

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Н. САМОХВАЛОВ

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗМЕРНОЙ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 24.04.04 Авиастроение

© Самарский университет, 2019

ISBN 978-5-7883-1428-0

САМАРА
Издательство Самарского университета
2019

УДК 621.373(075)

ББК 34.58я7

С177

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Л. В. К у д р о в,
д-р техн. наук, проф. В. А. М и х е е в

Самохвалов, Владимир Николаевич

С177 Высокоэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки: учеб. пособие / *В.Н. Самохвалов.* – Электрон. текст. и граф. дан. (1,15 Мб). – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 1 опт. компакт-диск (CD-ROM). – Систем. требования: PC, процессор Pentium, 160 МГц; оперативная память 32 Мб; на винчестере 16 Мб; Microsoft Windows XP/Vista/7; разрешение экрана 1024x768 с глубиной цвета 16 бит; DVD-ROM2-х и выше, мышь; Adobe Acrobat Reader. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7883– 1428-0

Рассмотрены технологические методы формообразования деталей, разделения листовых материалов и поверхностного упрочнения деталей, основанные на высокоскоростном импульсном приложении давления или воздействии концентрированных потоков энергии с высокой удельной плотностью или мощностью. Изложены высокоэнергетические методы формообразования тонкостенных деталей штамповкой взрывом, электрогидравлической и магнитно-импульсной обработкой.

Рассмотрены высокоэнергетические разделительные операции размерной обработки: гидроабразивная обработка, плазменная резка, лазерная обработка (резка) материалов, электронно-лучевая обработка. Изложены высокоэнергетические операции упрочняющей обработки: импульсные методы поверхностного энергетического воздействия (упрочнение взрывом и магнитно-импульсной обработкой), поверхностное упрочнение концентрированными потоками частиц и излучения.

Рассчитаны на студентов, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 24.04.04 Авиационное строительство.

Подготовлены на кафедре теоретической механики.

УДК 621.373(075)

ББК 34.58я7

Редактор И.И. Спиридонова

Компьютерная верстка И.И. Спиридоновой

Подписано для тиражирования 10.09.2019.

Объем издания 1,15 Мб.

Количество носителей 1 диск.

Тираж 10 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ	7
1.1. Штамповка взрывом.....	7
1.2. Электрогидравлическая штамповка.....	13
1.3. Магнитно-импульсная штамповка.....	17
2. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	20
2.1 Гидроабразивная обработка.....	20
2.2 Плазменная резка.....	25
2.3 Лазерная резка	30
2.4 Электронно-лучевая резка	37
3. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ	42
3.1 Импульсные методы поверхностного энергетического воздействия ..	43
3.1.1 Упрочнение взрывом	43
3.1.2 Магнитно-импульсная обработка материалов.....	46
3.2 Поверхностное упрочнение концентрированными потоками частиц и излучения.....	47
3.2.1 Лазерное упрочнение.....	47
3.2.2 Электронно-лучевая поверхностная обработка.....	54
3.2.3. Плазменное поверхностное упрочнение деталей.....	56
3.2.4. Детонационное нанесение покрытий	60
3.2.5. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение	62
3.2.6 Ионное распыление	64
3.2.7. Магнетронное распыление.....	65
3.2.8. Ионная имплантация (легирование).....	67
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	73

ВВЕДЕНИЕ

Развитие предприятий авиастроения и уровень их конкурентоспособности в огромной степени зависят от эффективности использования новых конструктивных решений, материалов и методов их обработки при получении изделий.

Объектом изучения дисциплины «Высокоэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки» являются технологические методы формообразования деталей, разделения листовых материалов и поверхностного упрочнения деталей, основанные на высокоскоростном импульсном приложении давления или воздействии концентрированных потоков энергии с высокой удельной плотностью или мощностью.

Предметом курса являются физические основы и технологические характеристики:

- высокоскоростных формообразующих процессов обработки металлов взрывом, электрогидравлической и магнитно-импульсной штамповкой;
- операций размерной обработки заготовок и деталей гидро- и гидроабразивной, плазменной, лазерной и электронно-лучевой резкой;
- методов поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей машин при упрочнении взрывом, магнитно-импульсной обработкой, лазерной и электронно-лучевой обработкой, детонационным и плазменном поверхностном упрочнении деталей.

Цели дисциплины: изучение и освоение технологических процессов, использующих концентрированные потоки энергии и импульсного воздействия, позволяющих обеспечить качество и эксплуатационную надежность летательных аппаратов (ЛА).

Задачи дисциплины:

- изучение основных физических процессов, протекающих в материалах при воздействии концентрированных потоков энергии, и их влияния на эксплуатационные свойства материалов и качество изделий;

- изучение деформационных процессов, протекающих в материалах заготовок при импульсном воздействии давлений, и их влияния на качество материала деталей;

- изучение технологических возможностей применения высокоэнергетических методов для осуществления разделительных, формообразующих и поверхностно-упрочняющих операций при производстве деталей ЛА;

- подготовка магистров к глубокому изучению высокоэффективных технологических процессов производства ЛА и методов управления их качеством на стадии производства.

После освоения данного курса обучающийся должен знать:

- основные физические процессы, протекающие при высокоэнергетическом воздействии на материалы;

- влияние физического механизма воздействия концентрированных потоков энергии и высокоскоростного нагружения на свойства материалов и качество изделий;

- основные понятия о технологических процессах производства деталей ЛА, основанных на высокоэнергетических воздействиях на заготовки;

- основные технологические методы производства элементов ЛА, с использованием концентрированных потоков энергии и импульсного нагружения;

Магистр данного профиля должен уметь:

- проводить анализ влияния основных физических процессов высокоэнергетического воздействия на свойства изготавливаемых изделий;

- оценивать влияние технологических факторов и физических процессов, протекающих при реализации высокоэнергетических методов, на свойства материалов деталей;

- выбирать технологические методы, основанные на импульсном нагружении и применении концентрированных потоков энергии для повышения ресурса и надежности ЛА.

1. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Это технологические методы формообразования деталей и разделения листовых материалов (размерная обработка) и поверхностного упрочнения деталей, основанные на высокоскоростном импульсном приложении давления или воздействии концентрированных потоков энергии с высокой удельной плотностью или мощностью.

При высокоэнергетических методах штамповки деформирование металла осуществляется с высокими скоростями преобразования энергии. Кратковременное приложение больших усилий разгоняет заготовку до скоростей $V=150...300$ м/с. Последующее деформирование материала в значительной степени происходит за счет кинетической энергии, накопленной в период разгона заготовки (действия импульса давления).

К высокоскоростным формообразующим процессам обработки металлов относятся: штамповка взрывом, электрогидравлическая штамповка, магнитно-импульсная штамповка.

1.1. Штамповка взрывом

Штамповка взрывом – способ обработки металлов, основанный на использовании энергии взрыва. Взрыв – процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. Формообразование заготовки происходит за счет импульсного давления ударной волны, вызывающего в материале заготовки напряжения, значительно превышающие предел текучести.

Штамповка взрывом – один из первых, наиболее исследованных методов высокоскоростного деформирования материалов (промышленное использование метода началось с 1950 г.). Обладая высокой удельной и общей энергоемкостью и эффективностью, взрывчатые вещества (ВВ) позволяют деформировать детали больших габаритов из высокопрочных материалов с высокой точностью. Этим методом изготавливаются детали различной конфигурации и размеров из плоских и фасонных листовых заготовок.

К источникам энергии при обработке металлов взрывом относятся различные виды взрывчатых веществ. Взрывчатым веществом называется химическое соединение (смесь), которое, под действием теплоты механического удара или давления, за короткий промежуток времени превращается в другое устойчивое вещество, полностью или большей частью газообразное.

Различают несколько видов штамповки, в зависимости от типа взрывчатого вещества (рис. 1.1).

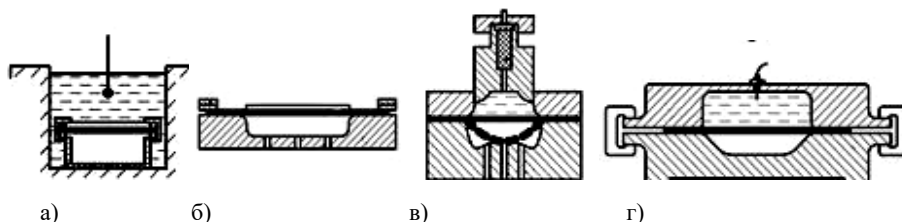


Рис. 1.1. Принципиальные схемы штамповки взрывом с применением:
 а, б – бризантного взрывчатого вещества (контактная и бесконтактная);
 в – пороховых зарядов; г – газовых смесей или сжиженных газов

Энергия молекулярных связей при взрыве ВВ выделяется при превращении его в газ в виде теплоты. Температура сжатого газа достигает несколько тысяч градусов. За миллионные доли секунды ВВ переходит в новое агрегатное состояние – разогретый газ. Разогретый газ при этом будет находиться в сверхсжатом состоянии (сотни тысяч атмосфер). Взрывчатые вещества могут быть газообразными и твердыми (конденсированными). Газообразные ВВ представляют собой смесь газов: водорода, ацетилена, метана или других с кислородом. Твердые взрывчатые вещества представляют собой нитросоединения (гексоген, нитроглицерин, тетрил) или соли азотной кислоты (нитрат аммония). Как правило, эти твердые взрывчатые вещества используются не в чистом виде, а в виде смесей (динамит, аммонит и др.).

Твердые ВВ изготавливаются в виде порошка, прессованных брикетов, литых зарядов различной формы, листов, шнуров.

Основным критерием выбора ВВ является такая его характеристика, как удельная теплота взрыва. Например, для тротила она составит 1010 ккал/кг, тетрила – 1100 ккал/кг, гексогена – 1300 ккал/кг, аммонита – 1000 ккал/кг, нитрата аммония – 380 ккал/кг.

Для газовых смесей энергоспособность – это количество теплоты, выделившееся, например, при сгорании 1 кг смеси: водорода и кислорода – 3230 ккал, ацетилена и кислорода – 2950 ккал, пропана и кислорода – 2400 ккал.

Другим характеристикам взрывчатых веществ относятся:

– бризантность – это степень воздействия ВВ на материал заготовки, находящейся вблизи от заряда;

– фугасность, это степень воздействия ВВ на материал заготовки, находящейся вдали от заряда.

Наибольшее распространение при взрывном формообразовании получили бризантные взрывчатые вещества, имеющие большую мощность, высокую скорость ударной волны, надежность и удобство при работе, хорошо изученную кинематику взрыва. Линейная скорость ударной волны бризантных ВВ составляет 2...9 км/с.

Твердые ВВ изготавливаются в виде порошка, прессованных брикетов, литых зарядов различной формы, листов, шнуров.

При штамповке взрывом заряд бризантного ВВ размещают:

– на поверхности заготовки (при этом взрывная волна непосредственно воздействует на заготовку) – рис. 1.1, б;

– на некотором расстоянии от нее (в этом случае энергия взрыва передается через промежуточную среду: газ, жидкость, песок и др.) – рис. 1.1, а.

Наиболее широкое применение в производстве получил метод штамповки взрывом с использованием жидкой среды для передачи давления от заряда взрывчатого вещества к заготовке (гидровзрывное формообразование). Для бесконтактной взрывной штамповки используют тринитротолуол, тетрил, пентолит, динамиты и жидкие взрывчатые вещества.

Как правило, штамповку производят в открытых емкостях – естественных (озеро, река) или искусственных (железобетонных и земляных бассейнах) наполненных водой (рис. 1.2, а).

Иногда используются бассейны одноразового действия (рис. 1.2, б), которые могут устанавливаться в бронеканере – при изготовлении небольших деталей. Стенки бассейна крепятся легкосъёмными элементами и гибкими связями и при взрыве либо полностью разрушаются, либо откидываются.

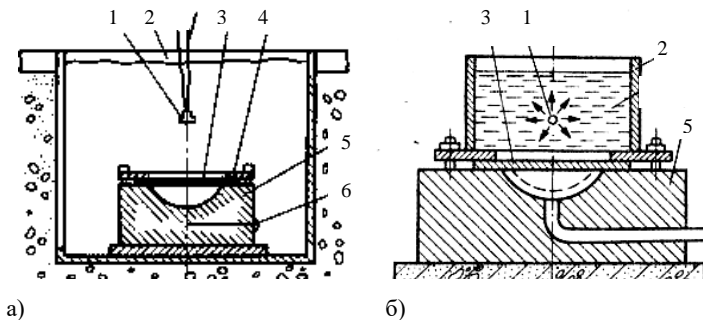


Рис. 1.2. Штамповка взрывом в бассейне:
 1 – заряд ВВ; 2 – бассейн; 3 – заготовка; 4 – прижимное кольцо;
 5 – матрица; 6 – вакуумная линия

Метод заключается в том, что штампуемую заготовку 3 укладывают на матрицу 5 и прижимают с помощью прижимного кольца 4. Между заготовкой и полостью матрицы создается вакуум. Заряд взрывчатого вещества с детонатором 1 подвешивают в воде на определенном расстоянии над заготовкой 3. Матрицу с заготовкой и зарядом опускают в бассейн с водой 2.

При срабатывании детонатора внутри ВВ возникает фронт детонационной волны, которая распространяется в жидкости со скоростью 1450 м/с. При взрыве образуется мощная ударная волна и газовый пузырь от продуктов взрыва, который, пульсируя (расширяясь и сжимаясь), вызывает дополнительные импульсы давления. Газовый пузырь, расширяясь, создает направленный в сторону заготовки гидропоток. Когда ударная волна достигает поверхности заготовки, начинается процесс деформации. Ударная волна отдает ей часть своей энергии на деформацию металла и на придание заготовке ускорения (разгон заготовки), а часть энергии ударной волны отразится от заготовки.

Затем под действием сил сопротивления пластической деформации заготовка замедляет свое движение. Гидропоток догоняет ее, сообщая новый силовой импульс. Далее происходит сложный процесс схлопывания парогазовой полости, взаимодействия отраженных волн, гидропотоков и т.д., но практическое значение имеет лишь первая стадия распространения ударной волны и действия гидропотока (80...90% энергии). Окончательное формоизменение заготовки происходит при ее высокоскоростном соударении с поверхностью матрицы, что обеспечивает дополнительную калибровку полученной детали. В

ходе колебаний пузырь перемещается к поверхности жидкости, а оставшаяся энергия вместе с частью жидкости выплескивается в атмосферу.

Примерно 60% выделившейся энергии приходится на основной импульс давления, 25% – на первые колебания газового пузыря, а остальные 1...5% – на последующие. Часть энергии, высвобождаемой при взрыве заряда ВВ передается через воду заготовке, которая деформируется, принимая форму поверхности матрицы 5. Энергия, преобразуемая в механическую работу деформации, зависит от взаиморасположения заготовки, заряда и поверхности жидкости, так как газовый пузырь для каждого заряда имеет вполне определенные размеры. Для получения взрывной волны нужной формы часто заряд, необходимый для деформирования заготовки, разбивают на отдельные части, располагая их так, чтобы можно было получить наибольший эффект. Глубина погружения заряда должна быть больше максимального радиуса газового пузыря, который соответствует первому периоду колебаний.

Чтобы воздух под заготовкой не препятствовал ее перемещению, происходящему с большой скоростью, полость матрицы под заготовкой вакуумируют с помощью специальной вакуумной линии 6.

Режим и условия гидровзрывного формообразования определяют следующие основные параметры: вид ВВ, его масса, плотность, форма, расположение заряда над заготовкой, уровень жидкости над заготовкой, диаметр рабочего бассейна, толщина заготовки.

Производственные исследования показали, что идеальная форма заряда должна соответствовать форме детали. Это позволяет расположить энергоноситель в максимальной близости к заготовке и при использовании подобных зарядов возникает плоская волна, имеющая большую мощность.

Масса заряда определяется с учетом расстояния до заготовки, вида взрывчатых веществ, диаметра, толщины и материала заготовки, а также глубины штамповки.

При деформировании сосредоточенным зарядом высота его расположения над заготовкой в большей мере зависит от относительной толщины деталей. Чем больше эта толщина, тем меньше расстояние заряда до заготовки. Высота расположения заряда подбирается в зависимости от условий получения максимального изгиба заготовки при минимальной его массе. Экспериментально установлено, что опти-

мальное расстояние от заряда до заготовки должно быть равным половине максимального размера обрабатываемой детали в плане.

Штамповка порохами и газами осуществляется в закрытых емкостях. Энергия взрывчатого вещества передается заготовке либо непосредственно, либо через промежуточную среду. На рис. 1.1 представлены схемы деформирования заготовки с помощью энергии пороха (рис. 1.1, в) и газовой смеси (рис. 1.1, г).

Важными преимуществами штамповки газовыми смесями является равномерность нагружений поверхности заготовки при взрыве, возможность автоматизации процесса. Существенным недостатком штамповки газовыми смесями является повышенные требования к технике безопасности.

Основными достоинствами штамповки взрывом являются следующие:

- низкая стоимость оснастки (матрица изготавливается из недорогих материалов);
- небольшие капитальные затраты (не требуется прессовое оборудование);
- высокая точность обработки;
- возможность изготовления деталей сложной формы из трудно деформируемых и хрупких сплавов;
- сокращение числа технологических переходов;
- исключается, в некоторых случаях, промежуточная термообработка вследствие более полного использования пластических свойств металла и создания более благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния.

К недостаткам относятся неэкономичность при большом объеме производства, трудность управления процессом, опасность и неудобство работы с взрывчатым веществом.

Использование энергии взрыва значительно расширяет возможности обработки металлов давлением. Посредством энергии взрыва можно создавать давление от тысяч до миллионов атмосфер. Высокие значения давления определяют особые условия деформации металла: изменение свойств (повышение прочности, плотности, твердости) позволяют деформировать материалы, не поддающиеся обработке давлением при обычных скоростях и условиях деформации. Применение энергии взрыва при штамповке позволяет не только отказаться в ряде случаев от создания крупногабаритного и дорогостоящего оборудования, но и обеспечить получение изделий с новыми качествами и более

точными размерами, значительно сократить технологический цикл получения готового продукта и во многих случаях исключить ручные отделочные операции.

Штамповку взрывом применяют при изготовлении опытных или единичных образцов, а также в тех случаях, когда нельзя применить штамповку на прессе. Например, для получения тонкостенных деталей больших габаритных размеров. Диаметр штампуемых взрывом деталей достигает пяти метров. В литературе описан пример уникальной взрывной штамповки детали диаметром около 15 метров. Толщина обрабатываемых заготовок – 0,5...25 мм, материал – практически любые деформируемые сплавы (алюминиевые, медные, титановые и стали).

1.2. Электрогидравлическая штамповка

Электрогидравлическая штамповка – это метод формообразования фасонных изделий из тонколистового материала с использованием ударных волн высокой интенсивности, возникающих при импульсном электрическом разряде в жидкости.

В основе метода лежит электрогидравлический эффект – способ преобразования электрической энергии в механическую при возникновении в объеме жидкости импульсного электрического разряда.

Разрядный канал имеет высокие физические параметры: давление – $10^3 \dots 10^4$ МПа, температуру – 12000...20000°С. Быстрое расширение разрядного канала приводит к возникновению следующих энергосиловых факторов: ударных волн, гидравлических потоков и повышению давления в закрытой разрядной камере за счет парогазовой полости. Общее время электрогидравлического эффекта длится от нескольких микросекунд до миллисекунды.

Основными действующими факторами электрогидравлического эффекта являются:

- высокие и сверхвысокие импульсные гидравлические давления, приводящие к появлению ударных волн со звуковой и сверхзвуковой скоростями;
- значительные импульсные перемещения объемов жидкости (гидропотоки) со скоростями, достигающими сотен метров в секунду;
- мощные, импульсно возникающие кавитационные процессы.

Электрогидравлическую штамповку (ЭГШ) осуществляют в бассейне с водой. Обработка заготовок происходит за счет возникновения

высокого давления в результате высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую жидкость электродами.

Мощный искровой разряд в жидкости подобен взрыву. За счет энергии разряда, вокруг канала разряда в жидкости возникает ударная волна, которая, дойдя до заготовки, деформирует ее по матрице.

Существуют два метода преобразования электрической энергии в механическую:

- разряд конденсатора через зазор в жидкости;
- разряд конденсатора через проволочку, соединяющую электроды.

Технологические установки выполняют с открытой (рис. 1.3, а) или закрытой (рис. 1.3, б, в) камерой (емкостью).

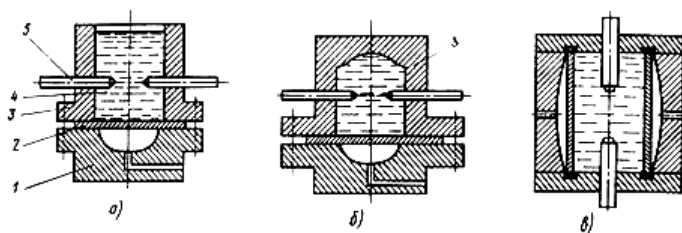


Рис. 1.3. Схема электрогидравлической штамповки детали:

а – в открытой камере; б – в закрытой камере; в – трубчатой заготовки в закрытой камере: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – камера; 4 – вода; 5 – электрод

Листовую заготовку укладывают на матрицу и прижимают к ней. Емкость заполняют передающей средой (водопроводной водой). В воде, на определенном расстоянии от заготовки, размещают рабочие электроды (положительный и отрицательный), соединенные с генератором импульсов тока (ГИТ) электрогидравлической установки (рис. 1.4).

Зарядный контур ГИТ обеспечивает подачу постоянного высокого напряжения к конденсаторам C . Высоковольтный трансформатор T повышает напряжение, выпрямитель Re обеспечивает постоянный ток, зарядное сопротивление R ограничивает зарядный ток для защиты высоковольтного трансформатора. Происходит зарядка батареи высоковольтных конденсаторов C . Разрядник P замыкает разрядный контур. Разрядный контур подает электрическую энергию, запасенную в батарее конденсаторов, к паре электродов, погруженных в жидкость в разрядной камере K . Осуществляется электрический пробой в жидкости.

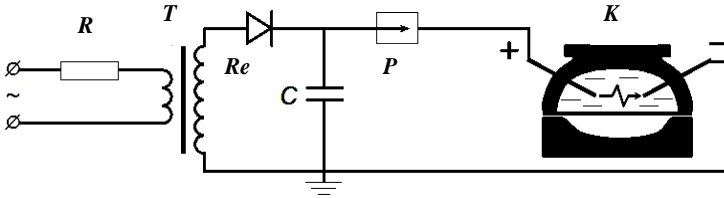


Рис. 1.4. Принципиальная электрическая схема реализации электрогидравлического эффекта: R – зарядное сопротивление; T – высоковольтный трансформатор; Re – выпрямитель; C – батарея конденсаторов; P – разрядник; K – разрядная камера, оснащенная электродной парой и заполненная жидкостью

Зарядное устройство позволяет накопить заданное (необходимое) для выполнения технологической операции количество электрической энергии в батарее конденсаторов:

$$W = CU^2/2,$$

где C – емкость;

U – напряжение заряда конденсаторов.

При включении разрядника рабочее напряжение U подается на электроды, а после пробоя межэлектродного промежутка по замкнутой цепи будет осуществляться разряд батареи конденсаторов. Величина тока в разрядной цепи достигает сотен килоампер, время разряда – миллисекунды.

При высоковольтном электрическом разряде между электродами возникает токопроводящий искровой канал. Расширение канала разряда приводит к возникновению газового пузыря и ударной волны, распространяющейся в жидкости со скоростью порядка 1500 м/сек.

При затухании электрического разряда, под действием избыточного давления ранее сжатой жидкости, происходит схлопывание газового пузыря; рождается гидропоток. При достижении гидропотокотом заготовки возникает новое силовое воздействие, окончательно деформирующее ее по матрице. При этом силовое действие гидропотока в 3...10 раз превышает силовое действие ударной волны

Коэффициент полезного действия (КПД) электрогидравлической штамповки составляет 5...20%. Наибольший КПД достигается в установках с замкнутым объемом жидкости.

Величина разрядного (межэлектродного) промежутка зависит от удельного сопротивления воды и параметров разрядного контура (U, C, L) и обычно составляет от 10 до 25 мм (часто можно регулиро-

вать). Чтобы облегчить управление формой и амплитудой генерируемых волн давления и повысить КПД, электроды закорачивают между собой проводниками в виде перемычки (мостика). Для возбуждения разряда требуемой траектории используется различное расположение электродов, а также различные формы проволочек, закорачивающих межэлектродный промежуток.

Перемычку выполняют из тонкой проволоки b , свернув ее спиралью, или из фольги. Благодаря этому путь электрического разряда может быть predetermined по направлению и форме. Соединяя электроды проволочкой, удается поставить параметры ударной волны в зависимость от формы разряда между электродами. Наличие проволочки позволяет увеличить длину разряда при одинаковой мощности установки и рабочей среде. При разряде конденсатора через проволочку превращение энергии более эффективно, так как свободный разряд и испарение жидкости заменяются «ударным» испарением проволочки. Это явление называется *электрическим взрывом* проводника. Применение взрывающейся проволочки дает возможность снижать рабочие напряжения, так как с ее помощью одно и то же напряжение «перекрывает» большее межэлектродное расстояние. Применение взрывающейся проволочки позволяет увеличить расстояние между электродами до 300 мм и более, при этом влияние проводимости жидкости на возникновение разряда значительно уменьшается.

Электрогидравлической штамповкой обычно изготавливают детали из листовых заготовок толщиной 0,8...2 мм. При этом минимальные радиусы кривизны поверхности детали, как правило, составляют не менее 2...4 мм.

Габаритные размеры плоских заготовок деталей сложной формы, изготавливаемых ЭГШ, достигают 1500×2000 мм. Глубина штампуемых деталей – до 500...600 мм. На специальных электрогидравлических установках с перемещаемой одной или несколькими разрядными камерами штампуют плоские крупногабаритные (до 3...3,5 м) детали с различными рифтами либо местными рельефами.

Детали сложной формы штампуют за несколько переходов – через эластичную диафрагму и с использованием многоэлектродных разрядных камер. Максимальный диаметр и длина оболочек, штампуемых на специализированных установках, обычно не превышают 1000 мм.

1.3 Магнитно-импульсная штамповка

Магнитно-импульсная штамповка – это способ пластической деформации металлов и их сплавов с высокой электропроводностью, осуществляемый при прямом преобразовании электрической энергии в механическую, непосредственно в самом обрабатываемом изделии.

При штамповке импульсным магнитным полем (ИМП) электрическая энергия разряда батареи конденсаторов преобразуется в энергию импульсного магнитного поля, при протекании импульсного тока через индуктор. Вокруг индуктора возникает импульсное магнитное поле высокой напряженности, наводящее вихревые токи в электропроводном материале заготовки. Взаимодействие вихревых токов в заготовке с магнитным полем индуктора создает механические силы, деформирующие заготовку.

Время действия импульса давления и деформирования обрабатываемой заготовки ИМП составляет $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с. При этом создаются давления до $10 \dots 40$ кг/мм², что позволяет деформировать различные, в том числе высокопрочные, материалы при высоких скоростях деформаций ($10^3 \dots 10^4$ 1/с). Скорость деформирования заготовок при магнитно-импульсной обработке достигает $100 \dots 300$ м/с.

Для магнитно-импульсной штамповки трубчатых и плоских заготовок созданы установки, на которых можно проводить обжим, раздачу, формовку и операции получения неразъемных соединений деталей.

Блок-схема магнитно-импульсной установки аналогична блок-схеме генератора импульсных токов при ЭГШ, только к выходным зажимам подключается индуктор (рис. 1.5).

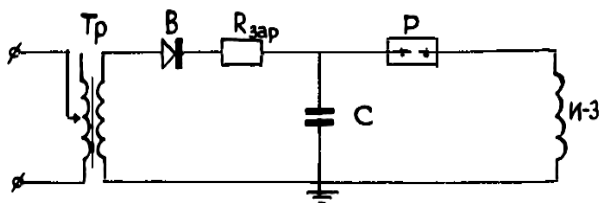


Рис. 1.5. Схема магнитно-импульсной установки

Металлы с высокой электропроводностью – медь, алюминий, латунь лучше деформируются ИМП, чем металлы с низкой электропроводимостью – сталь, титан.

Максимальное давление магнитного поля на металлическую стенку

$$p = 0,5\mu_0 H^2,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; H – напряженность магнитного поля.

Возможности ИМП: штамповка деталей толщиной S до 1,5 мм, пробивка в них отверстий $d_{\max} = 150$ мм; формовка деталей диаметром до 1000 мм (обечайка) и длиной до 1500 мм.

Достоинства магнитно-импульсной формовки:

1. Большие скорости обработки, позволяющие формовать детали из маловязких и твердых металлов, которые не поддаются пластической деформации при обычных скоростях.

2. Отсутствие механического соприкосновения между деталью и индуктором, что дает возможность штамповать металлы с нанесенными защитными покрытиями.

Недостатки:

1. Сравнительно низкий КПД из-за потерь на нагрев и рассеяние.

2. Сложность обработки деталей с отверстиями или пазами, мешающими прохождению тока.

3. Невысокая долговечность индукторов при работе в электрических полях высокой напряженности.

4. Сложность обработки заготовок больших толщин.

Технологические схемы магнитно-импульсной формовки

Основные схемы магнитно-импульсной штамповки: обжим и раздача трубчатых (полых) заготовок и формовка листовых заготовок (плоских и с одинарной или двойной кривизной) (рис. 1.6).

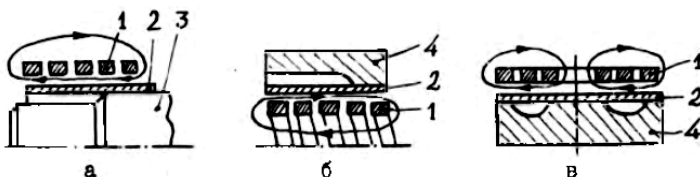


Рис. 1.6. Технологические схемы МИОМ: а – обжим, б – раздача, в – листовая штамповка: 1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – матрица

В схеме «обжим» индуктор располагается снаружи объекта обработки, в схеме «раздача» – внутри трубной заготовки, в схеме «листовая штамповка» – над плоской заготовкой.

По данным схемам выполняются формообразование и калибровка деталей из листов и труб, сварка трубных заготовок, напрессовка деталей пластическим деформированием одной из них.

Для выполнения технологических операций применяются разнообразные по форме и конструктивному исполнению индукторы:

- а) одновитковые и многовитковые;
- б) цилиндрические и плоские;
- в) одноразового и многоразового использования;
- г) охлаждаемые и неохлаждаемые;
- д) разъемные и неразъемные;
- е) с концентраторами магнитного поля и др.

Основные требования, предъявляемые к конструкции индукторов:

- механическая прочность, обеспечивающая необходимый ресурс;
- электрическая прочность изоляции;
- малое электрическое сопротивление.

2. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Это операции размерной обработки заготовок и деталей, основанные на использовании:

- 1) высокоскоростных потоков жидкости или плазмы
- 2) концентрированных потоков заряженных частиц или электромагнитного излучения.

К первой группе относятся:

- а) гидро- и гидроабразивная резка;
- б) плазменная резка.

Ко второй группе относятся:

- а) лазерная резка;
- б) электронно-лучевая резка.

2.1 Гидроабразивная обработка

В основе технологии гидроабразивной резки лежит принцип эрозионного воздействия высокоскоростной водяной струи или смеси воды и твердых абразивных частиц на обрабатываемый материал. Физическая суть механизма гидроабразивной резки состоит в отрыве и уносе из полости реза частиц разрезаемого материала скоростным потоком жидкости и твердофазных частиц (рис. 2.1).

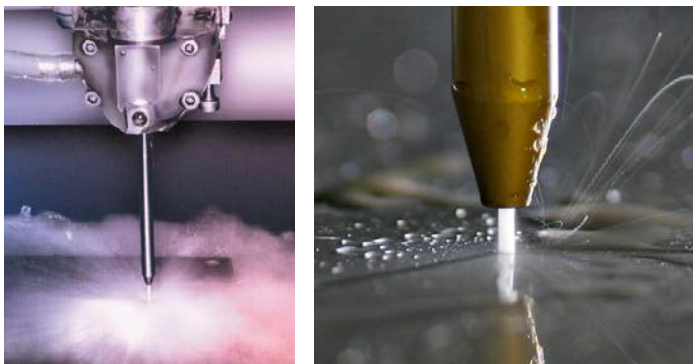


Рис. 2.1. Процесс гидроабразивной резки металла

Практически данный метод реализуется следующим образом. В установке гидроабразивной резки вода под давлением 250...1000 МПа, создаваемым насосом высокого давления (прямого действия, мультипликаторный, бустерный), подается в сопло с профилированным каналом, в котором формируется высокоскоростная водная струя (рис. 2.2).

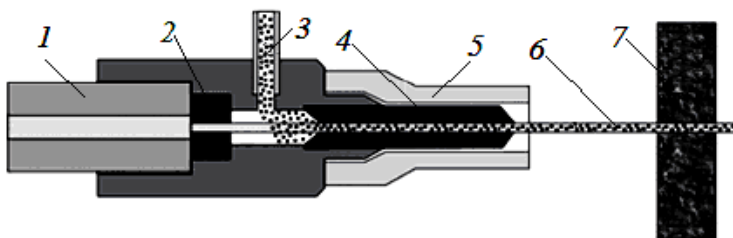


Рис. 2.2. Схема гидроабразивной резки: 1 – подвод воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – подача абразива; 4 – смеситель; 5 – конус; 6 – режущая струя; 7 – разрезаемый материал

Затем водная струя попадает в смесительную камеру режущей головки, где она захватывает поступающие туда абразивные частицы. В результате этого образуется гидроабразивная смесь, которая разгоняется в смесительной трубке до скорости 500...1400 м/с. После резки материала остаточная энергия струи гасится специальной водяной ловушкой (при вертикальном направлении струи).

Режущая головка устанавливается на устройстве позиционирования координатного стола и может перемещаться при помощи электроприводов по трем координатам с рабочими ходами, обусловленными габаритами координатного стола.

Сопла изготавливают из сапфира, рубина или алмаза. Срок службы сапфировых и рубиновых сопел составляет до 100...200 часов, алмазных сопел – до 1000...2000 часов. В зависимости от толщины обрабатываемого материала и его физико-механических свойств, диаметр выходного отверстия сопла выбирают в пределах 0,05...0,5 мм.

Смесительные трубки диаметром порядка 1 мм изготавливают из сверхпрочных сплавов. Срок службы – как правило, до 150...200 часов.

Для резки материалов применяются гидроустановки мощностью 8...80 кВт, при этом расход жидкости, проходящей через сопло, составляет до 500...2500 м³/мин.

Основными технологическими параметрами процесса гидроабразивной резки являются:

- 1) скорость резки;
- 2) вид, свойства и толщина разрезаемого изделия;
- 3) внутренние диаметры водяного сопла и смесительной трубки;
- 4) тип, размер частиц, скорость потока и концентрация в режущей смеси абразивных частиц;
- 5) давление.

Скорость резки существенно влияет на качество реза. При высокой скорости происходит отклонение (занос) водно-абразивной струи от прямолинейности, а также заметно проявляется ослабевание струи по мере разрезания материала. Как следствие, увеличиваются конусность реза и его шероховатость. Чем выше давление, тем выше скорость и эффективность резки.

С уменьшением внутреннего диаметра смесительной трубки (при прочих равных условиях) возрастают производительность и точность резки, уменьшается ширина реза (она примерно на 10% больше внутреннего диаметра трубки). При этом снижается и срок службы трубки. В процессе эксплуатации смесительной трубки ее внутренний диаметр увеличивается примерно на 0,01...0,02 мм за каждые восемь часов работы.

В качестве абразива обычно используют порошки твердых сплавов, карбидов, окислов. Выбор абразива зависит от вида и твердости разрезаемого материала. Так, для высоколегированных сталей и сплавов титана применяют особо твердые частицы граната, для стекла – соответствующие фракции обычного песка, для пластмасс, армированных стекло- или углеродными волокнами, – частицы силикатного шлака. Самым распространенным абразивом, является гранатный песок, поскольку он имеет более высокую режущую способность, твердость и невысокую цену.

Размер абразивных частиц подбирается равным 0,1...0,3 от диаметра режущей струи – для обеспечения ее эффективного воздействия и стабильного истечения. Обычно размер зерен составляет 0,15...0,25 мм, а в ряде случаев – порядка 0,075...0,1 мм, если необходимо получение поверхности реза с низкой шероховатостью.

С помощью водно-абразивной или водной струи можно разрезать практически любые материалы:

- черные металлы и сплавы;

- труднообрабатываемые легированные стали и сплавы (в том числе: жаропрочные и нержавеющие);
- цветные металлы и сплавы;
- композиционные материалы;
- керамические материалы;
- природные и искусственные камни;
- стекло;
- пористые и прозрачные материалы;
- сотовые и сэндвич-конструкции;
- бетон и железобетон.

Гидроабразивная резка особенно эффективна при резке труднообрабатываемых материалов: титановых сплавов различных видов высокопрочных керамик и сталей, а также композитных материалов. При их гидроабразивной резке не создается разрывов в структуре материала, который таким образом сохраняет свои первоначальные свойства.

При этом не возникают ни механические деформации заготовки (сила воздействия струи составляет лишь 1...100 Н), ни ее термические деформации, поскольку температура в зоне реза составляет около 60...90 °С. Поэтому гидроабразивная резка многослойных сотовых и композиционных материалов, керамики является практически единственно возможной. Гидроабразивная струя не изменяет физико-механические свойства материала и исключает деформацию, оплавление и пригорание материала.

Резка мягких материалов: полиуретан, поролон, пеноматериалы (пенопласты), кожаные изделия, картон, ткани и т.п., осуществляется струей воды без добавления абразива. Без абразива можно резать и другие материалы, но это требует более высокого давления. Например, для резки стальных листов водной струей необходимо давление 700...1000 МПа, а при использовании абразивно-жидкостной струи давление можно снизить до 250 МПа.

Преимущества технологии гидроабразивной резки:

1. Универсальность. Возможность использования одной и той же установки для резки широкого спектра материалов без смены или переналадки режущего инструмента. Диапазон толщин разрезаемых материалов от 0,1 до 300 мм.

2. Низкая температура в зоне реза (60...90 °С). Образующееся в процессе резания тепло практически сразу уносится водой. В результате не происходит заметного повышения температуры заготовки, что

обеспечивает по сути «холодный» рез всех материалов. Это позволяет при использовании гидроабразивной технологии:

- исключить оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне;
- исключить выгорание легирующих элементов в легированных сталях и сплавах;
- исключить появление разрывов в структуре материала и ухудшение первоначальных свойств материала;
- исключить температурную деформацию заготовки;
- исключить необходимость дополнительной механической обработки поверхности реза заготовки, вследствие чего повысить производительность и уменьшить себестоимость изготовления деталей.

3. Высокая точность резки. Резка по контуру любой сложности. При гидроабразивной обработке можно воспроизводить контуры любой сложности. Струя жидкости по своим техническим возможностям приближается к идеальному точечному инструменту, что позволяет обрабатывать профиль любой сложности с заданным радиусом закругления, поскольку ширина реза составляет 1...1,5 мм.

4. Высокое качество поверхности реза. Условно, шероховатость поверхности, получаемая на установках гидроабразивной резки, примерно соответствует величинам Ra5 – Rz120. При необходимости возможно получение финишной поверхности с шероховатостью Ra 1,5...2,5 мкм, при соответствующем подборе технологических параметров установки и скорости реза. Это позволяет применять технологию гидроабразивной резки не только в заготовительном производстве, но и для чистовой резки деталей.

5. Экологическая чистота процесса. Не образуются вредных веществ. Уровень шума колеблется в пределах от 85 до 95 дБ.

Недостатки данной технологии:

- недостаточно высокая скорость реза тонколистовой стали;
- ограниченный ресурс смесительных трубок и сапфировых сопел;
- невозможность повторного использования абразивного материала.
- сложность и малый ресурс систем создания высокого давления (ремонт и текущее обслуживание производится через каждые 300...500 часов);
- сложность управления резкой вследствие «заноса» абразивной струи.

2.2 Плазменная резка

Сущность процесса плазменной резки заключается в локальном интенсивном расплавлении металла в объеме полости реза теплотой, генерируемой сжатой электрической дугой, и удалении жидкого металла из полости высокоскоростным плазменным потоком, вытекающим из канала сопла плазмотрона (рис. 2.3).

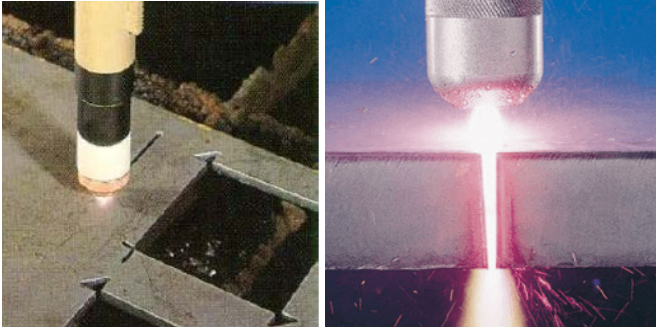


Рис. 2.3. Процесс плазменной резки металла

Для получения плазмы используются электрический дуговой разряд, через который с помощью сопла продувается плазмообразующий газ (аргон, азот, воздух или их смесь). В современной технике резки применяют две схемы плазмообразования (рис. 2.4).

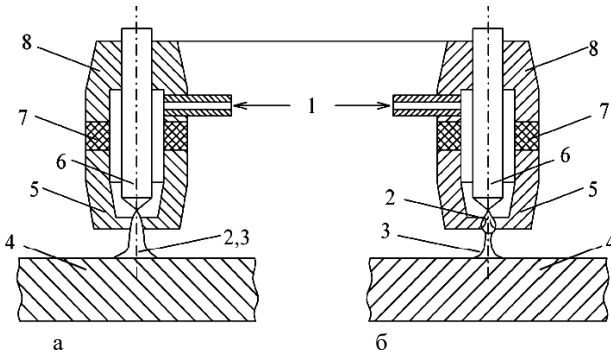


Рис. 2.4. Схемы плазмообразования: а – плазмотрон прямого действия (плазменная дуга); б – плазмотрон косвенного действия (плазменная струя):
1 – подача газа; 2 – дуга; 3 – струя плазмы; 4 – обрабатываемый металл (заготовка);
5 – наконечник; 6 – катод; 7 – изолятор; 8 – катодный узел

В первом случае (рис. 2.4, а) используют дугу прямого действия, возбуждаемую на обрабатываемом металле, являющемся одним из электродов разряда. При этом используется энергия электрической дуги и энергия плазмы – плазменно-дуговая резка. Для возбуждения рабочей дуги, первоначально между электродом и соплом возбуждается вспомогательная дуга, которая выдувается пусковым газом.

Во второй схеме (рис. 2.4, б), вторым электродом сжатой дуги служит формирующий наконечник плазмотрона (косвенная дуга). В этом случае, для резки используется только энергия плазменной струи – резка плазменной струей.

Энергетическая оценка обеих схем показывает, что плазменно-дуговую резку характеризует наиболее высокая эффективность, поэтому для резки металлов, как правило, используют схему плазменно-дуговой резки.

Резка плазменной струей применяется относительно редко, преимущественно для резки неметаллических (неэлектропроводных) материалов, когда невозможно создать дугу прямого действия.

Принципиальная схема плазмотрона представлена на рис. 2.5.

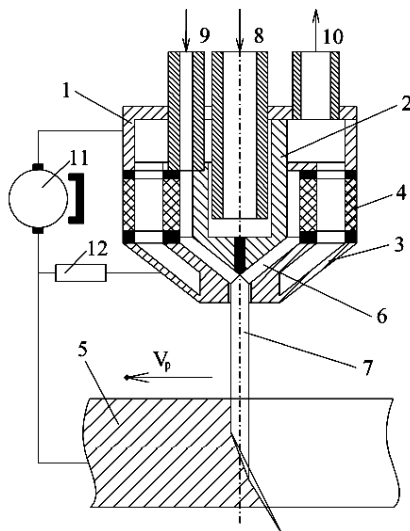


Рис. 2.5. Режущий плазмотрон: 1 – корпус; 2 – электрод (катод); 3 – формирующий наконечник; 4 – изолятор; 5 – разрезаемый металл; 6 – дуговая камера; 7 – столб дуги; 8 – подача охлаждающей воды; 9 – подача плазмообразующего газа; 10 – слив воды; 11 – источник тока; 12 – устройство зажигания дуги

Для возбуждения плазмогенерирующей дуги служит электрод, располагаемый обычно в тыльной стороне дуговой камеры. Столб дуги ориентируется по оси формирующего канала и заполняет практически все его сечение.

В дуговую камеру подается рабочий газ (плазмообразующая среда). Газ, поступая в столб дуги, заполняет формирующий канал, превращается в плазму. Вытекающий из сопла поток плазмы стабилизирует дуговой разряд. Газ и жесткие стенки формирующего канала ограничивают сечение столба дуги (сжимают его), что приводит к повышению температуры плазмы до 15000...20000 °С. Для стабилизации (центрирования) электрической дуги в плазмотронах применяют вихревую (тангенциальную) подачу плазмообразующего газа.

В плазмотрон часто подается два независимых потока газа. Один, меньший, называемый защитным, омывает электрод и защищает его от окисления. В качестве защитного газа обычно применяется аргон. Второй газ, рабочий или плазмообразующий, подается в большем количестве, составляя основную часть общего газового потока, выходящего из плазмотрона. В качестве рабочего газа может применяться технический азот, иногда воздух.

При плазменно-дуговой резке наиболее эффективно используется энергия в дуге постоянного тока прямой полярности (анод на металле). Питание плазмотрона осуществляется от мощного электрического источника с напряжением 200...500 В и током 300...400 А.

Метод обладает следующими достоинствами:

- обрабатываются любые металлы толщиной до 100...150 мм;
- малая ширина реза (при микроплазменной резке толщина резки до 8 мм, ширина реза до 1 мм);
- высокое качество поверхности реза;
- большой срок службы электродов и сопел;
- минимальный расход газов;
- повышенная скорость резки (до 6 м/мин при толщине разрезаемого металла до 10 мм);
- вырезка отверстий с малыми диаметрами;
- точная вырезка углов и скруглений с малыми диаметрами (рис. 2.6).

После плазменной резки материалов в большинстве случаев не требуется последующая механическая обработка, что позволяет сократить количество операций технологического процесса.

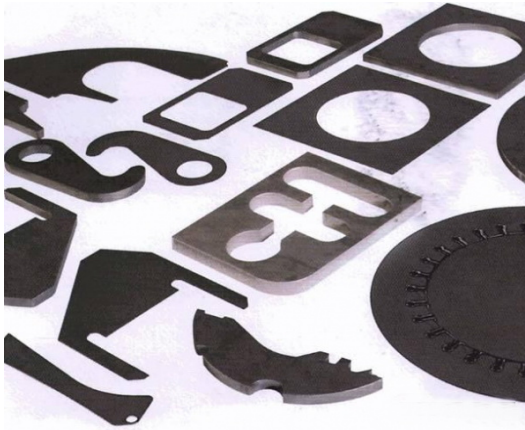


Рис. 2.6. Детали, полученные плазменной резкой

Недостатки метода:

- дорогое и сложное оборудование;
- при обработке цветных металлов возможно незначительное оплавление края;
- возникает наклон края реза около 3...5 градусов, кроме того, может быть незначительное прокаливание края заготовки на глубину 0,5...1,5 мм.

Рабочий газ для плазменной резки

Плазменная резка была создана и первоначально развивалась на использовании аргона в качестве рабочего газа. Аргон имеет ряд положительных качеств. Он уменьшает износ и обеспечивает продолжительную работу вольфрамового электрода. Он мало изнашивает и сопло плазматрона. В аргоне, ввиду малой его теплопроводности и теплоемкости, легко зажигается и устойчиво горит дуга, – при сравнительно низких напряжениях, что облегчает выполнение требований техники безопасности. Аргон не реагирует с разрезаемым металлом и не загрязняет его. Наряду с перечисленными преимуществами аргон имеет и существенные недостатки. Это одноатомный газ, его молекула состоит из одного атома и не может диссоциировать при нагреве. Поэтому аргон может воспринимать тепло только за счет теплоемкости (очень малой, всего 0,125 кал/кг – град) и запас тепловой энергии в аргоне, даже при высоких температурах, незначителен. Этот малый

запас тепла плохо передается металлу, так как аргон отличается и низкой теплопроводностью.

В результате, производительность резки сравнительно низка, значительно ниже, чем при использовании других газов. Кроме того, аргон дорог, а расход газов при резке значителен. Остальные инертные газы, в том числе гелий, вообще для резки недоступны из-за дефицитности и высокой стоимости. Значительно эффективнее для резки использовать двухатомные газы. Такие газы при нагреве диссоциируют с расщеплением молекулы на два свободных атома. Диссоциация поглощает много тепла, на поверхности металла при охлаждении газа идет обратный процесс: объединение двух свободных атомов в двухатомную молекулу; при этом энергия, затраченная на диссоциацию, освобождается и передается металлу, нагревая его.

Таким образом, диссоциированный, или атомарный газ содержит большой запас энергии и легко передает ее металлу.

Из двухатомных газов большого внимания заслуживает водород, он имеет очень высокую теплоемкость – 3,4 кал/кг град и высокую теплопроводность. Он легко диссоциирует при нагревании, переходя в атомарную форму и поглощая большое количество энергии (52 000 ккал/кг), и легко отдает ее металлу, быстро нагревая его. Плазменная струя водорода является особенно «горячей», расплавляет и режет металл быстрее, чем другие газы. Одновременно она усиливает износ сопла. Обычно считают, что водородная плазма слишком горячая и применяют водород не в чистом виде, а в смеси с аргоном или азотом.

К недостаткам водорода относится его взрывоопасность в смеси с воздухом.

Представляет интерес недефицитный двухатомный азот. Он пригоден для плазменной резки после достаточной очистки, которая делает его уже довольно дорогим газом. Недостаточная очистка вызывает быстрый износ электрода. Производительность резки на азоте ниже, чем на водороде, его молекула прочнее и диссоциация получает меньшее развитие, а теплопроводность азота в несколько раз меньше, чем у водорода. Недостатки, присущие каждому из газов, вызвали применение так называемого двойного газа.

В плазмотрон подается два независимых потока газа. Один, меньший, называемый защитным, омывает электрод и защищает его от окисления. В качестве защитного газа применяется обычно аргон. Второй газ, рабочий или плазмообразующий, подается в большем количестве, составляя основную часть общего газового потока, выходя-

щего из плазмотрона. В качестве рабочего газа может применяться дешевый технический азот, иногда воздух. Оригинальную систему плазмообразования предложил чешский инженер К. Миклоши. В плазмотроне его системы часть охлаждающей воды направляется в активную зону плазмотрона, где вода испаряется и превращается в плазмообразующий газ, состоящий из водорода и кислорода и некоторого количества окиси углерода, получаемой от сгорания угольного электрода, примененного в этом плазмотроне и непрерывно подаваемого в дугу по мере сгорания.

2.3 Лазерная резка

Лазерное излучение – это вынужденное монохроматическое излучение широкого диапазона длин волн. Лазерная обработка материалов основана на возможности лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала. Используемые в технологии лазеры генерируют излучение с длиной волны $\lambda=0,3...10,0$ мкм. Важными технологическими параметрами лазерного излучения являются высокая плотность энергии (до 100 Дж/см^2) и мощности (до 10^{10} Вт/см^2).

В зависимости от агрегатного состояния активной среды различают твердотельные и газовые лазеры. Лазеры подразделяют на импульсные и непрерывного действия. Для технологических целей важны следующие параметры лазерного излучения: монохроматичность и когерентность; интенсивность, измеряемая плотностью тока в непрерывном режиме или энергией импульса в импульсном режиме; длина волны; угловая расходимость (обычно $0,01...0,1^\circ$); время воздействия на металл.

Взаимодействие лазерного излучения с поверхностным слоем металла сводится, прежде всего, к его разогреву вплоть до расплавления и испарения. Но, по сравнению с традиционными методами, термической и химико-термической, лазерная обработка имеет ряд преимуществ, а именно, возможность локальной обработки заданных участков поверхности заготовки и достижения очень высоких скоростей нагрева и охлаждения. Это позволяет получать при затвердевании металла различные метастабильные структуры, включая и аморфную.

Обработка проводится с помощью остросфокусированного светового луча, излучаемого оптическим квантовым генератором – лазером.

Излучение лазера является узконаправленным и монохроматичным. Минимальный размер пятна, до которого может быть сфокусирован луч лазера, достигает значений 1 мкм. Благодаря этим свойствам лазерный луч может быть сфокусирован на очень маленькую поверхность материала и создать на ней плотность энергии, достаточную для нагревания и разрушения материала (например, порядка 10^8 Вт/см² для плавления металла).

Процесс взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым материалом можно разделить на следующие стадии:

- поглощение света и передача его энергии твердому телу;
- нагрев материала без разрушения, включая и плавление;
- разрушение материала путем испарения и выброса его расплавленной части;
- остывание после окончания воздействия.

Лучше всего обрабатываются металлы с низкой теплопроводностью, так как в них энергия лазера концентрируется в меньшем объеме металла, и, наоборот, при лазерной резке металлов с высокой теплопроводностью может образоваться грат.

В зависимости от соотношения времени воздействия излучения и плотности мощности лазерного излучения могут иметь место различные эффекты взаимодействия излучения с металлической поверхностью. В соответствии с этим разработаны разные методы лазерной обработки материалов.

Лазерная резка – технология резки и раскроя материалов, использующая лазер высокой мощности. Сфокусированный лазерный луч, обычно управляемый компьютером, обеспечивает высокую концентрацию энергии и позволяет разрезать практически любые материалы, независимо от их теплофизических свойств. При этом можно получить узкие резы с минимальной зоной термического влияния.

Разделение материала лазером может быть выполнено тремя основными способами:

1. Резка. Производится полное удаление материала по линии разреза.

2. Скрайбирование. Производится частичное удаление материала, например, при образовании системы отверстий малого диаметра по линии разделения с последующим разломом. Этот способ используется для разделения керамических материалов, которые, вследствие низкой теплопроводности, склонны к перегреву и разрушению след-

ствии высоких термических напряжений, возникающих при непрерывной резке.

3. Термораскалывание. Этот способ используется для разделения хрупких материалов. При движении луча по поверхности нагрев вызывает напряжения, приводящие к образованию локальных трещин. Разделение материала производится разломом по линии действия источника теплоты.

Для лазерной резки металлов применяют технологические установки на основе твердотельных, волоконных и газовых CO_2 -лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах излучения. Для разных материалов применяют различные типы лазеров. Принципиальная схема устройства для лазерной резки металлов показана на рис. 2.7.

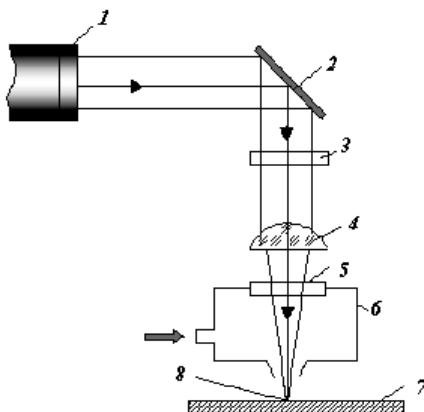


Рис. 2.7. Схема лазерной резки с подачей газовой струи в зону воздействия лазерного луча: 1 – лазер; 2 – зеркало; 3 – заслонка; 4 – линза; 5 – окно; 6 – камера; 7 – изделие; 8 – точка фокуса

На листовую заготовку через сопло резака подают сфокусированное лазерное излучение с заданным фокусным расстоянием и поток газа. Большинство выпускаемых лазерных установок выполнено с летающей оптикой или подвижным лазерным лучом. Разрезаемый материал остается при этом неподвижным, а лазерный луч перемещается по нему, осуществляя программируемые резы (рис. 2.8)

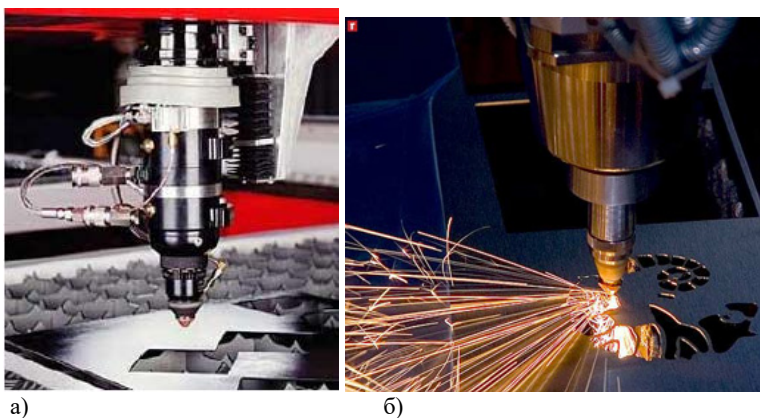


Рис. 2.8. Головка для лазерной резки (а) и процесс лазерной резки (б)

Возможны два механизма лазерной резки: 1) плавление, 2) испарение. Однако второй механизм требует значительно более высоких энергозатрат и практически осуществим только для тонкого металла. На практике лазерную резку выполняют плавлением. При этом, в целях существенного сокращения затрат энергии, повышения толщины обрабатываемого металла и скорости разрезания применяется вспомогательный газ, вдуваемый в зону реза для удаления продуктов разрушения металла. Обычно в качестве вспомогательного газа используется кислород, воздух, инертный газ или азот. Такая резка называется газолазерной.

В зависимости от свойств разрезаемого металла применяются два механизма газолазерной резки: 1) с горением материала, 2) без горения. В первом случае в общий тепловой баланс значительный вклад вносит теплота реакции горения металла. Такой механизм резки обычно используется для материалов, подверженных воспламенению и горению ниже точки плавления и образующих жидкотекучие оксиды – низкоуглеродистая сталь и титан.

При втором механизме резки материал не горит, а плавится, и струя газа удаляет жидкий металл из области реза. Данный механизм применяется для металлов и сплавов с низким тепловым эффектом реакции горения, а также для тех, у которых при взаимодействии с кислородом образуются тугоплавкие оксиды – легированные и высокоуглеродистые стали, алюминий, медь и др.

Лазерная резка отличается отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал, возникают минимальные деформа-

ции, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания. Вследствие этого лазерную резку, даже легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей, можно осуществлять с высокой степенью точности. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением позволяет осуществлять лазерную резку по сложному контуру плоских и объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса.

Для повышения точности и качества формируемых отверстий используется многоимпульсная обработка материала. Она заключается в том, что отверстия получаются в результате воздействия серии коротких импульсов (0,1...0,2 мс), период следования которых значительно больше времени остывания материала. Положительный эффект при многоимпульсной обработке достигается за счет:

- повышения динамической прочности материала при укорочении времени термоудара;
- более равномерного, по отношению к непрерывной обработке, распределения остаточных напряжений по толщине материала.

При многоимпульсной обработке глубина отверстий достигает 1...5 мм и может быть в 25 раз больше диаметра.

Особенности лазерной резки различных материалов

Резку углеродистых сталей чаще всего выполняют с применением кислорода в качестве вспомогательного газа. В результате взаимодействия кислорода с металлом, нагретым лучом, протекает экзотермическая реакция окисления железа с выделением тепла в 3...5 раз больше, чем от самого лазерного излучения. Качество торцевой поверхности реза высокое. На нижней кромке реза характерно образование незначительного грата.

В ряде случаев, например, при вырезке деталей с острыми углами и отверстиями малого диаметра, вместо кислорода предпочтительно использование инертного газа при высоком давлении.

Лазерная резка нержавеющей стали, в особенности больших толщин, затруднена процессом зашлаковывания реза из-за присутствия в металле легирующих элементов, влияющих на температуру плавления металла и его оксидов. Так, возможно образование тугоплавких оксидов, препятствующих подводу лазерного излучения к обрабатываемому материалу. Усложняет процесс резки и низкая жидкотекучесть

расплавленных оксидов, например, свойственная для нержавеющей хромоникелевых и высокохромистых сталей.

Для получения качественного реза используется азот высокой чистоты, подаваемый при повышенном давлении (обычно до 20 атм).

Для лазерной резки алюминия и его сплавов, меди и латуни, требуется излучение более высокой мощности, что обусловлено следующими факторами:

- низкой поглотительной способностью (большим отражением) этих металлов по отношению к лазерному излучению, особенно углекислотного лазера, в связи с чем твердотельные лазеры более предпочтительны;

- высокой теплопроводностью этих материалов.

Обработка материалов малой толщины может выполняться в импульсном режиме работы лазера, что позволяет уменьшить зону термического воздействия, а больших толщин – в микроплазменном режиме. Плазмообразующими являются пары легко ионизируемых металлов – магния, цинка и др. Под действием лазерного луча в области реза образуется плазма, нагревающая металл до температуры плавления и плавящая его.

При лазерной резке алюминия применяется вспомогательный газ с давлением более 10 атм. Структура торцевой поверхности реза – пористая, с легко удаляемым гратом на нижней кромке реза. С повышением толщины металла качество торцевой поверхности реза ухудшается.

При резке латуни торцевая поверхность реза обладает пористой шероховатой структурой с легко удаляемым гратом в нижней части реза. С возрастанием толщины металла качество торцевой поверхности реза ухудшается.

С помощью углекислотных лазеров возможна обработка различных неметаллических материалов: фанеры, дерева, ДВП, ДСП, пластика, оргстекла, полиэфирного и акрилового стекла, ламината, линолеума, резины, ткани, кожи, асбеста, картона и других.

Невозможен или крайне сложен раскрой лазером таких материалов как текстолит, стеклотекстолит, гетинакс, сотовый полипропилен, поликарбонат, сотовый поликарбонат. Затруднено разрезание материалов, склонных к растрескиванию, например, керамики или стекла. Здесь применяется скрайбирование или термоскальвание.

Для разрезания черных металлов в основном требуется мощность лазера от 450...500 Вт и выше, для цветных металлов – от 1кВт и выше.

Толщина разрезаемых листов:

- сталь – от 0,2 мм до 20 мм;
- нержавеющая сталь – от 0,2 мм до 12 мм;
- алюминиевые сплавы – от 0,2 мм до 20 мм;
- латунь – от 0,2 мм до 12 мм;
- медь – от 0,2 мм до 15 мм.

При лазерной резке на тонколистовом материале не остается окалины. Кромки реза у листов толщиной 6 мм и меньше остаются гладкими и прямолинейными, а у листов большей толщины кромки имеют некоторые отклонения со скосом примерно 0,5°.

Преимущества и недостатки лазерной резки

Основными преимуществами лазерной резки являются:

- высокая скорость обработки;
 - малая зона термического влияния;
 - высокая точность;
 - низкий уровень шума;
 - малое количество грата, не требующее окончательной механической обработки;
 - малый расход вспомогательных газов;
 - возможность резки широкого круга различных материалов;
 - возможность выполнения резки и маркировки на одном и том же оборудовании;
 - возможность выполнения V и Y-образных резов для подготовки кромок заготовок под сварку;
 - возможность выполнения отверстий малого диаметра;
 - возможность изменения угла резки при обработке гнутых деталей и центровки крупногабаритных листов;
 - быстрая переналаживаемость на выпуск других изделий.
- Лазерная резка характеризуется следующими параметрами:

- почти полное отсутствие окалины;
- конусность менее 1°;
- получаемые отверстия круглые и чистые;
- возможно получение небольших деталей;
- ширина реза составляет 0,2...0,375 мм;

- прижоги незначительны;
- зона термического влияния до 0,05 мм.

Сфокусированное лазерное излучение позволяет разрезать почти любые материалы, независимо от их теплофизических свойств. При этом можно получать качественные и узкие резы (шириной 0,1...1 мм) со сравнительно небольшой зоной термического влияния. При лазерной резке возникают минимальные деформации, как временные в процессе обработки заготовки, так и остаточные, после ее полного остывания. В результате возможна резка с высокой степенью точности, в том числе нежестких и легкодеформируемых изделий. Благодаря относительно несложному управлению лазерным пучком можно выполнять автоматическую обработку плоских и объемных деталей по сложному контуру.

Лазерная резка особенно эффективна для стали толщиной до 6 мм, обеспечивая высокое качество и точность при сравнительно большой скорости разрезания. Однако для металла толщиной 20...40 мм она применяется значительно реже, а для металла толщиной свыше 40 мм – практически не используется.

Существенным недостатком лазерной резки является низкий КПД самого лазера, что не позволяет обрабатывать листы толщиной более 20 мм. Кроме того, возникают сложности при обработке материалов с высокой отражающей способностью. Таких, как алюминий и алюминиевые сплавы.

2.4 Электронно-лучевая резка

Электронно-лучевая обработка основана на использовании энергии потока направленных электронов для нагрева, плавления и испарения материала в зоне обработки. Плотность тепловой энергии при этом составляет до $10^6 \dots 10^7$ Вт/см², а диаметры электронных пучков 0,5...500 мкм. Высокая плотность энергии сфокусированного электронного луча позволяет осуществлять размерную обработку детали вследствие расплавления и испарения материала с узлокального участка.

Для обработки материалов электронным лучом используются специальные установки, в которых электронными пушками формируются мощные направленные пучки электронов (рис. 2.9). Для уменьшения рассеяния пучка электронов обработку проводят в высоковакуумной камере (остаточное давление 10^{-5} мм рт.ст. или меньше).

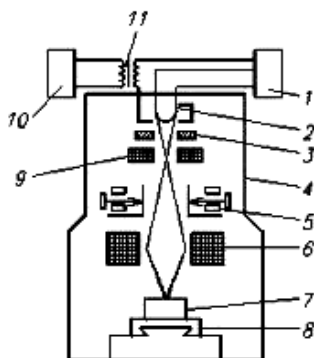


Рис. 2.9. Схема установки для электронно-лучевой резки: 1 – источник высокого напряжения; 2 – катод; 3 – анодная диафрагма; 4 – вакуумная камера; 5 – устройство электрической юстировки; 6, 9 – магнитные линзы; 7 – заготовка; 8 – координатный стол; 10 – импульсный генератор; 11 – трансформатор

Питаемый источником высокого напряжения вольфрамовый катод обеспечивает эмиссию свободных электронов, которые разгоняются электрическим полем, созданным между катодом и анодной диафрагмой. При напряжении до 50 кВ между анодом и катодом электроны ускоряются до скоростей около 75 % от скорости света в вакууме. Далее электронный луч проходит через систему магнитных линз, устройство электрической юстировки и фокусируется на поверхности обрабатываемой заготовки, установленной на координатном столе. Материал с заготовки удаляется сфокусированным пучком электронов, с большой скоростью налетающих на обрабатываемый участок. При этом их кинетическая энергия конвертируется в теплоту, которой достаточно для быстрого нагрева, плавления и испарения материала. Импульсный режим работы электронной пушки обеспечивается системой, состоящей из импульсного генератора и трансформатора.

Электронно-лучевая резка применяется при размерной микрообработке. Остросфокусированным пучком электронов можно получить минимальный диаметр отверстия 0,5 мкм, а максимальный с одного прохода – 0,2 мм. Производительность процесса при разрезании, заготовок достигает 1 мм³/мин, точность обработки – 2...3 мкм, шероховатость поверхности соответствует 11-му классу.

При размерной обработке (резке) заготовок установка работает в импульсном режиме. Длительность импульсов $10^{-4} \dots 10^{-6}$ с, а частота – 50...6000 Гц. Это обеспечивает локальный нагрев заготовки. Продолжительность импульсов и интервалы между ними подбирают такими,

чтобы за один цикл успел нагреться и испариться металл только под лучом, а теплота не успела распространиться по объему заготовки. Благодаря этому, в зоне обработки температура достигает 6000 °С, а на расстоянии 1 мкм от кромки луча не более 300 °С.

Возможность сканирования электронного луча позволяет использовать этот вид обработки для изготовления фасонных щелей и пазов в труднообрабатываемых материалах (рубин, керамика, кварц, тантал, цирконий, вольфрам и др.). Наиболее перспективно применение электронно-лучевой обработки в области технологии радио- и микроэлектроники. Размерная обработка используется при резке и прошивании полупроводниковых материалов, изготовлении элементов пленочных и полупроводниковых интегральных схем, обработке ферритовых элементов памяти и т.д.

Электронно-лучевой метод наиболее эффективен при обработке отверстий диаметром от 1 мм до 10 мкм, прорезании пазов, резке заготовок, изготовлении тонких пленок и сеток из фольги и т.д. Обработке подвергаются заготовки из труднообрабатываемых металлов и сплавов (тантала, вольфрама, циркония, нержавеющей стали), а также неметаллических материалов: рубинов, керамики, кварца.

Этим методом можно получить отверстия диаметром 1...10 мкм, прорезать пазы, резать металл, изготавливать тонкие сетки из фольги и др. Точность обработки находится в пределах 5...20 мкм.

Высокая плотность пучковой мощности позволяет выполнять отверстия с большим отношением глубины к диаметру, часто вплоть до 15:1. Например, отверстия диаметром 0,1...1,4 мм могут быть просверлены в материале толщиной до 10 мм. Поскольку к заготовке не приложены никакие механические силы, хрупкие и ломкие материалы могут быть обработаны без разрушения. Отверстия могут формироваться под углом до 20° к обрабатываемой поверхности. Обычно минимальное расстояние между ними равно двум диаметрам, однако даже с этим ограничением можно делать до 3000 отверстий на квадратном сантиметре поверхности. Производительность процесса невысокая: на черновых режимах – 20 мм³/мин, на чистовых – 1 мм³/мин; точность обработки 5...20 мкм; параметр шероховатости поверхности Ra = 3,2..0,8 мкм.

Основные преимущества электронно-лучевой резки: возможность широкого регулирования режимов и тонкого управления тепловыми процессами; пригодность для обработки металлических и неметалли-

ческих материалов; высокий коэффициент полезного действия (до 98%); возможность автоматизации процесса.

К недостаткам электронно-лучевой резки следует отнести сложность технологических установок, высокую их стоимость и необходимость проведения работ в условиях глубокого вакуума. Неизбежное появление жесткого рентгеновского излучения требует использования специальных средств защиты и соблюдения строгих мер предосторожности.

Одним из направлений повышения эффективности электронно-лучевой обработки является использование установок, обеспечивающих выход электронного луча в атмосферу, в частности, через «плазменное окно». Схема такой установки приведена на рис. 2.10. Поскольку отсутствует имеющая значительный объем вакуумная рабочая камера, возникает возможность создания компактных устройств, которые, аналогично лазерным головкам, могут устанавливаться на оборудовании с ЧПУ. Поскольку нет необходимости создания вакуума в рабочей камере, существенно сокращается время подготовки к обработке.

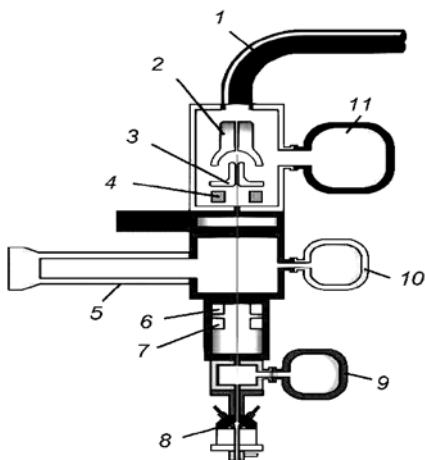


Рис. 2.10. Схема электронно-лучевой установки с плазменным окном:

- 1 – высоковольтный кабель; 2 – электронная пушка; 3 – анод; 4 – корректирующая система; 5 – система наблюдения (микроскоп); 6 – фокусирующая система;
- 7 – отклоняющая система; 8 – плазменное окно; 9 – форвакуумный насос первой ступени; 10 – форвакуумный насос второй ступени; 11 – турбомолекулярный (диффузионный) насос

При определенных условиях плазменный разряд может использоваться в качестве барьера, препятствуя проникновению атмосферной среды в электронную пушку и обеспечивая свободное прохождение электронного луча, ионов или других частиц. Схема «плазменного окна» показана на рис. 2.11.

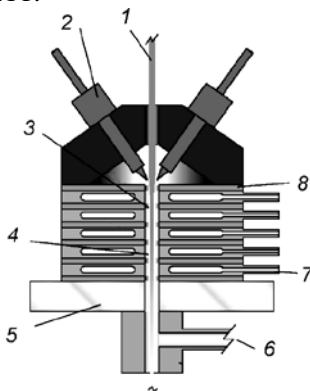


Рис. 2.11. Конструкция «плазменного окна»:

- 1 – электронный луч; 2 – система катодов; 3 – зона «горячей» плазмы;
- 4 – зона «холодной» плазмы; 5 – анод; 6 – подача плазмообразующего газа;
- 7 – медные охлаждаемые пластины; 8 – изоляционные пластины

Плазма удерживается в узком пространстве электрическими и магнитными полями, при этом устраняется ее контакт со стенками канала. Температура в зоне «горячей» плазмы составляет порядка 15000°С. Стенки канала охлаждаются водой.

С физической точки зрения эффект барьера обусловлен тем, что увеличение температуры в канале приводит к уменьшению плотности среды (количества молекул в единице объема). В результате атмосферная среда будет выталкиваться из «плазменного окна». Плотность среды при температуре 15000°С, характерной для условий работы «плазменного окна» будет в 40 раз ниже, чем в атмосфере.

Использование технологии «плазменного окна» позволит существенно расширить технологические возможности электронно-лучевой обработки. В частности, становится возможным выполнение процессов резки с удалением расплавленного металла потоком газа, как при лазерной резке. Энергетически электронный луч на 80...90 % более эффективен, чем лазерный. Следует отметить, что путь луча в атмосфере до обрабатываемой поверхности не должен превышать 200...300 мм.

3. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Повышение надежности и долговечности машин можно обеспечить не только разработкой современных конструкционных решений и применением новых высокопрочных материалов, но и путем изменений состояния поверхностного слоя деталей машин.

Методы поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей машин подразделяются на пять основных классов.

1. Упрочнение с созданием пленки на поверхности (электролитическое осаждение, осаждение из паров или при химической реакции).

2. Упрочнение с изменением химического состава поверхностного слоя металла (диффузионное насыщение, химическое и физико-химическое воздействие).

3. Упрочнение с изменением структуры поверхностного слоя (физико-термическая и электрофизическая обработка, механическая обработка и наплавка легированным элементом).

4. Упрочнение с изменением энергетического запаса поверхностного слоя (обработка в магнитном и электрическом поле, импульсными токами).

5. Упрочнение с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом (пластическое деформирование и комбинированные методы).

Составной частью этих методов являются методы высокоэнергетического воздействия. Это операции обработки поверхности деталей, основанные на использовании:

- 1) импульсного энергетического воздействия;
- 2) концентрированных потоков частиц или излучения.

К первой группе относятся:

- а) упрочнение взрывом;
- б) магнитно-импульсная обработка.

Ко второй группе относятся:

- а) лазерное упрочнение;
- б) электронно-лучевая обработка
- в) детонационное и плазменное поверхностное упрочнение деталей.

3.1 Импульсные методы поверхностного энергетического воздействия

3.1.1 Упрочнение взрывом

Одним из перспективных способов деформационного упрочнения является воздействие на металлы и сплавы ударных волн, реализующихся при взрыве бризантных взрывчатых веществ. Эффект упрочнения обусловлен тем, что, в результате взрывного нагружения, в металле повышается плотность дефектов кристаллического строения в основном дислокаций.

Взрывное упрочнение обычно осуществляется детонацией тонкого слоя пластического ВВ в контакте с поверхностью упрочняемого металла. По упрочняемому металлу распространяется ударная волна, которая производит изменение структуры металла. В результате повышается твердость: как на поверхности металла, так и внутри его, возрастают пределы текучести и прочности; деталь оказывает большее сопротивление износу особенно при ударной нагрузке.

В промышленных масштабах упрочнение обычно осуществляется ударными волнами, образующимися при скользящей детонации тонких слоев пластичных или эластичных ВВ, плотно контактирующих с упрочняемой деталью – бегущая волна (рис. 3.1, б). Плотность таких ВВ составляет $1,5...1,6 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $7...8 \text{ км/с}$, достигаемые в ударных волнах давления (в сталях) $15...20 \text{ ГПа}$.

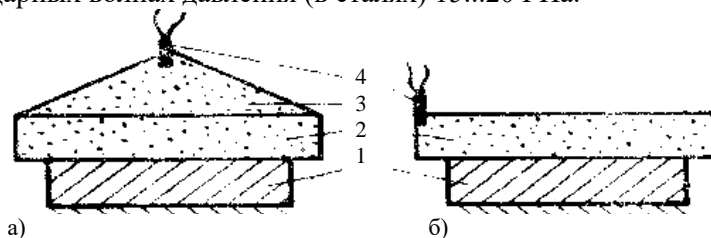


Рис. 3.1. Схемы упрочнения металлов ударными волнами при контактном взрыве: а – плоской волной; б – бегущей волной: 1 – упрочняемый образец; 2 – заряд ВВ; 3 – генератор плоской волны; 4 – детонатор

Для увеличения давления используют более сложную схему нагружения падающей детонационной волной (рис. 3.1, а). При нормальном отражении детонационной волны от границы раздела давление в ударной волне в стали достигает $35...40 \text{ ГПа}$.

Преимущество первой схемы в том, что здесь не требуется применение специального устройства – генератора плоской волны, и возможна обработка протяженных деталей большой площади. В силу этого, нагружение плоской волной используется в основном в исследовательских целях, а обработка бегущей волной применяется в промышленности.

Упрочнение распространяется на некоторую глубину (рис. 3.2). Глубина упрочненного слоя зависит от толщины слоя ВВ.

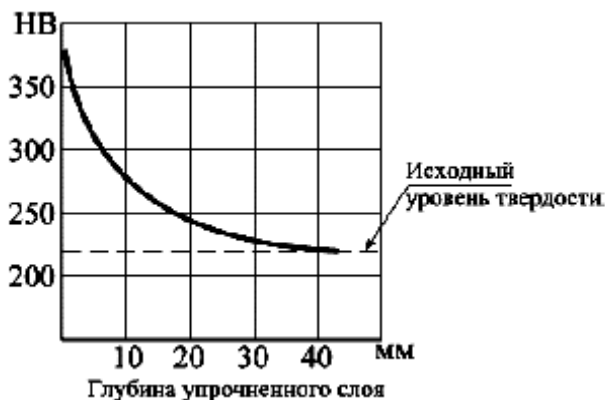


Рис. 3.2. Распределение твердости по глубине упрочненной взрывом пластины из марганцевой стали

Ударно-волновое нагружение упрочняемой детали характеризуется следующими параметрами: давлением во фронте ударной волны формой ударно-волнового импульса, определяемой длительностью и крутизной импульса сжатия; величиной деформации во фронте ударной волны. На эффект упрочнения существенное влияние оказывает также остаточная деформация, зависящая от способа и интенсивности нагружения.

Из большого разнообразия явлений, сопровождающих воздействие ударных волн на металлические материалы, практически важными являются изменение микроструктуры и механических свойств металлов. При правильном выборе параметров нагружения увеличиваются поверхностная твердость, износостойкость и прочность деталей из различных сталей, алюминиевых и титановых сплавов и других металлических материалов.

По отношению к воздействию ударных волн все металлы и сплавы условно можно разделить на две большие группы. В первую группу входят хорошо упрочняющиеся металлы и сплавы. К ним относятся отожженные металлы и однофазные сплавы: алюминий, медь, серебро, железо, ниобий, никель, латунь, стали аустенитного класса (1X18H10T, Г13Л). При взрывном нагружении их твердость возрастает в 1,5...2,5 раза. Во вторую группу входят материалы, которые при взрывном нагружении упрочняются незначительно или даже разупрочняются. К ним относятся гетерофазные сплавы с развитой (тонкой) мозаичной структурой, образованной в результате наклепа или термообработки. Твердость таких сплавов в исходном состоянии велика.

Механизмы упрочнения металлов и сплавов при взрывном нагружении сложны и многообразны. Величина упрочнения определяется количеством дефектов и искажений, остающихся в решетке после прохождения ударной волны. Взрывное нагружение приводит к формированию чрезвычайно мелких субзерен. Материалы с субмикрозернистой структурой (размер частиц 0,1...1,0 мкм), благодаря большой объемной доле межзеренных границ, приобретают повышенную прочность при сохранении пластичности.

Наибольшие результаты по взрывному упрочнению достигнуты для высокомарганцевистой стали Гадфильда Г13Л (сталь аустенитного класса с гранцентрированной решеткой), содержащей 13 % марганца. При давлении во фронте упрочняющей ударной волны 42 ГПа твердость и предел текучести возрастают примерно в три раза при сохранении пластичности – относительное удлинение остается на уровне 20%.

В меньшей степени взрывному упрочнению подвержены металлические материалы со структурой, насыщенной дефектами. Когда исходная структура мелкозернистая, разориентированных границ много, она устойчива к ударно-волновому нагружению, и упрочнить материал не удастся. Если же дислокации не организованы в блоки с разориентированными границами, то ударно-волновое нагружение преобразует структуру так, чтобы такие границы были созданы. При этом твердость материала несколько возрастает.

Взрывное упрочнение используется, например, применительно к марганцевым сталям, из которых изготавливают крестовины железнодорожных стрелок, детали мельниц, ковши экскаваторов, дробильные

молоты и другие, подвергающиеся в процессе эксплуатации ударам, нарастающему износу.

В таблице приведены результаты взрывного упрочнения марганцевой стали.

Свойства марганцевой стали после взрывного упрочнения

Характеристика металла	До обработки	После упрочнения взрывом
Твердость, НВ	200	370
$\sigma_{0,2}$, кГ/мм ²	41	89
σ_B , кГ/мм ²	94	128

3.1.2 Магнитно-импульсная обработка материалов

Магнитно-импульсная обработка металлов характеризуется воздействием на материал нестационарных магнитных полей напряженностью до $(2...3) \cdot 10^7$ А/м и импульсных токов до $5 \cdot 10^5$ А и обусловленным этим магнитно-импульсным воздействием и импульсным нагревом металла. При магнитно-импульсной обработке проявляется эффект, связанный с концентрацией электромагнитного поля на дефектах структуры. Возникновение в зоне дефектов градиентов потенциала, температур и термоупругих сжимающих напряжений приводит к локализации или полному «залечиванию» микродефектов структуры. Импульсное магнитное поле проникает в материал детали на толщину скин-слоя, который зависит от частоты электромагнитных колебаний и электропроводности материала детали. Поэтому можно обеспечить изменение свойств только поверхностного слоя детали.

Импульс электромагнитного поля и связанный с ним импульс вихревого электрического тока определенной величины, оказывает существенное влияние на механические свойства материалов, имеющих внутренние изменения структуры.

За счет эффекта электроимпульсного воздействия предел прочности титановых и алюминиевых сплавов возрастает на 8...15% без снижения пластических свойств. Усталостная прочность образцов из алюминиевых сплавов после магнитно-импульсной обработки увеличивается в 1,6...2,6 раза.

Импульсное воздействие электромагнитного поля формирует в материале мелкозернистую структуру, определяемую аномальными процессами рекристаллизации. Движущими силами здесь являются локально неоднородные выделения энергии электромагнитного поля на дефектах структуры,

Магнитно-импульсная обработка является эффективным методом упрочнения сварных соединений. При воздействии импульсных магнитных полей в результате рекристаллизации происходит локальное изменение структуры как околошовной зоны, так и самого шва, что приводит к снятию внутренних напряжений в сварном соединении. Главное воздействие на металл оказывает высокая тепловая энергия, возникающая при обработке электромагнитным полем, вызывающая диффузионную подвижность легирующих элементов, дислокаций, подвижность отдельных блоков, что приводит к снятию внутренних остаточных напряжений, микронапряжений.

Усталостная прочность сварных швов после воздействия ИМП увеличивается на 60...80%, в основном за счет «залечивания» зародышевых трещин. В зоне термического влияния происходит измельчение зерна приблизительно в два раза и переход растягивающих напряжений в сжимающие.

Импульсное воздействие магнитного поля приводит к принципиальному изменению структуры поверхности металла без изменения чистоты и геометрии этой поверхности. В поверхностных слоях сталей образуется структура типа «белого слоя» с высокой микротвердостью и износостойкостью, а также наблюдаются структурные изменения типа дробления блоков структуры. Структура металла становится более дисперсной и однородной.

3.2 Поверхностное упрочнение концентрированными потоками частиц и излучения

3.2.1 Лазерное упрочнение

Лазерное упрочнение основано на комплексе физико-химических явлений, которые имеют место при воздействии лазерного луча. Лазерное действие на материал, как правило, многофакторный процесс и лазерным упрочнением достигают получения различных результатов:

- лазерная термическая обработка (закалка, отжиг, отпуск);
- глазурирование (оплавление для получения остеклованной поверхности);
- поверхностное легирование;
- наплавка (восстановление изношенных деталей);
- плакирование.

Ударное воздействие лазерного излучения может быть использовано для упрочнения поверхности (метод поверхностной пластической деформации) и для инициирования поверхностных физико-химических процессов.

Основой процесса лазерного упрочнения является быстрый нагрев до высокой температуры (температуры плавления) поверхностного слоя металла с последующим быстрым охлаждением путем отвода тепла в основной объем металла, который остается практически холодным.

Поверхностную обработку отдельных элементов детали можно сделать лазерной термообработкой, которая может проводиться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Чаще всего используют обработку без оплавления с сохранением исходной шероховатости $R_a = 0,16 \dots 1,25$ мкм. Глубина упрочняемого слоя металла определяется величиной допустимого линейного износа.

Возможна обработка *перекрывающимися* и *неперекрывающимися* дорожками. При наложении дорожки упрочнения происходит частичный нагрев предыдущей упрочненной зоны, что может привести к отпуску и снижению твердости. При обработке *неперекрывающимися* дорожками зазор между ними составляет 10 – 30% от площади обрабатываемой поверхности, происходит уменьшение износа в 2-3 раза.

Для поверхностного упрочнения металла предпочтительнее применять твердотельные Nd-лазеры.

Лазерная закалка

Термическое упрочнение лазерным излучением металлов и сплавов лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка со сверхкритической скоростью, в результате теплоотвода теплоты во внутренние слои металла. Процесс лазерной закалки является поверхностным.

В основе лазерной обработки лежат структурные и фазовые изменения в материале, возникающие вследствие сверхвысоких скоростей его нагрева и последующего охлаждения в условиях лазерного облучения. Время нагрева и время охлаждения незначительны, практически отсутствует выдержка при температуре нагрева. Эти условия обеспечивают высокие скорости нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностных участков. Вследствие указанных особенностей,

формирование структуры при лазерной закалке имеет свои специфические особенности.

Для получения мартенсита в сплавах железа в интервале минимальной устойчивости аустенита (400...600 °С) должна быть обеспечена скорость охлаждения выше критической. Для большинства сплавов железа она находится в интервале 50... 200 К/с. Многократное увеличение скорости охлаждения не приводит к формированию новых фаз и структур. При лазерной термообработке в стали наблюдаются те же фазы и структуры, что и при обычной закалке: мартенсит, цементит (карбиды), остаточный аустенит. Однако высокая скорость охлаждения приводит к тому, что после охлаждения получается высокая неоднородность структуры, что связано с неомогенностью исходного аустенита. Кроме того, большая скорость охлаждения приводит к повышенной дефектности структуры, так как усиливается фазовый наклеп, замедляются процессы отжига и рекристаллизации. При этом происходит измельчение блоков, увеличение плотности дислокаций и рост напряжений в кристаллической решетке. Все эти особенности приводят к дополнительному упрочнению материала, вследствие чего микротвердость сплавов после лазерной закалки выше, чем после обычных видов закалки.

Основной целью лазерного термоупрочнения сталей, чугунов и цветных сплавов является повышение износостойкости деталей, работающих в условиях трения. В результате лазерной закалки достигаются: высокая твердость поверхности, высокая дисперсность структуры, уменьшение коэффициента трения, увеличение несущей способности поверхностных слоев ?? и другие параметры.

Заметно увеличивается износостойкость чугунов и алюминиевых сплавов в условиях трения скольжения после обработки непрерывным лазером. Повышение износостойкости чугунов после лазерной обработки обусловлено не только соответствующим структурным и фазовым составом, но и улучшением условий трения благодаря сохранившемуся в зоне лазерного воздействия графиту. Также повышается износостойкость сталей и некоторых других сплавов при трении в щелочной и кислой средах.

Режимы лазерной закалки

Для упрочнения инструментов применяется лазерная закалка импульсным излучением. Эффективна обработка боковых поверхностей

вырубных пуансонов, так как в этом случае упрочненный слой сохраняется после многократных переточек. Стойкость пуансонов возрастает в 2,5 раз.

Более высокая производительность закалки обеспечивается лазерами непрерывного излучения при перемещении обрабатываемой детали относительно луча с постоянной скоростью. При этом на детали формируются закаленные поверхностные участки в виде полосы шириной от 1 до 10 мм. Максимальная глубина упрочнения при закалке сталей и чугунов без оплавления достигает 2,0 мм. При обработке с оплавлением это значение возрастает, но при этом ухудшается качество поверхности.

Закалка непрерывным лазером обеспечивает большую равномерность упрочнения поверхности по сравнению с импульсным воздействием, так как по длине упрочненной полосы твердость распределяется равномерно. При обработке больших поверхностей упрочненные полосы накладывают с перекрытием. В ряде случаев для обеспечения износостойкости поверхности целесообразно накладывать полосы на некотором расстоянии друг от друга без перекрытия.

Последующее выравнивание свойств упрочненной полосы и увеличение ее ширины до 20 мм достигается сканированием лазерного луча в поперечном направлении по отношению к перемещению обрабатываемой детали. При высокой частоте сканирования (200 Гц и более) обеспечивается равномерное воздействие лазерного излучения по ширине обрабатываемого участка.

Лазерная термическая обработка (ЛТО) проводится при удельной мощности $10^3\text{--}5\cdot 10^4$ Вт/см² и времени воздействия на поверхность 10^{-1} с.

Процессы лазерной термической обработки определяются взаимодействием лазерного облучения с материалом, которое зависит от оптических и теплофизических свойств обрабатываемых материалов: коэффициента отражения поверхности, теплопроводности, температур плавления и испарения и т.д.

Для лазерной обработки используют технологические лазеры импульсного и непрерывного действия. Особенностью лазерного упрочнения является его локальность. При импульсном излучении воздействие осуществляется в точке, при непрерывном – в полосе шириной до 3 мм. В связи с этим для обработки поверхности необходимо и достаточно сканировать луч с взаимным перекрытием или без перекрытия зон упрочнения.

При обработке импульсными лазерами с повышением плотности мощности увеличиваются диаметр и глубина зоны упрочнения. Лазеры непрерывного излучения обеспечивают более высокую производительность обработки, высокую равномерность упрочнения и позволяют обрабатывать любой профиль поверхности со скоростью от 100 до 10000 мм/мин.

Глубина и ширина зоны термического воздействия при постоянной скорости обработки непрерывными лазерами зависят от плотности мощности излучения, с ростом которой увеличивается глубина зоны термического воздействия, а ширина уменьшается. При постоянной плотности мощности с увеличением скорости перемещения деталей уменьшаются как ширина, так и глубина зоны термического воздействия, так как уменьшается удельная энергия излучения в зоне лазерного воздействия.

Глубина упрочненного слоя на CO₂-лазере составляет от 0,3 до 0,1 мм, а на импульсном лазере – 0,1...0,15 мм.

Механизм лазерной термической обработки представляет собой фазовое превращение материала после скоростного нагрева до температур выше температур фазовой перекристаллизации с последующим быстрым охлаждением обработанной зоны. Скорость охлаждения при температуре нагрева ниже температуры плавления составляет $(5...10) \cdot 10^3$ °C/с, при кристаллизации из жидкого слоя -10^6 °C/с.

Упрочненная зона может состоять из трех или двух слоев. Между оплавленным слоем и следующей за ним зоной термического влияния существует четкая граница. Зона термического влияния состоит из белого и переходного слоев. Белый слой представляет собой светлую нетравящуюся полосу, так как имеет высокую концентрацию азота за счет высокотемпературного насыщения азотом воздуха. Вследствие высокой скорости охлаждения эта зона имеет закаленную структуру, строение которой зависит от концентрации углерода. В закаленном слое технически чистого железа происходит измельчение зерна феррита, а в отдельных зернах образуется пакетный мартенсит с развитой блочной структурой, имеющей невысокую твердость. Второй слой зоны термического влияния является переходным к исходной структуре.

Электронно-микроскопическим анализом установлено повышение плотности дислокаций в зоне термического влияния. При плотности мощности $1,6 \cdot 10^4$ Вт/см² плотность дислокации достигает 10^9 см⁻², при

плотности мощности $2,7 \cdot 10^4$ Вт/см² плотность дислокаций возрастает до 10^{10} см⁻².

Лазерная термическая обработка позволяет повысить твердость и износостойкость упрочняемых материалов. Твердость зависит от концентрации углерода и легирующих элементов в стали. Методом лазерной термической обработки хорошо упрочняют средне- и высоколегированные углеродистые и инструментальные стали. Стали с низким содержанием углерода и высокопрочные низколегированные стали, при лазерной термической обработке, упрочняются плохо. Лазерная термическая обработка практически не влияет на предел прочности и предел текучести сталей.

Термоупрочнение с помощью CO₂-лазеров

Эта технология имеет ряд существенных недостатков для термоупрочнения. Первым из них является то, что длина волны данного лазера находится в инфракрасной области (10,6 мкм). Длинноволновый свет плохо поглощается практически любыми видами сталей или других металлов, следовательно, для эффективного использования мощности лазера необходимо наносить дополнительное покрытие, которое позволяет увеличить процент поглощенной мощности. Вторым существенным недостатком является то, что общее КПД данного вида лазера очень низкое. Большое потребление энергии приводит к большим эксплуатационным расходам.

Термоупрочнение с помощью диодных лазеров

Лазерные диоды – это полупроводниковые приборы, которые непосредственно преобразуют электрическую энергию в лазерный луч. Длина волны данного типа лазера составляет от 808 нм до 980 нм. Мощность отдельных полупроводниковых лазеров не превосходит несколько ватт, однако излучатели могут быть изготовлены на одной подложке, другими словами собирается линейка полупроводниковых лазеров, тем самым увеличивая выходную мощность до нескольких киловатт. Максимальная эффективность преобразования входной электрической энергии в свет линеек лазерных диодов составляет около 59%, что во много раз выше, чем для любого другого типа лазера, и примерно в три-четыре раза выше, чем у CO₂ лазера.

Физико-химические процессы при лазерной закалке

Основное назначение лазерного поверхностного упрочнения непрерывным излучением заключается в обеспечении высокой износостойкости, прежде всего при трении качения и скольжения. В ряде случаев лазерное термоупрочнение приводит к повышению теплоустойкости.

В сплавах железа с углеродом искаженность кристаллической решетки и плотность дислокаций при лазерном термоупрочнении оказываются больше, чем при традиционной закалке. При нагреве чугунов, углеродистых и легированных сталей до 300°С, термоупрочненных лазерным излучением, возможно превращение остаточного аустенита в мартенсит. Большая пересыщенность твердых растворов после лазерной закалки, особенно в зоне оплавления, может приводить к выделению в процессе последующего нагрева большого количества сегрегации и промежуточных фаз, что приводит к увеличению твердости.

Лазерная закалка непрерывным излучением без оплавления поверхностей таких сталей, как 09Г2, 35, 45, 40Х, 75Г, приводит к повышению предела выносливости до 520 МПа (в исходном состоянии 200...300 МПа). Коррозионная стойкость сплавов, как правило, возрастает при повышении однородности фазового состава. В связи с этим, лазерное термоупрочнение с оплавлением поверхностей некоторых сплавов, в частности чугунов, алюминиевых и медных сплавов, как и аморфизация поверхностей сплавов, приводит к повышению коррозионной стойкости зон обработки.

Лазерная химико-термическая обработка

В последние годы все более широкое применение получают процессы лазерного легирования, отличающиеся способом ввода в расплав легирующих компонентов. При лазерной химико-термической обработке на поверхность изделия предварительно наносят различными способами легирующие элементы:

- накатка фольги из легирующего материала;
- электролитическое или химическое осаждение;
- напыление;
- электроискровое легирование;
- нанесение порошков или обмазок.

Лазерная химико-термическая обработка осуществляется в режиме расплавления. Насыщение легирующими элементами происходит путем диффузии и массопереноса в твердой фазе, из плазмы и жидкой фазы.

С помощью лазера сравнительно легко осуществляется процесс азотирования и науглероживания поверхности изделий. Образующиеся новые фазы и соединения (карбиды, нитриды) обладают свойствами, позволяющими резко повысить твердость, а также износостойкость материалов. В результате такого легирования удастся повысить твердость и износостойкость в 2...3 раза.

Перспективным является легирование деталей из углеродистых сталей металлокерамической смесью или твердыми вольфрам-кобальтовыми сплавами. Достоинством способа лазерного легирования, несомненно, является возможность управления процессами, регулируя энергию, частоту следования импульсов и их длительность. Изменяя скорость перемещения и число проходов луча по поверхности, можно достаточно просто и точно изменять фазовый и химический состав поверхностных слоев, добываясь необходимых результатов.

Диффузионная металлизация железа возможна при легировании различными металлами. Повышение твердости достигается только при растворении ванадия, ниобия, титана и вольфрама.

Высокая износостойкость и кавитационная стойкость получены при лазерном азотировании из обмазок на стали 38Х2МЮА и 15ХМФ.

При лазерном борировании зона термического воздействия имеет твердость в зависимости от режима обработки HV 1100-2100. При упрочнении достигается высокое сопротивление изнашиванию при различных схемах приложения нагрузки и различных условиях трения. Легирование бором снижает коэффициент трения материала, повышает его износостойкость.

3.2.2 Электронно-лучевая поверхностная обработка

В основе электронно-лучевой обработки металлических материалов лежит взаимодействие электронного луча с поверхностью упрочняемого изделия. Электронный луч является потоком ускоренных в электрическом поле заряженных частиц – электронов. Здесь обработка поверхности производится мощным электронным пучком в вакуумной среде. При этом необходима защита оператора от рентгеновского из-

лучения, что препятствует широкому массовому распространению такого упрочнения.

При попадании на материал значительная часть кинетической энергии электронного луча превращается в тепло в тонком приповерхностном слое. Для сплавов на основе железа доля энергии падающего луча, превращающейся в тепло в тонком слое изделия при вертикальном падении луча, составляет почти 75%. Остальные 25% теряются в основном с отраженными электронами, при рентгеновском и тепловом излучении, и с вторичными электронами. Толщину слоя, в котором происходит выделение энергии можно подсчитать по формуле

$$h = 2,1 \cdot 10^{-12} U/\rho,$$

где h – толщина слоя, см; U – ускоряющее напряжение, В; ρ – плотность материала, г/см³.

Для сталей при ускоряющем напряжении 60 кВ глубина слоя составляет 10 мкм, при 200 кВ – 57 мкм, при 5 МВ – 2,8 мм, при 10 МВ – 5,7 мм. Металл, расположенный под поглощающим слоем, нагревается путем передачи тепла теплопроводностью. После прекращения действия электронного источника, нагретые участки быстро охлаждаются отводом тепла в холодную сердцевину изделия

Применение электронных потоков для модифицирования поверхности, термоупрочнения поверхностного слоя заготовок металлов, сплавов и композиционных материалов можно разделить на две большие группы:

- процессы, проводящиеся с материалами в твердом состоянии;
- при расплавлении поверхности деталей.

Второе направление технологических процессов обладает более широкими возможностями, поскольку в расплавленный металл могут быть введены растворимые или нерастворимые добавки. Электронно-лучевое поверхностное легирование производится аналогично лазерному. Легирование производится в вакууме. Электронный луч сравнительно глубоко проникает в поверхностный слой и при оптимальных режимах обработки газодинамические силы незначительны. Это позволяет достигать высокого качества легированного слоя. Процессы электронно-лучевого легирования производятся в вакуумных камерах, что является дополнительным фактором получения высококачественного легированного слоя. Это, однако, является и недостатком процесса, поскольку увеличивается трудоемкость обработки. Кроме того, затруднена обработка деталей сложной формы с труднодоступными поверхностями.

Основные схемы технологических процессов, обеспечиваемых электронно-лучевой обработкой

1. Оплавление и последующее затвердевание с небольшими скоростями передвижения фронта фазовых превращений, осуществляется с целью рафинирования металла у поверхности заготовки от примесей и включений без дополнительного легирования материала, а также для устранения, заваривания поверхностных дефектов. Происходит формирование периодического рельефа на поверхности заготовки.

2. Закалка сплавов из твердого состояния со скоростями нагрева и охлаждения $\sim 10^2 \dots 10^4$ °C/с.

3. Поверхностное легирование путем введения в расплавленную металлическую основу растворяемых и нерастворяемых присадок, наплавка материала, обработка предварительно нанесенных на металл покрытий, нагрев слоев после ХТО.

4. Оплавление со сравнительно высокими скоростями плавления и кристаллизации ($\sim 10^2 \dots 10^5$ °C/с), обеспечивающими закалку сплавов из жидкого состояния, их гомогенизацию, уменьшение размера зерна.

5. Оплавление и затвердевание с высокими и сверхвысокими скоростями ($\sim 10^3 \dots 10^7$ °C/с), приводящие к аморфизации (стеклованию) тонкого приповерхностного слоя материала.

6. Ударное упрочнение с еще более высокими скоростями за промежутки времени $10^{-6} \dots 10^{-8}$ с. Глубинное упрочнение материала происходит из-за действия распространяющихся в виде ударной волны упругих колебаний.

Преимущества по сравнению с лазерной обработкой:

- более высокий КПД;
- более высокая мощность;
- меньшая стоимость.

3.2.3. Плазменное поверхностное упрочнение деталей

Плазменное поверхностное упрочнение находит широкое применение как в условиях мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства. Сущность его заключается в термических фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменной струей (дугой) и теплоотводе в материал детали.

Эти методы относятся к газотермическим методам, действие которых основано на полном или частичном нагреве материала покрытия до состояния плавления и распылении его плазменной струей. Напыляемый материал может быть в виде проволоки или порошка.

В зоне плазменной струи достигаются температуры достаточные для плавления любых материалов. При использовании порошков количество материалов, используемых для покрытий, не ограничено. Плазмотрон (рис. 3.3) объединяет катод (электрод) и анод (водоохлаждаемое сопло) отделенные друг от друга небольшой камерой. При подаче постоянного тока между анодом и катодом образуется электрическая дуга. В это время через камеру подается поток газа. В результате ионизации газовой среды возникает плазменная струя с температурой от 6000 до 16000°С. Вводимый покрывающий материал плавится и переносится струей на подложку.

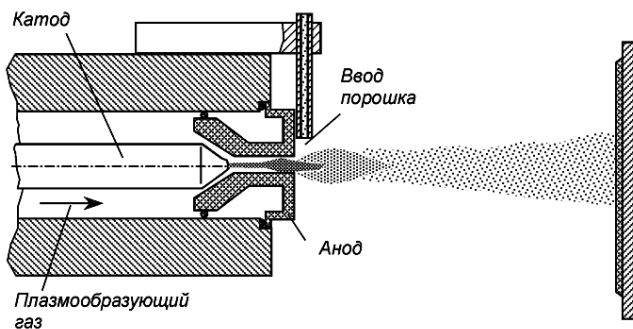


Рис. 3.3. Схема плазменного напыления покрытий

Особенностями и преимуществами этого процесса являются универсальность, высокая гибкость, большое количество наносимых материалов, неограниченная толщина покрытий, простота автоматизации, высокая производительность.

Плазменное нанесение покрытий имеет следующие особенности и преимущества:

- получение плотных и малоокисленных покрытий с высокой прочностью сцепления с основой;
- высокая производительность при нанесении как металлических, так и керамических материалов;

- высокий коэффициент использования: не менее 70 % – для металлов и 50 % – для оксидных керамик;
- сравнительно низкие эксплуатационные расходы, особенно при использовании сжатого воздуха вместо инертных газов;
- напыление производится в защитных кабинах фильтровентиляционной системой.

Плазменное напыление при низком давлении и вакуумное плазменное напыление используются для нанесения покрытий систем Me-Cr-Al-Y. Эти покрытия широко применяются для обеспечения жаростойкости компонентов газовых турбин авиационных двигателей и энергетических установок. Процессы выполняются в вакуумных камерах при давлении 40..60 мбар. Нанесение производится с помощью манипулятора расположенного внутри камеры и перемещающего детали относительно плазменной струи.

Преимуществами способов вакуумного напыления перед другими способами плазменного напыления являются:

- формирование плотных непористых покрытий (плотность покрытий выше, чем 98 %);
- отсутствие окисления;
- высокая прочность сцепления с подложкой;
- экологическая чистота процесса.

Особенностью этих методов упрочнения является возможность наносить тугоплавкие материалы на металлическую подложку без значительного ее нагрева (не более 150 °С), что исключает изменение свойств структуры поверхностного слоя. Можно наносить покрытия на окончательно термообработанные и упрочненные детали после финишной механической обработки.

Процесс плазменного напыления происходит в два этапа:

- 1) полет и распыление частиц напыляемого материала;
- 2) удар об обрабатываемую поверхность, соединение частиц с нею и между собой.

Образование покрытия происходит вследствие соударения частиц с поверхностью обрабатываемой детали, их сильного деформирования, расплющивания и разбрызгивания. В результате получаемое покрытие состоит как бы из чешуек напыляемого материала, соединенных между собой по контактной поверхности участками сваривания, поэтому прочность и плотность покрытия ниже прочности и плотности исходного материала.

Для повышения физико-механических свойств напыленного слоя и улучшения адгезии к подложке применяют дополнительную операцию оплавления. Сущность ее: напыленный слой нагревают до температуры, близкой к его плавлению. В результате нагрева между напыленным слоем и основным металлом протекает диффузионный процесс, и при остывании образуется плотное покрытие. Поры, остающиеся после напыления, заполняются расплавленной частью напыленного материала. После остывания получается равномерный тонкий однородный слой без пор. При этом охлаждение ведут вместе с печью.

Способы оплавления:

- плазменной или газовой горелкой;
- в электрической печи;
- в соляной ванне;
- ТВЧ.

Технологические варианты плазменного упрочнения деталей

Имеются следующие варианты плазменного поверхностного упрочнения:

- упрочнение без оплавления поверхности детали;
- упрочнение с оплавлением поверхности детали;
- упрочнение с зазором между упрочненными зонами;
- упрочнение с перекрытием упрочненных зон;
- химико-термическая плазменная обработка;
- плазменное упрочнение в сочетании с другими способами объемной или поверхностной термической обработки.

Плазменное упрочнение без оплавления поверхности является наиболее распространенным для стальных деталей, так как обеспечивает сохранение качества (величины шероховатости), достигнутого предшествующей механической обработкой.

Упрочнение с оплавлением поверхности стальных и чугуновых деталей применяется, когда необходимо получить особые эксплуатационные свойства. Например, обработка валков черновой группы клетей станов горячей прокатки, шероховатости рабочей поверхности которых не предъявляются высокие требования. При обработке чугуновых деталей на поверхности образуется отдельный слой с высокой износостойкостью.

Плазменное упрочнение поверхностей деталей без перекрытия зон обработки приводит к получению равномерной твердости на поверх-

ности, а с перекрытием зон обработки – к появлению неравномерной твердости из-за образования зон отпуска в местах перекрытия.

Возможность реализации химико-термической обработки при плазменной обработке определяется родом газа, используемого в качестве плазмообразующего, например азотирование. Здесь в качестве плазмообразующего газа применяется смесь аргона с азотом.

Возможно применение технологии комплексного упрочнения, включающей предварительную или последующую объемную термическую обработку и плазменное упрочнение; закалку в ТВЧ и плазменную обработку.

3.2.4. Детонационное нанесение покрытий

Технология детонационного нанесения покрытия относится к «холодным» газотермическим процессам и отличается от плазменного способа следующими особенностями:

- характерная величина адгезии составляет 120 МН/м^2 ;
- твердость поверхности до 1300 МН/м^2 .
- пористость керамического покрытия не выше 2%.

Процесс детонационного напыления. Ствол детонационной установки (рис. 3.4) заполняют взрывчатой газовой смесью. Затем в него подают порцию напыляемого материала и инициируют детонацию газовой смеси, например электрическим разрядом.

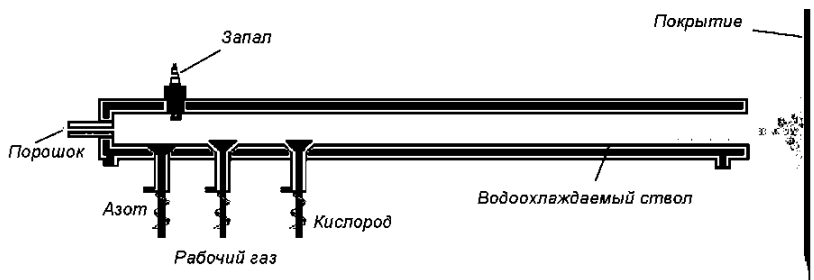


Рис. 3.4. Схема детонационного нанесения покрытий

У ацетиленокислородных смесей скорость детонации составляет $2000 \dots 3000 \text{ м/с}$. Температура нагрева газообразных продуктов составляет $3000 \dots 3500 \text{ }^\circ\text{C}$, а давление до 200 МПа . Частицы порошка разогреваются в продуктах детонации и получают большую кинетическую

энергию. Скорость движения частиц напыляемого порошка составляет 600...1000 м/с, что в 4...7 раз больше, чем при плазменном методе напыления. Чем больше скорость соударения частиц, тем выше прочность наносимого покрытия.

Продолжительность динамического и теплового воздействия газового потока на порошок обычно не превышает 3 мс, а время ударной деформации частиц напыляемого материала в момент формирования покрытия не превышает 0,1 мкс. Вследствие термического и ударного взаимодействия частиц с подложкой, происходит закрепление на ней основной массы порошка, т.е. формируется слой детонационного покрытия.

При детонационном напылении механизм формирования покрытий определяется пластической деформацией частиц порошка и детали в зоне соударения, где происходит локальное повышение активности основы под действием давления от удара твердых частиц, вызывающего упругие искажения решетки и пластическую деформацию. Это приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с основным металлом. Детонационные покрытия отличаются высокой плотностью и прочностью связи, достигающей прочности монолитного материала.

Импульсный характер термического воздействия на обрабатываемую деталь при детонационном напылении исключает коробление, поводки, перегрев детали и нежелательные структурные изменения материала детали.

За один выстрел образуется пятно покрытия диаметром несколько сантиметров толщиной до 10 мкм. Необходимая большая толщина наращивается серией последовательных выстрелов. Большие поверхности обрабатываются путем сканирования с помощью специализированного манипулятора. После каждого выстрела ствол аппарата продувают азотом для удаления продуктов сгорания.

Детонационное нанесение покрытий позволяет получать твердые, жаропрочные, коррозионностойкие и износостойкие покрытия толщиной от 10 мкм до нескольких миллиметров на поверхностях из различных материалов. В том числе на тонкостенных изделиях из черных и цветных металлов, реактопластов, керамики, стекла и др. без их деформации и термического разрушения.

Детонационным способом наносят покрытия из:

– металлов (Fe, Ni, Cr, Al, Mo, Co, Cu, Ti, W и др.);

- сплавов на их основе, в том числе самофлюсующихся (NiCrBSi, NiBSi, CoNiCrBSi);
- керамики (оксидов Al₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃, ZrO₂ и их композиции);
- твердых сплавов (на основе карбидов W, Cr, Ti и др. с применением в качестве связки 8...30% кобальта, никеля или хрома);
- металлокерамики (карбиды, нитриды, бориды, силициды переходных металлов);
- сверхтвердых материалов, включая алмазосодержащие (плакированные Ni и Cu).

Материалы применяются в виде порошков с размером частиц 2...150 мкм.

3.2.5. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание уделяется вакуумным ионно-плазменным методам. Характерной их чертой является прямое преобразование электрической энергии в энергию технологического воздействия, основанное на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами. Кроме того, эти методы позволяют:

- обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке;
- получать равномерные покрытия по толщине на большой площади;
- варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла;
- получить высокую чистоту поверхности покрытия;
- обеспечивать экологическую чистоту производственного цикла.

Методы вакуумной ионно-плазменной технологии:

1) модифицирование поверхностных слоев:

- ионно-диффузионное насыщение; (ионное азотирование, науглероживание, борирование и др.);

- ионное (плазменное) травление (очистка);
- ионная имплантация (внедрение);
- отжиг в тлеющем разряде;

2) Нанесение покрытий:

- полимеризация в тлеющем разряде;
- ионное осаждение (в триодной распылительной системе, диодной распылительной системе, с использованием разряда в полном катоде);
- электродуговое испарение;
- ионно-кластерный метод;
- катодное распыление (на постоянном токе, высокочастотное);
- химическое осаждение в плазме тлеющего разряда.

Современные вакуумные ионно-плазменные методы упрочнения (модифицирования) поверхностей деталей машин включают следующие этапы:

- генерацию (образование) корпускулярного потока вещества;
- активизацию, ускорение и фокусировку;
- конденсацию и внедрение в поверхность деталей (подложек).

Генерация корпускулярного потока вещества возможна его испарением (сублимацией) и распылением.

Испарение – переход конденсированной фазы в пар осуществляется в результате подводок тепловой энергии к испаряемому веществу.

Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется *сублимацией*.

Нагрев испаряемого вещества может осуществляться:

- за счет выделения Джоулева тепла при прохождении электрического тока через испаряемый материал или через испаритель;
- в результате бомбардировки поверхности металла ускоренным потоком электронов (электронно-лучевой нагрев) или квантами электромагнитного излучения (лазерный нагрев);
- высокочастотным электрическим магнитным полем (индукционный нагрев);
- электрической дугой.

Выбор способа нагрева и конструкция установки зависят от природы испаряемого материала, его исходной формы (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения, постоянства во времени и т.д.

Наибольшее распространение получил нагрев при помощи электронной бомбардировки, что позволяет достигать температуры 4000°C и плотности энергии в луче до $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$.

Электронно-лучевой способ нагрева состоит в том, что на образец металла направляют поток электронов от катода, ускоренных электрическим полем до энергии $5 \dots 25 \text{ кэВ}$. Поток электронов (электронный луч) получают с помощью электронно-лучевых пушек.

Средняя энергия частиц в потоке, образованном испарением, невысока, поэтому необходимо увеличить энергию частиц, прибывающих на подложку. Простым способом ускорения заряженных частиц является электрическое поле, но так как для создания потоков в основном используются нейтральные частицы, их активацию можно осуществлять действием на атомы потоком электронов, ионов, атомов или фотонов.

В результате образования активированного корпускулярного потока в контакт с подложкой металла детали, входят нейтральные частицы (возбужденные и невозбужденные) с высокой энергией и ионы. Процесс взаимодействия такого сложного по составу потока с поверхностью металла сводится к протеканию взаимосвязанных физических явлений: конденсация, внедрение и распыление.

3.2.6 Ионное распыление

Ионные распылители разделяют на две группы:

1) плазмоионные распылители, в которых мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового и высокочастотного разряда. Распыление происходит в результате бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы;

2) автономные источники без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень.

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 3.5). Распыляемую мишень из наносимого материала располагают на катоде. На другом электроде, на расстоянии в несколько сантиметров от катода, устанавливают детали (подложки).

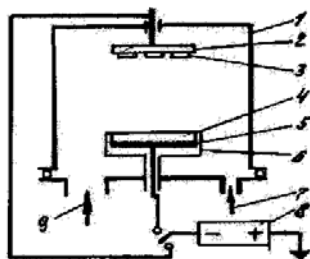


Рис. 3.5. Принципиальная система распыления: 1 – камера; 2 – подложкодержатель; 3– детали (подложки); 4– мишень; 5– катод; 6– экран; 7– подвод рабочего газа; 8– источник питания; 9– откачка

Камеру вакуумируют, а затем наполняют рабочим газом (чаще всего аргоном) до давления 1,33 Па. На электрод с подложки подают отрицательный потенциал, зажигают газоразрядную плазму и бомбардировкой ионами производят очистку их от поверхностных загрязнений. Далее отрицательный потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Распыляемые частицы движутся через плазму разряда, осаждаются на деталях и образуют покрытие. Большая часть энергии ионов, бомбардирующих мишень (до 25%), переходит в тепло, которое отводится водой, охлаждающей катод.

Достоинства: возможность получения покрытий из тугоплавких металлов, сплавов и химических соединений.

3.2.7. Магнетронное распыление

Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля.

При распылении ионы плазмы бомбардируют мишень из материала наносимого покрытия и выбивают атомы, сообщая им энергию, достаточную для перемещения к покрываемой детали и осаждения на ней. В этой технологии используются магниты, локализирующие плазму тлеющего разряда на отдельных участках мишени. При этом увеличивается плотность ионов, бомбардирующих поверхность. Схема магнетронного распыляющего устройства приведена на рис. 3.6.

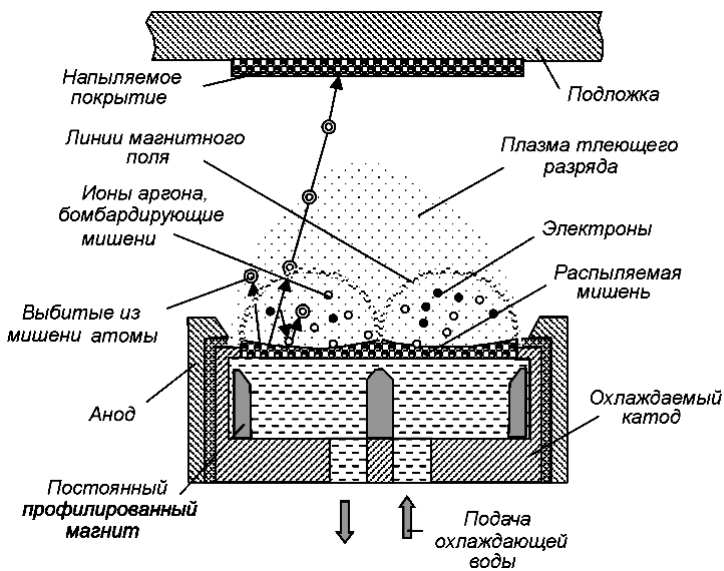


Рис. 3.6. Схема магнетронного распыления

Основными элементами магнетрона является катод (мишень), анод и магнитная система (рис. 3.7).

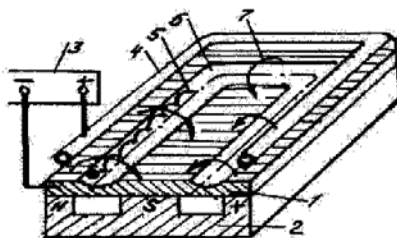


Рис. 3.7. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью:
 1 – катод (мишень); 2 – магнитная система; 3 – источник питания; 4 – анод;
 5 – траектория движения электрона; 6 – зона распыления; 7 – силовая линия магнитного поля

Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между системами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой оп-

ределяется формой полюсов магнитной системы. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд.

Наличие замкнутого магнитного поля на распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем и им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхностей мишени.

Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим их на катод, а с другой стороны – поверхностью мишени, их отталкивающей. Электрон циркулирует в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию.

Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительному росту скорости осаждения покрытия.

Процесс магнетронного распыления может быть использован для нанесения покрытий, как из проводящих материалов, так и диэлектриков (пластиков, керамик и др.).

Для обеспечения высокой адгезии предусматривается предварительная очистка поверхности изделий источником ионов газов.

3.2.8. Ионная имплантация (легирование)

Ионная имплантация – способ физико-химического модифицирования, основанный на внедрении ускоренных ионов легирующих элементов в поверхностный слой детали (рис. 3.8).

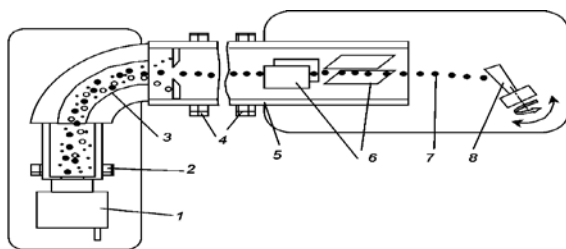


Рис. 3.8. Схема установки для ионной имплантации: 1 – источник ионов; 2 – система вытягивания ионов; 3 – сепаратор; 4 – фокусирующие магниты; 5 – линейный ускоритель; 6 – электростатическая отклоняющая система; 7 – поток ионов; 8 – упрочняемая деталь

Имплантируемые ионы имеют малую глубину проникновения, однако их влияние распространяется намного дальше от поверхности, чем первоначальная глубина проникновения.

Технологические особенности ионной имплантации:

- возможность получения на поверхности сплавов, которые невозможны в обычных условиях из-за ограниченной растворимости или диффузии компонентов. В ряде случаев равновесные пределы растворимости превышены в сплавах, полученных при имплантации, на несколько порядков;

- легирование не связано с протеканием диффузионных процессов за исключением модифицирования материалов ионной имплантации при большой плотности тока, когда наблюдается радиационно-стимулированная диффузия компонентов;

- процесс протекает при низких температурах (менее 150°C), без изменения механических свойств материала. Метод позволяет обрабатывать термочувствительные материалы;

- отсутствует заметное изменение размеров деталей после имплантации;

- модифицированные поверхности не требуют дальнейшей финишной обработки;

- процесс хорошо контролируется и воспроизводится;

- экологическая чистота процессов;

- упрочняются только открытые поверхности непосредственно находящиеся под воздействием облучения ионами;

- малая глубина модифицированного слоя;

- относительно высокая стоимость оборудования.

Ионная имплантация может выполняться ионами газов и металлическими ионами, причем используются ионы с различными уровнями энергии:

- высоким (30...100 кэВ, 65 мА);
- средним (1...10 кэВ, 100 мА);
- низким (0,1...1,5 кэВ, 200 мА);
- с диаметром луча 300...450 мм.

При высокоэнергетической ионной имплантации используется ионы газов с энергией до 100 кэВ для упрочнения металлов и сплавов, керамик, полимеров.

Перспективной является обработка высокоэнергетическими ионами азота для повышения стойкости режущего и штампового инструмента, усталостной прочности деталей.

Имплантация атомов внедрения, таких как азот, углерод и бор повышает износостойкость и сопротивление усталости сталей. Эти элементы обладают свойством сегрегации к дислокациям даже при комнатной температуре, что блокирует их движение и упрочняет поверхностный слой. Торможение движений дислокаций препятствует развитию усталостных трещин.

Ионная имплантация никеля бором приводит к увеличению усталостной прочности более чем на 100 %. Установлено, что увеличение усталостной прочности не связано с действием остаточных напряжений сжатия, возникающих при ионной имплантации, а обусловлено в основном торможением развития усталостных трещин снижением подвижности дислокаций.

Для повышения антифрикционных свойств может выполняться совместная имплантация ионов молибдена с двойным количеством ионов серы. Совместная имплантация может стать новым методом формирования антифрикционных и других специальных легированных слоев.

Ионная имплантация широко используется для повышения коррозионной стойкости стальных деталей. Для этих целей имплантируют ионы Cr, Mo, Ti, Cr-P, Cr-Mo, Ta-Cr-P и др. при энергиях 50...150 кэВ с дозами ионов $5 \cdot 10^{16} \dots 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Увеличение сопротивления коррозии объясняется формированием на поверхности пассивирующих пленок, в частности, фосфатных. При имплантации стальных поверхностей титаном получают на поверхности аморфную фазу Ti-C-Fe, что приводит к снижению трения и износа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Обработка взрывом, физическая сущность.
2. Что такое бризантные ВВ?
3. Технологические схемы штамповки взрывом.
4. Достоинства штамповки деталей взрывом.
5. Что такое электрогидравлический эффект?
6. Основные схемы электрогидравлической штамповки.
7. Что такое электрический взрыв?
8. Физическая сущность магнитно-импульсной штамповки.
9. Особенности обработки металлов магнитно-импульсным полем.
10. Достоинства магнитно-импульсной обработки металла.
11. Технологические схемы магнитно-импульсной формовки.
12. На чем основаны высокоэнергетические методы размерной обработки заготовок?
13. Основные виды высокоэнергетических разделительных операций.
14. Физические основы процесса гидроабразивной резки.
15. Взаимодействие абразивных частиц с обрабатываемым материалом в струе воды.
16. Схема гидроабразивной резки.
17. Виды абразивных материалов и их характеристики.
18. Материалы сопел и смешивающих трубок.
19. Свойства и толщина разрезаемого материала при гидроабразивной резке.
20. Скорость гидроабразивного резания и ее влияние на качество обработки.
21. Физические основы плазменной резки.
22. Основные схемы плазмообразования при резке материалов.
23. Плазменно-дуговая резка: область применения и достоинства?
24. Плазменная резка: область применения, достоинства и недостатки.
25. Рабочие газы для плазменной резки.
26. Физические основы лазерной обработки материалов.
27. Природа лазерного излучения, производственные лазеры.
28. Лазерная резка металлических и полимерных материалов.
29. Параметры, влияющие на зону термического воздействия при работе с лазером.

30. Влияние природы материала и оптических свойств поверхности на качество реза.
31. Особенности лазерной резки различных материалов.
32. Преимущества и недостатки лазерной резки.
33. Физические основы электронно-лучевой обработки.
34. Область применения и основные операции электронно-лучевой резки.
35. Основные виды импульсного поверхностного энергетического воздействия.
36. Основные методы поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей.
37. На чем основаны высокоэнергетические методы упрочняющей обработки?
38. Виды импульсных методов поверхностного энергетического воздействия.
39. Основные схемы упрочнение деталей взрывом.
40. Физические механизмы в материале при взрывном упрочнении.
41. Физические основы магнитно-импульсной упрочняющей обработки материалов.
42. Механизм магнитно-импульсного упрочнения материалов.
43. Виды методов поверхностного упрочнения концентрированными потоками частиц и излучения.
44. Лазерное упрочнение, его физическая сущность.
45. Физико-химические процессы при лазерной закалке.
46. Режимы лазерной закалки.
47. В чем отличие термоупрочнения с помощью CO₂-лазеров и диодных лазеров?
48. Лазерная химико-термическая обработка.
49. Электронно-лучевая поверхностная обработка, физическая сущность?
50. Основные схемы технологических процессов, обеспечиваемых электронно-лучевой обработкой.
51. Основные методы детонационного и плазменного нанесения покрытий.
52. Плазменное поверхностное упрочнение деталей, сущность.
53. Технологические варианты плазменного упрочнения деталей.
54. Механизм вакуумного ионно-плазменного упрочнения.
55. Механизмы ионного распыления.

56. Достоинства вакуумного напыления.
57. Физическая сущность магнетронного распыления.
58. Механизм и физическая сущность ионной имплантации (леги-рования).
59. Методы вакуумной ионно-плазменной технологии.
60. Преимущества электроннолучевой обработки в сравнении с лазерной обработкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Селиванов, В.В.* Взрывные технологии: учебник для вузов / В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519 с.
2. *Степанова, Т.Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учеб. пособие / Т.Ю. Степанова. – Иваново: Изд-во Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. – 64 с.
3. *Мурзин С.П.* Лазерные технологии обработки материалов: учеб. пособие / С.П. Мурзин, В.Н. Илюхин – Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2006. – 98 с.
4. *Рогов, В.А.* Основы высоких технологий : учеб. пособие / В.А. Рогов, Л.А. Ушомирская, А.Д. Чудаков. – М.: Вуз. книга, 2007. 253 с.
5. *Григорьяни, А.Г.* Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрлов ; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
6. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / С.И. Богодухов [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 623 с.
7. *Латыпов, Р.Р.* Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении: учеб. пособие для вузов / Р.Р. Латыпов, Н.Г. Терегулов, А.М. Смыслов, А.В. Лобанов; под общ. ред. В.Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2007. – 233 с.
8. *Схиртладзе, А.Г.* Технологические процессы в машиностроении : [учеб. для вузов] / А.Г. Схиртладзе, С.Г. Ярушин. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 523 с.
9. *Круглов, В.В.* Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки: учеб. пособие / В.В. Круглов. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегород.гос.техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 207 с.