут соответствовать свойствам основного материала. Если стыкуемые детали состоят из разных материалов или используются присадки, образуется сплав. В зависимости от используемых материалов шву могут придаваться определенные свойства: Хром или никель делают шов более коррозионностойким. Использование в качестве компонента сплава кремния предотвращает образование температурных трещин при сварке деталей из алюминиевых сплавов.

Дефекты шва



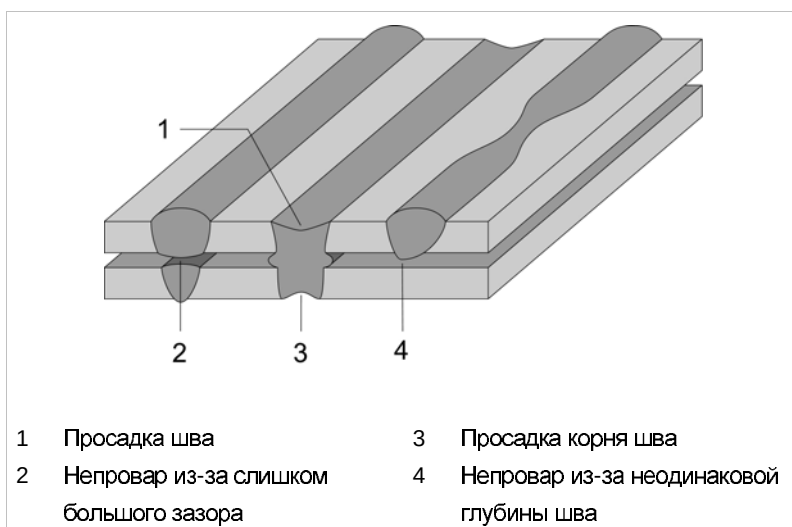
Внешние и внутренние дефекты шва, возможные при лазерной сварке - на примере соединения встык

Рис. 48047

Технические нормы различают внешние и внутренние дефекты шва.

Внешние дефекты шва	Последствия
Непровар или подрез в корне	В этих местах может произойти разрыв шва.
Выплеск расплава	При выплеске расплава из шва образуются лунки, снижающие прочность. Кроме того, шов становится проницаемым.
Просадки шва и его корня	Уменьшают сечение и вместе с тем прочность шва.
Смещение кромок в стыковом соединении с бессосным швом	Уменьшает сечение шва.
Впадины в конце шва (кратеры)	Уменьшают сечение шва; образуются, если лазер слишком быстро отключается.
Окисление верхнего и нижнего валиков	Снижается коррозионная стойкость нержавеющей стали.
Брызги на заготовке или шве	Причиняют неудобства и вызывают необходимость чистовой обработки.

Табл. 5-4



Дефекты, возможные при выполнении глубокой сваркой соединения внахлестку

Рис. 48048

Дефекты шва, связанные с недостатками качества материала или неверно заданными технологическими параметрами:

Внутренние дефекты шва	Последствия
Непровар	Стыковой зазор неполностью заполнен.
Поры	В шве присутствуют мелкие пузырьки воздуха и газа.
Трещины на поверхности шва или в заготовке	Образуются, например, из-за напряжений или сжатия материала при остывании.

Табл. 5-5

Теплопередача и деформация

Расплав отдает тепло окружающему его материалу. Даже небольшие количества тепла, образующиеся в процессе лазерной сварки, могут вызывать деформации заготовок или повреждения чувствительных деталей.

Для достижения высокого качества сварки заготовка должна как можно меньше нагреваться, а тепло - хорошо отводиться. При сварке прерывистыми швами заготовка нагревается менее сильно, чем при сварке сплошными швами. Ее деформация, соответственно, меньше. Если лазер работает в импульсном режиме, материал имеет возможность остывать в паузах между импульсами. С помощью охлаждающих устройств, хорошо отводящих тепло, остывание может быть ускорено.

Большое количество сварных точек и швов способствует сильному нагреву заготовки. В целях уменьшения деформаций последовательность сварочных операций определяется таким образом, чтобы заготовка нагревалась равномерно.

2.6 Станки и установки

Существует множество факторов, от которых зависит конструкция лазерной сварочной установки:

- Форма заготовки.
- Геометрия сварного шва.
- Тип сварного шва.
- Количество изделий.
- Степень автоматизации процессов изготовления.
- Технология и материал.

Одномерные установки

Для сварки труб и кромок достаточно установок лишь с одной осью движения, таких как станок для сварки кромок или трубосварочная установка. В них перемещается либо заготовка, либо оптика обработки.

Трёхмерные установки

Чаще всего лазерным лучом выполняется соединение трёхмерных деталей, при котором необходима такая же геометрия сварных швов. В этих случаях используются координатно управляемые лазерные установки с 5 осями движения и подвижной оптикой. В автомобильной промышленности, как правило, применяются роботы в комбинации с твердотельными лазерами.

Установки для сварки со сканированием

Для сварки со сканированием на выбор предлагаются 2 концепции: установка сканерной сварки и робот, оснащённый сканирующей оптикой.

В установке сканерной сварки заготовка позиционируется в рабочей зоне под сканирующей оптикой и затем сваривается. Если требуется быстрая сварка множества деталей, они могут также непрерывно проводиться через зону действия оптической системы. В этом случае говорят о "летучей" обработке.

Если сварка осуществляется с помощью робота, он движется вдоль крупных контуров, например, контура автомобильной дверцы. Сканирующая оптика обеспечивает точное направление лазерного луча и перемещает его по заготовке. Этот метод сварки предъявляет высочайшие требования к технике системы управления, так как она должна координировать совместные движения робота и сканирующей оптики. Система управления с миллисекундным тактом регистрирует точное пространственное положение робота и сравнивает его с запрограммированной траекторией движения. Если параметры расходятся, система управления компенсирует это с помощью сканирующей оптики.

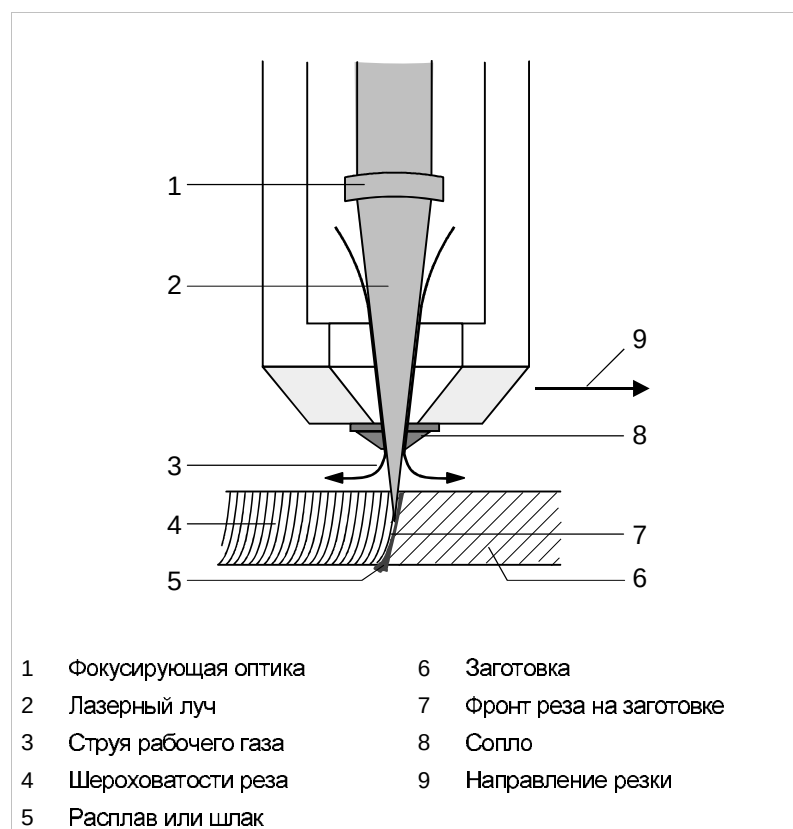
3. Лазерная резка

В 1970-е годы лазеры, в то время CO₂-лазеры мощностью от 200 до 500 Ватт, были впервые применены для резки. Однако, большой прорыв был достигнут только с разработкой установок лазерной резки. Это объясняется тем, что лазеру необходима система, которая способна управлять лазерным лучом и с предельной точностью направлять его в место обработки.

3.1 Принцип лазерной резки

Что происходит при соприкосновении лазерного луча с материалом?

Когда лазерный луч падает на заготовку, ее материал нагревается до такой степени, что начинает плавиться либо испаряться. Когда луч полностью проходит сквозь заготовку, начинается процесс резки. Лазерный луч перемещается вдоль контура детали и непрерывно расплавляет материал. Тот с помощью струи газа выдувается из образующейся при резке щели. Между деталью и остатком материала появляется узкий разрез. Струя используемого для резки газа выходит из сопла вместе с лазерным лучом.



Принцип лазерной резки

Рис. 24695



Прорезание Прежде чем начать вырезать контур, лазерный луч сначала должен в определенной точке пройти сквозь материал. Прорезание может осуществляться быстро, при полной мощности лазера, или медленно, в так называемом ступенчатом режиме. При образовании начального отверстия в ступенчатом режиме мощность лазера постепенно повышается, затем на время образования отверстия поддерживается на постоянном уровне, после чего снова медленно понижается.

Прорезание может также сопровождаться подачей газа, поддерживающего процесс и влияющего на результаты резки.

Выбор газа, используемого при прорезании или резке, зависит от того, какой материал обрабатывается и какие требования предъявляются к качеству заготовки.

В качестве газа для резки, как правило, применяют либо кислород, азот или аргон, либо просто воздух.

3.2 Способы резки

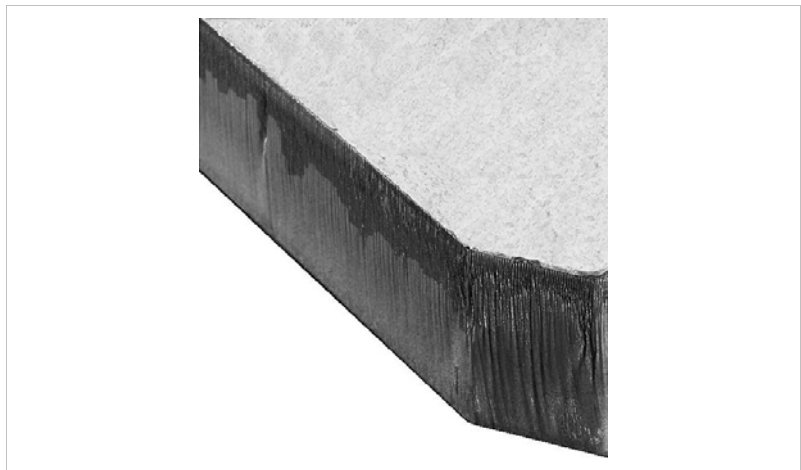
На сегодняшний день лазер справляется с очень разнообразными задачами, связанными с резкой, будь то образование с точностью до микрон прорезей в тончайших полупроводниковых чипах или качественная резка стальных листов толщиной в 30 мм. Для их выполнения применяются различные способы резки.

Кислородная резка: резка выжиганием

Резка выжиганием, при которой используется кислород (чистота газа 99.95, объемный процент 3.5) и создается давление максимум 6 бар, применяется преимущественно для конструкционной стали. Разогретый металл реагирует в прорези с кислородом, горит и окисляется. Образующийся расплав вместе с оксидами железа выдувается из прорези.

В процессе окисления образуется дополнительная энергия (экзотермическая реакция), позволяющая выполнять резку с большей скоростью, а также обрабатывать материалы большей толщины, чем это возможно при резке с использованием азота.

Недостатком этого способа является образование на поверхностях реза оксидного слоя. Если в последующем на детали наносится лакокрасочное покрытие, оксидный слой необходимо предварительно удалить. Если он выступает наружу, деталь становится незащищенной от коррозии.



Кислородная резка: Фрагмент кромки реза

Рис. 24694

Резка с азотом: резка с расплавлением

Для резки с расплавлением в качестве режущих газов используются азот или аргон. При этом способе материал также сначала расплавляется, а затем с помощью газа - как правило, азота - выдувается из прорези. Реакции с расплавленным металлом не происходит. Исключение составляет титан: Если режется титан, в качестве режущего газа должен использоваться аргон, так как титан активно реагирует с азотом (чистота аргона: 99.996, объемный процент 4.6). Данный способ резки практикуется с давлением газа от 2 до 20 бар (так называемая резка высокого давления) при чистоте азота 99.999 и объемном проценте 5.0.

Резка высокого давления

	O ₂	N ₂
	сопло 1.2 мм	сопло 2.3 мм
1 – 3 мм	4 бар	20 бар
5 – 30 мм	0,3 бар	20 бар

Сравнение параметров давления при резке выжиганием и резке высокого давления с азотом

Табл. 5-6

За счет высокого давления газа на кромках реза почти не образуется грата и не остается шлака. Дополнительной обработки не требуется.

Кроме того, использование инертных газов позволяет получать свободные от оксидов кромки реза, однако затрудняет прорезание в начале процесса резки. По этой причине в некоторых установках для резки предусмотрена возможность выполнять прорезание с подачей кислорода, а затем продолжать работу с подачей азота.



Резка с азотом: Деталь с кромкой реза, свободной от оксидов

Рис. 078_021

Резка со сжатым воздухом

Для резки тонких листов металла также может использоваться сжатый воздух. Давления в 5 - 6 бар достаточно, чтобы выдувать расплав из образующейся прорези. Так как воздух на 80 % состоит из азота, резка со сжатым воздухом практически представляет собой резку с расплавлением. Однако, поскольку воздух должен быть предварительно сжат, высушен и обезмаслен, этот способ резки не совсем себя экономически оправдывает. То, листы какой толщины могут разрезаться, зависит от давления сжатого воздуха и мощности лазера. При мощности лазера 5 кВт и давлении 6 бар возможна резка листа толщиной 2 мм без образования грата. Наилучшие результаты достигаются при резке алюминия.

Лазерная резка с плазменной поддержкой

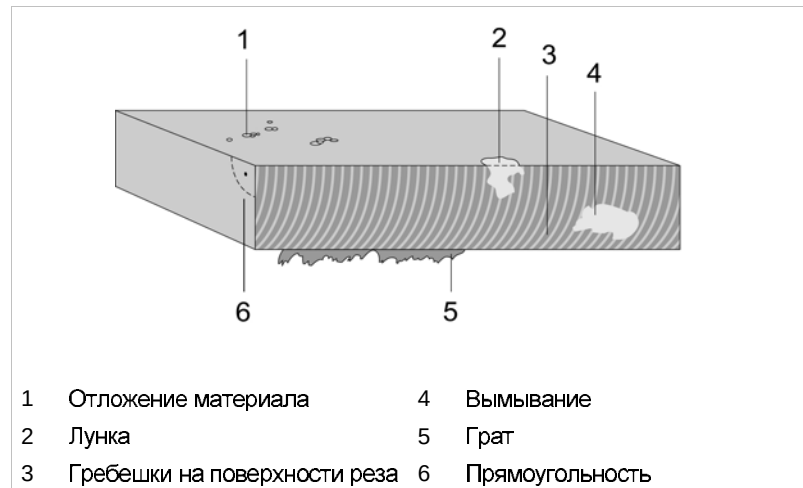
При лазерной резке с плазменной поддержкой в прорези образуется плазменное облако. Оно состоит из ионизированных паров металла и ионизированного газа, используемого для резки. Плазма поглощает часть излучения CO₂-лазера, которая иначе уходила бы неиспользованной через образуемую прорезь, и передает энергию кромке реза сбоку. Таким образом, материал расплавляется быстрее, что способствует увеличению скорости резки.

Однако, образование плазменного облака полезно только при резке тонких листов металла толщиной до 3 мм. При большей толщине металла оно, присутствуя в прорези, препятствует полному прохождению лазерного луча сквозь заготовку. Процесс резки "обрывается". Чтобы этого избежать, процесс резки металлических листов большой толщины контролируется и регулируется сенсорами, которые не допускают образования в прорези плазменного облака (PlasmaLine).

Тонкие листы металла могут разрезаться с очень высокой скоростью. При толщине листа 1 мм возможна скорость 40 и более метров в минуту. Однако, кромка реза получается более шероховатой, чем при азотной резке с расплавлением. Максимальная толщина листа, в свою очередь, зависит от мощности лазера. При мощности 6 кВт этим способом могут, например, особенно быстро резаться алюминиевые листы толщиной до 4 мм.

3.3 Критерии качества резки

Критерии качества резки, такие как отсутствие лунок, грат или гребешков на поверхности реза могут быть оценены невооруженным глазом. Для определения глубины шероховатости, прямоугольности и ширины прорези требуются вспомогательные средства. На практике необходимо определять, в каком случае какие критерии важны. Решающим при этом является назначение детали.



Критерии качества кромки реза

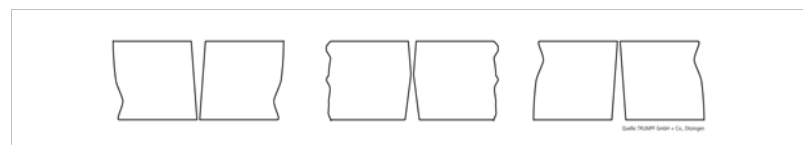
Рис. 48022

Глубина шероховатости

При вырезании лазерным лучом контуров на поверхностях резания образуются вертикальные бороздки. Их глубина определяет глубину шероховатости. Чем меньше глубина шероховатости, тем более гладкой является поверхность резания. При лазерной резке CO₂-лазерами принципиально считается, что глубина шероховатости увеличивается с увеличением толщины материала.

Форма и ширина прорези

При лазерной резке образуется прорезь, поверхности которой от верхней до нижней кромки реза, как правило, не параллельны друг другу.



Формы прорези при лазерной резке

Рис. 079_024G

Ширина прорези увеличивается с увеличением толщины материала. Она зависит от следующих факторов:

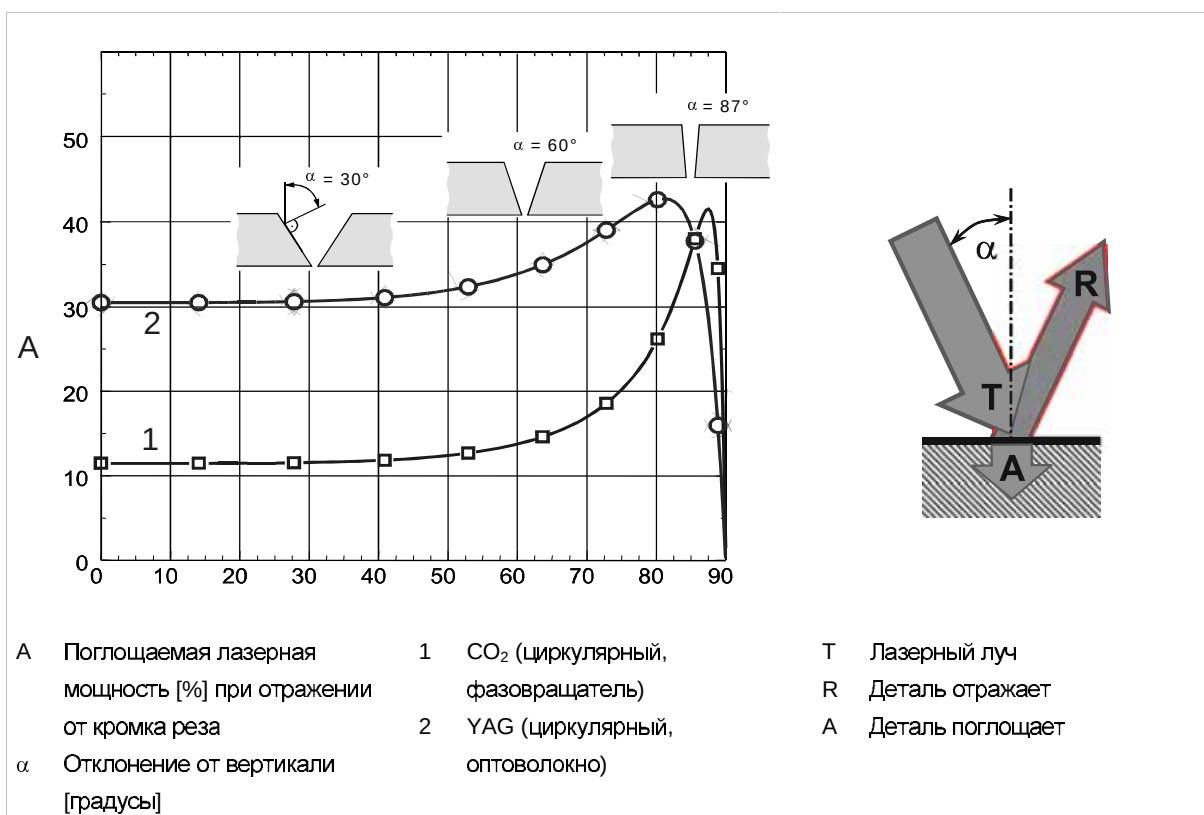
- Диаметр фокуса.
- Материал
- Длина волны.
- Способ резки.

Ширина прорези варьируется от 0.15 мм (толщина материала 1 - 6 мм) до 0.5 мм (толщина материала 20 - 30 мм). Она должна оставаться одинаковой во всей рабочей зоне установки, так как в противном случае не будут соблюдены размеры и контуры деталей.

CO₂-лазерами могут выполняться более узкие резы, чем твердотельными лазерами. Причины тому:

- Максимальное поглощение мощности CO₂-лазеров происходит при угле 87°, в отличие от угла 82° для YAG-лазеров.
- Поглощение при угле $\alpha = 0^\circ$ составляет у CO₂-лазеров 12 %, при $\alpha = 87^\circ$ 42 %. Излучение YAG-лазера, напротив, поглощается уже при 0° на 32 % и на 43 % при 82° (сравн. стр. 5-4).

Поэтому CO₂-лазер применяется для сварки и резки как тонких, так и толстых листов металла, в то время как YAG-лазер - только для обработки толстых листов.



Поглощаемая лазерная мощность в зависимости от угла падения луча

Рис. 48223, 48222ru

Отсутствие грата

Отсутствие грата является одним из наиболее важных критериев качества лазерной резки, ведь грат всегда необходимо удалять, а это - дополнительная рабочая операция. Возможно образование различных видов грата: от комковатых остатков шлака, которые легко удаляются, до острых металлических наплывов, крепко спекшихся с нижней кромкой реза.

Материал и мощность лазера

Мощность лазера должна быть согласована со способом резки, видом и толщиной материала. Максимально возможная разрезаемая толщина зависит от вида материала и мощности лазера. Считается: С повышением мощности лазера также увеличивается толщина материала, которая может быть подвергнута обработке.

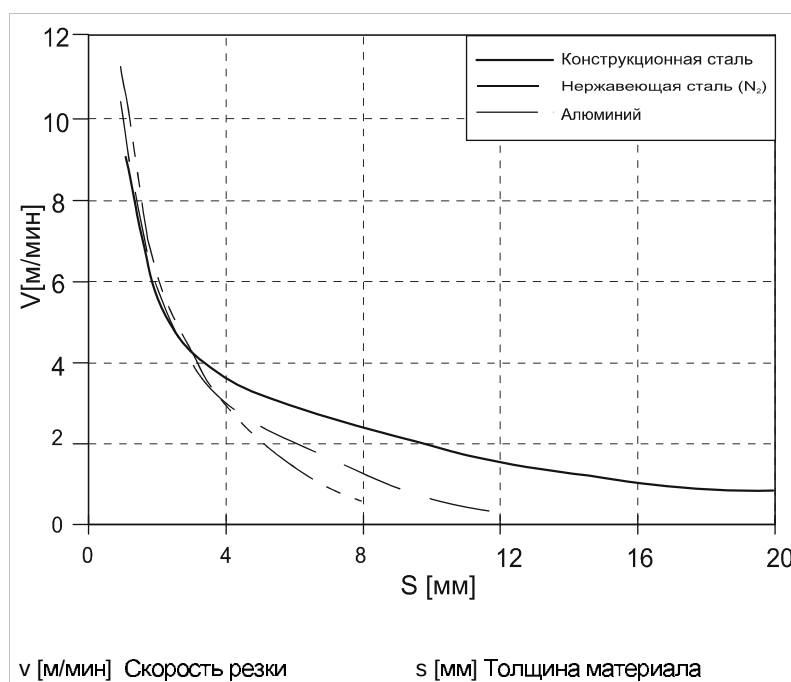
Режим работы

Режим работы - непрерывный или импульсный - определяет, какое количество энергии и как долго будет передаваться заготовке, т.е. непрерывно или с короткими интервалами. Стандартные контуры в миллиметровом и сантиметровом диапазоне вырезаются при непрерывном режиме работы лазера. Мелкие, филигранные контуры, напротив, вырезаются импульсами с низкими частотами, так как иначе могут иметь место деформации. В паузах между импульсами тепло отводится, и заготовка остывает.

Скорость резки

Скорость резки – так же, как и мощность лазера – необходимо согласовывать с видом и толщиной материала. Неверно выбранная скорость резки может приводить к образованию шероховатостей, грата или проплавлений на вырезаемом контуре. При слишком быстром вырезании контура может прекратиться полное прорезание материала.

Принципиально считается: Чем большая мощность лазера используется, тем быстрее может выполняться резка. При одинаковой мощности лазера скорость резки снижается с увеличением толщины материала.



Максимальная скорость резки при мощности лазера 4000 Вт в зависимости от толщины материала

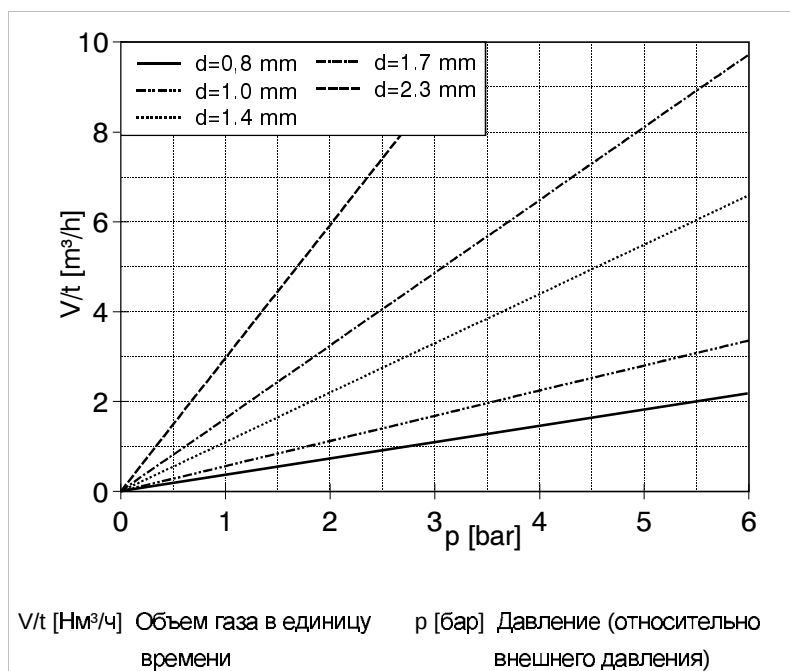
Рис. 18730ru

Расход газа при резке выжиганием и резке с расплавлением

Расход используемого для резки газа зависит от его давления и размера отверстия сопла.

Принципиально считается: Чем выше давление и больше отверстие сопла, тем выше расход используемого для резки газа.

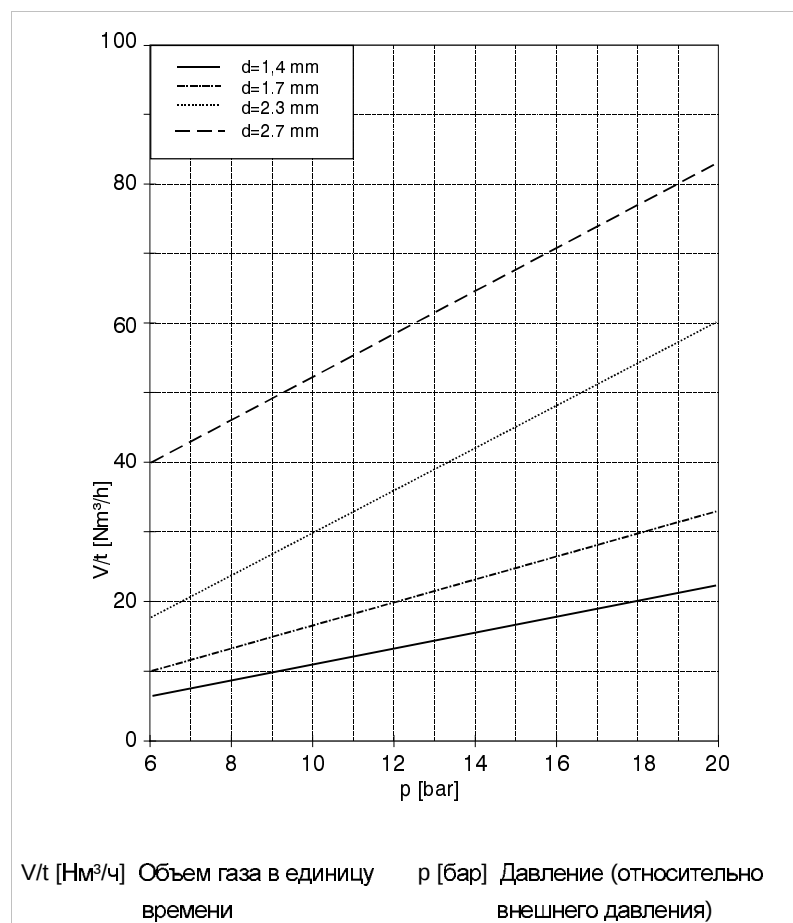
Пример: кислородная резка при давлении газа до 6 бар.



Максимальный расход используемого для резки газа в час при непрерывной резке

Рис. 8809ru

Пример: Резка с подачей азота давлением до 20 бар.



Максимальный расход используемого для резки газа в час при непрерывной резке

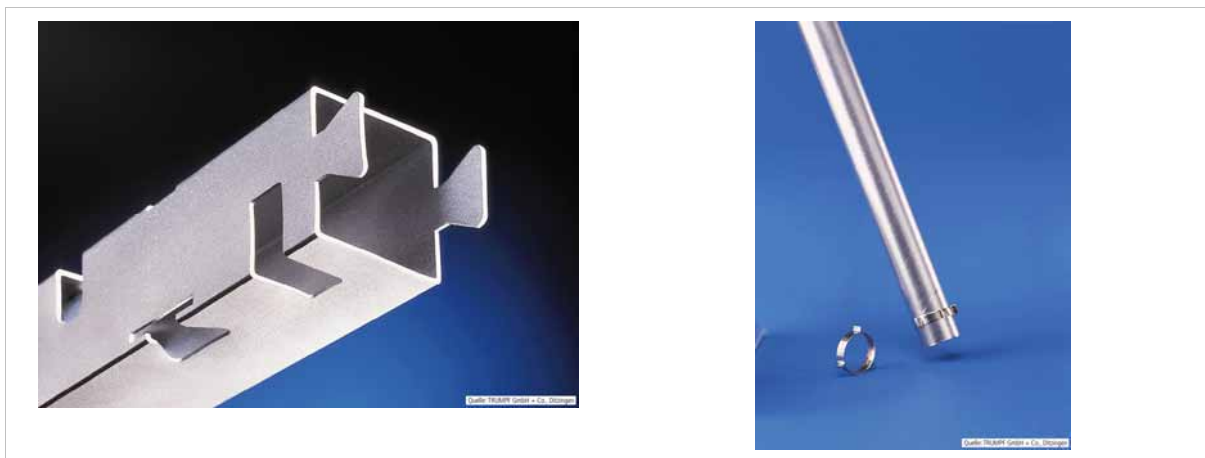
Рис. 23507ru

3.4 Преимущества и возможности применения

- Преимущества** По сравнению с другими способами разделения материалов, такими как плазменная резка, вырубка, высечка или электроэрозионная обработка, лазерная резка имеет множество преимуществ:
- Возможна бесконтактная и бессиливая обработка заготовки.
 - В отличие от вырубки и высечки, без единой смены инструмента могут создаваться контуры почти любой формы.
 - С помощью лазерного луча возможно вырезание как очень больших контуров любых форм, так и мелких, филигранных и сложных контуров. Особенно быстро, путем лишь нескольких врезаний, обрабатываются геометрические контуры.
 - Процесс разделения материала выполняется с большой точностью. Ширина образующейся прорези очень мала и может сохраняться почти неизменной. Допуски до 0.05 мм могут выдерживаться даже при серийном производстве.
 - Скорость резки высока. За счет этого возможно значительное, например, по сравнению с электроэрозионной обработкой, ускорение производственного процесса.
 - Благодаря высокой плотности энергии, зона теплового воздействия может сохраняться минимальной: возможна глубина закаленного слоя от 0.1 до 0.2 мм. При кислородной резке образуется оксидный слой.
 - Незначительное нагревание материала минимизирует деформации заготовки.
 - Глубина шероховатости поверхностей резания минимальна: менее 100 мкм. Дополнительная обработка заготовки не требуется.
 - Резка наиболее часто применяемых марок стали выполняется без образования грата, его последующее удаление не требуется.

Возможности применения

В промышленной практике с помощью лазерного луча обрабатываются плоские заготовки, а также круглые и многоугольные трубы и профили, имеющие различное поперечное сечение и выполненные из различных материалов.



Вырезанные лазером труба прямоугольного сечения и центrovочная звездочка

Рис. 078_20, 081_029

Лазерной резке подвергаются, главным образом, такие материалы, как конструкционная и инструментальная сталь, нержавеющая сталь (хромоникелевая), а также алюминий и алюминиевые сплавы.



Слева: Вырезанные лазером детали дверцы автомобиля из конструкционной стали
Справа: Вырезанный лазером чайник из нержавеющей стали

Рис. 076_017, 083_034

В качестве отрезного инструмента для неметаллических материалов, таких как картон, дерево, кожа, стекло, керамика, синтетические материалы (например, плексиглас, полиэтилен, полиамид, полиуретан и т. д.), лазерный луч может использоваться только при определенных условиях.

Указание

При лазерной резке синтетических материалов, в частности, могут выделяться ядовитые вещества. Резка синтетических материалов на станках лазерной резки фирмы TRUMPF запрещена!

3.5 Станки и установки

Для резки как плоских металлических листов метровых размеров, так и трехмерных заготовок лазерному лучу требуется фокусирующая оптика, а также машина, которая бы его направляла и обеспечивала все необходимые движения. То, какой спектр заготовок может обрабатываться лазером, определяет конструкция соответствующего станка либо установки.

Оси движения

Для вырезания контуров лазерный луч и заготовка должны двигаться относительно друг друга. Во время процесса обработки перемещается либо режущая головка, либо заготовка, либо совместно головка и заготовка. В зависимости от обрабатываемой детали, плоской или объемной, требуются одна или несколько осей движения. Все большее пространство также получают роботы.

Одномерные лазерные установки

Одномерные лазерные установки используются только для прямолинейной резки, например, для нарезки труб.

Двухмерные лазерные установки (установки лазерной резки планшетного типа и станки для обработки труб)

С помощью двухмерных лазерных установок производится вырезание контуров на плоских металлических листах и трубах. Чаще всего используются установки, в которых режущая головка перемещается над заготовкой.

Трехмерные установки

Трехмерные установки способны вырезать контуры в объемных заготовках. Для этого их оптика должна иметь по меньшей мере 5 осей движения, работать по 3 пространственным осям и дополнительно иметь оси вращения и качания. В особых случаях может перемещаться и заготовка.

Труборезные установки

На труборезных установках производится вырезание контуров на трубах и профилях. Оптические устройства обработки имеют от 2 до 5 осей движения. Дополнительно здесь также всегда может перемещаться заготовка.

Роботы

Роботы приобретают все большую популярность как экономичная альтернатива трехмерной установки. Однако, они в состоянии обрабатывать и плоские заготовки. Комбинирование роботов с CO₂-лазерами долгое время оставалось трудной задачей, так как их лазерный луч не может проводиться к роботу по световодному кабелю. Но лазеры с диффузионным охлаждением все-таки решили эту проблему. Они компактны, легки и размещаются прямо на механической руке робота. Однако, недостатком роботов является то, что их точность ниже, чем точность координатных установок.

4. Разметка и кернение лазером

Разметка При разметке лазерный луч снимает с поверхности материала тончайший слой и таким образом изменяет ее цвет. Это незначительное воздействие на становится незаметным, например, после покраски заготовки.

Разметка лазером конструкционной стали, нержавеющей стали и алюминия либо его сплавов возможна с учетом следующих аспектов:

- Возможна обработка листов любой толщины.
- Поверхность листов должна быть обезжирена.
- Требуется малая мощность лазера.
- Положение фокуса должно быть на значительном расстоянии от поверхности материала.
- Используемый для резки кислород вызывает изменение цвета поверхности материала.
- Применение азота возможно при обработке конструкционной стали и нержавеющей сталей и противопоказано для алюминия и его сплавов, так как вызывает очень сильное отражение лазерного луча.

Кернение При кернении в поверхности материала лучом образуется точечное углубление. Это может осуществляться двумя способами:

- **Круговое кернение** При нем лазерным лучом описывают два круга. На конструкционной стали - два круга одинакового диаметром 0.6 мм, на нержавеющей стали - два концентрических круга диаметром 0.3 мм и 0.6 мм.
- **Точечное кернение** означает, что с помощью ступенчатого цикла, т. е. с пониженной мощностью лазера, образуется начальное отверстие.

Кернение лучше выполняется на конструкционной и нержавеющей стали. При кернении на конструкционной стали в качестве газа для резки применяется кислород, на нержавеющей стали - азот.

5. Лазерная обработка поверхностей

Под "обработкой" поверхности подразумевается изменение структуры или состава металлического материала в поверхностном слое заготовки.

К методам, при которых происходит изменение структуры, относятся мартенситное превращение, переплавка, оплавление и шоковая закалка.

Состав материала можно изменять путем добавления присадок. Это достигается такими методами, как легирование, нанесение покрытия и диспергирование.

Лазерная закалка = мартенситное превращение

Лазерная закалка основана исключительно на фазовом превращении и является важнейшим методом в обработке материалов. Этот процесс соответствует классическому мартенситному превращению. При нем за счет нагрева материала до температуры чуть ниже температуры плавления высвобождается углерод, который затем диффундирует в имеющуюся структуру железа. При очень быстром охлаждении материала углерод образует с железом новую структуру, которая называется мартенсит. Данный метод применяется, например, для закалки гибочных инструментов.

Материал

Хорошо подходят для закалки чугун и сталь с содержанием углерода от 0.3 % до 6.67 %. Особую роль при этом играет также структура материала. Мелкозернистая структура благоприятствует процессу, так как в ней углерод способен быстрее диффундировать. Сталь с большим содержанием железа и крупнозернистой структурой меньше подходит для лазерной закалки.

Геометрия заготовки и толщина материала

В зависимости от геометрии заготовки и толщины материала необходимо учитывать следующее:

- Для того, чтобы обеспечивался теплоотвод в остаток материала, должно иметься достаточное количество материала в боковых направлениях и в глубину.
- Закалка острых кромок или в зонах вблизи контуров, аккумулирующих тепло, требует особого подхода.
- Лазерная закалка практически не вызывает деформаций и не требует припусков для последующей обработки.

Глубина закалки

Так как при лазерной закалке изменяется структура только поверхностного слоя, возможная глубина закалки составляет от 0.4 мм до 1.0 мм. За счет целенаправленного создания зон аккумуляции тепла может достигаться большая глубина закалки.

5.1 Закалка CO₂-лазером

При закалке CO₂-лазером ввод лазерного излучения в материал обеспечивается за счет графитового покрытия равномерной толщины. Слой покрытия частично вваривается в поверхность и по завершении процесса, если необходимо, должен быть удален. Закалка без оксидирования возможна, но из-за сильного отражения лазерного луча связана с большими трудностями и неэкономична.

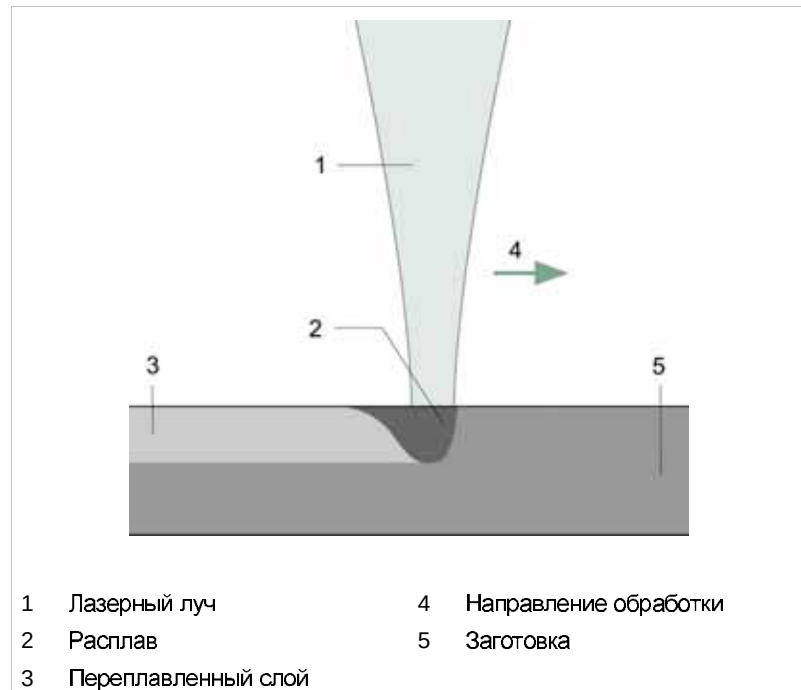
Закалка CO₂-лазером осуществляется либо с применением фасетной, либо с помощью сканирующей оптики.

Фасетная оптика При использовании фасетной оптики ширина дорожки определяется оптикой, благодаря чему она особенно хорошо подходит для закалки плоских заготовок.

Сканирующая оптика Сканирующая оптика позволяет программировать ширину дорожки: сканирующее зеркало приводится в колебательное состояние, и амплитуда колебаний определяет ширину дорожки. Дополнительно с помощью пирометра излучения может быть оптимально отрегулирована температура, так как важно, чтобы во всех зонах она поддерживалась постоянной.

5.2 Переплавка

При переплавке поверхность не только разогревается, но и подвергается непрерывному расплавлению. Когда расплав застывает, металл кристаллизуется и образует новую структуру. Она становится более равномерной и тонкой, чем была до обработки. Ее характеристики изменяются. В зависимости от материала, этим методом повышается степень твердости или коррозионная стойкость поверхности.



Переплавка

Рис. 48051

Переплавка применяется, главным образом, для обработки литых деталей. Примером тому служит кулачковый вал, управляющий клапанами двигателя в автомобиле.

Переплавка с присадочным материалом

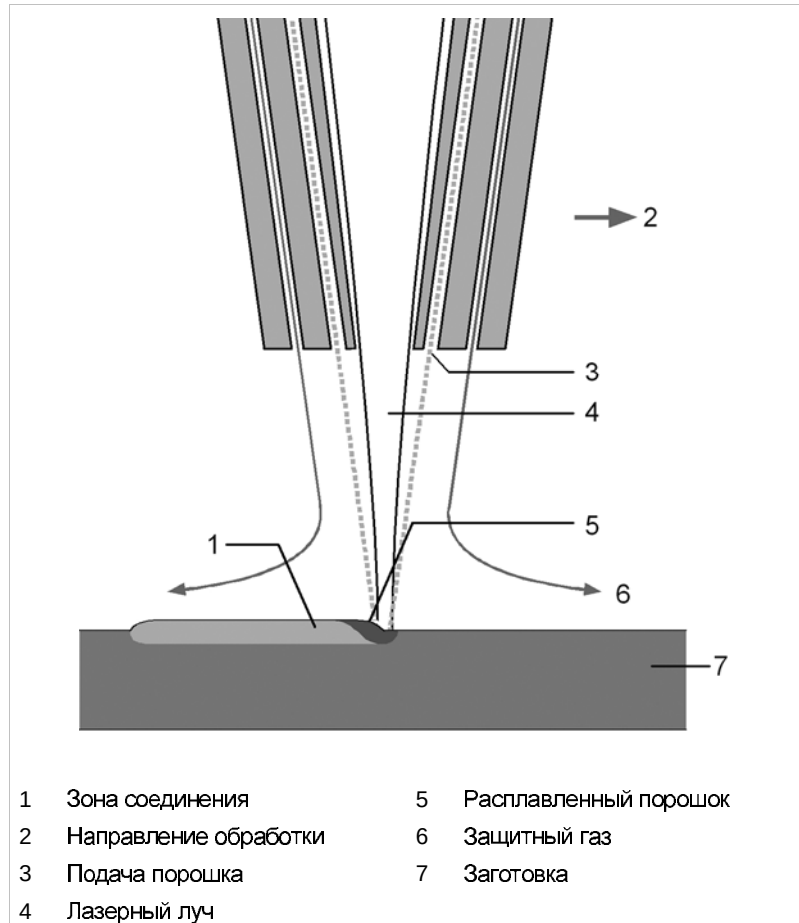
Присадочные материалы вводятся в расплав и изменяют свойства поверхностного слоя. Таким образом недорогие основные материалы могут приобретать высококачественную поверхность. Хром, никель и титан делают переплавленный слой более коррозионностойким. Карбиды повышают износостойкость.

Если расплав и присадочные материалы полностью смешиваются, речь идет о легировании. Если, напротив, присадочные материалы только закладываются в материал, речь идет о диспергировании.

Лазерная закалка и переплавка применяются, как правило, в особых случаях, например, для обработки объемных инструментов и частей, поверхности которых не могут быть упрочнены другими способами.

5.3 Легирование и диспергирование

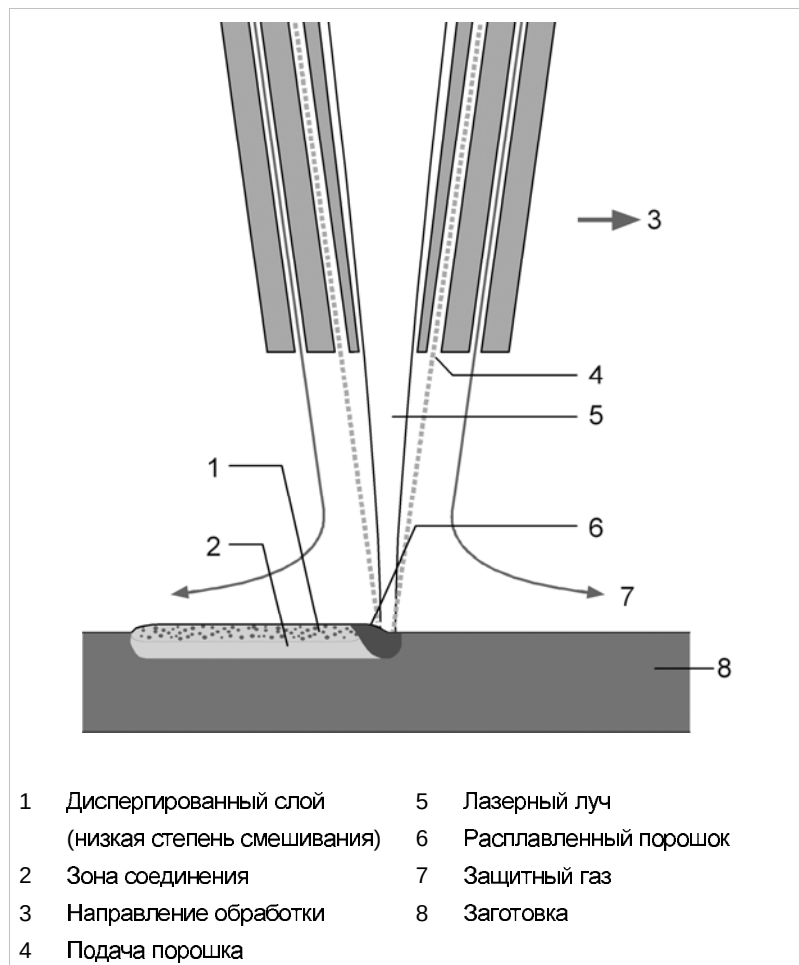
Легирование При легировании поверхность расплавляется при малой энергии лазера, и присадочный материал через сопло подается прямо в расплав. Присадочный материал расходится в расплаве, и образуется тонкий поверхностный слой.



Легирование

Рис. 48509

Диспергирование При диспергировании, в отличие от легирования, поверхности материала передается больше энергии. Расплавляется большее количество материала, и, опять же, через сопло в расплав подается присадочный материал. Однако, присадочный материал не расходится в расплаве, а образует на поверхности отдельный, тонкий слой.



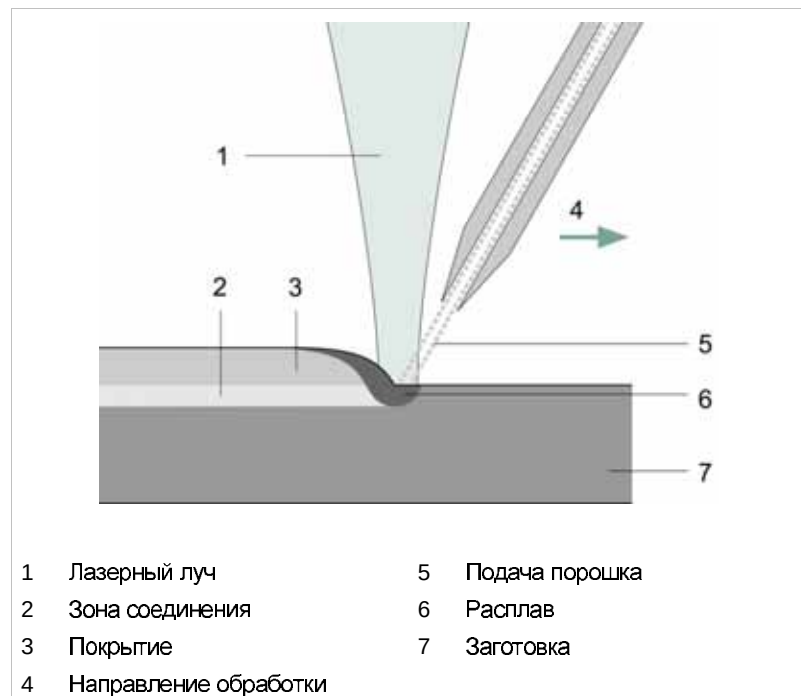
Диспергирование

Рис. 48510

5.4 Нанесение покрытий

При нанесении покрытий лазерным лучом расплавляется присадочный материал, который соединяется с поверхностью материала. Образуется отдельный слой толщиной от 0.5 до нескольких миллиметров.

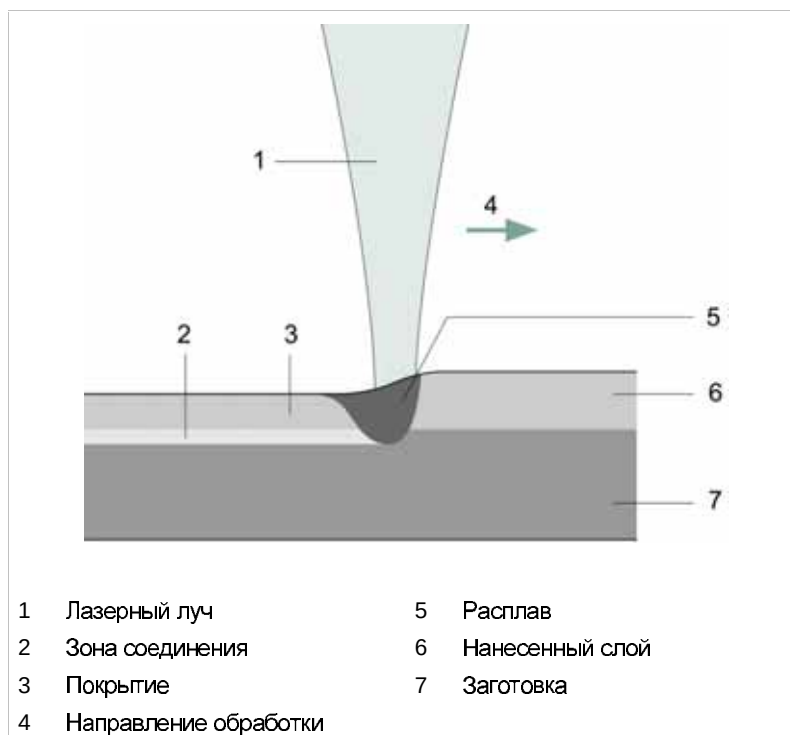
Подача присадочного материала осуществляется 2 различными способами. Первый: Присадочный материал в форме порошка подается через сопло прямо в расплав - аналогично технологии Direct Metal Deposition (DMD, см. следующий раздел).



Одноступенчатый цикл лазерного нанесения покрытия

Рис. 48052

Второй: На первом этапе присадочный материал наносится на поверхность заготовки. На втором этапе лазерный луч сплавляет нанесенный слой с основным материалом.



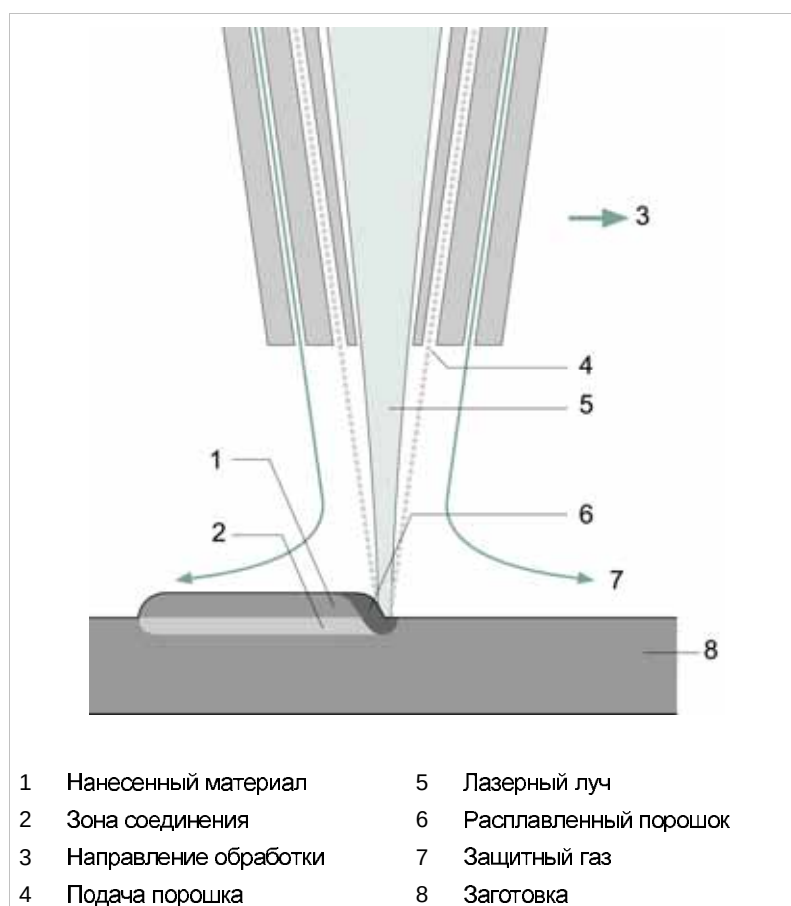
Двухступенчатый цикл лазерного нанесения покрытия

Рис. 48053

Данный метод подходит, прежде всего, для частичного изменения поверхностей заготовок. Так, например, на подверженные высоким нагрузкам клапаны двигателя (напр., в зоне открытия и закрытия) наносится защитное покрытие.

6. Direct Metal Deposition (DMD)

Технология Direct Metal Deposition представляет собой автоматизированную наплавку. Лазерный луч локально нагревает заготовку и создает на ее поверхности расплав. Тонкий металлический порошок соосно лазерному лучу струей подается в расплав и полностью расплавляется. При этом он соединяется с основным материалом. Толщина слоя составляет 0.2 - 1 мм. Возможно накладывание друг на друга множества слоев. В качестве защитного газа чаще всего используется аргон.



Автоматизированная наплавка, DMD

Рис. 48050

Для нанесения линий, поверхностей или форм обрабатывающая оптика перемещается над заготовкой. Сенсоры, регистрируя параметры распространения расплава, контролируют толщину слоя и могут регулировать подачу энергии. Слой приобретает одинаковую толщину, так как в местах, где луч проходит чаще, мощность лазера понижается.

Предварительная и последующая обработка требуется непременно. Перед наплавкой нового материала поверхностный слой должен быть снят до основного материала. После этого лазером производится грубое построение заранее запрограммированной геометрии. Когда заготовка остыла, может быть начата доработка, т. е. восстановление ее прежней формы путем фрезерования, точения, сверления или электроэрозионной обработки.

С помощью технологии DMD могут наплавляться как плоские слои, так и объемные формы. Основной материал и материал наносимой формы могут быть разными, но основной материал в любом случае должен быть металлом. Как правило, могут применяться порошки из инструментальной стали, нержавеющей стали, углеродистых или никелевых сплавов.

Благодаря высокой фокусируемости, связанной с этим большой плотности энергии, а также хорошей регулируемости лазерного луча, тепловое воздействие на заготовку очень незначительно по сравнению с традиционными сварочными технологиями. За счет полного расплавления металлического порошка образуются абсолютно плотные слои. Соединения отличаются высокой прочностью и устойчивостью к механическим нагрузкам, причем деформации основного материала минимальны.

Возможности применения

Возможности применения являются разнообразными, от производства штампов и пресс-форм до машиностроения и производства промышленного оборудования:

- Оптимизация характеристик, например, литевых пресс-форм: На корпус из меди, особенно хорошо отводящей тепло, наплавляется формирующая поверхность из износостойкой инструментальной стали. Это сокращает время цикла при литье под давлением и одновременно продлевает срок службы пресс-формы.
- Модификация существующих инструментов: При изменении дизайна не изготавливается новый инструмент, а только лишь изменяется необходимый элемент.
- Ремонт поврежденных компонентов оборудования.
- Изготовление антикоррозийных поверхностей для химической промышленности и производства промышленного оборудования.

Установка

Применяются координатные 5-осевые лазерные установки с программным управлением, наплавляющие трехмерные формы по заданным параметрам. Заготовка, как правило, неподвижна, а оптика обработки имеет 5 осей движения. В нескольких программируемых устройствах подачи держится наготове запас различных металлических порошков. Таким образом, могут наноситься слои различных материалов.



Глава 6

Резка труб и профилей

1.	Трубы и профили	6-3
1.1	Определения	6-3
1.2	Поперечные сечения какой формы могут обрабатываться лазером?	6-3
1.3	Качество	6-5
1.4	Возможности и ограничения при обработке труб на двух- и трехмерных установках	6-6
2.	Обработка искривленных поверхностей	6-9
2.1	Полигонализация контуров	6-9
2.2	Обработка контуров "в плоскости"	6-11
2.3	Регулировка расстояния	6-12
2.4	Зазор при резке труб круглого сечения	6-13
2.5	Обработка углов на трубах многоугольного сечения	6-14
	Коррекция зазора для резки	6-14
	Уменьшение подачи	6-16
3.	Влияние противоположной стороны	6-17
4.	Отрезание трубных элементов	6-18



1. Трубы и профили

1.1 Определения

Труба Открытое с двух сторон полое тело, длина которого больше удвоенного наружного диаметра. Для более точного обозначения трубы различают по форме поперечного сечения, например, труба круглого сечения, труба прямоугольного сечения, труба шестиугольного сечения и т. д.

Профиль Общее название поперечного сечения любой формы из любого материала.

1.2 Поперечные сечения какой формы могут обрабатываться лазером?

При использовании подходящих зажимных устройств лазером могут обрабатываться трубы с различными формами поперечного сечения.

Примеры стандартных форм поперечных сечений

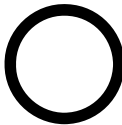
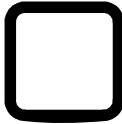
Труба круглого сечения	
Труба квадратного сечения	
Труба прямоугольного сечения	
Труба круглого овального сечения	
Труба плоского овального сечения	

Табл. 6-1

Примеры специальных форм поперечных сечений

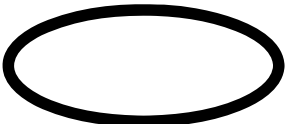
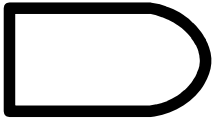
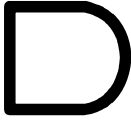
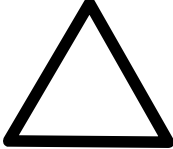
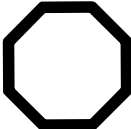
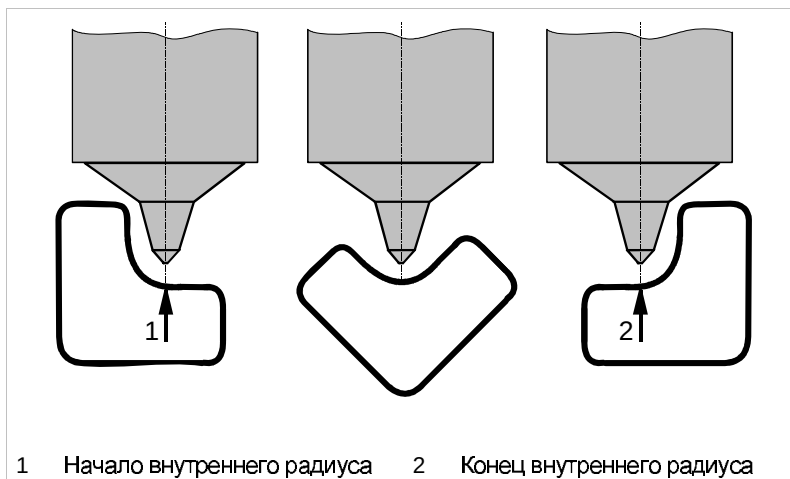
Труба эллипсоидного сечения	
Труба полуовального сечения	
Труба D-образного сечения	
Труба треугольного сечения	
Труба восьмиугольного сечения	

Табл. 6-2

Профили с внутренними радиусами

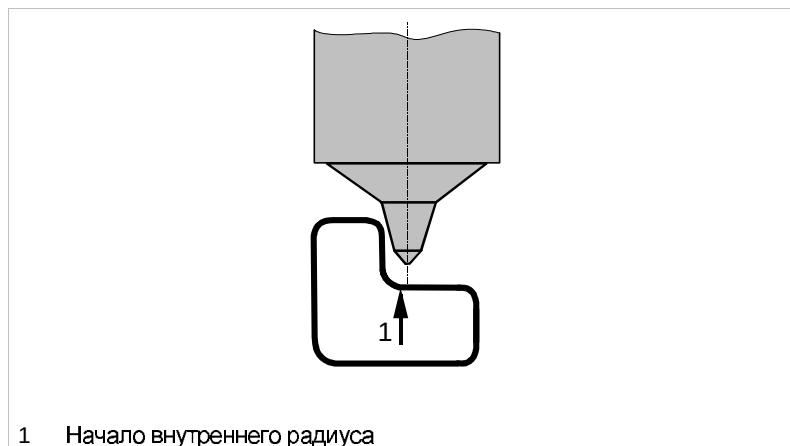
Профили с большими внутренними радиусами могут обрабатываться путем поворачивания на 90° под режущей головкой во время обработки.



Профиль с большим внутренним радиусом

Рис. 21147

Однако, при обработке профилей с внутренними радиусами имеются принципиальные ограничения. В зависимости от геометрии лазерной режущей головки и режущего сопла, при обработке профилей с малыми внутренними радиусами могут происходить столкновения головки с заготовкой.



Профиль с малым внутренним радиусом

Рис. 21148

Представленный на Рис. 21148 профиль с малым внутренним радиусом не может быть обработан, так как режущая головка и заготовка сталкиваются раньше, чем профиль сможет быть повернут для обработки внутреннего радиуса.

1.3 Качество

Исходное качество обрабатываемой трубы имеет решающее значение для достигаемой точности контуров на заготовке. Качество трубы определяется:

- Степенью отклонений от прямолинейности.
- Степенью отклонений от размеров диаметра.
- Степенью отклонений от размеров толщины стенки.
- Степенью скручивания.
- Степенью жесткости при кручении.
- Технологией изготовления (сварные или тянутые).
- Качеством поверхности (шероховатость, коррозия).
- Постоянством угловых радиусов (отклонения в пределах одной партии).

Оценка качества лазерной резки труб

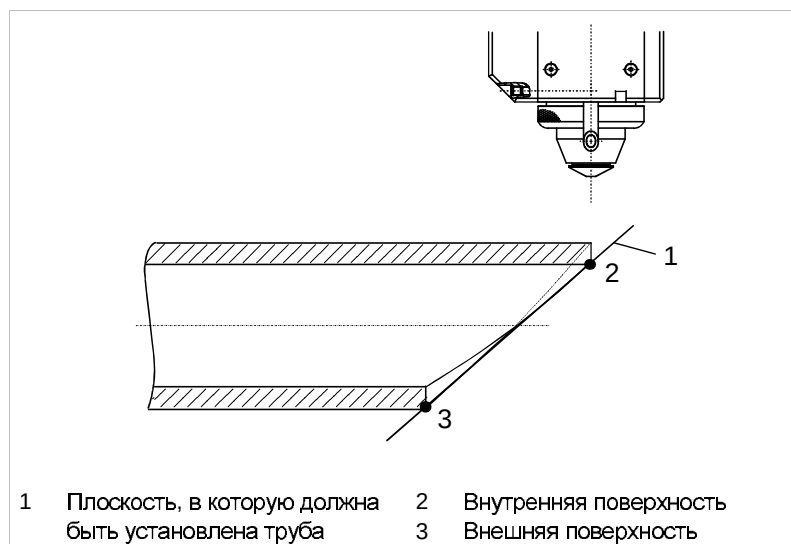
Относительно оценки качества лазерной резки труб можно, в принципе, сослаться на Главу 7 "Критерии оценки качества лазерной резки". В ней описаны отдельные критерии. Показатели, в основном, могут применяться и в отношении обработки труб. Только глубина шероховатости при лазерной резке труб всегда больше, нежели при лазерной резке плоских заготовок.

1.4 Возможности и ограничения при обработке труб на двух- и трехмерных установках

Для того, чтобы соединительные детали (плоские плиты, обработанные и необработанные трубы) могли быть соединены с кромкой реза трубы, соединительная деталь должна абсолютно плотно прилегать к кромке реза.

Двухмерная резка труб

При двухмерной резке труб направление лазерного луча, как правило, перпендикулярно к поверхности трубы, чтобы во время обработки не изменялась толщина материала. Луч перемещается в горизонтальной плоскости, в то время как труба вращается вокруг своей продольной оси. Вследствие этого "идеальная линия реза" образуется только в тех местах, в которых лазерный луч переходит с внутренней поверхности на внешнюю и наоборот.



Двухмерная обработка: Ровный рез

Рис. 27376

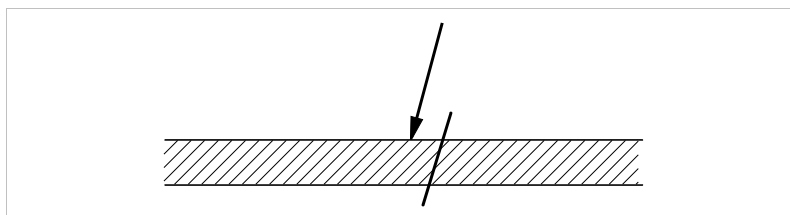


Рис. 27377

Для образования хорошего соединительного шва достаточно, чтобы имелось одно прилегание наружной поверхности трубы и одно - внутренней поверхности. Однако, это применимо только к случаю, если соединительный шов выполняется обычной сваркой с использованием присадочной проволоки.

Трехмерная резка труб

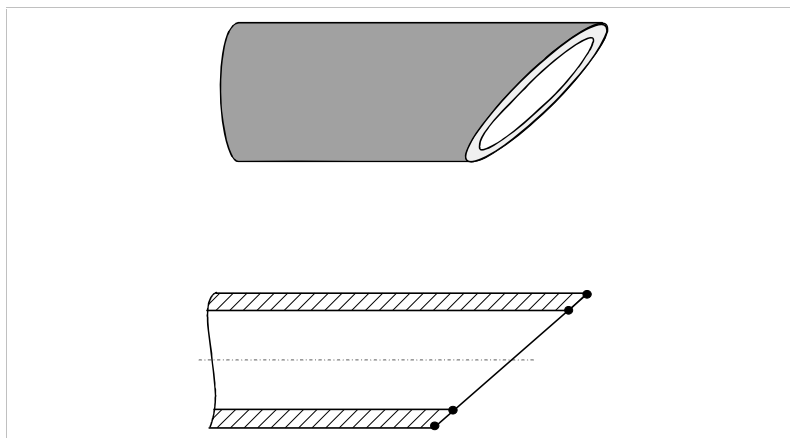
Для образования идеальной кромки реза, которая при соединении прилегала бы к соединительной детали одновременно во всех точках как наружной, так и внутренней поверхности, лазерный луч должен располагаться под определенным углом относительно трубы. Это необходимо, если кромка реза трубы будет соединяться с соединительной деталью методом лазерной сварки.



Положение луча при трехмерной обработке

Рис. 6450

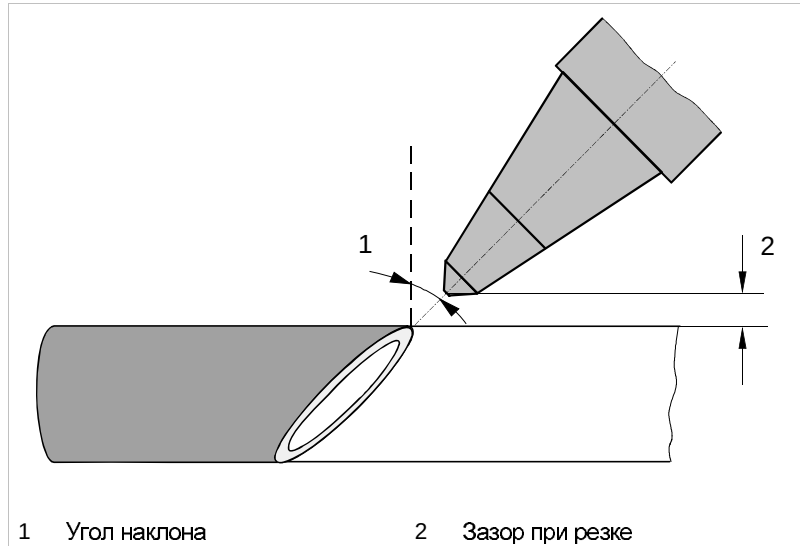
Это возможно только в установках трехмерной обработки:



Трехмерная обработка: Ровный рез

Рис. 6449

Однако, трехмерная резка труб по технологическим причинам возможна лишь с ограничениями. При экстремальном увеличении угла наклона лазерного луча относительно трубы возникают проблемы:



Экстремальный угол наклона при трехмерной обработке

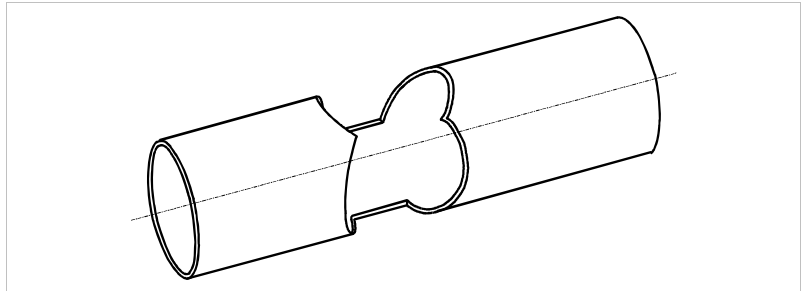
Рис. 21149

- Изменяется толщина материала.
Для того, чтобы, несмотря на это, достигать хороших результатов, требуется постоянное согласование параметров резки. Имеются два варианта такого согласования:
 - Использование нескольких технологических таблиц лазерной обработки, так как параметры резки одной таблицы всегда оптимальны только для одной толщины материала.
 - Выбрать параметры, которые во всей зоне обработки допускают лишь низкие скорости резки.
- Отклоняется струя газа, используемого для резки.
Выходящая струя газа частично отклоняется поверхностью трубы и не попадает исключительно в прорезь. При кислородной резке это может приводить к значительному выжиганию кромок реза и образованию грата. При резке с азотом возможно образование грата, так как расплав хуже удаляется из прорези.
- Используемый для резки зазор становится недействительным.
Емкостная система регулировки расстояния определяет слишком высокую электроемкость между соплом и поверхностью материала. Это ведет к погрешностям расчета расстояния и изменениям положения фокуса, что, в свою очередь, может приводить к ухудшению качества кромок реза.
- Снижается скорость резки.
При наклонных резах скорость резки должна часто предельно снижаться.

2. Обработка искривленных поверхностей

2.1 Полигонализация контуров

При обработке искривленных поверхностей кривые на трубах круглого сечения или на угловых радиусах труб многоугольного сечения выводятся в тексте управляющей программы в виде полигональных линий.



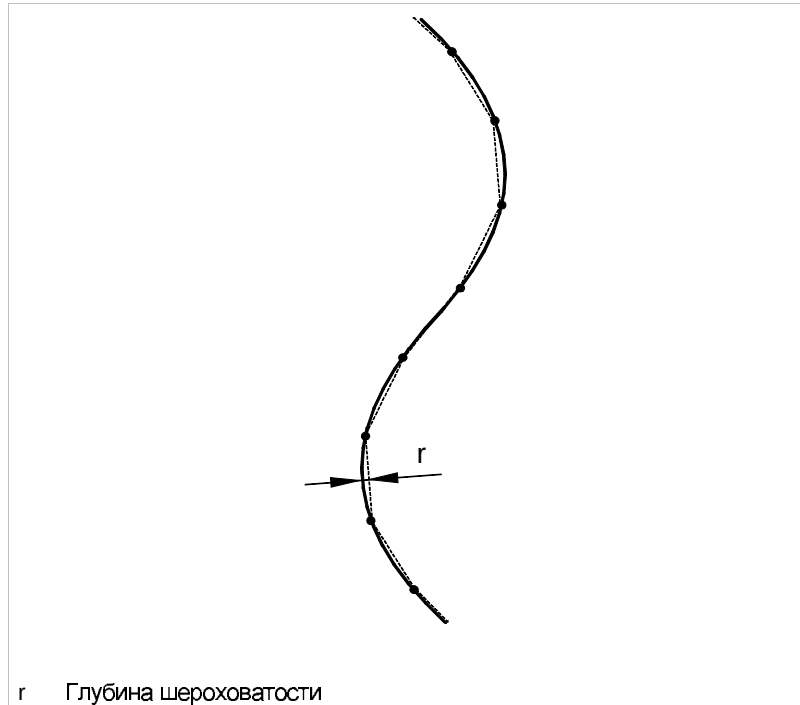
Произвольный контур с кривыми на трубе круглого сечения

Рис. 20852

Полигональные линии состоят из нескольких прямых отрезков (инкрементов), причем длина инкремента зависит от кривизны кривой и от выбранной погрешности контура. Скорость обработки полигональных контуров может быть увеличена, если переходы между отдельными инкрементами выполняются по касательной. Почти касательные (тангенциальные) переходы достигаются путем уменьшения инкрементов, т. е. определения большего количества точек кривой.

Погрешность контура

Погрешность контура - это максимальное расстояние между запрограммированным и оригинальным контуром резки. В системе программирования TruTops Tube она обозначается как "Глубина шероховатости". Норматив для глубины шероховатости при обработке труб круглого сечения: 0.05 мм.



Погрешность контура (глубина шероховатости)

Рис. 19936

Чем меньшее значение погрешности контура выбирается, тем меньше отличается полигонализированный контур от оригинального контура.

2.2 Обработка контуров "в плоскости"

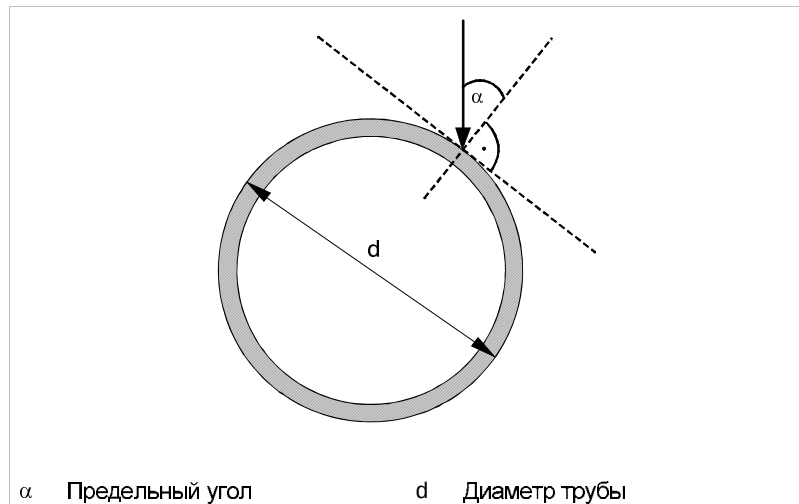
Небольшие контуры на трубах круглого сечения могут также обрабатываться "в плоскости". При этом вращающаяся ось во время обработки не поворачивается. Программируются движения по осям X и Y. Движения оси Z управляются системой регулировки расстояния.

Преимущества

- Оригинальный контур, не требуется полигонализация.
- Меньшее количество данных, требуется меньше емкости памяти.
- Высокая скорость обработки.
- Параллельные кромки реза.

Предельный угол α

При обработке контуров в плоскости не рекомендуется располагать лазерный луч под углом к трубе, превышающим предельный угол α (норматив: 25°). При больших углах реза появляются проблемы, уже описанные на странице 8.



α Предельный угол

d Диаметр трубы

Предельный угол α

Рис. 19935

2.3 Регулировка расстояния

В режущую головку интегрирована система регулировки расстояния, которая в процессе работы обеспечивает сохранение постоянного зазора для резки.

Принцип действия	Система регулировки по электроемкости определяет расстояние между режущим соплом и поверхностью материала (зазор при резке). При этом режущее сопло и поверхность материала могут рассматриваться как две противоположные пластины конденсатора. Между двумя этими пластинами образуется электрическая емкость, при этом ее определению способствует материал в радиусе около 20 мм вокруг вершины сопла. Емкость изменяется, когда изменяется зазор для резки. В результате постоянного сопоставления определенной величины емкости с определенным значением зазора для резки образуется параметрическая кривая.
Действие во время процесса обработки	При вызове одной из технологических таблиц лазерной обработки для системы регулировки расстояния управляющей программой определяется заданное значение зазора для резки. На основании параметрической кривой система регулировки расстояния назначает для этого заданного значения определенную величину электроемкости. После этого ось Z перемещается до тех пор, пока расстояние между соплом и поверхностью материала не создаст электроемкость точно такой величины. Во время процесса обработки система регулировки расстояния постоянно измеряет электроемкость между соплом и поверхностью материала, благодаря чему зазор для резки остается неизменным.

2.4 Зазор при резке труб круглого сечения

При обработке труб круглого сечения зазор для резки должен корректироваться. Причина этого заключается в том, что в связи с геометрией трубы круглого сечения при заданной электроемкости между ее поверхностью и соплом происходит уменьшение зазора для резки, т. е. фактический зазор меньше, чем то значение, которое запрограммировано в технологической таблице лазерной обработки.

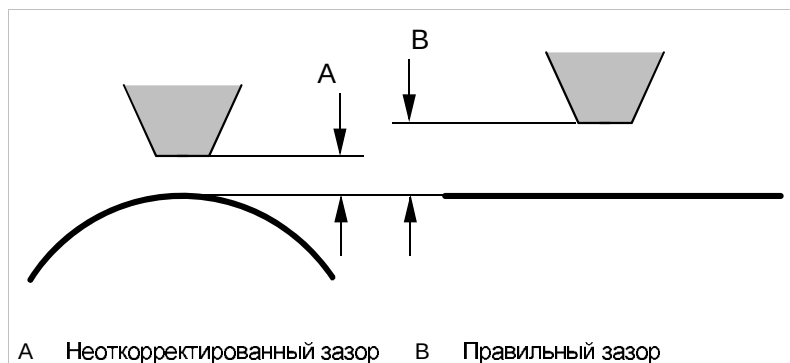


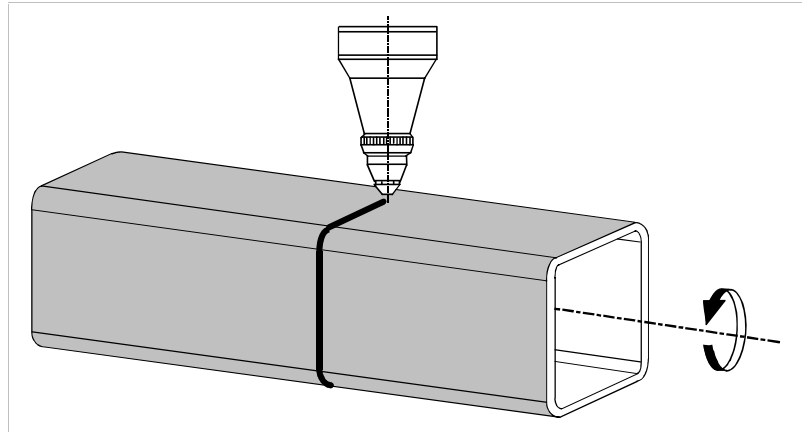
Рис. 20913

Создание параметрической кривой для трубы круглого сечения

При работе с трубами круглого сечения параметрическая кривая для системы регулировки расстояния может быть создана непосредственно с использованием самой трубы. Это значит, что по сравнению с параметрической кривой, применяемой для обработки плоских поверхностей, для одного и того же значения зазора для резки назначается меньшее значение электроемкости. В итоге, несмотря на кривизну трубы круглого сечения, во время ее обработки зазор для резки снова соответствует значению, запрограммированному в технологической таблице лазерной обработки.

2.5 Обработка углов на трубах многоугольного сечения

При работе с трубами многоугольного сечения технологически сложной является обработка их углов.



Труба прямоугольного сечения: Прохождение углов

Рис. 9417

В зависимости от величины углового радиуса и размеров сторон трубы, при обработке углов, с одной стороны, корректируется зазор для резки, с другой - ограничивается подача.

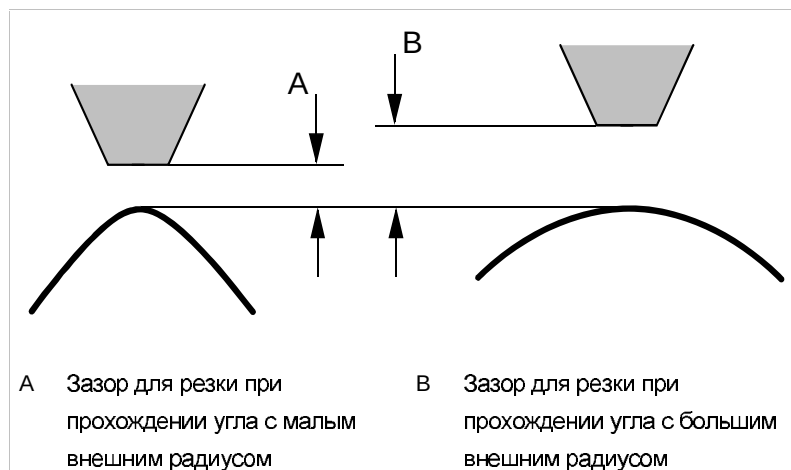
Коррекция зазора для резки

Значения для параметрической кривой системы регулировки расстояния снимаются для труб многоугольного сечения в центре их наибольшей плоской поверхности. Если резка производится точно в этой зоне плоской поверхности, фактический зазор для резки соответствует запрограммированному значению. Если резка производится в направлении углового радиуса, фактический зазор для резки уменьшается, в то время как сопло еще находится над плоской поверхностью трубы. Материал в радиусе около 20 мм вокруг вершины сопла способствует определению электроемкости между соплом и поверхностью, в зависимости от которой система регулировки расстояния определяет зазор для резки.

Когда сопло находится вблизи углового радиуса, в нужной зоне под соплом не везде присутствует материал, из-за чего уменьшается фактический зазор для резки. Экстремальное уменьшение фактического зазора происходит, когда режущее сопло оказывается над угловым радиусом трубы, занимающей наклонное положение под углом 45° . При наличии малых угловых радиусов сопло сталкивается с трубой, если не проводится коррекция зазора.

Зазор для резки при обработке внешних радиусов

Чем меньше внешний радиус, который должен быть пройден, тем меньше будет зазор для резки, который устанавливается при заданной электрической емкости, образующейся между соплом и поверхностью материала. В связи с этим, при обработке внешних радиусов должна производиться коррекция зазора для резки путем программирования его более высокого значения.

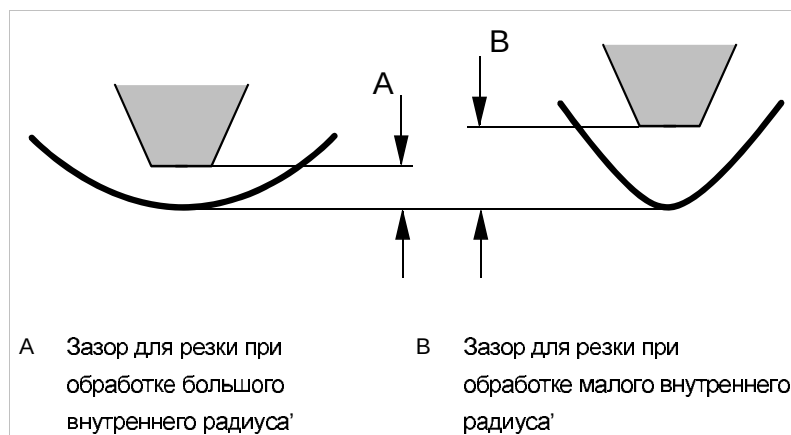


Прохождение внешних радиусов без коррекции зазора для резки

Рис. 21145

Зазор для резки при обработке внутренних радиусов

Чем меньше внутренний радиус, который должен быть пройден, тем больше будет зазор для резки, который устанавливается при заданной электрической емкости, образующейся между соплом и поверхностью материала. В связи с этим, при обработке внутренних радиусов должна производиться коррекция зазора для резки путем программирования его более низкого значения.



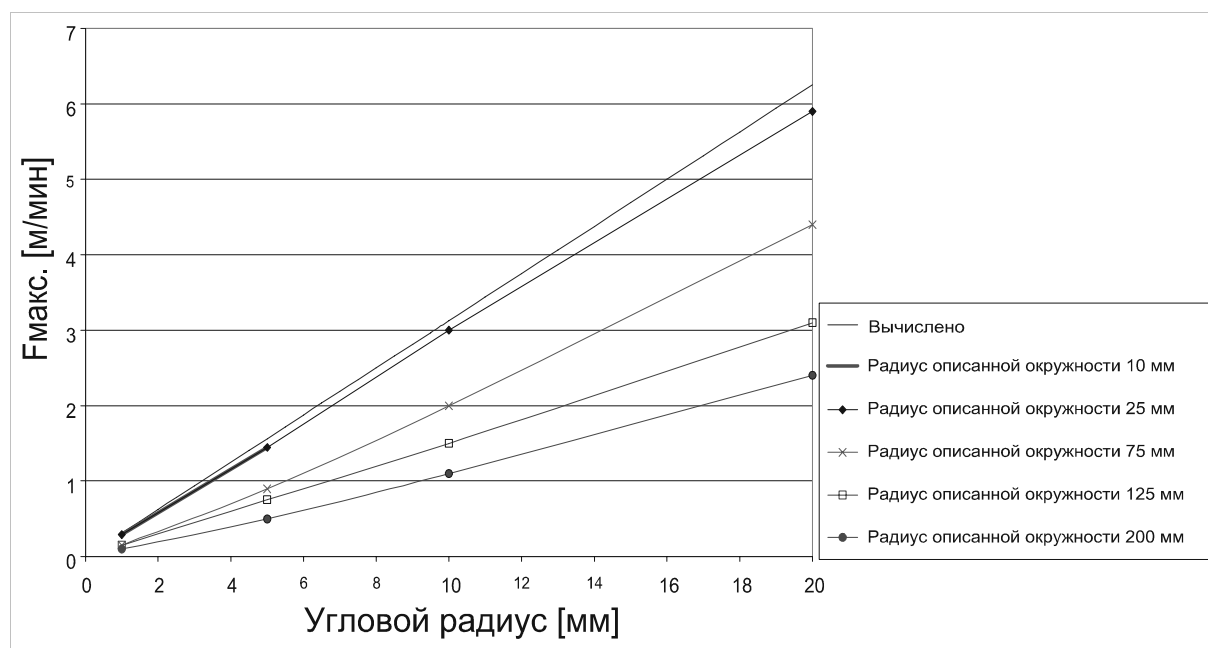
Обработка внутренних радиусов без коррекции зазора для резки

Рис. 21146

Уменьшение подачи

То, с какой скоростью могут проходить углы при обработке трубы многоугольного сечения, зависит от следующих факторов:

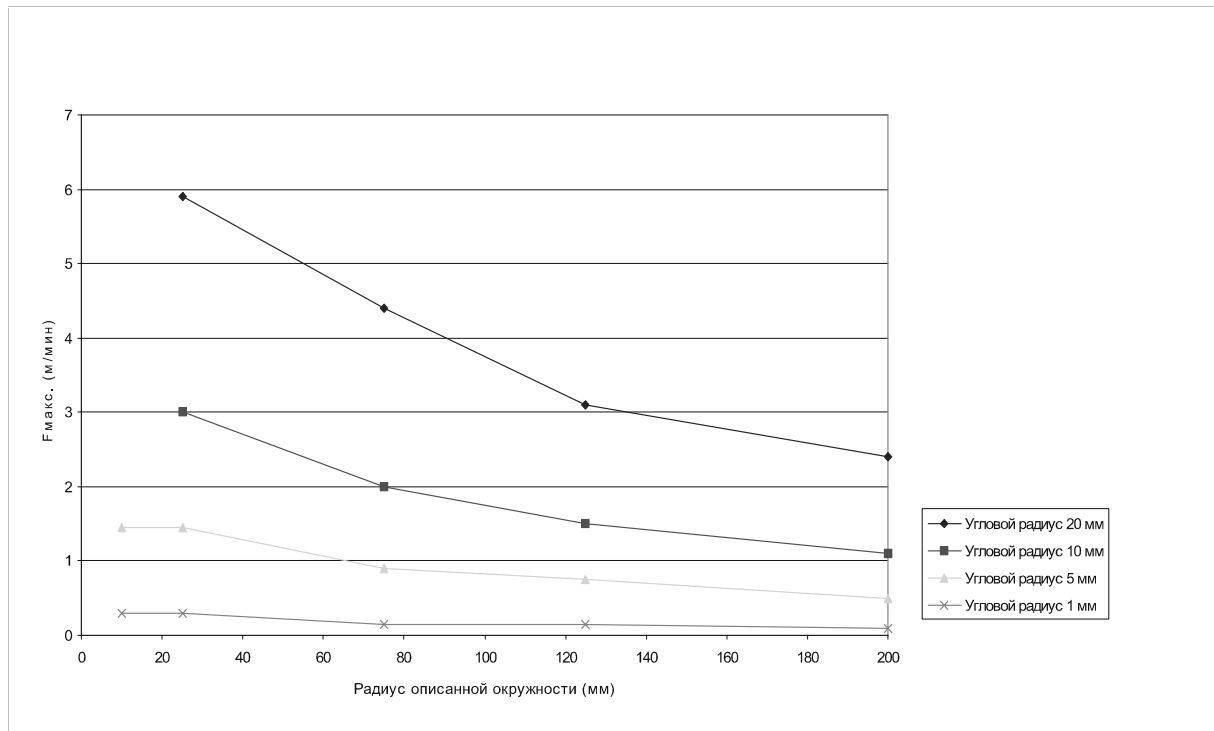
- Ускорение вращающейся оси
Конструктивное исполнение труборезного участка влияет на максимальную скорость подачи при обработке углов. Например, вращающаяся ось установки TruLaser 3030 с системой RotoLas не в состоянии вращаться так же динамично, как ось специально сконструированной для обработки труб установки TruLaser Tube 5000. Таким образом, максимальная скорость подачи при прохождении угла ограничивается максимальным значением ускорения вращающейся оси.
- Угловой радиус
Чем меньше радиус угла, который должен быть пройден, тем меньше максимальная скорость подачи при его обработке.



TruLaser 3030 с системой RotoLas: Максимальная скорость подачи при обработке углов в зависимости от углового радиуса

Рис. 20851

- Радиус описанной окружности
Чем больше радиус окружности, описанной вокруг трубы, тем меньше максимальная скорость подачи при обработке углов.



TruLaser 3030 с системой RotoLas: Максимальная скорость подачи при обработке углов в зависимости от радиуса описанной окружности¹

Рис. 19945

3. Влияние противоположной стороны

В отличие от обрабатываемых двухмерных заготовок, труба всегда имеет одну сторону, противоположную обрабатываемой стороне. Это может приводить к следующим проблемам:

- Забрызгивание внутренних стенок трубы шлаком или расплавом.
- Прорезание трубы на противоположной стороне.
- Значительное тепловое воздействие, вызывающее сильный перегрев материала.

Эти проблемы возникают, прежде всего, при обработке тонкостенных труб с малым диаметром либо описанной окружностью.

Решение проблем

- Брызгозащитное приспособление, вводимое в трубу во время обработки, может "отклонять" брызги шлака и поглощать лазерное излучение.
- Прорезание с пониженной мощностью лазера.
- Резка с пониженной мощностью лазера.

4. Отрезание трубных элементов

При обработке труб отдельный трубный элемент образуется, если от трубы отрезается ее обработанный конец. При данном процессе свободной резки, в зависимости от контура трубного элемента, могут возникать проблемы:

- Элемент может заклинить оставшейся частью трубы или трубными отходами.
- Элемент может запрокинуться и задеть сопло режущей головки.

Элемент заклинивается при отрезании

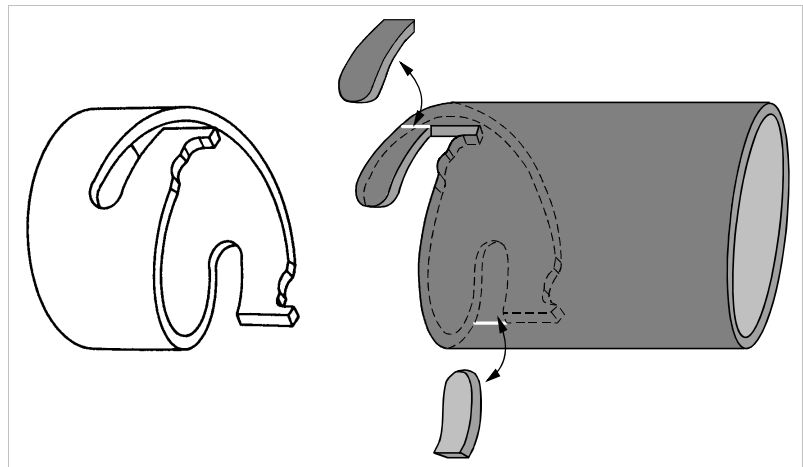
Легко заклиниваются оставшейся частью трубы или трубными отходами, прежде всего, отрезаемые трубные элементы, имеющие сложный вырезанный контур со множеством выемок и т. п. Типичным примером является элемент с контуром, вырезанным в виде байонетного затвора:



Байонетный затвор

Рис. 21179

Изготовление представленного на рисунке байонетного затвора требует программирования разделительных резов в трубных отходах. Отходы не могут быть извлечены без дополнительных резов.



Разделительные резы в трубных отходах

Рис. 21150

Элемент запрокидывается при отрезании

При отрезании трубные элементы могут запрокидываться и задевать сопло режущей головки, если рез выполняется предельно наклонно:

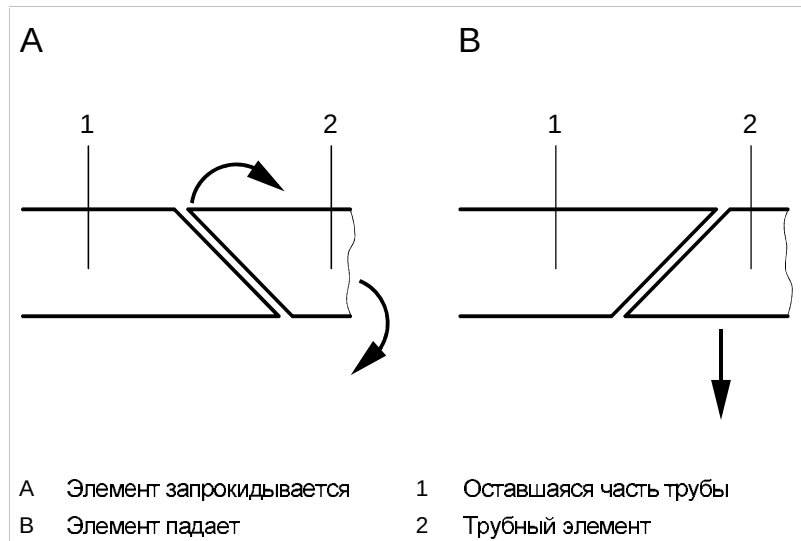


Рис. 20914

Запрокидывание трубного элемента может предотвращаться, если запрограммировать конец реза не на длинной стороне элемента (A), а на короткой (B).

Брызгозащитное приспособление, вводимое в трубу во время обработки, также предотвращает запрокидывание отрезаемого элемента.



Глава 7

Критерии оценки качества лазерной резки

1. **Каким образом оценивается качество резки?..... 7-2**
2. **Образование грата 7-3**
3. **Прорезь 7-4**
4. **Лунки..... 7-5**
5. **Усредненная глубина шероховатости 7-6**
6. **Желобчатый сбег 7-9**
7. **Погрешность прямоугольности и уклона..... 7-10**
8. **Итоговая таблица 7-12**

1. Каким образом оценивается качество резки?

DIN EN ISO 9013 DIN EN ISO 9013 является обобщенным сводом норм и одновременно замещает такие нормы, как DIN EN ISO 9013:1995-05 "Автогенная резка выжиганием", DIN 2310-4 "Плазменная резка" и DIN 2310-5 "Лазерная резка металлических материалов". Кроме того, содержание перечисленных норм перерабатывалось.

В своде норм DIN EN ISO 9013 приводятся определения понятий, критерии оценки качества поверхностей реза, классификация критериев качества и размерные допуски. Он распространяется, например, на лазерную резку материалов толщиной от 0.5 мм до 40 мм.

Критерии фирмы TRUMPF Частично отступая от DIN EN ISO 9013, для оценки результатов резки фирма TRUMPF применяет следующие критерии:

- Образование грата (заусенцев или наплывов).
- Прорезь
- Лунки
- Желобчатый сбег n .
- Усредненная глубина шероховатости R_{Z5} .
- Погрешность прямоугольности и уклона u .

Определение и описание методов измерения либо определения указанных выше критериев приводится на последующих страницах.

Итоговая таблица, приведенная в конце главы, служит в качестве образца для копирования и предусмотрена для сохранения данных, по которым оценивается качество резки.

2. Образование грата

Определение

При образовании грата речь может идти о

- прочном, не удаляемом без дополнительной обработки грате;
- налипшем шлаке, легко удаляемом без дополнительной обработки.

Оценка образования грата

Образовавшийся грат оценивается визуально и комментируется. Степень образования грата зависит, среди прочего, от положения фокуса.

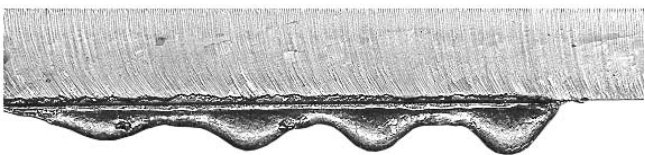
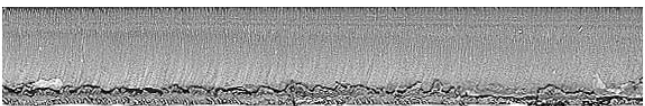
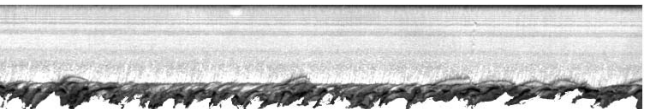
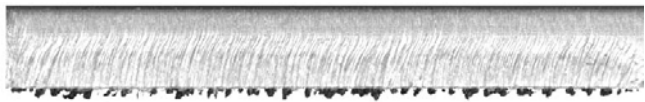
Вид грата	Описание	Пример
Бисерообразный грат	Бисероподобный или каплевидный грат с блестящей металлической поверхностью, прочно налипший. Пример: конструкционная сталь, толщина листа 15 мм, положение фокуса +5	
Крошкообразный грат	Налипание расплава в виде мелкого, крошкообразного грата; удаляется легче, чем грат с острыми краями. Пример: конструкционная сталь, толщина листа 15 мм, положение фокуса -1	
Грат с острыми краями	Образующийся в виде "бороды", грубый грат с острыми краями, частично прочно налипший. Нижняя сторона поверхности реза шероховата. Пример: нержавеющая сталь, толщина листа 8 мм, положение фокуса -4	
	Мелкий грат с острыми краями, прилипший к нижней стороне в виде "бороды". Пример: нержавеющая сталь, толщина листа 8 мм, положение фокуса -11	

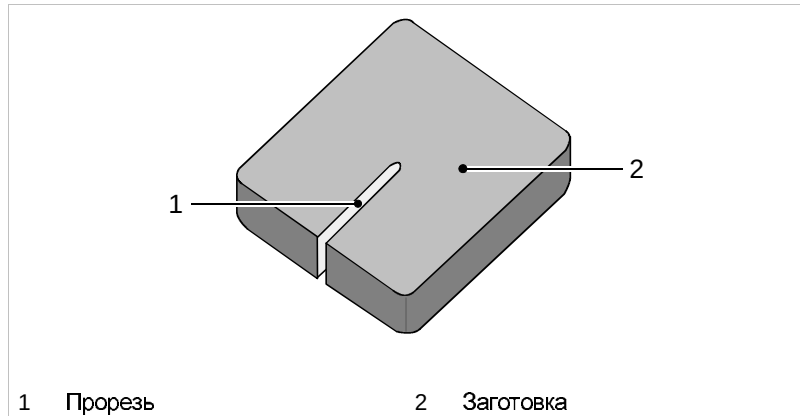
Рис. 25110, 25111, 25112, 25113

Табл. 7-1

3. Прорезь

Определение При лазерной резке образуется прорезь, которая сужается, как правило, по направлению от верхней к нижней кромке реза. Ширина прорези, также называемая шириной реза, указывается в [мм].

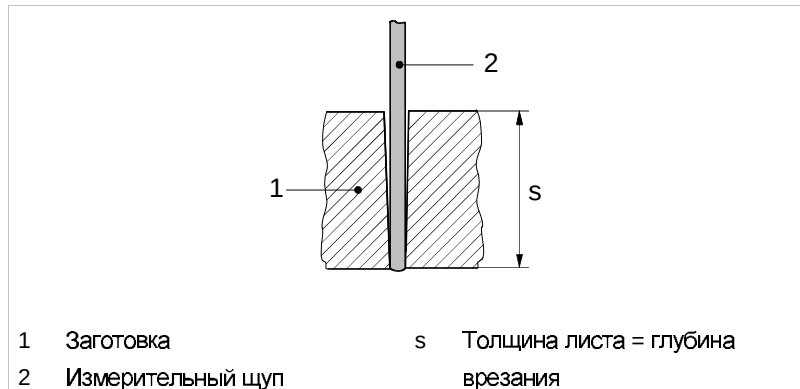
Измерение ширины реза Ширина реза измеряется в прорези, сделанной в прямоугольнике.



Прямоугольник с прорезью: Измерение ширины реза

Рис. 25395

С помощью измерительного щупа измеряется параметр: глубина врезания s .



Измерение прорези

Рис. 25396

При толщине материала более 3 мм для точного измерения ширины реза вырезается прямоугольник, и при помощи штангенциркуля измеряется длина кромок. Разница относительно запрограммированной длины кромок представляет собой ширину реза.

Пример 1 Запрограммированная длина кромок: 100 мм
Измеренная длина кромок: 99.7 мм
Вычисленная ширина реза: 0.3 мм

Указание

Нормативы фирмы TRUMPF для ширины реза Вы найдете в сборнике данных для Вашей установки.

Пример 2 Значения из сборника данных для установок TruLaser 2525, TruLaser 3030, TruLaser 3040, TruLaser 3060 с системой управления SINUMERIK 840D и TruFlow 3000.

Материал	Толщина листа [мм]	Ширина реза [мм]
Конструкционная сталь (QSt 37-2)	1-3	0.15
	4-6	0.2-0.3
	-15	0.35-0.4
	20	0.5
Нержавеющая сталь (1.4301), резка с N ₂ высокого давления	1-3	0.15
	4-8	0.2
	10-12	0.5
Алюминиевые сплавы (AlMg ₃ , AlMgSi ₁), резка с N ₂ Высокого давления	1-3	0.15
	4-8	0.2-0.3

Табл. 7-2

4. Лунки

Определение Лунками называют вымоины различной ширины, глубины и формы, которые прерывают в остальном ровную поверхность реза.

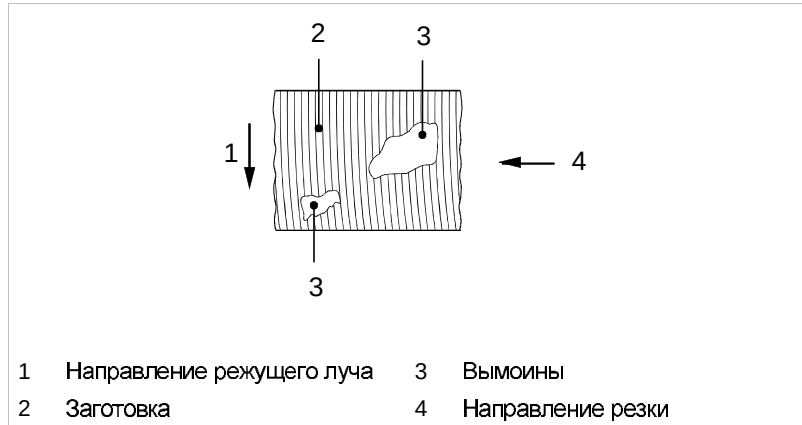


Лунки

Рис. 25397

Измерение При оценке качества реза производится визуальный контроль и словесное описание имеющихся лунок в их проявлении. При отсутствии лунок этот критерий требует негативного ответа.

Вымоины, образующиеся, например, при смене направления резки, приводятся отдельно.



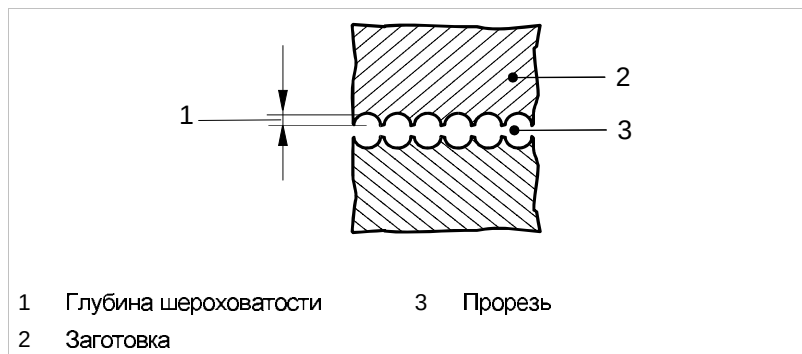
Вымоины

Рис. 25398

5. Усредненная глубина шероховатости

Определение глубина шероховатости

Глубина шероховатости = глубина бороздок



Схематическое изображение глубины шероховатости, увеличенный вид сверху

Рис. 25246

Усредненная глубина шероховатости R_{z5} представляет собой среднее арифметическое величин глубины шероховатости пяти расположенных рядом друг с другом отдельных участков измерения. Глубина шероховатости указывается в [мкм].



Иллюстрация: Глубина шероховатости на пяти отдельных измерительных участках

Рис. 25454

Измерение усредненной глубины шероховатости R_{z5}

Усредненная глубина шероховатости R_{z5} измеряется, например, контактным профилометром, соответствующим ISO 3274. Само измерение проводится, согласно ISO 4288, через равные промежутки в направлении реза.

Зона измерения глубины шероховатости зависит от толщины листа s и вида материала. Отступая от норм, фирма TRUMPF требует проведения измерений в зонах, в которых при первоначальном визуальном контроле обнаруживается наибольшая шероховатость. Согласно нормам, измерение должно проводиться в верхней трети у верхней кромки реза.

В следующей таблице представлены **зоны измерения глубины шероховатости** в зависимости от толщины листа и вида материала. Данные значения, учитывая нынешний уровень развития техники, следует рассматривать как нормативные. Они были определены при помощи TruFlow 4000.

Толщина листа s [мм]	Зона измерения [мм] конструкционная сталь	Зона измерения [мм] нержавеющая сталь	Зона измерения [мм] алюминий
1	-0.5	-0.5	-0.5
2	-1	-1	-1
3	-2	-1	-2
4	-2.6	-2.6	-2.6
5	-3.3	-1.6	-3.3
6	-4	-4	-4
8	-5.3	-7	-5.3
10	-1	-9	-
12	-1	-11	-
15	-1	-	-
20	-1	-	-

Табл. 7-3

Указание

На конструкционной стали толщиной > 8 мм глубина шероховатости увеличивается до максимума в направлении от нижней кромки листа к верхней. На нержавеющей стали и алюминии этого не наблюдается.

**Нормативные значения
усредненной глубины
шероховатости R_z**

В следующей таблице в качестве ориентировочных приведены максимальные значения усредненной глубины шероховатости. Эти значения были определены фирмой TRUMPF при помощи TruFlow 4000.

Толщина листа s [мм]	Конструкцион- ная сталь максимальные значения R_z [мкм]	Нержавеющая сталь максимальные значения R_z [мкм]	Алюминий максимальные значения R_z [мкм]
1	9	6	18
1.5	8	-	13
2	15	10	17
2.5	7	-	14
3	17	10	22
4	5	10	20
5	6	10	19
6	6	13	14
8	7	19	46
10	28	43	-
12	23	38	-
15	28	-	-
20	28	-	-

Табл. 7-4

Указание

Данные значения являются ориентировочными и были определены согласно нынешнему уровню развития техники.

Лунки

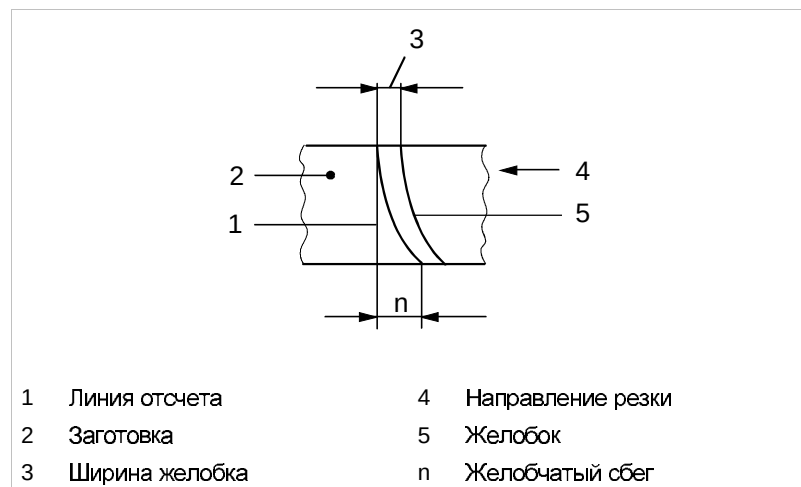
Лунки необходимо исследовать отдельно, так как они не могут учитываться в ходе измерения глубины шероховатости. Размеры распространения лунок превышают диапазон измерений измерительных приборов.

6. Желобчатый сбег

Определение При лазерной резке на кромке реза образуется типичный рифленый рисунок. При невысокой скорости резки эти желобки проходят практически параллельно лазерному лучу. Чем выше скорость, тем сильнее желобки загибаются относительно направления резки. Под желобчатым сбегом n подразумевается наибольшее расстояние между двумя образующимися желобками в направлении резки.

Измерение n Желобчатый сбег оценивается визуально.

Оценка проводится на основе фотоснимка или образца реза при помощи лупы или стереомикроскопа. В качестве вспомогательной используется линия отсчета.



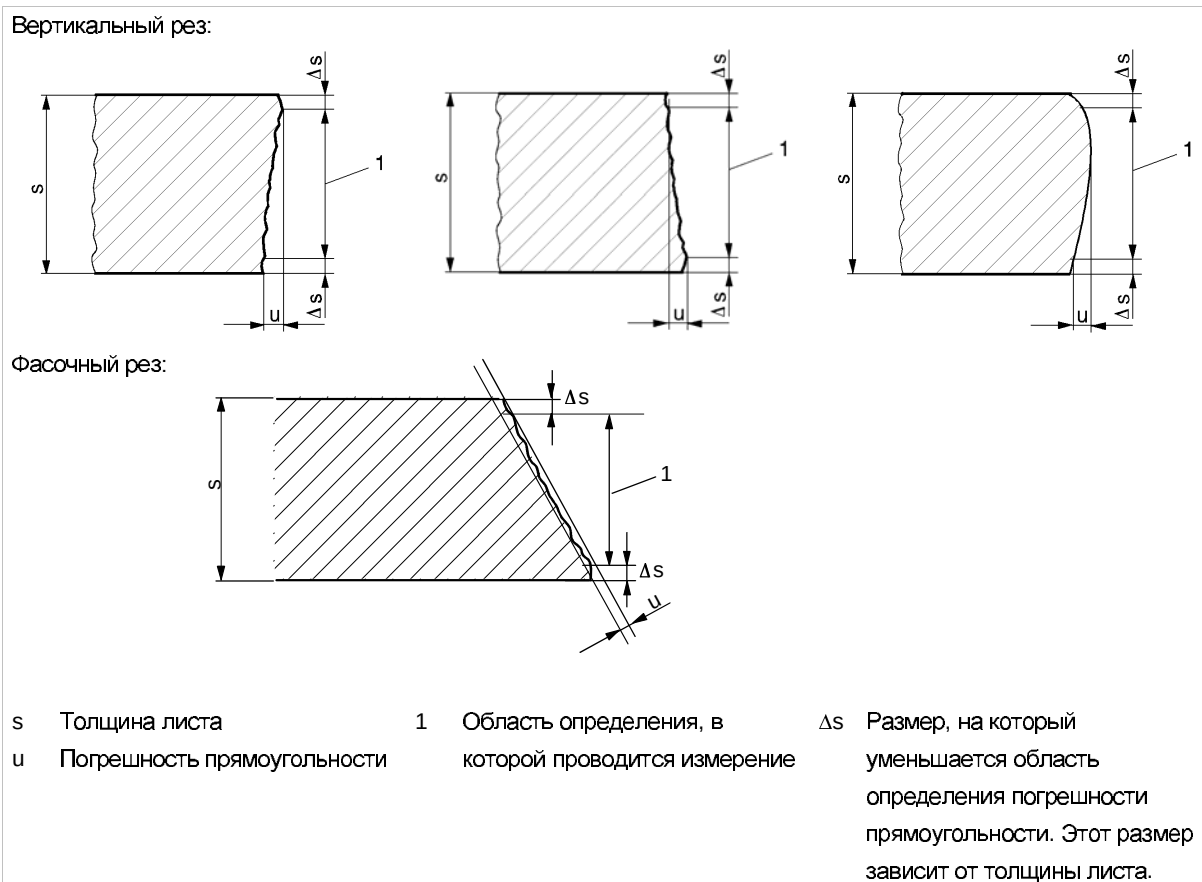
Измерение желобчатого сбega

Рис. 25399

7. Погрешность прямоугольности и уклона

Определение Погрешность прямоугольности и уклона u - это расстояние между двумя параллельными прямыми, между которыми должен располагаться профиль поверхности реза под теоретически правильным углом, - т. е. под углом 90° при прямоугольной резке. В погрешности прямоугольности и уклона учитывается как отклонение от прямолинейности, так и отклонение от плоскостности.

Погрешность прямоугольности и уклона измеряется в [мм] при вертикальных или фасочных резах.



погрешность прямоугольности и уклона

Рис. 3800, 11181, 11182, 25243

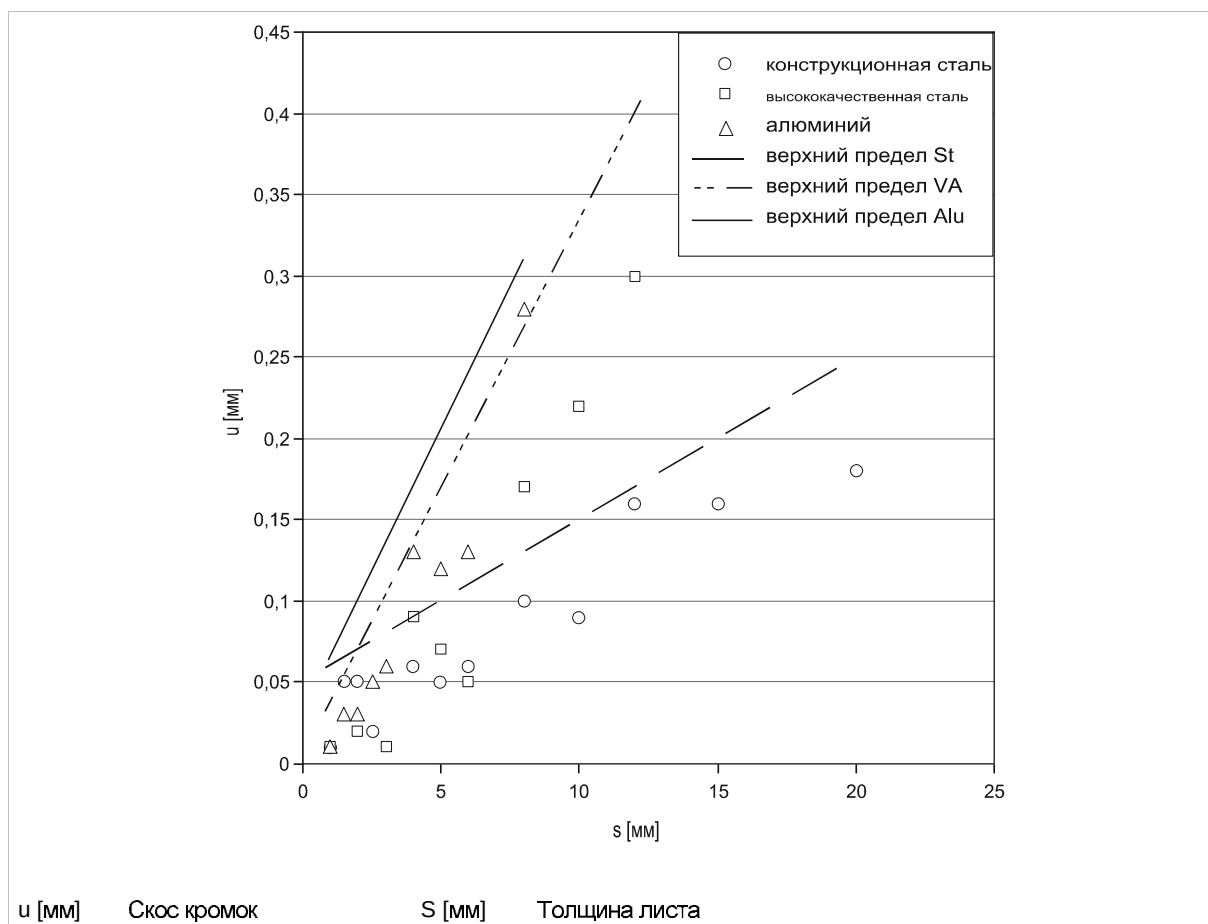
В нормах DIN EN ISO 9013 для резки лазером определены три области: от 1 до 3.

Отступая от норм, фирма TRUMPF определяет эти области, в зависимости от материала, по следующим формулам:

	Формула для верхнего предела (s = толщина листа)	
Конструкционная сталь (резка выжиганием)	$u = 0.05 + 0.01 s$	
Нержавеющая сталь (резка с расплавлением)	$u = 0.005 + 0.033 s$	
Алюминий (резка с расплавлением)	$u = 0.03 + 0.035 s$	

Табл. 7-5

Эти значения были определены фирмой TRUMPF с помощью TruLaser 3030 и TruFlow 4000. Они представлены на приведенном ниже графике:



Скосы кромок конструкционной стали, нержавеющей стали и алюминия

Рис. 25393

8. Итоговая таблица

Общие данные

Дата:	Исполнитель:
Вид материала:	Скорость резки:
Тип лазера:	Линза:
Мощность лазера:	Положение фокуса:
Тактовая частота:	Геометрия сопла:
Давление газа для резки:	Расстояние до сопла:
Газ для резки:	

Табл. 7-6

Измеренные параметры

Толщина материала [мм]	Ширина реза [мм]	Глубина шероховатости [мкм]	Желобчатый сбеги (да/нет, слабый/сильный)	Погрешность прямоугольности [мм]	Лунки (да/нет, отдельные/частые)	Вымоины после смены направления (да/нет)	Факт. радиус после смены направления на 90° [мм]	Прочее
Примечания:								

Табл. 7-7

Глоссарий

CO₂-газовый лазер

Распространенный тип лазера для обработки материалов. Лазерное излучение генерируется в газовой смеси, состоящей из углекислого газа (CO₂), азота (N₂) и гелия (He). Молекула CO₂ испускает лазерное излучение. Азот и гелий служат вспомогательными газами. Длина волны CO₂-лазеров в 10.6 микрометра относится к дальней зоне инфракрасной области спектра.

Direct Metall Deposition (DMD)

Автоматизированная наплавка. Лазерный луч расплавляет порошкообразный присадочный материал и таким образом образует на поверхности заготовки слои и формы. Присадочный металлический порошок подается через специальное сопло в оптическом устройстве обработки.

Активная среда

Вещество в источнике излучения, способное испускать лазерное излучение. В качестве активной среды в лазере может использоваться множество различных материалов: газы, твердые тела, такие как кристаллы или полупроводники, а также жидкости. В области обработки материалов, как правило, применяются газовые смеси CO₂, легированные кристаллы или стекла и полупроводники.

Главное фокусное расстояние

Параметр фокусирующей линзы или фокусирующего зеркала. Главное фокусное расстояние - это расстояние между главной плоскостью линзы или зеркала и фокусом идеального, сфокусированного, параллельного луча. Принято считать: Чем меньше главное фокусное расстояние, тем сильнее фокусируется лазерный луч, и тем меньше диаметр фокуса.

Глубокая сварка

Метод соединения металлов. Лазерный луч расплавляет и испаряет материал вдоль места стыка. В металле образуется узкий, глубокий паровой канал (keyhole), который перемещается вместе с движением лазерного луча. Позади парового канала

расплавы сливаются вместе и застывают. При этом образуются глубокие, тонкие швы.

Длина волны

Характеристика колебаний. В отношении лазерной техники: характеристика лазерного луча. Длина волны указывает расстояние между двумя гребнями электромагнитной волны. Единицей измерения длины волны является метр.

Закалка

Метод, направленный на повышение прочности поверхностей заготовок. Лазерный луч разогревает поверхностный слой заготовки и таким образом вызывает в металле преобразование структуры (аустенитизацию). После этого основной холодный материал очень быстро остужает поверхностный слой. В результате образуется новая структура (мартензит), и повышается степень твердости металла. Закалке поддаются углеродистая сталь и чугуны.

Защитный газ

Газ, предохраняющий обрабатываемый материал от нежелательных реакций с окружающим воздухом. При сварке защитный газ, например, предохраняет поверхность сварного шва от контакта с воздухом и препятствует ее окислению. В качестве защитных применяются инертные газы.

Импульсный режим

Режим работы источника излучения. В отличие от непрерывного режима, активная среда возбуждается не постоянно, а импульсами. Она генерирует прерывистый по времени лазерный луч. Важными параметрами для обработки материалов являются: длительность и энергия такого лазерного импульса, а также импульсная частота.

Испускание

В области лазерной техники это понятие означает генерирование лазерного излучения в активной среде.



Источник излучения

(лазерное устройство) Аппарат, который генерирует лазерное излучение. Основными компонентами источника излучения являются: активная среда, испускающая лазерное излучение; резонатор, формирующий лазерный луч и многократно проводящий его через активную среду; генератор накачки, возбуждающий активную среду; система охлаждения, отводящая тепло.

Качество луча

Основная характеристика лазерного луча. Качество луча характеризует свойства расходимости лазерного луча и, таким образом, его фокусируемость. Качество луча определяется его расходимостью (дивергенция) за плоскостью первой "перетяжки" и ее диаметром. Величинами, которыми выражается качество луча, являются произведение параметров луча (BPP), показатель M^2 и коэффициент К.

Когерентность

Свойство лазерного излучения: Электромагнитные волны совершают колебания синфазно – у них одна фазовая характеристика.

Кроссджет

Струя газа, предохраняющая оптику от брызг, образующихся в процессе обработки. Кроссджеты используются, например, при сварке и сверлении.

Лазер

Аббревиатура, означающая "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". По смыслу: усиление света посредством вынужденного испускания излучения. В этой аббревиатуре уже заложен смысл физического явления, на основе которого построен принцип действия лазера: лазерное излучение испускается, когда фотон вынуждает возбужденный атом или молекулу образовать еще один фотон. Испущенный фотон имеет ту же длину волны и фазовую характеристику, что и первый фотон. Понятие лазер часто используется как синоним источника излучения или лазерного луча.

Лазерное формование

Также: прямое лазерное формование. Метод послойного изготовления деталей из металлического порошка. Лазерный луч раз за разом наплавляет поперечное сечение детали. Слой за слоем образуется деталь.

Маркировка

Создание надписей с помощью лазерного луча. Для этого используются различные методы: гравировка, съем поверхностного слоя, изменение цвета синтетических материалов, маркировка при отпуске стали и титана, вспенивание синтетических материалов.

Мода

Упорядоченное распределение плотности мощности в лазерном луче, которое происходит в силу оптического резонанса в резонаторе. Основная мода - это гауссова мода. Кроме того, существуют моды более высокого порядка, например, кольцевая мода и суперпозиция мод, так называемые комплексные моды.

Монохроматичность

Одноцветность. Свойство лазерного излучения: все электромагнитные волны в лазерном луче имеют одинаковую длину.

Мощность

Также: мощность лазера. Характеристика лазерного луча и параметр для обработки материалов. Мощность определяется как количество энергии в единицу времени. Или, говоря образно: мощность лазера соответствует энергии всех фотонов в лазерном луче, которые пролетают мимо воображаемого наблюдательного пункта в течение одной секунды.



Накачка

Подразумевает возбуждение активной среды. При накачке активной среде передается энергия, оптическая, электрическая или энергия химической реакции. Целью является создание инверсии заселенностей уровней энергии в активной среде. После этого большее количество атомов или молекул находится не в основном, а в возбужденном состоянии, и может начинаться процесс генерации лазерного излучения.

Нанесение покрытий

Метод, позволяющий делать заготовки более коррозионно- и износостойкими. Лазер расплавляет присадочный материал и наносит его слой на поверхность заготовки. Присадочный материал либо подается в виде порошка во время обработки, либо предварительно слоем наносится на заготовку.

Наплавка

При лазерной наплавке присадочный материал в форме проволоки или порошка расплавляется и наносится на поверхность заготовки. Различают ручную наплавку и автоматизированную наплавку – также называемую Direct Metal Deposition.

Непрерывный режим

Режим работы источника излучения: В отличие от импульсного режима, активная среда постоянно возбуждается и генерирует непрерывный по времени лазерный луч.

Оптика обработки

Оптика обработки с помощью зеркал или линз фокусирует лазерный луч. Кроме того, она оснащена устройствами связи с установкой, например, для подключения датчиков, и может осуществлять подачу присадочных материалов и газов. Оптические устройства обработки могут иметь совершенно разную конструкцию и, как правило, предназначены для определенного способа обработки.

Оптический тракт

Путь от источника излучения до оптики обработки, а также проводящие лазерный луч компоненты. Лазерные лучи могут свободно проводиться, например, через защитные трубы и сильфоны. Лучи твердотельных лазеров и лазеров на полупроводниковом диоде могут проводиться по оптике обработки по лазерно-лучевым световодным кабелям.

Отражение

В лазерной технике: перевод лазерного излучения в пограничные области. Примеры: Во время обработки поверхность заготовки отражает значительную часть лазерного излучения. В стекловолокне световодного кабеля лазерный луч проводится за счет полного внутреннего отражения.

Параметры процесса

Параметры влияния, с помощью которых организуется процесс обработки. Примерами являются: мощность лазера, плотность мощности, диаметр фокуса, положение фокуса, скорость обработки и режим работы.

Переплавка

Метод обработки поверхностей металлов. Лазерный луч постепенно расплавляет поверхность заготовки. При ее отверждении образуется новая структура (перекристаллизация). Эта структура является более тонкой, равномерной и приобретает новые качества, например, более высокую износостойкость или коррозионную стойкость.

Плотность мощности

Также называется интенсивностью. Характеристика лазерного луча и параметр для обработки материалов. Плотность мощности определяется как мощность на единицу площади. Самая высокая плотность мощности - в фокусе.



Плазма

Агрегатное состояние, которое с энергетической точки зрения выше газообразного. Компоненты вещества находятся в атомарном, ионизированном состоянии. При лазерной обработке материалов плазма может образовываться как побочный продукт. Металлическая плазма, например, поглощает излучение CO₂-лазера и тем самым влияет на процесс обработки.

Поглощение

В области обработки материалов лазером означает принятие заготовкой лазерного излучения. Степень поглощения указывает, какое количество лазерного излучения принимается заготовкой. При одинаковой длине волны она варьируется от материала к материалу. Наоборот считается: Материалы обладают различными степенями поглощения волн различной длины. Кроме того, степень поглощения зависит от угла падения луча, температуры, агрегатного состояния и характеристик поверхности материала.

Полупроводниковый лазерный диод

Тип лазера, использующий в качестве активной среды полупроводник. Лазерное излучение генерируется при электронно-дырочной рекомбинации на переходе между полупроводниковыми слоями с n- и p-легированием. Длина волны лазерного диода зависит, прежде всего, от состава полупроводника и простирается от видимого до инфракрасного диапазона спектра.

Поляризация

Направление колебаний световых волн. Различают: неполяризованное лазерное излучение, в котором световые волны совершают случайные (статистические) колебания в разных направлениях; линейно поляризованное, при котором направление колебаний лежит в одной плоскости; а также циркулярно поляризованное, при котором направление колебаний является круговым. Для обработки материалов применяется, как правило, неполяризованное и циркулярно поляризованное лазерное излучение. Некоторые типы лазеров генерируют линейно поляризованное

излучение. Оно преобразуется в циркулярно поляризованное с помощью так называемых фазовращательных зеркал.

Присадочные материалы

Все материалы, добавляемые к заготовке во время процесса обработки.

Рабочее расстояние

Расстояние между корпусом оптического устройства обработки и заготовкой. Варьируется при разных видах обработки. При лазерной резке с расплавлением это расстояние составляет всего 1 - 2 миллиметра, чтобы применяемый для резки газ проходил в пространство прорези.

Рабочий газ

Газ, который применяется для воздействия на процесс обработки. При лазерной резке с расплавлением рабочий газ выдувает расплав из прорези. При сварке CO₂-лазером он препятствует образованию плазменного облака.

Расходимость

Лазерный лучи являются направленными. Однако, они не являются параллельными и постепенно расширяются. Это расширение называется расходимостью. Угол раствора (расходимости) указывает, насколько сильно расходится лазерный луч.

Резка выжиганием

Способ разрезания конструкционной стали. Лазерный луч нагревает металл так сильно, что он реагирует с рабочим газом (кислородом) и сгорает (окисление). В ходе химической реакции образуется очень большое количество энергии. Она поддерживает процесс резки.

Резка с расплавлением

Метод разделения плавких материалов, в основном металлов. Лазерный луч поступательно расплавляет заготовку вдоль контура резки. Инертный рабочий газ, такой как гелий, аргон или азот, с высоким давлением вдувается в прорезь и удаляет из нее расплав.



Резонатор

Общее понятие: способная колебаться система, совершающая особо сильные колебания при возбуждении собственной частотой. В лазерной технике: способная колебаться система для генерации лазерного излучения. Резонатор состоит, как правило, из 2-х зеркал. Зеркала обеспечивают многократное прохождение лазерного луча сквозь активную среду и его усиление. Кроме того, резонатор задает направление распространения луча.

Рэлеевская длина

Рэлеевская длина - размер, определяющий глубину резкости сфокусированного лазерного луча. Она указывает, на каком расстоянии от фокуса площадь поперечного сечения лазерного луча удвоилась по сравнению с площадью поперечного сечения в фокусе. Удвоенную рэлеевскую длину пользователи часто называют глубиной резкости.

Сварка

Термический метод соединения. К способам лазерной сварки относятся: теплопроводная сварка и глубокая сварка металлов, а также просвечивающая сварка пластмасс.

Свет

С физической точки зрения: электромагнитное излучение с определенной длиной волны. В первую очередь, это понятие используется в отношении видимой части спектра (480 - 780 нанометров) и, кроме того, охватывает инфракрасный и ультрафиолетовый диапазоны электромагнитного спектра.

Съем материала

Способ, применяемый для маркировки и создания углублений. Лазерный луч снимает основной материал или слой покрытия.

Твердотельный лазер

Распространенный тип лазера в области обработки материалов. Активная среда представляет собой легированный кристалл или стекло. Типичными примерами являются: Nd:YAG и Yb:YAG (алюмо-

иттриевый гранат с неодимовым и иттербиевым легированием), а также Yb:стекло. Есть и другие, например, Nd:YVO₄ (иттрий-ванадат с неодимовым легированием). Длина волны твердотельного лазера зависит, в основном, от легирующего материала и для перечисленных сред составляет около 1 микрометра.

Теплопроводная сварка

Метод соединения металлов. Лазерный луч поверхностно расплавляет стыкуемые детали вдоль стыка. Из расплавы соединяются и застывают. При теплопроводной сварке образуются швы с гладкими поверхностями. Поэтому этот способ сварки особенно хорошо подходит для видимых кромок.

Фокус

Точка за фокусирующей линзой или фокусирующим зеркалом, в которой лазерный луч имеет свое наименьшее поперечное сечение. Площадь поперечного сечения фокуса определяет плотность мощности. Фокус, как правило, имеет круглое поперечное сечение. Кроме того, существуют и другие поперечные сечения, например, линейный фокус.

Частота

Характеристика колебаний. В отношении лазерной техники: характеристика лазерного луча. Частота указывает количество колебаний электромагнитных волн в секунду. Единицей измерения частоты является Герц (Гц).

Энергия

Физическая величина. В области лазерной обработки материалов интерес представляет общая передаваемая энергия, т. е. энергия, воздействующая на заготовку. Эта энергия соответствует мощности лазерного излучения, помноженной на время воздействия. В некоторых случаях важна даже энергия одного единственного фотона лазера. Эта фотонная энергия зависит от длины волны. Считается: Чем короче длина волны, тем выше энергия.



Предметный указатель

С

CO ₂ -лазер	
• Диффузионное охлаждение	2-6
• Области применения.....	5-3
• Проточный	2-4
• Характеристики.....	2-3

Д

DIN EN ISO 9013.....	7-2
----------------------	-----

Т

TEM ₀₀	1-7
TEM _{01*}	1-8
TwistLas	5-23

λ

λ/4-зеркало.....	4-15
------------------	------

А

Адаптивные зеркала	3-7
Аксиконовое зеркало	2-7
Активная среда.....	1-10
Алюминиевые сплавы	5-23
Алюминий	5-23

Б

Бесскосный стыковой шов.....	5-13
Благородные металлы.....	5-23

В

Возбуждение	1-10
Возбуждение ВЧ	2-9
Вспомогательные средства	
для стыковки	5-18
Вымоины	7-5
Выстрел мод	1-8

Г

Гауссова мода.....	1-7
Геликсное зеркало.....	2-7
Геометрия шва.....	5-13
Гибридный метод сварки	5-11
Главное фокусное расстояние	4-5
Глубина шероховатости.....	5-33, 5-39, 7-6
Глубокая сварка	
• Без присадочного материала	5-9
• С присадочным материалом.....	5-11

Д

Делитель луча	3-9
Дефекты шва	5-24
Диаметр фокуса.....	4-4
Длина волны видимый свет.....	1-2

Ж

Желобчатый сбег.....	7-9
----------------------	-----

З

Зажимные устройства	5-17
Замочная скважина	5-6, 5-9
Защитный газ.....	5-7
Зеркало.....	3-3

Зеркальная оптическая система.....	4-8
Зона теплового воздействия.....	5-39

И

Импульсный режим.....	2-11
Индукцированная лазером плазма	5-9
Испускание	
• Вынужденное	1-2
Источник излучения	1-10
Итоговая таблица	
• Образец	7-12

К

Качество луча	1-6, 4-5
• Лазерная сварка	5-19
Качество резки	7-2
Кернение	5-42
Коаксиальный лазер	2-6
• Ход луча	2-8
Когерентность.....	1-5
Кольцевая мода	1-8
Комплексная мода	1-8
Критерии качества резки	5-33
Круговое кернение	5-42

Л

Лазер	
• Безопасность	1-13
• Определение.....	1-2
• Охлаждение газа	2-3
• Установка	1-11
• Циркуляция газа	2-3
Лазерная закалка	5-43, 5-44
• Сканирующая оптика.....	5-44
• Фасетная оптика	5-44
Лазерная резка	
• Преимущества	5-39
• Применение	5-40
• Принцип действия	5-28
• Характеристики.....	5-33
Лазерная резка с плазменной поддержкой.....	5-32
Лазерная сварка.....	5-6
• Алюминий, алюминиевые сплавы ...	5-22
• Благородные металлы	5-23

• Главное фокусное расстояние	5-19
• Качество луча.....	5-19
• Поляризация.....	5-20
• Преимущества.....	5-21
• Применение	5-21
• Принцип	5-6
• Способы.....	5-8
• Стали.....	5-22
• Титан и титановые сплавы.....	5-23
• Характеристики	5-12
• Цветные металлы	5-22, 5-23
Лазерная сварочная головка.....	5-8
Лазерное излучение	
• Свойства	1-5
Лазеры	
• Типы	1-9
Линейно поляризованный свет	4-13
Линза	1-12, 3-3, 4-7
Линза из селенида цинка	4-7
Лунки.....	7-5
Лучевой телескоп	3-3, 3-5
• Внешний.....	3-5

М

Моды.....	1-7
Моды ТЕМ	1-7
Мощность лазера и материал.....	5-35
Монохроматичность	1-5

Н

Нанесение покрытий	5-48
Непрерывный режим.....	2-10
Нормальное гауссово распределение	1-7

О

Обрабатывающая головка	
• Лазерная сварочная головка	5-8
Обработка поверхностей.....	5-3, 5-43
Образование грата	7-3
Оптические системы для резки.....	4-9
Оптические устройства обработки	4-6
Осевой круговой шов	5-14
Основная мода	
• ТЕМ ₀₀	1-7
Отклонитель луча.....	3-10

Отклоняющее зеркало	1-12, 3-3
Отсутствие грата	5-35
Охлаждение	1-11
Охлаждение сопла	4-7

П

Параметрическая кривая	6-13
• Труба многоугольного сечения	6-14
Паровой канал	5-6, 5-9
Передвижной держатель зеркал	3-8
Переплавка	5-45
Погрешность прямоугольности	7-10
• Формула TRUMPF для верхнего предела	7-10
Погрешность уклона	7-10
Подвод газа для резки	4-7
Показатель степени дифракции	1-7
Поляризация	
• Лазерная сварка	5-20
Проводка луча	3-2
Произведение параметров луча	1-6
Прорезь	5-33, 7-4
Профиль	
• Определение	6-3
• С внутренним радиусом	6-4

Р

Работа на нескольких участках	3-9
Рабочий газ	5-7, 5-29, 5-31
Радиальный круговой шов	5-14
Разметка	5-42
Распределение интенсивности	1-7
Расходимость	4-6
Режимы работы	2-10
Режущее сопло	1-12, 4-7, 5-28
Резка	
• Станки и установки	5-41
Резка выжиганием	5-30
Резка с расплавлением	5-31
Резка со сжатым воздухом	5-32
Резка труб	
• Двухмерная	6-6
• Трехмерная	6-7
Резонатор	1-10, 2-3
Роботы	5-41
Рэлеевская длина	4-4

С

Сварка	
• Оптическая система	4-8
• Процесс	5-6
• Скорость	5-18
• Способы	5-6
• Станки и установки	5-27
Сварка со сканированием	5-12
Система датчиков контроля	
• Выходное зеркало	4-12
• Линза	4-12
Система датчиков контроля линзы	4-12
Система регулировки расстояния	6-12
Сканирующие оптические системы	4-10
Скорость резки	5-36, 5-39
Сопло	1-12, 5-28
Сопряженное фокусное расстояние	4-4
Способы резки	5-30
• Резка выжиганием	5-30
• Резка с расплавлением	5-31
Сталь	5-21
Ступенчатый режим	2-12
Ступенчатый цикл	2-12, 5-42

Т

Технология Direct Metal Deposition	5-50
Тип шва	5-15
Титан и титановые сплавы	5-23
Точечное кернение	5-42
Труба	
• Влияние противоположной стороны	6-17
• Вырезание контуров в плоскости	6-11
• Зазор для резки	6-13
• Качество	6-5
• Обработка искривленных поверхностей	6-9
• Определение	6-3
• Оценка качества лазерной резки	6-5
• Формы поперечного сечения	6-3
Труба многоугольного сечения	
• Обработка	6-14
• Уменьшение подачи	6-16
Трубный элемент	
• Свободная резка	6-18
Труборезные установки	5-41
Трубы круглого сечения	5-40
Трубы многоугольного сечения	5-40

У

Угловой шов.....	5-13
Усредненная глубина шероховатости R_z	
• Нормативы фирмы TRUMPF	7-8
Усредненная глубина шероховатости R_{z5}	7-6
• Измерение	7-7

Ф

Фазовращатель	1-12
Фокусирование	4-3
Фокусирующая линза	1-12, 3-3, 4-7
Фокусирующая оптика	5-28

Ц

Цветные металлы	5-22, 5-23
Центробежный турбоагнетатель	2-5

Циркулярно поляризованный свет.....	4-14
Циркуляционный поляризатор	3-3

Ш

Ширина реза	
• Нормативы фирмы TRUMPF	7-5
Шов	
• Подготовка.....	5-15
Шов внахлестку.....	5-14
Шов с отбортовкой кромок.....	5-13
Шов таврового соединения	5-14

Э

Эффект глубокой сварки	5-10
------------------------------	------