

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
ННІ МІТ
Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

Пупань Л.І.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Лазерні та комбіновані технології»

Харків

МОДУЛЬ №1. Лазерные технологии и их применение в машиностроении

ЛЕКЦИЯ №1

ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

1. Роль технологий на современном этапе
2. Лучевые методы обработки материалов и их роль в машиностроении
3. Общая характеристика лазерных технологий

1. Понятие технология сегодня трактуется как совокупность управленческих, научно-исследовательских, опытно-конструкторских, производственных процессов, являющихся фундаментом продуктивной деятельности людей.

Технологии являются главными объективными предпосылками экономического развития и на этой основе удовлетворения потребностей с помощью новых продуктов, новых материалов, новых процессов или их возможных комбинаций.

Разработка принципиально новых технологий, основанных на последних достижениях науки и техники, – главная черта современного этапа развития производства.

Дальнейшее ускорение НТП, всесторонняя интенсификация производства связаны с развитием и применением высоких технологий.

Основными критериями высоких технологий являются: наукоемкость, системность (включая физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации), компьютерная технологическая среда, автоматизация всех этапов, устойчивость, надежность, экологическая чистота, высокая культура производства. При соответствующем техническом и кадровом обеспечении данные технологии гарантируют получение изделий, обладающих новым уровнем функциональных, эстетических и экологических свойств.

Высокие технологии определяют в целом уровень развития общества и оказывают влияние на различные сферы человеческой деятельности – промышленное производство, информационные технологии, экономику, здравоохранение, образование.

Примеры технологий, которые по праву могут быть отнесены к высоким: микроэлектроника, информационные технологии, **лазерные и другие лучевые технологии**, биотехнологии, космические технологии, альтернативная энергетика, нанотехнологии и т.д.

2. Среди различных видов высоких технологий особая роль принадлежит лучевым технологиям, которые основаны на воздействии на поверхность материала высококонцентрированных узконаправленных лучевых потоков или высокоэнергетических струй.

Данные методы получили интенсивное развитие во второй половине XX века и сегодня занимают полноправное место среди других технологий, применяемых в различных отраслях, в том числе в машиностроении.

Носителями энергии в этих методах являются: световой луч высокой энергии, поток ускоренных заряженных частиц – электронов, а также плазменная струя.

Особенностью лучевых методов обработки является отсутствие традиционного рабочего инструмента, роль которого выполняет непосредственно используемое излучение, которое оказывает тепловое воздействие на материал.

Лучевые технологии достаточно широко уже применяются в машиностроении – в технологиях получения и обработки конструкционных материалов (электронно-лучевой

переплавление, термообработка и легирование, лучевые способы сварки, размерной обработки), в технологиях осаждения износостойких покрытий, в нанотехнологиях (получение наноматериалов, методы их исследования).

Как правило, установки лучевой обработки являются многоцелевыми и позволяют реализовать целый ряд технологий обработки материалов.

Особую роль играют лучевые методы в технологиях размерной обработки заготовок деталей машин.

Как известно, по виду используемой энергии методы размерной обработки делят на механические (обработка резанием), физико-химические и комбинированные, рис.1.

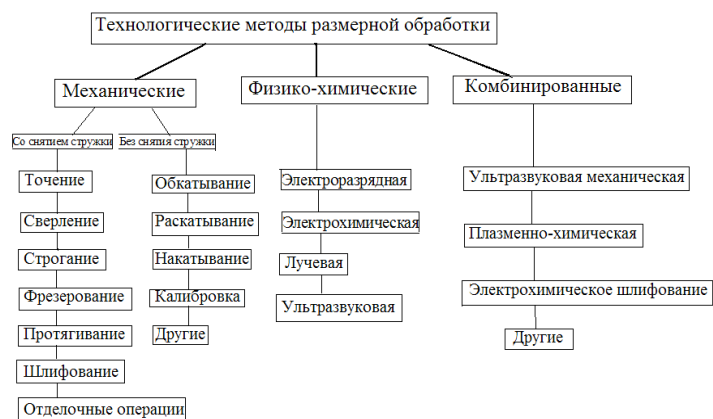


Рисунок 1 – Методы размерной обработки заготовок деталей машин

Наряду с наиболее распространенной и универсальной традиционной механической технологией (в основном, резанием) существует еще одна группа перспективных методов размерной обработки, принципиально отличающихся по характеру формообразования деталей. Это **группа физико-химических методов размерной обработки (ФХО)**, базирующихся на использовании различных физико-химических процессов энергетического воздействия на заготовку с целью формообразования детали с заданными размерами, формой, требуемым качеством поверхности.

Достоинствами методов ФХО по сравнению с традиционными методами резания являются следующие:

- практическая независимость режимов обработки от механических свойств материала в большинстве методов, что позволяет обрабатывать, высоколегированные, твердые сплавы, полупроводниковые материалы, высокопрочные хрупкие материалы;
- отсутствие одного из важнейших требований традиционной механической обработки – превышения твердости инструмента над твердостью обрабатываемого материала;
- возможность осуществления операций, достаточно сложных либо невозможных для механической обработки (заготовки сложной геометрической формы из труднообрабатываемых материалов, в т.ч. с глухими фасонными отверстиями, полостями сложной формы, отверстиями с криволинейной осью, отверстиями малого диаметра; миниатюрные тонкостенные изделия);
- возможность точного регулирования процессов и их автоматизации благодаря достаточной простоте кинематики формообразования поверхности.

Перспективные методы ФХО не вытесняют существующие методы резания, они их дополняют либо заменяют в тех случаях, о которых говорилось выше. К факторам, ограничивающим их широкое применение, относятся, прежде всего, более низкая

производительность и большая энергоемкость по сравнению с методами механообработки. Поэтому *сегодня удельный вес этих методов невысок – от 5...7% до 20...30% в различных отраслях.*

Одной из основных групп ФХО являются лучевые методы, основанные на размерном удалении материала плавлением и испарением его в зоне обработки под воздействием энергии концентрированных узконаправленных лучевых потоков или высокоэнергетичных струй (светового луча высокой энергии, потока ускоренных заряженных частиц – электронов, плазменной струи).

Методы отличаются высокой плотностью энергии в пятне фокусировки, локальностью, прецизионностью, высоким качеством обработанной поверхности.

Основным недостатком лучевых методов обработки сегодня является достаточно высокая стоимость, поэтому их применение целесообразно для изготовления высокоточных ответственных изделий из труднообрабатываемых материалов.

3. Из указанных лучевых методов обработки материалов и получения изделий, в т.ч. в машиностроении, особая роль принадлежит лазерным технологиям, которые являются неотъемлемой частью современного промышленного производства и стали своего рода символом высоких технологий.

Отличительные черты применения лазерных технологий в различных видах производств – высокое качество получаемых изделий, высокая производительность процессов, экономия материальных ресурсов, экологическая чистота, повышение культуры производства.

Лазерная обработка может быть применена для обработки практически всех материалов независимо от их твердости и вязкости (металлов, твердых сплавов, керамики, стекла, пластмасс, резин, полупроводниковых материалов, драгоценных камней, биологических материалов) во многих отраслях промышленности – в машиностроении, в микроэлектронике, в промышленности строительных материалов, в медицине, в сельском хозяйстве, в ювелирной промышленности и т.д.

Получаемый в лазерах (оптических квантовых генераторах, ОКГ) концентрированный световой луч является мощным тепловым источником, используемым для целого ряда процессов обработки материалов в машиностроении и других отраслях промышленности.

Качество лазерной энергии (лазерного луча) определяется ее высокой концентрацией и возможностью передачи на значительные расстояния.

Лазерное излучение обеспечивает получение предельных значений многих параметров – плотности мощности в зоне фокусировки, реализуемой температуры в зоне воздействия и т.д.

Применение лазерных технологий обеспечивает повышение *эффективности и конкурентоспособности предприятий.*

ЛЕКЦИЯ №2

ОСНОВЫ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Свет как электромагнитные волны
2. Основные свойства лазерного излучения
3. Общий принцип действия лазера. Условия генерации вынужденного лазерного излучения
4. История создания лазерной техники и технологий

1. Оптическое излучение (свет в широком смысле слова) – представляет собой электромагнитные волны с длиной волны от 100 нм до 1 мм (видимого, ИК и УФ – диапазона), рис.2, при прохождении которого через среду возможны процессы отражения, преломления, дифракции, интерференции.

Для всех типов электромагнитного излучения справедливо соотношение $\lambda\nu = c$.

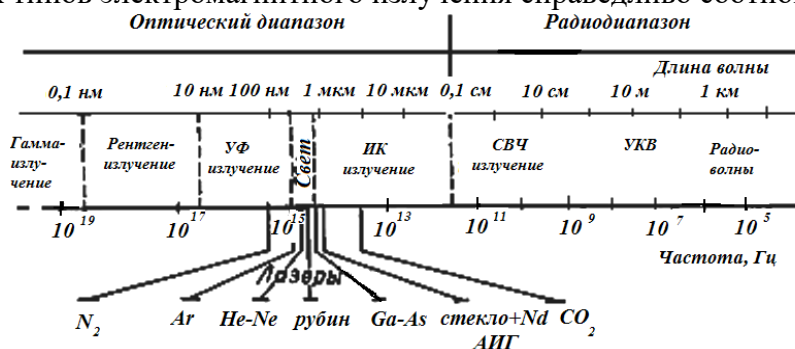


Рисунок 2 – Электромагнитный спектр и диапазон длин волн, в котором получено лазерное излучение

Двойственная природа света (корпускулярно-волновой дуализм) заключается в том, что, с одной стороны, световое излучение представляет собой электромагнитные волны, т. е. колебания электрического и магнитных полей, с другой – обладает корпускулярными свойствами, т.е. излучение может быть представлено как поток дискретных квантов энергии, фотонов. Каждый фотон несет определенное количество энергии, определяемое из соотношения

$$W = h\nu = hc/\lambda,$$

где h – постоянная Планка; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Наиболее широко используемые лазеры генерируют световое излучение в диапазоне длин волн 0,3 (ультрафиолетовый диапазон) ... 10 мкм (инфракрасный диапазон).

2. Лазерное излучение имеет особые свойства, которые делают его уникальным технологическим инструментом.

Основные характеристики лазерного излучения:

- **монохроматичность:** лазерное излучение представляет собой свет практически одной длины волны (одной частоты);

- **направленность:** угол расходимости луча во многих случаях не превышает долей угловой минуты. Это значит, что энергия может передаваться по лучу на большие расстояния и в соответствии с законами геометрической оптики легко фокусироваться на площадки небольших размеров ~10...100 мкм.

- **когерентность:** согласованность волновых процессов в пространстве и во времени, что теоретически позволяет сфокусировать лазерное излучение в пятно диаметром, равным длине волны и получить высочайшую плотность энергии.

Все три особенности лазерного излучения нашли применение в самых разных отраслях техники при решении различных технологических задач.

3. Принцип действия лазера (оптического квантового генератора – ОКГ), заложен в его названии: laser - аббревиатура от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света в результате вынужденного (стимулированного) излучения.

Лазер – устройство, преобразующее различные виды энергии (электрическую, световую, химическую, тепловую) в энергию когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона.

Действие лазера основано на использовании индуцированного (вынужденного) излучения света системой возбужденных атомов, ионов, молекул или других частиц вещества (**активной средой**), помещенной в **оптический резонатор**.

Лазерный эффект (вынужденное излучение) наблюдается при переходах между определенными энергетическими уровнями атомной или молекулярной системы (активной среды).

Для генерации вынужденного излучения необходимо обеспечить интенсивное «заселение» одного или нескольких верхних энергетических уровней – так называемую «инверсную населенность».

Инверсная населенность – это такое состояние системы, когда большая часть электронов (атомов, молекул) находится на верхних энергетических уровнях, с которых начинается флуоресцентный переход, т.е. избыточная концентрация возбужденных микрочастиц.

Для получения лазерного эффекта, создания инверсии населенностей необходимо изменить тепловое равновесие системы, т.е. осуществить «накачку» активного элемента (например, облучение системы дополнительным светом внешнего источника).

В результате вынужденного (индуцированного) взаимодействия фотона с атомом (молекулой) появляются два фотона, которые имеют одну и ту же частоту и распространяются в одном и том же направлении. Фактически наблюдается усиление интенсивности падающего света, рис.3.

Для усиления излучения, т.е. для увеличения числа возбужденных частиц, участвующих в генерировании, увеличивают размеры активного вещества и используют **резонаторную систему** – два зеркала (одно – полностью отражающее, т.е. непрозрачное, другое – частично отражающее, полупрозрачное).

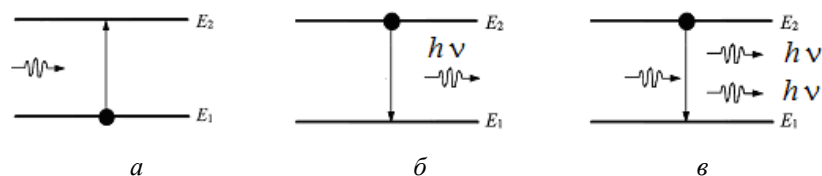


Рисунок 3 – Схемы процессов взаимодействия излучения с веществом: а – поглощение; б – спонтанное излучение; в – вынужденное излучение

Общая оптическая ось зеркал выделяет в пространстве направление, в котором формируется лазерный луч, рис.4.

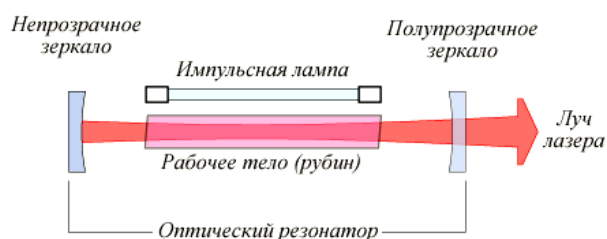


Рисунок 4 – Общая схема устройства лазера и формирования лазерного излучения

Последующей фокусировкой с помощью фокусирующей линзы уменьшают диаметр луча, при этом плотность энергии существенно возрастает. Сфокусированный лазерный луч направляется на обрабатываемое изделие.

4. Основные этапы развития лазерной техники и технологий:

- 1917 г.: Альбертом Эйнштейном введено понятие и теоретическое обоснование вынужденного излучения, которое лежит в основе принципа работы лазера;
- 1939 г.: советский физик В.А. Фабрикант указал на возможность использования вынужденного испускания для усиления электромагнитного излучения при его прохождении через вещество;

- 1950 год: французский физик Альфред Кастлер предложил метод «оптической накачки» среды для реализации основного принципа работы лазера – создания в ней инверсной населенности;

- 1954 г.: молекулярный генератор (мазер) разработан и создан независимо и одновременно в СССР (группой под руководством Н.Г. Басова и А.М. Прохорова) и в США (группой под руководством Ч. Таунса);

- 1960 г.: первый твердотельный (рубиновый) лазер оптического диапазона (создан американским физиком Т.Мейманом) – один из наиболее распространенных сегодня;

- начало 70-х гг.: в СССР и США одновременно создаются первые полупроводниковые лазеры;

- 1962 г.: первые коммерческие лазеры (США).

Дальнейшие годы связаны с созданием различных типов лазеров – твердотельных, жидкостных, газовых, полупроводниковых (диодных), оптоволоконных, лазеров с использованием нанотехнологий; расширением диапазона длин волн лазерного излучения; повышением КПД; снижением стоимости промышленных установок.

ЛЕКЦИЯ №3 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЛАЗЕРОВ. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

1. Классификация лазеров
2. Основные типы твердотельных лазеров и их характеристика
3. Диодные лазеры. Лазеры с диодной накачкой
4. Волоконные лазеры

1. Разнообразие лазеров объясняется применением разных типов активных элементов, разных способов накачки, разных значений выходной мощности, длины волны, а также разнообразием задач, которые решаются при помощи лазера.

Существующие типы лазеров можно классифицировать по нескольким признакам:

◆ *по принципу агрегатного состояния активного вещества:* твердотельные, жидкостные, газовые лазеры, лазеры на свободных электронах;

◆ *по способу возбуждения активного вещества (по способу накачки):* лазеры с оптической накачкой, лазеры с электронно-лучевой накачкой, газоразрядные лазеры, диодные лазеры, химические лазеры, лазеры с ядерной накачкой, лазеры с возбуждением солнечной энергией и т.д.;

◆ *по величине излучаемой мощности:* маломощные (от 10^{-3} до нескольких ватт), средней мощности ($10^3 \dots 10^5$ Вт), высокомоощные (более 10^6 Вт...десятки МВт);

◆ *по длине волны генерируемого излучения:* от 0,001 мкм (1 нм) до 1000 мкм (1 мм);

◆ *по режиму работы:* непрерывный, импульсный;

◆ *по энергии импульса;*

◆ *по КПД (от десятых долей процента у твердотельных до 60 % у диодных);*

◆ *по безопасности.*

Лазеры представляют собой достаточно сложное оборудование, создание которого требует определенных знаний точной механики, оптики, электроники, опыта работы с вакуумной техникой (для газовых лазеров), технологии выращивания лазерных кристаллов, изготовления полупроводниковых слоев и т.д.

Благодаря сложности конструкции лазеры выглядят скорее как небольшой завод, а не как оптическое устройство.

В то же время в настоящее время наметилась тенденция по упрощению структуры лазерных установок, повышению их мобильности, созданию офисного лазерного оборудования, в т.ч. принтеров, сканеров, указок, снижению их стоимости.

Лазерные установки производятся многими ведущими фирмами мира – в США, Германии, Японии, Китае, в России, в Украине.

Стоимость лазеров зависит от мощности, типа активного элемента и т.д.; средняя стоимость лазера невысокой мощности (100...200 Вт) – 1,5...5000 тыс. \$; стоимость 1 час работы (резка) – от 2 до 10 \$.

По оценкам журнала «*Laser Focus World*», мировой рынок лазеров составляет около 8 млрд долл. США. Из них 60 % приходится на диодные лазеры, остальное – другие типы лазерных систем.

2. Из всех типов лазеров одними из наиболее распространенных, в т.ч. для металлообработки, являются твердотельные лазеры (ТЛ), рис.5.

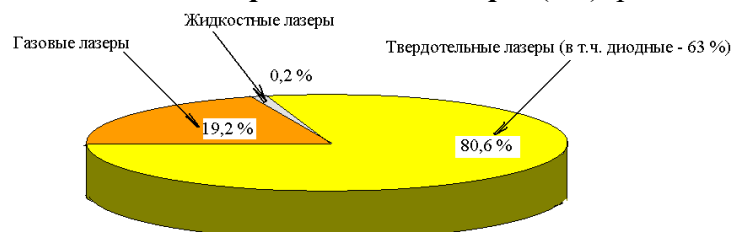


Рисунок 1 – Относительная доля различных типов лазеров

Активная среда классических твердотельных лазеров представляет собой цилиндрические (или призматические) стержни длиной в несколько сантиметров, выполненные из люминесцирующих материалов – искусственно выращенных монокристаллов (синтетического рубина, активированного хромом, иттрий-алюминиевом гранате с примесью хрома, тулия, неодима, гольмия); стекла, активированного неодимом.

Для возбуждения активной среды в твердотельных лазерах применяется оптический метод накачки – с помощью интенсивного света газоразрядных (для импульсного режима) или дуговых (для непрерывного режима) ламп, полупроводниковых диодов, других лазеров.

2.1. Рубиновый лазер является первой реализованной на практике лазерной системой. В качестве активной среды используется кристаллический стержень из синтетического рубина (оксида алюминия Al_2O_3 , легированного 0,05 вес. % 3-валентными ионами хрома ($Cr^{3+}:Al_2O_3$)).

Лазеры на рубине генерируют излучение в видимой (красной) области спектра длиной волны $\sim 0,6943$ мкм (694,3 нм) при комнатной температуре.

Рубиновые лазеры – трехуровневые системы, это требует достаточно высокой энергии накачки для достижения порога лазерного излучения. *КПД лазеров на рубине лежит в пределах 0,1...1 %.*

Применение рубиновых лазеров:

- спектроскопия;
- медицина (офтальмология);
- голография.

2.2. У неодимового лазера генерируется излучение ионов Nd^{3+} . Ион Nd^{3+} может быть встроен как активатор в разные рабочие вещества – кристаллы, стекла. В настоящее время чаще всего для лазеров с неодимом используют кристаллы иттрий-алюминиевого (алюмоиттриевого) граната, легированного неодимом – Nd: ИАГ. *КПД лазеров этого типа составляет несколько процентов.*

Лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом является важнейшим типом лазеров и используется в науке и технике, особенно измерительной, при обработке материалов, в медицине, спектроскопии и голографии.

3. С учетом того, что современные мощные традиционные твердотельные лазеры являются довольно малоэффективными преобразователями энергии (КПД максимум до 10 %), перспективными считаются разработки **полупроводниковых (диодных) лазеров**, КПД которых достигает 50 % и выше.

Полупроводниковые лазеры перспективны с экономической точки зрения и уже производятся в больших количествах для использования в обычных потребительских товарах, в т.ч. в цифровых музыкальных центрах, ПЗУ сверхбольшой емкости на компакт-дисках (CD- и CD-ROM) для персональных компьютеров и в лазерных принтерах. Среди других областей применения – системы дальней связи, обработка материалов, медицинская техника, проекционные системы для телевидения.

Активным элементом в диодных лазерах является полупроводниковый кристалл (арсенид галлия, кремний с примесью индия, фосфат галлия, арсенид индия, соли свинца, селенид цинка и т.д.)

Диодные лазеры представляют собой полупроводниковые слои с p- и n-проводимостью, через которые пропускается электрический ток. Тонкий пограничный слой между p- и n-зонами размером ~ неск. мкм является активной зоной, испускающей лазерное излучение, рис.б.



Рисунок 6 – Схема формирования излучения диодного лазера

4. Дальнейшим развитием лазерной техники является также создание **волоконных лазеров** с полупроводниковой накачкой, **с использованием активных элементов на основе волоконной оптики.**

Главная особенность данного лазера в том, что излучение рождается в тонком, диаметром от нанометров до 1000 мкм, волокне-сердцевине из оптически прозрачного материала (стеклянном, полимерном), которое находится внутри волокна большего диаметра – оболочке.

Для накачки волоконных лазеров используют преимущественно диодные лазеры.

Использование активных элементов на основе волоконной оптики обеспечивает высокое качество луча, КПД преобразования электроэнергии возрастает до 50 %, появляется возможность разработки надежной и компактной конструкции лазера за счет исключения нуждающихся в юстировке оптических приборов. Подобное оборудование представляет собой практически офисную технику, питание которой осуществляется от обычной розетки.

ЛЕКЦИЯ №4 ГАЗОВЫЕ И ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ

1. Общая характеристика газовых лазеров
2. CO_2 –лазеры
3. Жидкостные лазеры – СР
4. Основные направления развития лазерной техники

1. Первый газовый лазер (на смеси гелия и неона) был создан в 1960 г. После ряда усовершенствований гелий-неоновый лазер стал одним из наиболее применимых в различных отраслях.

Газовые лазеры наиболее часто используются в области научных исследований, а также в машиностроении и в материалообработке, в строительстве (в т.ч. крупных сооружений), в оптической связи и локации, в голографии, в космических исследованиях (в т.ч. в открытом космосе), в медицине.

Основным элементом *газового лазера* является заполненная газом разрядная трубка (*активный элемент*), ограниченная с двух сторон параллельными зеркалами – непрозрачным и полупрозрачным (*оптический резонатор*).

В результате электрического разряда между введенными в трубку электродами, создаваемого с помощью источника питания, возникают ускоренные электроны, которые возбуждают газовые молекулы. Возвращаясь в стабильное состояние, эти молекулы образуют кванты света, аналогично твердотельным лазерам.

По сравнению с другими типами лазеров (твердотельными, полупроводниковыми) спецификой газовых лазеров являются следующие свойства:

- ◆ более значительные размеры;
- ◆ более высокое качество пучка лазерного излучения;
- ◆ более высокие мощности в непрерывном режиме;
- ◆ большая точность и стабильность частоты излучения;
- ◆ большой диапазон длин волн.

В качестве активной среды в газовых лазерах чаще всего применяют возбужденные электрическим током газы или пары.

Основные типы газовых лазеров:

- на нейтральных атомах;
- на нейтральных молекулах;
- на эксимерах (могут быть отнесены к группе молекулярных);
- на ионах.

4. Один из наиболее распространенных и широко применяемых в промышленном производстве (в частности, для обработки материалов), в медицине, для научных целей – CO_2 -лазер, рис.7.

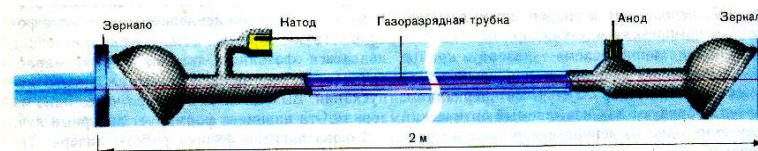


Рисунок 7 – Схема газового лазера

Обычно CO_2 -лазеры работают на смеси газов – углекислый газ, гелий, азот ($\text{CO}_2 + \text{He} + \text{N}_2$).

Гелий (содержание от 60 до 80 %) непосредственно не участвует в процессе генерации лазерного излучения. Его задачей является «опустошение» нижнего лазерного уровня в результате столкновений молекул CO_2 с гелием и обеспечение высокого теплоотвода.

Азот выполняет аналогичную задачу – молекулы N_2 обеспечивают эффективную накачку верхнего лазерного уровня.

Гелий является дорогостоящей и дефицитной составляющей, поэтому ведется поиск новых безгелиевых рабочих смесей, например, $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{воздух}$ и т.д. Тем не менее, все эти лазеры принято называть *лазерами на CO_2 или CO_2 -лазерами*.

Лазеры данного типа имеют высокую мощность – до 100 кВт в непрерывном режиме, большой КПД – на уровне 10...20 %.

В импульсном режиме генерируются лазерные импульсы в диапазоне от наносекунд до миллисекунд.

Существует большое число конструктивных исполнений CO_2 -лазера с длиной волны в ИК-диапазоне от 9 до 11 мкм.

4. Развитие лазерной техники идет в направлении повышения их мощности, повышения КПД, возможности компьютерного управления, передачи световой энергии на большие расстояния, уменьшения габаритов оборудования, снижения его стоимости.

Развитие машиностроения и приборостроения на современном этапе определяется дальнейшим стремлением к уменьшению габаритов, миниатюризации выпускаемых изделий, повышению их качества и надежности. При этом значительные усилия направляются на развитие микро-и нанотехнологий обработки материалов, среди которых особое значение приобретает лазерная обработка сверхмощными импульсами, т.к. традиционные методы (микромеханическая обработка, микроштамповка) находятся на предельных возможностях при изготовлении современных миниатюрных и высокоточных изделий.

Степень локализации подводимой лазерной энергии в пространстве зависит от длины волны излучения, а во времени – от длительности лазерного импульса. Поэтому перспективными направлениями совершенствования лазерной техники, наряду с указанными выше, являются также уменьшение длины волны получаемого излучения и длительности импульсов излучения.

Сегодня лазерные пучки охватили весь оптический диапазон, в том числе инфракрасную и ультрафиолетовую область спектра. Длина волны лазерного излучения, зависящая от природы активного элемента, может быть в диапазоне нескольких нм (самая короткая из длин волн генерируемого современными лазерами излучения составляет 4 нм) до 1 мм. Есть даже лазеры рентгеновского диапазона, обсуждаются идеи гамма-лазера.

Создание лазеров коротковолнового рентгеновского излучения и гамма-излучения с длиной волны атомного порядка, обладающих высокой проникающей способностью (до 15...20 см в стали) и предельными значениями пятна фокусировки, открывает новые возможности перед лазерной технологией и позволяет повысить возможности сверхпрецизионной обработки.

Локализация в пространстве и во времени лазерной энергии позволяет добиться очень высокой концентрации плотности потока излучения (до $10^{14} \dots 10^{26} \text{ Вт/см}^2$), что дает возможность реализовать различные механизмы энергетического воздействия на материал (например, механизм «холодного» разрушения – испарение без плавления) и, таким образом, выполнить разнообразные виды обработки. При этом термическое воздействие локализуется в чрезвычайно малой толщине материала, вплоть до толщины молекулярного или атомарного слоев без нарушения структуры основного материала.

Тенденции развития лазерной техники и технологии, постоянное их совершенствование приводят к тому, что методы обработки материалов с применением лазерного излучения становятся конкурентоспособными в различных отраслях промышленности. В ряде случаев широкое их применение сдерживается соображениями экономического характера: стоимость лазеров пока еще достаточно высока, что требует тщательного анализа всех факторов при выборе данного способа.

ЛЕКЦИЯ №5

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

1. Характеристики лазерного излучения как инструмента для обработки материалов
2. Управление перемещением лазерного луча
3. Процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом
4. Макро- и микролазерная обработка

1. Широкое применение лазерного излучения в науке и технике обусловлено специфичностью свойств этого излучения - монохроматичностью, когерентностью, высокой направленностью, особой пространственно-временной структурой.

Лазеры представляют собой универсальные приборы, легко перестраиваемые и способные осуществлять различные виды обработки (в том числе получение изделий сложной формы, операции с удалением материала – сверление, разрезные операции, сварку) разнообразных материалов – металлов, неметаллов, полупроводниковых материалов, минералов и драгоценных камней, биологических тканей и т.д.

Лазерный луч не подвержен износу, как механический инструмент, применим для задач микрообработки.

Лазерное оборудование автоматизировано, совместимо с промышленными роботами для обеспечения движения луча.

Существует лишь одно существенное ограничение их широкого внедрения в промышленность – инвестиционные затраты.

2. Для многих применений лазерного излучения требуется обеспечение относительного перемещения лазерного излучения (модуляция) и объекта, на который это излучение направлено. Это может быть получено изменением положения:

- 1) объекта относительно неподвижного луча;
- 2) луча относительно неподвижного объекта;
- 3) луча относительно подвижного объекта.

Первый способ нашел наиболее широкое распространение в технологических применениях лазерного излучения. В этом случае заготовке может быть сообщено вращательное или поступательное движение. Возможно также различное сочетание этих движений. Закон перемещения обычно задается системой программного управления.

Для реализации второго и третьего способов используются сканеры (механические, оптические, электрические, пьезосканеры).

3. Возможности использования лазерного излучения в качестве универсального инструмента для обработки материалов определяются закономерностями протекания таких процессов и явлений, как поглощение излучения поверхностью материала, нагрев, плавление материала, его эрозия, образование зоны термического влияния (ЗТВ), изменение напряженно-деформированного состояния, диффузия в условиях тепловых воздействий на материал и т. д.

Данные процессы, реализуемые при разных видах технологической обработки, зависят от плотности мощности излучения и длительности его воздействия на материал.

Т.к. большинство технологических применений лазеров основано на тепловом действии света, к технологическим лазерам относят те лазеры, которые способны нагреть объект воздействия до температур, когда в обрабатываемом материале происходят те или иные физические процессы, такие как: изменение фазового состояния и структуры, химические реакции, физические переходы – плавление, испарение и т.д.

Использование различных эффектов воздействия лазерного луча на материал позволяет реализовать следующие технологические процессы обработки:

- нагрев материала \Rightarrow упрочнение, термообработка;
- плавление \Rightarrow сварка;
- испарение \Rightarrow размерная обработка (резка, сверление), нанесение покрытий и т.д.

4. При лазерной обработке материалов следует различать:

- макрообработку, которая применяется для обработки средних и крупных заготовок – сварки элементов конструкций большой толщины с глубоким проплавлением, разделительных операций, сверления, закалки участков от 0,1 до нескольких миллиметров с помощью достаточно мощных лазеров – от 2,2 до 20 кВт;
- микрообработку – разделительные операции, сверление микроотверстий (диаметром в несколько мкм), удаление материала, упрочнение, процессы обработки тонких пленок толщиной от нескольких нанометров до микрометров, точной сварки, изготовление и обработка интегральных микросхем.

Для макрообработки используются, прежде всего, газовые CO_2 -лазеры; для микрообработки применимы твердотельные лазеры, например, Nd-ИАГ-лазеры.

ЛЕКЦИЯ №6

ЛАЗЕРНАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

- 1. Достоинства по сравнению с традиционными процессами**
- 2. Обрабатываемость материалов лазерным излучением.**
- 3. Зона термического влияния**

1. К наиболее общим преимуществам лазерной технологии можно отнести следующие.

1. Отсутствие механического воздействия при обработке со стороны инструмента на обрабатываемую заготовку. Это позволяет обрабатывать тонкие, легко деформируемые, миниатюрные изделия без опасности их повреждения.

2. Высокая локализация лазерного воздействия на материалы позволяет выполнять уникальные операции прецизионной микрообработки, невыполнимой или трудновыполнимой другими технологическими методами.

3. Благодаря определенной «гибкости» лазерного излучения как обрабатывающего инструмента, возможности сравнительно легкого изменения его положения в пространстве без сложных металлоемких приспособлений можно проводить обработку в труднодоступных или недоступных для обычного инструмента местах.

4. Безынерционность при перемещении лазерного излучения относительно заготовки, возможность дискретной и непрерывной подачи энергии лазерного луча в зону обработки позволяют значительно повысить производительность технологических операций.

5. Возможность управления температурой в зоне лазерного воздействия в широких пределах позволяет обрабатывать лазерным излучением любые материалы, создает предпосылки для замены различных дефицитных высоколегированных сталей и сплавов менее дефицитными конструкционными материалами, шире использовать неметаллические (керамические, композиционные) материалы.

6. Применение лазерной технологии позволяет существенно повысить точность, качество, надежность, долговечность деталей, инструментов, изделий, дает возможность сообщить обработанным изделиям новые эксплуатационные свойства.

7. Отсутствие износа инструмента.

8. Использование лазерного излучения в качестве инструмента в различных технологических процессах существенно улучшает условия труда, повышает общую культуру производства.

2. Обрабатываемость материалов лазерным излучением, в отличие от механической обработки, определяется не механическими свойствами материала, а зависит от теплофизических свойств: температуры плавления и испарения, теплоемкости, теплоты сублимации (переход из твердого в газообразное состояние), теплоты плавления.

При воздействии лазерного излучения на материал в результате нагрева в поверхностном слое происходят структурные и фазовые изменения, возникают остаточные термонапряжения, изменяются свойства материала, т.е. возникает зона термического влияния.

3. Под зоной термического влияния понимают область материала с отличными от исходных структурой и свойствами, которая появилась в результате лазерного облучения.

Размер данной зоны составляет от нескольких мкм до нескольких десятков и даже сотен мкм.

Структурные изменения при лазерном воздействии на материал могут быть следующими:

- рекристаллизация;
- закалка (сталей);
- аморфизация (стеклокерамики, тонких металлических пленок);
- взаимная диффузия нагретых слоев;
- отжиг дефектов (в полупроводниках) и т.д.

Характер структурных и фазовых превращений в материале, параметры облученной зоны при прочих равных условиях зависят от природы материала, его исходных свойств.

Например, в углеродистых сталях зона термического влияния при лазерной обработке имеет слоистую структуру (обычно 2...3 слоя), ширина ЗТВ ~ 60...80 мкм.

Первый слой представляет собой светлую нетравящуюся полосу (*белый слой*), наблюдаемую и при других видах высокоскоростного локального нагрева (электронно-лучевого, электроразрядного, плазменного и т. д.). Микротвердость этого слоя значительно отличается от микротвердости исходного материала (существенно выше, увеличение твердости может составлять несколько крат – 3...5 и существенно превышать твердость, получаемую при традиционной термообработке). Толщина слоя ~ 10...20 мкм.

Второй слой обычно является переходным от слоя с повышенной микротвердостью к исходной структуре.

Микротвердость зоны термического влияния в углеродистых сталях при одинаковых режимах обработки зависит от содержания углерода. С увеличением содержания углерода наблюдается значительный рост микротвердости.

Увеличение микротвердости в ЗТВ связано со структурными превращениями, происходящими при лазерном нагреве, и формированием фаз, характеризующихся высокой твердостью (например, мартенситной, мартенсито-аустенитной структуры, перлитно-цементитной).

ЛЕКЦИЯ №7

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА И КОНТУРНАЯ ОБРАБОТКА

1. Общая характеристика
2. Принцип реализации
3. Основные параметры режима лазерной резки и технологические показатели процесса
4. Типичные изделия и области применения
5. Оборудование

1. Одним из основных процессов получения заготовок или деталей в машиностроении является **резка металла**, т.е. разделение исходного материала на части или получение из него деталей определенной формы.

Традиционно используются механические способы, основными недостатками которых являются невысокая производительность, низкая стойкость режущего инструмента, а также проблематичность, а порой и полная невозможность разнофигурной резки по круглым и криволинейным контурам.

Методы, основанные на физико-химическом воздействии на материал (газовая, газозлектрическая, плазменная резка), также не лишены существенных недостатков (низкая точность, значительное термическое воздействие). Высокоточная электроэрозионная резка позволяет изготавливать детали любой геометрии, однако ее недостатками являются низкая производительность, высокая технологическая сложность.

Применение лазеров для резки металлов и неметаллов обусловлено следующими преимуществами по сравнению с указанными выше и ставшими уже традиционными методами: обширным классом обрабатываемых материалов; возможностью получения тонких разрезов благодаря острой фокусировке лазерного луча; малой зоной термического влияния излучения; минимальным механическим воздействием, оказываемым на материал; возможностью быстрого включения и выключения устройства с высокой точностью; химической чистотой процесса резки; возможностью автоматизации процесса и получения высокой производительности метода; возможностью резки по сложному профилю в двух и трех измерениях.

Лазерные раскройные комплексы позволяют производить раскрой тонколистовых металлических материалов со скоростью до 10..50 м/мин при точности 0,01 мм.

Наиболее эффективна лазерная резка для резки материалов следующих толщин:

- углеродистая сталь – от 0,2 мм до 25 мм;
- нержавеющая сталь – от 0,2 мм до 30 мм;
- алюминиевые сплавы – от 0,2 мм до 20 мм;
- латунь – от 0,2 мм до 12 мм;
- медь – 0,2 мм до 15 мм;
- неметаллические материалы – до 50 мм.

В сравнении со многими из применяемых на производстве установок стоимость лазерного оборудования для резки остается еще достаточно высокой, хотя в последнее время наметилась тенденция к ее снижению. В связи с этим процесс лазерной резки становится эффективным только при условии обоснованного и разумного выбора области применения, когда использование традиционных способов трудоемко или вообще невозможно.

2. Возможны два механизма лазерной резки – **плавлением и испарением**.

Последний механизм требует высоких энергозатрат и осуществим лишь для достаточно тонкого металла.

Поэтому на практике резку выполняют преимущественно плавлением. При этом в целях существенного сокращения затрат энергии, повышения толщины обрабатываемого металла и скорости разрезания, т.е. для интенсификации процесса лазерной резки (и импульсным излучением, и непрерывным), применяется вспомогательный газ, вдуваемый в зону реза. Обычно в качестве вспомогательного газа используется кислород, воздух, инертный газ. Такая резка называется газолазерной.

Таким образом, лазерная резка основана на локальном плавлении материала и дальнейшем его удалении под действием силы тяжести, конвективного потока или газовой струи, рис.8.

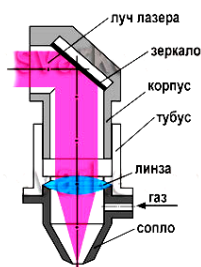


Рисунок 8 – Схема газолазерной резки:

1 – заготовка; 2 – сопло для подачи рабочего газа; 3 – фокусирующая линза;
4 -лазерный луч; 5 – поворотное зеркало; 6 – лазер

3. Основными параметрами режима лазерной резки, определяющими технологические показатели процесса (точность, качество, производительность), являются:

- плотность мощности излучения;
- давление и состав вспомогательного газа;
- диаметр сфокусированного пятна и т.д.

При импульсном режиме к данным параметрам добавляются:

- частота повторения импульсов;
- длительность импульсов.

Кроме того, на показатели качества и производительность лазерной резки влияют также поглощательная способность поверхности материалов, вид и свойства разрезаемых материалов.

Технологические показатели процесса лазерной резки.

Производительность лазерной резки характеризуется скоростью резки и степенью автоматизации оборудования.

Скорость лазерной резки определяется мощностью излучения, толщиной материала, давлением рабочего газа; зависит от теплопроводности материала. В ряде случаев она значительно больше, чем при других способах резки, в том числе механической и составляет 1...10 м/мин (при толщине обрабатываемого металла 25...0,5 мм соответственно), для неметаллов – до 50 м/мин.

Качество реза определяется шероховатостью его поверхности. Минимальная шероховатость поверхности кромки после резки лазером составляет $R_a \leq 3,2...12,5$ мкм (при толщине стального листа от 0,5 до 12мм). Для сравнения – при гидроабразивной резке качество поверхности составляет $R_z = 20...60$ мкм.

Увеличение производительности (скорости резки) приводит к снижению качества обработанной поверхности.

Высокая точность лазерной резки является одним из преимуществ по сравнению с другими видами обработки листового материала. Так, например, точность позиционирования при гидроабразивной резке составляет $\pm 0,2$ мм, точность резки $\pm 0,15$ мм. При лазерной резке точность позиционирования $\pm 0,03$ мм, а точность (повторяемость) резки $\pm 0,01$ мм, что является определяющим фактором при необходимости выбора способа резки для технологической операции, после которой дополнительная обработка с целью «подгонки» размера экономически нецелесообразна.

4. К наиболее характерным областям применения лазерной резки и контурной обработки относятся следующие.

- Раскрой металлического листового материала (толщины – 0,2...25 мм).

Примеры материалов и получаемых изделий: резка стальных прокатанных листов при изготовлении обшивок самолета, полостей несущего винта вертолета, получение деталей кузовов и дверей автомобиля, производство разнообразных деталей для судостроения и т.д.

Лазерной резке подвергаются углеродистые и нержавеющие стали, цветные металлы и сплавы, в т.ч. сложнообрабатываемые титановые сплавы.

- Изготовление вырубных штампов.

Лазерная резка применяется для получения рабочих узлов штампов – пуансона и матрицы.

Особенностью технологии является высокое качество и малая ширина реза, возможность получения наборных конструкций узлов, высокая экономичность операции.

- Скрайбирование хрупких материалов.

Скрайбирование – несквозное резание, применяемое обычно для разделения хрупких материалов (полупроводниковые материалы, керамика, стекло, минералы).

Суть традиционной технологии скрайбирования заключается в нанесении (как правило, твердосплавным или алмазным инструментом) направляющей царапины (подреза), по которой при незначительном усилии происходит разделение хрупкого материала. Этот процесс достаточно трудоемок и обычно сопряжен с появлением высокого процента брака обработки.

Процесс лазерного скрайбирования происходит в результате теплового воздействия интенсивного лазерного луча на обрабатываемый материал (в виде пластины). В результате локального испарения материала при перемещении лазерного пятна по поверхности формируется канавка (подрез) без механических напряжений в прилегающих областях и нагрева пластины.

Технология применяется в микроэлектронике (изготовление микросхем при разделении пластин на основе кремния), для изготовления тонкопленочных солнечных батарей и т.д.

- Раскрой неметаллических материалов (толщины – до 50 мм).

Обрабатываемые материалы: стеклоткань, бумажные, картонные, текстильные материалы, изделия из резины, пластмасс, различных новых синтетических материалов.

5. Для резки обычно используют твердотельные (на рубине, стекле с неодимом или алюмоиттриевом гранате) и газовые лазеры (на углекислом газе).

При раскрое металлов – стали, алюминиевых сплавов, меди и латуни твердотельные лазеры имеют преимущество по сравнению с углекислотными, поскольку поглощение излучения поверхностью этих металлов значительно выше на длине волны твердотельного лазера (видимый диапазон).

Для неметаллов (пластмасс, оргстекла) применяют лазеры, излучающие в УФ- или ИК-диапазоне, поскольку ряд таких материалов полностью или частично прозрачны для видимого излучения (с длиной волны около 1 мкм), т.е. излучения твердотельных лазеров.

Углекислотные лазеры наиболее универсальны и применяются для обработки практически любых металлов и неметаллов. Кроме того, у них низкая расходимость луча, что дает возможность разместить источник излучения далеко от зоны обработки без потери качества луча.

Лазеры работают как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах излучения.

Импульсное излучение целесообразно использовать в тех случаях, когда требуется выполнить прецизионную резку. Вопросы производительности при этом отступают на второй план, так как лазерная обработка в таких случаях является единственным технологическим средством обеспечения поставленной конструктором задачи.

Непрерывное излучение, напротив, дает возможность осуществить высокопроизводительную резку, причем с малыми потерями материала при обработке, что выгодно отличает лазерную резку от традиционных методов раскроя, в том числе и от резки струей плазмы. Однако при этом точность и качество резки могут быть ниже, чем при использовании импульсного излучения.

ЛЕКЦИЯ №8 ЛАЗЕРНАЯ ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ

1. Основные преимущества по сравнению с механической обработкой (сверлением)
2. Технологические особенности процесса обработки отверстий
3. Области применения

1. По сравнению с механической обработкой данная операция имеет ряд преимуществ:

- удается прошивать любой материал независимо от его механических свойств;
- возможно получение отверстий малых диаметров (от нескольких микрометров до 0,3..0,5 мм) с большим отношением глубины к диаметру (10...25). При больших значениях h/d лазерная прошивка превосходит по экономичности все другие методы;
- возможно получение отверстий с осью, направленной под углом к поверхности.

Данный вид обработки выполняется, как правило, импульсным излучением – моноимпульсным, многоимпульсным (импульсные лазеры на гранате и CO_2). Обработка отверстий в настоящее время является самой широкой областью применения излучения импульсных лазеров.

Однако есть ряд операций, для которых целесообразно использовать непрерывное излучение.

2. Образование элементарной лунки (отверстия) под действием единичного импульса или серии импульсов является базовым процессом не только для технологии прошивки отверстий, но и для операций резки, получения щелей, пазов и т. п.

Особенностью лазерной прошивки отверстий является реализация процесса не за счет механического удаления материала, а в результате его плавления и испарения.

Значения размерных характеристик отверстия (h , d) определяются как параметрами лазерного излучения (радиусом пятна фокусировки r , углом светового конуса излучения ϕ , энергией излучения в импульсе E), так и **характеристиками обрабатываемого материала**, в частности, его плотностью ρ , теплофизическими характеристиками – скрытой теплотой испарения вещества $L_{\text{и}}$ (количество тепла, которое нужно сообщить жидкому или твердому телу для превращения его в пар при неизменной температуре), скрытой теплотой плавления вещества $L_{\text{п}}$ (количество тепла, которое нужно сообщить твердому веществу для перевода в жидкое при неизменной температуре).

Область применения лазерной технологии на прошивочных операциях ограничивается в настоящее время отверстиями, предназначенными в основном не для сопряжения с другими деталями, а для пропускания лучей (световых, электронных), различных жидких или газообразных сред (топливо, вода, воздух и т. п.). В связи с этим более жесткие требования предъявляются обычно не к качеству обработанной поверхности, а к точности размерных характеристик отверстия. Тем не менее для ряда технических применений новой технологии представляет также интерес оценка макро- и микрогеометрии поверхности отверстия, влияния различных факторов на шероховатость обработанной поверхности.

Оценка отклонений размеров отверстий показывает, что отверстия, обработанные в моноимпульсном режиме без применения специальных приемов, можно отнести в б...7 квалитетам в зависимости от условий обработки.

Повышение точности обработки может быть достигнуто улучшением конструкции лазерных технологических установок, повышением их технико-эксплуатационных характеристик, снижением составляющих погрешностей, вносимых отдельными конструктивными элементами и узлами установки.

К мероприятиям, уменьшающим погрешности обработки, обусловленные нестабильностью параметров генерации лазера, могут быть отнесены:

- упорядочение пространственно-временной структуры лазерного импульса;

- управление формой импульса;
- защита лазерной оптики от продуктов лазерной эрозии и т.д.

Представляет интерес интенсификация процесса лазерной обработки подведением дополнительной энергии (соизмеримой с энергией лазерного импульса) в зону воздействия излучения лазера.

Целесообразные операции использования лазерной технологии при прошивке отверстий: дюзы (шайбы) для дозирования воздуха или газов, трубчатые детали с серией отверстий для распылительных систем, различные виды крепежных деталей (болты с отверстием под шплинт, гайки с отверстием под контрольную проволоку), водоохлаждаемые турбинные лопатки, ряд специальных деталей и т. д.

3. Обработка отверстий в настоящее время является самой широкой областью применения излучения импульсных лазеров. Вследствие специфики лазерной обработки ее использование ограничено лишь деталями с толщиной стенок не более 5...12 мм.

Некоторые примеры применения данной технологии.

••• *Обработка серий отверстий (диаметром менее 1 мм) в длинномерных трубчатых и листовых заготовках.*

Примерами таких деталей являются длинномерные трубчатые заготовки с большим количеством отверстий для противопожарной системы самолета, для распылительных систем, криволинейные трубы, длинномерные детали из профильного проката и т.д.

Значительные трудности представляет также прошивка отверстий в трубах, имеющих сложный пространственный криволинейный профиль. Сверление отверстий в таких трубах затруднено из-за сложности их базирования, а также из-за частой поломки сверл малого диаметра. Применение лазерного излучения позволяет значительно усовершенствовать технологический процесс обработки таких отверстий.

Лазерную обработку целесообразно использовать при необходимости получения отверстий одинакового диаметра с большой плотностью их размещения по площади листовой заготовки – при изготовлении различного рода сит, фильтров, ламинированных поверхностей летательных аппаратов и т. д.

••• *Получение системы отверстий для охлаждения турбинных лопаток.* Во избежание горячих точек на поверхности лопаток плотность отверстий должна быть до ~ 200 отверстий/см². К тому же, сложная структура жаропрочного кристаллического Ni-сплава требует процесса сверления, не меняющего его матрицу.

Перспективной технологией получения охлаждающих микроотверстий (100...500 мкм) в жаропрочных сплавах является лазерная прошивка.

••• *Обработка отверстий в часовых и приборных камнях (из синтетического рубина, лейкосапфира), играющих роль подшипников.*

В настоящее время малопроизводительное механическое сверление отверстий в часовых и приборных камнях практически повсеместно заменено лазерной прошивкой.

Подобная технология, основанная на использовании 2-х импульсов, обеспечивает производительность оборудования до 45 тысяч камней в две смены.

••• Еще более эффективно использование лазерной технологии для *прошивки отверстий в алмазных волокнах*, для протягивания проволоки Ф 10...1000 мкм.

Лазерная технология позволяет повысить производительность традиционной обработки более чем в 100 раз.

••• *Обработка отверстий в крепежных деталях.* К деталям, для изготовления которых целесообразно применение лазерной технологии, относят также специальные виды крепежа (болты) с отверстиями (в гайках) под шплинт или контрольную проволоку.

••• Одной из областей целесообразного применения лазерного излучения является *прошивка отверстий для ввода проволочного электрода электроэрозионного вырезного станка* в пластинчатых заготовках твердосплавных вырубных штампов, а также других подобных деталях.

••• *Получение отверстий (диаметром 0,25...0,35 мм ... 0,01 мм) в корпусах распылителей топливной аппаратуры.*

••• Другие характерные применения:

- Обработка газоотводящих отверстий во вкладышах шинных пресс-форм (применяют для вулканизации покрышек в автомобилестроении).

- Обработка отверстий в керамических материалах (например, фильерах для текстильного машиностроения; ферритовых пластинах памяти); в других диэлектрических хрупких материалах – стекле, кварце и т.д.

- Обработка отверстий в деталях из пластмасс (клапаны для аэрозольных баллончиков, перфорация полиэтиленовых труб).

- Лазерная прошивка отверстий в деталях медицинского назначения – головки инъекционных игл (изготавливаются из латунного прутка холодной высадкой).

- Изготовление сит с отверстиями $\Phi < 1$ мм, плотностью отверстий 10...15 тыс. шт/м (для мукомольной и химической промышленности, для машин по изготовлению рыбной муки).

ЛЕКЦИЯ №9 ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

1. **Технология лазерного упрочнения и его виды**
2. **Роль лазерных технологий в развитии сварочных процессов**
3. **Основные виды лазерной сварки**
4. **Области применения лазерной сварки**

1. Упрочняющая лазерная поверхностная обработка – направление, которое активно развивается в мировой практике и представляет собой достаточно простой способ повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя материала в 2...3 раза без термического деформирования изделий, типичного для традиционных методов термообработки.

Применяется для упрочнения различных инструментов – резцов, фрез, сверл; для различных деталей машин, в т.ч. для крупногабаритных деталей химического и энергетического машиностроения.

Использование различных видов лазерного упрочнения в машиностроении и приборостроении дает возможность существенно сократить расход дефицитных высоколегированных сталей при изготовлении ответственных деталей машин, инструментов, повысить надежность, долговечность выпускаемых изделий.

Эффект упрочнения при лазерном воздействии на металлические материалы наблюдается вследствие сверхвысоких скоростей нагрева и последующего охлаждения облучаемого материала, частичного легирования поверхностного слоя элементами окружающей среды, роста плотности дислокаций в зоне облучения и т. д. В облученном материале при таких условиях происходят структурные и фазовые превращения, сопровождающиеся образованием специфической ультрадисперсной однородной (гомогенной) структуры с уникальными свойствами.

Основными видами лазерного упрочнения, реализуемыми в зависимости от применяемой плотности мощности и скорости охлаждения, являются следующие: упрочнение без фазового перехода, упрочнение с фазовым переходом, лазерное легирование, наплавка, аморфизация поверхности, «шоковое» упрочнение, табл.1.

Таблица 1- Основные виды упрочнения

Упрочнение	Плотность мощности, Вт/м ²	Скорость охлаждения, °С/с	Глубина ЗТВ, мм
Без фазового перехода	10 ⁷ ...10 ⁸	10 ⁴ ...10 ⁵	0,02...0,5
С фазовым переходом	10 ⁸ ...10 ⁹	10 ⁴ ...10 ⁶	0,2...3
Лазерное легирование	10 ⁸ ...10 ¹⁰	10 ⁴ ...10 ⁶	0,2...2
Лазерная наплавка	10 ⁸ ...10 ¹⁰	10 ⁴ ...10 ⁶	0,02...1
Аморфизация поверхности	10 ¹² ...10 ¹⁴	10 ⁶ ...10 ¹⁰	0,01...0.10
«Шоковое» упрочнение	10 ¹³ ...10 ¹⁶	10 ⁴ ...10 ⁶	0,02...0,2

▲ **Упрочнение без фазового перехода** ($q = 10^7 \dots 10^8$ Вт/м², $V_{\text{охл}} = 10^4 \dots 10^5$ °С/с) предполагает структурные изменения в материале без расплавления облученной зоны. При этом виде упрочнения сохраняется исходная шероховатость поверхности.

▲ **Упрочнение с фазовым переходом** ($q = 10^8 \dots 10^9$ Вт/м², $V_{\text{охл}} = 10^4 \dots 10^6$ °С/с) предполагает плавление материала в облученной зоне; требует более высокой плотности мощности излучения. Плавление материала приводит к изменению исходной шероховатости поверхности.

Первые два вида обработки не требуют специальной среды, обработка проводится на воздухе.

▲ При **лазерном легировании** ($q = 10^8 \dots 10^{10}$ Вт/м², $V_{\text{охл}} = 10^4 \dots 10^6$ °С/с) требуется специальная среда – газообразная, жидкостная, твердая. На обрабатываемой поверхности образуется новый сплав, отличный по составу и структуре от матричного материала (глубиной от нескольких микрометров до нескольких миллиметров).

Легирование вводят в материал преимущественно в виде порошков или обмазки металлов (титан, молибден, вольфрам), неметаллических материалов (хлорид аммония, бор, углерод) а также тугоплавких соединений (карбиды титана, циркония, вольфрама, кремния, бора и таллия, нитриды алюминия, бора, и титана). Возможны и другие способы, например, накатывание фольги из легирующего материала на обрабатываемую поверхность; удержание легирующих элементов магнитным полем на матричной поверхности; подача легирующего состава в зону обработки синхронно с лазерным излучением и т.д.

▲ **Лазерная наплавка** ($q = 10^8 \dots 10^{10}$ Вт/м², $V_{\text{охл}} = 10^4 \dots 10^6$ °С/с) позволяет нанести на поверхность обрабатываемого материала слой другого материала, улучшающий эксплуатационные характеристики основного. При этом получают биметаллические изделия.

Наплавка может быть также применена с целью восстановления первоначальных размеров изношенных поверхностей.

Лазерная наплавка позволяет локально наносить износостойкие покрытия (основа сталь–наплавка молибден; основа титан–наплавка кобальт; основа сталь–наплавка титан) и керамические составы. Эта технология может быть также успешно применена на ремонтно-восстановительных участках для восстановления элементов оборудования как замена достаточно «грубому» процессу дуговой наплавки, в т.ч. для восстановления валов, звездочек, фланцевых соединений.

За счет передачи излучения по оптоволокну появляется возможность обработки изделий сложных геометрических форм.

Если для этих целей применяют сварку давлением, то используют термин «наварка» (плакирование).

▲ Новая разновидность лазерного упрочнения (ЛУ) – **аморфизация поверхности** ($q = 10^{12} \dots 10^{14}$ Вт/м², $V_{\text{охл}} = 10^6 \dots 10^{10}$ °С/с) в условиях скоростного облучения (коротким импульсом или сканирующим лучом). Сверхвысокие скорости теплоотвода, достигаемые при этом, обеспечивают своеобразное замораживание расплава, образование металлических стекол (метгласса) или аморфного состояния поверхности. При этом

достигаются высокая твердость, коррозионная стойкость, улучшаются магнитные характеристики и другие свойства.

▲ **«Шоковое» упрочнение** имеет место при воздействии на материал мощного сверхкороткого импульса излучения ($q=10^{13}\dots 10^{16}$ Вт/м²). Такой мощный импульс приводит к возникновению импульса отдачи, который, в свою очередь, вызывает образование ударной волны в материале и, в результате, к существенному упрочнению.

Первые четыре вида упрочнения получили наибольшее распространение.

Указанные направления в развитии лазерной упрочняющей технологии весьма перспективны в связи с ростом дефицита чистых металлов типа W, Mo, Ni, Cr, Co, V, острой необходимостью снижения расхода высоколегированных сталей и в связи с этим увеличения надежности и долговечности изделий из менее дефицитных конструкционных материалов.

Лазерное упрочнение вызывает улучшение многих эксплуатационных показателей облученных материалов – износостойкости, теплостойкости, механических характеристик материалов, остаточных напряжений в поверхностном слое материалов, т. е. те параметров, которые определяют триботехнические свойства контактирующих поверхностей, надежность и долговечность изделий машиностроения.

Лазерная упрочняющая технология интенсивно развивается и в настоящее время находит применение во многих отраслях промышленности.

Наиболее широкая область применения лазерного упрочнения – инструментальное производство, изготовление и эксплуатация режущего инструмента, элементов штамповой оснастки, упрочнение рабочих поверхностей деталей различных машин и приборов.

Оборудование для лазерного упрочнения различается по типу излучателя, лежащего в его основе, - установки на базе твердотельных или газовых лазеров.

Установки на базе твердотельных лазеров (выпускаются серийно) обычно более компактны, хотя и не генерируют излучения высокой мощности.

Большинство выпускаемых установок для упрочнения базируется на импульсных лазерах. Эти установки, как правило, используются для упрочнения небольших участков рабочих поверхностей деталей сравнительно малых размеров.

Оборудование на основе газовых лазеров обычно генерирует мощное непрерывное излучение, расширяющее возможности выполнения различных видов упрочнения.

При создании новых видов упрочняющих технологий перспективно сочетание в одном процессе лазерного упрочнения и локального пластического деформирования – комбинированные способы обработки.

2. Лазерная сварка является одним из важнейших промышленных применений лазера.

Многие основные тенденции развития современного мирового сварочного производства связаны с применением лазерного излучения, например:

♦ дальнейшее развитие «гибридных» технологий, основанных на одновременном использовании двух или более процессов соединения, в т.ч. с использованием лазерных источников;

♦ решение проблем экологической безопасности и охраны труда. Приоритет промышленного применения в экономически развитых странах отдается экологически чистым сварочным технологиям, в т.ч. лазерным;

♦ создание новых средств нагрева, пригодных для сварки плавлением. Современные способы сварки плавлением основаны на использовании поверхностных источников нагрева с интенсивностью (плотностью мощности) от $1\cdot 10^2$ до $1\cdot 10^8\dots 10^9$ Вт/см² (наиболее высокие значения характерны для лазерного излучения);

♦ дальнейшее совершенствование технологий повышения износостойкости поверхности деталей – наплавки, нанесения покрытий напылением (с использованием газового пламени, плазмы, лазерного излучения, детонации, электронно-лучевого испарения и

конденсации материалов в вакууме), позволяющих увеличить срок службы быстроизнашиваемых и тяжело нагруженных деталей, повысить надежность и работоспособность машин и механизмов;

♦ эффективное применение сварочных процессов (*прежде всего, лазерных*) в медицине и т.д.

3. Лазерная сварка основана на использовании лазерного излучения в качестве теплового концентрированного источника для локального расплавления соединяемых материалов; имеет много общего с процессами лазерного упрочнения при их выполнении на предельных уровнях плотности мощности излучения, приводящих к оплавлению материала.

Существуют следующие основные **виды лазерной сварки**:

- по *технологическому признаку* различают лазерную сварку с глубоким проплавлением и лазерную сварку материалов малых толщин;

- в зависимости от конструкции свариваемых изделий, технологических требований и ряда других факторов возможно осуществление сварки со сквозным проплавлением (применяется при сварке листовых нагруженных конструкций) и без сквозного проплавления (применяется для герметизации или соединения тонких деталей с массивными);

- по положению в пространстве, аналогично целому ряду способов сварки плавлением, лазерная сварка может осуществляться в нижнем положении, вертикальном, горизонтальном, потолочном, как с перемещением луча, так и свариваемого изделия;

- по форме соединения лазерная сварка может быть точечной и шовной.

Весьма перспективны **методы совмещения лазерной сварки с другими сварочными процессами** – **комбинированные процессы**, например, лазерная сварка в сочетании с дуговой сваркой в среде защитных газов; светолазерная сварка; лазерно-плазменная сварка и т.д.

4. К лазерной сварке проявляется большой интерес со стороны различных отраслей промышленности. Этот интерес обусловлен специфическими достоинствами, которые выгодно отличают ее от других методов сварки.

Основными рациональными областями применения лазерной сварки являются следующие.

▲ **Лазерная сварка малых толщин** (плотность мощности излучения $10^5 \dots 10^6$ Вт/см²):

- точечная и шовная сварка деталей электровакуумных приборов из тугоплавких металлов и сплавов; герметизация корпусов различных приборов;

- точечная сварка в микроэлектронике и радиотехнической промышленности (сварка проводов, элементов микросхем), точном приборостроении, в ювелирном деле, в медицине, изготовлении художественных изделий, реставрации произведений искусства;

- к другим применениям данного вида лазерной сварки могут быть отнесены заваривание аэрозольных баллонов, герметизация капсул для лекарств и т.д.

▲ **Лазерная сварка средних и больших толщин** – **более 1 мм** (плотность мощности излучения более 10^7 Вт/см²):

- производство крупногабаритных корпусных деталей, например, двигателей и обшивки самолетов, автомобилей и судов; валов и осей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, например, карданных валов автомобиля;

- при изготовлении деталей механизмов и машин, состоящих из разнородных материалов;

- для сварки труб, арматурных конструкций и т.д.

Отдельную группу применения лазерной сварки представляют детали и изделия, в т.ч. машиностроения, в которых для надежного соединения требуется **глубокое («кинжальное») проплавление** – с большим соотношением глубины к ширине шва

(10...25). В этом случае используется, как правило, непрерывное излучение достаточно высокой мощности $> 1 \dots 2$ кВт.

СР - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ в сферах интенсификации механической обработки; динамической балансировки деталей; поверхностной очистки; маркировки; устройствах для записи и считывания информации; голографии; медицины и т.д.

МОДУЛЬ №2. КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЛЕКЦИЯ №10,11

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК ПРИМЕР ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Машиностроение как одна из ведущих отраслей материального производства характеризуется широкой номенклатурой выпускаемой продукции, отличающейся по конструктивным и технологическим признакам, таким как размеры, масса, точность формы и размеров, предъявляемым к ней техническим, экономическим и другим требованиям, условиям эксплуатации и производства, серийности выпуска.

Соответственно различаются и технологии производства машиностроительной продукции.

Кроме того, имеет место заимствование технологий из одной подотрасли машиностроения в другие.

Все это обусловило потребность не только в разработке новых технологий, но и в выработке новых подходов к их формированию.

В связи с этим появилась и новая идентификация (классификация) технологий.

В частности, существуют понятия **комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий**. Отдельную группу составляют «высокие» технологии.

Определение данных групп технологий постоянно дополняется, уточняется и совершенствуется, так как появляются новые технологии, учитывающие и использующие взаимодействие большего количества факторов. Иногда эти понятия используются как синонимы, что указывает на наличие у них общих признаков.

▲ **Комплексные технологии** предусматривают увязку основных и вспомогательных технологических процессов в единый технологический процесс. В данном случае превалирует **организационный аспект производства**.

Данная группа технологий может не влиять непосредственно на качество выпускаемой продукции, но влияет на величину затрат времени и средств на ее производство, а следовательно, на **экономическую эффективность** деятельности предприятия.

Комплексные технологии, как правило, разрабатываются на стадии производства либо подготовки производства изделия.

▲ **Комбинированные технологии** предполагают использование сочетания различных физических и химических эффектов, а также способов обработки для изготовления продукции.

Данная группа технологий непосредственно предназначена для обеспечения необходимых технических характеристик продукции, повышения производительности труда

и принципиальной возможности изготовить изделие, которое невозможно обработать с использованием какого-либо одного эффекта или процесса обработки.

▲ К интегрированным технологиям относятся такие технологии, которые базируются на органическом сочетании последних достижений в различных областях науки, техники, технологий, в т.ч. информатики, материаловедения и т.д., использование которого обеспечивает быстрое получение нового продукта с принципиально новым уровнем функциональных, эстетических, экологических свойств, гарантирующих ему высокую конкурентоспособность на рынке.

Интегрированные технологии понимаются как технологии, разрешающие противоречия между факторами, влияющими на принятие управленческих, конструкторских, технологических и организационных решений.

Понятие «интегрированные технологии» является обобщающим и объединяет в себе комбинированные технологии, комплексные технологии, генеративные технологии и технологии одновременного изготовления материала и изделия из него, а также технологии, непосредственно влияющие на эксплуатационные характеристики изделия, усовершенствованные традиционные технологии.

▲ Синергетические технологии основаны на иницировании и использовании самоорганизационных явлений при осуществлении технологического процесса.

Под синергией понимается взаимное усиление эффектов, а также проявление новых эффектов в результате взаимодействия различных факторов.

Синергетический эффект присутствует во всех типах рассмотренных выше технологий.

Общей чертой комплексных, комбинированных, интегрированных, синергетических технологий является поиск, создание и использование синергетического взаимодействия (синергии) между факторами, в общем случае влияющего на принятие и выполнение управленческих, конструкторских, технологических, организационных решений и действующего на всех этапах жизненного цикла изделия.

Выявляется подобное взаимодействие на этапе проведения научно-исследовательских работ, а также на этапах проектирования и подготовки производства и собственно изготовления конкретного изделия.

Различие между комплексными, комбинированными, интегрированными, синергетическими технологиями состоит в том, между какими факторами обнаруживается или создается синергия и что является целевой функцией разработки технологии, иными словами, на непосредственное получение какого эффекта рассчитана та или иная технология.

Естественно, что целью деятельности любого предприятия является получение прибыли, то есть **экономический эффект**.

При использовании комплексных технологий экономический эффект достигается непосредственно. Комбинированные и синергетические технологии обеспечивают получение экономического эффекта посредством достижения технического.

В ряде случаев, особенно для государств с развитым природоохранным законодательством и социальными гарантиями экономический эффект может достигаться путем обеспечения экологического и социального эффектов.

Таким образом, непосредственным фактором обеспечения конкурентоспособности продукции может служить любой из перечисленных эффектов, а остальные обеспечиваются через его достижение, что характерно для интегрированных технологий.

Интегрированные технологии обеспечивают достижение технического, экономического, экологического и социального эффекта. Проявляется такое взаимодействие на всех стадиях жизненного цикла изделия. Следовательно, имеет место одновременное, параллельное использование методов научной, изобретательской и инженерной деятельности на всех стадиях создания продукции.

Взаимосвязь между технологиями и ожидаемыми эффектами от их разработки и внедрения показана на рис.9.



Рисунок 9 – Эффекты и технологии

Достаточно четко разделить сферы применения комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий не всегда представляется возможным – они перекрываются.

В самом общем виде можно сделать вывод, что **основа комбинированной технологии – инженерное решение, как правило, технологическое, комплексной – управленческое и организационное, интегрированной – как правило, научно-исследовательская работа, изобретательское и инженерное решения, синергетической – научно-исследовательская работа.**

На вопрос о том, кому надлежит разрабатывать комплексные, комбинированные, интегрированные и синергетические технологии, можно ответить следующим образом:

- разработка и внедрение комплексных технологий находятся в компетенции руководителей и технологов (управленческих и технологических подразделений предприятий);
- разработка и внедрение интегрированных, комбинированных и синергетических технологий в случаях, когда в конструкторской документации не указан способ получения продукции, – в компетенции технологов или технологических подразделений;
- разработка технологий, влияющих на технические характеристики продукции, может производиться научными работниками, конструкторами, технологами (или соответствующими подразделениями предприятий), а принятие решения об их внедрении находится в компетенции конструкторов (конструкторских подразделений) либо заказчика.

Разработка комплексных, комбинированных, интегрированных и синергетических технологий является проявлением инновационного мышления на разных стадиях создания продукции.

▲ В конце 70-х...начале 80-х годов XX столетия появился и получил широкое распространение термин **«высокие технологии»**, обозначающий принципиально новые, передовые, наукоемкие технологии, обеспечивающие использующим их предприятиям лидирующие позиции на рынке. Использование высоких технологий показало, что *дело не только в технической стороне производства, но и в его организации, мотивации людей к деятельности и множестве других факторов.*

Понятие «высокие технологии» является относительным.

Развитие науки, техники, технологий приводит к тому, что технологии, новые и достаточно эффективные для одного поколения производителей и потребителей продукции становятся для последующих традиционными и не удовлетворяют возрастающим требованиям времени и рынка.

Уже в 90-е годы XX столетия оказалось, что многие высокие технологии утратили передовые позиции и были заменены другими.

Комплексные, комбинированные, интегрированные и синергетические технологии являются высокими на момент их разработки и остаются таковыми в течение некоторого периода времени.

Термин «высокие технологии» обозначает их уровень, а термины «комплексные», «комбинированные», «интегрированные», «синергетические» технологии – способ достижения этого уровня.

ЛЕКЦИЯ №12,13 КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

1. Примеры комбинированных технологий обработки материалов в заготовительном производстве:
 - а) жидкая штамповка;
 - б) ультразвуковая обработка давлением
2. Гибридные способы сварки – СР

1. Конструирование и технология всегда находятся в противоречивых отношениях: чем выше требования к прочности конструкций, тем труднее обрабатывать элементы этих конструкций; чем больше габаритные размеры и сложнее конфигурация деталей, составляющих конструкцию, тем больше усилий требуется для их обработки, сложнее инструменты и оборудование, дороже их эксплуатация.

Решение подобных проблем зачастую невозможно при условии применения одной из наиболее распространенных технологий формообразования – литья, обработки металлов давлением, обработки резанием.

Одним из перспективных решений в этом направлении является совмещение нескольких технологических процессов формообразования в одном процессе, т.е. применение комбинированных технологий.

Комбинированные технологии в заготовительном производстве основаны с сочетанием различных традиционных методов в одном технологическом процессе и получением синергетического эффекта, с введением дополнительной механической энергии в виде ультразвуковых колебаний, с введением дополнительной лучевой энергии в виде лазерного излучения и т.д.

Далее рассматриваются некоторые примеры применения комбинированных технологий в заготовительном производстве.

1.1. Жидкая и полужидкая штамповка

Данная технология является комбинацией литья и обработки давлением и сочетает в себе преимущества обеих технологий, позволяя при этом в определенной мере избежать их недостатков.

Жидкой штамповкой (литьем с кристаллизацией под давлением) называют технологический процесс получения заготовок деталей, при котором кристаллизация жидкого металла, залитого в полость металлической пресс-формы, происходит под высоким давлением. Данная технология весьма перспективна вследствие своей экономичности и высокого качества получаемых изделий.

Используют разные схемы технологического процесса штамповки.

▼ По основной схеме металл заливают в полость штампа (состоит из трех формообразующих частей, рис. 10 – вкладыша 2 и выпалкивателя 3, образующих матрицу, а также пуансона 1), соответствующую форме поковки, сжимают пуансоном и производят таким образом кристаллизацию под давлением.

▼ Вторая схема предусматривает частичное затвердевание металла под давлением в полости, отличной от окончательной формы поковки; затем следует деформация в полужидком состоянии до получения окончательных размеров поковки. Штамповку металла в полужидком состоянии называют *тиксотропной штамповкой*.

▼ В третьем случае после полной кристаллизации под давлением следует деформация в твердом состоянии для получения окончательных размеров поковки.

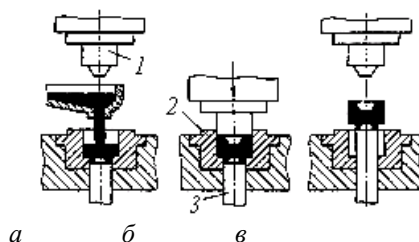


Рисунок 10 – Основные стадии процесса жидкой штамповки

Другими достоинствами технологии жидкой штамповки являются следующие: более высокие механические и эксплуатационные свойства изделий, более высокая точность размеров, более рациональный расход металла (по сравнению с технологией литья); возможность получения заготовок с тонкими стенками, уменьшение числа переходов обработки, возможность обработки труднодеформируемых сплавов (по сравнению с технологией горячей объемной штамповкой).

Особенности процесса позволяют снять ограничения по применяемым сплавам и производить замену дорогостоящих сплавов на менее дорогие и более распространенные без ухудшения физико-механических характеристик изделий. Так, кроме цветных сплавов (алюминиевых, медных), стали, заготовки и детали методом жидкой штамповки можно также изготавливать из чугуна, который, как известно, вследствие малой пластичности давлением не обрабатывается.

Методы жидкой и полужидкой штамповки находят все большее применение в промышленности.

Например, преимущества жидкой штамповки особенно ярко проявляются при изготовлении поршней для двигателей внутреннего сгорания из литейных алюминиевых сплавов – силуминов, т.е. сплавов системы алюминий-кремний (АЛ25, АЛ26, АЛ30, АК12, АК18, АК21 и др.), а также ковких сплавов алюминий-медь (АК4, АК6, АК8 и т.д.).

При реализации технологии жидкой штамповки появляется возможность изготовления композитных поршней (алюминиевый сплав + керамика), что открывает новые перспективы развития двигателестроения, а также позволяет получать высоконагруженные композиционные детали, применяемые в других областях машиностроения, в т.ч. траки колесо-гусеничных машин, детали тормозной системы и т.д.

1.2. Ультразвуковая обработка давлением

Достаточно прочные позиции в производстве занимает *ультразвуковая обработка давлением*, которая основана на наложении ультразвуковых механических колебаний, т.е. колебаний с частотой 16...50 кГц, на инструмент (или заготовку) в различных

процессах обработки металлов давлением (ОМД). Наложение ультразвуковых колебаний реализуется при прокатке, ковке, штамповке, волочении, прессовании.

Ультразвуковые колебания (УЗК) в данных видах обработки используются как средство интенсификации основных технологических операций обработки давлением и являются дополнительным источником энергии.

Интенсифицирующее действие ультразвука на процессы обработки металлов давлением связано с изменением прочностных и пластических свойств деформируемого металла (за счет существенного повышения плотности структурных несовершенств – дислокаций, вакансий – в результате действия знакопеременных ультразвуковых деформаций), повышением его температуры (за счет поглощения энергии упругих колебаний), уменьшением сил контактного трения в очаге деформации под действием упругих колебаний.

Применение ультразвуковых колебаний при обработке давлением позволяет повысить стойкость инструмента, улучшить качество поверхностного слоя заготовок (снизить шероховатость, уменьшить величину остаточных напряжений), обеспечить обработку материалов, деформация которых без УЗК приводит к их разрушению, и уменьшить энергоемкость операций.

Источником ультразвуковых механических колебаний, используемых при обработке металлов давлением, является магнитострикционный (или пьезокерамический) преобразователь, преобразующий высокочастотные электрические колебания, вырабатываемые специальными генераторами, в механические колебания той же частоты.

Весьма важным моментом в реализации ультразвуковой обработки давлением является реализация оптимального способа подведения колебаний к очагу деформации.

Возможен подвод через обрабатывающий инструмент или через деформируемый металл (заготовку). Первая схема более распространена, т.к. подвод колебаний через заготовку обязывает выполнение определенных требований к ее конфигурации и размерам.

Достаточно распространены в промышленности процессы листовой штамповки (например, гибки) с применением ультразвука, рис.11,а. При листовой штамповке (разделительных или формоизменяющих операциях) УЗК вводят в зону деформации с помощью пуансона, матрицы или через оба инструмента.

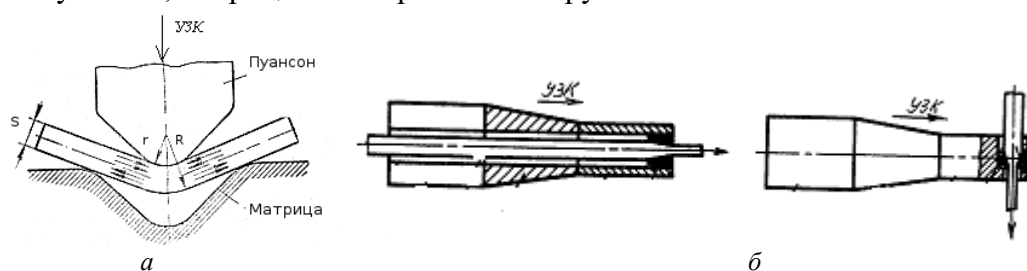


Рисунок 11

Применяется также технология волочения проволоки, труб с наложением УЗК на волочильный инструмент (волоку, матрицу), рис.11,б.

Обрабатываемые материалы – углеродистые, коррозионностойкие стали, сплавы меди и алюминия, никеля и т.д.

ЛЕКЦИЯ №14,15,16 КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

1. Общая характеристика. Классификационные признаки
2. Плазменно-механическая обработка

3. Механическая обработка с нагревом заготовки перед зоной резания лучом лазера
4. Деформирующее резание
5. Ультразвуковая механическая обработка
6. Электрохимическое шлифование. Алмазно-искровое шлифование

1. К настоящему времени в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки деталей. По своей сущности методы обработки усложнились. Интенсивность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т. д. в различном их сочетании, т.е. *реализация комбинированных (по сути, интегрированных) технологий.*

Все большее внимание уделяется развитию и совершенствованию методов обработки со съемом относительно небольших слоев металла и создание на поверхности и в поверхностном слое необходимых физико-механических свойств и шероховатости. Это объясняется непрерывным совершенствованием методов получения заготовок, уменьшением припусков на механическую обработку, ростом требований к точности и необходимостью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей и изделий, применением в машиностроении новых конструкционных материалов.

Рациональное использование интегрированных методов обработки приводит к повышению, как производительности обработки, так и качества детали. Кроме того, в ряде случаев освоение интегрированных методов обработки позволяет достичь новых технических результатов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики деталей, а также достичь синергетического эффекта, проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

Главный критерий при разработке или выборе интегрированного процесса обработки - повышение эффективности по всем основным показателям или отдельным, лимитирующим (производительность, качество, себестоимость, эксплуатационные характеристики, конкурентоспособность).

Методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием многообразны, например:

- использование дополнительного теплового воздействия (например, резание с искусственным нагревом);
- использование дополнительного механического воздействия (например, резание с опережающим пластическим деформированием);
- конструктивное совмещение в одном инструменте элементов различного функционального назначения (например, совмещение в одном инструменте режущих и деформирующих элементов);
- усложнение кинематики для повышения выходных показателей процесса (например, резание с интегрированной кинематикой);
- совмещение по времени различных процессов с унаследованием новых свойств инструмента (например, резание с предварительной приработкой режущего инструмента; резание инструментом с износостойкими покрытиями);

- использование дополнительного вибрационного воздействия (например, алмазное шлифование с вибрациями; виброабразивная обработка);
- введение дополнительной электрической энергии в зону шлифования (например, алмазно-искровое шлифование; силовое электроалмазное шлифование);
- использование нетрадиционных видов энергии для формирования абразивных инструментов и управления процессом обработки (магнитно-абразивная обработка; резание материалов сверхзвуковыми струями жидкости с примесями абразивов);
- управления режущей способностью абразивных инструментов в процессе шлифования (пример, алмазное шлифование с управлением рабочей поверхностью кругов) и т.д.

Для классификации и систематизации интегрированных процессов выделены комплексы признаков – энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих.

Одним из важнейших классификационных признаков, например, является энергетический.

Как известно, во всех случаях применительно к интегрированным (комбинированным) процессам резания обязательным условием является наличие подвода исходной механической энергии. Дополнительный подвод различных видов энергии может существенно повышать выходные показатели процесса.

Примеры технологий с использованием дополнительной энергии:

- *механической энергии*: резание с опережающим пластическим деформированием, ультразвуковое резание, абразивная обработка с наложением вибраций и т.д.
- *тепловой энергии*: резание с предварительным нагревом заготовки и т.д.;
- *электрической энергии*: введение электрического тока в зону резания при лезвийной обработке, формообразование рабочей поверхности абразивных инструментов на токопроводящих связках в процессе работы и т.д.;
- *энергии магнитного поля*: магнитно-абразивная обработка;
- *химической энергии*: применение СОТС с химически активными компонентами;
- *лучевой энергии*: плазменно-механическая обработка, резание лезвийным инструментом с локальным нагревом заготовки перед зоной резания лучом лазера; формообразование рабочей поверхности абразивного инструмента; (правка) лучом лазера и т.д.;
- *ядерной энергии* (перспективное направление, исследуемое в настоящее время) и т.д.

Некоторые примеры интегрированных (комбинированных) технологий резания рассматриваются далее.

2. Процессы лезвийной механической обработки коррозионностойких и быстрорежущих сталей, специальных сплавов, высокопрочных чугунов, керамических и многих других материалов обычно характеризуются низкой производительностью и значительным износом режущего инструмента.

Известным способом интенсификации процессов резания труднообрабатываемых материалов является применение *предварительного нагрева* материала срезаемого слоя с помощью индуктивного, электродугового, электроконтактного, газопламенного, плазменного, лазерного нагрева.

При нагреве улучшается обрабатываемость резанием вследствие изменения механических характеристик материала в зоне стружкообразования – увеличения его пластичности, снижения прочности и твердости.

Изменение механических характеристик материала, в свою очередь, снижает усилия резания, износ режущего инструмента, позволяет повысить скорость резания и увеличить, таким образом, производительность обработки при обеспечении высоких точности и качества процесса.

Плазменно-механическая обработка (ПМО) заключается в предварительном локальном нагреве срезаемого слоя заготовки из труднообрабатываемого материала (коррозионностойкой, жаропрочной стали, кобальтовых и никелевых сплавов) плазменной струей с последующим съемом этого слоя режущим инструментом.

Физическая сущность процесса плазменно-механической обработки заключается в разупрочнении материала детали, обрабатываемой традиционными методами резания (например, на токарных станках), с помощью локального дозированного нагрева в пятне плазменной дуги; при этом глубина нагрева регулируется таким образом, что разупрочненный слой удаляется резцом, следующим за пятном нагрева.

ПМО является наиболее эффективным методом повышения производительности труда и снижения машинного времени при обработке крупногабаритных заготовок, изготовленных из высокопрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов: высокомарганцовистых сталей, высокоуглеродистых и легированных сталей, отбеленного чугуна, титановых сплавов; заготовок, имеющих нагартованные и наклепанные поверхности, твердые наплавки или литейные и ковочные корки.

При этом метод предварительного нагрева с помощью плазменной струи позволяет уменьшить пятно теплового воздействия лишь до 6...8 мм, что значительно превышает величину подачи инструмента на оборот заготовки и приводит к образованию зоны термического влияния больших размеров.

Это ограничивает применение плазменного нагрева обдирочными, черновыми операциями механической обработки.

Кроме того, установка плазмотрона загромождает зону обработки, а в случае образования сливной стружки имеется опасность короткого замыкания с корпусом плазмотрона.

3. При использовании в качестве источника предварительного нагрева лазерного излучения рассмотренные недостатки устраняются.

Лазерное воздействие можно локализовать таким образом, чтобы нагреву подвергалась только зона стружкообразования, рис.12. В этом случае глубина зоны термического влияния не превышает глубины резания, не происходят термические искажения детали, и, следовательно, нагрев не отражается отрицательно на точности и качестве обработки.

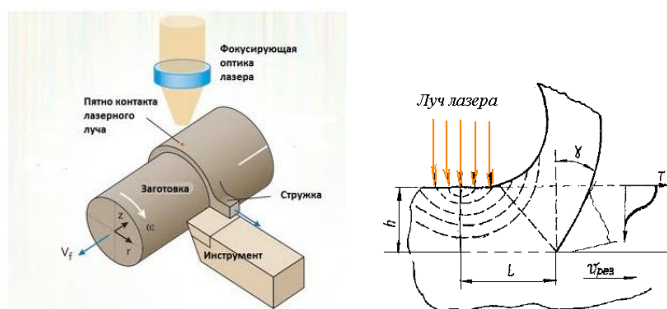


Рисунок 12 - Схема резания металла в условиях его предварительного нагрева лазерным излучением

Эффективность использования лазерного нагрева в значительной мере определяется плотностью мощности излучения (см. модуль №1), а также зависит от режимов точения.

Предварительный нагрев лазерным излучением приводит не только к снижению составляющих сил резания, но и к улучшению качества обработанной поверхности. Так, при лазерно-механической обработке шероховатость поверхности жаропрочной стали снижается примерно в 2 раза по сравнению с обычным резанием. Существенно, до 1,5...3 раз может быть повышена и производительность обработки.

Для реализации рассмотренного процесса обработки используется обычно лезвийный инструмент, армированный пластинками твердого сплава ВК8, Т15К6, ВК6М и т.д.

При выборе металлорежущего станка следует иметь в виду, что частота вращения и размеры детали должны обеспечить возможность обработки с высокими скоростями резания.

В качестве излучателей при создании специального оборудования применяются лазеры непрерывного излучения на CO_2 большой мощности ($P > 1$ кВт).

4. К числу перспективных комбинированных технологий относится также метод формообразования, основой которого являются одновременно как процесс резания, так и процесс пластического деформирования. Метод получил название «деформирующее резание».

Как известно, обработка материалов резанием (ОМР) основана на пластическом деформировании, разрушении заготовки с ее разделением на части и всегда сопровождается образованием новых поверхностей. Обработка материалов давлением (ОМД) основана на пластической деформации заготовки без ее разрушения и нарушения сплошности. В то же время определить четкую грань между обработкой резанием и обработкой давлением достаточно сложно, поскольку и в ОМР, и в ОМД основой формообразующего процесса являются пластические деформации, только при резании эти деформации доведены до разрушения.

В методе деформирующего резания одновременно реализуются оба процесса – частичное разрушение (подрезание) поверхностного слоя заготовки резанием и пластическое деформирование (отгибка) подрезанного слоя.

Особенность процесса деформирующего резания (ДР) связана с конструкцией применяемого инструмента – резца, который имеет вспомогательную кромку, на которой исключен процесс резания. Таким образом, вспомогательная кромка становится деформирующей и отгибает подрезанный главной кромкой слой. Совокупность подрезанных и отогнутых слоев, которые имеют связь с основным материалом заготовки, образуют развитый макрорельеф на поверхности детали (в виде ребер, шипов, ячеек), рис.13.

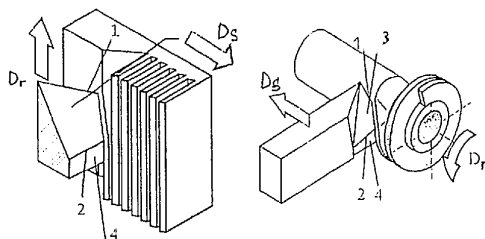


Рисунок 13 - Схема формообразования макрорельефа методом деформирующего резания:

1 – главная (режущая) кромка; 2 – вспомогательная (деформирующая) кромка;
3 и 4 – передняя и задняя вспомогательная поверхности

При проведении деформирующего резания меняется цель процесса. Если для традиционной обработки резанием целью операции является получение заданной формы, точности и качества поверхности детали, то для ДР цель процесса – обеспечение заданной формы, точности и качества рельефа, получаемого на поверхности детали в виде совокупности неотделившихся от заготовки подрезанных слоев, по сути дела – стружки.

Перспективные области применения данной комбинированной технологии.

- ▼ Изготовление деталей теплообменников из меди и ее сплавов.
- ▼ Принципиально новый подход при создании износостойких покрытий большой толщины с управляемой структурой и свойствами.
- ▼ Восстановление размеров изношенных деталей машин как самостоятельный технологический прием.
- ▼ Охлаждающие или термостабилизирующие пластины с внутренними подповерхностными микроканалами для элементов радиоэлектронной аппаратуры.
- ▼ Получение резьбы на тонкостенных трубах из цветных металлов
- ▼ Подготовка поверхностей под последующее нанесение газотермических покрытий, склеивание, диффузионную сварку и пайку и т.д.

5. Одним из видов комбинированной обработки является ***ультразвуковая механическая обработка*** (интенсификация процесса резания с помощью ультразвука), реализуемая путем сообщения вынужденных механических колебаний ультразвуковой частоты традиционным режущим инструментам.

Применение ультразвуковых колебаний является одним из направлений интенсификации процессов резания труднообрабатываемых материалов. Применение ультразвука при механической обработке обеспечивает повышение производительности и улучшение качества поверхностного слоя деталей из труднообрабатываемых материалов. При выполнении некоторых операций ультразвуковые методы обработки являются наиболее эффективными и целесообразными.

Совмещенный способ обработки (УЗ+механическая обработка) наиболее эффективен и перспективен при обработке жаропрочных и нержавеющей сталей, титановых сплавов, стекла, керамики.

Сущность ультразвуковой механической обработки заключается в том, что на обычную кинематическую схему процесса резания накладываются дополнительные колебания на инструмент или заготовку в направлении одной из координатных осей.

Примеры применения.

- ◆ Весьма эффективен процесс УЗ механической обработки твердых, хрупких неметаллических материалов (керамики, стекла, полупроводников) сверлением с использованием ультразвуковой вибрации вращающегося алмазного сверла.
- ◆ Эффективно использование УЗК при нарезании наружной и внутренней резьбы в заготовках диаметром от 12 до 30 мм из нержавеющей, жаропрочных и титановых сплавов.
- ◆ Существует опыт применения ультразвука при обработке нержавеющей стали Х18Н9Т спиральными твердосплавными сверлами и т.д.

6. *На базе совмещения процессов физико-химической и традиционной механической обработки резанием разработаны комбинированные методы размерной обработки, которые наиболее эффективны применительно к алмазным кругам на металлической связке, - алмазно-искровое шлифование, алмазное электрохимическое шлифование.*

♦ Одним из эффективных способов интенсификации процесса резания труднообрабатываемых материалов алмазными кругами на металлической связке является *совмещение процессов электроэрозионного воздействия на материал срезаемого слоя и инструмент с процессом резания.*

Примером подобной комбинированной обработки является процесс интенсифицированного *алмазно-искрового шлифования (АИШ)*, разработанный в НТУ «ХПИ».

Сущность его заключается в том, что при шлифовании в зону обработки вводится дополнительная энергия в форме электрических разрядов определенной мощности, длительности и частоты от автономных источников технологического тока. Шлифование выполняется токопроводными алмазными кругами на обычных станках с изоляцией круга и детали от общей массы станка. Процесс стабильно протекает в различных смазочно-охлаждающих средах, применяемых при шлифовании, с подачей их в зону обработки поливом, в том числе и СОТС на водной основе.

Процесс микрорезания алмазными зернами совмещается с процессом электроискрового воздействия (т.е. воздействия электрических разрядов малой длительности – мгновенных, искровых, $\tau = 10^{-5} \dots 10^{-7}$ с и высокой частоты – $8 \dots 100$ кГц – от электроимпульсных генераторов) на обрабатываемый материал и металлическую связку круга.

Электрические разряды в рабочей зоне оказывают определенное воздействие на поверхность обрабатываемой заготовки, на режущую поверхность круга и на срезаемую стружку.

Обработанная поверхность формируется в результате совместного действия режущих алмазных зерен и электрических разрядов. Под действием электрических разрядов происходит предразрушение микрослоя обрабатываемого материала с соответствующим улучшением обрабатываемости.

Следовательно, в зоне обработки совмещается механическое действие режущих зерен, осуществляющих срезание микростружек и электрофизическое действие разрядов. Оба этих процесса взаимосвязаны и в значительной степени влияют друг на друга. Поэтому зону шлифования следует рассматривать с одной стороны, как зону стружкообразования и контактно-фрикционного взаимодействия инструмента с металлом, а с другой - как межэлектродный промежуток.

При этом микрорезание алмазными зернами является доминирующим процессом.

Электрические разряды выполняют вспомогательную роль, их действие способствует интенсификации основного процесса, при этом характер влияния разрядов и эффективность процесса зависят от вида дополнительной энергии, ее величины и от состояния межэлектродного промежутка.

Благодаря совмещению электрофизического воздействия с процессом алмазного шлифования кругами на токопроводящей связке обеспечивается сохранение высокой режущей способности алмазных кругов и устойчивость их рельефа.

Устранение засаливания и стабилизация высоких показателей работоспособности кругов являются одним из важнейших преимуществ АИШ перед другими способами шлифования.

♦ *Электрохимическое шлифование* (применительно к алмазным кругам – *алмазное электрохимическое шлифование – АЭХШ, или электроалмазное шлифование*) – один из комбинированных процессов обработки, совмещающий возможности механической обработки (шлифование) и электрохимической.

Применение данных процессов позволяет расширить возможности и области эффективного применения процессов шлифования токопроводящих материалов (сталей, твердых сплавов и т.д.), является значительным резервом повышения производительности и, соответственно, снижения себестоимости обработки и качества изделий.

Данный способ удачно сочетает в себе достоинства указанных методов (алмазного шлифования, электрохимической обработки), а также обеспечивает проявление эффектов их взаимодействия – синергетический эффект, способствующий интенсификации удаления припуска.

Сущность процесса состоит в том, что обработку заготовки (анода) выполняют электропроводящим абразивным или алмазным кругом на металлической связке (на основе меди или алюминия), являющимся катодом в электролите, подаваемым в зазор заготовка-круг, рис. 14.

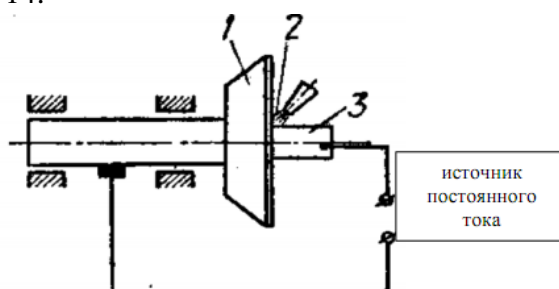


Рисунок 14 – Типовая схема электроалмазного шлифования:

- 1 – алмазный круг на токопроводящей связке;
- 2 – электролит;
- 3 – обрабатываемая деталь

Метод основан на управляемом микроразрушении обрабатываемого материала в электрическом поле при одновременном действии алмазных зерен шлифовального круга, электролитического растворения, электроэрозии и контактного оплавления.

Введение в зону контакта круга с заготовкой электро-физико-химического воздействия позволяет повысить производительность обработки в условиях уменьшения нагрузки на абразивные зерна или создать возможности дополнительного съема материала при ее сохранении. Кроме того, эффекты, возникающие от дополнительного воздействия электрической энергии, благоприятно сказываются на поддержании высокой режущей способности круга.