

4 Высокоэнергетические технологии обработки поверхности

4.1 Электронно-ионно-квантовые технологии

В последнее время для модифицирования поверхности материалов стали привлекаться высокоэнергетические лучевые технологии с использованием концентрированных потоков энергии. В соответствии с природой носителей энергии – лазерное излучение, ионные пучки, электронные лучи, такие технологии получили название электронно-ионно-квантовые технологии (ЭИКТ) или радиационно-пучковые технологии (РПТ).

В отличие от традиционных технологий обработки поверхности материалов в машиностроении (термомеханическая, химико-термическая, химическая и электрохимическая), РПТ имеют свою специфику и особенности, в ряде случаев вытесняют традиционные технологии модифицирования приповерхностных слоев вследствие более высокой эффективности, экологической чистоты и уникальности получаемых результатов. РПТ являются менее энергоемкими, так как обработке подвергается только узкий приповерхностный слой. Модифицирующее действие РПТ осуществляется за счет целого ряда физических процессов: имплантации атомов (ионов) в материал; осаждения и ионного перемешивания атомов в поверхностном слое; быстрого нагрева и охлаждения поверхностного слоя; распыления или испарения атомов поверхностного слоя; плазмообразования на поверхности мишени; дефектообразования в слое материала и др.

В последние годы широкое применение находят РПТ для получения пленок и покрытий, включая осаждение на подложку атомов, полученных лазерным, ионным, магнетронным и катодным распылением (испарением); ионов, полученных в вакуумно-электродуговых и ионно-плазменных ускорителях, и кластеров атомов, полученных в плазмодинамических ускорителях. Уникальной особенностью ионно-плазменных технологий получения покрытий является возможность в одной установке осуществить предварительную очистку поверхности, нанесение слоев и их бомбардировку ионами, что, по сути, является примером комбинированной обработки материалов ионами и плазмой.

В материаловедении хорошо известно, что изменения структуры происходят в процессе термомеханической или термической обработки. При этом происходит соответствующее изменение механических свойств. Наиболее эффективный способ изменения структуры поверхностного слоя сложнолегированных материалов – это термообработка приповерхностного слоя, включая закалку и последующий (при необходимости) отпуск. Для закалки необходимо быстро нагреть и охладить поверхностный слой материала. Существует ряд наиболее распространенных технологий изменения структуры и упрочнения приповерхностного слоя материалов:

- поверхностная пластическая деформация;
- поверхностная термическая (и термоциклическая) обработка, включая индукционный нагрев;

- ударно-волновое воздействие (например, взрывом).

РТП является наиболее эффективным способом изменения структуры поверхностного слоя, позволяющего проводить сверхбыструю закалку весьма узкого (десятки микрометров по глубине) слоя сплавов, в том числе из жидкого состояния. При этом происходит изменение структуры (аморфизация, измельчение зерна, квазипериодические или многозонные структуры) материалов.

Для различных видов РТП общим являются: высокие плотности мощности ($\sim 10^{12}$ Вт/см²) и энергии (~ 100 Дж/см²), высокие градиенты температуры, создаваемые в поверхностном слое (10^6 - 10^8 К/см) и высокие скорости нагрева и закалки (10^9 - 10^{11} К/с), достижимые при определенных условиях.

Каждая РТП-технология имеет свои особенности воздействия на твердое тело. Это касается передачи энергии в твердом теле: электронам при лазерном излучении, электронам и ядрам при электронном облучении, атомам, электронам и ядрам при ионной и плазменной обработке. Вследствие этого наблюдаются отличия в характере энергосвободения по глубине мишени и, следовательно, в распределении температуры и термонапряжений в твердом теле. Наибольшее проникновение в глубину мишени можно достичь при электронной обработке.

4.2 Лазерная обработка поверхности

4.2.1 Основные характеристики лазерной обработки

Лазерная обработка (ЛО) материалов основана на возможности лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала. Интенсивное развитие лазерной технологии обусловлено широкими возможностями обработки металлов с помощью пучков лазерного излучения и выпускаемым серийно совершенным оборудованием.

Лазерное излучение – это вынужденное монохроматическое излучение широкого диапазона длин волн. Используемые в технологии лазеры генерируют излучение с длиной волны $\lambda=0,3-10,0$ мкм. Энергетической характеристикой излучения является энергия фотона. $E = h\nu = hc/\lambda$, где $h=6,6\cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ν – частота излучения; λ – длина волны излучения; c – скорость распространения электромагнитного излучения (скорость света).

В зависимости от агрегатного состояния активной среды различают твердотельные и газовые лазеры. Лазеры подразделяют так же 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. Значение времени в импульсном режиме $t = 10^{-9}-10$ с, в непрерывном режиме $t = D/v$, где – D – диаметр пучка на образце, v – скорость сканирования пучка по образцу. Важными технологическими параметрами ЛО являются высокие плотности энергии (до 100 Дж/см²) и мощности (до 10^{10} Вт/см²).

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 обработок ЛО 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.

Для расчета тепловых процессов при лазерной обработке необходимо учитывать специфику теплового источника на основе особенностей взаимодействия лазерного излучения с поверхностью обрабатываемого металла. Интенсивность отражения лазерного излучения определяется коэффициентом отражения, зависящим от материала и длины волны излучения. В таблице 9 представлены значения коэффициентов отражения при нормальном падении луча и при комнатной температуре для различных металлов в диапазоне длин волн наиболее распространенных типов лазеров.

Коэффициенты отражения лазерного излучения от поверхности различных металлов

Характеристика лазера		Коэффициент отражения		
Активное вещество	Длина волны Излучения, мкм	Au	Cr	Ni
Ag	0,488	0,415	0,437	0,597
Рубин	0,694	0,930	0,831	0,676
CO ₂	10,6	0,975	0,984	0,942

Из данных таблицы следует, что наиболее высокий коэффициент отражения имеют CO₂ – лазеры. Однако важным обстоятельством является существенное увеличение поглощательной способности с ростом температуры обрабатываемой поверхности, а так же зависимость ее от состояния поверхности. С ростом оксидной пленки коэффициент поглощения может увеличиться в несколько раз.

Таким образом, энергетическая эффективность процессов лазерной обработки значительно повышается с увеличением шероховатости поверхности и изменением ее химического состава. Однако при поверхностной обработке оказалось более целесообразно нанесение покрытий для увеличения поглощения лазерного излучения. При выборе покрытия главным условием является высокая поглощательная способность покрытия.

В настоящее время применяются следующие типы покрытий:

- химические покрытия, получаемые в технологических процессах воронения, сульфидирования, анодирования, фосфатирования;
- углеродистые покрытия – сажа, растворы графита или сажи в ацетоне;
- лакокрасочные покрытия – водоэмульсионные краски, гуаши, туши;
- порошки металлов или оксидов, напыленные на поверхность, или гальванические покрытия.

4.2.2 Методы поверхностной лазерной обработки материалов

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.

На рис.24 показаны примерные области режимов лазерной сварки, пробивки отверстий и некоторых видов поверхностной лазерной обработки: термообработка, аморфизация, ударное упрочнение. Наклонными линиями показаны уровни удельной энергии. Из диаграммы видно, что методам поверхностной обработки отвечают меньшие значения удельной энергии, чем для процессов сварки и пробивки отверстий. Это обусловлено тем, что при

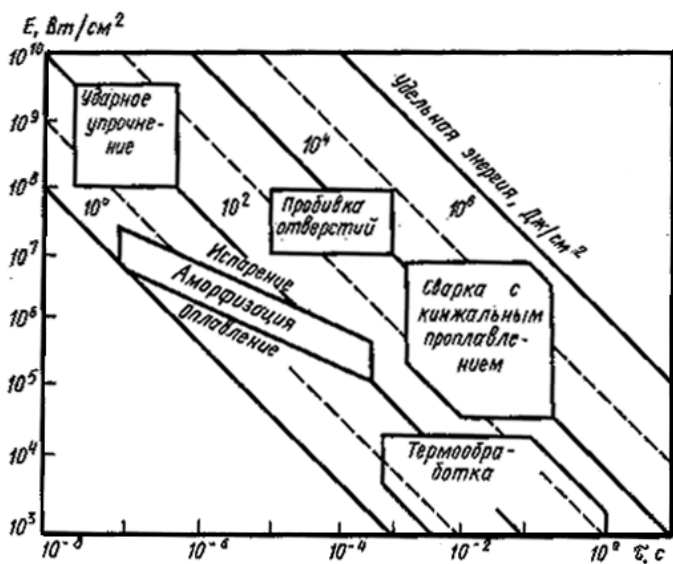


Рис. 24. Классификационная диаграмма различных видов лазерной технологии по энергетическим параметрам (E – плотность мощности, τ – длительность воздействия)

температур, а после прекращения действия излучения этот участок охлаждается с высокой скоростью за счет теплоотвода во внутренние слои металла. Высокая скорость охлаждения приводит к образованию закалочных структур в сплавах и к высокой твердости поверхности.

В том случае, когда толщина обрабатываемой детали соизмерима с размерами зоны лазерного воздействия и условия быстрого теплоотвода не обеспечиваются, происходит *лазерный отжиг*. В основе его лежит нагрев закаленных деталей до температур ниже критических для снятия остаточных термических напряжений.

Оплавление поверхности как технологический процесс используется для повышения качества поверхности – уменьшения пористости, оптимизации шероховатости, повышения коррозионной стойкости. Для получения аморфного состояния в оплавленном слое требуется максимальная скорость охлаждения, поэтому глубина оплавления не должна превышать 50 мкм.

Получение поверхностных покрытий. Легирование и наплавка позволяют получать поверхностное покрытие с требуемыми характеристиками. Упрочняемый участок поверхности нагревается выше температуры плавления, затем в зону оплавления вводят легирующие компоненты. В зависимости от количества вводимого материала можно получить поверхностный слой с химическим составом, отличным от основного металла, либо наплавленное покрытие с химическим составом и структурой, обеспечивающими необходимые свойства поверхности.

Вакуумно-лазерное напыление включает в себя процесс испарения материала участка поверхности под воздействием лазерного излучения в вакууме и процесс конденсации испарившихся продуктов на поверхности обрабатываемого изделия.

поверхностной обработке требуется нагрев лишь ограниченного по толщине поверхностного слоя.

Рассмотрим основные методы поверхностной лазерной обработки материалов.

Лазерная термообработка соответствует обычным методам термической обработки сплавов. Для проведения *лазерной закалки* локальный участок поверхности массивной детали нагревают с помощью излучения до

сверхкритических

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

4.2.3 Формирование структуры поверхностного слоя при лазерной обработке

Для лазерной обработки поверхности, как и для других видов высокоэнергетических лучевых технологий, характерны высокие скорости нагрева и охлаждения. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на структуру и свойства обрабатываемой поверхности. Показано, что разные сплавы и стали после одинаковых термических циклов обработки могут иметь противоположные свойства – упрочняться и разупрочняться, иметь разную величину и знак остаточных напряжений и др.

При лазерной закалке без оплавления очень важной фазой является фаза нагрева, так как в процессе последующего скоростного охлаждения фиксируются стадии превращений, полученные при нагреве. Если при обычной термообработке для анализа фазовых превращений можно пользоваться диаграммами равновесных состояний, то при лазерном нагреве имеет место сдвиг критических точек превращения и тем больше, чем выше скорость нагрева. Так, в условиях скоростного лазерного нагрева железоуглеродистых сплавов могут иметь место такие эффекты, как протекание превращения перлит – аустенит не изотермически, а в интервале температур, сдвиг критической точки A_{c3} в область высоких температур, смещение точки A_{cm} и обусловленное этим микроплавление границы цементита с аустенитом. Во всех случаях процесс диффузионного перераспределения углерода в аустените, т.е. гомогенизация аустенита, смещается в область еще более высоких температур.

Если превращение феррит - аустенит или перлит - аустенит происходит за счет диффузионного механизма, то при лазерном нагреве следует ожидать сдвиг A_{c1} и A_{c3} в область высоких температур. Однако перестройка решетки в этом случае может происходить без концентрационного перераспределения углерода, т.е. в виде полиморфного превращения, а при достаточно высокой скорости нагрева не исключена возможность протекания α - γ превращения по мартенситному механизму. Эти соображения приводят к заключению, что в действительности сдвиг A_{c1} и A_{c3} может быть меньшим, чем в случае только диффузионного механизма превращения.

Кроме сдвига критических точек высокая скорость нагрева вызывает смещение температуры рекристаллизации деформированного сплава. Так, для железа, деформированного на 60%, при увеличении скорости нагрева от нескольких сотен градусов в минуту до 500 - 600 К/с, температура рекристаллизации повышается от 500 до 700 - 900°C. При этом имеет место изменение последовательности стадий рекристаллизации – при ускорении нагрева не успевает происходить полигонизация и процесс начинается сразу с первичной рекристаллизации. С увеличением скорости нагрева температура рекристаллизации смещается в область высоких температур более интенсивно, чем температура точки A_{c1} .

Предполагается, что может существовать некоторая критическая скорость нагрева, ниже которой рекристаллизация протекает до завершения превращения перлит - аустенит, а выше этой скорости рекристаллизация протекает после завершения превращения перлит - аустенит. При сверхвысоких скоростях рекристаллизация может не происходить вплоть до температуры плавления.

Закалка. Среди видов лазерной обработки поверхности наибольшее распространение получила закалка. Для лазерных технологий характерны высокие скорости охлаждения, поскольку для прогретого тонкого поверхностного слоя закалочной средой является металлический материал изделия с высокой теплопроводностью.

Для получения мартенсита в сплавах железа в интервале минимальной устойчивости аустенита (400 - 600°C) должна быть обеспечена скорость охлаждения выше критической, которая для большинства сплавов железа находится в интервале 50 - 200°K/c. 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.

4.2.4 Формирование структуры поверхностного слоя после оплавления

При лазерной термообработке с оплавлением конечная структура поверхностного слоя формируется на стадии охлаждения материала поверхности, находящегося в жидком состоянии. При этом наибольший интерес представляет возможность достижения высоких и сверхвысоких скоростей охлаждения для расплавленного металла, что отвечает процессу закалки из жидкой фазы.

Скорость охлаждения оказывает большое влияние на строение, структуру и свойства затвердевшего сплава. В общем случае с увеличением скорости охлаждения размер зерен уменьшается, хотя однозначно это утверждать не следует. Известно, что оба основных параметра кристаллизации – скорость роста кристаллов и скорость образования зародышей имеют сложную зависимость от переохлаждения, т.е. от разности между температурой равновесного превращения и действительной температурой кристаллизации. При этом степень переохлаждения однозначно возрастает с увеличением скорости охлаждения.

Рассмотрим, как форма зерна и его внутреннее строение могут изменяться в зависимости от скорости охлаждения. При медленном охлаждении скорость появления зародышей и скорость линейного роста кристаллов имеют небольшие значения, зародыши образуются по всему объему расплава, направление их роста неориентировано, в результате образуются крупные зерна с плоскими границами, ячеистые зерна (рис.25а).

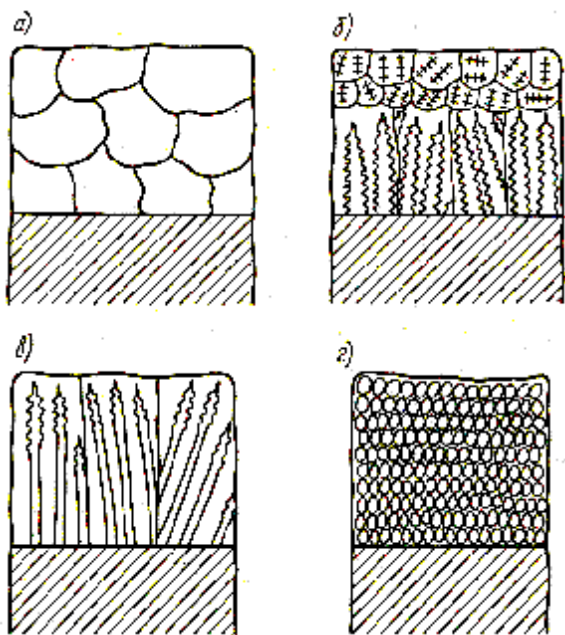


Рис. 25. Схемы кристаллизации расплавленного поверхностного слоя при различных скоростях охлаждения

В большинстве случаев зерна состоят из одного или нескольких дендритов, хотя возможен и недендритный рост.

Увеличение скорости охлаждения приводит к тому, что наибольшее переохлаждение достигается на границе с подложкой, а у поверхности расплава переохлаждение меньше. Поэтому ячеистые равноосные зерна имеются лишь у поверхности, а возле границы с подложкой где скорость образования зародышей и скорость роста кристаллов

имеют наибольшие значения, столбчатые зерна растут от подложки к поверхности расплава, причем зерна состоят из нескольких одинаково ориентированных дендритов (рис 25б).

Дальнейшее увеличение скорости охлаждения приводит к исчезновению ячеистых зерен у поверхности расплава, а в столбчатых зернах разветвленность дендритов еще больше уменьшается и на границе с подложкой могут исчезать вторичные оси (рис.25в). При скорости охлаждения $10^5 - 10^6$ К/с вторичные оси дендритов исчезают. При скорости охлаждения больше 10^6 К/с, когда переохлаждение достигает нескольких сотен градусов, скорость роста существенно уменьшается. Это препятствует дендритному росту кристаллов, дендритность вырождается и формируется плоский фронт зерен (рис25г). Измельчение зерен благоприятно сказывается на свойствах сплава, становится возможным достижение наиболее оптимального сочетания прочности и пластичности. Особенно сильное влияние измельчение зерен оказывает на повышение сопротивлению ползучести, поскольку границы зерен эффективно препятствуют пластическому течению металла при повышенных температурах.

Кроме изменения размера, формы и внутреннего строения зерен скорость охлаждения оказывает заметное влияние на однородность химического состава кристаллизующегося объема сплава. Сначала, когда скорость охлаждения невелика, различные участки зерен имеют одинаковый состав, который отвечает исходному составу сплава, поскольку в процессе кристаллизации успевают протекать диффузионное перераспределение элементов как в жидкой, так и в твердой фазе.

При увеличении скорости охлаждения диффузионное перераспределение элементов в твердой фазе происходит не успевают. В результате участки зерен затвердевшие в начале кристаллизации (центральные оси дендритов), обогащены тугоплавкими элементами, а участки зерен, затвердевшие в конце кристаллизации, обогащены легкоплавкими элементами. Возникает дендритная ликвация. При скоростях охлаждения более 10^6K/с , когда имеет место формирование плоского фронта кристаллизации, перераспределение элементов не успевают происходить и в жидкой фазе. Тогда дендритная ликвация резко уменьшается, зерно по химическому составу становится более однородным, а это может привести к улучшению многих свойств сплавов.

4.2.5 Аморфизация поверхности

Среди факторов, определяющих склонность сплавов к аморфизации, различают внешние и внутренние. К внешним факторам относятся скорость аморфизации, индивидуальная для каждого сплава, и химический состава сплава. К внутренним факторам относятся зависимость вязкости от температуры, температурный интервал кристаллизации, скорость роста центров кристаллизации и др. Склонность к аморфизации определяется совокупностью всех этих факторов, и нельзя ее связывать только с одним из них.

Существует ограниченный ряд систем, в которых практически возможно достижение аморфного или нанокристаллического состояний. Вот некоторые из них.

1. Сплавы околоэвтектического состава: система металл – металлоид (Ag, Au, Fe, Ni, Co, Pd, Pt, Rh и Si, Ge, P, C); система металл – редкоземельный металл (Ag, Au, Cu, Al, Sn и La, Ce, Nd, Y, Gd);
2. Сплавы неэвтектического состава: системы на основе теллура (Te и Ag, Ga, Cu); системы на основе свинца и олова (Pb – Sb, Pb – Si, Pb – Ag, Pb – Au, Sn – Cu).

Ввиду отсутствия сдвиго-дислокационного перемещения по системам скольжения аморфные сплавы отличаются высокими прочностными свойствами. Значительная хрупкость проявляется только в макроскопическом масштабе, когда пластическая деформация идет неравномерно. Хрупкие при растяжении аморфные металлы допускают значительную деформацию при сжатии или изгибе (до 50%). Такие металлы легко прокатываются, поскольку деформационное упрочнение у них крайне мало. С ростом температуры прочность аморфных сплавов резко снижается, причем для некоторых сплавов при температуре 150 – 200°С наблюдается значительная хрупкость.

После лазерной аморфизации у некоторых сплавов имеет место значительное увеличение микротвердости поверхности. Например, микротвердость сплавов системы Fe – B – Si повышается от 3500 – 5800 МПа в исходном состоянии до 7100 – 11700 МПа. Наличие на поверхности сплавов аморфного слоя приводит к улучшению коррозионных характеристик.

Большие перспективы имеет лазерная аморфизация обычных промышленных сталей и чугунов с одновременным легированием поверхности

для увеличения склонности к аморфизации. В этом случае на поверхность чугуна или стали наносится порошок бора или кремния, а затем поверхность оплавляют лазером. Режимы оплавления подбирают так, чтобы после охлаждения состав сплава отличался наибольшей склонностью к аморфизации.

Таким образом, ввиду уникальности свойств аморфных состояний получение их с помощью лазерного излучения весьма перспективно.

4.3 Электронно – лучевые технологии

4.3.1 Электронно-лучевая обработка материалов

В основе электронно-лучевой обработки (ЭЛО) металлических материалов лежит взаимодействие электронного луча с поверхностью упрочняемого изделия. Электронный луч является потоком ускоренных в электрическом поле заряженных частиц – электронов. При попадании на материал значительная часть его кинетической энергии 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

$$h = 2.1 \cdot 10^{-12} V/\rho,$$

где h – толщина слоя, см; V – 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

Исследования применения 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 и при расплавлении их поверхности. Второе направление технологических процессов обладает более широкими возможностями, поскольку в расплавленный металл могут быть введены растворимые или нерастворимые добавки.

На рис.26 представлены основные схемы технологических процессов, обеспечиваемых ЭЛО.

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. Формирование периодического рельефа на поверхности заготовки.

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

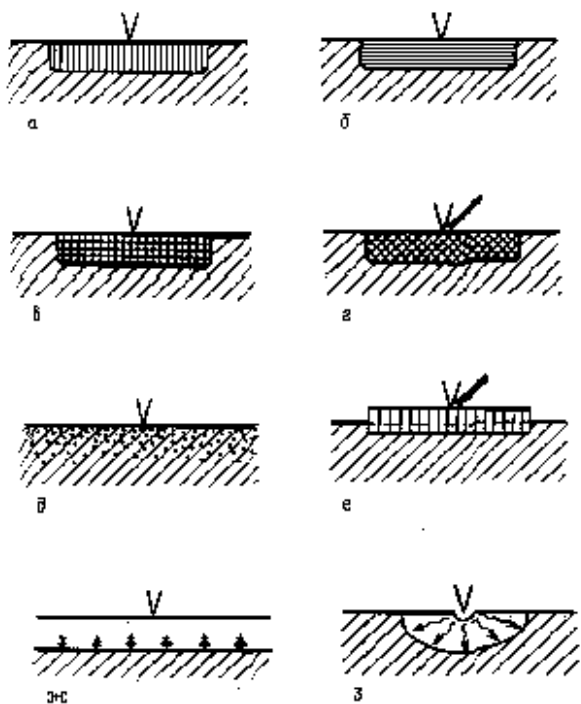


Рис. 26. Схема вариантов электронно-лучевого модифицирования свойств металлов и сплавов: а -рафинирующее оплавление; б -закалка из твердого состояния; в -закалка с фазовым превращением; г -легирование, внедрение; д -диффузия; е -наплавка; ж - обработка предварительно нанесенных покрытий; з – ударное упрочнение

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

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

Оплавление и затвердевание с высокими и сверхвысокими скоростями ($\sim 10^3-10^7$ $^{\circ}\text{C}/\text{с}$), приводящие к аморфизации (стеклованию) тонкого приповерхностного слоя материала.

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

Перечисленные группы процессов расположены в порядке возрастания используемых значений удельной мощности и, соответственно, снижения времени воздействия потоков электронов на модифицированный материал.

Для электронно-лучевой поверхностной обработки с целью модифицирования поверхности используются ускорители электронов с напряжениями 0,1-20 МВ, мощностью до нескольких десятков и сотен киловатт.

Применяются установки камерного типа (для обработки обычно одного изделия), такт-машины (с камерой, соответствующей размерам детали, в серийном производстве), проходные установки непрерывного действия, установки для вневакуумной обработки с выпуском луча через серию диафрагм в атмосферу, а также оборудование с использованием принципов локального и мобильного вакуумирования обрабатываемого участка на крупногабаритном изделии.

Применение концентрированных источников нагрева – электронных и лазерных – для повышения свойств, упрочнения поверхности целесообразно, в тех случаях, когда невозможно использовать остальные методы поверхностного

нагрева, а также когда применение источников концентрированного воздействия приводит к получению качественно новых результатов, свойств упрочненных изделий. В ряде случаев модифицирование поверхности можно проводить путем как электронно-лучевого, так и лазерного воздействия.

Расчет полей температур в стальной пластине при нагреве электронным и лазерным лучами с использованием значений удельной мощности $5 \cdot 10^6$ и $1,25 \cdot 10^6$ Вт/см² показывает, что требуемые температуры закалки достигаются за $(60-0,2) \cdot 10^{-3}$ с при электронно-лучевом и $10^{-6}-10^{-7}$ с при лазерном нагреве. Глубины закалки составляют соответственно 0,2-0,3 мм в первом случае и $2 \cdot 10^{-3}$ мм, т.е. на два порядка меньше, во втором.

Проведено упрочнение одинаковых образцов из стали 45 с нагревом электронным лучом, излучением лазера (Кардамон) и токами высокой частоты. Мощности электронного и лазерного лучей были одинаковыми (500 Вт), скорости перемещения образца в обоих случаях 30 мм/с. Диаметры электронного и лазерного пучков составили 1,5 и 0,5 мм, вследствие чего удельная мощность лазерного луча примерно на порядок выше, чем электронного. Однако, несмотря на это, при электронно-лучевом упрочнении глубина закаленного слоя оказалась в 2 раза больше. Авторы объясняют этот результат большей поглощающей способностью и глубиной проникновения электронов. Кроме того, после упрочнения электронным лучом твердость закаленной стали 45 на 1,2-2,2 ГПа выше, чем после закалки с нагревом лазером и ТВЧ.

Метод электронно-лучевой обработки обладает следующими технологическими преимуществами перед традиционными методами упрочнения, в том числе поверхностного:

- постоянной глубиной обработки, в частности закалки;
- минимальным короблением изделия;
- высоким к. п. д. При генерировании луча и поглощения его энергии, т.е. низкими затратами энергии;
- независимостью поглощения энергии от оптических свойств и шероховатости поверхности, отсутствием необходимости нанесения покрытия на поверхность для повышения ее поглощающей способности;
- высокой стабильностью и воспроизводимостью параметров излучения, простотой контроля характеристик;
- возможностью сканирования луча с высокой частотой и большой амплитудой (>50 мм), высокой надежностью (по сравнению с механической системой развертки лазерного луча) электромагнитной системы сканирования;
- экологической чистотой.

4.3.2 Электронно - лучевая наплавка

Одним из вариантов решения задачи повышения долговечности изделий путем уменьшения их износа является легирование поверхности, нанесение твердых и износостойких покрытий на металлическую основу с применением электронно-лучевого нагрева. При использовании присадочного материала на дешевом металле основы можно получать покрытия с такими свойствами, которые не отличаются от свойств дорогостоящих дефицитных. Такие методы обработки предусматривают подачу присадки непосредственно во время действия источника нагрева или предварительное нанесение покрытия на модифицируемую поверхность заготовки (в виде гальванического или напыленного слоев, фольги, пластины и т.д.). Применение электронно-лучевого нагрева для указанных целей позволяет устранить многие недостатки, присущие широко применяемым в настоящее время методам дуговой и ТВЧ-наплавки.

Электронно- лучевая наплавка с подачей порошка

Электронно- лучевая наплавка (ЭЛН) покрытий производится подачей присадочного материала (порошка) в жидкометаллическую ванну, возникающую на поверхности наплавляемой детали под действием сканирующего электронного луча. Деталь при этом перемещается по требуемому закону относительно электронной пушки и порошкового питателя. Малый размер (5x5 мм) жидкометаллической ванны и возможность управления энерговыделением (нагревом ванны и детали) позволяют гибко управлять процессом кристаллизации. В результате можно получить наплавленные слои с требуемыми характеристиками – с мелкой однородной структурой, с небольшой пористостью. Химический и фазовый состав наплавляемого покрытия выбираются в соответствии с условиями работы конкретной детали.

Сравнительные исследования структуры, физико-механических свойств и износостойкости покрытий, полученных различными методами: плазменного напыления с оплавлением, дуговой и электронно-лучевой наплавки порошковыми материалами в вакууме показали, что ЭЛН технология имеет существенные преимущества перед альтернативными технологиями. Вот некоторые из них:

- отсутствуют потери наплавляемого порошка;
- не только исключается опасность окисления наплавляемого материала, но и происходит рафинирование его от растворенных газов и окислов;
- обеспечивается плавно регулируемый переход от покрытия к основе, за счет чего сводится к минимуму напряжения на границе раздела, которые обычно приводят к растрескиванию и отслоению покрытия;

- износостойкость ЭЛН покрытий в 2-5 раз выше по сравнению с напыленными и в 1,5-2 раза по сравнению с напыленными и оплавленными.

Электронно-лучевая наплавка с применением обмазки

Одним из способов электронно-лучевой обработки поверхности является электронно-лучевая химико-термическая обработка, заключающаяся в нагреве электронным лучом поверхности металла с нанесенной на нее насыщающей обмазкой. Изменяя состав насыщающей обмазки, параметры электронного луча, параметры технологического процесса, можно получать различные свойства поверхности (высокую коррозионную стойкость, износостойкость и др.).

Сравнительные исследования борированного поверхностного слоя, полученного на образцах при электронно-лучевом борировании (время обработки 2 –5 мин) и при традиционном печном борировании в герметичном контейнере с порошковой смесью (в течение 4 часов), показали, что при практически равной микротвердости поверхности образцов, нагретых до высоких температур, боридные слои, полученные электронно-лучевым методом, оказываются более пластичными.

4.3.3 Вневакуумная электронно-лучевая технология

Особый интерес для расширения области применения электронно-лучевой технологии для поверхностной обработки крупно-габаритных деталей машин и механизмов представляет новое направление в технологии ЭЛО – нагрев концентрированным электронным пучком в атмосфере. Для этой цели используются мощные ускорители электронов, а электронный луч выводится за пределы вакуумной камеры через рабочее окно, закрытое фольгой. В частности, вневакуумная электронно-лучевая технология предлагается для упрочнения поверхности стрелочных переводов на железных дорогах. Показано, что на поверхности рельсовой стали после электронно-лучевой наплавки ферромарганца формируется структура, соответствующая структуре стали Гадфильда, которая не только хорошо выдерживает ударно-контактные нагрузки, но в процессе эксплуатации до определенной степени и упрочняется.

4.4 Ионно-лучевые технологии

Ускоренные ионы в виде моноэнергетических или полиэнергетических лучей используются в ионно-пучковых технологиях. Для бомбардировки поверхности твердых тел используются ионы различных химических элементов, получаемые в газовом или твердотельном ионном источнике. Параметры ионного пучка (энергия ионов, поток, флюенс) выбирают в зависимости от решаемой задачи при обработке материала. В настоящее время рассматриваются два основных направления технологического применения ионных пучков: нанесение пленок (покрытий) на заданную подложку путем распыления специально выбранной мишени и модифицирование поверхностного слоя материалов с целью получения заданных свойств поверхности. С первым направлением мы уже познакомились при рассмотрении вакуумного конденсационного метода напыления покрытий. В основе другого направления лежит процесс изменения элементного состава и фазового состояния, изменение структуры поверхности (например, кристаллической на аморфную). Такой технологический процесс называется ионной имплантацией или ионным легированием.

Ионное легирование представляет собой процесс внедрения (имплантации) легирующего элемента в поверхностный слой детали в результате ее бомбардировки высокоэнергетическими ионами. Ионное легирование широко применяют в промышленности. В настоящее время ведутся исследования по разработке и внедрению технологии ионного легирования деталей из металлов, керамики, пластмасс.

Взаимодействие имплантируемого иона с частицами твердого вещества (электронами, ионами, атомами) приводит к постепенному снижению его кинетической энергии, т. е. к торможению. Пробег иона (пройденный путь) R в твердом теле зависит от его начальной энергии E_1 и массы, а также от характеристик материала обрабатываемой заготовки.

Взаимодействие имплантируемых ионов с частицами твердого тела носит статистический характер, поэтому распределение легирующего элемента описывается непрерывной функцией $P(E_1, R)$, где P – плотность вероятности того, что ион с энергией E_1 остановится после прохождения пути R .

Распределение ионов по глубине характеризуется средним квадратичным разбросом пробега $\Delta R = k R_p$, где $k = \text{const}$, R_p – проекционный пробег (проекция пробега на направление первоначального движения иона). В первом приближении распределение внедренных в твердое тело ионов по глубине (концентрационный профиль) можно описать функцией Гаусса (рис. 27, кривая 1).

$$N(h) = (D/(2\pi))^{0.5} \Delta R \exp(-((h-R)^2/2 \Delta R^2),$$

где D – доза облучения, т.е. количество имплантированных ионов на единицу площади поверхности. Максимум профиля распределения

$$N_{max} = N(R) = D/(2\pi)^{0,5} \Delta R_m$$

соответствует величине R_m , а значение $N(h)$ снижается в 10 раз по сравнению с N_{max} на глубинах $h = R \pm \Delta R_m$.

Распределение концентраций имплантированного элемента зависит прежде всего от структуры материала обрабатываемой заготовки (аморфной, поликристаллической, монокристаллической). В решетке кристалла существуют такие направления, вдоль которых атомы отсутствуют, т. е. наблюдаются “каналы”, ограниченные параллельными цепочками атомов. Рассеяние и торможение ионов при движении вдоль этих каналов незначительно, поэтому имплантируемые элементы проникают в твердое тело на глубину R_{mk} , большую, чем R_m . Этот процесс называется каналированием ионов (рис. 27, кривая 2).

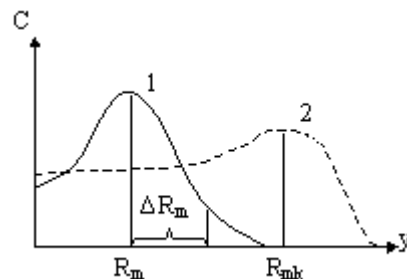


Рис.27. Распределение концентрации имплантированного элемента; 1 — для поликристаллических материалов, 2 — для монокристалла.

Исследование физических процессов, имеющих место при взаимодействии ускоренных ионов с твердым телом, шло параллельно с разработкой технологических процессов упрочнения поверхности. Было показано, что при средних энергиях ионов (10-1000 кэВ) глубина проникновения ионов составляет несколько десятков или сотен нанометров.

Ионное легирование приводит к увеличению концентрации дефектов (межузельных атомов и др.) в поверхностном слое облучаемого материала. Возникающие при этом дефекты решетки принято называть радиационными. В процессе ионного легирования в металле может протекать радиационно-стимулируемая диффузия, основной причиной которой является увеличение концентрации вакансий.

Ионная бомбардировка, так же как и облучение электронами, приводит к нагреву металла. Температура нагрева зависит от плотности ионного тока, энергии ионов и теплофизических характеристик материала мишени. Нагрев поверхностного слоя детали можно использовать для увеличения толщины легированного слоя.

Как показывает анализ результатов исследований природа упрочнения поверхности при ионной имплантации имеет сложный характер. Можно отметить следующие механизмы упрочнения: а) изменение химического состава, получение твердых растворов с концентрацией, недоступной при других методах легирования, выделение второй фазы; б) деформационное упрочнение; в) при больших дозах — разрушение кристаллической структуры т.е. аморфизация; г) повышение глубины легированного упрочненного слоя за счет радиационно-стимулированной диффузии.

Ионная имплантация хорошо зарекомендовала себя как способ упрочнения инструмента, фильер. Она позволяет повысить сопротивление

усталости, улучшает фрикционные свойства, повышает сопротивление коррозии, радиационную стойкость, снижает шероховатость поверхности и т.д.

С целью повышения износостойкости используется многократная имплантация бора высокими дозами при разных энергиях для создания поверхностного слоя, содержащего бориды. Выбор бора объясняется тем, что определенные фазы металл–В очень тверды и износостойки. При имплантации азота в обрабатываемой детали образуются нитриды. Значительное улучшение износостойкости наблюдается при совместной имплантации металла и неметалла (Ti+C, Ti+B), что объясняется образованием прочных соединений в виде дисперсных выделений. Метод ионной имплантации позволяет имплантировать в поверхностный слой ионы практически любого элемент из периодической таблицы элементов

В последнее время при исследовании различных свойств и микроструктуры ионно-имплантированных материалов было установлено, что влияние ионных потоков при облучении ряда металлических материалов не ограничивается тонким поверхностным слоем, где происходит торможение

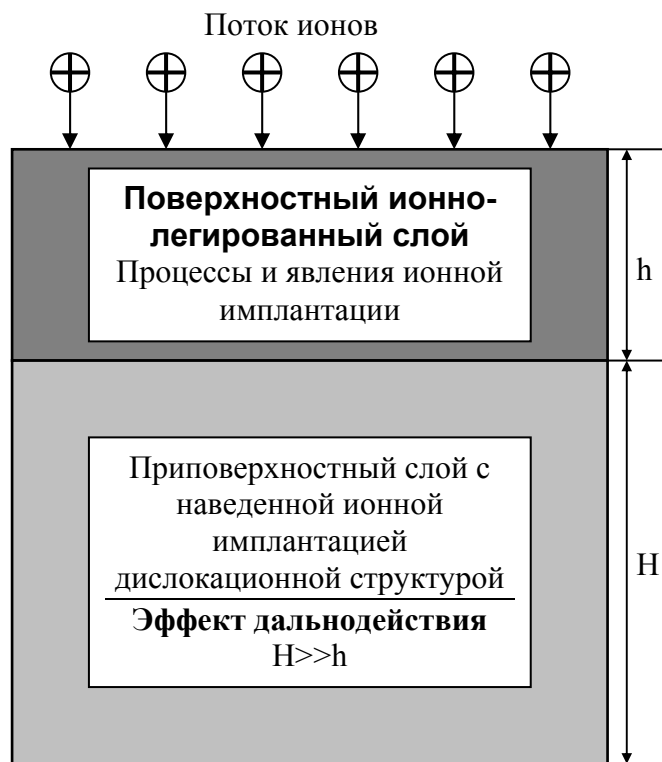


Рис. 28. Эффект дальнего действия в металлических материалах при ионной имплантации

внедряемых ионов, а распространяется на значительно большие расстояния. Данное явление получило название *эффекта дальнего действия*.

В настоящее время доказано, что в металлах и сплавах эффект дальнего действия заключается в формировании дефектной структуры в приповерхностном слое, толщина которого существенно больше (на порядок и более) толщины легируемого поверхностного слоя (рис.28). Так например, в отожженных металлах с низкой плотностью дислокаций эффект дальнего действия проявляется в генерации дислокаций, в увеличении плотности дислокаций на 1 – 1,5 порядка и в формировании дислокационных

субструктур в слое, локализованном за поверхностно ионно-легированным слоем.

Достоинствами ионно-лучевой обработки являются:

- 1) универсальность (в зависимости от величины энергии ионов можно проводить легирование металла, очистку его поверхности от загрязнений, распыление тонких слоев основного материала, осаждение покрытий из ионных пучков);

- 2) возможность легирования любыми химическими элементами;
- 3) локальность обработки (с использованием защитных масок или узких ионных пучков);
- 4) высокая химическая чистота;
- 5) возможность полной автоматизации;
- 6) процесс дает возможность получать метастабильные фазы и пресыщенные твердые растворы, которые не удастся получить при других методах обработки поверхностного слоя заготовки.

Однако данная технология не свободна и от некоторых недостатков. В частности, обработка материала производится в зоне прямого действия пучка ионов, мала глубина модифицированного слоя (мкм). Следует также отметить, что ионная имплантация как метод поверхностного напыления является относительно дорогостоящим. Поэтому использовать его необходимо лишь при явных преимуществах перед другими методами. Особенно эффективно его применение при упрочнении дорогостоящих деталей на небольшую глубину, когда сердцевина не должна изменять свои свойства. Перспективен он и в случае необходимости повысить одновременно комплекс свойств, например, усталостную прочность, износостойкость и коррозионную стойкость, что другими методами выполнить трудно.