

В.П. Табаков

**МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ
И НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ**

Учебное пособие

Ульяновск
2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	.....
РУКОВОДСТВО ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ	.....
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ	.....
1.1. Классификация методов поверхностной модификации	.....
1.2. Механизмы упрочнения материала при поверхностной модификации	.....
Контрольные вопросы	.....
2. МЕТОДЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	.....
2.1. Статические методы деформационного упрочнения.	.....
2.2. Динамические методы деформационного упрочнения	.....
2.2. Упрочнение в магнитном поле	.....
Контрольные вопросы	.....
3. МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ	.....
3.1.Ионное азотирование	.....
3.2. Ионная имплантация	.....
3.3. Лазерная обработка	.....
3.4. Электронно-лучевая обработка	.....
3.5. Электроэрозионная обработка	.....
3.6. Другие методы термического воздействия и поверхностного легирования	.....
Контрольные вопросы	.....
4. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ	.....
4.1. Материалы, применяемые в качестве покрытий и требования предъявляемые к ним	.....
4.2. Подготовка поверхности перед нанесением покрытий	.....
4.3. Методы химического осаждения покрытий	.....
4.4. Методы физического осаждения покрытий	.....
4.5. Технологические принципы осаждения нанопокровтий	.....
4.6. Особенности процесса резания режущим инструментом с покрытиями	.....
Контрольные вопросы	.....
5. КОМБИНИРОВАННАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА	.....
5.1. Нанесение покрытий и лазерная обработка.	.....

5.2. Ионное азотирование и нанесение покрытий.	
5.3. Лазерное легирование и азотирование	
5.4. Криогенно-эрозионная обработка	
Контрольные вопросы	
Практическая работа № 1	
Практическая работа № 2	
Практическая работа № 3	
Тестовые задания	
Основная литература	
Дополнительная литература	

Введение

В настоящем учебном пособии методы поверхностной модификации и нанесения покрытий рассмотрены на примере их использования для режущих инструментов принимая во внимание тот факт, что повышение работоспособности режущего инструмента является важнейшим резервом интенсификации процесса резания и роста эффективности механообрабатывающего производства. Режущий инструмент является особым объектом механической обработки, от которого в первую очередь зависит работоспособность технологической системы в целом. Роль режущего инструмента еще больше возрастает на операциях механической обработки, характеризующихся повышенными теплосиловыми нагрузками – при высокоскоростном резании, при обработке деталей из закаленных, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей и сплавов, а также различных композиционных материалов.

В настоящее время отсутствуют универсальные инструментальные материалы, которые смогли бы обеспечить высокую работоспособность режущего инструмента при разнообразном характере условий его эксплуатации. Область применения современных инструментальных материалов определяется их физико-механическими свойствами – например, быстрорежущие стали характеризуются высокими прочностными свойствами, но имеют сравнительно невысокую твердость и теплостойкость, а режущая керамика, напротив, имеет высокие значения твердости и теплостойкости, но обладает низкими прочностными свойствами.

Работоспособность режущего инструмента во многом определяется свойствами его контактных площадок. Следовательно, повышение износостойкости контактных площадок режущего инструмента, изготовленных из традиционных инструментальных материалов, является эффективным направлением роста его работоспособности.

Повышение износостойкости контактных площадок режущего инструмента может быть обеспечено применением различных методов

поверхностной упрочняющей обработки (химико-термической, деформационной, нанесением износостойких покрытий, модификацией свойств поверхностного слоя инструмента и другими способами).

В учебном пособии рассмотрены физические и технологические основы современных методов нанесения покрытий, поверхностного легирования, термической, деформационной и комбинированной обработки, показано их влияние на физико-механические свойства поверхностного слоя и эксплуатационные показатели режущего инструмента.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

1.1. Классификация методов поверхностной модификации

В данном учебном пособии рассматриваются методы, связанные с воздействием на рабочие поверхности режущего инструмента концентрированных потоков энергии – ионного пучка, лазерного луча и др., а также различного деформационного воздействия. Такие классические методы химико-термической обработки, как, например, азотирование, низкотемпературное цианирование, нитроцементация, карбонитрация в печах или соляных ваннах, которые используются в отечественной инструментальной промышленности на протяжении уже нескольких десятилетий, рассматриваться не будут.

Все многообразие используемых в инструментальном производстве методов поверхностной упрочняющей обработки можно разделить на 5 групп: деформационное воздействие; термическое воздействие; поверхностное легирование; нанесение покрытий; комбинированная обработка (рис. 1.1).

Методы, относящиеся к различным группам, оказывают различное воздействие на поверхность и поверхностный слой режущего инструмента. При деформационном воздействии происходит наклеп поверхностного слоя режущего инструмента, изменяется его микрогеометрия и энергетический запас. Результатом термического воздействия на поверхностный слой инструмента является изменение его структуры, при этом его химический состав остается неизменным. Поверхностное легирование изменяет химический состав и, как правило, структуру поверхностного слоя режущего инструмента. При нанесении покрытий на поверхности режущего инструмента происходит формирование тонкой пленки. На рис.1.2 представлено приближенное процентное соотношение между различными группами методов поверхностной

Нанесение покрытий и модификация рабочих поверхностей инструментов

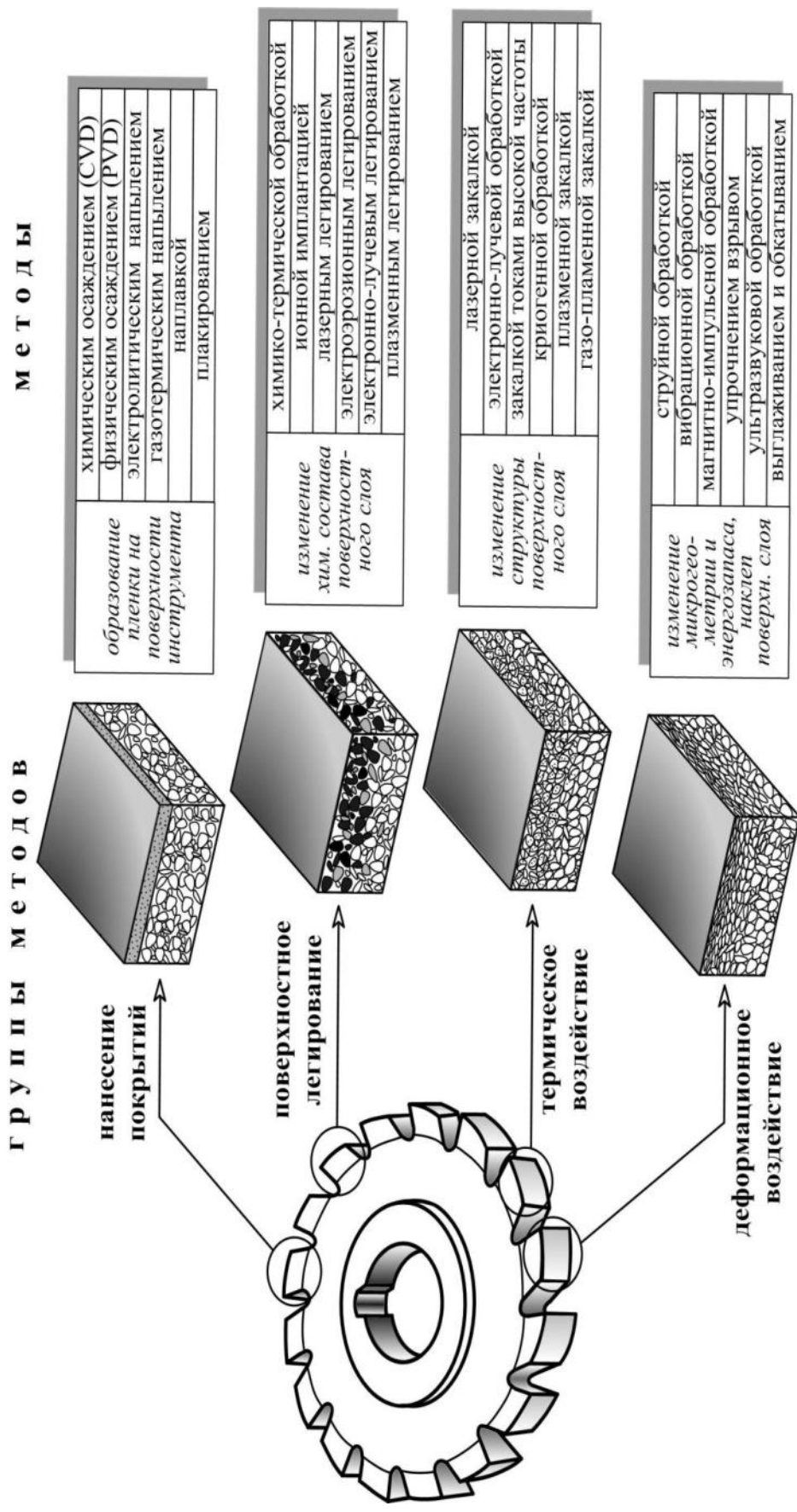


Рис. 1.1. Классификация методов поверхностного упрочнения режущих инструментов

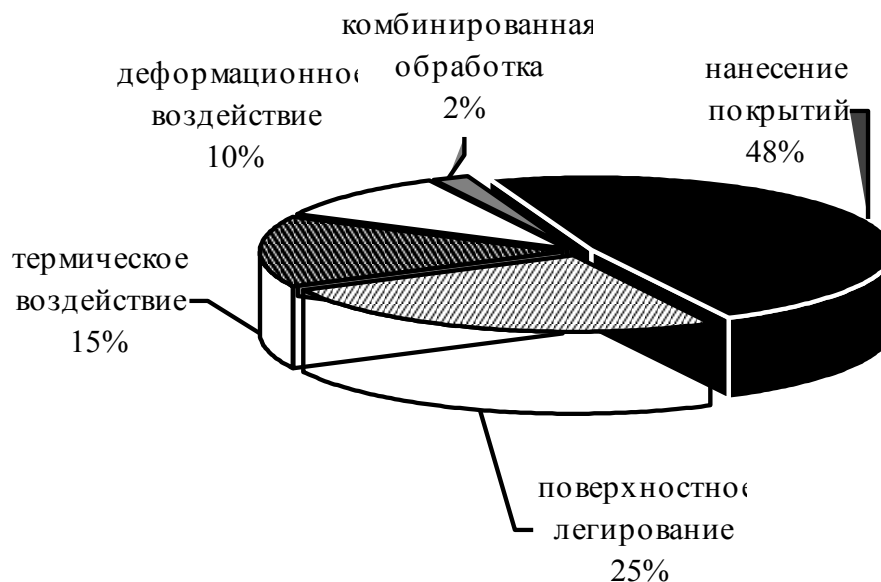


Рис. 1.2. Доля различных групп методов нанесения покрытий и модификации поверхности в инструментальном производстве

упрочняющей обработки, применяющихся при производстве режущего инструмента. В табл. 1.1 представлены общие сведения по областям применения методов поверхностного упрочнения для различных видов инструментальных материалов. Более подробно вопросы целесообразного применения того или иного метода поверхностной упрочняющей обработки для повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента будут рассмотрены далее.

1.2. Механизмы упрочнения инструментальных материалов

С точки зрения классического металловедения применение любого из методов поверхностной упрочняющей обработки приводит к упрочнению поверхностного слоя режущего инструмента за счет четырех принципиально различных механизмов (либо их комбинаций). Это субструктурное, твердорастворное, поликристаллическое и многофазное упрочнения.

Субструктурное упрочнение (упрочнение дислокациями)

В чистых металлах увеличение сопротивления изнашиванию и разрушению осуществляется исключительно за счет субструктурного

упрочнения. Субструктурное упрочнение достигается при введении в кристаллическую решетку большого числа дефектов – дислокаций при их плотностях, достигающих значений 10^{14} - 10^{15} м⁻².

Дислокации, скользящие через хаотически расположенные неподвижные дислокации, испытывают со стороны последних сопротивление. Скользящие дислокации могут пересекать неподвижные.

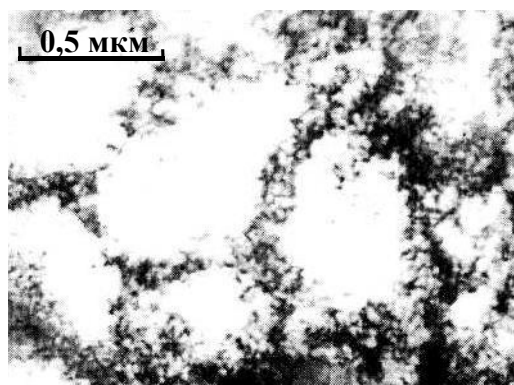
1.1. Области применения различных методов нанесения покрытий и поверхностной модификации режущих инструментов

Группа	Метод	Вид инструментального материала				
		углеродистые и легированные стали	БРС	твердые сплавы	керамика	СТМ
Нанесение покрытий	химическое осаждение (HT-CVD)		+	+	+	+
	физическое осаждение (PVD)		+	+	+	+
	электролитический способ		+	+		
	газо-термическое напыление	+	+	+		
	наплавка	+	+	+		
Поверхностное легирование	химико-термическая обработка	+	+	+		
	ионная имплантация	+	+	+	+	+
	лазерное легирование	+	+	+	+	
	электроэрозионное легирование					
	плазменное легирование	+	+	+	+	
Термическое воздействие	лазерная закалка	+	+			
	электронно-лучевая обработка	+	+			
	криогенная обработка	+	+			
	газо-пламенная закалка	+	+			

	закалка ТВЧ	+	+			
Деформационное воздействие	дробеструйная обработка	+	+			
	магнитно- импульсная обработка	+	+	+		
	упрочнение взрывом	+	+	+	+	
	выглаживание и обкатывание	+	+	+	+	
	ультразвуковая обработка	+	+	+	+	

Благодаря упругому взаимодействию и междислокационным реакциям дислокации не сохраняют хаотического расположения, а создают различные субструктуры, отличающиеся определенным порядком в их расположении. Электронно-микроскопическое изображение некоторых типов дислокационных субструктур представлено на рис. 1.3.

Сопротивление движению дислокации через упорядоченное расположение дислокаций (через субструктуру) отличается от сопротивления при движении через их хаотическое распределение. Если в последнем случае оно зависит только от плотности дислокаций, то при организации субструктуры оно уже зависит от параметров последней. Это явление и называется субструктурным упрочнением. Как уже указывалось выше, оно в основном формирует упрочнение чистых металлов.



а)

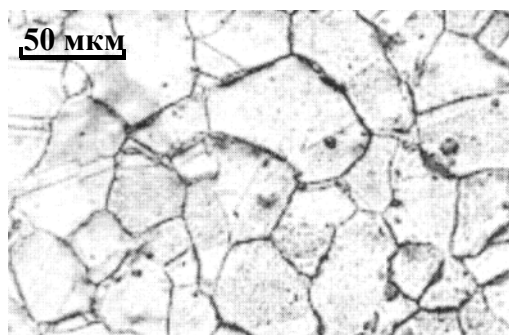


б)

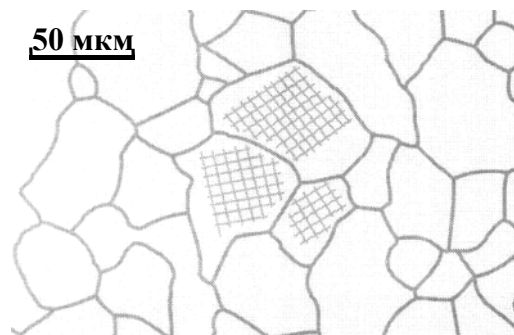
Рис. 1.3. Электронно-микроскопическое изображение некоторых типов дислокационных субструктур:
а – дислокационные ячейки; б – микрополосовая субструктура

Твердорастворное упрочнение (упрочнение атомами внедрения или замещения). Твердорастворное упрочнение основано на введении в кристаллическую решетку основного металла элементов замещения или внедрения. Если при введении второго элемента в кристаллическую решетку основного металла его решетка сохраняется, а атомы этого второго элемента замешают часть атомов основного элемента на их законных узлах, то в этом случае образуется твердый раствор замещения. Если же при введении второго элемента атомы его располагаются в междоузлиях кристаллической решетки основного металла и она также сохраняется, то имеют дело с твердым раствором внедрения. При взаимодействии атомов замещения или внедрения с атомами основного металла, во-первых, может образоваться определенный порядок в расположении атомов (ближний или дальний), и, во-вторых, кристаллическая решетка основного металла искажается вследствие различного размера атомов, образующих твердый раствор. Особенно большие искажения возникают при образовании твердых растворов внедрения (например, атомы углерода или азота в сплавах железа). В процессе пластической деформации дислокации при своем движении разрушают ближний порядок в сплаве и преодолевают искажения кристаллической решетки. Это повышает работу сопротивления материала изнашиванию и хрупкому разрушению. Твердорастворное упрочнение является одним из наиболее распространенных механизмов упрочнения сталей, широко используемым в технике.

Поликристаллическое упрочнение (упрочнение границами зерен). Большинство используемых на практике материалов – поликристаллы.



а)



б)

Рис. 1.4. Поликристаллический материал:
а – наблюдение зерен на поверхности материала в металлографическом
микроскопе, б – схематическое изображение этой картины (штриховка –
обозначение
кристаллических решеток в зернах)

Поликристаллическое тело (рис. 1.4) состоит из областей (зерен), каждая из которых представляет собой монокристалл, но эти отдельные монокристаллы повернуты друг относительно друга на некоторый угол (десятки градусов). Границы, разделяющие зерна, называются границами зерен. Наличие границ зерен в поликристалле приводит к его дополнительному упрочнению по сравнению с монокристаллом. С уменьшением среднего размера зерна сопротивление деформированию в большинстве случаев существенно возрастает.

Как известно, ультрамелкозернистые материалы, в частности твердые сплавы, значительно лучше сопротивляются нагрузкам, возникающим в процессе эксплуатации режущего инструмента. Это является следствием того, что мелкие зерна в своих границах накапливают большую избыточную энергию. Для ограничения их роста при повышенных температурах границы зерен закрепляют малорастворимыми частицами вторых фаз. Они препятствуют миграции (движению) границ и тем самым росту зерен. Эффективность закрепления границ зерен определяется размером частиц и объемной долей частиц второй фазы.

Многофазное упрочнение (упрочнение дисперсными частицами).
 Многофазное упрочнение заключается чаще всего в образовании мелких

выделений второй фазы в матрице основного металла или сплава. Эти выделения могут иметь ту же самую или иную кристаллическую решетку, создавать поля напряжений, быть перерезаемыми или непроходимыми для дислокаций. В любом случае они создают дополнительные препятствия для движения дислокаций и могут значительно повышать сопротивление изнашиванию и хрупкому разрушению материала.

На рис. 1.5 можно наблюдать частицы второй фазы в алюминиевом сплаве, где также хорошо прослеживаются дислокации в виде темных линий.

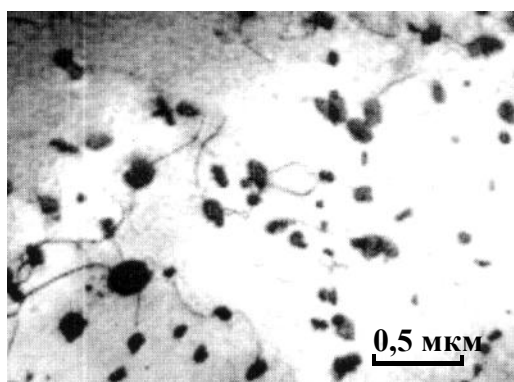


Рис. 1.5. Частицы второй фазы в алюминиевом сплаве, полученные электронной микроскопией

В отличие от твердорастворного, субструктурного и поликристаллического многофазное упрочнение может серьезно снизить пластичность материала, что часто является существенной проблемой для практического использования таких материалов.

Рассмотрим механизмы упрочнения материала износостойкого покрытия при нанесении его методом физического осаждения и в частности – методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ). Основным направлением повышения работоспособности режущего инструмента с покрытием является структурное упрочнение материала покрытия. Пути создания высокопрочного состояния металлов хорошо известны и основаны на создании препятствий движению дислокаций, в качестве которых могут быть примеси, границы зерен, фаз. Пределом повышения прочности является теоретическая прочность, достигнутая на бездефектных

(бездислокационных) нитевидных кристаллах. Однако реальная прочность металлов падает с увеличением числа дислокаций только вначале. Достигнув минимального значения при некоторой плотности дислокаций, она вновь начинает возрастать.

Повышение реальной прочности материала с возрастанием плотности дислокаций объясняется как возникновением параллельных друг другу дислокаций, так и дислокаций, расположенных в разных плоскостях и направлениях. Такие дислокации мешают перемещаться друг другу и реальная прочность материала возрастает. Прочность материала покрытия оценивается уровнем предела текучести. Однако при анализе механизмов упрочнения необходимо рассматривать не только зависимость «предел текучести-микроструктура», но и зависимость «вязкость разрушения-микроструктура». Поэтому для оценки возможности реального, эффективного упрочнения материала покрытия, т. е. повышение предела текучести σ_m без существенного снижения вязкости разрушения K_{ICP} , необходимо сопоставлять механизмы увеличения предела текучести с допустимыми изменениями вязкости разрушения. Таким образом, требуется комплексное рассмотрение системы «предел текучести-вязкость разрушения-микроструктура».

Если по первой части этой задачи накоплен определенный опыт (известны многие зависимости типа Петча-Холла), то решение второй задачи вызывает значительные трудности. Это объясняется тем, что зависимости «предел текучести-микроструктура» и «вязкость разрушения-микроструктура» принципиально различны. То, что препятствует скольжению, способствует разрушению и наоборот. Для оценки возможности реального, эффективного упрочнения металлов, т.е. повышения предела текучести, без существенного снижения вязкости разрушения, необходимо сопоставить дислокационные механизмы увеличения предела текучести с допустимым изменением вязкости разрушения.

В современной дислокационной теории пластической деформации и разрушения предел текучести и вязкость разрушения являются функциями следующих параметров:

$$\sigma_m, K_{ICП} = f(\sigma_n, \sigma_d, \sigma_p, \sigma_\phi, \sigma_z), \quad (1.1)$$

где σ_n – напряжение Пайерлса-Набарро (напряжение трения кристаллической решетки); σ_d – упрочнение увеличением числа дефектов решетки (вакансий и дислокаций); σ_p – упрочнение растворенными атомами; σ_ϕ – упрочнение дисперсными фазами, имеющимися или специально созданными в структуре покрытия; σ_z – упрочнение микроструктурными барьерами на пути движущихся дислокаций в виде границ зерен, границ двух фаз, узких прослоек второй фазы.

Повышение напряжения трения решетки матрицы σ_n приводит к некоторому росту предела текучести, но одновременно резко снижается критическое напряжение разрушения. Напряжение Пайерлса-Набарро сильно зависит от типа связи и увеличивается при усилении доли ковалентности в межатомной связи. Торможение дислокаций рельефом Пайерлса процесс низкотемпературный. Так в железе сила Пайерлса определяет подвижность дислокаций при температуре ниже $0,03 T_{пл}$ и лишь в ковалентных кристаллах Si, Ge, SiC, Si₃N₄ вплоть до $0,45 T_{пл}$. Поэтому необходимо учитывать влияние напряжения Пайерлса-Набарро на прочность износостойких покрытий. Покрытия, получаемые физическим осаждением из паровой фазы, как показывают исследования, имеют число дислокаций, близкое к критическому ($\sim 10^{16} \text{ м}^{-2}$), поэтому упрочнение, связанное с увеличением их числа практически неосуществимо. Упрочнение дисперсными фазами также является перспективным механизмом повышения прочности износостойких покрытий. Однако он возможен только в системах, содержащих две и более фазы.

Основным механизмом изменения физико-механических свойств износостойких покрытий является упрочнение растворенными атомами, так

как покрытия конструируются на базе концентрированных твердых растворов или химических соединений. Изменяя состав твердого раствора, можно оптимизировать его физико-механические характеристики за счет изменения типа химической связи. Кроме того, примесные атомы сильно снижают подвижность дислокаций и повышают стабильность дислокационной структуры (т.е. замедляют протекание процессов возврата и рекристаллизации) и следовательно могут обеспечить стабильность структуры конденсата, т.е. предотвращать или замедлять процессы старения.

Модифицирование твердых растворов за счет легирования материала покрытия технологически возможно по двум механизмам: первый это раствор замещения в подрешетке металлоида; процесс осуществляется за счет направленного изменения состава газовой среды в камере и наличия в ней остаточных газов, при этом образовывается соединение по типу MeX_1X_2 , второй механизм это раствор замещения в подрешетке металла; процесс осуществляется за счет направленного «подпыления» различных элементов. В этом случае образовывается соединение по типу Me_1Me_2X . Возможно также протекание обоих механизмов одновременно с образованием сложных соединений.

В соединениях по первому типу введение второго металлоида меняет и число электронов на атом, усиливая ковалентную связь, и отклонение от стехиометрии. Внедрение в подрешетку металлоида X_1 другого металлоида X_2 приводит к искажениям кристаллической решетки из-за большей силы связи X_1-X_2 . Изменяя объем и жесткость связей, металлоид X_2 участвует в более сильном закреплении дислокаций на примесных атомах. Для такого соединения наблюдаются экстремальные зависимости прочности при изгибе и твердости.

Твердорастворное упрочнение материала покрытия по второму механизму имеет значительно более широкие возможности. Все легирующие элементы в этом случае подразделяются на две большие группы: элементы, образующие соединения с неограниченной растворимостью, и элементы,

образующие соединения с ограниченной растворимостью или не взаимодействующие между собой. При легировании твердого раствора TiN к элементам первой группы относятся Zr, Mo, Cr, V, Ta, Nb, Hf. Они также как нитрид титана образуют нитриды с ГЦК решеткой, обладают высокой твердостью и износостойкостью. В силу их взаимной неограниченной растворимости с нитридом титана состав покрытия можно регулировать в широких пределах и тем самым подбирать его свойства. Среди нитридообразующих элементов второй группы выделяют Al, Fe, Si, B. Ограниченная взаимная растворимость таких нитридов, а также наличие тройных соединений позволяет предположить, что в покрытиях на основе нитрида титана, легированного элементами второй группы, кроме механизма твердорастворного упрочнения возможно действие механизма дисперсионного упрочнения. Элементы второй группы являются относительно дешевыми и распространенными материалами. Легирующий элемент Me_2 взаимодействует как с металлом так и с металлоидом. При этом действие различных механизмов упрочнения в разной степени влияет на формирование свойств покрытия. Из многих воздействий легирующего элемента на металлоид наиболее явное – изменение термодинамической активности примеси X. Ближний порядок «замещение-внедрение» дает такой тип препятствий, как пары Me_2 -X. В зависимости от поля смещений пара Me_2 -X как препятствие может оказаться сильнее одиночного атома внедрения. Поэтому упрочнение материала покрытия легированием по второму механизму влияет на величину силы Пайерлса. Это проявляется в увеличении внутреннего трения и, следовательно, предела текучести растворов типа Me_1Me_2X , причем с повышением температуры это изменение проявляется более отчетливо. Кривые упрочнения таких растворов имеют экстремум.

Представляют интерес для использования в качестве легирующих компонентов элементы, не образующие нитриды с необходимым комплексом свойств, но образующие химические соединения (интерметаллиды) с

титаном как основы покрытия. К таким элементам относятся никель и медь. Введение их в состав покрытия также может привести к дополнительному упрочнению материала покрытия.

Степень упрочнения твердого раствора при полном растворении легирующего элемента по теории Мотта-Набарро можно выразить уравнением:

$$\Delta\sigma = \sigma_a^{3/4} \cdot C, \quad (1.2)$$

где $\sigma_a \approx \frac{1}{a} \cdot \frac{da}{dC}$ - параметр линейного несоответствия; a – период решетки; C – концентрация растворенных атомов.

Причем при одинаковой концентрации C степень упрочнения выше в случае, когда размеры растворенного атома меньше атома растворителя, чем при обратном соотношении размеров.

По теории Флейшера, кроме несоответствия по размерам учитывается и несоответствие по модулям упругости элементов $\sigma_a \approx \frac{1}{c} \cdot \frac{dc}{da}$, но обычно его вклад в величину $\Delta\sigma$ невелик.

В случае образования химсоединения степень упрочнения будет зависеть как от прочности интерметаллида, так и от концентрации примесей (например, для сплава Ti + 4% Al $\sigma_B = 680$ МПа, а для Ti + 5%Al $\sigma_B = 820$ МПа). Данный механизм (образование интерметаллидов) можно рассматривать как достаточно перспективный для упрочнения износостойких покрытий, т. к. интерметаллиды обладают очень высокой твердостью, и, что немаловажно, являются хорошим барьером для протекания диффузионных процессов, что должно способствовать повышению эффективности режущего инструмента с покрытиями.

В случае конденсированных пленок примесные атомы могут попадать в покрытие вследствие наличия остаточных газов в камере, адсорбированных атомов и т.д. Известно, что с повышением давления остаточных газов вакуума при конденсации прочностные характеристики пленок, в частности

микротвердость, возрастают. Отношение числа молекул остаточных газов N' и испаряемого вещества N , попадающих на единицу площади подложки в единицу времени, находятся в определенной зависимости от физических параметров процесса – температуры конденсации T_K и скорости осаждения V_K :

$$\frac{N'}{N} = \frac{A}{\sqrt{T_K}}, \quad (1.3)$$

где A – константа, зависящая от молекулярной массы испаряемого вещества (для данного сорта атомов примеси), давления остаточного газа и плотности покрытия.

При нанесении покрытий методом КИБ зависимость скорости роста покрытия от температуры может быть представлена в виде:

$$V_K = V_0 - k \cdot T_K, \quad (1.4)$$

где величины V_0 и k определяются сортом распыляемых атомов и схемой распыления.

С учетом (1.4) выражение (1.3) можно привести к виду:

$$\frac{N'}{N} = \frac{A}{(V_0 - k \cdot T_K) \sqrt{T_K}}. \quad (1.5)$$

Из полученного выражения видно, что температурная зависимость дефектности покрытия $D_I = N'/N$, обусловленная наличием атомов остаточных газов, немонотонна и существует температура «минимальной дефектности» $T = V_0/3 \cdot k$, определяемая из условия $d(N'/N)/dT_K = 0$. Таким образом, из приведенных рассуждений понятно, что основным технологическим параметром, от которого зависит степень упрочнения покрытия за счет остаточных газов вакуума (дефектность D_I), является температура конденсации T_K . В то же время величина T_K определяет и неравновесное содержание вакансий, «замурованных» в конденсате (дефектность D_2),

наличие которых также приводит к упрочнению материала покрытия. Причем число вакансий резко растет как с понижением температуры, так и с увеличением скорости конденсации, что, как отмечено выше, для метода КИБ наблюдается также с уменьшением температуры конденсации. На рис. 1.6 показан характер изменения степени дефектности покрытия от температуры конденсации. При построении общей зависимости дефектности покрытия от температуры следует учитывать тот факт, что уменьшение температуры конденсации может приводить к измельчению субструктуры конденсата и повышению в нем плотности дислокаций, т.е. к увеличению дефектности покрытия D_3 . При $T_K < T_{min}$ суммарная дефектность D_4 резко растет с уменьшением T_K ; при $T_K > T_{min}$ ход зависимости зависит от соотношения $d(D_1)/dT$ и $d(D_2)/dT$ и, в общем случае, может как возрастать, так и убывать.

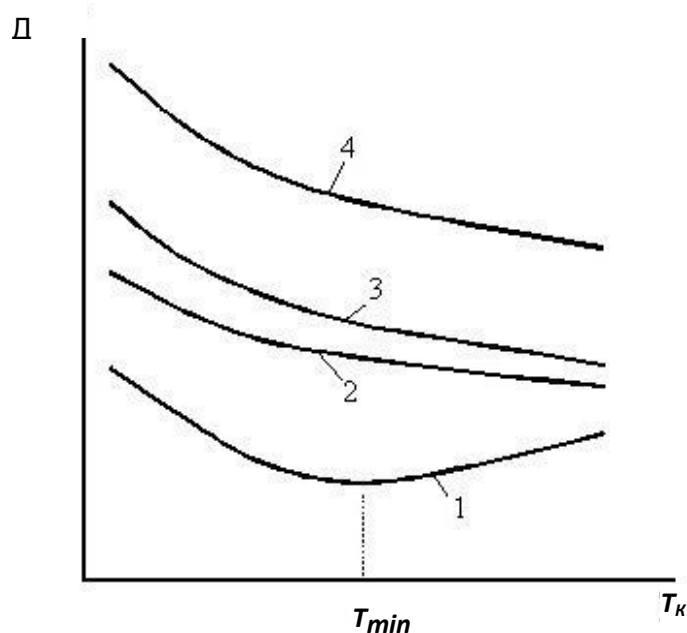


Рис. 1.6. Гипотетические зависимости дефектности покрытия D от температуры конденсации T_K :

1 – за счет примесных атомов остаточных газов D_1 ; 2 – за счет роста числа вакансий D_2 ; 3 – за счет измельчения микроструктуры и роста плотности дислокаций D_3 ;
4 – суммарная дефектность D_4

Таким образом, снижение температуры конденсации приводит к увеличению дефектности конденсата и повышению его механических свойств. Отсюда следует ожидать существенного повышения твердости,

износостойкости материала покрытия за счет формирования его при снижении температуры конденсации.

Нанесение покрытий методом конденсацией с ионной бомбардировкой (КИБ) осуществляется при подаче в вакуумную камеру установки реакционного газа: азота, метана, ацетилена. Изменение газовой среды оказывает влияние на свойства покрытий, в частности на их микротвердость. Изменение микротвердости покрытий при этом может быть связано с электронной структурой материала покрытия, т.к. твердость и прочность в первую очередь определяются структурой материалов. В то же время, наблюдаемое уменьшение зерна промежуточных составов покрытия по сравнению с исходным твердым раствором позволяет сделать предположение, что изменение газовой среды, например, добавление углеродсодержащего газа (ацетилена) при конденсации покрытий на основе карбонитридов аналогично действию легирующих компонентов в покрытии сложного состава и вызывает твердорастворное упрочнение материала покрытия.

Упрочнение микроструктурными барьерами (границы зерен, раздел двух фаз, прослойки второй фазы) также может быть перспективным методом создания высокопрочного состояния материала износостойкого покрытия. Известно, что резервом значительного повышения прочности пленок является уменьшение их толщины. Это позволяет создавать пленочные композиции микроскопических размеров, состоящих из тонких поликристаллических пленок с прочностью, не достижимой для массивных материалов. основной причиной такого характера зависимости является то, что при уменьшении величины h , начиная с некоторых толщин, наблюдается существенное измельчение кристаллов, приводящее к упрочнению конденсата.

Упрочнение микроструктурными барьерами может реализовываться при создании микрослоистых материалов. Этому способствуют протекающие при нанесении покрытия процессы испарения (распыления) и конденсации,

которые открывают практически неограниченные возможности в конструировании микрослойных материалов.

Варьируя толщиной чередующихся микрослоев, можно в широких пределах регулировать механические свойства таких материалов.

Предел текучести микрослойных материалов можно выразить соотношением:

$$\delta_m = \delta_{0n} + \frac{\alpha G_n b_n}{d} f, \quad (1.6)$$

где σ_{0n} , G_n , b_n – соответственно предел текучести, модуль сдвига и вектор Бюргерса кристаллической решетки материала несущего слоя; d , f – соответственно средний размер и объемная доля частиц второй фазы; α – коэффициент, слабо зависящий от природы и формы дисперсных частиц.

Соответствующим выбором материалов чередующихся микрослоев можно изменять другие физико-химические свойства микрослойных материалов, например, теплопроводность, температурный коэффициент линейного расширения, твердость, прочность.

Анализ технологических условий осаждения покрытий, показывает, что упрочнение материала износостойкого покрытия в данном случае возможно за счет твердорастворного механизма упрочнения путем изменения состава покрытия при его легировании, изменении состава газовой среды при конденсации покрытий на основе карбонитридов и за счет остаточных газов вакуума при варьировании температурой конденсации покрытия. Кроме того, упрочнение материала покрытия возможно за счет упрочнения микроструктурными барьерами при создании слоистости структуры покрытия без изменения или с изменением его состава.

Контрольные вопросы

1. Назовите методы поверхностной модификации.
2. Перечислите механизмы упрочнения инструментальных материалов.
3. Что такое субструктурное упрочнение.
4. На чем основано твердорастворное упрочнение.

5. Объясните поликристаллическое упрочнение материала.
6. В чем заключается многофазное упрочнение.
7. Перечислите возможные механизмы упрочнения материала износостойкого покрытия
8. Назовите наиболее эффективный механизм упрочнения материала износостойкого покрытия.

2. МЕТОДЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

2.1. Статические методы деформационного упрочнения

Методы поверхностного упрочнения, основанные на деформационном воздействии, не получили широкого распространения при производстве режущего инструмента. Главным образом, они применяются для упрочнения деталей машин широкой номенклатуры, но имеется немало примеров их эффективного применения для упрочнения режущего инструмента.

Каждый метод упрочняющей обработки, основанный на деформационном воздействии на режущий инструмент, характеризуется своей механикой деформирования, специфическими особенностями формирования геометрических и физико-механических свойств поверхностного слоя, а также условиями протекания процесса.

Механика поверхностного пластического деформирования предопределяется характером воздействия деформирующего элемента на режущий инструмент. В зависимости от этого способы деформационного упрочнения разделяются на статические и динамические. Для статических способов (обкатывание, выглаживание и др.) характерны постоянство во времени силы деформационного воздействия и непрерывность контакта деформирующего элемента и режущего инструмента. Для динамических способов (дробеструйная, вибрационная, ультразвуковая обработка, чеканка др.) характерно импульсное воздействие деформирующих элементов на поверхность режущего инструмента в условиях прерывистого контакта. Также в последнее время распространение получили способы, сочетающие статические и динамические нагрузки.

Для реализации указанных способов используются «твердые» деформирующие элементы – шарики, ролики, гранулированное вещество (металлическая, стеклянная дробь, абразив и др.). Кроме того, при деформационном воздействии на режущий инструмент может в качестве

деформирующего элемента может выступать некая среда, например, магнитное поле.

Под давлением деформирующего элемента на поверхностный слой инструмента в его наружных слоях происходит остаточная пластическая деформация и вследствие уплотнения дислокаций происходит так называемый наклеп поверхности, повышается ее микротвердость, снижается шероховатость, а также создаются благоприятные напряжения (остаточные напряжения сжатия). Последнее особенно важно, учитывая то, что после шлифования в поверхностном слое инструмента, как правило, присутствуют остаточные напряжения растяжения, существенно увеличивающие вероятность хрупкого разрушения поверхностного слоя инструмента в процессе эксплуатации.

На рис. 2.1 представлены сравнительные данные о характеристиках поверхностного слоя, достигаемых применением статических и динамических способов деформационного воздействия. Видно, что применение статических способов (обкатывания, раскатывания и выглаживания) обеспечивает достаточно большие значения микротвердости и остаточных напряжений сжатия при сравнительно небольшой глубине упрочненного слоя. Динамические способы (дробеструйная, гидродробеструйная обработка и чеканка) также обеспечивают большие значения микротвердости и остаточные напряжения сжатия, но при этом имеет место значительно большая глубина упрочненного слоя. Кроме того, в последнем случае наблюдается более плавный переход от упрочненной к неупрочненной поверхности. В то же время при использовании некоторых динамических способов может наблюдаться существенное ухудшение исходной шероховатости поверхности инструмента.

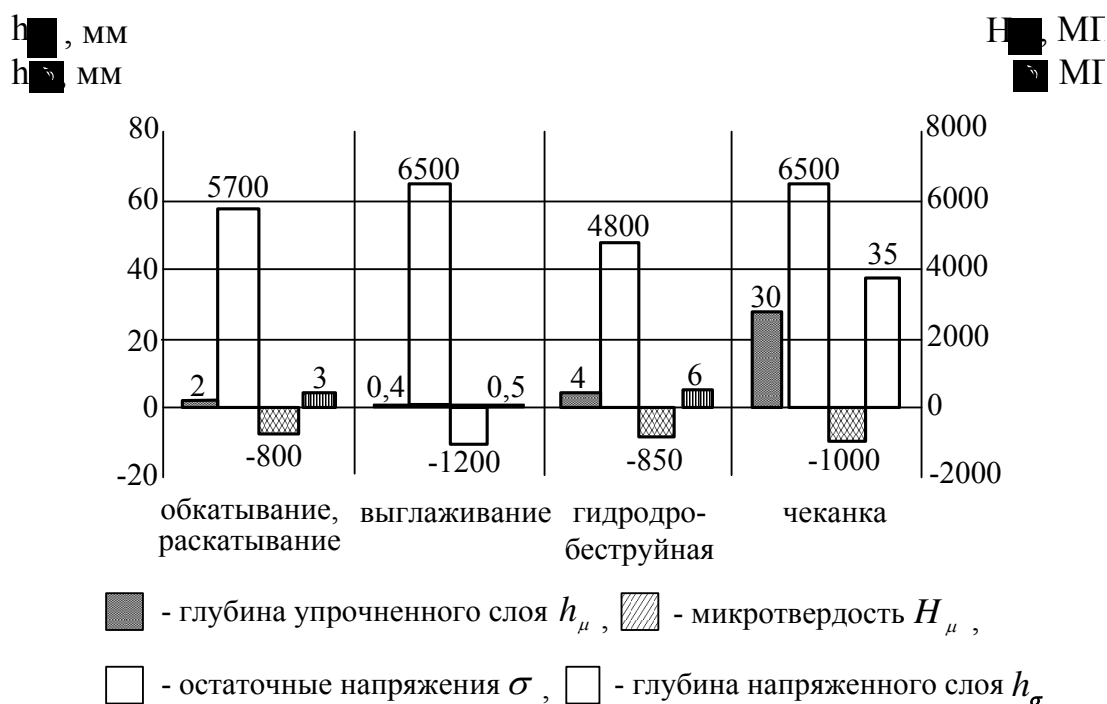


Рис. 2.1. Характеристики поверхностного слоя, достигаемые применением различных способов деформационного воздействия

2.1. Статические методы деформационного упрочнения

Разновидностями методов статического поверхностного деформирования являются обкатывание (обработка наружных поверхностей), раскатывание (обработка внутренних поверхностей), накатывание (рифление поверхности) и алмазное выглаживание. Применительно к режущему инструменту в промышленности используются обкатывание и выглаживание. При реализации этих методов применяется специальный деформирующий элемент, который взаимодействует с обрабатываемой поверхностью режущего инструмента по схемам качения, скольжения или внедрения.

Обкатывание осуществляют специальным инструментом, рабочими элементами которого являются шарики или ролики, изготовленные из закаленных сталей или твердых сплавов. Наличие различных вращательных и поступательных движений позволяет обрабатывать различные поверхности (плоские, цилиндрические, фасонные). Выглаживание производят

инструментом, рабочим элементом которого является алмазный, твердосплавный или керамический индентор (наконечник), скользящий по обрабатываемой поверхности. Этим методом можно обрабатывать все виды поверхностей – от плоских до фасонных.

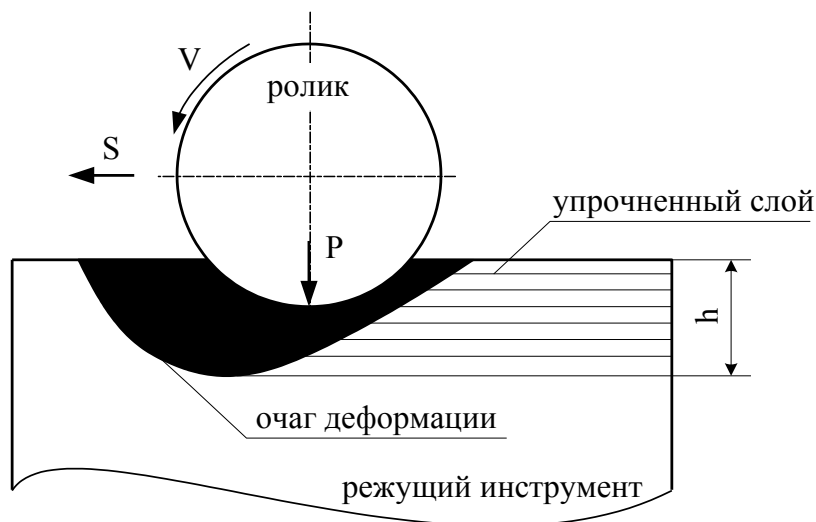


Рис. 2.2.
Принципиальная
схема обкатывания
роликом

На рис. 2.2 представлена принципиальная схема процесса обкатывания режущего инструмента роликом. Сущность метода заключается в том, что ролик прижимается к поверхности режущего инструмента с фиксированной силой P , перемещается относительно нее, совершая при этом вращение вокруг своей оси. Иногда могут использоваться и другие схемы обработки, при которых обрабатываемое изделие совершает вращательное или поступательное движение. В зоне локального контакта ролика с обрабатываемой поверхностью инструмента возникает очаг пластической деформации, который перемещается вместе с деформирующим элементом, благодаря чему поверхностный слой режущего инструмента последовательно деформируется на глубину h , равную глубине распространения очага деформации.

На рис. 2.3 представлена типичная конструкция инструмента, используемого для пластического деформирования наружных цилиндрических поверхностей методом обкатывания. Хвостовик инструмента закрепляют в резцедержателе или специальном приспособлении

станка. Обкатывание обрабатываемой поверхности производится шариком, который упирается в наружную обойму подшипника, насаженного на ось, и удерживается от выпадания колпачком со стопором. Под действием усилия обкатывания шарик отжимается и перемещает пиноль в расточке корпуса, которая сжимает пружину. Последняя, с одной стороны, упирается в подпятник, а с другой - в пробку, с помощью которой регулируется сила сжатия пружины. Пиноль удерживается от разворота в корпусе с помощью болта.

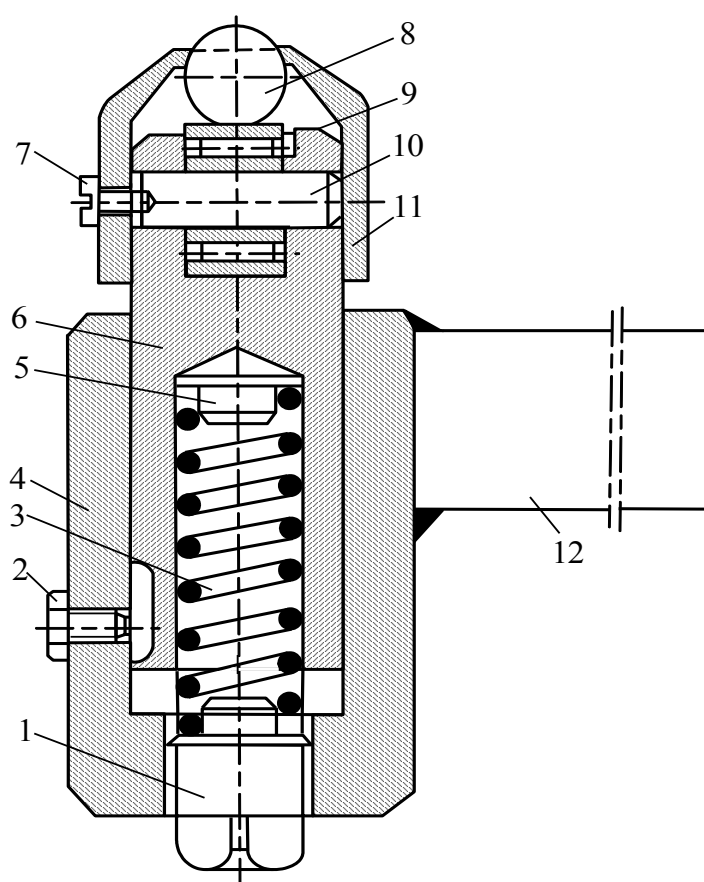


Рис. 2.3. Конструкция инструмента для деформирования методом обкатывания шариком:

1 – пробка, 2 – болт, 3 – пружина, 4 – корпус, 5 – подпятник, 6 – пиноль, 7 – стопор, 8 – шарик, 9 – подшипник, 10 – ось, 11 – колпачок, 12 – хвостовик

Алмазное выглаживание режущего инструмента по своей сути аналогично обкатыванию и заключается в пластическом деформировании поверхностных слоев обрабатываемого инструмента кристаллом алмаза, рабочая часть которого может иметь различную форму. Алмазный инструмент, прижимаемый с определенной силой, скользит по поверхности

обрабатываемого изделия (режущего инструмента), сглаживая микронеровности и упрочняя ее.

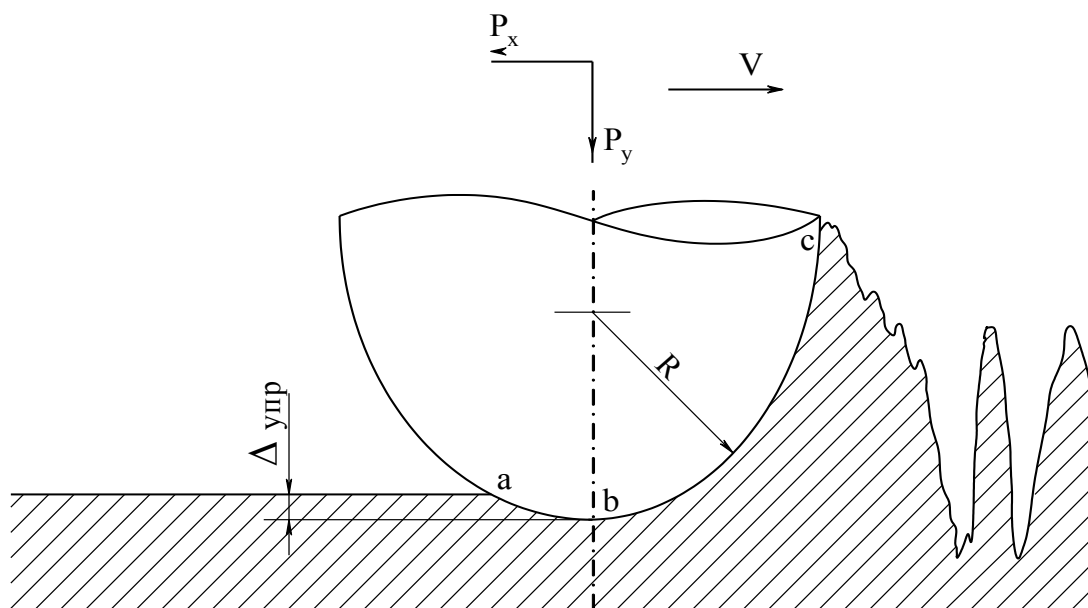


Рис. 2.4. Схема деформации поверхности при выглаживании

На рис. 2.4 показана схема деформации поверхностного слоя при выглаживании. Прижатый к обрабатываемой поверхности с силой P_y инструмент внедряется в нее на определенную глубину и при своем движении сглаживает исходные неровности. После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности на величину $\Delta_{упр}$. Контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью в сечении происходит по дуге $авс$.

При выглаживании применяются наконечники из природного и синтетического алмазов с различной формой огранки (рис. 2.5). Инструмент со сферической формой (рис. 2.5, а) позволяет обрабатывать наружные, внутренние и плоские поверхности. Цилиндрическую форму (рис. 2.5, б) применяют только для обработки наружных цилиндрических поверхностей. Тороидальная форма (рис. 2.5, в) не нашла широкого применения из-за сложности изготовления алмазов большого размера. Кроме того, может быть использован конический выглаживатель (рис. 2.5, г), который работает большой поверхностью конуса.

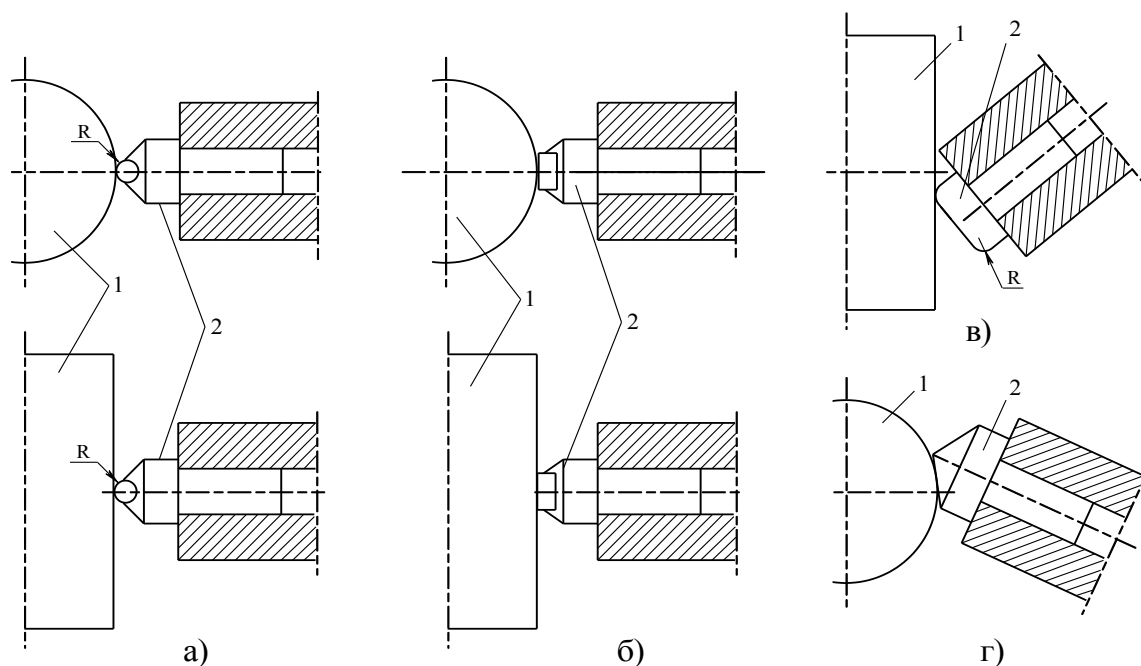


Рис. 2.5. Различные формы деформирующего элемента, использующиеся при алмазном выглаживании (1 – обрабатываемое изделие, 2 – выглаживатель)

Размеры очага деформации, а также свойства, которые приобретает упрочненный поверхностный слой (толщина слоя, шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения) зависят от давления деформирующего элемента на обрабатываемую поверхность, его формы, размеров и материала, подачи и скорости, числа проходов. Также, на свойства формируемого слоя оказывают влияние исходная твердость инструментального материала, шероховатость поверхности, а также форма и размеры режущего инструмента.

На рис. 2.6-2.9 представлены характерные зависимости распределения остаточных напряжений σ по глубине поверхностного слоя h образцов из легированной стали типа 45ХНМФА после обкатывания роликом при различных технологических режимах обработки – скорости вращения изделия, подачи и давления обкатного ролика, а также количестве проходов.

Как видно из данных, представленных на рис. 2.6, после чистового шлифования в поверхностном слое изделия формируются растягивающие напряжения, в то время как после обкатывания – напряжения сжатия.

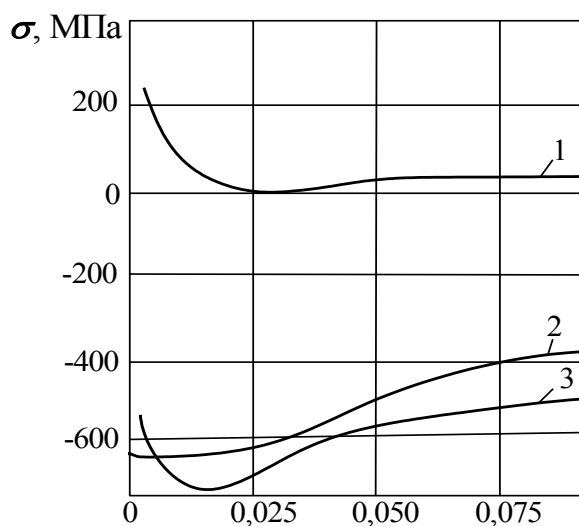


Рис. 2.6. Распределение остаточных напряжений σ по глубине поверхностного слоя изделия h после чистового шлифования (1) и последующей однократной (2) и двукратной (3) обкатки (давление ролика

$P = 1,9 \text{ МПа}$)

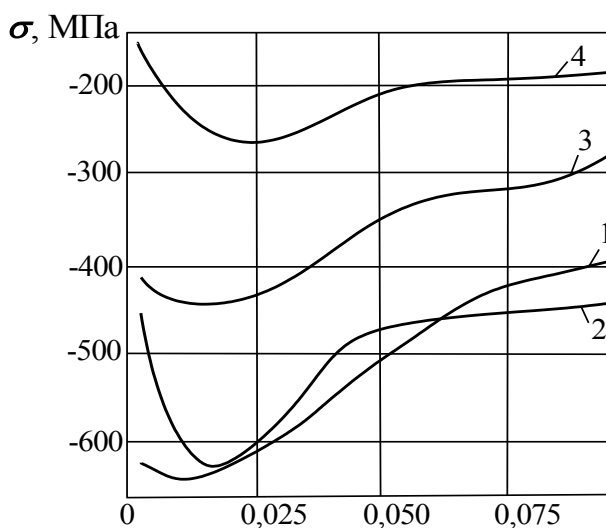
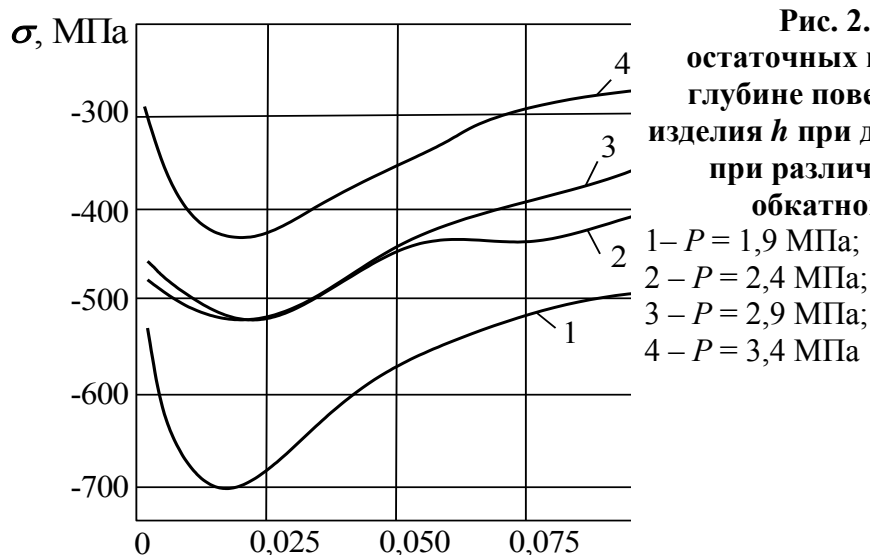


Рис. 2.7. Распределение остаточных напряжений σ по глубине поверхностного слоя изделия h при однократной обкатке при различных давлениях обкатного ролика P :

- 1 – $P = 1,9 \text{ МПа}$;
- 2 – $P = 2,4 \text{ МПа}$;
- 3 – $P = 2,9 \text{ МПа}$;
- 4 – $P = 3,4 \text{ МПа}$



Однократное обкатывание (рис. 2.7) при различных давлениях ролика формирует в поверхностных слоях изделия сжимающие напряжения. При двукратном обкатывании и тех же давлениях ролика величина сжимающих напряжений несколько увеличивается (рис. 2.8). Увеличение давления ролика заметно уменьшает уровень сжимающих напряжений как при однократном, так и двукратном обкатывании. Повышение скорости вращения изделия вызывает рост остаточных сжимающих напряжений.

2.2. Динамические методы деформационного упрочнения

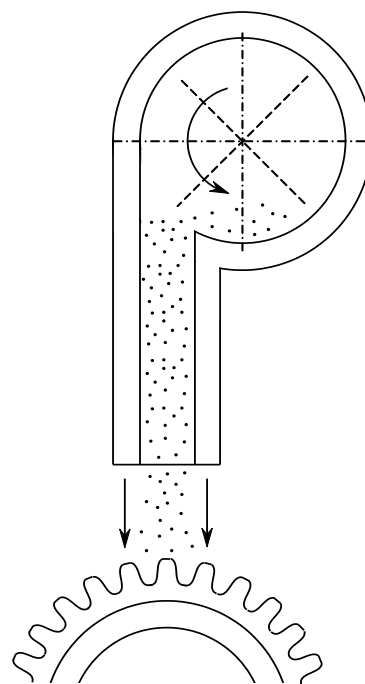
К динамическим (ударным) методам деформационного воздействия на поверхностный слой инструмента относятся дробеструйная, вибрационная, ультразвуковая, статико-импульсная обработка, чеканка и др. В этих процессах деформирующий элемент внедряется в поверхностный слой изделия перпендикулярно профилю поверхности или под некоторым углом к ней. Многочисленные удары, наносимые по изделию по заданной программе или хаотично, оставляют на ней большое число локальных пластических отпечатков, которые в результате покрывают (с перекрытием или без него) всю поверхность. Размеры очага деформации зависят от материала изделия, размеров и формы инструмента и от энергии удара по поверхности.

Дробеструйная обработка. При дробеструйной обработке деформирующим элементом является разнообразная сыпучая рабочая среда – абразивные гранулы, дробь и др. Сущность дробеструйной обработки (рис. 2.9) заключается в том, что поток дробы направляется на обрабатываемое изделие со скоростью соударения, достигающей 100 м/сек, в результате чего происходит пластическое деформирование поверхностного слоя изделия. Главным преимуществом этого метода является его высокая технологичность и универсальность, обеспечивающие возможность обработки любых сложнопрофильных поверхностей режущего и штампового инструментов.

Для реализации процессов струйной обработки может использоваться металлическая, керамическая, стеклянная, ледяная дробь, а также различные абразивные частицы или песок.



а)



б)

Рис. 2.9. Общий вид (а) и принципиальная схема (б) дробеструйной обработки

Изменяя размер, форма и твердость дробы, можно оптимизировать технологический процесс обработки. Гранулы дробы должны иметь такой размер и массу, чтобы обладать достаточной энергией для удаления всех загрязнений очищаемой поверхности и ее упрочнения, но с другой стороны они не должны разрушать ее.

Материал, используемый для упрочнения, может подаваться на поверхность изделия соплом с помощью воздуха, воды или масла (гидродробеструйная обработка) или воздействием центробежных сил. Во всех случаях эффект одинаковый – создание в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, уравнивающих напряжения растяжения, и повышение микротвердости.

В зависимости от вида используемой дробы и рабочей среды может быть достигнута различная шероховатость рабочих поверхностей инструмента. В частности, подача дробы в зону обработки с использованием масла при гидродробеструйной обработке позволяет улучшить микрогеометрию поверхности по сравнению с поверхностью, сформированной дробеструйной обработкой.

Следует отметить, что при дробеструйной обработки и ее разновидностях может происходить затупление режущих кромок инструмента. Это обстоятельство необходимо обязательно учитывать при проектировании и применении процессов дробеструйного упрочнения.

Основными технологическими режимами дробеструйной обработки, определяющими характеристики формируемого слоя, является целый ряд факторов – твердость инструментального материала, скорость полета дробы и ее диаметр, угол атаки, расстояние от места вылета дробы до обрабатываемого инструмента, продолжительность обработки и расход дробы.

Увеличение размера дробы приводит к повышению шероховатости поверхности и росту остаточных напряжений сжатия, глубины наклепа и твердости поверхностного слоя. Шероховатость поверхности увеличивается с

ростом скорости и диаметра дробы и с увеличением твердости обрабатываемой детали. Исходная шероховатость поверхности практически не влияет на эффективность дробеструйной обработки. Эффективность обработки во многом зависит от угла падения (атаки) дробы на упрочняемую поверхность. Этот режим, как правило, сложно контролировать, так как он определяется конфигурацией упрочняемого инструмента, который может представлять собой всевозможные сочетания плоских, выгнутых и вогнутых поверхностей. Кроме того, в процессе обработки инструмент может совершать как поступательное, так и вращательное движение по отношению к потоку дробы. Считается, что наибольшая эффективность обработки достигается при угле атаки, близком к 90° .

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что глубина и степень наклепа прямо пропорциональна скорости дробы, ее диаметру, синусу угла атаки и обратно пропорциональна квадратному корню из твердости обрабатываемого материала. Указанные закономерности имеют место при использовании в качестве рабочего инструмента не только дробы, но и абразивных частиц.

Изменение режимов обработки, ведущее к увеличению силы нормального давления уплотненного абразивного потока на обрабатываемую поверхность при центробежной обработке, приводит к возрастанию деформационного упрочнения поверхностного слоя. Основное влияние на величину силы нормального давления при обработке в поле центробежных сил оказывают относительная скорость перемещения уплотненного потока рабочей среды, зернистость абразивного материала и угол атаки.

На рис. 2.10-2.13 представлены графики изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя конструкционной стали типа 40Х при различных значениях технологических режимов процесса обработки уплотненным потоком свободного абразива. Все представленные закономерности распространяются и на различные инструментальные материалы.

Как видно представленных данных, степень наклепа поверхностного слоя в зависимости от значений технологических режимов повышается на 2 – 14 %, а глубина наклепанного слоя распространяется на 20 – 40 мкм. Увеличение относительной скорости перемещения уплотненного абразивного потока от 5,5 до 10,5 м/с вызывает рост степени наклепа поверхностного слоя от 2 до 15 % соответственно, при этом глубина наклепа возрастает от 30 до 40 мкм (рис. 2.10). Наблюдаемое повышение степени и глубины наклепа связано с тем, что увеличение относительной скорости абразивной частицы приводит к росту ее кинетической энергии, а также силы контактного давления на обрабатываемую поверхность, что при прочих равных условиях увеличивает степень пластической деформации обрабатываемого материала.

Увеличение зернистости абразива также повышает степень упрочнения поверхностного слоя и глубину наклепа. Рост размеров абразивного зерна от 400 до 1250 мкм приводит к повышению степени наклепа поверхностного слоя от 2 до 10 %, а глубина наклепа распространяется на 30 – 40 мкм (рис. 2.11). Это происходит по двум причинам. Во-первых, с ростом размеров абразивного зерна растет кинетическая энергия абразивной частицы, воздействующей на обрабатываемую поверхность, что увеличивает степень пластической деформации обрабатываемого материала. Во-вторых, с ростом размеров абразивного зерна уменьшается острота режущих граней, что, при прочих равных условиях, приводит к снижению глубины внедрения частицы в поверхностный слой обрабатываемого изделия и увеличивает степень пластической деформации металла.

С ростом угла атаки уплотненного потока рабочей среды увеличивается степень и глубина наклепа. Так, при увеличении угла атаки от 20 до 80° степень наклепа возрастает от 2 до 7 % соответственно, а глубина наклепа с 20 до 30 мкм (рис. 2.12). Угол атаки определяет соотношение нормальной и касательной составляющей силы воздействия абразивной частицы на обрабатываемую поверхность. Полезная работа, совершаемая

абразивной частицей, с ростом угла атаки в большей степени затрачивается на деформационное упрочнение поверхностного слоя.

Как видно из рис. 2.13, интенсивное упрочнение металла происходит в первые 30 секунд. При увеличении длительности воздействия уплотненного абразивного потока на обрабатываемую поверхность до 1 минуты существенного изменения степени наклепа не происходит, увеличивается лишь глубина наклепа от 30 до 40 мкм. Дальнейший рост времени обработки существенно не изменяет ни степени, ни глубины наклепа. Таким образом, существует определенный временной предел, после которого значения степени и глубины наклепа поверхностного слоя зависят лишь от величин других технологических режимов обработки.

Ультразвуковая обработка. Сущность процесса ультразвуковой обработки (УЗО) заключается в воздействии на обрабатываемую поверхность изделия деформирующего элемента, прижатого к ней с постоянной силой и вибрирующего с частотой $f = 2 \cdot 10^4$ Гц. В результате ультразвукового воздействия в зоне контакта могут развиваться высокие локальные напряжения [24].

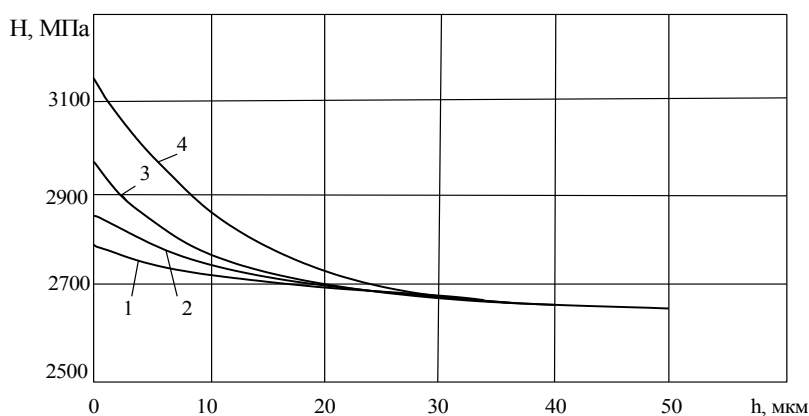


Рис. 2.10.
Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя образца в зависимости от относительной скорости перемещения уплотненного потока рабочей среды:

- 1 – исходная поверхность;
- 2 – $V = 5,5$ м/с;
- 3 – $V = 7,7$ м/с;
- 4 – $V = 10,5$ м/с

Условия обработки:
 $\alpha = 20^\circ$; $d = 400$ мкм

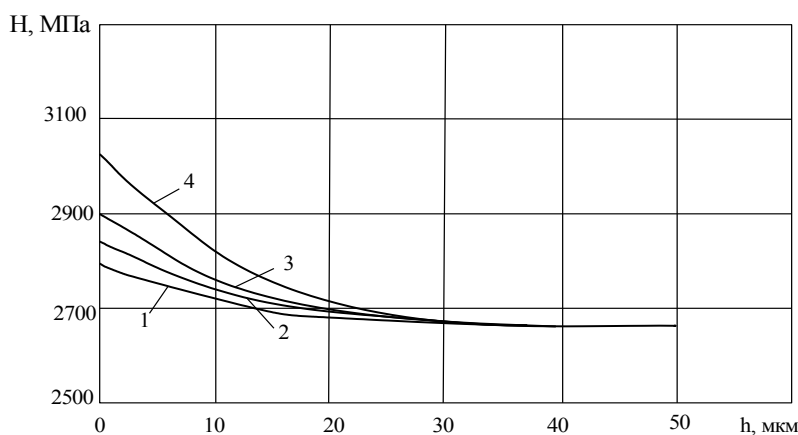


Рис. 2.11.
Изменение
микротвердости по
глубине
поверхностного слоя
образца в зависимости
от зернистости
абразива:

1 – исходная
поверхность;
2 – $d = 400$ мкм;
3 – $d = 800$ мкм;
4 – $d = 1250$ мкм

Условия обработки:
 $V = 5,5$ м/с; $\alpha = 20^\circ$

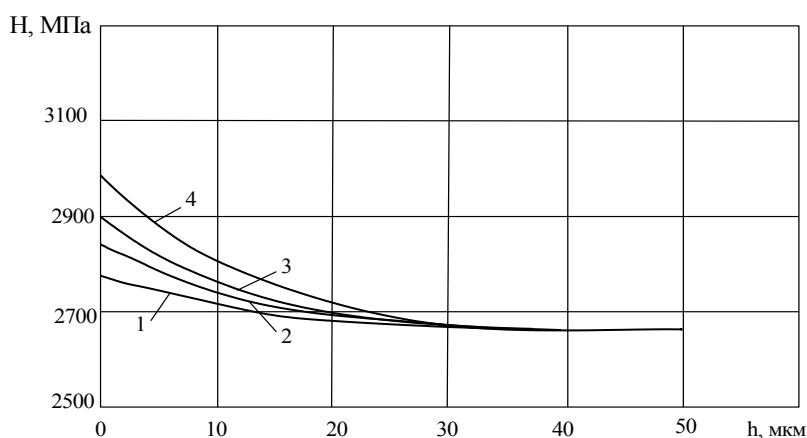


Рис. 2.12.
Изменение
микротвердости по
глубине
поверхностного слоя
образца в зависимости
от угла атаки:

1 – исходная
поверхность;
2 – $\alpha = 20^\circ$;
3 – $\alpha = 45^\circ$;
4 – $\alpha = 80^\circ$

Условия обработки:
 $V = 5,5$ м/с; $d = 400$ мкм

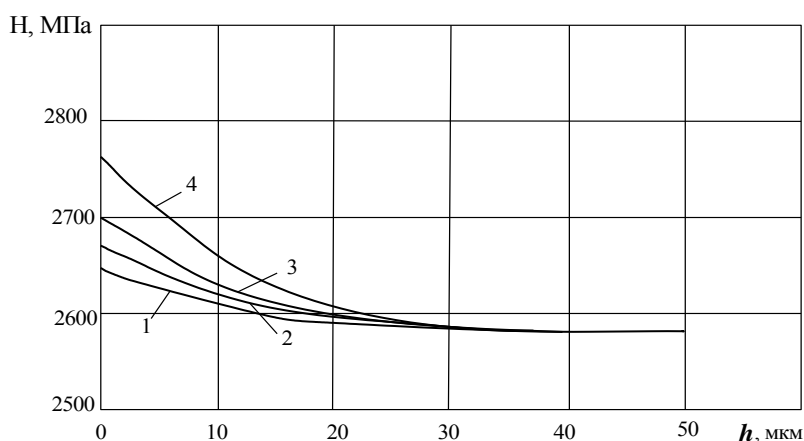


Рис. 2.13.
Изменение
микротвердости по
глубине
поверхностного слоя
образца в зависимости
от времени обработки:

1 – исходная
поверхность;
2 – $\tau = 0,5$ мин;
3 – $\tau = 1$ мин;
4 – $\tau = 5$ мин

Условия обработки:
 $V = 5,5$ м/с; $d = 400$ мкм;
 $\alpha = 20^\circ$

При наложении ультразвуковых колебаний возникают сложные процессы: наложение знакопеременных нагрузок на статические нагрузки, локальное поглощение ультразвуковой энергии и, как результат этого,

изменение условий течения металла и облегчение пластического деформирования. Сложение статического напряжения с амплитудным значением знакопеременного напряжения делает суммарное напряжение достаточным для преодоления дислокациями потенциальных барьеров, т.е. для начала более раннего появления пластических деформаций. Активация дислокаций происходит в основном за счет поглощения акустической энергии в местах дефектов кристаллической решетки и других структурных несовершенств. За время, исчисляемое миллисекундами, происходит локальный нагрев вокруг источников поглощения, снятие напряжений, разблокировка дислокации, увеличение их подвижности. Все это обеспечивает более интенсивный ход пластической деформации. Кроме того, уменьшается коэффициент трения между обрабатываемой поверхностью и деформирующим элементом.

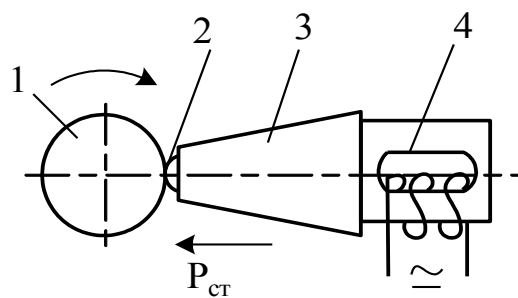


Рис. 2.14. Принципиальная схема ультразвукового упрочнения (обкатывания)

На рис. 2.14 представлена принципиальная схема ультразвуковой обработки. Ультразвуковой инструмент 2 выполнен в виде шарика, который связан с концентратором колебаний 3, поступающих от преобразователя 4. Шарик может быть жестко закреплен (припаян), но может и не иметь жесткого контакта с преобразователем. Инструмент прижимается к вращающемуся изделию 1 с небольшим усилием $P_{ст}$.

Характерными особенностями ультразвуковой обработки являются: высокая частота ультразвуковых колебаний ($f \approx 10^4$ Гц), незначительная амплитуда колебаний ($A = 10 \dots 20$ мкм), небольшая статическая сила ($P_{ст} = 30 \dots 300$ Н), весьма малое время контакта деформирующего элемента с изделием $\tau \approx 3 \cdot 10^{-5}$

с, значительные колебательная скорость инструмента $V_i = 2\pi \cdot f \cdot A \geq 2...3 \text{ м/с}$, ускорение $j = (2\pi \cdot f)^2 A \geq 24 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$ и многократность деформирования.

Малые величины амплитуды колебаний и статической силы не обеспечивают достаточной пластической деформации поверхностного слоя и твердость обрабатываемой поверхности практически не меняется. При увеличении амплитуды колебаний и статической силы в поверхностном слое создается напряжение, при котором плотность дислокаций близка к критической, и твердость увеличивается. При чрезмерном увеличении амплитуды и статической силы поверхностный слой начинает разрушаться и твердость уменьшается. Аналогичным образом с амплитудой и статической силой связан параметр шероховатости поверхности.

На микротвердость и шероховатость поверхности большое влияние оказывают продольная подача, скорость относительного перемещения обрабатываемой поверхности и радиус сферы рабочей части деформирующего элемента.

Процесс ультразвуковой обработки от рассмотренного выше статического способа упрочняющей обработки – обкатывания шариком, отличается следующим: ультразвуковой инструмент пластически деформирует поверхностный слой детали импульсно, с большой интенсивностью колебаний; контактирование инструмента с поверхностью обрабатываемого изделия и его деформирование сопровождаются прерывистым и интенсивным трением скольжения (трение качения отсутствует); статическая сила, действующая на изделие, незначительна; среднее давление, создаваемое в поверхностном слое изделия, под действием нормально направленной силы в 3-9 раз больше, чем при обкатывании; перемещение рабочей части деформирующего элемента происходит одновременно в направлении относительной скорости перемещения обрабатываемой поверхности и перпендикулярно ей.

В процессе ультразвуковой обработки из-за многократности воздействия нагрузки, напряженно-деформированное состояние отличается от

обычного статического воздействия. Вследствие этого образуются различные преимущественные ориентировки текстуры деформирования, а пластическое деформирование осуществляется множественным скольжением, оно происходит даже в тех плоскостях, которые энергетически для этого невыгодны. Множественное скольжение создает дополнительное торможение движению дислокаций.

В табл. 2.1 представлены сравнительные данные о характеристиках поверхностного слоя, достигаемых применением статического обкатывания шариком и ультразвуковой обработки.

2.1. Характеристики поверхностного слоя, достигаемые применением различных способов обработки

Обрабатываемый материал	Микротвердость H_{μ} , ГПа			Шероховатость R_a , мкм		
	исходная	обкатывание	УЗО	исходная	обкатывание	УЗО
Сталь 45	2180	3900	5000	2,60	0,25	0,20
Сталь 10А	8600	10100	11800	0,30	0,22	0,18
Сталь ШХ15	8400	9480	10300	0,35	0,23	0,14

Кроме рассмотренного выше ультразвукового обкатывания, на практике часто используется ультразвуковое выглаживание, схема которого показана на рис. 2.15.

На вращающееся изделие действует со статической силой $P_{ст}$ алмазный наконечник, закрепленный в ультразвуковом концентраторе, который, в свою очередь, припаян к магнитострикционному преобразователю. Колебательная система закреплена в подвижном корпусе, который может перемещаться вдоль оси неподвижного корпуса. Регулирование и установка необходимой силы выглаживания производятся с помощью тарированной пружины и винта.

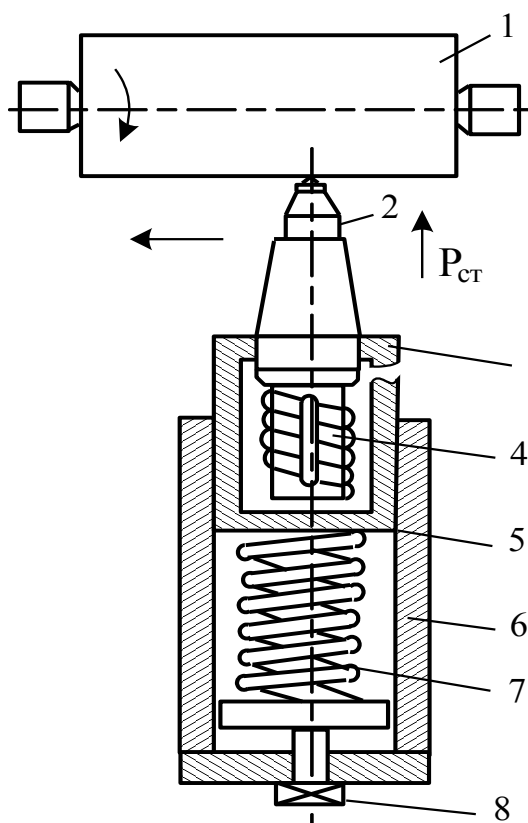


Рис. 2.15. Схема установки для алмазного выглаживания:
 1 – изделие; 2 – алмазный наконечник инструмента;
 3 – ультразвуковой концентратор;
 4 – магнитострикционный преобразователь; 5 – подвижный корпус; 6 – неподвижный корпус;
 7 – пружина; 8 – нагружающее устройство

Выбор режимов выглаживания осуществляется в зависимости от конкретных условий и технических требований к инструменту с учетом производительности процесса. Так же, как и в случае ультразвукового обкатывания, наиболее важными параметрами обработки являются радиус сферы алмазного наконечника, статическая сила $P_{ст}$, амплитуда колебаний и значение подачи инструмента.

Наконечник радиусом $R=1...5$ мм обычно изготавливают из твердых сплавов, природных или синтетических алмазов. Амплитуда колебаний составляет $A=6...8$ мкм при частоте $f=22...44$ кГц. Сила $P_{ст}$ не влияет на производительность процесса – выбор ее значения определяется требованиями, предъявляемыми к качеству поверхности детали (обычно $P_{ст} < 50...100$ Н). Оптимальное значение подачи лежит в диапазоне $S=0,05...0,1$ мм/об. Применение малых подач ($S < 0,05$ мм/об) снижает производительность и вызывает ухудшение качества поверхностного слоя, повышение износа деформирующего элемента из-за увеличения времени

контакта с изделием и высокой температуры в зоне обработки. При больших подачах ($S > 0,1$ мм/об) эффективность ультразвукового выглаживания снижается.

Скорость выглаживания оказывает значительное влияние на качество поверхности, а выбор ее значения (в пределах от 30 до 150 м/мин) определяется состоянием станка, конфигурацией изделия и другими технологическими условиями. Выглаживание рекомендуется проводить за один проход, так как повторные проходы, незначительно изменяя состояния поверхностного слоя, снижают производительность процесса.

При оптимально выбранных технологических режимах ультразвуковое выглаживание позволяет в несколько раз снизить высоту микронеровностей, получить высокую поверхностную микротвердость и создать в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения.

Чеканка. Сущность процесса чеканки заключается в том, что с помощью специального приспособления по упрочняемой поверхности наносят удары. Чеканочный инструмент состоит из ударника с бойком. Приспособления для чеканки могут быть пневматического, электрического и механического типов. Обычно применяются бойки в виде ролика с профильным радиусом 3...5 мм. Упрочняющая чеканка может производиться вручную при помощи специальных пневматических приспособлений. Также чеканку можно с успехом производить на металлорежущих, например, токарных станках при помощи специальных механических ударных приспособлений. В последнее время широкое распространение получили конструкции пружинных ударников, работающих с приводом от кулачкового валика.

Технологическими режимами упрочняющей чеканки, оказывающими наибольшее влияние на характеристики формируемого слоя, являются сила удара бойка $P = 50 \dots 300$ Н, плотность ударов $\rho = 20 \dots 90$ уд./мм и скорость бойка в момент удара $v = 0,1 \dots 1$ м/с. Выбор режимов чеканки производится с учетом твердости упрочняемого материала и исходя из требуемых

характеристик поверхностного слоя – микротвердости и глубины, шероховатости и остаточных напряжений.

В литературе имеются данные о режимах упрочняющей чеканки, обеспечивающих максимальную износостойкость различных режущих инструментов в процессе эксплуатации. Например, оптимальными режимами чеканки для сменных многогранных пластин, эксплуатирующихся при продольном точении различных материалов, являются: для стали У12А – $P=140$ Н, $\rho=32$ уд/мм и $v=0,3$ м/с; для стали Р5М5 – $P=105$ Н, $\rho=45$ уд/мм и $v=0,35$ м/с; для сплава Т15К6 – $P=70$ Н, $\rho=45$ уд/мм и $v=0,28$ м/с.

2.2. Микротвердость пластин из различных инструментальных материалов до и после упрочняющей чеканки

Материал режущей пластины	Сравниваемые варианты пластин	Микротвердость HV_{cp} , МПа	Среднеквадратическое отклонение σ_{HV} , МПа	Коэффициент увеличения k_{HV}
У12А	Обычные Упрочненные	6447 9120	933 1100	1 1,42
Р6М5	Обычные Упрочненные	7150 9770	860 1550	1 1,37
Т15К6	Обычные Упрочненные	9700 15500	1100 900	1 1,6

В таблицах 2.2 и 2.3 представлены сведения о микротвердости и шероховатости поверхностного слоя различных инструментов, достигаемой в результате применения упрочняющей чеканки по оптимальным режимам. Видно, что микротвердость поверхности материала после чеканки возрастает в 1,4-1,6 раза, а параметры шероховатости снижаются в 1,5-3,3 раза по сравнению с исходным материалом.

Вполне естественно, что отмеченные изменения характеристик поверхностного слоя должны сказаться на функциональных параметрах процесса резания и на работоспособности самого инструмента.

В таблицах 2.4 и 2.5 представлены сведения о влиянии упрочняющей чеканки на составляющую силы резания P_z и период стойкости режущих пластин при точении стали типа 40X. Видно, что в результате применения упрочняющей чеканки происходит снижение силы резания до 20 %, а стойкость инструмента в ряде случаев возрастает в 2,7 раза.

2.3. Шероховатость пластин из различных инструментальных материалов до и после упрочняющей чеканки

Материал режущей пластины	Сравниваемые варианты пластин	Параметр шероховатости	Шероховатость R_{cp} , мкм	Среднеквадратическое отклонение σ_R , мкм	Коэффициент уменьшения k_{R_a}
У12А	Обычные	R_a	1,32	0,37	1
		R_z	8,14	1,81	
		R_t	9,58	2,12	
	Упрочненные	R_a	0,44	0,036	3,3
		R_z	3,2	0,34	2,54
		R_t	3,77	0,596	2,54
Р6М5	Обычные	R_a	0,41	0,019	1
		R_z	4,26	0,77	
		R_t	4,26	0,71	
	Упрочненные	R_a	0,26	0,058	1,58
		R_z	2,07	0,5	2,06
		R_t	2,66	0,78	1,6
Т15К6	Обычные	R_a	0,12	0,028	1
		R_z	1,01	0,042	
		R_t	1,15	0,025	
	Упрочненные	R_a	0,09	0,008	1,33
		R_z	0,79	0,025	1,28
		R_t	0,87	0,037	1,32

2.4. Значения составляющей силы резания до и после упрочняющей чеканки

Материал режущей пластины	Сравниваемые варианты пластин	Составляющая силы резания P_{zcp} , Н	Среднеквадратическое отклонение σ_{P_z} , МПа	Коэффициент уменьшения
У12А	Обычные	115	2,9	1
	Упрочненные	96	3,1	1,2
Р6М5	Обычные	108	5,8	1
	Упрочненные	90	4,3	1,2
Т15К6	Обычные	77	1,8	1
	Упрочненные	72	1,9	1,1

Примечание: Режим резания: для стали У12А – $V=14$ м/мин, $s=0,17$ об/мин, $t=0,5$ мм; для стали Р6М5 – $V=45$ м/мин, $s=0,17$ об/мин, $t=0,5$ мм; для сплава Т15К6 – $V=190$ м/мин, $s=0,17$ об/мин, $t=0,25$ мм

2.5. Значения периода стойкости режущих пластин из различных инструментальных материалов до и после упрочняющей чеканки

Материал режущей пластины	Сравниваемые варианты пластин	Среднее значение периода стойкости T_{cp} , мин	Среднеквадратическое отклонение σ_T , МПа	Коэффициент увеличения k_T
У12А	Обычные	8,83	0,255	1
	Упрочненные	17,57	0,627	2
Р6М5	Обычные	6,61	0,49	1
	Упрочненные	18,65	0,604	2,7
Т15К6	Обычные	11,48	0,306	1
	Упрочненные	17,96	0,473	1,6

Примечание: Режим резания: для стали У12А – $V=14$ м/мин, $s=0,17$ об/мин, $t=0,5$ мм; для стали Р6М5 – $V=45$ м/мин, $s=0,17$ об/мин, $t=0,5$ мм; для сплава Т15К6 – $V=190$ м/мин, $s=0,17$ об/мин, $t=0,25$ мм

Виброударная обработка. Распространенным способом динамического деформационного упрочнения является виброударная обработка, позволяющая осуществлять местное упрочнение изделий, т.е. лишь тех участков, которые наиболее подвержены износу в процессе эксплуатации.

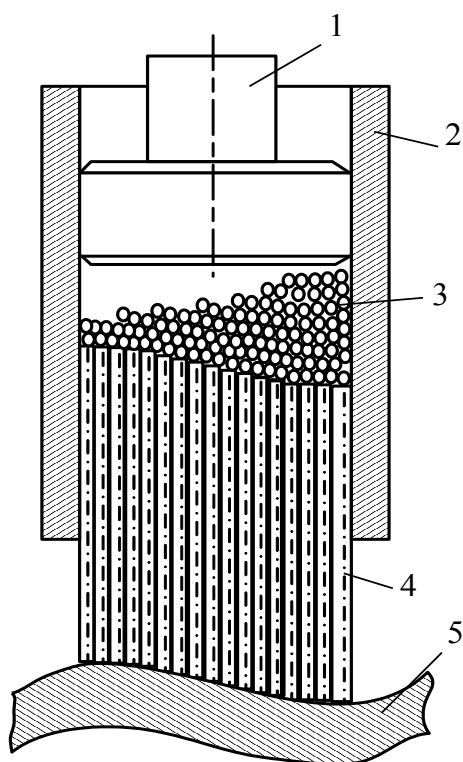


Рис. 2.16. Схема многоконтактного виброударного упрочнителя:

- 1 – ударник; 2 – корпус;
3 – стальные шарики;
4 – стержни; 5 – обрабатываемая поверхность

Для реализации этого процесса часто используют шарикостержневой упрочнитель, представляющий собой многоконтактный виброударный инструмент, состоящий из двух основных узлов – источника ударных импульсов и самого упрочнителя. Источником ударных импульсов могут служить стандартные пневмо- и электромагнитные молотки, а также специальные виброударные устройства. В существующих конструкциях используют клепальные пневмомолотки различных типов исполнения.

Упрочнитель состоит из корпуса (рис. 2.16), комплекта стальных стержней со сферически заточенными торцами, закаленных стальных шариков и массивного ударника. В конструкции многоконтактного виброударного инструмента используется явление передачи ударного импульса от массивного ударника, приводимого в движение пневмомолотком или другим способом, через замкнутый объем закаленных стальных шариков – комплекту стальных стержней со сферическими наконечниками, которые и воздействуют на обрабатываемую поверхность.

Благодаря свойству псевдотекучести объема шариков расположение сферических вершин стержней может изменяться, принимая форму сферы,

цилиндра и даже поверхности с отрицательной кривизной. В связи с этим данный метод эффективно используется для упрочнения поверхностей самой разнообразной формы.

Еще одной разновидностью виброударной обработки является обработка в уплотненной среде (рис. 2.17). Динамическое нагружение среды осуществляется путем сообщения ударных импульсов от нескольких источников пневмоударником через поршень. Последний смещен от оси на величину ε , что создает условия для циркуляционного движения обрабатывающей среды и равномерности обработки поверхности изделия. Избыточное давление в рабочей камере создается путем поджатия среды поршнем. Изделию может сообщаться как продольная, так и круговая подачи, обеспечивающие равномерную обработку всей его поверхности.

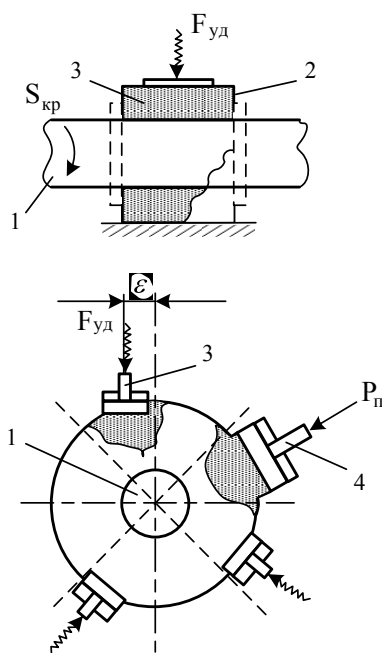


Рис. 2.17. Схема виброударной обработки наружной поверхности в уплотненной среде:
 1 – обрабатываемое изделие;
 2 – рабочая камера с обрабатывающей средой;
 3 – поршень-ударник; 4 – поршень для поджатия среды

2.3. Упрочнение в магнитном поле

Физическая сущность и технологические особенности процесса.

Известно, что при магнитном воздействии многие материалы изменяют свои физико-механические свойства. В зависимости от магнитной восприимчивости материалы разделяют на ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики. Наибольшее влияние магнитное поле оказывает на

ферромагнетики (железоуглеродистые, кобальт- и никельсодержащие сплавы), меньшее – на парамагнетики и очень слабое – на диамагнетики. Улучшение свойств инструментов, прошедших обработку в магнитном поле, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов материала внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводность материала.

Взаимодействие импульсного магнитного поля с инструментом из токопроводящего материала происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность инструментального материала. Поэтому, чем выше концентрации поверхностных и внутренних напряжений в инструменте, тем больше вероятность локальной концентрации в них микровихрей внешнего поля и тем длительнее течение релаксационных процессов в материале.

При намагничивании материала инструмента в нем протекают достаточно сложные процессы. Весь объем инструмента при рассмотрении магнитных полей можно разделить на воображаемые микрообъемы, называемые доменами.

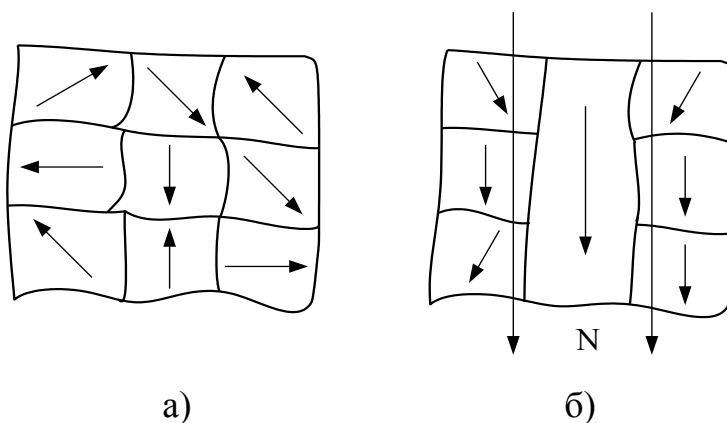


Рис. 2.18. Доменная структура инструментального материала:
а – до обработки магнитным полем; б – после помещения в магнитное поле

Каждый домен имеет свою ориентацию вектора магнитной индукции (рис. 2.18, а). При помещении ферромагнитного вещества в магнитное поле домены изменяют свои границы из-за роста их объемов, так как домены, у которых векторы намагниченности ориентированы близко к направлению

поля, объединяются (рис. 2.18, б). Такое объединение приводит к повышению теплопроводности инструмента и улучшает его эксплуатационные показатели.

Изменение направления самопроизвольной намагниченности отдельных доменов способствует повышению вязкости и износостойкости материала. При импульсном воздействии магнитного поля в инструменте возникают вихревые токи и локальные микровихри. Они нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. Микроструктура материала улучшается в течение 0,01...1,0 с. Выделяющаяся теплота расходуется на процессы, связанные с фазовыми превращениями 1-го и 2-го рода.

Одновременно с тепловыми процессами за счет импульсного магнитного поля в металле происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, расположенных в области контакта кристаллитов и зерен сплавов. Это приводит к улучшению некоторых механических свойств материала (износостойкости, вязкости и др.).

Осуществляется магнитная обработка с использованием соленоидов различного типа – полых, с концентратором поля или с контейнером с ферромагнитной жидкостью. В зависимости от размера инструмента и вида инструментального материала выбирается вид соленоида, напряженность его магнитного поля и продолжительность воздействия. Напряженность магнитного поля соленоида может достигать 2000 кА/м. Длительность одного импульса от 0,1 до 10 секунд, а количество импульсов от 2 до 10 с выдержкой между ними от 1 до 20 минут. По завершении магнитной обработки необходима выдержка инструмента на немагнитной подложке в течение 5-24 часов. За это время происходят релаксационные процессы в материале, подвергнутом магнитному воздействию.

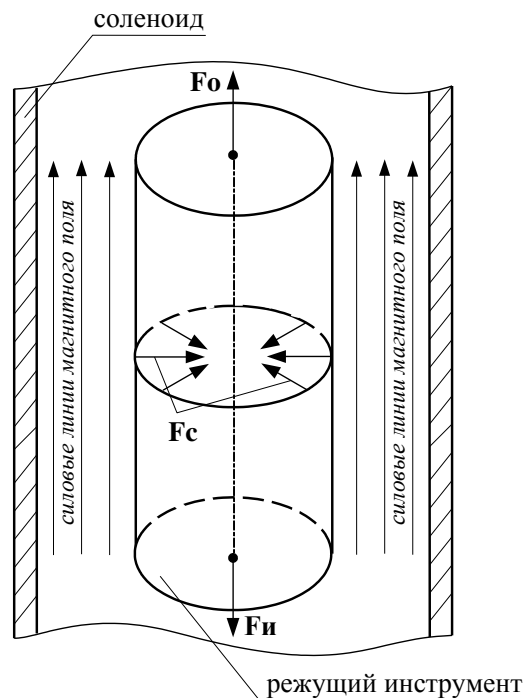


Рис. 2.19. Принципиальная схема магнитной обработки осевого инструмента:

F_u – сила инерции; F_c – сила, сжимающая инструмент;

F_o – сила воздействия магнитного поля

Технология магнитного упрочнения сводится в основном к следующему (рис. 2.19). Инструмент помещают в полость соленоида таким образом, чтобы центр тяжести инструмента был удален от положения равновесия. Под воздействием силы магнитного поля инструмент втягивается магнитным полем в полость соленоида с некоторым ускорением и совершает внутри полости колебательные движения. За счет силы инерции инструмент (и его центр тяжести) смещается в противоположную сторону. В этот момент на инструмент действует сила, которая втягивает его обратно внутрь соленоида. Таким образом, инструмент, многократно пересекая магнитный поток, совершает в полости соленоида свободные перемещения, которые с течением времени затухают. Когда колебания прекращаются, инструмент занимает положение равновесия. В результате такой обработки уменьшается избыточная энергия и происходит релаксация внутренних напряжений в инструменте, несколько повышается микротвердость инструментального материала. Это приводит к повышению стойкости

инструмента особенно в условиях действия циклических нагрузок.

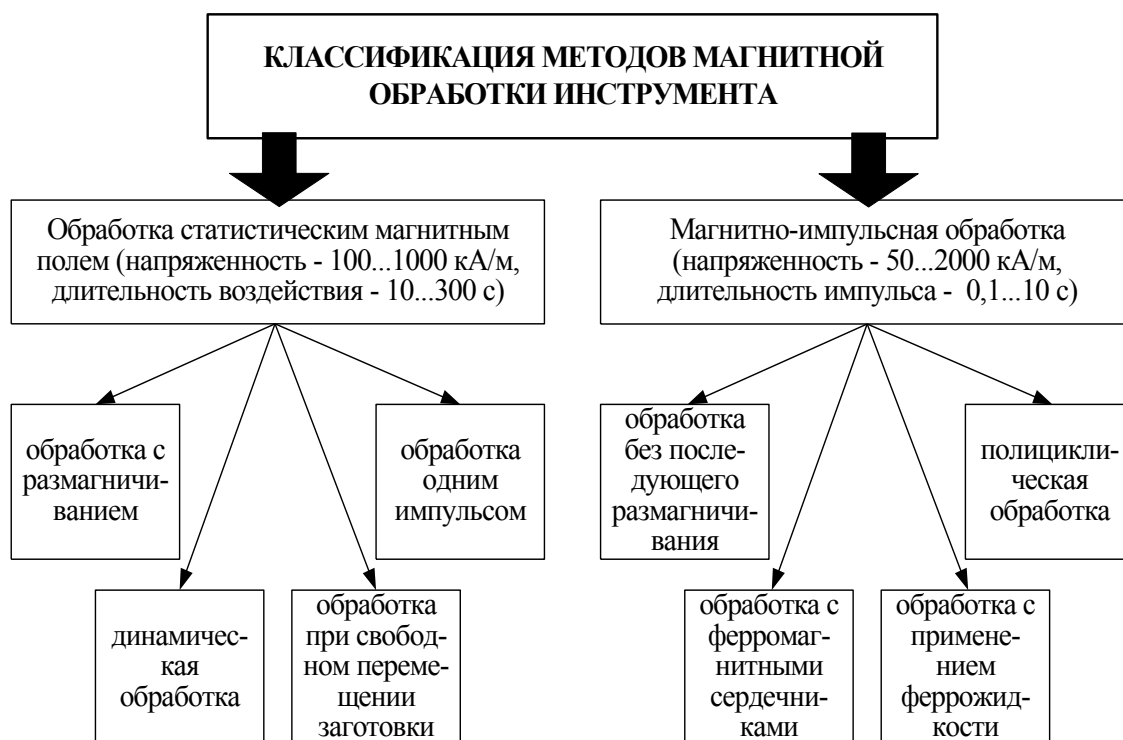


Рис. 2.20. Основные методы магнитной обработки инструмента

Все методы магнитной обработки инструмента и деталей машин классифицируются следующим образом (рис. 2.20): обработка статическим магнитным полем (ОСМП) напряженностью 100...1000 кА/м при длительности воздействия 10...300 с; магнитно-импульсная обработка полем напряженностью 50... 2000 кА/м при длительности импульса 0,1...10 с.

К методам ОСМП относятся: обработка с размагничиванием через 8...24 часа; обработка одним импульсом с направленной (локальной) концентрацией магнитного потока на заготовку; динамическая обработка, когда деталь в поле постоянной напряженности вращается с некоторым ускорением частоты вращения (1...50 об/с) в течение 1...5 мин; обработка при свободном перемещении заготовки в полости индуктора.

К методам магнитно-импульсной обработки относятся: обработка без последующего размагничивания; полициклическая обработка (2...10 циклов) с выдержкой между циклами 1...20 мин; обработка с применением

ферромагнитных сердечников и локальных концентраторов магнитного поля; обработка в металлических контейнерах или камерах с применением феррожидкости.

Технология магнито-импульсной обработки предусматривает также комбинирование перечисленных выше воздействий. Практически для всех методов магнито-импульсной обработки необходима последующая выдержка заготовки в течение 5...24 часов на немагнитических подложках.

Для снятия напряжений в инструментах проводят магнито-импульсную обработку с последующим размагничиванием или без него. Магнито-импульсную обработку без размагничивания применяют для упрочнения инструментов, обрабатывающих слабомагнитные и немагнитные материалы. На практике применяют методы магнитной обработки с выдержкой и размагничиванием. Такая обработка пригодна для широкого ассортимента инструмента, а также кинематических и зубчатых пар, осей, валов, пружин, сварных и заклепочных соединений, сборочных единиц, машин и целых механизмов. Для большинства инструментов и деталей машин достаточна моноциклическая обработка воздействием магнитного поля с последующей выдержкой.

Многократную циклическую магнитную обработку следует применить при сложной конструкции инструмента. В этом случае число последовательных циклов магнито-импульсной обработки составляет 5...10 при выдержке между ними 10...300 с.

Динамическую обработку (обработку вращающимся магнитным полем или вращением самой заготовки в соленоиде) применяют для упрочнения крупногабаритных изделий. Методы магнито-импульсной обработки с применением ферромагнитных сердечников используют для обработки полых и симметричных деталей или инструмента, а также для локальной магнитной обработки. Форма сердечников определяется конфигурацией изделия. Для локальной обработки инструмента сложной конструкции применяют разъемные и сборные, как сердечники, так и соленоиды.

Магнито-импульсную обработку мелкогазмерного инструмента проводят в контейнерах. При этом ферромагнитная жидкость, которую заливают в контейнер, усиливает магнитное поле и концентрирует его на те участки инструмента, где имеются повышенные концентрации напряжений.

Выбор той или иной технологии магнитной обработки существенно зависит от вида инструментального материала, размера инструмента и его конструктивных особенностей, а также нагрузок, действующих на него в процессе резания.

Например, цельный инструмент (сверла, метчики, фрезы и т.п.) из быстрорежущих сталей массой до 1,5 кг рекомендуется обрабатывать одним-двумя импульсами при выдержке между ними 3-5 мин при свободном его перемещении в полости соленоида. Цельный и комбинированный режущие инструменты обрабатываются асимметрично с осевым перемещением поля или при некотором вращении в соленоиде. Полярность при этом зависит от условий работы инструмента.

Инструменты из твердого сплава обрабатываются за два-три цикла полем напряженностью 400-2000 кА/м при длительности импульса 0,3-1,5 с.

Инструмент из углеродистых и быстрорежущих сталей обрабатывают за 1-2 цикла при длительности импульса 0,3-1,5 с, выдержка после обработки составляет 8-12 часов. С увеличением массы инструмента оптимальное время импульса увеличивается в 2-3 раза.

Инструмент из твердых сплавов и композиционных материалов обрабатывают за 5-10 циклов с напряженностью до 4000 кА/м в контейнерах с ферромагнитной жидкостью. Выдержка между циклами обработки зависит от массы, геометрии и размеров инструмента и составляет 0,5-5 мин.

Твердосплавные пластины и абразивный инструмент обрабатывают большим числом циклов при продолжительности импульса 0,5-1 с.

Протяжки и другой инструмент длиной до 5000 мм обрабатывают при последовательном их перемещении в соленоиде на величину 0,2-0,5 длины камеры.

В целом технология магнитной обработки является достаточно универсальной и может быть применима для упрочнения любого металло- и деревообрабатывающего инструмента (сверла, метчики, плашки, пилы, протяжки и т.д.).

Контрольные вопросы

1. Перечислите статические методы деформационного упрочнения.
2. Объясните механизм упрочнения материала при обкатывании и выглаживании.
3. Назовите материал наконечника деформирующего инструмента при обкатывании и выглаживании.
4. Перечислите динамические методы деформационного упрочнения.
5. В чем заключается сущность дробеструйной обработки.
6. Объясните влияние дробеструйной обработки на шероховатость и микротвердость обрабатываемой поверхности.
7. Сущность процесса ультразвуковой обработки.
8. Физическая сущность и технологические особенности упрочнения в магнитном поле.
9. Перечислите основные методы магнитной обработки.

3. МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

3.1. Ионное азотирование

Среди многообразия существующих методов поверхностного легирования наибольшее распространение при производстве инструментов из быстрорежущих сталей получила химико-термическая обработка. К химико-термической обработке режущего инструмента относятся технологии диффузионного насыщения его поверхностного слоя различными элементами – С, N, О, В и др. (цементация, азотирование, нитроцементация, оксидирование, борирование и др.). Выбор того или иного метода химико-термической обработки обусловлен требованиями, предъявляемыми к поверхностному слою инструмента, теплостойкостью инструментального материала и др. Указанные процессы, как правило, являются заключительной операцией в технологической цепочке изготовления режущего инструмента. Влияние их на физико-механические свойства и эксплуатационные показатели инструментов примерно одинаково. В результате химико-термической обработки формируется поверхностный слой высокой микротвердости, теплостойкости, возникают полезные сжимающие напряжения и уменьшается адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом. Прочностные свойства режущего инструмента определяются при этом свойствами основного инструментального материала.

Из всех процессов химико-термической обработки наиболее универсальным и пригодным для всех теплостойких инструментальных сталей является азотирование. Существует достаточно большое количество разновидностей этого процесса (рис. 3.1). До недавнего времени в отечественной инструментальной промышленности были распространены процессы газового и жидкого азотирования, которые выполнялись в специальных печах или соляных ваннах. В последнее время достаточно широкое распространение получил процесс диффузионного насыщения

поверхности инструмента азотом с использованием низкотемпературной плазмы – ионное (плазменное) азотирование.

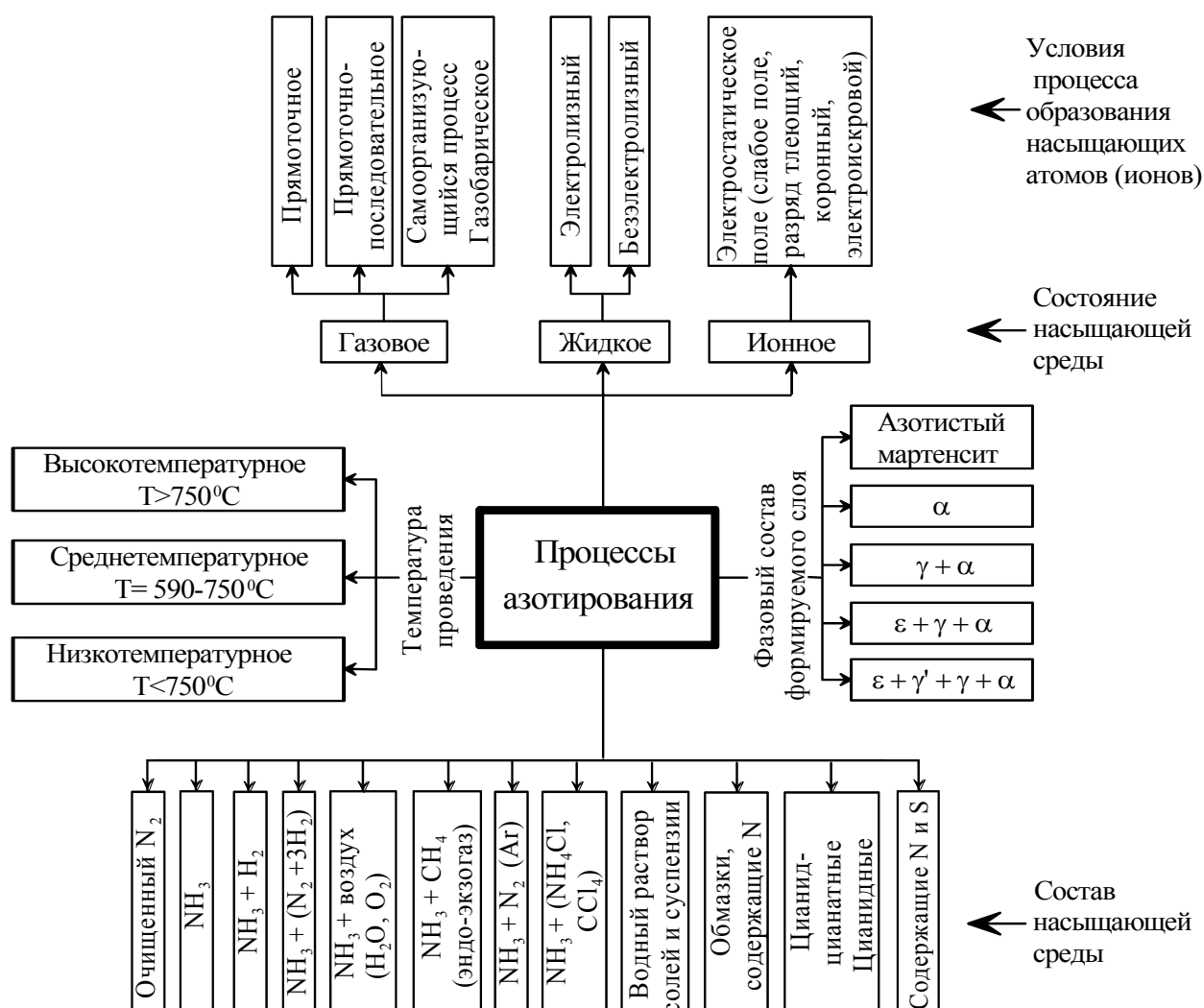


Рис. 3.1. Классификация процессов диффузионного насыщения поверхности инструмента азотом

Способы диффузионного насыщения поверхности инструментальных сталей с использованием низкотемпературной плазмы выгодно отличаются от классических схем химико-термической обработки. Так, например, при ионном азотировании скорость обработки по сравнению с обычным азотированием возрастает в 2-5 раза за счет ускорения диффузионных процессов и уменьшения количества подготовительных операций, снижается температура нагрева инструментов, имеется возможность регулирования фазового состава путем изменения технологических режимов, отсутствует

коробление обрабатываемых инструментов. Кроме того, эти процессы являются нетоксичными и экологически чистыми.

Ионное азотирование заключается в насыщении поверхности режущего инструмента азотом при бомбардировке ионами из низкотемпературной плазмы газового разряда. Данный процесс характеризуется энергиями прибытия легирующих ионов азота к поверхности инструмента порядка 400 – 2000 эВ и сопровождается диффузионными процессами, имеющими определяющее значение. Эти процессы происходят в результате разогрева поверхности при бомбардировке ее ионами и стимулирования диффузии в процессе насыщения за счет генерации дефектов в обрабатываемом материале, что позволяет доводить общую толщину азотированного слоя до 200...300 мкм.

Известно, что под действием ионной бомбардировки в материале возникает избыточная концентрация структурных дефектов (точечных, линейных, трехмерных). Это способствует интенсификации процессов диффузии и массопереноса насыщающего элемента в материале и создает возможность появления фаз, которые не образуются в условиях обычного насыщения при повышенной температуре. Плотность структурных дефектов зависит от множества факторов – дозы облучения, плотности потока ионов, направленного на поверхность, массы, энергии ионов и температуры подложки.

Процессы ионного азотирования выполняются на оборудовании, реализующем две формы газового разряда – тлеющего (получило наибольшее промышленное распространение) и вакуумно-дугового. В общем случае система ионного насыщения представляет собой вакуумную камеру, в электрическом плане реализующую двухэлектродную схему. Для проведения процесса ионного насыщения в вакуумную камеру подается легирующий материал (элемент или химическое соединение) в газообразном (парообразном) состоянии, а к режущему инструменту прикладывается отрицательный потенциал. Поверхность режущего инструмента

бомбардируется положительными ионами легирующего элемента из газоразрядной плазмы, что позволяет значительно сократить длительность процесса насыщения поверхности.

При азотировании формируется диффузионный слой, состоящий из поверхностной нитридной зоны (ε и γ' -фазы) и зоны внутреннего азотирования (α -фаза). Нитридный слой более твёрдый и хрупкий, чем твёрдорастворный слой на основе α -фазы. Слой, состоящий из высокоазотистой ε -фазы обладает большей твёрдостью и хрупкостью, чем слой из γ' -фазы. Поэтому с целью снижения вероятности хрупкого разрушения инструмента в процессе эксплуатации (особенно в условиях прерывистого резания) при азотировании обычно стараются исключить образование γ' -фазы и тем более ε -фазы.

Конкретные условия эксплуатации режущего инструмента требуют создания азотированного слоя определенной толщины и микротвердости с развитием тех или иных структурных составляющих, которые в конечном итоге и определяют его работоспособность в процессе резания. Характеристики азотированного слоя определяются целым рядом технологических факторов, управляя которыми, можно регулировать характеристики азотированного слоя с учетом конкретных условий эксплуатации режущего инструмента. Все технологические факторы процесса находятся между собой в сложной и пока еще недостаточно изученной зависимости. Поэтому, применяемые в настоящее время технологические процессы ионного азотирования, как правило, основаны на эмпирических данных и экспериментальном подборе оптимальных режимов диффузионного насыщения.

Рассмотрим подробнее два различных варианта реализации процесса – ионное азотирование в тлеющем и в вакуумно-дуговом разрядах.

Ионное азотирование в тлеющем разряде. Технологический процесс ионного азотирования в плазме тлеющего разряда заключается в следующем (рис. 3.2). После герметизации камеры вакуумным насосом откачивается

воздух до давления 2–4 Па. Затем остатки воздуха из камеры удаляются 2–3-кратной продувкой ее рабочим газом из баллонов при давлении 10^3 Па и откачкой до исходного давления. Рабочий газ перед поступлением в камеру очищается фильтрами от влаги и кислорода. Далее к инструментам (катоду) и внутренней поверхности заземленной рабочей камеры (аноду) подается напряжение от источника постоянного тока, которое плавно повышается примерно до 1000 В. При этом давление в камере увеличивается до 10 Па и между катодом и анодом возбуждается тлеющий разряд, ионизирующий газовую среду. На этой стадии осуществляется катодное распыление. Ионы газа, бомбардируя поверхности инструментов, очищают их от возможных загрязнений и окислов и таким образом подготавливают к азотированию. Затем начинается вторая стадия процесса – азотирование. Плавно повышая давление газовой среды в рабочей камере и силу тока, инструменты нагревают до заданной температуры. При этом рабочее напряжение составляет 350–550 В. В этой области давлений тлеющий разряд обладает двумя особенностями: основное падение напряжения происходит в прикатодной области протяженностью от долей до нескольких миллиметров и в определенном диапазоне плотность тока по всей поверхности катода поддерживается практически одинаковой. Благодаря этому удается обеспечить равномерный нагрев и насыщение легирующими элементами большого числа инструментов даже сложного профиля. По окончании технологической выдержки производят охлаждение изделий в вакууме или в потоке газа. Температура в установке может измеряться с помощью термопары, введенной в глухое отверстие образца, близкого по форме к азотируемым изделиям, расположенного рядом с ними и являющегося также как и они катодом.

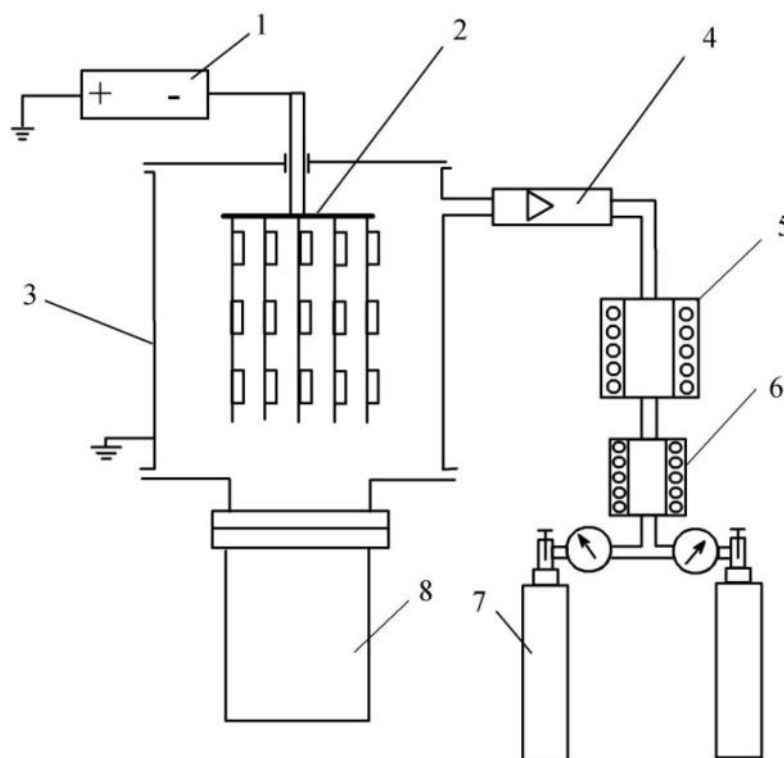


Рис. 3.2. Принципиальная схема установки для ионного азотирования в тлеющем разряде:

1 – источник питания; 2 – навеска с обрабатываемыми изделиями; 3 – вакуумная камера; 4 – ротаметр; 5,6 – фильтры; 7 – баллоны с газом; 8 – форвакуумный насос

Ионное азотирование в плазме тлеющего разряда имеет широкие возможности для технологического контроля и управления процессом диффузионного насыщения. Наряду с составом азотосодержащей среды, температурой и продолжительностью насыщения, процесс можно регулировать изменением давления газовой среды и электрических характеристик разряда.

Имеющиеся литературные данные показывают, что при прочих равных технологических факторах для каждой конкретной установки существует определенное давление рабочего газа (так называемое давление максимального насыщения), обеспечивающее наибольшую толщину диффузионной зоны. Зависимость толщины диффузионной зоны от давления азотосодержащей среды имеет ярко выраженный экстремум. Повышение давления азотосодержащей среды приводит к увеличению количества ионов атомарного азота, способных к участию в сорбционных процессах и последующем диффузионном насыщении. С другой стороны, с ростом

давления газа снижается кинетическая энергия этих ионов из-за уменьшения длины их свободного пробега в результате взаимного столкновения. При этом некоторая часть ионов азота объединяется в молекулы и не участвует в процессе насыщения. Кроме того, повышение давления рабочего газа снижает эффект катодного распыления, что приводит к росту толщины внешней нитридной зоны, то есть к усилению ее барьерного действия на диффузию азота вглубь металла.

Состав азотосодержащей атмосферы оказывает сильное влияние на концентрацию возбужденных и ионизированных атомов азота, являющихся основными частицами, ответственными за протекание процесса ионного азотирования. Для проведения процесса азотирования могут быть использованы различные азотосодержащие газовые смеси – $\text{Ar}+\text{H}_2$, $\text{Ar}+\text{NH}_3$ и др. Наибольшая концентрация ионизированных атомов азота обнаруживается в газовой смеси, состоящей из одной части азота, одной части водорода и двух частей аргона ($2\text{Ar}+1\text{N}_2+1\text{H}_2$).

Считается, что важную и неоднозначную роль при азотировании в тлеющем разряде имеют ионы водорода. С одной стороны они не только обладают хорошей распыляющей способностью, но и снижают энергию, требуемую для диссоциации молекулы азота, в то время как при соударении с ионом аргона диссоциация молекул азота менее вероятна. С другой стороны при добавлении к азоту водорода общий ионный ток растет и существенно возрастает интенсивность тока водородосодержащих ионов при соответствующем снижении тока ионов азота, образующиеся ионы водорода просто вытесняют ионы азота из процесса насыщения. Небольшое количество водорода (до 5%), как правило, добавляют в азотную среду с целью нейтрализации возможной примеси кислорода, наличие которого просто недопустимо. Его присутствие до двух раз снижает количество ионов N^+ и оказывает крайне неблагоприятное влияние на растворимость азота в материале.

Основными характеристиками азотированного слоя, которые подвергаются оптимизации для конкретно взятых условий эксплуатации инструмента, являются толщина, микротвердость и фазовый состав.

При ионном азотировании температуру насыщения быстрорежущей стали выбирают таким образом, чтобы она не превышала температуру ее отпуска. Поэтому ионное азотирование широко применяемой стали Р6М5 проводят в интервале 400...550 °С.

3.1. Результаты производственных испытаний многолезвийного инструмента, подвергнутого ионному азотированию

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	Количество обработанных деталей, шт	
		без азотирования	после ионного азотирования
Фрезерование			
ЖС6КП-ИД	Р6М5К5	8	43
ХН30ВМТ	Р9М4К8	20	32
ВТЗ-1	Р9К5	17	60
13Х11Н2В2МФ	Р9М4К8	15	25
Протягивание			
13Х11Н2В2МФ	Р18	120	315

3.2. Результаты производственных испытаний мелкоразмерного инструмента, подвергнутого ионному азотированию

Обрабатываемый материал	Вид инструмента	Период стойкости (мин) или количество обработанных отверстий (шт)	
		без азотирования	после ионного азотирования
27КХ	Сверла диаметром 2,5	40 мин	80 мин
ВТЗ		50 мин	70 мин
36КНМ		18 мин	80 мин
50Н		30 мин	80 мин
50Н	Метчик М5х0,5	50 шт.	100 шт.
36КНМ		20 шт.	35 шт.
36НХТЮ		18 шт.	30 шт.

В табл. 3.1 и 3.2 представлены результаты производственных испытаний азотированного инструмента различного типоразмера из которых видно, что

применение ионного азотирования позволяет существенно повысить период стойкости быстрорежущего инструмента.

Азотирование в вакуумно-дуговом разряде. Вакуумно-дуговой разряд, который может быть использован для проведения процесса ионного азотирования, представляет собой несамостоятельный дуговой газовый разряд, эмиттером электронов для поддержания которого служит вакуумно-дуговой испаритель, отделённый от рабочего объёма вакуумной камеры экраном, непроницаемым для частиц испаренного металла, и пропускающим газ и электроны. Ток дугового разряда составляет несколько десятков или сотен ампер, а диапазон давлений, при которых он существует, составляет 0,01...1 Па, что значительно ниже давлений газа в тлеющем разряде. Такой разряд может существовать в разнообразных газовых средах, т.е. имеется возможность проводить химико-термическую обработку в различных насыщающих газах и их смесях.

На рис. 3.3 представлена простейшая схема установки для азотирования с использованием двухступенчатого вакуумно-дугового разряда. Вакуумная камера снабжена вакуумно-дуговым испарителем с источником питания. Испаритель отделён от основной рабочей части камеры оптически непрозрачным проницаемым для газа и электронов экраном. Корпус вакуумной камеры является анодом испарителя. Дополнительный анод находится под более положительным потенциалом, чем корпус камеры. В камере находится изолированный от неё подложкодержатель с обрабатываемыми инструментами, на который может быть подан положительный или отрицательный потенциалы от источников питания с помощью переключателя.

Для проведения процесса азотирования включают испаритель, источник питания разряда и напускают в камеру насыщающий газ (N_2 ; N_2+H_2 ; N_2+H_2+Ar или др.), устанавливая заданное его давление. В объёме между экраном и дополнительным анодом зажигается дуговой газовый разряд, в котором ионизируется насыщающий газ. Обычно величина тока этого

разряда составляет 60...200 А и зависит от количества обрабатываемых инструментов. Регулируя величину напряжения (или тока) в цепи подложки, управляют температурой азотируемого изделия и скоростью её подъёма.

В отличие от азотирования в тлеющем разряде, процесс по данному способу можно проводить как при отрицательном потенциале на инструменте (ионная бомбардировка), так и при положительном (электронная бомбардировка). В последнем случае исключается растравливание поверхности за счет её распыления ускоренными ионами азота, что сохраняет чистоту поверхности обрабатываемого изделия. При этом скорость азотирования на начальном этапе в 2...3 раза выше, чем при азотировании в тлеющем разряде.

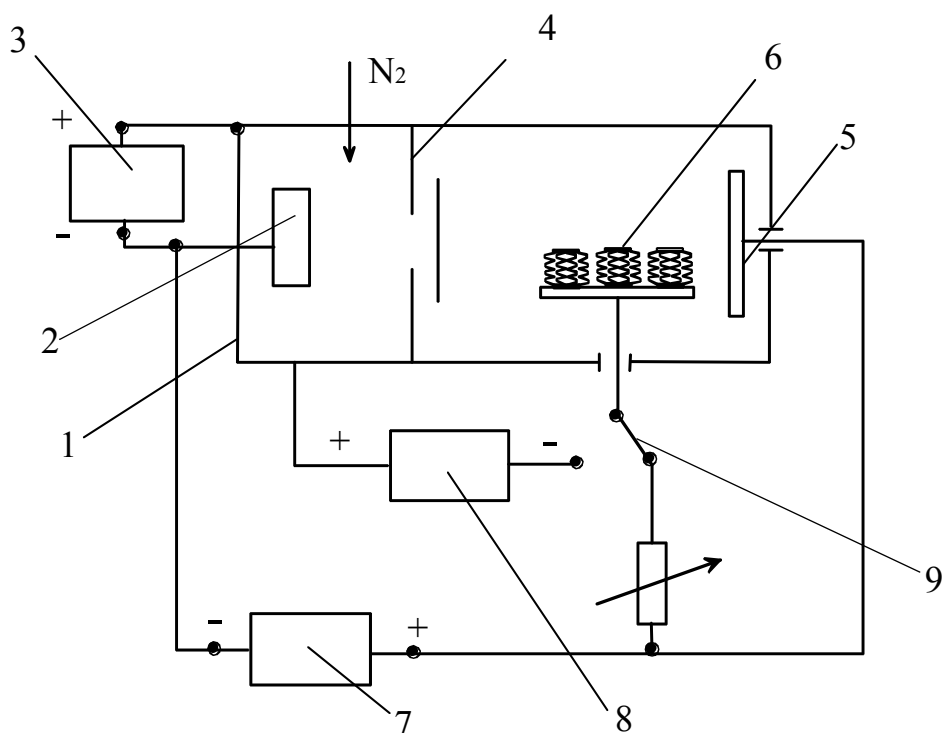


Рис. 3.3. Принципиальная схема установки для азотирования инструмента в плазме вакуумно-дугового разряда:

1 – вакуумная камера; 2 – вакуумно-дуговой испаритель; 3, 7, 8 – источники питания;
4 – экран; 5 – дополнительный анод; 6 – инструменты; 9 – переключатель

Изменяя основные технологические режимы азотирования – температуру, продолжительность процесса и состав газовой смеси – можно регулировать фазовый состав, толщину и микротвердость слоя.

При азотировании быстрорежущих сталей в газовой плазме вакуумно-дугового разряда наибольшее влияние на структуру формирующегося слоя оказывает состав азотосодержащей атмосферы, а время и температура влияют, главным образом, на его толщину и микротвердость.

Использование при азотировании азото-аргоновых газовых сред различного состава в условиях вакуумно-дугового разряда позволяет регулировать фазовый состав азотированного слоя, в зависимости от конкретных условий эксплуатации инструмента. Рентгеноструктурный и металлографических анализ показывает, что в поверхностном слое образцов, азотированных в 100% N₂ во всех случаях присутствует хрупкая ϵ -фаза, а по мере разбавления азота инертным газом аргоном (до 40-60 % N₂) образование ϵ -фазы полностью блокируется.

Эксплуатационные испытания быстрорежущего инструмента, работающего в условиях переменных теплосиловых нагрузок (например, фрезерования) показывают, что образование на поверхности азотированного слоя даже очень тонкой сплошной нитридной зоны может привести к выкрашиванию режущих кромок уже в первые минуты работы инструмента. Для инструмента, работающего в условиях непрерывного резания, оптимальной структурой является азотистый мартенсит, на поверхности которого допустимо формирование даже небольшого количества нитридной фазы на основе γ' -фазы, обладающей повышенной теплостойкостью.

За счет введения в состав азотосодержащей атмосферы инертного газа можно управлять фазовым составом формируемого слоя и в зависимости от конкретных условий эксплуатации режущего инструмента и его служебного назначения, получать необходимую структуру. Например, азотированный слой на основе твердого раствора азота в мартенсите без образования внешней нитридной зоны, являющийся оптимальным при эксплуатации инструмента в условиях циклических нагрузок, можно получить при азотировании в среде, содержащей 30% N₂ и 70% Ar, а структуру, являющуюся оптимальной для непрерывного резания – при 60% N₂ и 40% Ar.

В принципе, для разбавления азота возможно использование практически любого инертного газа, но если исходить из экономических соображений, наиболее подходящим является аргон.

В табл. 3.3 и 3.4 представлены результаты исследований влияния состава газовой смеси, температуры и продолжительности азотирования на толщину и максимальную микротвердость формируемого слоя.

Зависимость толщины азотированного слоя от продолжительности процесса подчиняется параболическому закону, что характерно для диффузионных процессов насыщения. При этом необходимо отметить, что за сравнительно короткое время 50-70 мин в интервале температур 420-510°C формируется азотированный слой очень большой толщины (до 90-175 мкм).

Увеличение процентного содержания азота в газовой смеси с аргоном ведет к некоторому увеличению поверхностной твердости азотированного слоя, но толщины формируемых слоев уменьшаются. Это может быть связано с образованием на поверхности значительного количества нитридных фаз (или сплошного слоя нитридов), препятствующих диффузии азота вглубь от поверхности.

Микротвердость и толщина азотированного слоя при азотировании в вакуумно-дуговом разряде по величине аналогичны тем, что имеют место при азотировании в тлеющем разряде, которые были рассмотрены выше. Главным же отличием является то, что при азотировании с использованием плазмы вакуумно-дугового разряда формируются очень большие по толщине слои, которые невозможно получить за соответствующее время ни одним другим известным способом, включая азотирование в тлеющем разряде.

Следовательно при азотировании в плазме вакуумно-дугового разряда создаются наиболее благоприятные условия для интенсивной диффузии азота в поверхностный слой, что может быть связано с очень высокой концентрацией азота в приповерхностном слое, а также с активацией поверхностного слоя быстрорежущей стали при ионной бомбардировке на стадии очистки и последующего азотирования.

3.3. Влияние продолжительности азотирования при температуре 450 °С на толщину слоя и максимальную микротвердость (40% ат. N₂+60% ат. Ar)

Продолжительность процесса, мин	Микротвердость , кН/мм ²	Эффективная толщина, мкм	Общая толщина, мкм
10	9,8	-	120
30	10,7	32	250
50	11,2	40	280-300
70	11,4	42-45	320

3.4. Влияние температуры и состава газовой смеси на толщину и микротвердость азотированного слоя (время азотирования – 50 мин)

Температура азотирования, °С	Концентрация N ₂ в газовой смеси с Ar	Микротвердость, ГПа	Эффективная толщина, мкм	Общая толщина, мкм
420	10	10,0	70	450-500
	20	10,0	30-40	200-250
	40	10,3	25-30	180-210
	80	10,6	10-15	150-200
	100	11,2	8	80-90
510	10	10,8	175	450
	20	11,2	90-100	300-350
	40	11,1	85	450-500

Производственный опыт эксплуатации инструмента после ионного азотирования в плазме вакуумно-дугового разряда показывает, что при проведении азотирования по оптимальным режимам, стойкость быстрорежущего инструмента может быть увеличена в 1,5-3,5 раза по сравнению с инструментами без азотирования.

3.2. Ионная имплантация

В основе ионной имплантации инструмента лежит внедрение в его поверхностный слой ускоренных ионизированных атомов легирующего вещества (титана, хрома, азота и др.). Этот метод поверхностной обработки может быть использован для упрочнения рабочих поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей, твердых сплавов, режущей керамики и даже сверхтвердых материалов. При ионной имплантации в поверхностном слое облучаемого материала образуются радиационные дефекты, которые приводят к изменению таких свойств материала, как микротвердость, прочность, пластичность, теплопроводность, электрическое сопротивление.

Данный метод поверхностного упрочнения является универсальным по спектру легирующих элементов, обрабатываемых материалов и диапазону концентраций элементов в легированном слое инструментального материала. Кроме того, имплантированный слой не изменяет размеров режущего инструмента и не отслаивается, как это может происходить с покрытиями.

Однако, ионная имплантация не получила повсеместного распространения в инструментальном производстве, что связано с высокой стоимостью имплантационного оборудования и его достаточно низкой производительностью. Отмеченные недостатки особенно проявляются при необходимости имплантации слоев большой толщины. Поэтому ионная имплантация, в первую очередь, применяется в микроэлектронике, медицине и других областях, где часто требуется формирование ультратонких и наноразмерных структур.

Анализ имеющихся экспериментальных данных, позволяет считать, что при ионной имплантации основными механизмами воздействия облучения на эксплуатационные показатели инструмента являются:

1. Создание различных барьеров для движения дислокаций, что приводит к повышению микротвердости и прочностных характеристик поверхностного слоя.

2. Создание в поверхностном слое сверхравновесных концентраций имплантированной примеси, приводящее к твердорастворному упрочнению материала.

3. Перераспределение компонент включений материала и обогащение его поверхностного слоя легкой компонентой (в частности, углеродом), что позволяет предотвратить интенсивное обезуглероживание поверхности, сопровождающее процесс изнашивания.

4. Изменение напряженного состояния поверхностного слоя, позволяющее формировать поля напряжений, которые компенсируют неблагоприятное воздействие полей напряжений в процессе эксплуатации.

5. Уменьшение высоты микронеровностей за счет распыления поверхности, приводящее к уменьшению фактической площадки контакта при трении и, как следствие, к снижению интенсивности изнашивания.

Ионная имплантация – это процесс, при котором практически любой элемент или соединение может внедряться в приповерхностную область любого твёрдого тела с использованием высокоэнергетического потока ионов с энергией до нескольких мегаэлектронвольт. Ионы внедряются в материал мишени на глубину $\sim 0,01 \dots 1$ мкм, теряя энергию в результате столкновения с атомами мишени. Необходимо понимать, что глубина проникновения ионов не характеризует общую толщину модифицированного слоя. В результате диффузионных и других процессов, происходящих как непосредственно в процессе имплантации, так и в процессе последующей обработки и эксплуатации режущего инструмента, общая толщина модифицированного слоя в некоторых случаях может достигать 200 мкм.

Существуют два различных способа ионной имплантации – ионно-лучевая и плазменно-иммерсионная. В первом случае имплантация осуществляется на специальных ускорителях при сканировании поверхности обрабатываемого инструмента ускоренным ионным лучом с энергиями до 5 МэВ. Во втором случае имплантация происходит при погружении инструмента в плазму (тлеющего, вакуумно-дугового и др. разрядов) и

подачи на него импульсов того или иного потенциала. При этом значение энергий ионов, как правило, не превышает 100 кэВ.

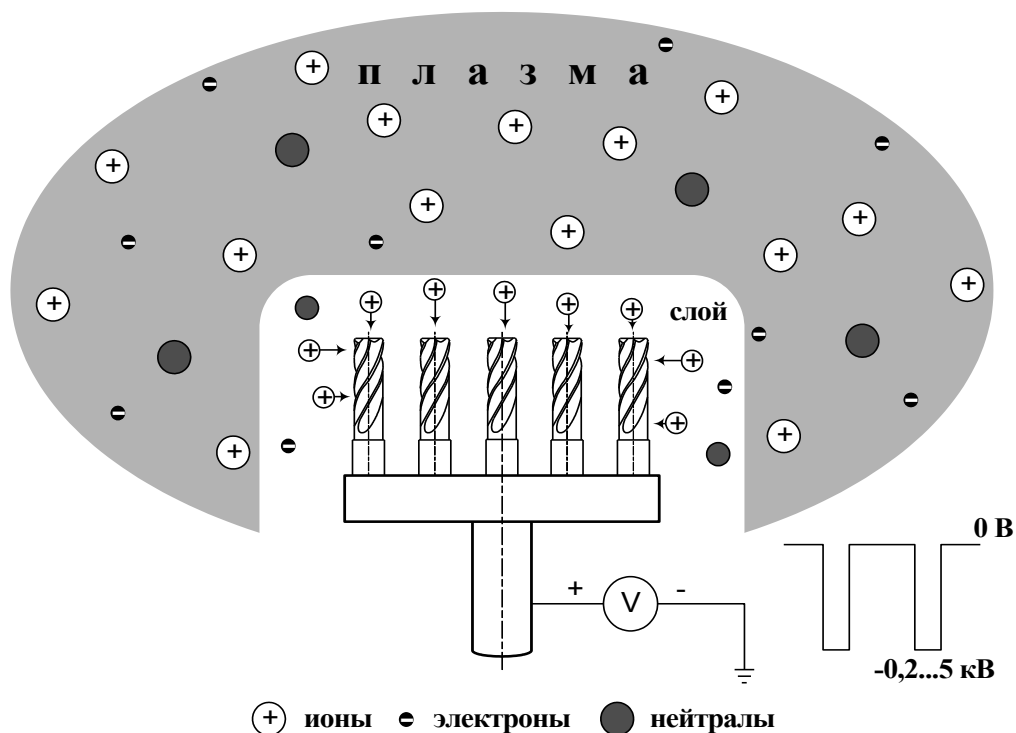


Рис. 3.4. Принципиальная схема процесса плазменно-иммерсионной имплантации режущего инструмента

В отличие от ионно-лучевой плазменно-иммерсионная имплантация (рис. 3.4) не требует извлечения ионов из плазменного эмиттера, фокусировки, транспортировки, сканирования и других операций. При размещении в заполненной плазмой камере любого изделия сложной геометрической формы и подаче на него импульса высокого напряжения отрицательной полярности вся его поверхность одновременно обрабатывается ионами, ускоряемыми в слое между плазмой и изделием. Благодаря этому данный метод является более дешевым и более производительным. В то же время он характеризуется низкой эффективностью использования энергии из-за того, что ток вторичных электронов, эмитируемых изделием, на порядок превышает ток бомбардирующих его поверхность ионов. Необходимо также упомянуть о больших габаритах рабочих камер установок. Это связано с тем, что ширина слоя вокруг изделия при подаче на него импульса может достигать 0,5 м. Поэтому для обработки даже небольшого по размерам

изделия нужна камера диаметром 1 м. Самым серьезным недостатком плазменно-иммерсионной имплантации, препятствующим ее широкому промышленному освоению, является опасное рентгеновское излучение, возбуждаемое вторичными электронами с энергией 50 – 100 кэВ.

При ионной имплантации атомы легирующих элементов ионизируют в сильном электрическом поле и облучают потоком ионов поверхность инструмента. Имея при подлёте к поверхности одинаковую энергию, ионы при вхождении в твердое тело испытывают многократные столкновения с ядрами и кулоновское взаимодействие с электронами атомов мишени. Это приводит к постепенному торможению ионов вплоть до полной остановки. При этом путь, пройденный отдельным ионом в материале, называемый длиной пробега, является величиной случайной.

На практике могут использоваться две основные схемы ионной имплантации (рис. 3.5):

1. Прямая имплантация, когда изменение свойств поверхностных слоев материала происходит непосредственно под действием облучающих ионов.
2. Атомами отдачи (так называемое, ионное перемешивание), когда свойства поверхностного слоя формируются за счет атомов предварительно нанесенной на инструментальную матрицу пленки, а облучающие ионы (обычно инертных газов) только обеспечивают каскадное перемешивание атомов пленки и матрицы.

Метод прямой имплантации может быть осуществлен на ускорителях или в установках, реализующих различные виды разрядов – тлеющий, вакуумно-дуговой и др. Имплантация атомами отдачи требует значительных энергий, поэтому осуществима только на ускорителях.

Вид имплантируемых ионов выбирается, главным образом, исходя из условий эксплуатации инструмента, химического состава и структуры облучаемого инструментального материала, а также возможностей имплантационного оборудования.

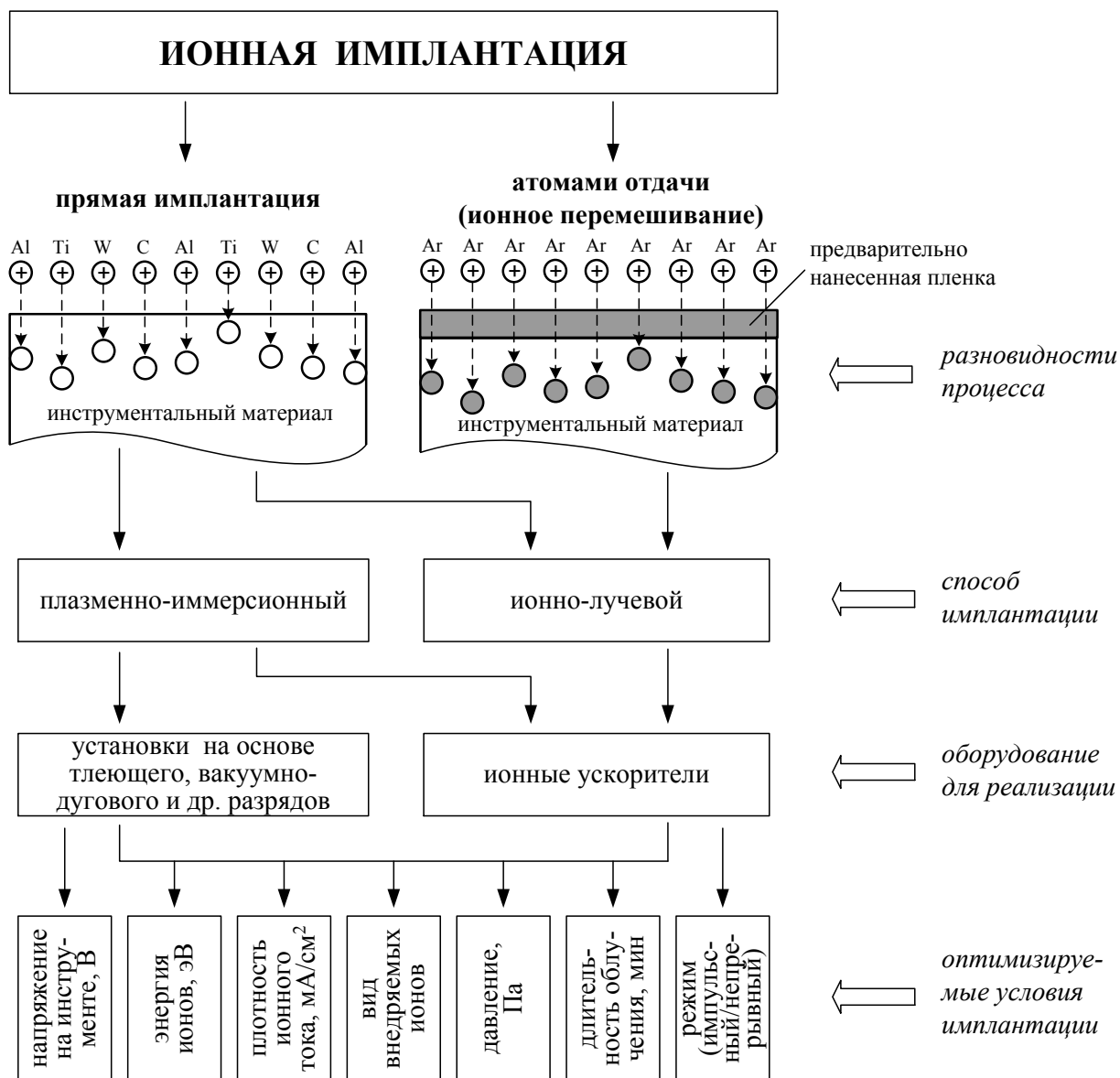


Рис. 3.5. Различные способы и условия проведения процесса ионной имплантации

Необходимо понимать, что положительный эффект от применения ионной имплантации может быть достигнут только при выборе оптимальных условий ее проведения.

К оборудованию, используемому для ионной имплантации, предъявляется целый комплекс требований. Наиболее важными из них являются:

- высокая производительность, определяемая количеством обработанных изделий определенного размера в единицу времени;
- малые габариты и как можно меньшее энергопотребление;

- длительная и стабильная работа источника ионов и других узлов ускорителя;
- однородность дозы по большой площади мишени и воспроизводимость результатов при выбранном типе ионов;
- возможность прецизионной взаимной ориентации ионного луча и образца;
- возможность автоматизации процесса и компьютерного управления;
- безопасность для персонала и простота обслуживания.

Установка для ионно-лучевой имплантации представляет собой вакуумную камеру, состоящую из ряда блоков, последовательно состыкованных с помощью уплотнений из вакуумной резины. Из источника примесь в парообразном или газообразном виде попадает в разрядный блок (ионизатор), из которого отрицательным потенциалом в 5...25 кВ ионы вытягиваются в магнитный сепаратор (масс-анализатор). Здесь в постоянном магнитном поле происходит разделение траекторий ионов с различным электрическим зарядом так, что в следующий блок проходит моноэнергетический поток ионов. В этом блоке с помощью системы электродов ионному пучку придаётся плоская (ленточная) форма и в следующем блоке (ускорителе) ионы разгоняются до необходимой энергии. В рабочую камеру, таким образом, проходит плоский (ленточный) ионный луч неподвижный в пространстве.

На рис. 3.6 представлена принципиальная схема установки для ионной имплантации с линейным ускорителем.

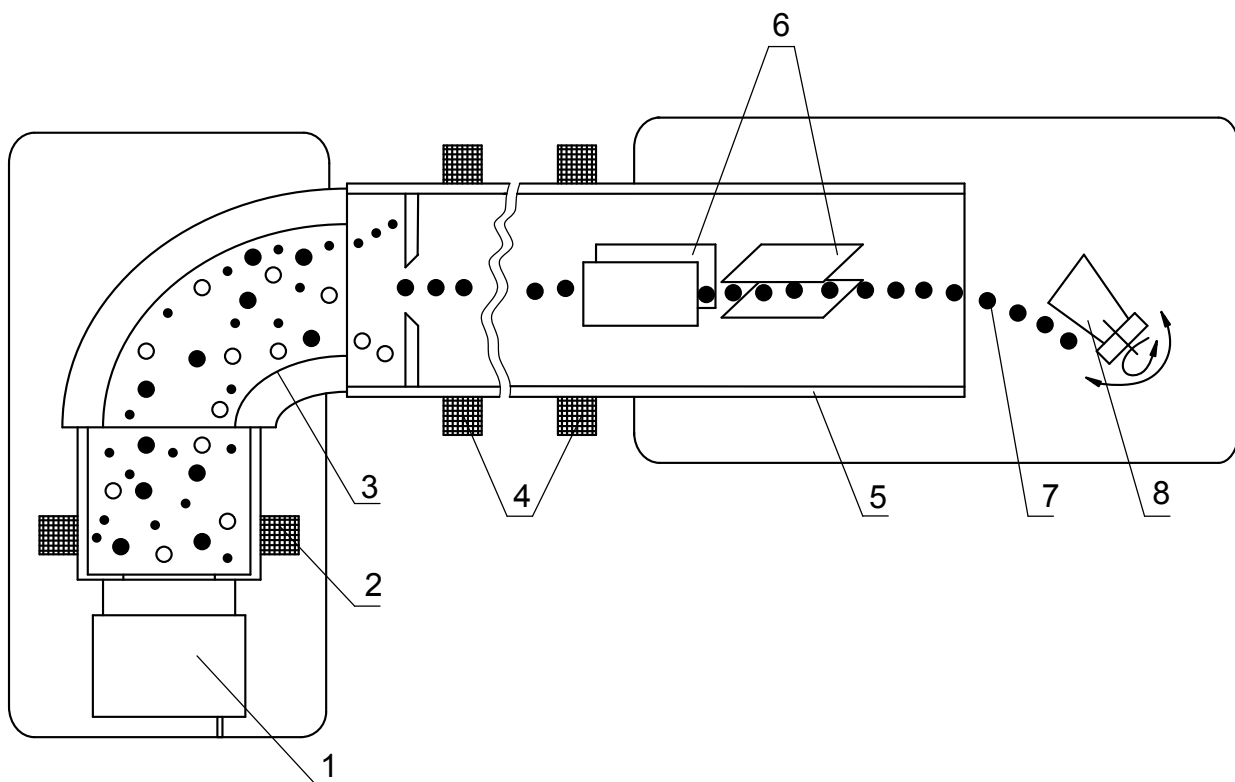


Рис. 3.6. Схема установки для ионной имплантации с линейным ускорителем:
 1 - источник ионов, 2 система вытягивания ионов, 3 - сепаратор, 4 - фокусирующие магниты, 5 - линейный ускоритель, 6 - электростатическая отклоняющая система, 7 - поток ионов, 8 - упрочняемые изделия

Все типы установок по системам ускорения ионов условно можно разделить на три группы: с ускорением до сепаратора, после сепаратора и с двумя системами ускорения. В устройствах первой группы ионы вытягиваются из выходной щели источника напряжением 5...15 кВ и далее получают приращение энергии в многоэлектродной системе с постоянной напряженностью электрического поля. После сепаратора выделенный поток направляется в приемную (рабочую) камеру. Как сепаратор, так и приемная камера, здесь находятся под нулевым потенциалом, что удобно при эксплуатации.

Однако работа с ионами большой массы и энергии требует значительного увеличения габаритов магнитного сепаратора, поэтому становится выгодным ускорять ионы до требуемой энергии после их разделения. Вытягивание их из источника и формирование потока осуществляется с помощью относительно невысокого напряжения. Установки этой группы относятся к

устройствам с послеускорением ионов; приемная камера или располагаемые внутри ее держатели образцов находятся под высоким потенциалом, что усложняет эксплуатацию.

Установки третьей группы чаще используют для легирования высокоэнергетическими ионами со сравнительно малыми массовыми числами. В них применяются две системы ускорения. Если приемное устройство заземлено, то под высоким напряжением находятся источник ионов и масс-сепаратор.

При выборе типа установки существенна величина дозы легирующей примеси и по этому признаку установки также разделяют на три типа: 1) малых и средних доз; 2) больших доз с интенсивными ионными токами; 3) высокоэнергетические.

Чем более высокие диапазоны энергий ионов используются при имплантации, тем меньше максимальные значения плотности ионного тока, которых можно достичь. Например, в ускорителях малых и средних доз при энергии ионов 100...200 кэВ сила тока ионного пучка может достигать 500...800 мкА, в то время как при имплантации с энергиями порядка 1 МэВ и выше, токи не превышают единиц микроампер.

Предприятия отечественной промышленности оснащены различными типами установок для ионного легирования: ИЛУ, «Везувий», «Иолла», «Лада» и др.

Общей характеристикой установок класса ИЛУ (ИЛУ-100, ИЛУ-200, ИЛУ-2, ИЛУ-3 и ИЛУ-4) является использование в них электромагнитного сепаратора и двойного ускорения ионов. Энергия ионов регулируется в диапазоне 20...100 кэВ, а сила тока ленточного пучка 0,3...30 мА. Площадь обрабатываемой мишени составляет 20...25 см². Ускорители класса ИЛУ являются крупногабаритными установками. Например, для размещения ускорителя ИЛУ-4 требуется площадь 57 м².

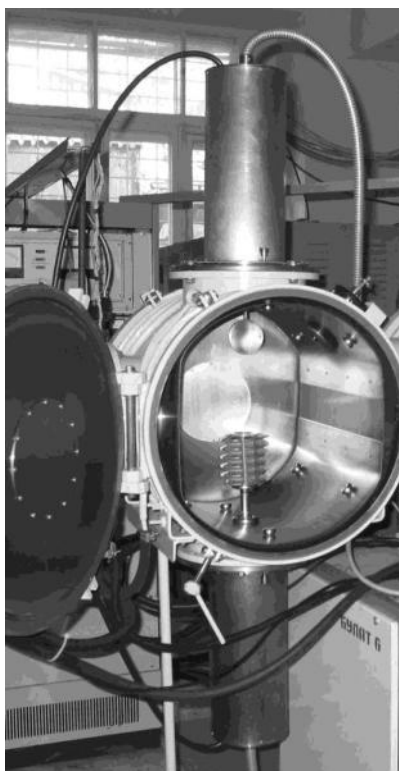
Большим разнообразием характеристик обладают установки типа «Везувий». Часть из них имеет электромагнитный сепаратор, а в других

используется постоянный магнит. В табл. 3.5 представлены некоторые характеристики установок для ионной имплантации.

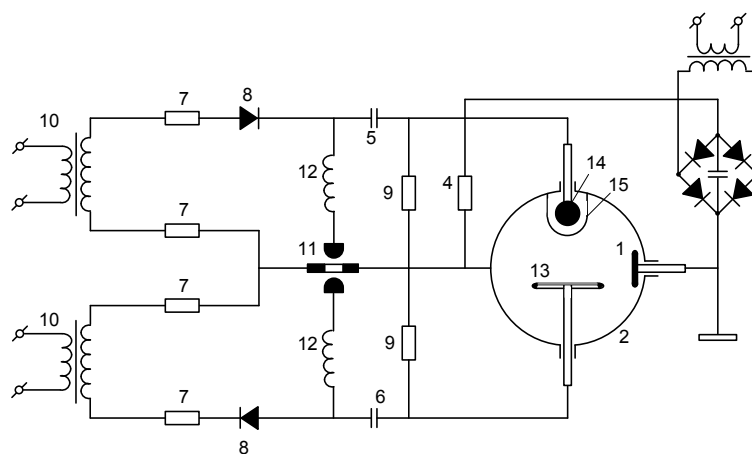
3.5. Основные характеристики некоторых отечественных моделей установок для ионной имплантации

Модель установки	Диапазон энергий, кэВ	Сила тока ионов, мкА	Неоднородность легирования,	Занимаемая площадь,	Потребляемая
Везувий-1	20...200	20...200	2	37	55
Везувий-2	20...200	150...600	4	24	15
Везувий-3М	20...150	300...1000	2	17	8
Везувий-4	15...100	300...700	4	24	15
ИЛУ-3	20...80	300...600	3	50	45
Иолла-2	50...80	100	2	5	6
Лада-30М	50...180	100	1	-	-

В установках для плазменно-иммерсионной имплантации применяются различные источники плазмы: вакуумная дуга, высокочастотный разряд, разряд с накалимым катодом и периферийным магнитным полем, а также другие разряды. В течение $\sim 99\%$ затрачиваемого на обработку времени плазма не оказывает существенного воздействия на изделие и лишь нагревает его. И только во время высоковольтного импульса длительностью ~ 20 мкс плазма «поглощается» расширяющимся слоем положительного объемного заряда вокруг изделия, при этом из плазмы извлекается и имплантируется в поверхность изделия значительная доля ионов. Каждый такой импульс приводит к снижению концентрации плазмы в камере и для восстановления ее прежней величины требуется определенное время, зависящее от типа источника плазмы.



а)



б)

Рис. 3.7. Общий вид (а) и электрическая схема установки (б) для плазменно-иммерсионной имплантации с использованием тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов

Для снижения энергии вызывающих рентгеновское излучение вторичных электронов в два раза по сравнению с энергией однократно заряженных ионов, бомбардирующих подложку, может быть использовано оборудование, где вместо импульса высокого напряжения ~ 100 кВ, ускоряющего ионы в слое между плазмой и изделием, одновременно подаются два импульса с меньшей в два раза амплитудой: один – между камерой и изделием, а другой – между погруженным в плазму дополнительным анодом и камерой. В этом случае рентгеновское излучение индуцируют эмитированные стенками камеры электроны, бомбардирующие дополнительный анод, и эмитированные изделием электроны, бомбардирующие стенки камеры. Так как энергия и тех и других электронов, по крайней мере, в два раза ниже энергии ионов, бомбардирующих изделие, интенсивность и проникающая способность рентгеновского излучения существенно снижаются. Для

исключения бомбардировки дополнительного анода эмитированными подложкой электронами с полной энергией ~ 100 кэВ между ними устанавливается небольшой экран, соединенный с камерой. На рис. 3.7 представлен общий вид и электрическая схема экспериментальной установки, в которой используется для имплантации тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов.

Упрочнение инструментальных материалов при ионной имплантации связано с изменением субструктуры и фазового состава поверхностных слоев. Металлофизические исследования поверхности имплантированного инструмента из быстрорежущей стали показывают, что микроструктура облученной стали Р6М5 резко отличается от исходной. При облучении данной стали в импульсном режиме модифицированный слой состоит из трех зон: первая (толщиной 2...5 мкм) содержит рекристаллизованный материал, вторая (толщиной 10...20 мкм) – повышенную долю мартенситной компоненты, а третья (толщиной 20...30 мкм) – имеет аустенитную структуру.

Как показывает производственный опыт, для быстрорежущего инструмента, в частности из стали Р6М5, наиболее перспективным является облучение их ионами углерода с высокими (200...600 кэВ) энергиями в импульсном режиме и ионами углерода, алюминия и вольфрама с меньшими энергиями (до 40 кэВ) в стационарном режиме при дозах облучения порядка 10^{18} ион/см².

В твердосплавных материалах на основе карбида вольфрама облучение приводит, прежде всего, к изменению дислокационной структуры, увеличению плотности дислокаций, измельчению блоков мозаики, появлению дислокационных петель. При облучении твердых сплавов различными ионами, в том числе инертных газов в диапазоне энергий ионов от 0,4 до 600 кэВ, обнаруживается перераспределение имплантированных элементов и элементов матрицы за счет радиационно-стимулированной диффузии. Это перераспределение особенно интенсивно протекает при

повышенных температурах, то есть при облучении в плазме тлеющего разряда. При эксплуатации инструмента может происходить дальнейшая миграция имплантированной примеси в матрицу, что приводит к увеличению глубины модифицированного слоя до 200 мкм и более. Перераспределение имплантированных ионов происходит в условиях фрикционного взаимодействия материалов, сопровождающееся целым комплексом разнообразных физических явлений.

Применение ионной имплантации позволяет существенно уменьшить интенсивность изнашивания твердосплавного инструмента. Наиболее эффективным способом является облучение ионами инертного газа (например, гелия). На рис. 3.8 представлены результаты стойкостных испытаний токарных резцов, оснащенных неперетачиваемыми пластинами из твердых сплавов ВК8, Т5К10 и Т15К6, имплантированных ионами гелия и аргона с энергиями 400 эВ и дозами 10^{21} ион/см². Из представленных данных видно, что период стойкости облученных твердосплавных пластин во всех случаях существенно выше по сравнению с необлученными.

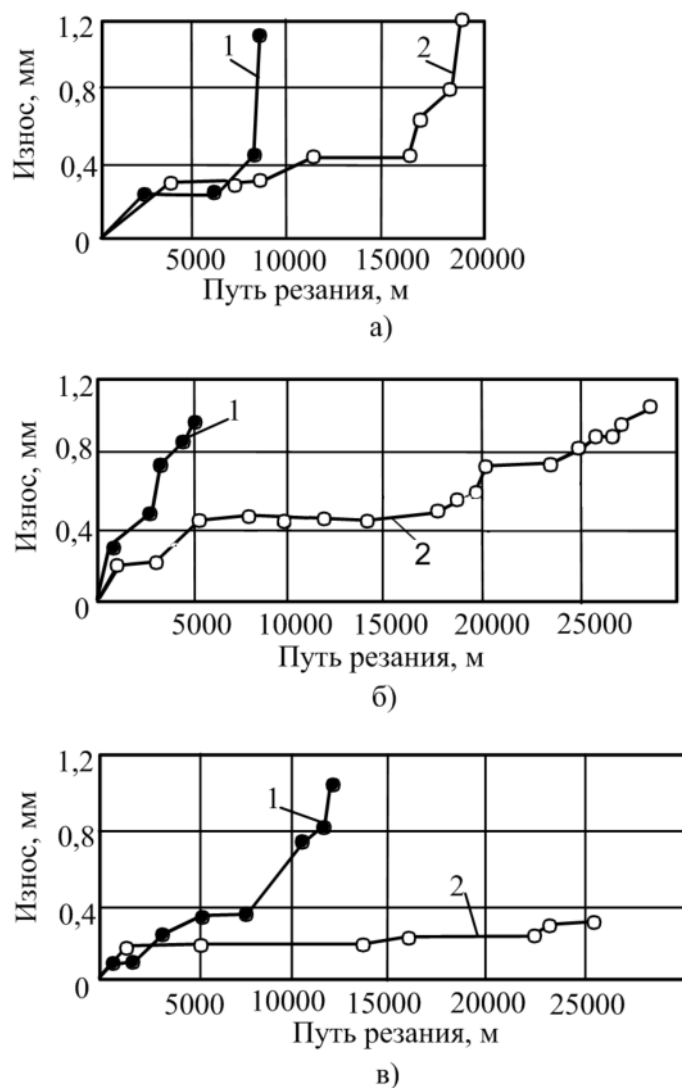


Рис. 3.8. Зависимость износа по задней поверхности от пути резания исходных (1) и имплантированных гелием (2) пластин из твердых сплавов VK8 (а), T5K10 (б) и T15K6 (в):
 $V=120$ м/мин; $t=1$ мм; $S=0,12$ мм/об

Ионная имплантация может быть использована для повышения работоспособности пластин из режущей керамики. Имплантация высокоэнергетических ионов Ti, Zr, Cr, N и Al приводит к образованию в поверхностном слое таких пластин новых соединений или твердых растворов, обладающих увеличенным объемом по сравнению с объемом керамического материала. Высокая плотность внедренных ионов создает в приповерхностных слоях керамики сжимающие напряжения, распространяющиеся на достаточно большую глубину. Возникновение сжимающих напряжений в приповерхностном слое тормозит образование и распространение трещин, что и приводит к росту прочности при изгибе и

трещиностойкости. При этом определенный вклад в эффект упрочнения вносит и структурное модифицирование дефектных слоев режущей керамики, вызванное воздействием ионного пучка. Однако ионная имплантация не всегда способствует повышению прочностных характеристик режущей керамики. Например, структура керамики на основе SiC после ионной имплантации становится аморфной и даже несколько теряет в прочности.

3.3. Лазерная обработка

В инструментальном производстве получили распространение различные виды поверхностной обработки с использованием лазерного излучения – лазерная закалка (термообработка), легирование и наплавка. Если первые два процесса используются для упрочнения тонкого (до 80 мкм) поверхностного слоя режущего инструмента за счет изменения его структуры и химического состава, то наплавка в основном используется для нанесения сравнительно толстых покрытий (до 3 мм) главным образом для ремонта и восстановления штампового инструмента – пресс-форм, фильер, вырубного инструмента и др.

Лазерное поверхностное упрочнение осуществляется высококонцентрированным излучением, сфокусированным на малой площади – от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Данный способ обработки может быть использован для упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики.

Для осуществления лазерной закалки локальный участок поверхности инструмента нагревают с помощью излучения до сверхкритических температур, а после прекращения воздействия излучения этот участок охлаждается за счёт отвода теплоты во внутренние слои металла. Высокая скорость охлаждения приводит к образованию в инструментальном материале закалочных структур и, как следствие, к изменению физико-

механических характеристик поверхностного слоя инструмента – микротвёрдости, напряженного состояния и др.

Легирование и наплавка отличаются от закалки тем, что участок поверхности нагревается выше температуры плавления, а в зону оплавления вводят легирующие компоненты. В результате этого на поверхности инструмента образуется слой, отличающийся от исходного инструментального материала не только своей структурой, но и химическим составом. Разновидностями легирования являются оплавление лазером предварительно полученных покрытий и лазерное легирование из обмазок (рис. 3.9).

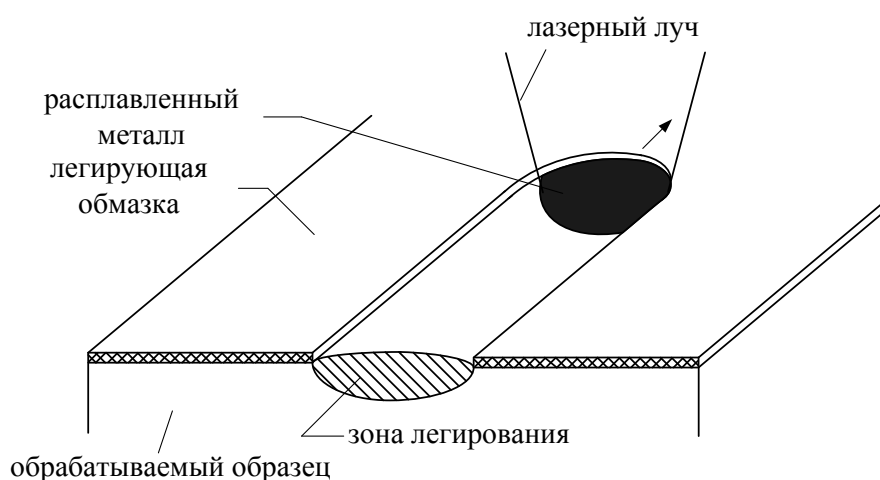


Рис. 3.9. Принципиальная схема лазерного легирования

Высокие плотности мощности лазерного излучения позволяют получать качественно новые свойства поверхностей, недоступные традиционным методам обработки материалов. Лазерная обработка поверхностей металлов и сплавов относится к локальным методам термической обработки с помощью высококонцентрированных источников нагрева. В этой связи лазерный луч как источник нагрева при термической обработке материалов имеет свои особенности и преимущества:

1. Высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют производить обработку только поверхностного участка материала без нагрева остального объёма и нарушения его структуры и свойств. Кроме

того, высокая концентрация подводимой энергии позволяет провести нагрев и охлаждение обрабатываемого объёма материала с большими скоростями при очень малом времени воздействия.

2. Возможность регулирования параметров лазерной обработки в широком интервале позволяет разработать целый ряд процессов поверхностной лазерной обработки, в каждом из которых можно легко регулировать структуру поверхностного слоя и его свойства – твёрдость, шероховатость, геометрические размеры обработанных участков и др.

3. Возможность обработки на воздухе, лёгкость автоматизации процессов, отсутствие вредных отходов при обработке и т.д.

4. Возможность транспортировки излучения на значительные расстояния и подвода его с помощью специальных оптических систем в труднодоступные места, позволяет производить обработку в тех случаях, когда использование других источников энергии затруднительно или невозможно.

Однако лазерная обработка, как, впрочем, и любой другой метод поверхностного упрочнения режущего инструмента, наряду с преимуществами, имеет и недостатки. Для лазерного упрочнения это в первую очередь чрезвычайно низкий КПД и высокая стоимость оборудования, а также трудности при упрочнении фасонного инструмента – протяжек, червяных фрез и др.

Воздействие луча лазера на твердое непрозрачное тело условно можно разделить на несколько характерных стадий:

- поглощение светового потока и передача его энергии тепловым колебаниям решетки твердого тела;
- нагревание вещества без его разрушения;
- испарение вещества в зоне воздействия луча лазера и разлет продуктов разрушения;
- остывание вещества после окончания воздействия лазерного излучения.

Одновременно с указанными стадиями проходят диффузионные и химические процессы, а также фазовые превращения, оказывающие влияние на характер воздействия лазерного излучения на материал.

Условиями лазерного воздействия, которыми можно варьировать и которые оказывают решающее влияние на свойства формируемого слоя, и, как следствие, на эксплуатационные показатели режущего инструмента, являются мощность лазерного излучения, время и тип воздействия (импульсный или непрерывный), частота следования импульсов (для импульсного режима излучения), скорость сканирования луча (для непрерывного режима излучения) и др.

На количество поглощенной энергии при лазерной обработке оказывают влияние теплофизические характеристики инструментального материала или покрытий и обмазок, нанесенных на его поверхность. Необходимо отметить, что последние используются не только при лазерном легировании, но и при обычной лазерной закалке с целью увеличения поглощательной способности поверхности. Для снижения коэффициента отражения часто используются специальные краски, грунтовки, сажа, графит, а также различные покрытия. Указанные вещества испаряются под воздействием лазерного луча и поэтому не изменяют химического состава поверхностного слоя (как в случае легирования), а только лишь повышают эффективность лазерной закалки. При выборе химического состава обмазок или покрытий для лазерного легирования также необходимо учитывать их поглощательную способность.

Рассмотрим энергетические условия процесса лазерной закалки и легирования материалов.

При лазерной обработке энергия излучения расходуется на поглощение поверхностью E_n , на потери энергии в результате отражения, определяемые оптическими свойствами покрытий (E_{no}) и на энергию, поглощенную покрытием и не дошедшую до обрабатываемого материала ($E_{обм}$) (рис. 3.13).

Вся энергия поглощенного лазерного излучения преобразуется в тепловую в тонком поверхностном слое $10^{-6} \dots 10^{-7}$ м.

Практика показывает, что предварительно нанесенные на поверхность инструмента покрытия или обмазки существенно увеличивают энергетическую эффективность процесса обработки за счет значительного увеличения коэффициента поглощения – до 0,8...0,9.

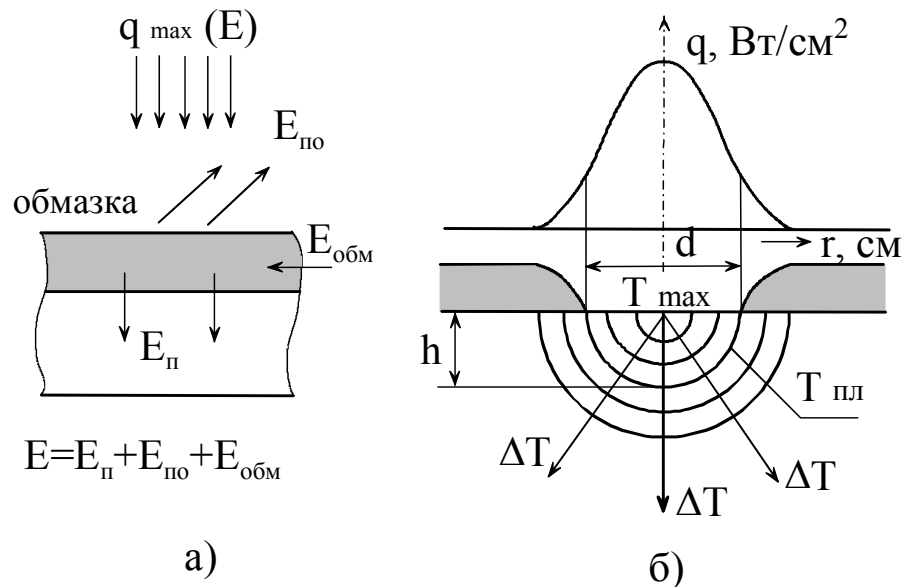


Рис. 3.10. Поглощение энергии при лазерной обработке (а) и температурное поле в зоне лазерного облучения (б)

В зависимости от плотности мощности излучения лазерная обработка осуществляется как с нагревом до температур, превышающих температуру плавления $T_{пл}$ или ниже температуры плавления. Уровни плотности мощности лазерного излучения, обеспечивающие локальный разогрев металла до температур $T < T_{пл}$ без заметного испарения материала, составляют $10^8 \dots 10^9$ Вт/м². Обычно рекомендуется значения плотности мощности q для лазерной термообработки устанавливать из условия $q > q_n$, где q_n – пороговая плотность мощности излучения, с превышением которой происходит активное расплавление и испарение инструментального материала. Значения q_n для различных материалов составляют $10^9 \dots 5 \cdot 10^{10}$ Вт/м².

При лазерном легировании обработка проводится при плотностях мощности излучения, приводящих к частичному подплавлению поверхности,

что может привести к ухудшению ее микрорельефа. Это объясняется тем, что эффект легирования достигается в случае расплавления и перемешивания обмазок и тонкого поверхностного слоя обрабатываемого инструмента. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при выборе условий обработки – в случае недопустимого ухудшения микрогеометрии обрабатываемой поверхности необходимо применять финишную доводку режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента.

Для лазерной обработки материалов в зависимости от типа используемой активной среды используется 4 лазеров: твердотельные, полупроводниковые, жидкостные и газовые.

Активная среда при лазерной обработке представляет собой совокупность атомов, молекул, ионов или кристаллов, которая под действием света может приобретать усиливающие свойства. Каждый атом обладает дискретным набором энергетических уровней. Электроны атома, имеющие минимальную энергию, при поглощении квантов света переходят на более высокий энергетический уровень. При излучении кванта света все происходит наоборот.

Для того чтобы преобладали переходы, при которых происходит излучение энергии (переходы с верхнего энергетического уровня на нижний), необходимо создать повышенную концентрацию возбужденных атомов или молекул (создать инверсную населенность). Это приведет к усилению падающего на вещество света. Состояние вещества, в котором создана инверсная населенность энергетических уровней, называется активным, а среда, состоящая из такого вещества - активной средой.

Процесс создания инверсной населенности уровней называется накачкой. Поэтому еще одной классификацией лазеров является классификация по способу накачки (оптическая, тепловая, химическая, электрическая и т.д.). Методы накачки зависят от типа лазера.

По режимам работы лазеры подразделяются на импульсные и непрерывные. В импульсном режиме в активную среду может быть введена

значительно более высокая мощность накачки и соответственно получены большие мощности генерации. Достоинством непрерывного излучения является то, что в этом режиме наиболее полно реализуются такие свойства лазеров как монохроматичность, когерентность, направленность и низкий уровень шумов излучения.

В общем случае конструкция лазера включает в себя следующие основные элементы (рис. 3.11) – активный элемент, система накачки и зеркало резонатора. Также, в лазерной системе могут использоваться дополнительные устройства для получения различных эффектов – поворачивающиеся зеркала, модуляторы, фильтры, поглотители т.д.

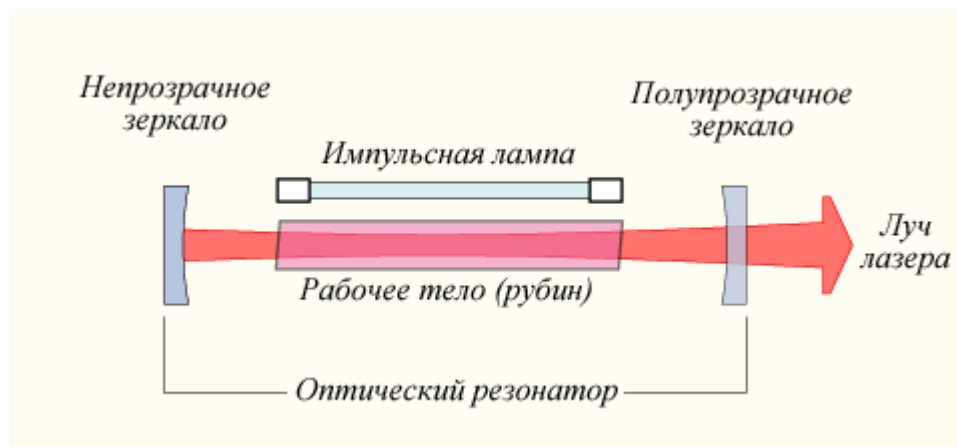


Рис. 3.11. Принципиальная схема устройства лазера

Существует большое количество твердотельных лазеров, работающих как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Рабочее тело (активное вещество) твердотельных лазеров выполняется в виде узких длинных призм, цилиндров и стержней. Наибольшее распространение среди импульсных установок получили лазеры на рубине и неодимовом стекле. Примером твердотельных лазеров непрерывного действия являются лазеры на иттриево-алюминиевом гранате с примесями различных редкоземельных атомов. Используемые в настоящее время в машиностроении различные типы твердотельных лазеров, достигают мощности 50...500 Вт.

Трудности выращивания больших монокристаллов или варки больших образцов однородного и прозрачного стекла для твердотельных лазеров

привели к созданию жидкостных лазеров, в которых примеси атомов редкоземельных элементов вводятся не в кристаллы, а в жидкость.

Основным достоинством газовых (CO_2) лазеров является высокая оптическая однородность. Поэтому в случае, когда необходимы максимально высокая направленность и монохроматичность излучения, газовые лазеры представляют наибольший интерес. Серийно выпускаемые газовые лазеры достигают мощности более 15 кВт и обеспечивают стабильную работу в непрерывном режиме излучения.

Полупроводниковые лазеры занимают особое положение среди других типов по ряду своих характеристик. Они характеризуются очень высоким КПД преобразования электрической энергии в когерентное излучение и могут работать в непрерывном режиме. Общим недостатком полупроводниковых лазеров является сравнительно невысокая направленность излучения.

Для упрочнения режущего инструмента в инструментальном производстве применение нашли твердотельные и газовые лазеры устройство которых представлено на рис. 3.15.

Типичный твердотельный лазер (рис. 3.15, а) состоит из активного элемента, резонатора в виде глухого и полупрозрачного зеркал, газоразрядной лампы с криптоновым наполнителем, являющейся источником оптической накачки, отражателя и системы питания лампы накачки.

Газовый CO_2 -лазер с диффузионным охлаждением (рис. 3.12, б) состоит из охлаждаемой водой разрядной трубки, внутри которой с помощью системы электродов создается газоразрядная плазма. По торцам разрядной трубки размещаются зеркала резонатора: глухое и полупрозрачное. Между электродами возбуждается электрический разряд с помощью высоковольтного источника питания. Излучение проходит через зеркало.

Представленные на рис. 3.12 схемы дают лишь общее представление об устройстве работы лазеров. Конструкции реальных промышленных лазерных установок намного сложнее. В качестве примера на рис. 3.16

представлен общий вид промышленного лазерного технологического комплекса на базе мощного CO_2 -лазера непрерывного действия модели ЛГН-702.

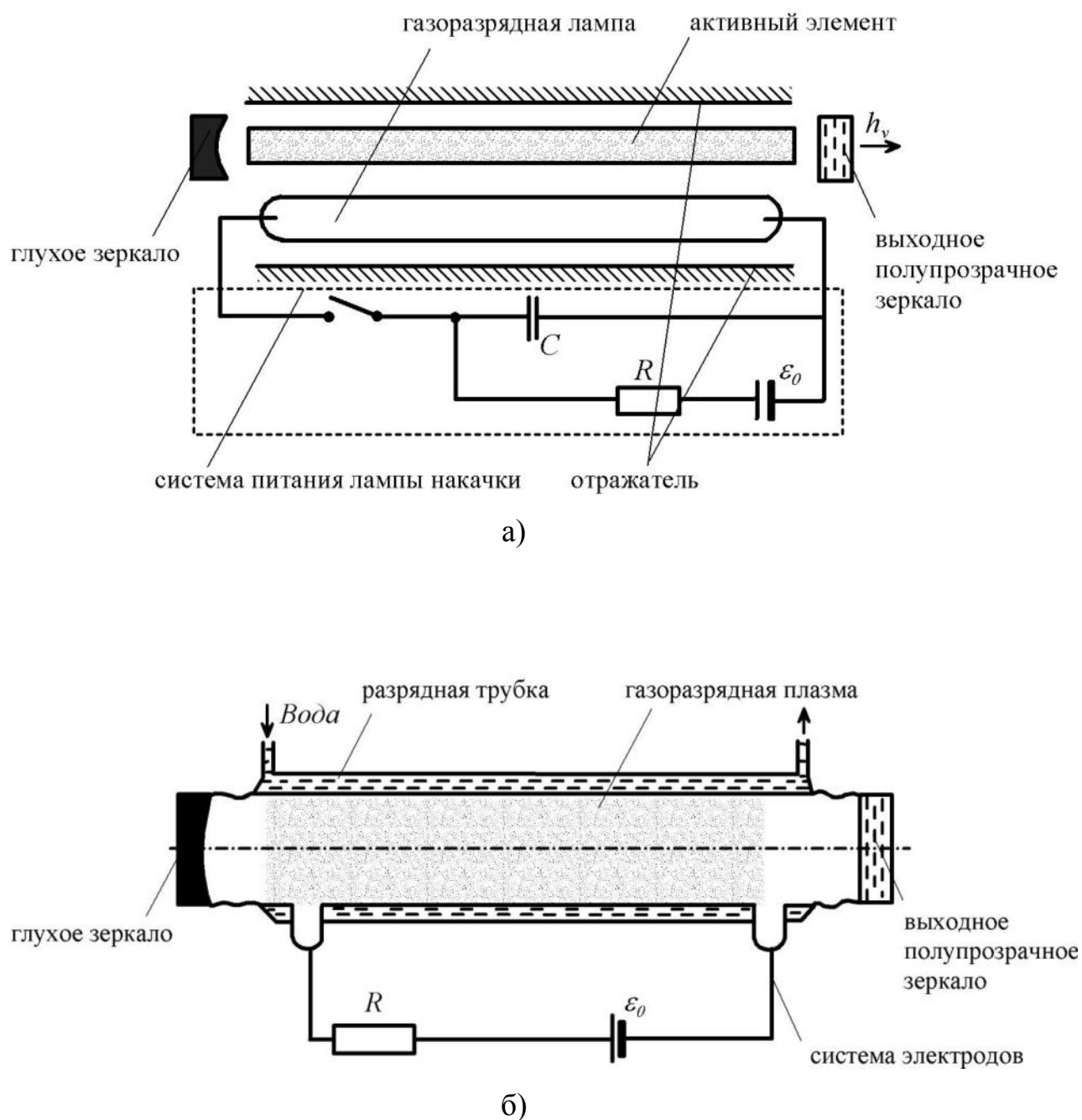


Рис. 3.12. Простейшая схема твердотельного лазера (а) и газового лазера с диффузионным охлаждением (б)

Представленный комплекс включает собственно сам газоразрядный лазер-излучатель с блоком питания, блоком прокачки, регулятором напряжения, газовой станцией и опорами. На передней опоре и задней стойке размещена направляющая балка, по которой перемещается фокусирующая система.

Перемещение фокусирующей системы производится по программе. Кроме этого, на направляющей балке размещен прерыватель излучения с поглотителем излучения. Для визуализации зоны обработки и настройки оптического канала используется гелий-неоновый лазер (типа ЛГ-78). Контроль уровня мощности лазерного излучения осуществляется непрерывно в процессе обработки с помощью специального измерителя проходного типа. Комплекс имеет два поста обработки (I и II). Передача излучения на второй пост осуществляется с помощью системы зеркал. Ориентирование обрабатываемых деталей и их перемещение относительно лазерного луча осуществляются с помощью вертикально-фрезерного станка, оснащенного блоком ЧПУ. На втором посту предусмотрена возможность обработки наружных и внутренних поверхностей длинномерных деталей типа тел вращения.

3.6. Технологические характеристики установок для лазерной обработки материалов

Технические параметры	Модель установки		
	Квант-15	Квант-16	Квант-18
Максимальная энергия излучения, Дж	10	35	100
Частота повторения импульсов, Гц	0,1 – 10	1	0,5
Длительность импульса излучения, мс	1,5; 2; 2,5; 4	1, 2, 3	8
Диапазон регулирования пятна, мм	0,25 – 3	0,4 – 6	1 – 16
Потребляемая мощность, кВт	12	12	16
Скорость прошивки, отв/с (толщина 1 мм)	20	–	–
Скорость сварки, мм/мин	350	–	–
Скорость резки, мм/мин	350	–	–
Скорость термообработки, мм/мин	1000	–	–
Габариты, мм	1000 × 960 × 1200	1225 × 1032 × 950	5,4 м ²
Масса, кг	200	200	1820
Назначение	Прошивка, резка, сварка, упрочнение	Упрочнение, сварка, прошивка	Упрочнение, сварка

Типичные примеры технологических процессов упрочнения металлорежущих инструментов с использованием лазерного технологического комплекса представлены на рис. 3.13.

Наряду с газовыми лазерами, широкое распространение в инструментальном производстве получили отечественные технологические комплексы на базе твердотельных лазеров типа Квант.

Особенностью лазерной обработки является локальность теплового воздействия, в силу чего эффективность ее применения во многом определяется правильностью выбора схемы облучения. На практике используется несколько основных схем лазерной обработки поверхности (рис. 3.14).

По схеме, представленной на рис. 3.14, а, используется импульсно-периодическое лазерное излучение. Лазерное упрочнение осуществляется импульсами излучения, сфокусированными в пятне диаметром d . Каждый последующий импульс перекрывает предыдущее пятно нагрева, т.е. перекрытие Δx составляет меньше диаметра пятна лазерного излучения.

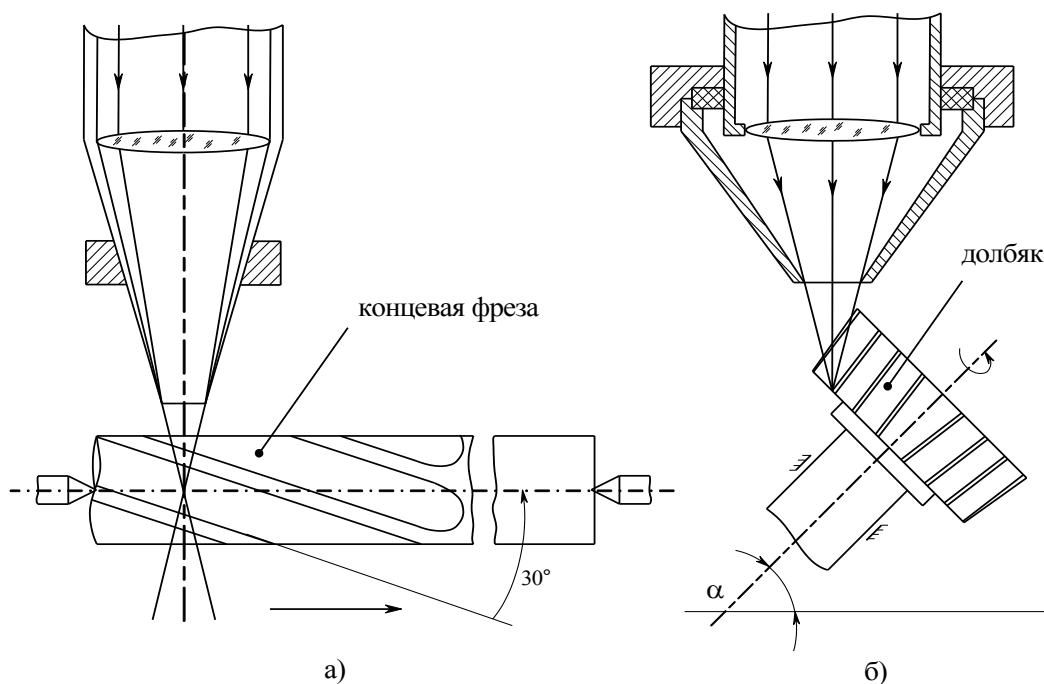


Рис. 3.13. Технологические схемы процесса лазерного упрочнения фрез (а) и долбяков (б)

Схема непрерывного излучения представлена на рис. 3.14, б. Высокая концентрация лазерного излучения обеспечивается фокусировкой его в пятно минимальных размеров. Процесс обработки в этом случае осуществляется сканированием луча в поперечном направлении с определенной частотой и одновременным линейным перемещением изделия в направлении обработки со скоростью v .

Согласно третьей схеме (рис. 3.14, в) для непрерывного излучения лазерный луч также имеет большую мощность и поэтому обеспечивает достаточную для упрочнения плотность мощности при фокусировке в пятно значительно больших размеров, чем в предыдущей схеме. Процесс обработки осуществляется перемещением изделия в направлении обработки со скоростью v .

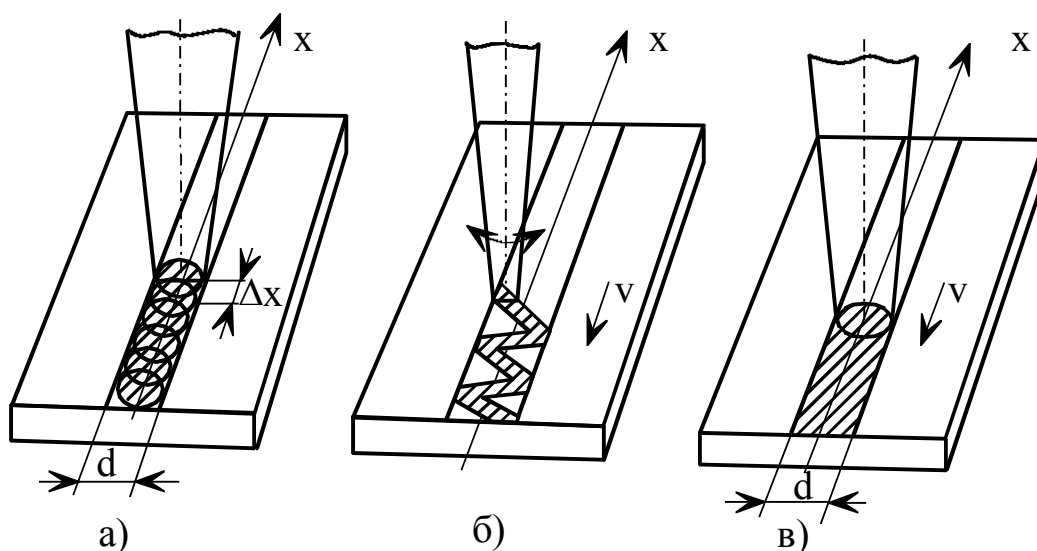


Рис. 3.14. Схемы лазерного упрочнения:

а – импульсно-периодическое; б – непрерывное излучение со сканированием;
в – непрерывное излучение (d – диаметр пятна, Δx – перекрытие пятен,
 v – скорость перемещения изделия)

Выбор той или иной схемы облучения определяется условиями эксплуатации инструмента и причинами его износа. Как правило, лазерной обработке подвергаются только те участки рабочих поверхностей инструмента, которые при эксплуатации наиболее интенсивно изнашиваются. При хрупком разрушении режущего инструмента (выкрашивание режущей кромки и сколы режущей части) применение

лазерной обработки, как правило, является нецелесообразным. В данном случае следует выбирать более прочный инструментальный материал, либо оптимизировать геометрические параметры режущего инструмента. Лазерная обработка может использоваться в качестве дополнения к указанным мероприятиям.

Оптимальные значения механических свойств инструментального материала после лазерной обработки определяются сочетанием параметров излучения. При этом руководствуются или экспериментальными зависимостями, разработанными для конкретных условий реализации процесса, либо для расчета некоторых параметров используют теоретические закономерности с поправочными коэффициентами на реальные условия.

Для обеспечения надежности результатов упрочнения, как правило, необходимо корректировать типовые режимы лазерной обработки применительно к конкретному изделию и применяемой лазерной установки. Одинаковый по типу и размерам инструмент из одной и той же марки стали, но изготовленный и прошедший объемную термообработку на разных предприятиях имеет различную поглощательную способность. Поэтому даже при обработке с одним уровнем энергии эффект от применения лазерного упрочнения может быть различным.

При импульсном лазерном упрочнении характеристики формируемого поверхностного слоя зависят, прежде всего, от плотности мощности лазерного излучения, длительности импульса, коэффициента перекрытия.

Практика показывает, что глубина упрочненного слоя как с оплавлением, так и без оплавления поверхности увеличивается с ростом плотности мощности лазерного излучения (рис. 3.14), а твердость обработанной поверхности имеет максимальное значение в определенном интервале ее значений.

Лазерная обработка инструмента обычно ведется с перекрытием зон лазерного воздействия (рис. 3.15). Практика показывает, что для получения достаточных размеров участков упрочненного металла облучение следует

вести при коэффициентах перекрытия (степени перекрытия пятен в ряду) превышающих 0,2. От выбора значения коэффициента перекрытия зависят равномерность упрочненного слоя по глубине и производительность процесса обработки. Наибольшая равномерность слоя по глубине достигается при коэффициенте перекрытия 0,4-0,5.

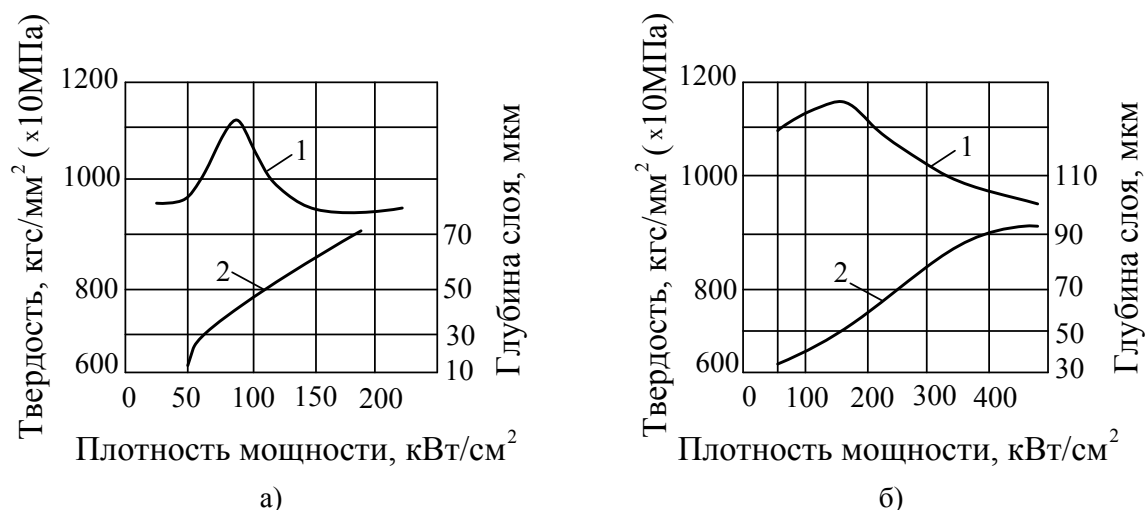


Рис. 3.14. Зависимость средней твердости (1) и глубины (2) упрочненных зон стали Р6М5 от плотности мощности лазерного излучения при различных длительностях импульса:
а - $\tau_{имп} = 1$ мс; б - $\tau_{имп} = 3-6$ мс

Кроме твердости и глубины упрочненного слоя, важной характеристикой, оказывающей существенное влияние на изнашивание режущего инструмента, является высота неровностей упрочненной поверхности. Ее минимальное значение наблюдается при малых значениях плотности мощности лазерного излучения и коэффициентах перекрытия пятен.

При использовании непрерывного излучения значительно повышается производительность лазерной обработки, что позволяет подвергать упрочнению участки как малых, так и крупногабаритных режущих инструментов. Кроме того, при непрерывном упрочнении важным условием, от которого в значительной степени зависят свойства формируемого слоя, является скорость относительного перемещения луча и инструмента.

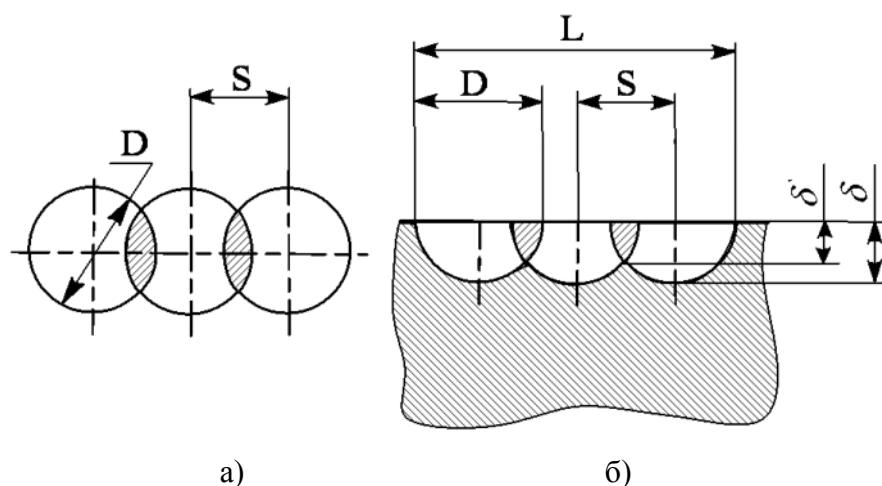


Рис. 3.15. Схема расположения облученных зон в плане (а) и продольном сечении (б) при линейном упрочнении

С увеличением скорости перемещения луча снижается глубина упрочненной зоны, что объясняется меньшей удельной энергией, подводимой к зоне лазерного воздействия. При слишком низкой скорости перемещения луча температура нагрева участка поверхности может превысить пороговое значение, что вызовет нежелательное ухудшение микрорельефа поверхности.

При лазерном легировании в качестве легирующих элементов используются углерод, молибден, ванадий, вольфрам, хром, кобальт, никель, кремний, их комбинации и соединения на основе тугоплавких металлов (WC , TiN , ZrN и другие). Выбор легирующих элементов производится таким образом, чтобы один или несколько легирующих элементов (Cr , Co , W , Mo) при нагреве в процессе эксплуатации или в процессе последующего после лазерного упрочнения отпуска частично сохранялись в твердом растворе и задерживали распад мартенсита. Другие (C , V), выделяясь из раствора наряду с частью перечисленных выше легирующих элементов, усиливали дисперсионное твердение и повышали вторичную твердость. Для протекания указанных процессов и компенсации возможного обезуглероживания поверхностных слоев инструментального материала (особенно в присутствии Co , Mo) при высокотемпературном нагреве необходимо присутствие в покрытиях углерода. Это способствует дополнительному насыщению

твердых растворов и может привести к формированию дисперсных карбидов легирующих элементов в процессе охлаждения после лазерной обработки или в процессе последующего отпуска структур лазерного легирования.

При легировании рабочих поверхностей инструмента часто используются дисперсионные порошки твердых сплавов ВК6, ВК10, Т15К6.

В зависимости от вида инструментального материала и условий лазерной обработки эффект упрочнения инструмента достигается в результате одного или сочетания нескольких эффектов (рис. 3.16).

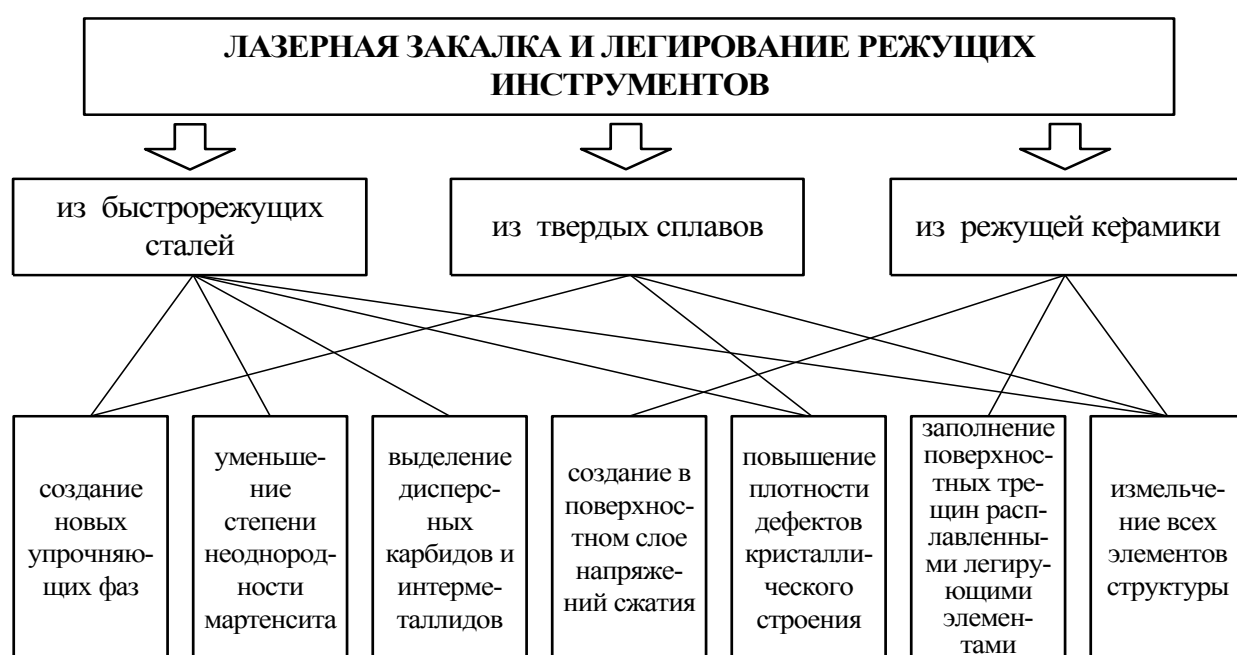


Рис. 3.16. Основные механизмы лазерного упрочнения инструментов из различных инструментальных материалов

Упрочнение инструментов из быстрорежущих сталей при лазерном легировании достигается в результате целого комплекса эффектов: создания новых упрочняющих фаз, уменьшения степени неоднородности мартенсита, выделения дисперсных карбидов и интерметаллидов, повышения плотности дефектов кристаллического строения, измельчения всех элементов структуры. Упрочнение инструмента из твердого сплава в основном достигается в результате создания новых упрочняющих фаз, повышения

плотности дефектов кристаллического строения и измельчения всех элементов структуры. Эффект упрочнения керамического инструмента в основном обеспечивается созданием в поверхностном слое напряжений сжатия, заполнением поверхностных трещин расплавленными легирующими элементами и измельчением всех элементов структуры.

3.4. Электронно-лучевая термообработка

Эффекты, происходящие при взаимодействии электронного луча с поверхностью режущего инструмента очень похожи с эффектами, рассмотренными в предыдущем разделе. При электронно-лучевом воздействии на поверхностный слой инструмента также возможна его закалка (термообработка) и легирование из предварительно нанесенных покрытий и обмазок.

Сущность процесса электронно-лучевой обработки состоит в том, что кинетическая энергия электронного луча (импульсного или непрерывного) сформированного в среде высокого вакуума, превращается в тепловую в зоне обработки. Последняя используется для различного воздействия на поверхностный слой режущего инструмента, находящегося под ускоряющим напряжением.

Получение свободных электронов осуществляется путём применения раскаленного металлического катода, эмитирующего (испускающего) электроны. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высокой разностью потенциалов между катодом и анодом. Фокусировка (концентрация электронов) достигается использованием кольцевых магнитных полей. Резкое торможение электронного потока происходит автоматически при внедрении электронов в металл. Электронный луч, используемый для упрочнения поверхности изделий, образуется в специальном устройстве - электронной пушке.

Повышая скорость движения электронов и их кинетическую энергию, увеличивая число электронов, можно создать чрезвычайно высокую концентрацию тепловой энергии в зоне торможения электронного луча.

Достоинствами электронно-лучевой обработки, обуславливающими целесообразность её практического применения, являются: возможность широкой регулировки режимов и тонкого управления тепловыми процессами; проведение процесса в вакууме, что обеспечивает чистоту среды в процессе обработки; высокий КПД (до 90%), существенно превосходящий аналогичный показатель для лазерной обработки; возможность автоматизации процесса.

Недостатками процесса, ограничивающими его применение, являются: необходимость защиты от рентгеновского излучения, возникающего при работе на напряжениях свыше 20 кВ; достаточно высокая стоимость и относительная сложность оборудования.

При электронно-лучевой обработке диапазоны мощности и концентрации энергии в луче достаточно велики, что позволяет проводить плавление и испарение, сварку, термообработку и другие виды термического воздействия (рис. 3.17).

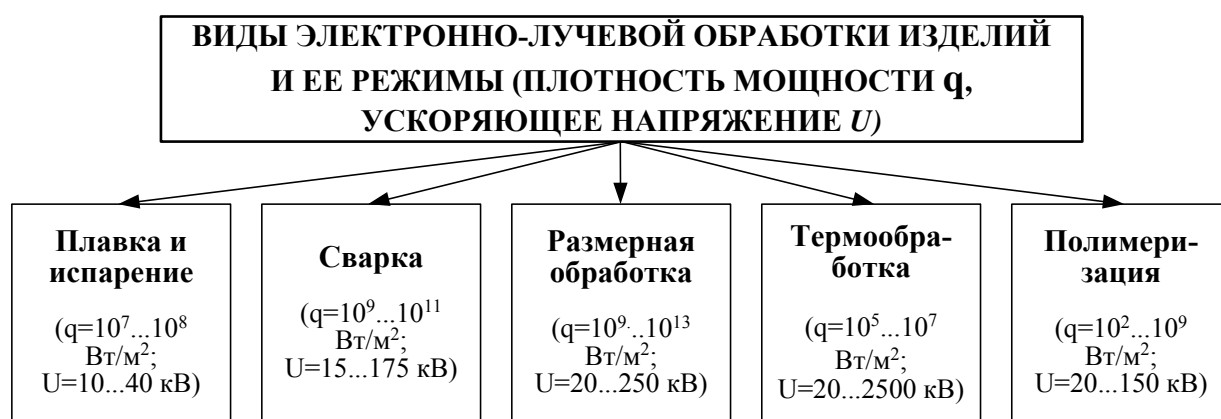


Рис. 3.17. Классификация методов электронно-лучевой обработки

Электронным лучом можно управлять при помощи электростатических и магнитных полей. Создавая по оси электронного луча с помощью магнитной линзы магнитное поле, можно проводить фокусировку луча и отклонение. Благодаря малой массе электронов, луч достаточно легко можно перемещать по поверхности с любой траекторией.

Электронно-лучевая обработка может осуществляться только в вакууме, так как при соударении с молекулами воздуха электроны отдают им свою энергию и происходит их рассеяние.

Все технологические изменения в поверхностном слое материалов при осуществлении электронно-лучевых процессов происходят благодаря их взаимодействию с электронами луча.

Удельная поверхностная мощность луча в зоне его воздействия определяется размером поперечного сечения луча, который зависит от фокусировки. Удельная поверхностная мощность может достигать 10^{13} Вт/м². При такой мощности можно производить испарение материала. Значения удельной мощности и ускоряющего напряжения для различных процессов электронно-лучевой обработки приведены на рис. 3.17.

При попадании электронов в твердое тело происходит их торможение, в результате которого протекают следующие процессы: нагрев поверхности, появление рентгеновского излучения, вторичная электронная эмиссия. Время контакта электронов с веществом оценивается $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с.

3.7. Глубина проникновения электронного луча

Материал	Плотность (кг/м ³)	Глубина проникновения (мкм) при различных напряжениях ускорения электронов (кВ)		
		10	50	100
Титан	4,5	0,45	11,7	46,6
Алюминий	2,7	0,76	19,4	77,5
Медь	8,89	0,23	5,9	23,6
Вольфрам	19,3	0,1	2,7	10,9
Сталь	7,7	0,27	6,8	27,1

Глубина проникновения зависит от плотности вещества и энергии электронов. Некоторая часть электронов от поверхности отражается. Отражение тем больше, чем больше отклонение луча от нормали к поверхности.

В таблице 3.7 представлены сведения о глубине проникновения электронного луча в материалы при различных ускоряющих напряжениях.

Для промышленного использования электронно-лучевой обработки применяют в основном термоэлектроны, получаемые при нагреве катодных спиралей.

Формирование электронного луча осуществляется при помощи специального оборудования (рис. 3.18), в котором происходит ускорение электронов электростатическим или магнитным полем и формирование электронного пучка; изменение поперечного сечения электронного пучка (чаще всего для его фокусирования на обрабатываемой поверхности); отклонение электронного луча и обеспечение требуемой траектории перемещения точки его встречи (фокального пятна) с обрабатываемой поверхностью.

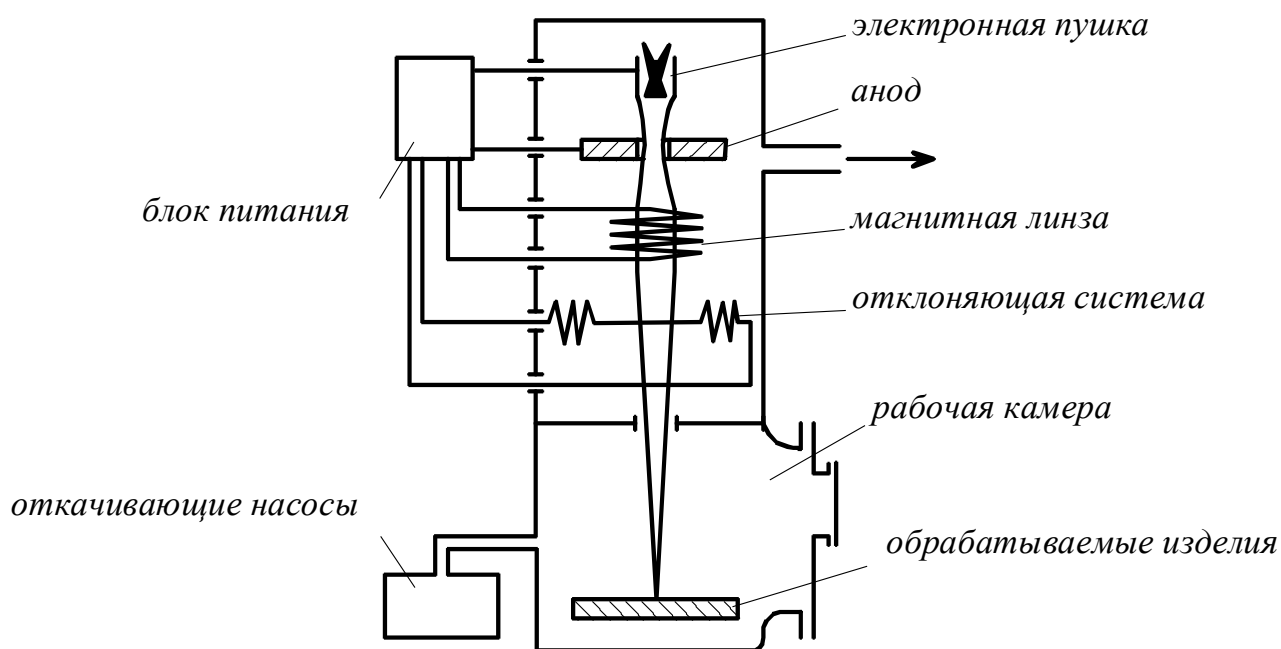


Рис. 3.18. Функциональная схема электронно-лучевой установки

Источником электронов в электронных пушках обычно является термоэмиссионный катод из вольфрама или тантала, обладающих высокими эмиссионными характеристиками. В зависимости от материала катода его рабочая температура может достигать 1600...2800 К. Подогрев катода чаще всего осуществляется с помощью накаливаемого электрическим током подогреваемого элемента; в некоторых случаях сам этот элемент может выполнять функции катода (катод прямого накала). Из-за тяжелых температурных условий работы, интенсивного испарения и охрупчивания, срок службы катодов обычно не превышает нескольких десятков часов. Поскольку замена катода требует последующей регулировки и настройки электронной пушки, то основные усилия разработчиков направлены на увеличение срока службы катодов.

На некотором расстоянии от катода находится анод, выполненный в виде массивной детали с отверстием. Между катодом и анодом от специального высоковольтного источника питания, входящего в состав блока питания, прикладывается ускоряющее напряжение 30...50 кВ. Электроны ускоряются этим напряжением до значительных скоростей, большая их часть проходит через отверстие в аноде и в заанодном пространстве они движутся по инерции. Чтобы из такого электронного потока сформировать электронный луч с необходимыми характеристиками обычно требуется дополнительная операция – фокусирование.

Для фокусирования луча в электронной пушке обычно используется система диафрагм и магнитных линз. Магнитная линза представляет собой соленоид с магнитопроводом, создающим специальной формы магнитное поле, которое при взаимодействии с движущимся электроном смещает его траекторию в направлении оси системы. При этом можно добиться «сходимости» электронов на достаточно малой площади поверхности, а в фокусе электронный луч может обладать весьма высокой плотностью энергии, достигающей 10^{13} Вт/м², причем с помощью фокусировки она может быть плавно изменена до меньших значений.

В конструкцию электронной пушки обычно входит также отклоняющая система, служащая для перемещения электронного луча по обрабатываемой поверхности. Перемещение луча осуществляется за счет его взаимодействия с поперечным магнитным полем, создаваемым отклоняющей системой. Электронная пушка обычно имеет две пары отклоняющих катушек, обеспечивающих перемещение луча по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Следует отметить, что в рабочем пространстве электронной пушки необходим высокий вакуум, чтобы молекулы остаточных газов не препятствовали свободному прохождению электронов. Кроме того, условия работы подогреваемого катода также требуют защиты его от взаимодействия с атмосферными газами. Давление в камере электронной пушки не должно превышать $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па. При ухудшении вакуума происходит пробой между катодом и анодом электронной пушки, что может привести к выходу из строя высоковольтного выпрямителя.

Электронная пушка обычно выполняется в виде функционального блока, который или неподвижно крепится к рабочей камере, или перемещается внутри нее с помощью специальных механизмов.

Обрабатываемая заготовка помещается в рабочую камеру, снабженную иллюминаторами для наблюдения за процессом обработки. Откачка пространства пушки и рабочей камеры производится системой насосов. При большой протяженности зоны обработки заготовка перемещается в вакуумной камере с помощью специальных механизмов. При малой площади обработки (менее 10×10 мм) обычно достаточно перемещения луча, а заготовка может оставаться неподвижной.

Чтобы точно направлять электронный луч на обрабатываемую заготовку, в некоторых электронно-лучевых установках могут применяться специальные оптические системы.

Для электронно-лучевой обработки используются установки отечественного производства – первого поколения ЭЛУ-5, ЭЛУ-9Б, ЭЛУ-

9КУ, ЭЛУ-10А и ЭЛУ-25 и второго поколения ЭЛУ-20. На рис. 3.19 представлена принципиальная схема одной из таких установок.

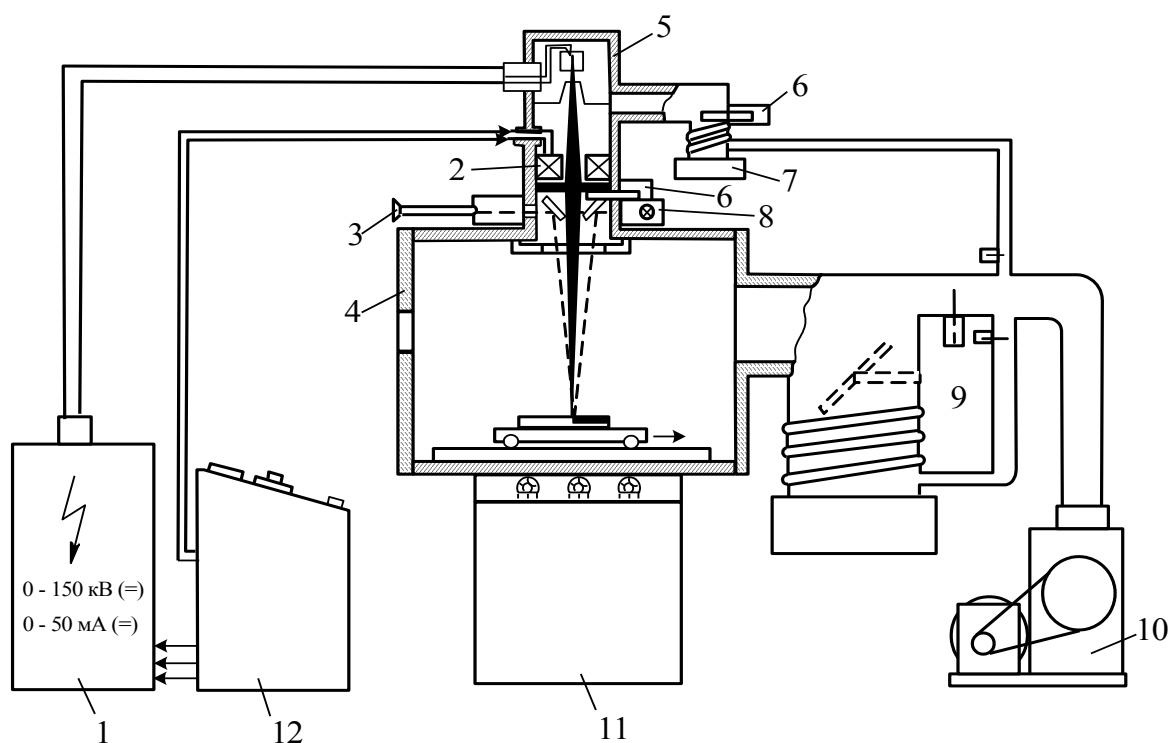


Рис. 3.19. Схема промышленной установки для электронно-лучевой обработки:

1 - высоковольтный источник питания; 2 – электромагнитная линза и отклоняющие катушки; 3 - телескопическое устройство для наблюдения; 4 - камера; 5 - электронно-лучевая пушка; 6 - вентиль; 7 - диффузионный насос; 8 - освещение; 9 - вакуумный вентиль; 10 - роторный форвакуумный насос; 11 - пульт управления движением изделия; 12 - электрический пульт управления

На практике могут быть использованы разнообразные конструкции электронных пушек. Перспективным является применение электронных пушек в основе работы которых лежит высоковольтный тлеющий разряд. Общий вид одной из таких пушек представлен на рис. 3.20.

Анодный узел включает в себя охлаждаемый водой корпус анода, на котором смонтированы отклоняющая система, магнитная линза, датчик ионизационного манометра, измеряющего давление в пушке, и штепсельный разъем для подсоединения кабеля от блока управления электронным лучом к пушке. Магнитная линза и отклоняющая система закрыты защитным кожухом. Узел ввода высокого напряжения содержит кабельный

высоковольтный разъем и "водяной реостат" для безопасного охлаждения катода, находящегося под высоким потенциалом.

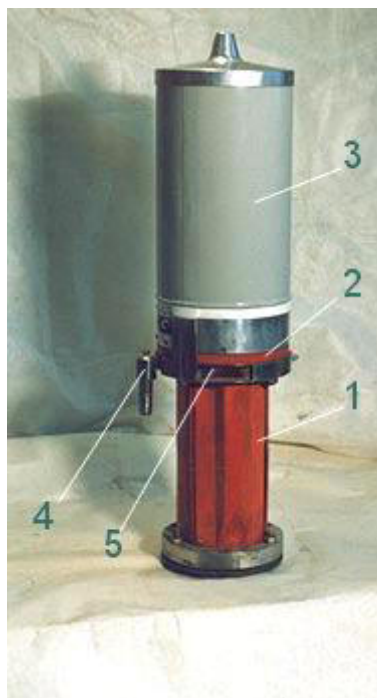


Рис. 3.20. Общий вид электронно-лучевой пушки:

1 - анодный узел, 2 – катодный узел, 3 - узел ввода высокого напряжения и охлаждения катода, 4 - датчик ионизационного манометра, 5 - штепсельный разъем системы управления электронным лучом

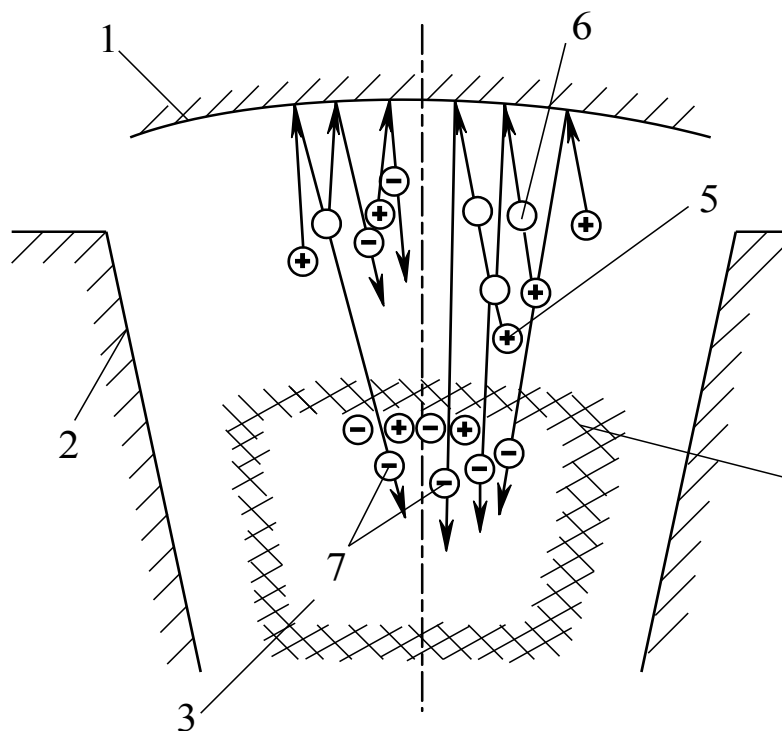


Рис. 3.21. Принцип работы электронно-лучевой пушки:

1 – катод, 2 – анод, 3 – область плазмы, 4 – граница плазмы, 5 – ионы, 6 – быстрые нейтральные частицы, 7 – электроны

Принцип работы электронной пушки поясняет рис. 3.21. При повышении рабочего давления в пушке до уровня 0,01-0,1 мм рт.ст. и при приложении высокого напряжения (1-30 кВ) между катодом и анодом в разрядном пространстве пушки в среде рабочего газа развивается высоковольтный тлеющий разряд.

Для этого типа разряда характерно наличие в разрядном пространстве двух, примыкающих друг к другу областей – области плазмы, заполняющей полость анода, и области катодного падения потенциала между рабочей

(вогнутой) частью поверхности катода и плазмой. В области катодного падения сосредоточено практически все напряжение разряда. Вытягиваемые электрическим полем катодного падения с границы плазмы положительные ионы, двигаясь к катоду, претерпевают многократную перезарядку. В результате этого поверхность катода бомбардируется потоком ионов и быстрых нейтральных частиц (атомов и молекул), вызывающих эмиссию электронов и нагрев катода. Электроны, ускоряясь в области катодного падения, формируются в сходящийся электронный луч, ионизируя при этом рабочий газ в разрядном пространстве и обеспечивая этим существование плазмы и дополнительного потока ионов в сторону катода. Электронный луч выводится из разрядного пространства в технологическую камеру через анодное отверстие, попадая по дороге в магнитные поля магнитной линзы и отклоняющей системы, с помощью которых осуществляется его фокусировка, развертка и перемещение.

Области применения электронно-лучевой закалки и легирования и механизмы упрочнения режущего инструмента в результате их применения аналогичны уже рассмотренной выше лазерной обработке. Например, воздействие электронного луча на поверхность твердосплавных пластин из сплавов ВК8, Т15К6 и Т5К10 в зависимости от вида обрабатываемого материала и режимов резания позволяет снизить интенсивность их изнашивания в 1,8...3 раза. Также имеются данные об эффективности применения электронно-лучевой обработки для улучшения эксплуатационных показателей инструментов из быстрорежущих сталей.

3.5. Электроэрозионное легирование

Из всех методов электроэрозионного воздействия на поверхностный слой материала (электроискровой, электроимпульсный, электроконтактный и анодно-механический) для упрочнения режущего инструмента используются электроискровой и электроимпульсный. Электроискровой и

электроимпульсные способы позволяют производить как съём металла (размерную обработку), так и упрочнение, а анодно-механический и электроконтактный - только съём металла.

Электроэрозионная обработка основана на явлении электрической эрозии и полярного переноса материала анода (легирующего электрода) на катод (упрочняемый инструмент) в условиях импульсных разрядов в газовой среде. Благодаря полярному эффекту, преимущественный перенос эродируемого материала обеспечивает формирование на упрочняемом инструменте поверхностного слоя с требуемыми физико-химическими свойствами. Таким образом, при электроэрозионных способах обработки изменение свойств поверхности инструмента является результатом термического воздействия электрического тока.

Первой стадией эрозионного процесса является пробой межэлектродного промежутка в результате образования зоны с высокой напряженностью поля. Под действием разряда происходит ионизация промежутка через который начинает протекать электрический ток, т.е. образуется канал проводимости – узкая область, заполненная нагретым веществом (плазмой), состоящей из ионов и электронов. Через канал проводимости протекает ток, при этом скорость нарастания его силы может достигать сотен килоампер в секунду.

Затем вокруг канала проводимости из паров металла и жидкости образуется газовый пузырь. Давление в канале проводимости достигает 20 МПа. Газовый пузырь стремится расшириться, сжимая при этом окружающую среду. Граница канала проводимости движется с высокой скоростью в радиальном направлении. На наружной границе образуется фронт уплотнения, в котором давление скачкообразно меняется.

Заключительной стадией является прекращение тока, отрыв ударной волны от газового пузыря и продолжение его расширения по инерции. В начале этой стадии в межэлектродном промежутке находится жидкий металл в углублениях электродов. Когда газовый пузырь достигает максимального

диаметра, давление внутри него резко падает и расплавленный металл в лунках вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток.

На рис. 3.22 представлены все основные стадии процесса электроэрозионной обработки.

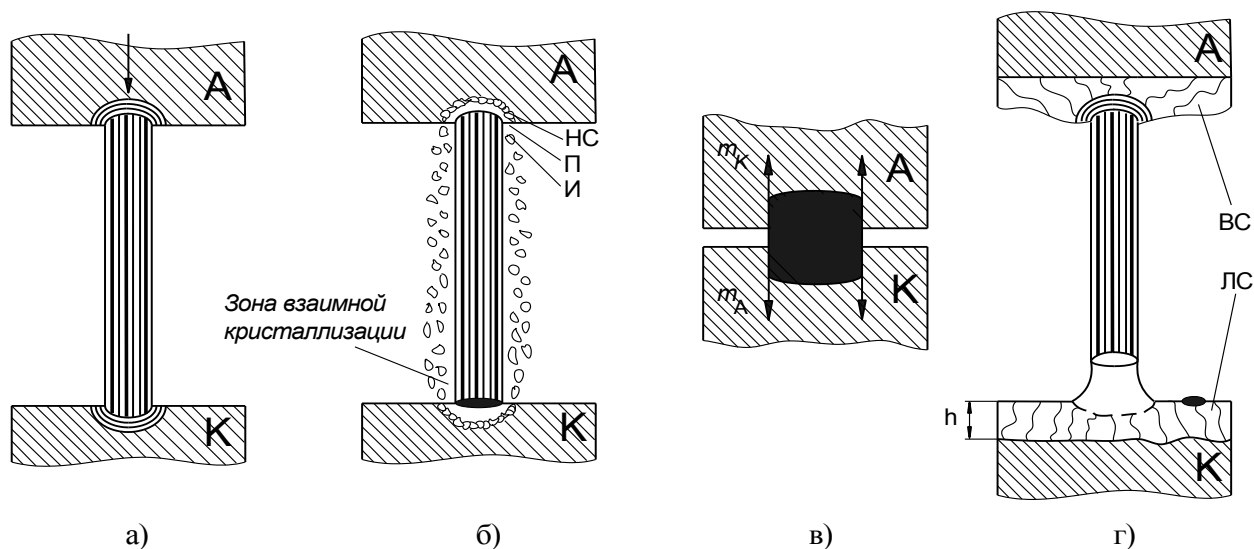


Рис. 3.22. Обобщенная модель процесса электроэрозионной обработки:

а – пробой межэлектродного пространства; б – образование эрозионных лунок на аноде (А) и катоде (К) с тремя зонами: испарения (И), плавления (П) и напряженного состояния (НС); в – момент контакта электродов, которому сопутствует схватывание и обратный перенос; г – формирование на аноде вторичной структуры (ВС) и легированного слоя (ЛС) на катоде

Производительность процесса электроэрозионной обработки оценивается отношением объема или массы нанесенного вещества ко времени обработки. Для увеличения производительности можно применять обработку одновременно несколькими электродами, наносить обмазки, применять специальные межэлектродные среды, увеличивающие устойчивость разряда, защиту от перегрева. При электроэрозионной обработки могут быть использованы различные легирующие электроды: твердые сплавы на основе карбида вольфрама (ВК6, ВК20, Т15К6 и др.); карбиды, нитриды, бориды, силициды переходных металлов (TiN, TiC, MoSi₂ и др.), получаемые различными способами; сложные композиции типа ZrN-Al₂O₃, TiN-Ni и др., в состав которых могут входить добавки металлов и вещества,

стабилизирующие искровой разряд; чистые металлы и их сплавы; графит и полупроводниковые материалы.

3.8. Рекомендуемые материалы электродов для упрочнения различных материалов

Материал легирующего катода	Марка обрабатываемого материала	Назначение легированного слоя
Al	Al, Cu, стали Ст.3, У10А, ХВГ	к., ж., и.
Cu	Al, Cu, стали Ст.3, Х18Н10Т	к.
Cr	Стали 30, 45, 40Х, У10А ХВГ, ВТ2, Cu	и., ж., р.и.
Графит	Стали Р18, 65Г, Т15К6	р.и., ш.о.
Mo, W	Стали 30, 45, У10А, ХВГ	и., к.
Ag	Cu, Д16Т, 35ХН3Ф, ВТ6А	р.и.
FeCr	Стали 35, 45, У8А, Х12М, 40Х	и., р.и., ш.о.
TiC, TiB ₂	Стали У8А, Р18, Р6М5, 65Г, Fe	и.
Бронзы БрБ ₂ , БрАЖНЦ-9	Чугун, стали 45, Р18, Х12Ф1, 2Х13	и.
ВК2	Стали 45, Р6М5, 5ХНТ	и., ш.о.
ВК3	Стали 45, У7, 65Г, Р18, Р6М5, Т15К6	и., ш.о., р.и.
ВК6, ВК6М	Стали Ст.2, 45, У7, Р6М5	р.и.
ВК8	Стали 45, У7, 9ХС, У8, 40Х, 4ХГС, 1Х18Н9Т, Р6М3, Р6М5, Х12М	р.и.
ВК15	Стали У8, Р6М5	р.и., ш.о.
Т5К10	Стали 45, Р6М5	р.и.
Т14К8	Сталь 2Х13	и.
Т15К6	Стали 45, У7, У8, Р6М5, Р18, 9ХС, ХВГ, 1Х18Н9Т, 65Г, чугун	и., р.и.
Т30К4	Стали 15, У8, 40Х, Р18, Р6М5, Т15К6	р.и.
WC-Co-B	Сталь 45	р.и.
WC-Co-Ni ₃ Al, WC-Co-Ni-Cr-B-Si	Сталь 45	р.и., ш.о.
TiC-Ni-Mo-ДТК	Стали 45, Х12Ф1	р.и., ш.о.
LaB ₆	Стали У8, Ст.3, Мо	р.и.
TiN, ZrN, HfN, AlN, Si ₃ N ₄	Сталь 45, Ст.3, Мо	р.и.
Условные обозначения: и. – повышение износостойкости, к. – повышение коррозионной стойкости, ж. – повышение жаростойкости, р.и. – повышение стойкости режущего инструмента, ш.о. – повышение стойкости штамповой оснастки		

Рабочая часть электрода обычно имеет форму конуса или пирамиды с затуплением вершины радиусом 1,6... 2,0 мм, что обеспечивает получение качественной упрочненной поверхности при обработке. Графитовые, медно-графитовые, вольфрамокобальтовые электроды часто получают с помощью

технологий порошковой металлургии. Очень часто для реализации этого метода используются отходы пластин из твердого сплава. При отсутствии пластин требуемых форм и размеров можно применять электроды, изготовленные напайкой или приваркой твердосплавных пластинок к стальной державке.

На сегодняшний день в литературе имеется крайне мало сведений о критериях выбора состава электродного материала, основанных на исследовании взаимосвязи их состава и свойств с эксплуатационными показателями инструмента. Некоторые рекомендации по выбору материалов электродов в зависимости от марки материала упрочняемого изделия представлены в табл. 3.8.

Поэтому в настоящее время все способы обработки, использующие электрическую эрозию, осуществляют на двух режимах – электроискровом и электроимпульсном.

При электроискровом легировании рабочих поверхностей режущих инструментов импульсные разряды в газовой среде сопровождаются электрической эрозией и полярным переносом материала анода на инструмент, являющийся катодом. Для формирования на инструменте слоя требуемой толщины, необходима серия электрических разрядов при сканировании анода по обрабатываемой поверхности инструмента.

На рис. 3.23 представлена принципиальная схема этого процесса. Между электродом (анод) и инструментом (катод) в воздухе происходит электрический разряд, который ведет к химическим реакциям легирующего металла с атомарным азотом и углеродом воздуха, а также с материалом инструмента. Для предотвращения повреждения режущих кромок при электроискровом легировании, их изолируют специальными графитовыми пластинками. В процессе модификации электрод перемещается по обрабатываемой поверхности, выполняя либо круговые движения с продольной подачей, либо зигзагообразные с небольшой амплитудой и продольной подачей. В результате химических реакций в поверхностном

слое режущего инструмента образуются сложные соединения (карбиды, высокодисперсные нитриды, карбонитриды), составляющие износостойкий упрочненный слой толщиной до 50...80 мкм. Однако в поверхностном слое часто формируются неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения.

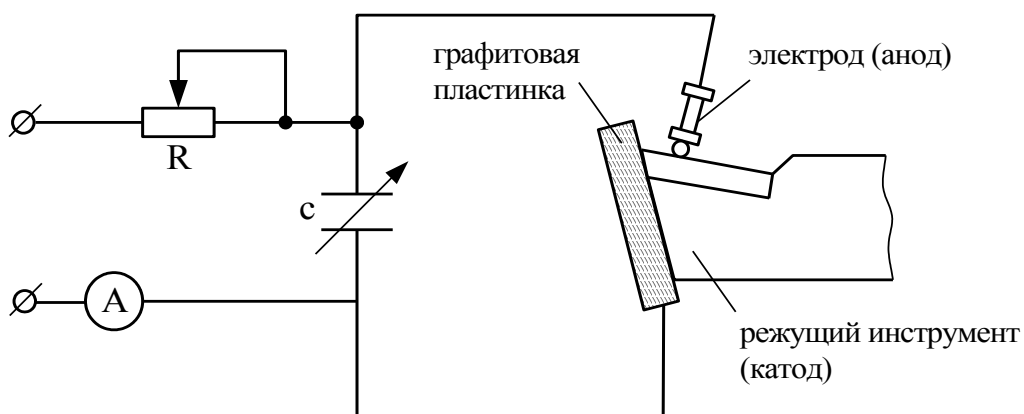


Рис. 3.23. Принципиальная схема модификации поверхности токарного резца методом электроискрового легирования

Кроме того, после электроискрового легирования наблюдается ухудшение шероховатости поверхности инструмента, что требует применения дополнительных видов механической обработки, например, шлифования.

Наличие загрязнений на поверхности режущего инструмента может привести к снижению эффективности процесса. Например, наличие на поверхности масла ведет к повышению ее шероховатости, а искровой разряд в жидкой среде приводит к резкому расходу материала электродов и уменьшению толщины упрочненного слоя. При электроискровом легировании следует как можно реже отрывать электрод от обрабатываемой поверхности, поскольку это ведет к разряду конденсатора установки. При последующем приближении электрода к режущему инструменту может произойти электрический разряд в ионизированном воздухе, что вызовет эрозию обрабатываемой поверхности, а также может привести к появлению прижогов.

3.9. Режимы электроискрового легирования

Режим	Напряжение на электродах, В		Сила тока, А		Время обработки, см ² /мин	Удельный расход (г/см ²) материала электрода		
	вспомогательный ход	рабочий	короткого замыкания	рабочая		феррохрома	сплава Т15К6	титана
Мягкий	15	9-13	3,5	0,8-1	4,0-16	0,009	0,006	0,002
	23	10-18	3,7	1,-1,5	3,0-8,0	0,030	0,025	0,010
Средний	40	21-33	4,5	1,5-2	2,0-8,0	0,050	0,045	0,024
	75	30-48	4,3	2-2,5	2,0-7,0	0,070	0,060	0,036
Жесткий	135	35-58	4,2	2,2	1,0-6,0	0,05	0,080	-
	190	48-68	5,5	2-2,8	0,5-5,0	0,110	0,100	-

В зависимости от напряжения на электродах и тока в сети различают три режима электроискрового легирования: мягкий, средний и жесткий. При мягких режимах формируется тонкий мелкодисперсный слой упрочненного металла при достаточно большом времени обработки. На жестких режимах за короткий промежуток времени формируется толстый слой упрочненного материала, но при этом практически невозможно обеспечить его однородность, мелкодисперсность и плотность. Режимы электроискрового легирования представлены в табл. 3.9. Поскольку рабочие поверхности режущего инструмента должны иметь низкую шероховатость, то при его упрочнении используют в основном мягкий режим.

Электроимпульсная обработка основана на использовании импульсов дугового разряда и была предложена советским специалистом М.М. Писаревским в 1948 году. Этот метод стал внедряться в промышленность в начале 50-х годов прошлого столетия. В отличие от искрового, дуговой разряд имеет температуру плазмы ниже (4000-5000°С), что позволяет увеличивать длительность импульсов, уменьшать промежутки между ними и таким образом вводить в зону обработки значительные мощности (несколько десятков кВт), т.е. увеличивать производительность обработки. Характерное для дугового разряда разрушение катода приводит к тому, что износ электрода (в этом случае он подключается к аноду) ниже, чем при

электроискровой обработке и составляет (0,05-0,3) % от объёма снятого материала.

При электроимпульсной обработке применяется другой тип генераторов, обеспечивающих получение импульсов постоянно действующих только в одном направлении. В качестве диэлектрической среды используются различные масла – дизельное, трансформаторное и др. В рабочей зоне заметно снижается температура, что и позволяет использовать электроды, выполненные с применением графита, обеспечивающие более высокую производительность обработки. Кроме того, обычно при электроимпульсной обработке меняется полярность.

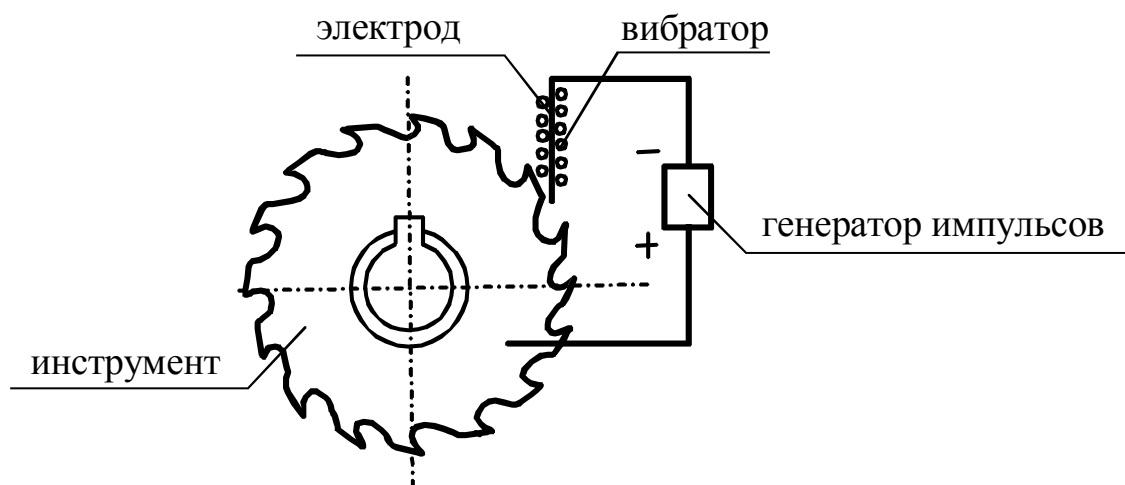


Рис. 3.24. Принципиальная схема электроимпульсной обработки цилиндрической фрезы

Пример использования электроимпульсной обработки для упрочнения инструмента показан на рис. 3.24. Электроимпульсная обработка имеет некоторые преимущества по сравнению с электроискровой и является более производительной и экономичной. Улучшение технологических характеристик обусловлено применением специальных независимых генераторов импульсов.

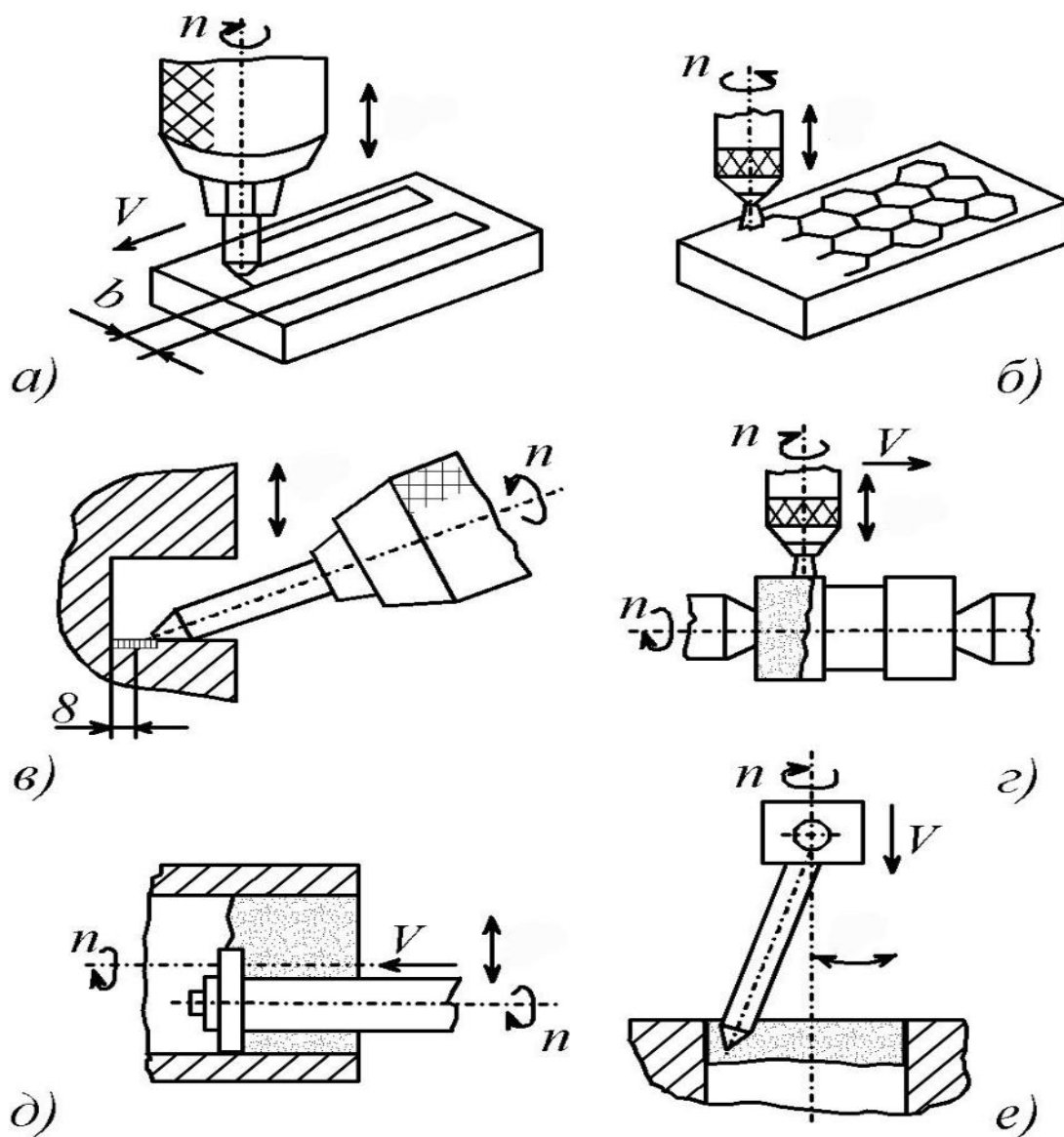


Рис. 3.25. Типовые технологические схемы электроэрозионного легирования

На практике могут быть использованы различные схемы электроэрозионного легирования (обработки) режущего инструмента. На рис. 3.25 представлены типовые технологические схемы электроэрозионного легирования вращающимися электродами. Для упрочнения плоских поверхностей обычно используют схему, приведенную на рис. 3.25, а. В этом случае легирующий электрод устанавливают перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, а характер его перемещений определяется конфигурацией инструмента. Поскольку ширина b полосы, образующейся за

движущимся электродом, не превышает его диаметра, для упрочнения протяженных поверхностей обработку ведут так, чтобы обеспечивалось взаимное перекрывание полос.

Иногда для обеспечения требуемой износостойкости нет необходимости в получении сплошного покрытия, а достаточно выполнить упрочнение отдельных участков, равномерно расположенных по поверхности. В этом случае легирующему электроду задается движение по закону, обеспечивающему формирование, например, ячеек шестиугольной формы (рис. 3.25, б) или других конфигураций.

Для упрочнения труднодоступных участков, например, пазов, используют обработку наклоненным электродом (рис. 3.25, в).

Обработку наружных цилиндрических поверхностей выполняют при вращательном движении упрочняемого изделия (рис. 3.25, г) с применением стержневых и трубчатых легирующих электродов.

При упрочнении внутренних поверхностей, как правило, используются дисковые электроды (рис. 3.25, д), а для неглубоких отверстий – наклоненные стержневые электроды. Кроме того, обработку отверстий можно вести с применением специализированного модуля, который обеспечивает работу следящей системы поддержания межэлектродного зазора в цилиндрической системе координат. Упрочнение выполняется дисковым или стержневым электродом (рис. 3.25, е) в зависимости от диаметра и глубины упрочняемого отверстия.

Качественные характеристики формируемого поверхностного слоя в процессе обработки зависят от многих факторов. Наибольшее влияние оказывают характеристики импульсных разрядов, длительность обработки, материал электродов, среда в межэлектродном промежутке, схема движения анода и др.

Для электроэрозионной обработки компактными электродами применяются универсальные установки с ручным управлением, механизированные и специальные установки (комплексы).

Универсальные установки с ручным управлением комплектуются генератором импульсов электрического тока, вибратором, инструментами (электродами), которыми производится легирование, и приспособлениями для закрепления обрабатываемых деталей. Механизированные и автоматизированные установки (комплексы) состоят из следующих блоков: генераторов импульсов электрического тока с органами управления, головок одноэлектродных, многоэлектродных для закрепления электродов и передачи определенного движения относительно поверхности детали, набора инструментов (электродов), станков, в которые устанавливаются обрабатываемые детали и головки с электродами. Могут быть использованы универсальные станки, станки с ЧПУ, а также специальные станки. Кроме этого, для автоматизированных комплексов необходимо наличие блока управления генератором импульсов и механическими движениями электрода и детали, включающего банк данных по процессам обработки и блок согласования сигналов, поступающих с датчиков контроля параметров качества образуемых покрытий, со входом в вычислительный комплекс.

На рис. 3.26 приведены основные схемы установок для электроэрозионного легирования компактными электродами: а – с ручным управлением; б – механизированная установка для обработки цилиндрических поверхностей; в – автоматизированный комплекс для обработки цилиндрической поверхности.

Установки для электроимпульсного упрочнения отличаются от электроискровых практически только лишь генератором импульсов.

Наиболее известными отечественными моделями, используемыми промышленными предприятиями для легирования режущего инструмента, являются Элитрон-16, Элитрон-22А, Элитрон-52Б, созданные Институтом прикладной физики АН МССР, а также ЭАИ-1, ИЕ-2, ИЕ-2М, ИАС-2М, ИАС-3, разработанные и созданные в ЦНИИТМАШе. Кроме того используется оборудование зарубежных производителей: Electroarc (США);

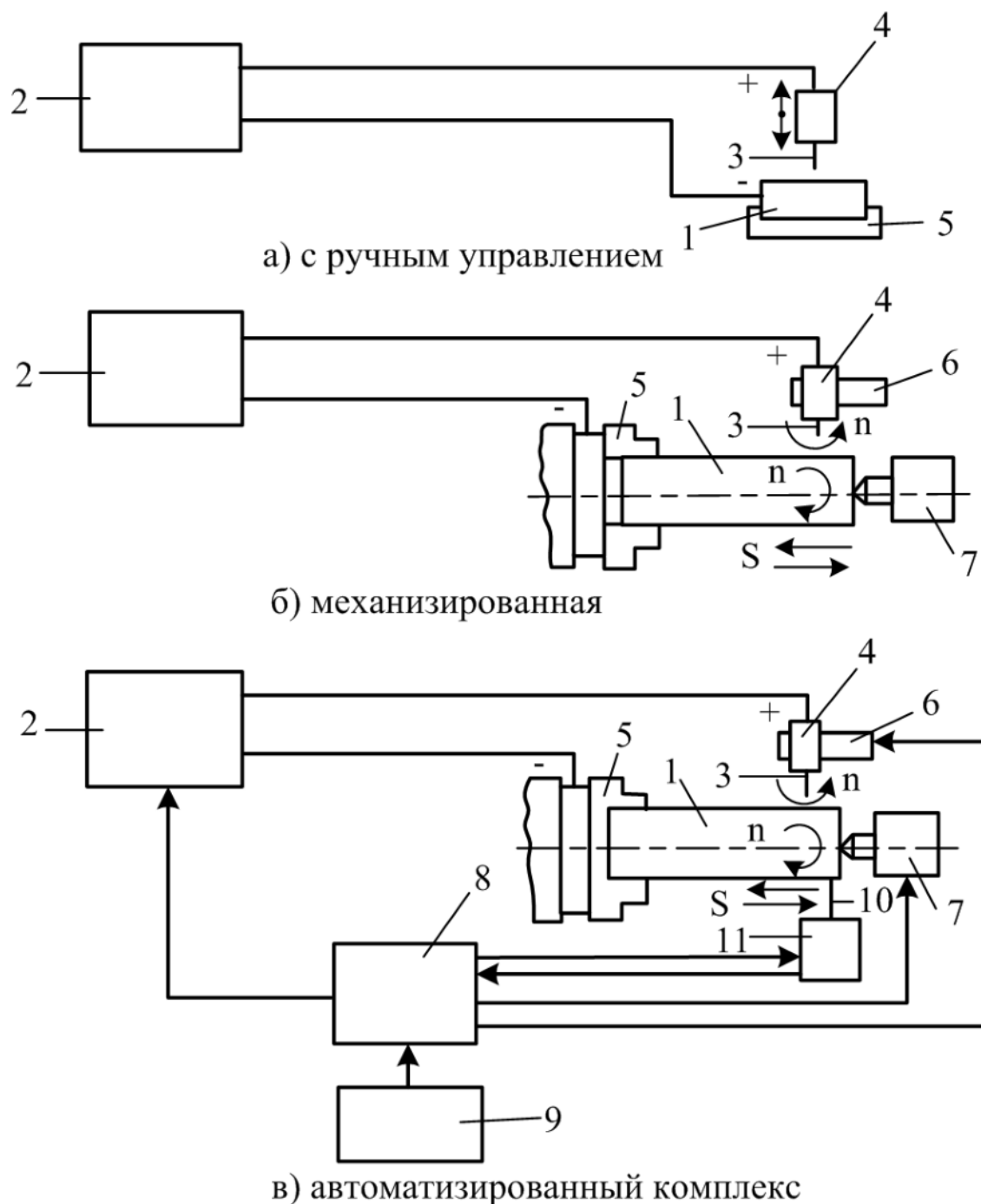


Рис. 3.26. Основные схемы установок для электроискрового легирования компактными электродами:

1 – обрабатываемая деталь (катод), 2 – генератор импульсов электроэрозионного тока, 3 – электрод (анод), 4 – устройство для закрепления электрода (вибратор, одно- многоэлектродные головки), 5 – устройство для закрепления деталей (приспособления, патроны с центрами), 6 – блок управления движением устройства для закрепления электрода, 7 – блок управления движением детали, 8 – вычислительный комплекс с блоком управления генератором импульсов и механическими движениями электрода и детали, включая банк данных по процессам; 9, 10 – датчики контроля параметров качества образуемых покрытий, 11 – блок согласования сигналов датчиков с выходом в вычислительный комплекс

Tucadur 2000, Eroleg (Германия); SNPM1 (Франция); SparkDepo mod.500, 300, 200 (Япония); Cosmeca A.G., Carbidor (Швейцария); Rocklinizer mod.500, 600, 1000 (Ю.Корея); D9105A, D9110A (Китай) и др.

Основными преимуществами электроэрозионной обработки (легирования) являются: возможность осуществления легирования в строго указанных местах радиусом от долей миллиметра и более, не защищая при этом остальную поверхность; разнообразие легированных слоев; отсутствие необходимости применения специальной предварительной подготовки поверхности, которая подвергается легированию; простота технологии и оборудования для легирования.

К недостаткам электроэрозионной обработки относятся: высокая шероховатость и пористость обработанной поверхности; достаточно низкая производительность обработки; невозможность использования диэлектрических материалов; относительно небольшие толщины получаемых упрочненных слоев.

3.6. Другие методы термической обработки и легирования

Криогенная обработка (обработка холодом) Высокоуглеродистые и многие легированные стали имеют температуру конца мартенситного превращения ниже 0°C. Поэтому в структуре стали после закалки присутствует значительное количество остаточного аустенита, который снижает твердость и прочностные характеристики инструмента, что ограничивает срок его службы. С целью ликвидации или уменьшения количества остаточного аустенита в ряде случаев используют криогенную обработку (глубокое охлаждение).

В процессе криогенной обработки за счет происходящих структурных превращений обеспечивается улучшение физико-механических свойств инструментальных сталей.

При оценке целесообразности назначения криогенной обработки стали необходимо учитывать следующие особенности:

- наибольшие структурные изменения под влиянием криогенных температур происходят в сталях с повышенным содержанием остаточного аустенита (высокоуглеродистые и легированные стали, причем в легированных сталях больше остаточного аустенита, чем в углеродистых);
- закономерности изменения размеров инструмента в результате аустенитно-мартенситных превращений следует определять опытным путем для конкретного химического состава стали в зависимости от режимов предыдущей термообработки и конфигурации инструмента;
- при обработке инструмента особо сложной формы с неравномерным распределением массы рекомендуется немедленно после закалки применять отпуск для снятия закалочных напряжений;
- нельзя непосредственно после закалки производить охлаждение ниже нуля, так как в этих случаях увеличиваются напряжения и опасность образования трещин;
- криогенная обработка приводит к росту объема структурных составляющих при распаде остаточного аустенита. Распад остаточного аустенита и превращение его в мартенсит происходит в определенном интервале температур.

Для снижения количества остаточного аустенита наиболее эффективна термообработка, включающая в себя отпуск (при 580 °С для стали типа Р18Ф2К8М или 560 °С для сталей типа Р6М5Ф2К8 и Р6М5Ф3) после закалки, криогенную обработку при -70...-100 °С (для указанных типов сталей) и последующий двукратный отпуск при 560-580 °С. После такой обработки количество остаточного аустенита приближается в стали типа Р18Ф2К8М к 1,9%, а в стали типа Р6М5Ф2К8 к 0,52%. При этом твердость стали составляет HRC 65-66.

Быстрорежущие стали, обработанные при криотемпературах и затем отпущенные, приобретают более равномерную твердость, чем стали,

охлажденные только в масле и отпущенные 3 раза при 560 °С. Для резцов из быстрорежущей стали, обрабатываемой при криотемпературах, рекомендуется двукратный отпуск при 540 °С с выдержкой не менее 1 ч. Практика показывает, что средняя стойкость инструментов, охлажденных ниже нуля может быть увеличена до 1,5 раз по сравнению с инструментами не подвергавшимися криогенной обработке.

Обработка токами высокой частоты. Еще одним методом термического воздействия на инструментальный материал и используемым в промышленности, является закалка токами высокой частоты (ТВЧ). Этот метод основан на том, что в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, в которое помещают инструмент, индуцируются вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше формируемый закаленный слой (обычно его толщина составляет 0,5...3 мм).

При нагреве в печах и ваннах передача энергии происходит извне, скорость нагрева ограничивается условиями теплопередачи из внешней среды в металл (лучеиспусканием или конвекцией) и теплопроводностью металла. При электронагреве энергия выделяется непосредственно в нагреваемом теле в результате прохождения через него электрического тока, поэтому интенсивность нагрева гораздо выше. Время нагрева в большинстве случаев соответствует секундам и долям секунды. Это создает ряд таких технологических преимуществ, как высокая производительность, слабое окисление и обезуглероживание поверхности нагреваемых инструментов.

Для закалки токами высокой частоты обычно используются машинные генераторы с частотой 50...15000 Гц и ламповые генераторы с частотой более 10^6 Гц. Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом необходимо постоянство зазора между индуктором и поверхностью изделия.

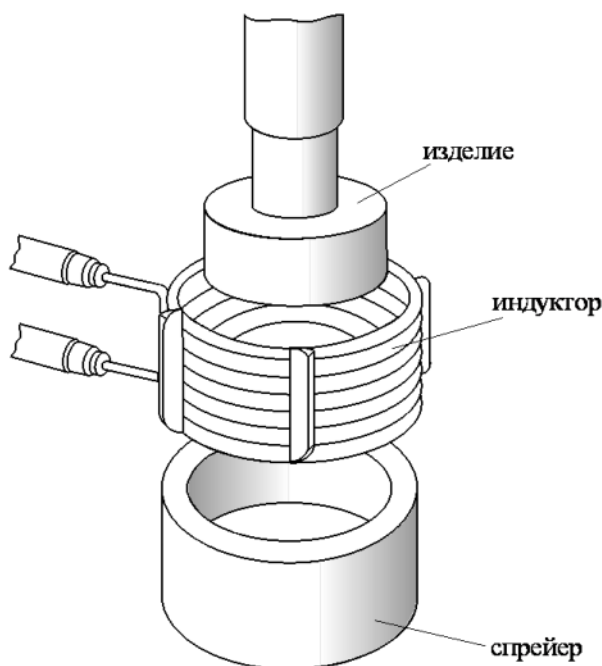


Рис. 3.27. Схема технологического процесса закалки ТВЧ

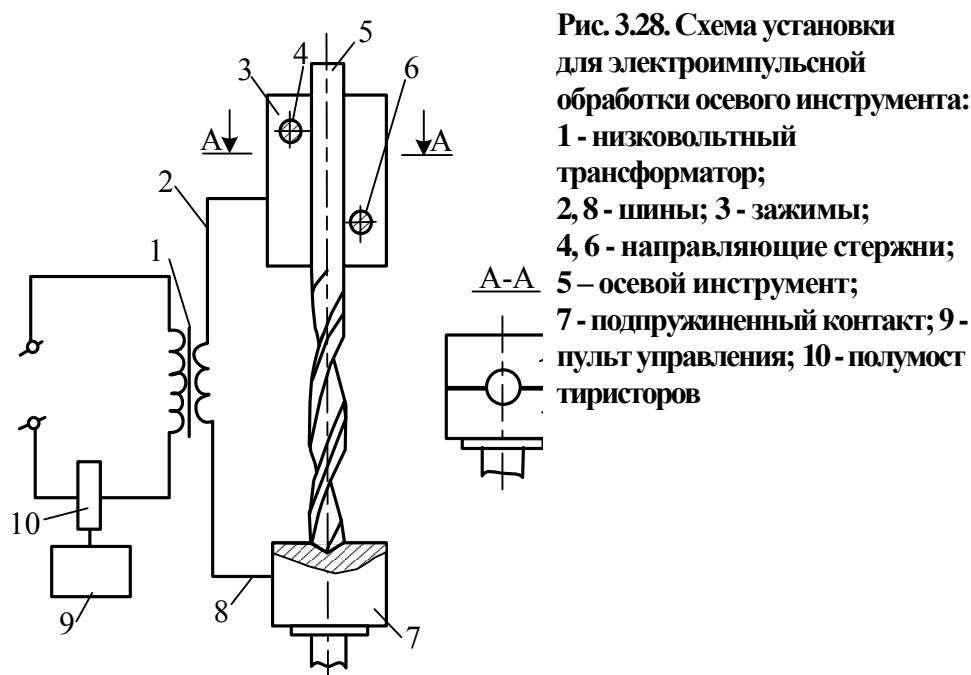
Схема технологического процесса закалки ТВЧ представлена на рис. 3.27. После нагрева в течение 3...5 с изделие быстро перемещается с индуктора в специальное охлаждающее устройство – спрейер, через отверстия которого на нагретую поверхность разбрызгивается закалочная жидкость.

Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур. Температура закалки при нагреве токами высокой частоты должна быть выше, чем при обычном нагреве. При правильных режимах нагрева после охлаждения получается структура мелкоигольчатого мартенсита. Недостатком этого вида закалки является неравномерность глубины и твердости закаленного слоя, наличие резкого перехода от упрочненной поверхности к неупрочненной сердцевине.

Обработка импульсным электрическим током. Проходя через проводящий материал, склонный к структурным и фазовым превращениям, импульсный электрический ток действует в первую очередь на элементы структуры, обладающие избыточной запасенной энергией, например, на области со скоплениями дислокаций, примесных атомов, вакансий и т.д.

Для получения импульсов тока применяются специальные импульсные генераторы, энергетическим элементом в которых служат индукционные или емкостные накопители, или электрическая машина и сварочные трансформаторы большой мощности.

Схема одного из устройств для воздействия на инструмент импульсов тока представлена на рис. 3.28.



Цанговая часть образца (сверло) крепится в медных зажимах, перемещающихся по направляющим стержням. К режущей части сверла подводится пружинный контакт. На расстоянии 10 мм от торцевой части сверла к вспомогательной режущей кромке приваривается спай хромель-алюмелевой термопары диаметром 0,4 мм. На пульте управления импульсов устанавливают режим обработки материала: длительность импульса τ , ток I , напряжение U . При нажатии пусковой кнопки сигнал от устройства поступает на полумост тиристоров, которые подключают первичную обмотку низковольтного трансформатора к сети напряжения, в результате чего ток

вторичной обмотки трансформатора по шинам поступает на зажимы и медный подпружиненный контакт. Данная система обеспечивает обработку материала импульсным током определенной мощности и длительности. К примеру, длительность импульсов обычно варьируют от 0,02 с до 0,6 с, температуру нагрева от 100 до 1000 °С, скорость нагрева - от 150 до 6000° С/с.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию методов термического воздействия и поверхностного легирования.
2. Области применения методов термического воздействия и поверхностного легирования.
3. Объясните механизм упрочнения материала при термическом воздействии и поверхностном легировании.
4. В чем заключается ионное азотирование поверхности режущего инструмента.
5. Опишите технологический процесс при ионном азотировании в тлеющем разряде.
6. Опишите процесс азотирования в вакуумно-дуговом разряде.
7. Что такое ионная имплантация и ее разновидности.
8. Объясните механизм изменения механических свойств поверхностного слоя при ионной имплантации.
9. Объясните процесс лазерной обработки и лазерного легирования.
10. Опишите технологические схемы лазерного упрочнения.
11. Какие материалы используются при лазерном легировании.
12. Сущность процесса электронно-лучевой обработки.
13. Назовите методы электроэрозионного легирования.
14. Сущность электроискрового и электроимпульсного легирования.
15. Что такое криогенная обработка и области ее использования.
16. Охарактеризуйте процесс обработки токами высокой частоты и область ее применения.

Глава 4. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Одним из наиболее эффективных способов обеспечения оптимального сочетания «твёрдость-пластичность» инструментальных материалов являются методы нанесения износостойких покрытий.

Современные технологические процессы позволяют синтезировать покрытия на основе одинарных, двойных и тройных соединений тугоплавких металлов IV - VI групп Периодической системы элементов (карбиды, нитриды, бориды, оксиды и их смеси). Толщина каждого слоя таких покрытий может составлять нескольких нанометров, что позволяет не только предельно уменьшить количество различных дефектов, но и реализовать «теоретическую» прочность материала покрытия. Использование инструментов с подобными покрытиями позволяет эффективно решить целый ряд задач для широкой гаммы технологических операций резания, связанных с повышением производительности, точности и качества обработки, снижением расхода дорогостоящих инструментальных материалов, возможностью реализации экологически безопасного резания без применения СОТС.

4.1. Материалы, применяемые в качестве покрытий, и требования, предъявляемые к ним

Рассмотрим требования, предъявляемые к износостойким покрытиям. Исходя из общих эксплуатационных требований, покрытие должно быть: устойчивым против коррозии и окисления; сохранять свои свойства при высоких температурах; не иметь дефектов (пор, включений); обладать высоким пределом выносливости. В связи со служебным назначением покрытия должны иметь: твёрдость в 1,5–2 раза превышающую твёрдость инструментального материала; низкую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом;

минимальную способность к диффузионному растворению в обрабатываемом материале.

Кристаллохимические- и физико-механические свойства покрытия и инструментального материала должны быть достаточно близкими и совместимыми. В связи с этим желательно иметь: максимальное подобие кристаллохимических параметров; минимальное отличие физико-механических и теплофизических свойств; минимальную вероятность возникновения твердофазных диффузионных реакций при температуре резания.

В наибольшей степени требованиям к покрытиям для режущего инструмента удовлетворяют соединения тугоплавких d-переходных металлов IV-VI, что обусловлено особенностями их кристаллохимического строения. Для соединений металлов IV группы (Ti, Zr, Hf) характерно образование тугоплавких соединений с элементами внедрения (B, C, N, O) достаточно простой структуры. Металлы V группы (V, Nb, Ta) и VI группы (Cr, Mo, W) Периодической таблицы элементов имеют больший атомный радиус, поэтому образуют соединения более сложной структуры с большим числом фаз. Практически все соединения металлов IV-VI групп имеют чрезвычайно высокую термодинамическую устойчивость, тугоплавкость, твердость (особенно нитриды, карбиды, бориды и их смеси за исключением нитридов Mo и W). Поэтому при нанесении на рабочие поверхности инструмента они обеспечивают значительный рост износостойкости инструмента. Кроме того, большинство соединений переходных металлов имеют широкую область гомогенности, что позволяет в зависимости от содержания в них элементов внедрения B, C, N, O в достаточно большой степени изменять их физико-механические свойства. Последнее обстоятельство очень важно с точки зрения возможности варьирования свойствами покрытий в зависимости от условий применения режущего инструмента.

Различные соединения тугоплавких металлов, получившие наибольшее распространение в качестве покрытий и их отдельных слоев, можно условно

разделить на три группы в зависимости от типа химической связи между атомами: металлической, ковалентной или ионной. Бориды, карбиды и нитриды переходных металлов – TiN , CrN , ZrN , TiC , ZrC , WC , TiB_2 , имеют преимущественно металлическую связь; B_4C , BN , SiC , Si_3N_4 , AlB_2 , AlN представляют собой материалы с ковалентной связью; оксиды Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2 имеют ионную связь.

Все перечисленные соединения характеризуются высокими значениями микротвердости, значительно превышающими твердость инструментальных материалов и имеют значительно более высокие температуры плавления.

Несмотря на значительное количество существующих соединений, которые потенциально могут быть использованы в качестве покрытий для режущего инструмента, широкое распространение в инструментальном производстве на сегодняшний день получили порядка пятнадцати соединений, которые используются как в качестве самостоятельных покрытий, так и в качестве их слоев. Остальные соединения в основном используются либо в исследовательских целях, либо для узкоспециализированного режущего инструмента.

Среди всех покрытий отдельный класс на сегодняшний день составляют наноструктурные покрытия, размеры зерен которых составляют менее 100 нм.

В отличие от традиционных, наноструктурные покрытия за счет принципиально иного механизма деформации и разрушения, позволяют совместить в себе уникальный комплекс свойств – например, повышенную микротвердость и достаточную пластичность. Технологии получения подобных покрытий в основном находятся еще на стадии лабораторных исследований, но уже в недалеком будущем возможно промышленное освоение их результатов.

Все покрытия, использующиеся для нанесения на режущий инструмент можно классифицировать по составу (одноэлементные и многоэлементные), по строению (однослойные и многослойные) и по типу связи с инструментальной основой (адгезионные, диффузионные и адгезионно-диффузионные).

В настоящее время в практике производства режущих инструментов все чаще используют многослойные покрытия на основе одинарных, двойных и тройных соединений тугоплавких металлов IV-VI групп Периодической системы элементов (карбиды, нитриды, бориды, оксиды и их смеси). Данные покрытия достаточно хорошо удовлетворяют комплексу требований к покрытию, рассмотренных выше.

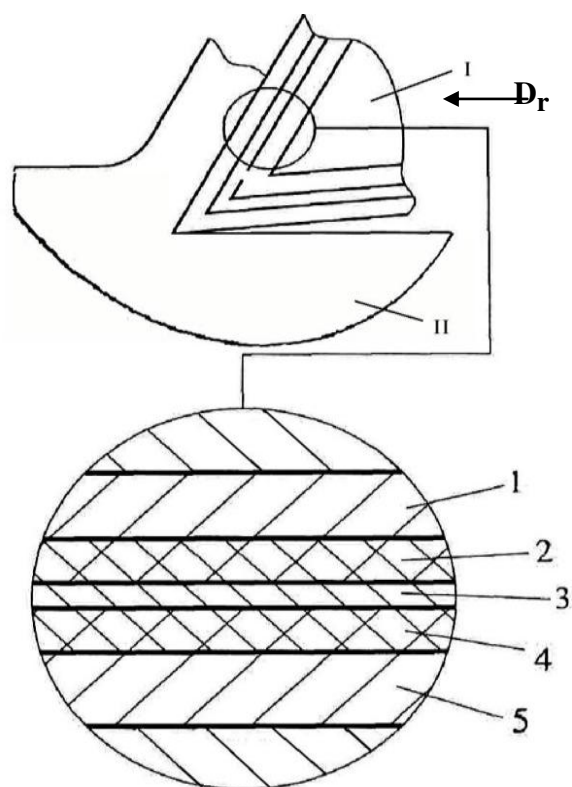


Рис. 4.1. Идеализированная схема многослойного покрытия:

I – режущий инструмент, II – заготовка

Многослойное покрытие содержит несколько слоев (рис. 4.1), каждый из которых имеет собственное функциональное назначение. Слой 5, непосредственно примыкающий к инструментальной основе, должен обеспечивать прочную адгезионную связь между покрытием и инструментальным материалом. Поэтому кристаллохимическое строение этого слоя и инструментального материала должно быть максимально идентично. Вместе с тем при

эксплуатационных температурах на границе раздела данного слоя и инструментального материала не должно образовываться хрупких металлоидов или декарбидизирующих фаз, снижающих прочность адгезии покрытия и инструментального материала. Необходимо также обеспечение минимальной разницы тепло- и физико-механических свойств материалов покрытия и инструмента (коэффициента термического расширения, Пуассона, модуля упругости и т.д.), так как в противном случае при эксплуатационных термомеханических нагрузках концентрация напряжений приведет к

разрушению покрытия на границе раздела «покрытие – инструментальная основа». Основную функцию выполняет слой 1, непосредственно контактирующий с обрабатываемым материалом. При выборе свойств материала слоя 1 необходимо, чтобы его кристаллохимическое строение максимально отличалось от соответствующего строения обрабатываемого материала. В этом случае весьма велика вероятность снижения склонности к физико-химическому взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов и, прежде всего, снижения склонности к адгезии между ними. Кроме того, варьируя составом, структурой и строением слоя 1, можно, в известных пределах, изменять его свойства и, таким образом, управлять контактными процессами и стружкообразованием при резании. Слой 3 может выполнять барьерные функции, например, существенно замедлять интердиффузионные процессы между инструментальным и обрабатываемым материалами, снижать интенсивность теплового потока в инструмент и т.д. Промежуточные слои 2 и 4 с переменными свойствами осуществляют связь между слоями 1, 3 и 3, 5.

Чрезвычайно важной задачей разработки инструментального материала с покрытием является выбор метода нанесения покрытий. Наибольшее распространение для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент получили методы химического (CVD – Chemical Vapour Deposition) и физического (PVD – Physical Vapour Deposition) осаждения покрытий.

Разновидностями метода химического осаждения являются высокотемпературное осаждение покрытий – high-temperature (HT-CVD), среднетемпературное осаждение – medium-temperature (MT-CVD) и осаждение покрытий с плазменным сопровождением – plasma assisted (PA-CVD); метода физического осаждения – ионно-термическое, электродуговое и ионное распыление.

4.2. Подготовка поверхности перед нанесением покрытий

Одним из важных факторов, оказывающих большое влияние на работоспособность режущего инструмента с покрытием при его эксплуатации, является качество подготовки его рабочих поверхностей перед нанесением покрытия. Поэтому прежде чем загрузить инструмент в камеру вакуумной установки для нанесения PVD-покрытий или в реактор для нанесения CVD-покрытий, он должен быть качественно подготовлен.

Состояние поверхности перед нанесением покрытий определяет качество осажденного покрытия и многие его функциональные характеристики, в частности прочность его адгезионной связи с инструментальной матрицей, являющуюся обязательным условием успешной эксплуатации инструмента с покрытием.

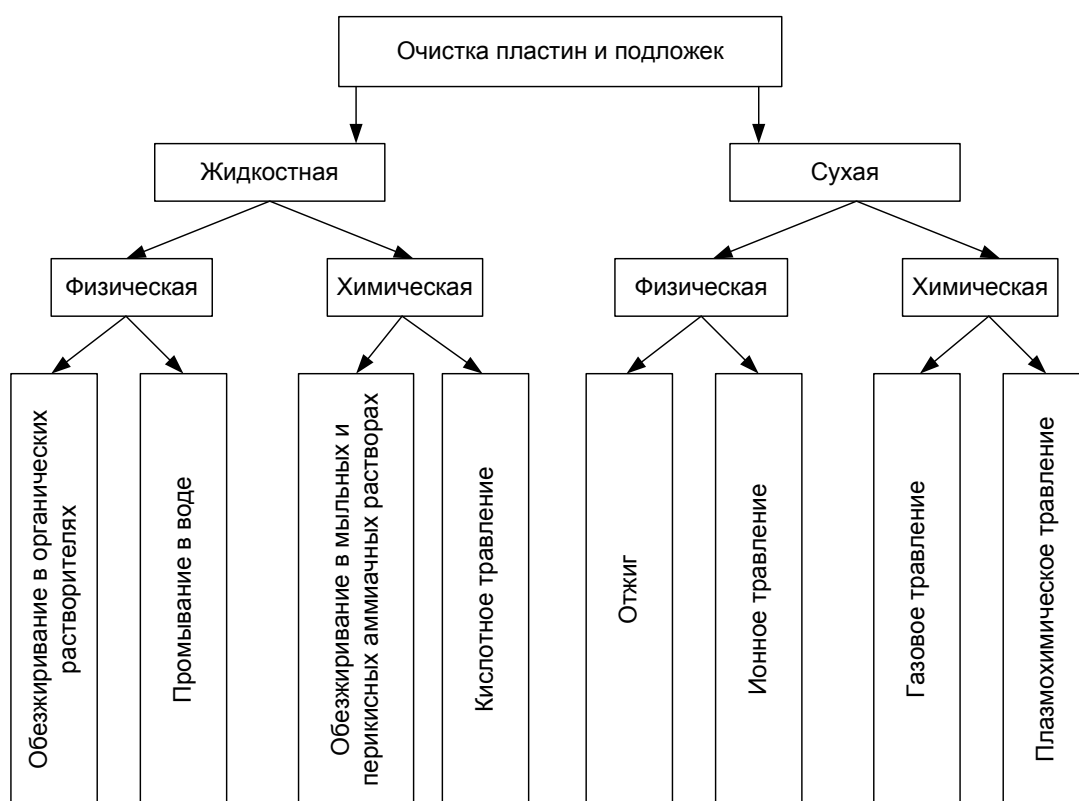


Рис. 4.2. Классификация методов очистки поверхностей режущего инструмента

Для облегчения доступа атомов испаряемого (распыляемого) материала к поверхности режущего инструмента необходимо удалить имеющиеся на нем пленки загрязнений и адсорбционные пленки. По механизму протекания

процессов все методы очистки классифицируют на физические и химические, а по применяемым средам - на жидкостные и сухие (рис. 4.2).

В основу каждого способа очистки положен один из трех принципов удаления загрязнений с поверхности: механическое удаление частиц загрязнителя потоком жидкости или газа, растворение в воде и химическая реакция.

Кроме очистки к подготовке поверхности инструмента перед нанесением покрытий можно отнести шлифовальные и доводочные операции. От качества шлифования и заточки и производящейся после этих операций очистки будет существенно зависеть работоспособность режущего инструмента.

На рис. 4.3 представлена типовая схема подготовки твердосплавных пластин перед нанесением покрытий.

Процесс удаления с поверхности режущего инструмента различных загрязнений, как правило, начинается с химической очистки. Первый этап химической очистки – грубая химическая очистка, которая состоит в удалении с поверхности видимых слоев органических загрязнений: остатков масел, смазочных материалов, красителей, отпечатков пальцев и жировых пятен. При этом используют различные органические растворители, например, бензин, ацетон, этиловый спирт и др.

Для удаления продуктов очистки с поверхности обрабатываемых режущих инструментов и обеспечения качественного состояния поверхности после грубой химической очистки используют мягкие ткани, смоченные в растворителе. Очистку режущего инструмента часто проводят в ультразвуковых ваннах с применением органических растворителей. При ультразвуковой очистке крупные жировые загрязнения удаляются вследствие интенсивного локального перемешивания под действием создаваемых в растворителе ударных волн. Растворитель, насыщенный примесями, непрерывно удаляется с поверхности подложки и его заменяет свежий растворитель. Механические колебания, создаваемые в режущем инструменте, способствуют удалению

макрозагрязнений чешуек металлов, пыли и др. Эффективность ультразвуковой очистки в основном определяется частотой колебаний, а также температурой растворителя. Поскольку ультразвуковая очистка позволяет удалять только крупные загрязнения, она часто завершается обезжириванием в парах органических растворителей.

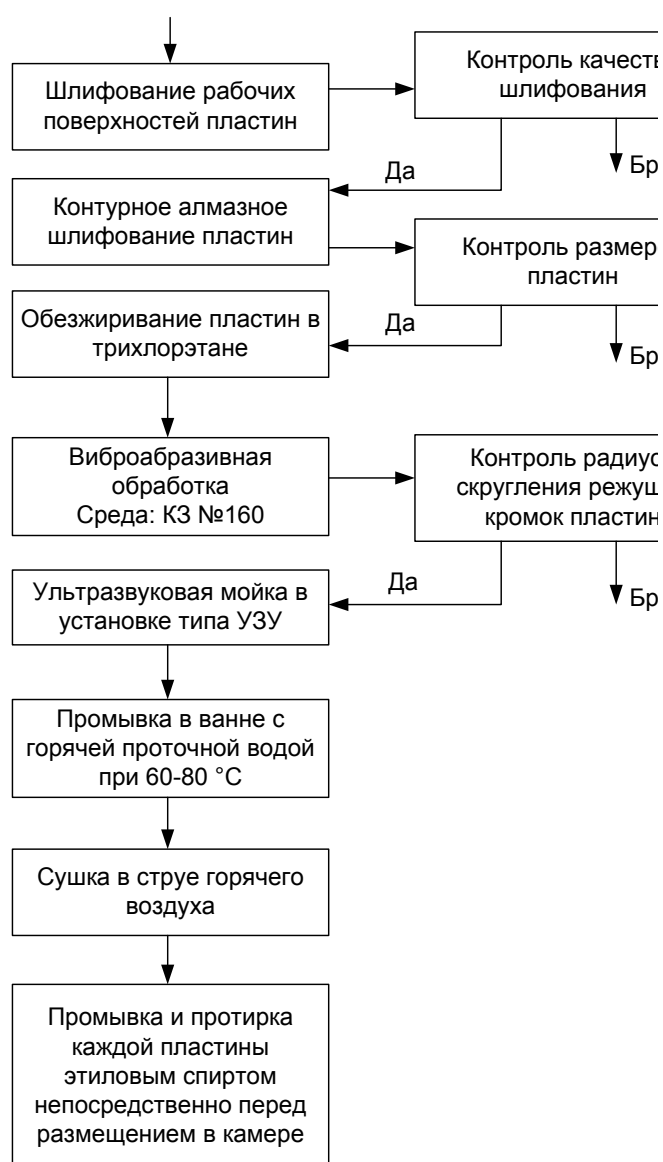


Рис. 4.3. Типовая схема подготовки твердосплавных пластин перед нанесением покрытий

Сушка очищенных режущих инструментов – еще один важный этап их подготовки перед нанесением покрытий. На этой стадии возможно повторное загрязнение поверхности, если не принимать соответствующих мер

предосторожности. Сушку проводят в паровом очистителе или в чистой печи горячим отфильтрованным воздухом или азотом. Приспособления и кассеты, используемые при очистке и транспортировании режущих инструментов, должны быть абсолютно чистыми, а окружающая атмосфера – свободной от загрязнений, обычно присутствующих в воздухе.

Последняя ступень при очистке – промывка в деионизированной воде, из которой режущий инструмент необходимо извлекать таким образом, чтобы на поверхности оставалось минимальное количество жидкости. Остающиеся на поверхности режущего инструмента капли воды при высыхании образуют видимые пятна, изменяющие свойства формируемого покрытия; поэтому капли воды после промывки следует сдувать струей воздуха или удалять центрифугированием. Очистку режущего инструмента желательно проводить непосредственно перед помещением в вакуумную камеру или реактор для нанесения покрытий, так как именно «свежеочищенные» поверхности обеспечивают наилучшее качество осаждаемой пленки.

Заключительным этапом любого процесса очистки является ее контроль, осуществляемый, как правило, визуально с помощью лупы или бинокулярного микроскопа. На поверхности подготовленного режущего инструмента не должно быть следов пятен от влаги и других загрязнений, а также ворсинок от ткани. Режущие инструменты, не удовлетворяющие этим требованиям, подвергаются повторной очистке.

4.3. Методы химического осаждения износостойких покрытий

4.3.1. Высоко- и среднетемпературные методы химического осаждения (HT-CVD, MT-CVD). В общем случае процессы CVD основаны на протекании гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей режущие инструменты, в результате которых образуется износостойкое покрытие. Получение покрытий из тугоплавких соединений путём осаждения их из

газовой фазы основано на восстановлении летучих соединений металлов водородом в присутствии активных составляющих газовой смеси, которые, взаимодействуя с выделяющимся в свободном виде металлом, образуют соответствующие тугоплавкие соединения.

На рис. 4.4 представлена принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы (CVD). Конденсация покрытий в процессах HT-CVD осуществляется на поверхности инструмента, нагретого до необходимой температуры 900...1200 °С при давлении близком или равном атмосферному. Для получения покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов в качестве активной (науглероживающей) составляющей газовой смеси обычно используются углеводороды, при необходимости получения покрытий на основе нитридов – азот, а при осаждении карбонитридов – метан. Осаждение покрытий в основном производят на неподвижные подложки. Однако известны конструкции установок, в которых подложки перемещаются вдоль реакционной зоны, качаются или вращаются в ней, а также находятся в подвешенном состоянии.

Для проведения процессов CVD используются специализированные реакторные установки, состоящие из 3 основных компонентов: система подачи и смешивания реагентов, камера для осаждения покрытий с системой нагрева и система повторного использования и удаления реагентов.

Нагрев режущего инструмента при проведении процессов CVD, как правило, осуществляется прямым контактом с тепловым источником, индукционным способом и радиационным способом.

Процессы HT-CVD реализуются при достаточно высоких температурах – 900...1100 °С. Такие температуры исключают возможность применения этого метода для инструмента из быстрорежущей стали. Однако и при нанесении покрытий на твердосплавные инструменты нагрев до столь высоких температур часто неблагоприятно сказывается на его работе. Твердосплавные инструменты с CVD-покрытиями часто имеют повышенную склонность к хрупкому

разрушению в виде выкрашиваний и сколов. Это особенно проявляется при прерывистом резании, когда действуют циклические нагрузки, при обработке труднообрабатываемых сплавов, при обработке с большими толщинами срезаемого слоя.

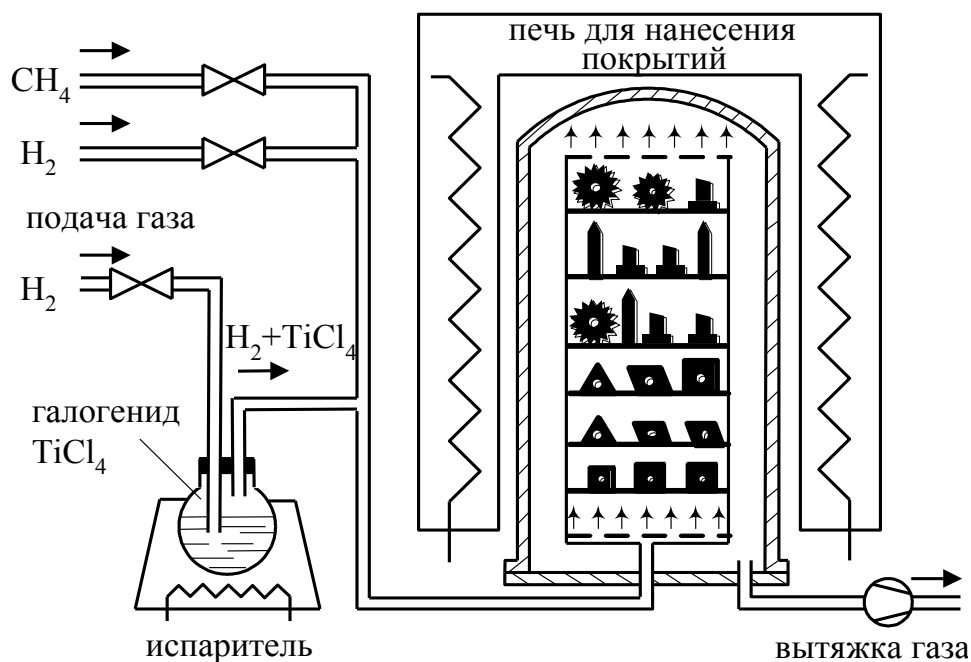


Рис. 4.4. Принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавные инструменты

Одной из причин повышенной хрупкости твердосплавного инструмента с покрытием CVD является высокотемпературная диффузия кобальта (частично и вольфрама) из твердого сплава в покрытие. В результате этого на границе раздела покрытие – твердый сплав формируется хрупкая η -фаза ($\text{W}_6\text{Co}_6\text{C}$, $\text{W}_3\text{Co}_6\text{C}$), толщина которой может достигать 4 мкм. Формирование η -фазы существенно повышает склонность твердосплавных инструментов к хрупкому разрушению в процессе резания. Другой причиной повышенной хрупкости являются возникающие растягивающие напряжения и трещины, зарождающиеся на поверхности твердосплавного инструмента в процессе остывания после нанесения покрытий.

Формирование хрупкой η -фазы практически не происходит при использовании метода химического осаждения покрытий при средних температурах – medium-temperature CVD (MT-CVD), который реализуется при температурах 700...900 °C [65].

Методами CVD наносятся покрытия на основе нитридов, карбидов, оксидов и карбонитридов тугоплавких металлов. Кроме того, с их помощью наносятся покрытия с алмазоподобной структурой. Наибольшее распространение в инструментальном производстве получили следующие соединения, формируемые процессами CVD: TiN, TiC, TiCN, Al₂O₃. Указанные соединения применяются как в качестве однослойных покрытий, так и в качестве отдельных слоев многослойного покрытия. Типичные многослойные покрытия, предлагаемые ведущими мировыми производителями твердосплавных инструментов – Sandvik Coromant, Kennametal Hertel, ISCAR и др., а также некоторые области их эффективного применения, представлены на рис. 4.9 и в табл. 4.6.

4.1. Типовые составы многослойных CVD-покрытий, предлагаемых ведущими мировыми производителями твердосплавных инструментов, и области их применения

Группа применения по ISO	Область применения	Материал основы (приближенный отечественный аналог)	Состав покрытия	Общая толщина покрытия, мкм
M20 K20	Получистовое точение жаропрочных и нержавеющей сталей, высокоскоростное точение серых и шаровидных чугунов при постоянных условиях резания	BK6M	TiC/TiN/Al ₂ O ₃	12
P25	Получистовое точение конструкционных сталей при постоянных условиях резания	T14K8	TiC/TiCN/Al ₂ O ₃	10
P10	Чистовое фрезерование конструкционных сталей	T15K6	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃	4

P20 M15 K15	Универсального применения	-	TiC/TiCN/TiN	3
P35	Получерновое и черновое точение конструкционных сталей	T5K12	TiN/TiCN/TiN/TiCN	6
P40 M35	Точение конструкционных и нержавеющей сталей в неблагоприятных условиях	TT7K12	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	6
P10 K15	Чистовое высокоскоростное точение, растачивание, развертывание, сверление конструкционных сталей, серых и шаровидных чугунов	-	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃	8

В многослойном покрытии каждый из слоев выполняет строго регламентированные служебные функции. Например, в покрытии TiN-TiCN-Al₂O₃ наружный слой Al₂O₃ предназначен для сдерживания диффузионных процессов, снижения физико-химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов, снижения склонности инструментального материала к окислению при повышенных температурах резания. Слой TiN обладает кристаллохимической совместимостью с твердосплавной основой, а слой на основе карбонитрида титана TiCN используется для повышения прочности адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия.

Важной характеристикой покрытия является его толщина. С одной стороны, ее рост благоприятно сказывается на повышении износостойкости контактных площадок инструмента, с другой – приводит к заметному увеличению количества дефектов в покрытии, снижению прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом и уменьшению способности покрытия сопротивляться хрупкому разрушению. По этой причине при нанесении покрытий на режущие инструменты, эксплуатирующиеся в условиях прерывистого резания, например, при фрезеровании, когда покрытие должно

сопротивляться циклическим нагрузкам, его толщина, как правило, не превышает 3...5 мкм, в то время как при точении в некоторых случаях этот показатель может достигать 15 мкм.

Основным направлением совершенствования твердого сплава с CVD-покрытиями является снижение хрупкости его поверхностного слоя. Появление технологий MT-CVD также не смогло до конца решить эту проблему. Величина растягивающих напряжений в поверхностном слое покрытий, получаемых по технологии MT-CVD, несколько ниже, чем у аналогичных, полученных высокотемпературным CVD-методом, но все же достаточна чтобы привести к зарождению трещин.

Одним из решений данной проблемы может служить технология предложенная фирмой Sandvik Coromant. Согласно данной технологии, после нанесения на твердосплавную основу покрытия $\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, передняя поверхность пластины полируется по специальной технологии, в результате чего полностью снимается слой нитрида титана и верхний слой оксида алюминия. Удаление всего 2...3 мкм от общей толщины покрытия дает возможность снизить уровень внутренних растягивающих напряжений в 2 раза и ликвидировать большую часть зародышей трещин. Такие покрытия получили название «Low stress coating». Кроме того, полировка «обнажает» наиболее плотный и износостойкий слой оксида алюминия, который наилучшим образом сопротивляется диффузионному и абразивному износу. Гладкая передняя поверхность дает дополнительные преимущества при обработке вязких материалов – на ней практически отсутствует схватывание с обрабатываемым материалом. Задняя поверхность, сохранившая всю толщину покрытия, эффективно сопротивляется действующим на нее нагрузкам.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день порядка 80% всего выпускающегося твердосплавного инструмента имеют различные покрытия, большую часть которых составляют покрытия, нанесенные по технологиям CVD. Данные технологии обеспечивают равномерное нанесение покрытий

высокой плотности на рабочие поверхности инструмента и обеспечивают достаточно высокую производительность режущего инструмента. Существенными недостатками CVD-методов являются достаточно высокие температуры, при которых они реализуются, сложность управления составом и структурой формируемых покрытий в широких пределах, а также то обстоятельство, что они практически не используются для нанесения многоэлементных покрытий типа $(\text{Ti}, \text{Me})\text{N}$, $(\text{Ti}, \text{Me}_1, \text{Me}_2)\text{N}$.

4.3.2. Химическое осаждение с плазменным сопровождением (PA-CVD).

Мощным инструментом воздействия на кинетику процессов нанесения CVD-покрытий и свойства самих покрытий, является плазменное сопровождение (ассистирование) в англоязычной литературе получившее название plasma-assisted CVD (PA-CVD) или plasma-enhanced CVD (PE-CVD). Применение различных приемов возбуждения плазмы в реакционном объеме и управление ее параметрами позволяет интенсифицировать процессы роста покрытий, сдвигать их в область более низких температур, делать более управляемыми процессы формирования покрытий требуемой структуры и состава.

При использовании процессов PA-CVD покрытие на инструментальной основе образуется в результате химических реакций в газовой фазе при воздействии на последнюю плазмой газового электрического разряда (как правило, высокочастотного). На практике для нанесения PA-CVD-покрытий может быть использован метод «горячей плазмы», когда при давлении близком или равном атмосферному, электроны, ионы и нейтральные газовые молекулы, находящиеся в локальном термодинамическом равновесии, вводятся в дугу для получения равновесной плазмы. Электроны и в меньшей степени ионы обладают большей энергией, чем молекулы газа в тлеющем разряде при низком давлении. Это приводит к так называемой «холодной плазме», параметры которой оказываются неравновесными. Большинство процессов PA-CVD осуществляются именно по этому методу, а не по методу равновесной горячей плазмы.

Основные преимущества процесса PA-CVD по сравнению с CVD заключается в том, что при его реализации отсутствует необходимость в нагреве инструментальной основы до высоких температур (температуры процессов PA-CVD не превышают 600 °C.), достигается более высокая прочность адгезионной связи покрытия и инструментальной основы. Вместо тепловой энергии газы-реагенты активируются быстрыми электронами. Большинство указанных выше преимуществ обуславливаются именно этим обстоятельством.

Еще одним важным достоинством процессов химического осаждения покрытий из газовой фазы с плазменным сопровождением является более высокие скорости осаждения, чем в процессе обычного (термического) CVD. Но в то же время контролировать процессы PA-CVD часто достаточно сложно. Кроме того, осаждение чистых материалов этим методом фактически невозможно (за исключением полимеров), поскольку почти все недесорбируемые газы удерживаются осадком. Другой недостаток – сильное взаимодействие плазмы с растущей пленкой. Высокая скорость осаждения приводит к плохой контролируемости однородности и требует тщательной отладки реакционной установки.

4.4. Методы физического осаждения износостойких покрытий

Для всех методов физического осаждения покрытий генерация наносимого вещества осуществляется в результате термического перевода твердого вещества в парообразное (испарением, вакуумной дугой или ионным распылением), а дополнительное повышение средней энергии осаждаемых частиц производится за счет их ионизации, осуществляемой различными способами (наложением тлеющего, дугового или высокочастотного разряда или подмешиванием ионов, получаемых от автономных источников).

Методы физического осаждения покрытий универсальны с точки зрения получения гаммы однослойных и многослойных покрытий практически любого состава, в том числе с алмазоподобной и наноразмерной структурой. Они позволяют реализовывать процессы нанесения покрытий при температурах 500...600 °С, что обеспечивает возможность их применения для быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики.

Все методы физического осаждения покрытий (вакуумно-плазменные методы) основаны на получении в среде вакуума пара осаждаемого материала в результате воздействия на изготовленный из него катод (мишень) различных источников энергии – мощных высокотемпературных нагревателей, лазерного луча, электронных и ионных пучков, катодных пятен вакуумной дуги, сильноточного импульса и др. Данные методы позволяют получать пар практически любого твердого вещества, а для синтеза его соединений на поверхности инструмента (например, нитридов, оксидов или карбидов) используются нетоксичные газы, такие как азот, кислород, ацетилен и другие, не представляющие опасности для окружающей среды. Кроме того, как уже было отмечено, при реализации PVD-процессов отсутствует необходимость в нагреве инструмента до высоких рабочих температур. Все отмеченное значительно расширяет диапазон применения PVD-методов и делает их более универсальными по сравнению с CVD.

Однако для достижения такой же высокой плотности, твердости и других характеристик покрытий, как при их осаждении методом CVD, необходимо не только подготовить должным образом (очистить от загрязнений, активировать, а если нужно, то и нагреть) поверхность инструмента, но и обеспечить определенное энергетическое состояние, как осаждаемого пара, так и поверхности покрытия.

Все вакуумно-плазменные методы, используемые для нанесения покрытий, можно условно разбить на три самостоятельные группы: ионно-термическое испарение, электродуговое испарение и осаждение распылением.

На рис. 4.5 систематизированы методы физического осаждения покрытий. Необходимо понимать, что представленная классификация является достаточно условной, но в то же время она позволяет разобраться в существующем многообразии PVD-методов и их технологических особенностях.

Сущность большинства методов первой группы – ионно-термического испарения заключается в испарении различными способами (резистивным, индукционным, электронно-лучевым, дуговым, лазерным) наносимого материала, ионизации частиц и их ускорении в электрическом и/или магнитном поле по направлению к покрываемой поверхности и, наконец, их конденсации на этой поверхности. Эти методы различаются способами испарения материала и ионизации потока осаждаемого материала, которая может осуществляться в тлеющем и дуговом самостоятельном или несамостоятельном разрядах, с использованием разряда Пеннинга и др.

Большинство методов электродугового испарения, часто называемого вакуумно-дуговым, основаны на испарении наносимого материала катодными пятнами вакуумной дуги, в которых плотность потока энергии составляет $10^6 \dots 10^7$ Вт/см², ионизации металлического пара и последующей конденсации чистого металла либо его соединения с реакционным газом на рабочих поверхностях режущего инструмента. Для реализации указанных процессов могут использоваться различные комбинации электрических и магнитных полей, способы генерации плазмы (анодный и катодный) и ее ускорения – электростатическое или холловское. Кроме того, вакуумно-дуговое испарение может осуществляться в импульсном или непрерывном режимах.

Классификация методов физического осаждения покрытий в вакууме Physical Vapour Deposition (PVD)

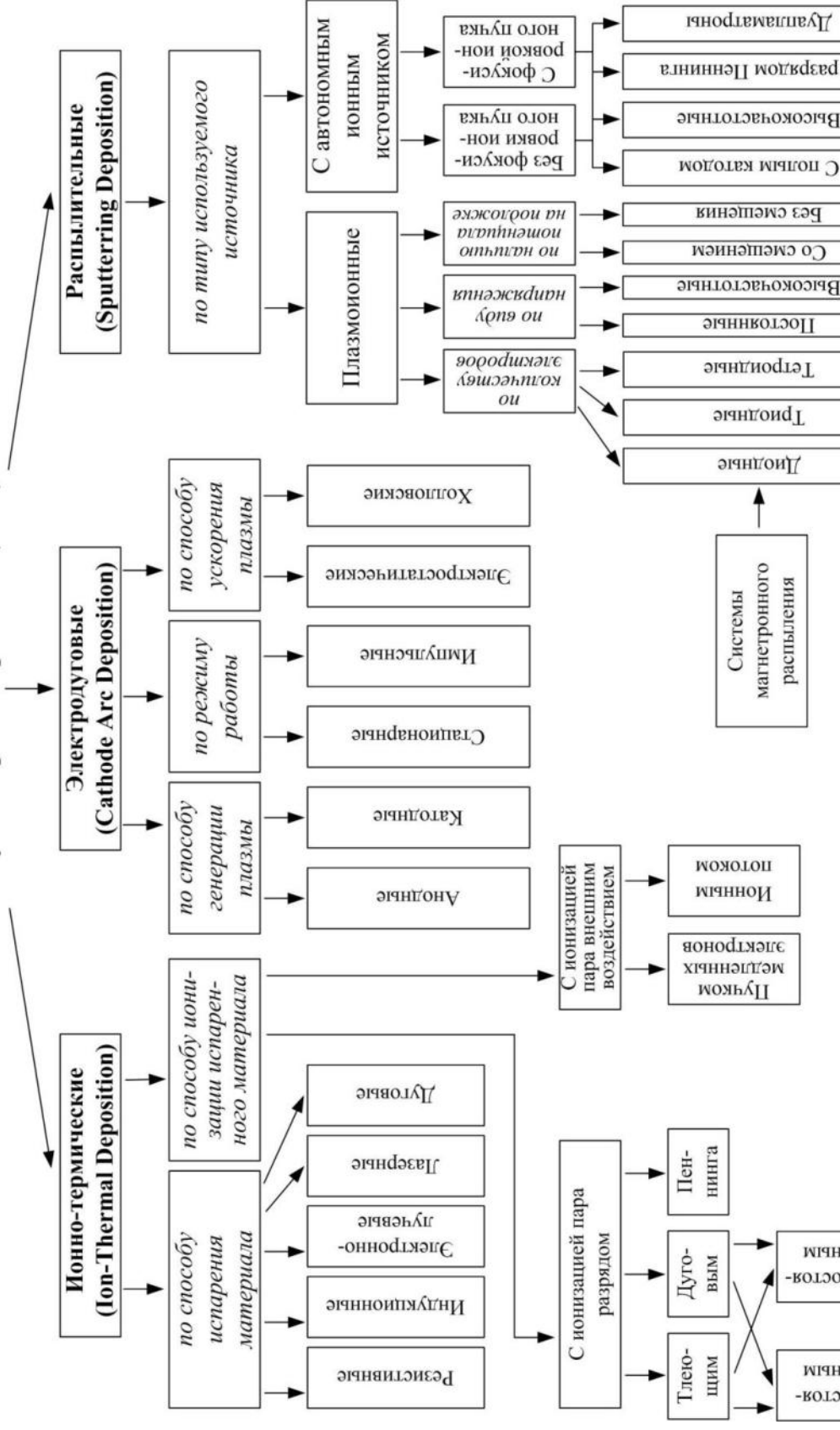


Рис. 4. 5. Систематизация методов физического осаждения покрытий на режущий инструмент

Методы третьей группы основаны на явлении ионного (катодного) распыления твердой мишени. Покрытие образуется в результате конденсации на поверхности обрабатываемого режущего инструмента, главным образом, нейтральных частиц (атомов), выбиваемых из мишени с помощью ее бомбардировки ионами инертного газа. Чаще всего для этой цели используются тлеющие разряды при невысоком давлении.

На рис. 4.6 представлены принципиальные схемы установок, реализующих три наиболее распространенных механизма вакуумно-плазменного осаждения покрытий: электронно-лучевое испарение (а), являющееся представителем ионно-термических методов; электродуговое испарение (б); магнетронное распыление (в), являющееся разновидностью распылительных методов.

На первой из представленных схем перевод твердого вещества в металлический пар осуществляется в результате его испарения в тигле электронным лучом, во втором случае – в результате испарения материала катодным пятном вакуумной дуги, а в третьем – в результате магнетронного распыления материала. В табл. 4.8. представлено сравнение энергетических и других характеристик установок трех представленных конструкций.

Характерной особенностью, представляющей несомненное достоинство электродуговых и распылительных систем в сравнении с ионно-термическими, является высокая степень ионизации потока вещества, достигаемая без использования дополнительных систем ионизации. Кроме того, в системах электродугового испарения и ионного распыления генерация потока наносимого вещества осуществляется испарением (распылением) с поверхности интегрально холодного катода (мишени), в то время как при ионно-термическом испарении – из плазмы с горячим катодом. Поэтому системы вакуумно-дугового испарения и магнетронного распыления часто называют «холодными».

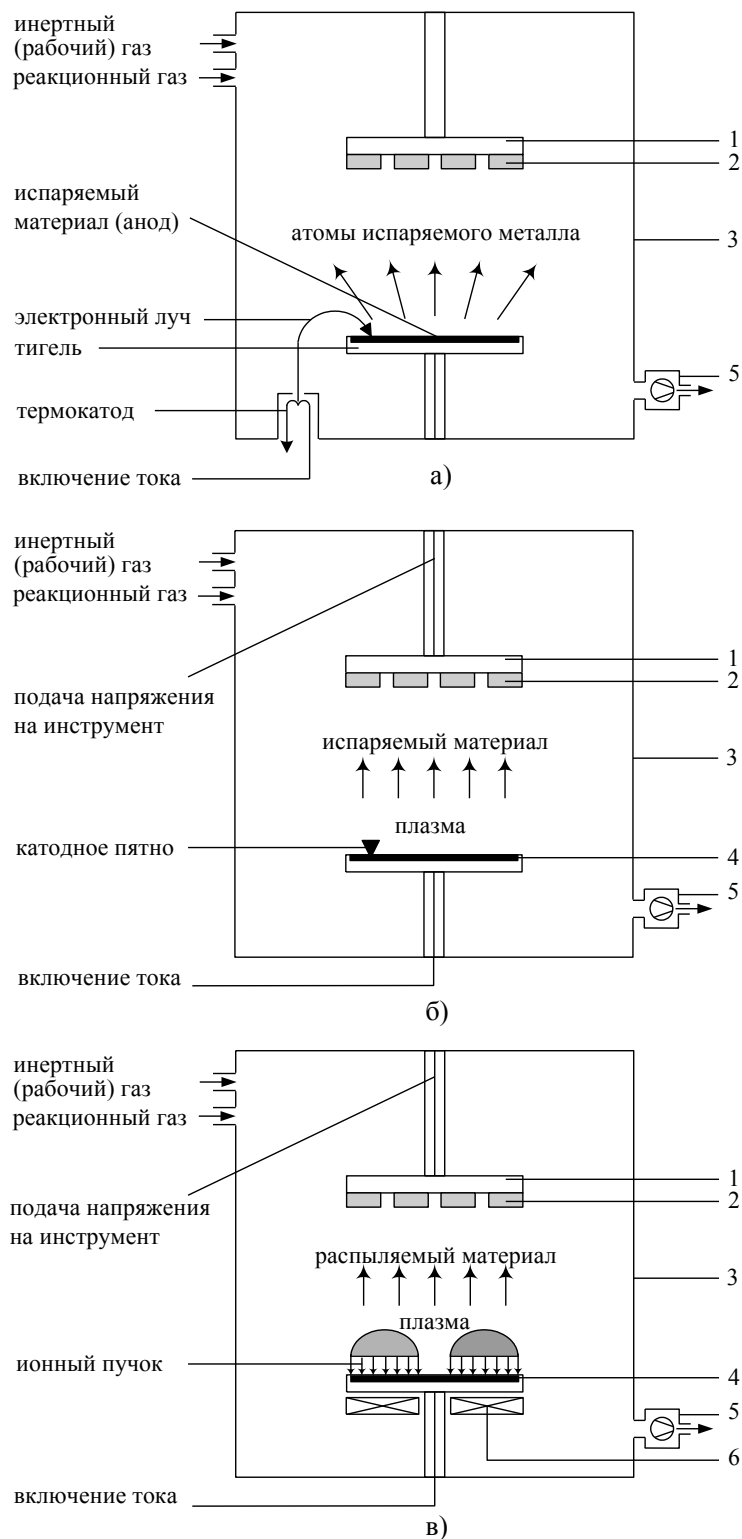


Рис. 4.6. Принципиальные схемы нанесения покрытий на режущие инструменты PVD-методами:

а – электронно-лучевое; б - электродуговое; в - магнетронное: 1 – держатель инструментов; 2 – инструменты; 3 – вакуумная камера; 4 – осаждаемый материал; 5 – вакуумный насос; 6 – магнитная система для магнетронного распыления

Методы ионно-термического испарения, хотя и характеризуются простотой и высокими скоростями осаждения (до 20 мкм/ч), но в то же время не обеспечивают достаточной воспроизводимости свойств покрытий, особенно из материалов сложного состава. При термическом испарении составы покрытия и исходного испаряемого материала зачастую сильно различаются. Электронно-лучевое испарение характеризуется низким коэффициентом использования материала (~ 20%) и низким энергетическим КПД, т.к. непосредственно на процесс испарения расходуется ~5% подводимой энергии. Остальная энергия идет на нагрев тигля, рентгеновское и ультрафиолетовое излучение, образование вторичных электронов (до 25% энергии первичного пучка).

Особенностями метода электродугового испарения, выгодно отличающими его от других, являются универсальность спектра наносимых покрытий, высокая производительность процесса (скорость осаждения до 40 мкм/ч) и высокая прочность адгезионной связи покрытия с инструментальной основой. Последнее обеспечивается за счет наличия на границе раздела «инструментальный материал – покрытие» переходного металлического подслоя, формируемого при очистке поверхности инструмента бомбардировкой ионами материала катода. Самым главным недостатком этого метода является наличие в генерируемом плазменном потоке большого количества микрокапель испаряемого материала (катода), что ухудшает качество и эксплуатационные показатели формируемого покрытия. Для устранения капельной фазы в вакуумно-дуговые установки вводятся дополнительные узлы для сепарации плазменного потока что существенно их усложняет и удорожает.

Отличительной чертой методов распыления, в первую очередь магнетронных систем, является формирование высококачественных покрытий, не имеющих дефектов в виде капель и мелких частиц, нарушающих сплошность покрытия. В то же время этим методам свойственен один серьезный недостаток, сдерживающий их более широкое распространение в

инструментальном производстве – низкая скорость осаждения покрытий.

Все PVD-процессы независимо от их технологических особенностей и применяемого оборудования включают в себя следующие стадии: прогрев и очистка поверхности режущего инструмента ионами газа или металла, генерация плазмы и формирование ионного потока, ускорение и доставка ионного потока к поверхности режущего инструмента, конденсация покрытия на поверхности режущего инструмента.

Представленная на рис. 4.7 структурно-функциональная схема процессов нанесения PVD-покрытий различными методами, наглядно демонстрирует, что работоспособность инструмента зависит от различных характеристик покрытий – толщины (h), микротвердости (HV), остаточных напряжений ($\sigma_{ост}$) и др., являющихся выходными параметрами любого процесса. Указанные характеристики в свою очередь являются функциями входных факторов (условий) процессов нанесения покрытий: напряжения на режущем инструменте (U), давления газа в камере (p), тока (I), времени нанесения (τ) и др.

Среди условий нанесения покрытий необходимо разделять зависимые и независимые переменные. Например, температура процесса нанесения покрытия и плотность тока влияют на выходные параметры процесса (характеристики покрытий), но сами при этом являются зависимыми переменными (параметрами), так как напрямую зависят от напряжения на инструменте, тока, материала катода или мишени и других входных факторов, которые устанавливаются технологом.

Необходимо понимать, что покрытие, нанесенное на режущий инструмент, приводит к ожидаемому увеличению какого-либо из выходных параметров процесса резания только в том случае, если будут правильно подобраны режимы и условия его нанесения. Одно и то же покрытие в зависимости от условий его осаждения может иметь широкий спектр физико-механических характеристик. В качестве примера можно рассмотреть широко

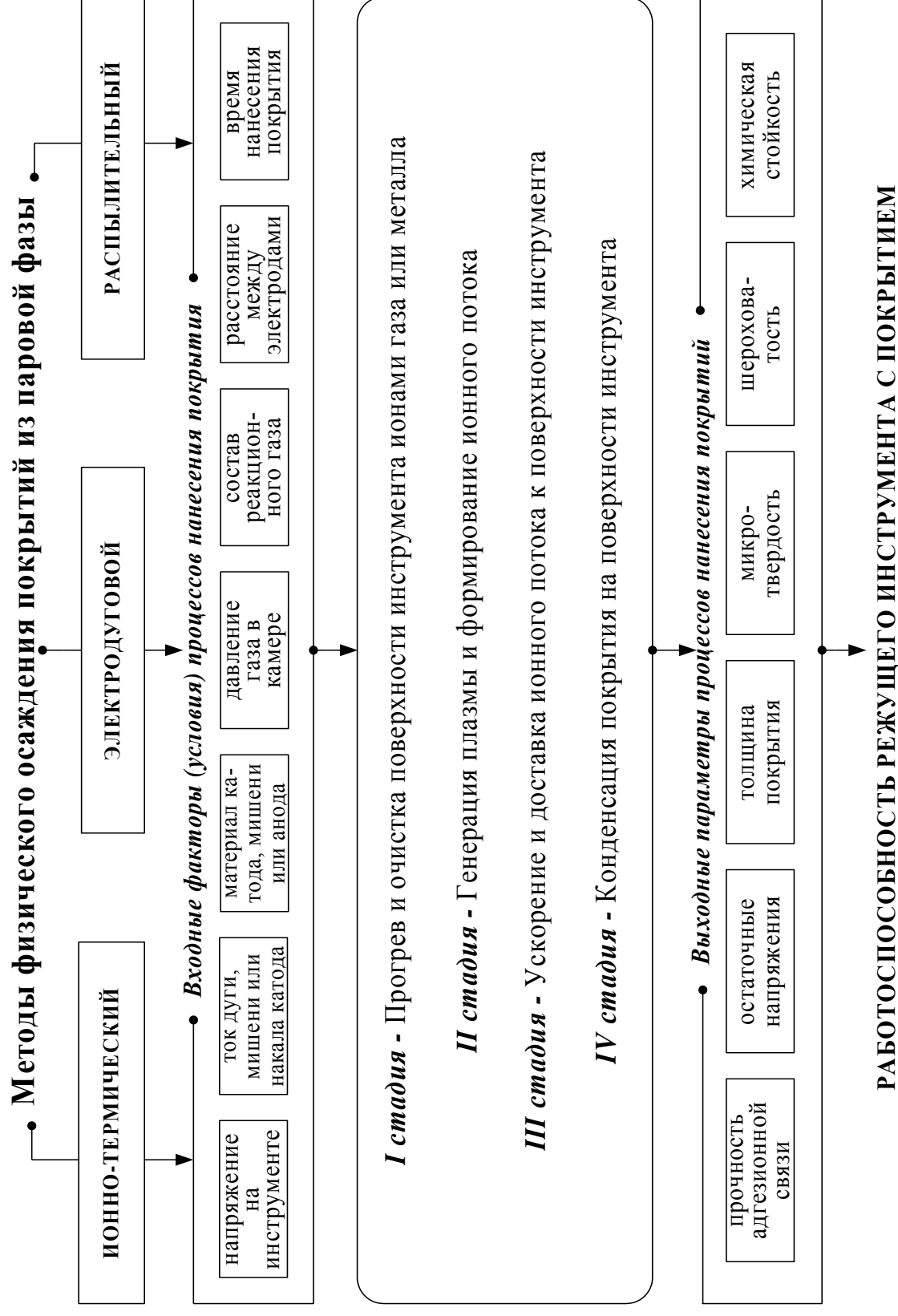


Рис. 4.7. Структурно-функциональная схема процессов нанесения PVD-покрытий различными методами

используемое покрытие (Ti,Al)N. В зависимости от химического состава катода или мишени его микротвердость может варьироваться от 10 до 40 ГПа.

4.4.1. Ионно-термическое испарение. Как уже было отмечено, системы ионно-термического нанесения покрытий различаются между собой способами испарения материала и ионизации потока осаждаемого вещества.

На практике наибольшее применение получили ионно-термические системы, использующие для испарения электронно-лучевой нагрев и тлеющий или дуговой разряд для ионизации. Чаще всего электронно-лучевой испаритель реализуется в двух вариантах: с направленным сфокусированным лучом и с несфокусированным электронным лучом. Усовершенствованным вариантом таких систем является напылительная система, оборудованная дополнительным электродом, расположенным между испаряемым материалом и подложкодержателем, который, в свою очередь, может быть заземленным, находиться под потенциалом смещения или под плавающим потенциалом. Дополнительный электрод может одновременно выполнять функции коллектора реакционноспособного газа.

Процессы ионного осаждения, использующие термический перевод наносимого материала из твердого в парообразное состояние и осуществляемые в среде реакционноспособных газов с зажиганием плазмы в парах, получили в отечественной литературе название реактивных электронно-плазменных (РЭП). В англоязычной литературе процессы реактивного термовакuumного испарения, в которых поток осаждаемых частиц тем или иным способом активируется в зоне между источником испаряемого вещества и подложкодержателем, получили название Activated reactive evaporation (ARE). Реактивное осаждение покрытий за счет активирования потока осаждаемых частиц, получаемых ионным распылением, при энергетичной сопутствующей бомбардировке растущей пленки, получил название Reactive ion plating (RIP). Процессы, в которых к подложке прикладывается потенциал смещения или осуществляется

воздействие ионным (плазменным) потоком на растущую пленку (например, с помощью автономного ионного источника), также относят к методам RIP.

В системах, реализующих метод РЭП (ARE), металл нагревается и испаряется с помощью электронно-лучевой пушки. В результате взаимодействия электронного луча с испаряемым металлом над его поверхностью возникает плазменная область. Низкоэнергетичные вторичные электроны из этого плазменного сгустка вытягиваются в реакционную зону камеры посредством кольцевого электрода, расположенного над этой плазменной областью. Для экстракции электронов дополнительный электрод находится под положительным потенциалом (20–100 В). Низкоэнергетичные вторичные электроны, имея высокое поперечное сечение, частично ионизируют и/или активизируют металлический пар и газ. Активированный поток вещества конденсируется на подложки, которые могут находиться под небольшим отрицательным потенциалом, способствующим повышению качества покрытий вследствие удаления атомов, имеющих слабую связь с осажденным слоем.

Для реализации различных процессов ионно-термического нанесения покрытий в промышленности широкое распространение получили установки типа ЭПН-1, ЭПН-3, ЭПН-12.

В этих установках используется электронно-лучевая система с кольцевым катодом с которого эмитируются электроны, ускоряются до величины приложенного потенциала и бомбардируют поверхность металла, приводя к его испарению в результате нагрева. Часть испаренных атомов ионизируется при столкновении с электронами и при определенной скорости испарения между поверхностью и кольцевым катодом достигается такая плотность пара, что происходит пробой промежутка анод-катод и работа испарителя переводится в режим несамостоятельного разряда, характеризующегося большим током и относительно малым падением напряжения в промежутке анод-катод. Из-за относительно высокой плотности пара в пространстве между катодом и анодом в результате их соударения с ионами, поток пара состоит из ионов,

возбужденных атомов и вторичных электронов, образующихся при столкновении первичных электронов с атомами пара. Таким образом, конденсация потока пара происходит в присутствии ионов испаряемого металла, энергию которых можно регулировать за счет величины подаваемого на подложку отрицательного потенциала смещения U , а степень ионизации - напряжением и током разряда, а также парциальным давлением и потенциалом ионизации испаряемого металла. Метод позволяет наносить с высокой производительностью чистые металлы, а также тугоплавкие соединения, если испарительное устройство снабжается кольцевым коллектором для ввода в плазму испаряемого металла активного газа. В отличие от установок, реализующих электродуговое испарение «Булат» и «Пуск», которые будут рассмотрены ниже, в установках типа ЭПН расходуемым электродом является не катод, а анод, что позволяет полностью избавиться от капельной фазы за счет диффузионного пятна, покрывающего всю плотность анода (испаряемого металла).

К катоду и аноду электронной пушки от источника питания подводится высоковольтное напряжение. В зависимости от типа пушки оно составляет 5-60 кВ. Энергия атомов в потоке невелика и составляет 0,2–0,3 В, степень ионизации частиц 0,05-0,1 %. Для повышения производительности и стабилизации процесса испарения целесообразно на ионизированный поток металлического пара накладывать продольное магнитное поле. Работа в режиме низковольтного несамостоятельного разряда дает высокую степень ионизации потока пара, приближающуюся к 100%. В установках, работающих по схеме испарителя с анодной формой дуги (испарители с горячим анодом), реализуются высокие мощности разряда, достигающие 10 кВт. Практически полностью ионизированный поток пара позволяет получать покрытия с высокой прочностью адгезионной связи с инструментальной подложкой без сильного нагрева последней.

4.4.2. *Электродуговое испарение.* В основе метода осаждения покрытий посредством электродугового (вакуумно-дугового) испарения лежит процесс генерации металлической плазмы в вакууме сильноточным низковольтным разрядом (дугой), горящим в парах материала электрода. По способу генерации плазмы вакуумные дуги разделяются на катодную (наиболее распространена) и анодную формы, в которых генерация осуществляется соответственно катодными и анодными пятнами. В отличие от катодных пятен, каждое из которых, как будет показано ниже, занимает весьма малую площадь, анодное пятно распространяется на всю бомбардируемую поверхность и его площадь примерно равна площади испаряемого материала в целом (расходуемого электрода).

Ускорение плазмы может осуществляться электростатически или с использованием холловского ускорения. В системах с холловским ускорением плазмы, получивших наибольшее распространение, в отличие от систем с электростатическим ускорением, обеспечивается формирование сфокусированных, практически полностью ионизированных и ускоренных плазменных потоков.

В нашей стране наибольшее промышленное распространение получил метод конденсации покрытий в условиях ионной бомбардировки (КИБ). За рубежом этот метод известен как Ion Bond или Cathode Arc Deposition. Его сущность заключается в испарении материалов катодными пятнами вакуумной дуги в рабочее пространство камеры с одновременной подачей реакционноспособных газов и последующей конденсации паров материалов либо их соединений с газами на рабочих поверхностях инструмента в условиях ионной бомбардировки последнего. Все процессы испарения, плазмохимических реакций, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. На рис. 4.8 представлена принципиальная схема установки для реализации описанного процесса.

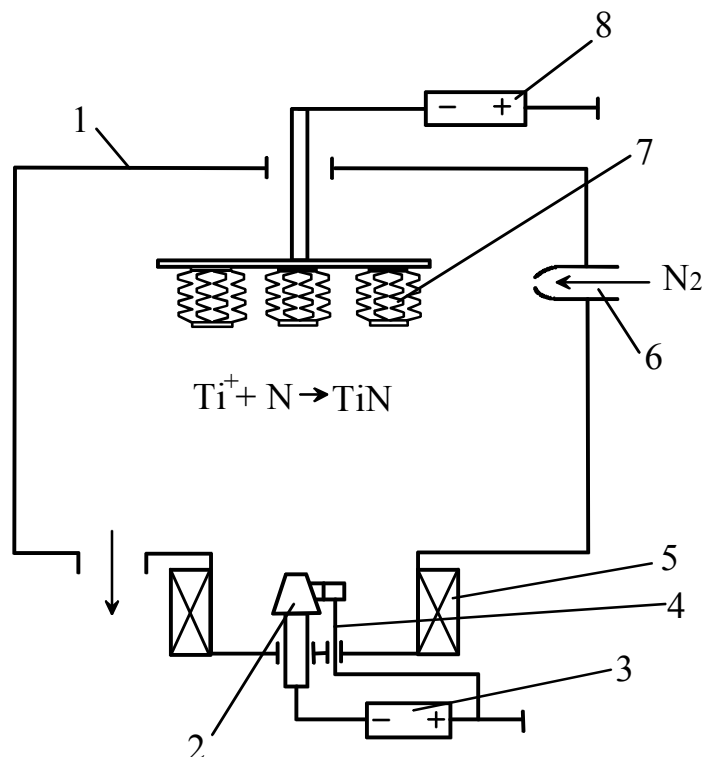


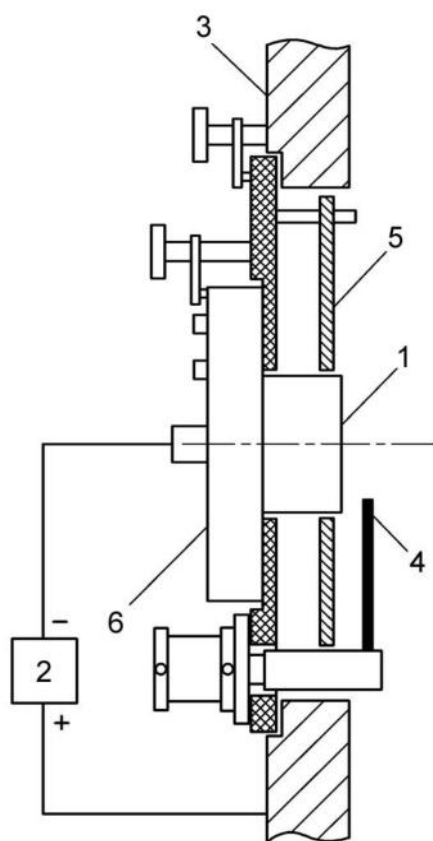
Рис. 4.8. Принципиальная схема установки для нанесения покрытий на режущий инструмент методом конденсации с ионной бомбардировкой:

- 1 – корпус вакуумной камеры; 2 – титановый катод; 3 – источник питания разряда;
 4 – устройство поджига; 5 – магнитная катушка; 6 – ввод реакционноспособного газа;
 7 – режущий инструмент; 8 – источник опорного напряжения

Катодные пятна, с помощью которых осуществляется перевод твердого вещества в парообразное, представляют собой микроскопический сгусток плотной металлической плазмы на поверхности катода, через который протекает ток ~ 100 А. Плотность выделяемой на поверхности катода мощности составляет $\sim 10^9$ Вт/см² и соответствует очень высокой температуре, при которой материал полностью ионизируется. В зависимости от положения испаряемого материала в периодической таблице Менделеева его атомы могут быть ионизированы однократно, двукратно, трехкратно и так далее. В каждой отдельной группе и в каждом периоде таблицы Менделеева кратность ионизации повышается с ростом порядкового номера элемента. Щелочные металлы эмитируют только однократно ионизированные атомы, легкие переходные металлы титан, ванадий и хром ионизованы преимущественно двукратно, а атомы таких тяжелых металлов как тантал и вольфрам –

ионизированы в основном трехкратно и четырехкратно. Т.е. степень ионизации возрастает при переходе к более тугоплавким металлам.

Наличие микрокапель сегодня считается основным недостатком методов электродугового осаждения покрытий. Это связано с тем, что микрокапли являются источниками локальных напряжений в покрытиях и наиболее вероятными местами, с которых начнется их разрушение в процессе эксплуатации инструмента.



**Рис. 4.9. Конструктивная
схема
электродугового испарителя
металла:**

1 – катод, 2 – источник питания,
3 – стенка вакуумной камеры,
4 – поджигающий электрод,
5 – экран, 6 – охлаждаемый
водой фланец испарителя

На рис. 4.9 представлена схема испарителя металла, использующегося в самых первых установках электродугового осаждения. Он содержит цилиндрическую мишень, подключенную к отрицательному полюсу сильноточного источника питания дуги. Положительный полюс обычно подключается к заземленной рабочей вакуумной камере. Зажигание дуги

происходит при контакте с поверхностью мишени вспомогательного подвижного электрода и последующем размыкании контакта.

Для повышения однородности испарения плоской поверхности катода, обращенной к обрабатываемым режущим инструментам, используются испарители, в которых катод находится в аксиальном магнитном поле, создаваемом стабилизирующей катушкой (рис. 4.10). Для зажигания дуги в этом испарителе используют высоковольтный импульс. Дополнительная фокусирующая катушка позволяет снизить диаметр выходящего из корпуса испарителя плазменного потока и выпускать его через отверстие в выходной диафрагме. В результате снижается содержание в осаждаемых покрытиях металлических капель, повышается эффективность транспортировки ионизованного материала катода до подложки и снижаются его потери на стенках рабочей камеры.

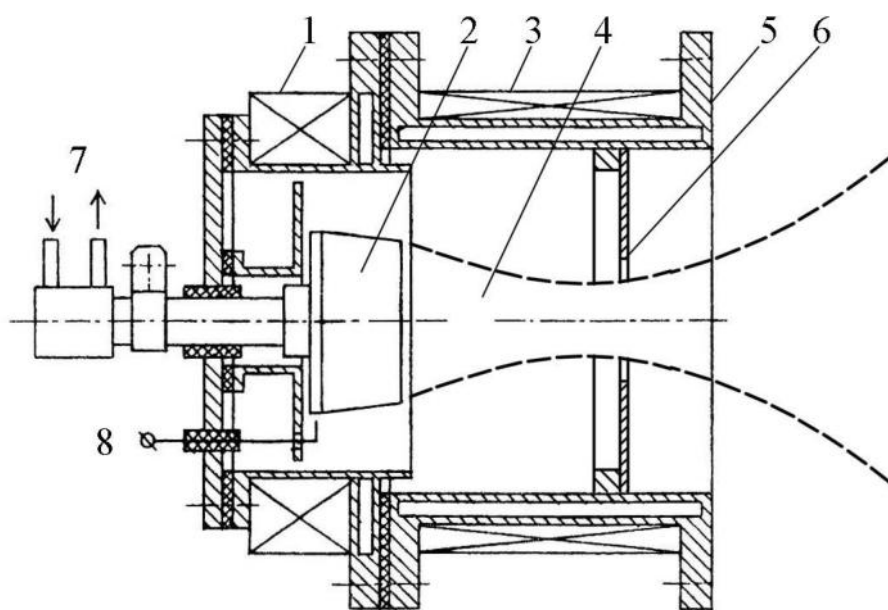


Рис. 4.10. Конструктивная схема электродугового испарителя металла со стабилизацией катодных пятен на плоском торце цилиндрической мишени и с магнитной фокусировкой потока металлической плазмы:

1 – стабилизирующая катушка, 2 – катод, 3 – фокусирующая катушка, 4 – поток металлической плазмы, 5 – корпус, 6 – диафрагма, 7 – водяное охлаждение мишени, 8 – высоковольтный ввод поджигающего устройства

Размер и количество макрочастиц зависят от материала катода и тока дуги. Они возрастают как с уменьшением температуры плавления материала, так и с ростом тока. В первом случае увеличивается размер жидкого расплава одного или нескольких сменяющих друг друга элементарных катодных пятен. Во втором случае количество одновременно присутствующих на мишени катодных пятен и эмитируемых ими макрочастиц растет пропорционально току, при этом увеличивается вероятность слияния жидких расплавов нескольких катодных пятен. Чем больше размеры жидкого расплава металла, тем большего размера капли могут выбрасываться с поверхности катода под давлением перегретого пара катодного пятна.

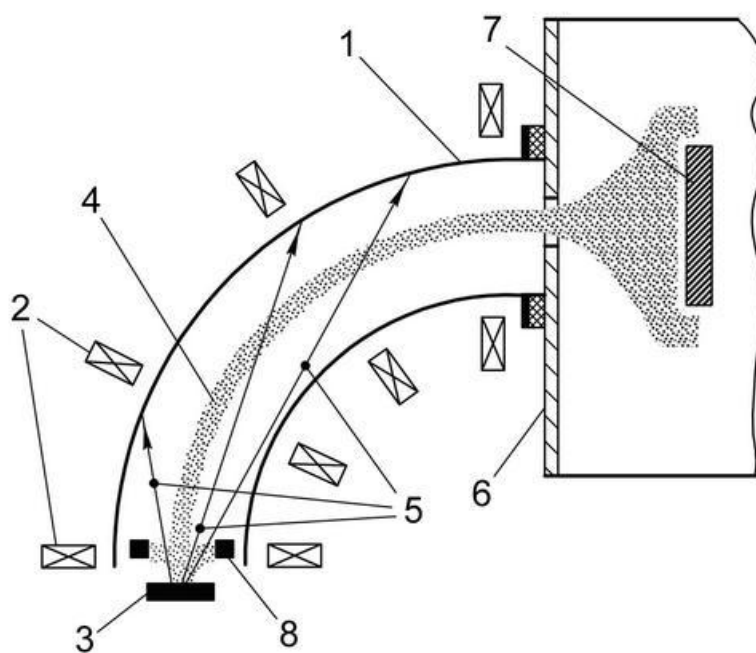


Рис. 4.11 Схема очистки плазмы вакуумной дуги от микрокапель металла в магнитном поле:

- 1 – плазмодод, 2 – катушки магнитного поля, 3 – катод,
- 4 – металлическая плазма, 5 – микрокапли металла,
- 6 – камера, 7 – подложка, 8 – вспомогательный анод

Если содержание металлических капель в покрытии вообще недопустимо, то на практике используются различные технологические приемы фильтрации потока металлической плазмы, покидающего поверхность катода – например,

использование криволинейного плазмоведа, принципиальная конструкция которого представлена на рис. 4.11. Фильтр содержит криволинейный плазмовод и катушки магнитного поля, удерживающего на оси плазмоведа эмитируемую поверхностью испаряемой мишени плазму. Магнитное поле отклоняет плазменный поток на 90 градусов и не оказывает никакого воздействия на макрочастицы, движущиеся по прямолинейным траекториям и осаждающиеся на поверхности плазмоведа. Анодом дуги является рабочая вакуумная камера, в которой располагаются подложки (инструментальная основа). Для зажигания дуги используют вспомогательный анод вблизи катодной мишени. Иногда на плазмовод подают положительное относительно камеры напряжение в несколько десятков вольт. Так как движение электронов поперек магнитного поля из плазмы на стенки плазмоведа затруднено, возникающий в его цепи ток значительно меньше тока дуги. Однако падение напряжения на образующемся слое отрицательного пространственного заряда между плазмой и плазмоводом полностью исключает потери на его стенках положительных ионов металла.

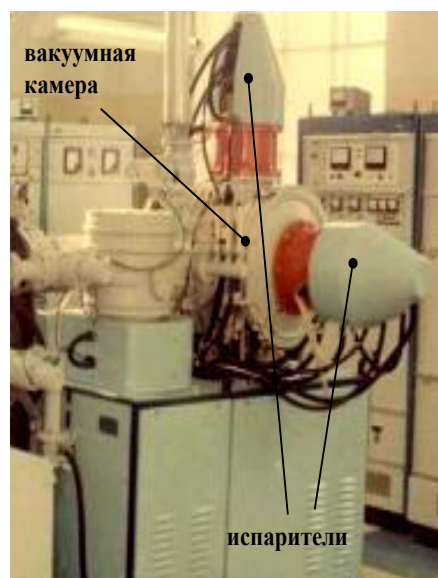
В бывшем Советском Союзе, начиная с 1980 года, был налажен серийных выпуск установок, предназначенных для реализации процессов нанесения покрытий электродуговым испарением. На рис. 4.12 представлены фотографии двух наиболее распространенных отечественных установок - ННВ6.6-И1 и «Булат-6». Установки в основном отличаются габаритными размерами, схемой размещения режущего инструмента в камере, количеством испарителей и др. Кроме того, в некоторых конструкциях установок анодом является режущий инструмент, а в других – металлический корпус вакуумной камеры.

Отечественные разработки в области электродугового нанесения покрытий прошлых лет вызвали огромный интерес во всем мире. В качестве примера можно привести тот факт, что в 1980 году американская фирма Multi-Arc Vacuum System купила у СССР лицензию на технологию и установку

«Булат» и на их базе наладила серийный выпуск установок моделей PVD 20 (рис. 4.13, а).

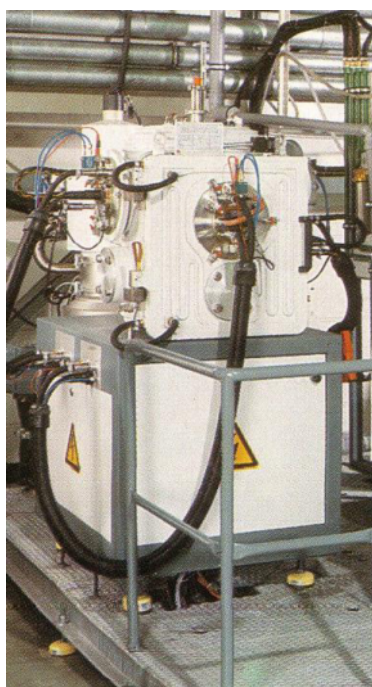


а)



б)

Рис. 4.12. Общий вид установок для электродугового осаждения покрытий, выпускавшихся в СССР: ННВ6.6-И1 (а) и «Булат-6» (б)



а)



б)

Рис. 4.13. Общий вид установок, выпускавшихся Multi-Arc Vacuum System (США): PVD 20 (а) и с 6 испарителями для нанесения покрытий на длинномерные инструменты (б).

Для нанесения покрытий на длинномерные и крупногабаритные инструменты (протяжки, прошивки и др.) применяются установки с высотой рабочей камеры от 1000 мм и более. На рис. 4.13, б представлена одна из таких установок, ранее выпускавшаяся фирмой Multi-Arc Vacuum System.

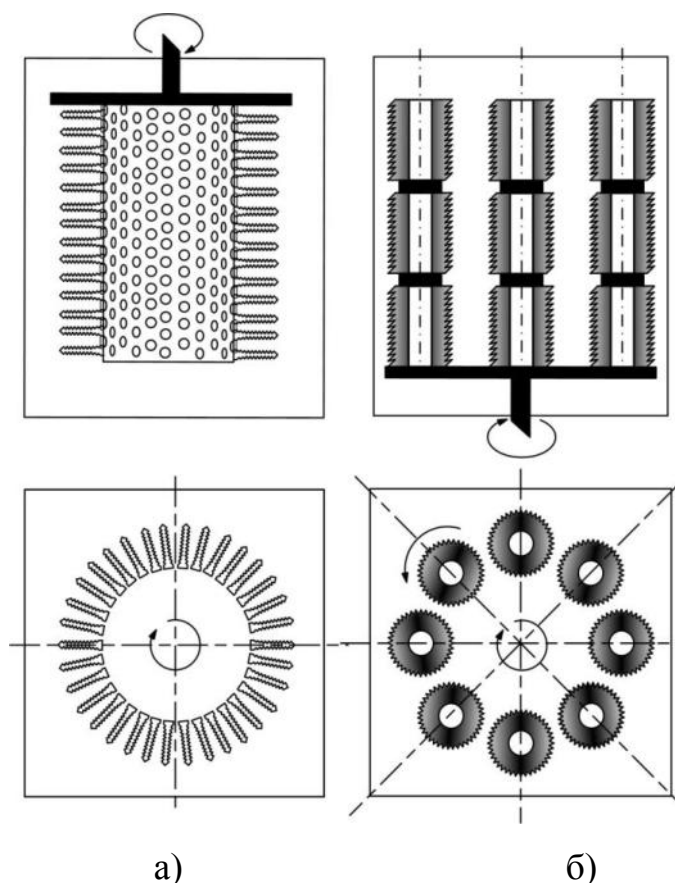


Рис. 4.14. Варианты расположения партии мелкогабаритного (а) и крупногабаритного (б) инструмента в вакуумной камере установки

В зависимости от типоразмера инструмента, используются различные схемы его размещения в вакуумной камере установки в процессе нанесения покрытия (рис. 4.14). Например, для закрепления мелкогабаритного инструмента может использоваться многоместное приспособление, располагаемое на поворотном устройстве (рис. 4.14, а). В зависимости от конфигурации изделий нанесение на них покрытий осуществляется без вращения, с осевым планетарным вращением и т.д. Для равномерного нанесения покрытий на партию крупногабаритного инструмента

(крупномодульные червячные фрезы и др.) на многих установках предусмотрена система планетарного вращения (рис. 4.14, б).

Эксплуатационные свойства режущего инструмента с покрытием, полученным электродуговым испарением, также как ионно-термическим испарением или ионным распылением сильно зависят от условий нанесения покрытий (входных факторов). Например, применительно к электродуговому испарению, определяющими факторами являются – давление реакционного газа, температура конденсации покрытия, продолжительность процесса нанесения покрытия, напряжение смещения на инструменте и ток дуги на катоде.

В зависимости от требуемого состава и физико-механических свойств покрытия его нанесение может осуществляться по различным технологиям с использованием катодов из чистых сплавов (раздельные катоды), из их сплавов или составных катодов. Рассмотрим технологические возможности методов физического осаждения покрытий на примере метода КИБ.

Нанесение покрытий в комбинированном температурном режиме. Одним из основных факторов, определяющих работоспособность режущего инструмента с покрытием, являются условия теплового режима. Уменьшение температуры конденсации вызывает рост сжимающих остаточных напряжений, повышение микротвердости и снижение прочности его сцепления с инструментальной основой (табл. 4.2).

4.2. Влияние температуры конденсации на механические свойства покрытия нитрида титана

Температура конденсации $T_k, ^\circ\text{C}$	Механические свойства	
	Микротвердость $H_\mu, \text{ГПа}$	Коэффициент отслоения K_0
350	$27,0 \pm 2,2$	$2,4 \pm 0,1$
450	$25,2 \pm 2,0$	$1,5 \pm 0,1$
550	$23,2 \pm 0,7$	$1,1 \pm 0,1$

Для эффективного использования высокой микротвердости материала покрытия, полученного при низких температурах конденсации, необходимо обеспечить его достаточную прочность сцепления с инструментальной основой, которая при низких температурах невысока. Для реализации вышесказанного положения нанесение проводят в два этапа: внутренний слой покрытия для обеспечения высокой прочности сцепления с инструментальной основой наносят при высокой температуре, а последующее нанесение покрытия производят при возможно низкой температуре, обеспечивая при этом высокую микротвердость и износостойкость поверхностного слоя покрытия.

Покрытия, нанесенные в комбинированном температурном режиме, имеют при таких температурах более высокую прочность сцепления с инструментальной основой и трещиностойкость, что способствует повышению периода стойкости режущего инструмента в 1,5 – 2 раза по сравнению с аналогичными покрытиями, полученными по традиционной температуре.

Нанесение многоэлементных покрытий. Компоновочная схема установки для нанесения двухэлементных износостойких покрытий на основе нитрида титана представлена на рис. 4.15.

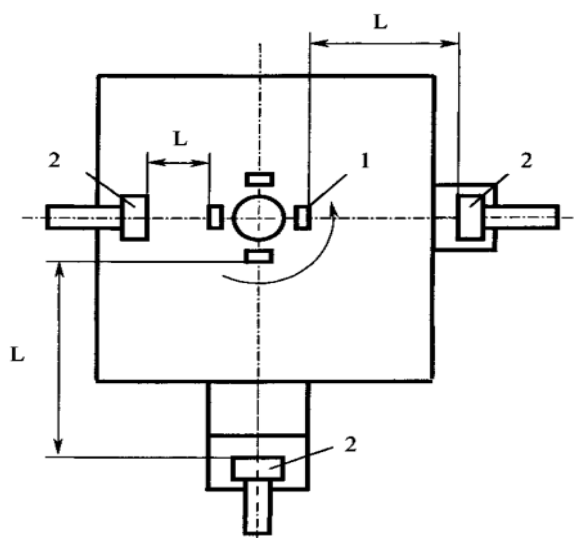


Рис. 4.15. Компоновочная схема установки для нанесения двухэлементных покрытий TiMeN:

1 – корпус, 2 – стол с режущими инструментами, 3 – катоды из титана, 4 – катод из Me1, L – расстояние от катода до режущего инструмента

Нанесение многоэлементных нитридных покрытий осуществляется с использованием отдельных (1, рис. 4.19) или составных (2, рис. 4.19) катодов с подачей в камеру установки азота.

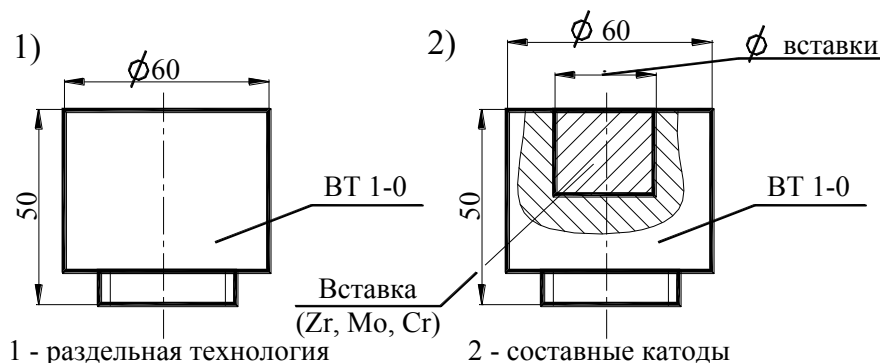


Рис. 4.19. Конструкции катодов

Раздельные (цельные) катоды изготавливаются из сплавов титана, циркония, хрома и других материалов, которые могут использоваться в качестве элементов покрытия. Составной катод имеет корпус, в который закреплена вставка из другого материала (например, в корпус из титанового сплава запрессовывается вставка из циркония, хрома, ниобия и др.).

Двухэлементные покрытия, нанесенные из отдельных катодов, являются двухфазными. В них одновременно присутствуют две ГЦК фазы, близкие по составу соответственно нитриду титана и нитриду второго элемента покрытия. Планетарное перемещение режущего инструмента в камере установки относительно катодов приводит к образованию за один оборот стола установки мультислойной структуры с чередованием мультислоев отдельных фаз покрытия TiN и MeN , разделенных друг от друга переходными мультислоями переменного состава $Ti_xMe_{1-x}N$. Наличие мультислойной структуры способствует повышению механических свойств и прочности адгезии покрытия с инструментальной основой.

При использовании составных катодов получаемые двухэлементные нитридные покрытия являются однофазными, а за один оборот стола установки получается однородная структура. Такие покрытия имеют меньшую

микротвердость и прочность адгезии с инструментальной основой по сравнению с аналогичными покрытиями, полученными с использованием отдельных катодов. Различия в механических свойствах двухэлементных нитридных покрытий, полученных из отдельных и составных катодов, объясняется действием различных механизмов упрочнения материала покрытий. Меньшая микротвердость и прочность адгезии с инструментальной основой покрытий, полученных из составных катодов, являются причиной большей интенсивности изнашивания режущего инструмента с такими покрытиями по сравнению с аналогичными покрытиями, нанесенными с использованием отдельных катодов

При нанесении двухэлементных покрытий появляется возможность целенаправленно подбирать их механические свойства (микротвердость, модуль упругости, вязкость разрушения, прочность адгезии, трещиностойкость и др.) путем изменения компоновки установки – расположения катодов относительно друг друга, их количества, расстояния от катодов до режущего инструмента).

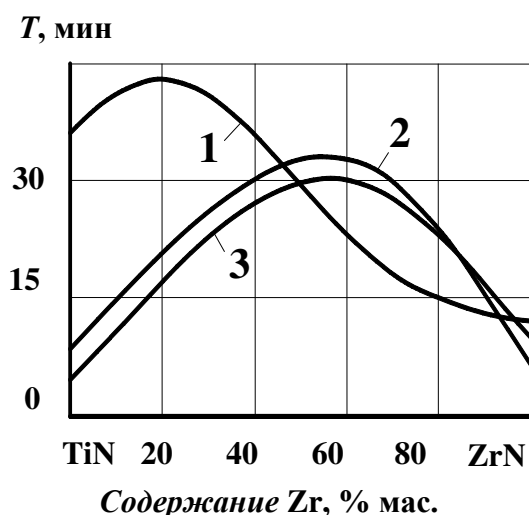


Рис.4.16. Влияние состава покрытия (Ti, Zr)N на период T стойкости пластин ВК6 при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 (1) и сталей 30ХГСА (2), 12Х18Н10Т (3):
 1 – $V=40^{\text{м}}/\text{мин}$, $S=0,15^{\text{мм}}/\text{об}$, $t=0,5\text{мм}$;
 2 – $V=200^{\text{м}}/\text{мин}$, $S=0,3^{\text{мм}}/\text{об}$; $t=1,0\text{мм}$;
 3 – $V=160^{\text{м}}/\text{мин}$, $S=0,15^{\text{мм}}/\text{об}$, $t=0,5\text{мм}$

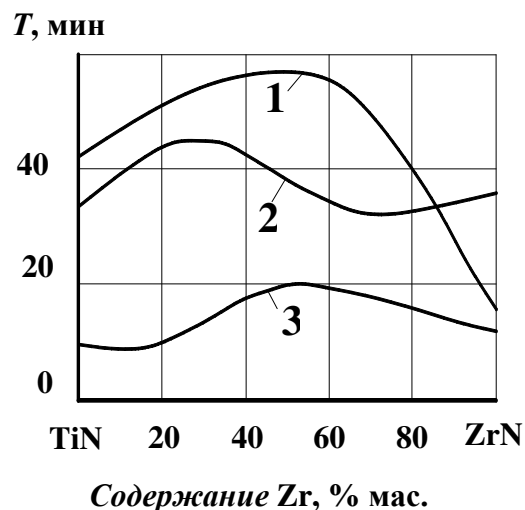


Рис. 4.17. Влияние состава покрытия (Ti, Zr)N на период T стойкости пластин Р6М5 при обработке заготовок из сталей 40Х (1), 12Х18Н10Т (2) и титанового сплава ВТ22 (3):
 $S=0,3^{\text{мм}}/\text{об}$, $t=1,0\text{мм}$; 1 – $V=75^{\text{м}}/\text{мин}$,
 2 – $V=10^{\text{м}}/\text{мин}$, 3 – $V=28^{\text{м}}/\text{мин}$

Как видно из рис.4.16 и 4.17, для двухэлементных покрытий имеет место оптимальное содержание элементов, обеспечивающее максимальное повышение работоспособности режущих пластин при обработке заготовок из различных материалов.

Применение двухэлементных нитридных покрытий повышает период стойкости твердосплавных пластин при обработке заготовок из конструкционной стали в 1,5 – 4 раза по сравнению с одноэлементными покрытиями.

Механические свойства двухэлементных покрытий могут быть повышены путем их легирования. Получаемое покрытие ($TiMe_1Me_2N$, где Me_1 и Me_2 – легирующие элементы) может быть нанесено с использованием составных катодов. Технологическая компоновочная схема установки для нанесения таких покрытий показана на рис. 4.18, а.

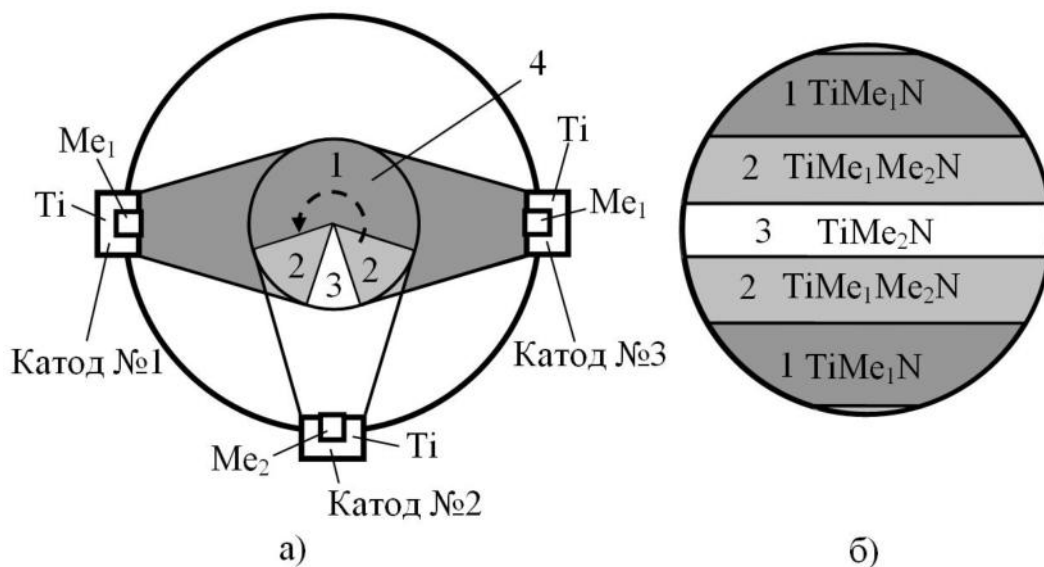


Рис. 4.18. Компоновочная схема (а) и строение (б) слоя трехэлементного покрытия за один оборот стола установки

Покрытие наносится с помощью трех составных катодов, два из которых с легирующим элементом Me_1 расположены напротив друг друга, а третий с легирующим элементом Me_2 находится между ними. Как видно из рис. 4.18, б, в данном случае за один оборот стола установки также будет образовываться

мультислойная структура как и в случае нанесения двухэлементных покрытий из отдельных катодов: мультислои нитрида титана, легированные элементами Me_1 и Me_2 (соответственно $(Ti, Me_1)N$ и $(Ti, Me_2)N$), чередуются с мультислоями нитрида титана, легированного одновременно элементами Me_1 и Me_2 $(Ti, Me_1, Me_2)N$, состав которых может быть различен в зависимости от компоновочной схемы установки. Таким образом, при нанесении трехэлементных покрытий с использованием составных катодов также действуют два механизма упрочнения материала покрытия – твердорастворный и упрочнение микроструктурными барьерами, что вызывает повышение механических свойств покрытия $TiMe_1Me_2N$ по сравнению с двухэлементными нитридными покрытиями $TiMe_1N$. (табл. 4.3).

4.3. Влияние состава многоэлементных покрытий на механические свойства

п/п	Покр ытие	E, ГПа	НМ, ГПа	σ_T , ГПа	K_{ICP} , $MPa \cdot m^{1/2}$
	2	3	4	5	6
	TiAlN	369	41,40	12,26	14,77
	TiAlZrN	419	49,31	14,29	15,72
	TiAlSiN	442	50,56	14,59	16,92
	TiSiN	350	37,39	11,17	14,46
1	TiSiAlN	418	46,54	13,57	16,29
2	TiSiZrN	403	44,64	13,09	15,53
3	TiZrN	379	41,91	12,38	14,44
7	TiZrAlN	428	50,03	14,47	16,18
8	TiZrSiN	423	47,87	13,91	15,79

Варьируя содержание легирующего элемента в двухэлементном покрытии можно направленно изменять его параметры структуры и

механические свойства. Легирование покрытий TiMe_1N железом и алюминием повышает прочность их сцепления с инструментальной основой о чем свидетельствует снижение коэффициента отслоения K_0 , все остальные легирующие элементы повышают его величину. Введение легирующих элементов в покрытие TiMe_1N ведет к росту его механических свойств. Так, например, увеличение содержания кремния в покрытии TiZrSiN повышает

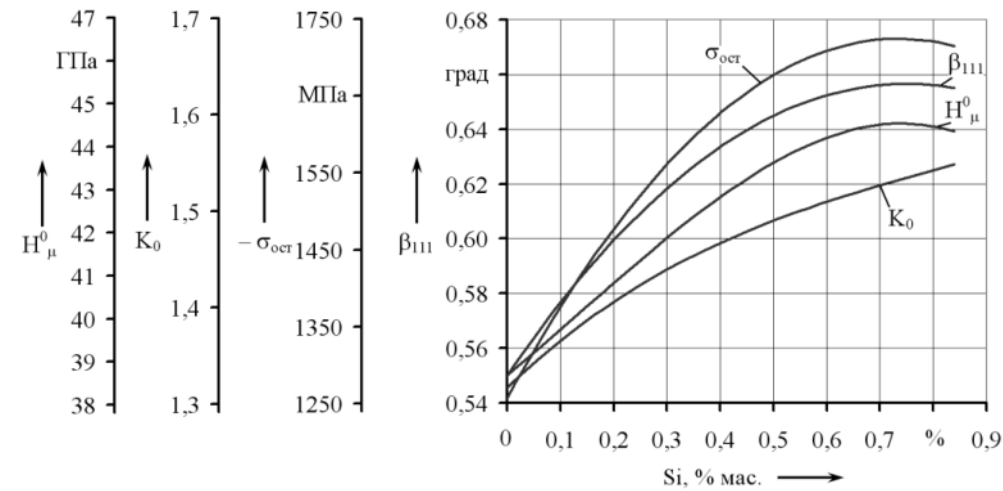


Рис. 4.20. Влияние содержания второго легирующего элемента (Si) на полуширину рентгеновской линии β_{111} , остаточные сжимающие напряжения $\sigma_{\text{ост}}$, микротвердость H_μ и коэффициент отслоения K_0 покрытия TiZrSiN

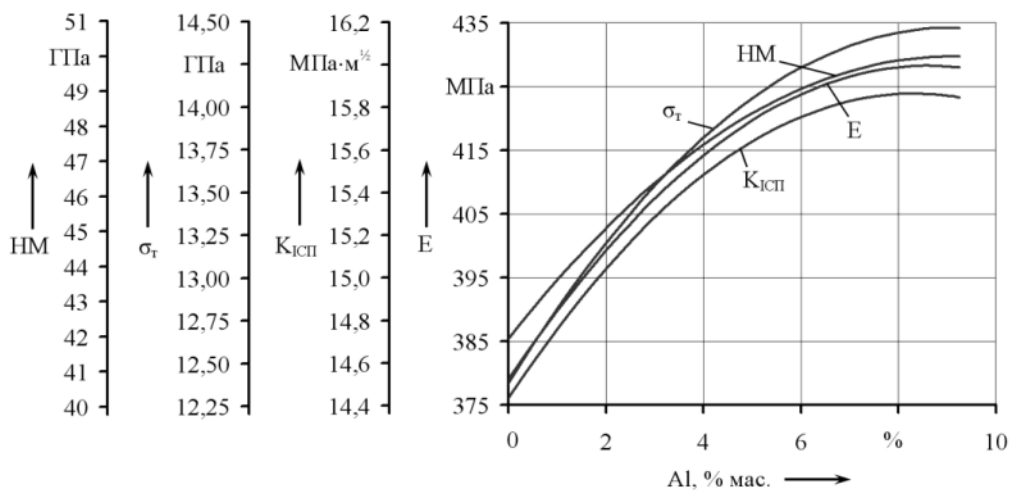


Рис. 4.21. Влияние содержания второго легирующего элемента (Al) на модуль Юнга E , твердость по Мейеру HM , предел текучести σ_t и вязкость разрушения $K_{\text{ИСП}}$ покрытия TiZrAlN

полуширину рентгеновской линии, свидетельствующей о микродеформации кристаллической решетки покрытия, величину остаточных сжимающих напряжений, микротвердость, но снижает прочность адгезии покрытия с инструментальной основой (повышает коэффициент отслоения покрытия) (рис. 4.20). Аналогично повышение алюминия в покрытии TiZrAlN вызывает рост модуля Юнга, твердости по Майеру, предела текучести и вязкости разрушения покрытия (рис. 4.21).

При нанесении карбонитридных покрытий в качестве реакционного газа используется смесь азота и ацетилена. Карбонитридные покрытия имеют более высокие механические свойства по сравнению с нитридными покрытиями. Максимальная микротвердость одноэлементных карбонитридных покрытий TiCN наблюдается при содержании ацетилена 25...35 % в составе реакционного газа (рис. 4.22, а).

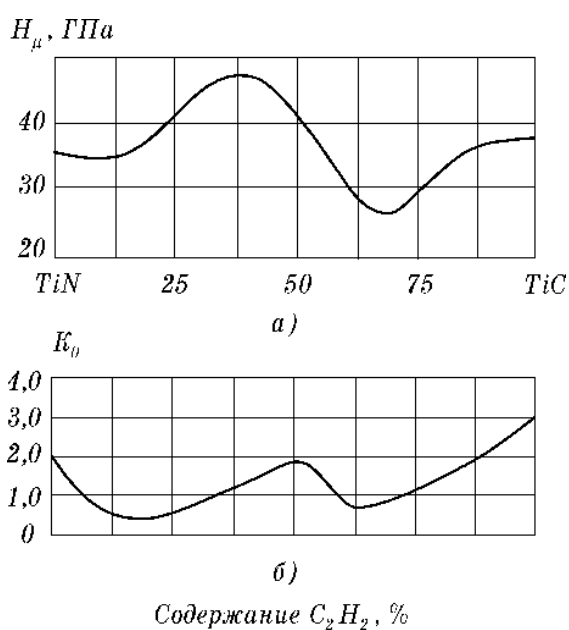


Рис. 4.22. Влияние содержания ацетилена в составе реакционного газа на микротвердость H_μ (а) и коэффициент отслоения K_0 (б) покрытия TiCN

Прочность адгезии данных покрытий повышается при снижении их микротвердости. Повышение содержания ацетилена до 10...15 % несколько повышает прочность адгезии, что отражается в снижении коэффициента K_0 ,

затем прочность адгезии снижается с ростом микротвердости и наибольшее значение коэффициента отслоения наблюдается при содержании C_2H_2 40 %. Дальнейшее повышение ацетилена до 50 % ведет к снижению коэффициента отслоения, а затем наблюдается его рост (рис. 4.22, б).

Двухэлементные покрытия на основе карбонитрида титана, полученные из отдельных катодов, являются двухфазными. По аналогии с двухэлементными нитридными покрытиями в них присутствуют две фазы, близкие по своему составу соответственно к карбонитриду титана и карбонитриду второго элемента. Например, покрытие $TiZrCN$ за один оборот стола установки также имеет мультислойную структуру, состоящую из чередующихся слоев карбонитридов $TiCN$ и $ZrCN$ разделенных мультислоем переменного состава $Ti_xZr_{1-x}C_yN_z$. Содержание ацетилена в покрытии, как видно из рис. 4.22, влияет на его механические свойства и, следовательно, изменяя его содержание в составе реакционной смеси можно направленно подбирать необходимые свойства покрытия.

Режущие свойства инструмента с карбонитридными покрытиями существенно зависят от содержания ацетилена в составе реакционного газа. При этом для одного и того же покрытия оптимальное содержание ацетилена различно при обработке различных обрабатываемых материалов (рис. 4.23).

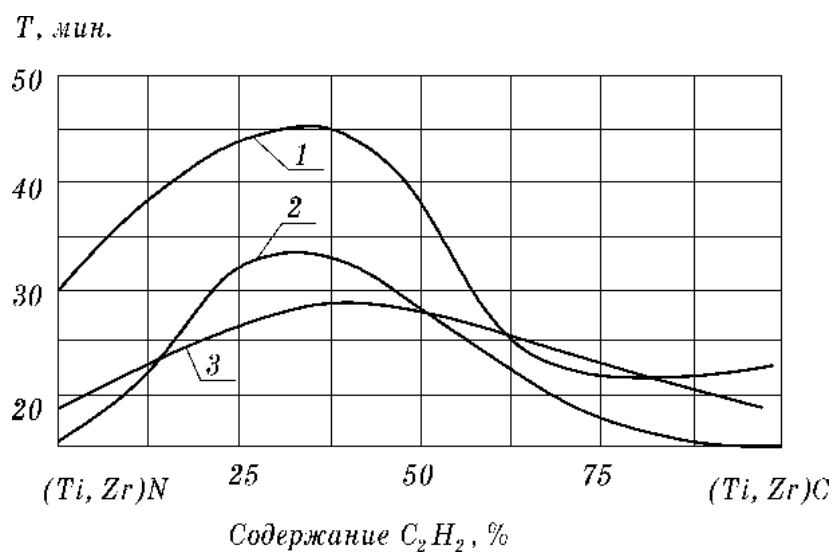


Рис. 4.23. Влияние содержания ацетилена в покрытии $(Ti, Zr)CN$ на период

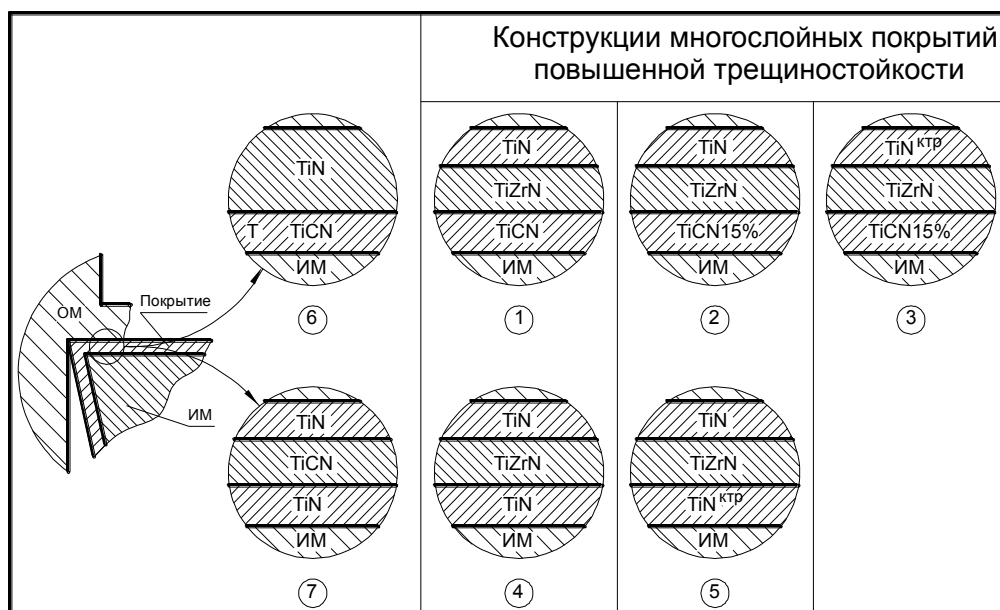
стойкости пластин ВК6 при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 (1) и сталей 12Х18Н10Т (2), 30ХГСА (3):

$1 - V = 60^M/\text{мин}$, $2 - V = 140^M/\text{мин}$, $3 - V = 180^M/\text{мин}$; $S = 0,15^{\text{мм}}/\text{об}$, $t = 0,15\text{мм}$

По сравнению с аналогичными по составу нитридными покрытиями применение карбонитридных покрытий повышает период стойкости режущего инструмента в 1,4 – 2,4 раза в зависимости от состава покрытия и условий обработки.

Как уже отмечалось выше, в настоящее время производители режущих инструментов используют новое поколение износостойких покрытий на основе многослойной архитектуры, которая в наибольшей степени отвечает требованиям, предъявляемым к износостойким покрытиям. Многослойное покрытие содержит несколько слоев, каждый из которых имеет собственное функциональное назначение. Повысить эффективность многослойных покрытий можно за счет направленного выбора механических свойств отдельных его слоев и его архитектуры.

Схемы конструкций многослойных покрытий, предназначенных для условий непрерывного и прерывистого резания, представлены на рис 4.24 (нарисовать новый рисунок).



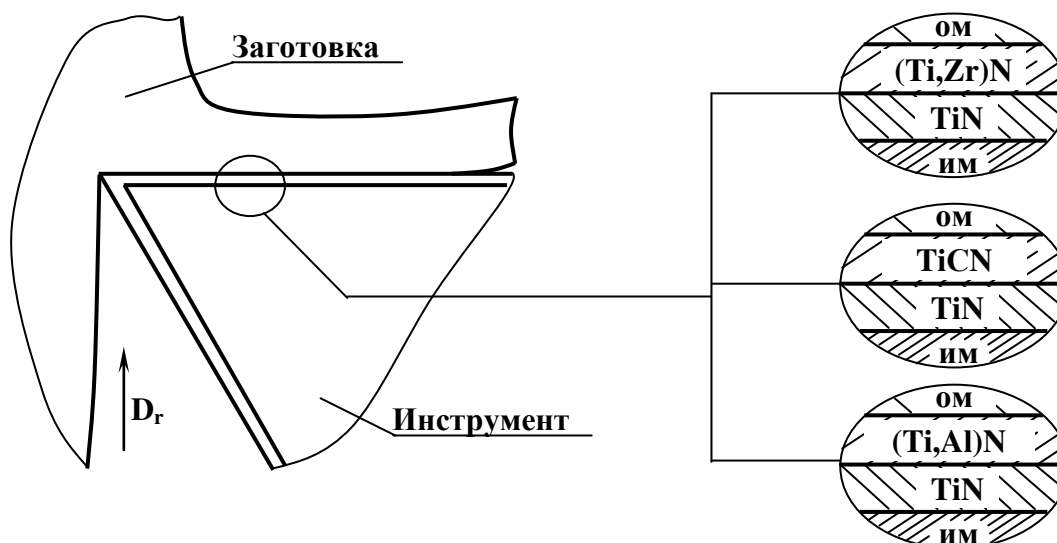


Рис. 4.24. Схемы конструкций многослойных покрытий для условий непрерывного (а) и прерывистого (б) резания

Многослойные покрытия по сравнению с однослойными имеют более высокие механические свойства и прочность адгезии с инструментальной основой. Изменяя конструкцию многослойного покрытия (толщину отдельных слоев и толщиной покрытия в целом) можно управлять параметрами структуры и механическими свойствами. Например, для многослойных покрытий TiN-TiCN и TiN-TiZrN, предназначенных для работы в условиях непрерывного резания, увеличение толщины верхнего слоя ведет к росту микротвердости, а прочность сцепления покрытий с инструментальной основой определяется толщиной нижнего слоя TiN (рис. 4. 25).

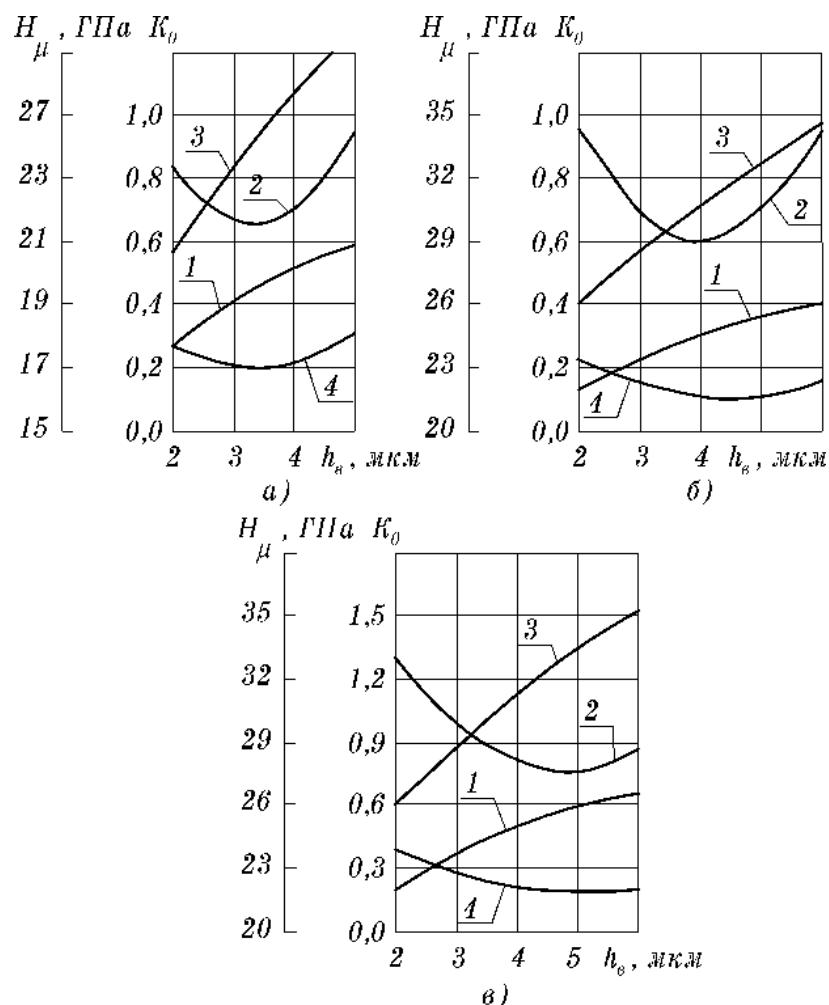


Рис. 4.25. Влияние толщины верхнего слоя на микротвердость H_μ (1, 3) и коэффициент отсоединения K_0 (2, 4) многослойных покрытий TiN-TiCN (1, 2) и TiN-TiZrN (3, 4) общей толщиной 6 мкм (а), 8 мкм (б) и 10 мкм (в)

Применение многослойных покрытий по сравнению с однослойными повышает период стойкости режущего инструмента при обработке заготовок из конструкционных сталей в 1,5 – 4,0 раза в зависимости от конструкции покрытия и свойств обрабатываемого материала.

Эффективность многослойных покрытий можно повысить за счет направленного выбора механических свойств отдельных его слоев и его архитектуры.

Например, нанесение в двухслойном покрытии TiCN-TiN промежуточного слоя TiZrN, имеющего высокую трещиностойкость благодаря мультислойной структуре, снижает интенсивность трещинообразования в покрытии. На фотографиях контактных площадок на передней поверхности

(рис. 4.26), видно, что для покрытия TiCN-TiZrN-TiN характерно меньшее количество трещин в покрытии и меньшая площадь его разрушения по сравнению с TiCN-TiN за одно и то же время работы инструмента.



Рис. 4.26. Фотографии контактных площадок режущего инструмента с многослойными покрытиями:

$V = 247$ м/мин, $S_z = 0,4$ мм/зуб, $B = 20$ мм, $t = 1,5$ мм, $\tau = 25$ мин; *a* - TiCN-TiN, *б* - TiCN-(Ti,Zr)N-TiN

Высокие остаточные сжимающие напряжения, возникающие в износостойких покрытиях после нанесения их на режущий инструмент, способствуют снижению интенсивности процессов их разрушения в процессе резания. С другой стороны, наличие перепада напряжений на границе покрытия с инструментальной основой отрицательно сказывается на прочности их сцепления. Снизить перепад напряжений и, следовательно, повысить прочность адгезионной связи износостойкого покрытия с основой инструмента можно за счет нанесения между ними переходных адгезионных слоев. Более высокая прочность сцепления может быть получена при нанесении переходных слоев, в состав которых входят элементы покрытия и инструментальной основы. Применительно к быстрорежущей инструментальной основе такими элементами могут быть кобальт, вольфрам, титан, тантал, железо, ванадий, хром, молибден.

В качестве переходных адгезионных слоев могут быть использованы чистые металлы, нитриды данных металлов или их сочетание.

Схемы конструкции многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями и верхним слоем из нитрида титана TiN и нитрида TiZrN представлены на рис. 4.27.

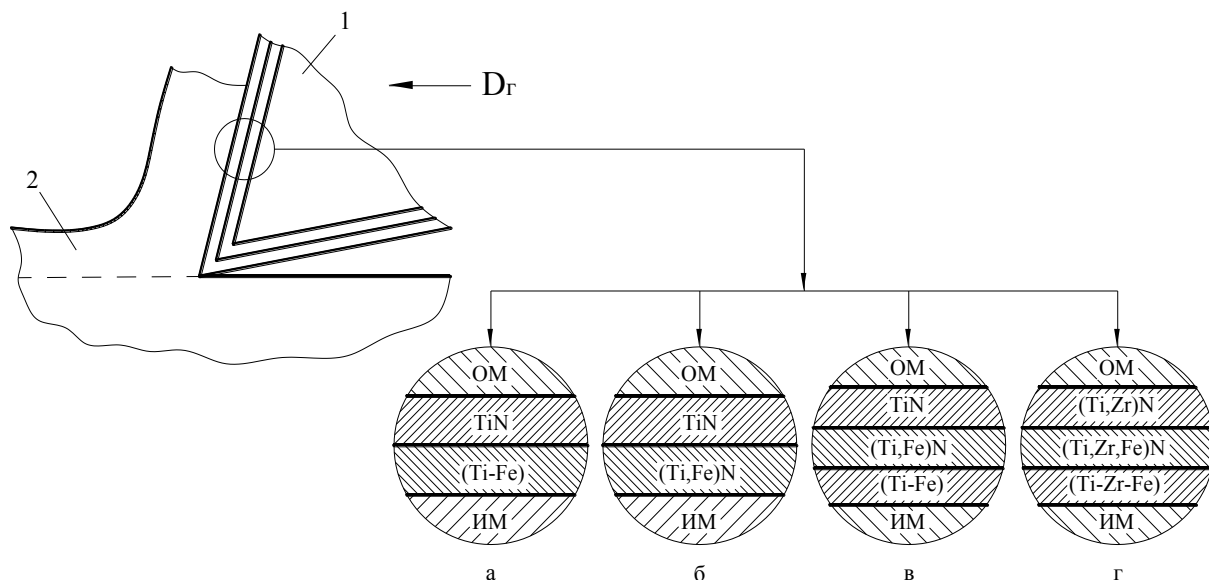


Рис. 4.27. Схемы конструкций покрытий с переходными адгезионными слоями:
1 - режущий инструмент, 2 – заготовка

Изменяя конструкцию многослойного покрытия с переходными адгезионными слоями можно направленно подбирать необходимые свойства покрытия, обеспечивающие наибольшее снижение интенсивности износа режущего инструмента. Нанесение переходных адгезионных слоев вызывает снижение остаточных напряжений в покрытии и повышение прочности адгезии с инструментальной основой. Кроме того, нанесение переходных слоев на основе многоэлементных нитридов и наличие в покрытии дополнительных границ, повышает их механические свойства.

Применение многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями существенно повышает период стойкости быстрорежущего инструмента по сравнению с однослойными покрытиями.

4.4.3. Осаждение распылением. Методы ионного (катодного) распыления основаны на явлении распыления материала компактной мишени в форме диска или штабика. Мишень может изготавливаться различными способами – механической обработкой, литьем или порошковой металлургией. Покрытие образуется в результате конденсации на поверхности обрабатываемого инструмента главным образом нейтральных частиц (атомов), выбиваемых из мишени бомбардировкой ее поверхности ионами инертного газа. При этом распыляемая мишень и обрабатываемый инструмент помещаются оппозитно друг другу в вакуумной камере. Направленный поток ионов инертного газа обычно образуется в результате зажигания тлеющего разряда между мишенью, которая в данном случае является катодом, и стенками металлической заземленной вакуумной камеры. Выбиваемые ионами инертного газа из мишени атомы, разлетаются в разные стороны с энергией, по меньшей мере, на порядок более высокой, чем энергия частиц, образующихся при испарении в термовакuumных методах. Использование мишени в качестве катода и обусловило использование термина «катодное распыление».

При ионном распылении мишень находится при относительно низкой температуре, а ее материал как бы послойно переносится на подложку, что обеспечивает малое нарушение его исходного состава. Если же в рабочий газ добавлять реакционноспособные газы, то на подложках можно синтезировать и химические соединения.

Ионное распыление проводят при сравнительно высоком давлении рабочего газа (10...100 Па – для диодных систем на постоянном токе и 0,1...1 Па – для триодных и высокочастотных систем). При таком давлении происходят многократные столкновения частиц распыляемого материала с молекулами среды, возникает обратное рассеяние и загрязнение пленок атомами рабочего газа. Поэтому в таких условиях невозможно достичь высокой скорости осаждения покрытий, а процесс не обеспечивает высокой чистоты пленок. Использование асимметричного распыления, распыления с

подачей напряжения смещения на подложку, геттерного распыления позволило получать пленки высокой чистоты, а применение магнетронных устройств – резко повысить скорости распыления.

Кроме высокой скорости распыления, магнетронные системы обладают рядом специфических особенностей, основной из которых является отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетичными вторичными электронами, являющимися первоисточниками нагрева подложек. В магнетронной распылительной системе вторичные электроны захватываются магнитной ловушкой и не бомбардируют подложку, что обеспечивает ей сравнительно низкую температуру. Это позволяет использовать эти системы для нанесения покрытий на подложки из материалов с низкой теплостойкостью.

Существует большое число разнообразных конструкций магнетронов, отличающихся способом создания магнитного поля (в некоторых случаях – его конфигураций), конструкцией катодного узла и геометрией мишени. На практике используются три базовые конструкции магнетрона – цилиндрическая (с цилиндрическим катодом), планарная (с плоским катодом) и с кольцевым конусообразным катодом, которую иногда считают разновидностью цилиндрической.

В цилиндрических (коаксиальных) магнетронных системах катод из распыляемого материала выполняется в виде трубы. Магнитная система устанавливается либо внутри трубы (рис. 4.28, а – при этом распыляется внешняя поверхность катода), либо снаружи (рис. 4.28, б – распыляется внутренняя поверхность катода). Плазма локализуется у распыляемой поверхности катода с помощью кольцевого арочного магнитного поля. Подложки располагаются вокруг катода (при внешнем распылении) или внутри вдоль его оси (при внутреннем распылении), причем в последнем случае достигается более высокий коэффициент использования материала мишени. Для приведенных систем характерна достаточно высокая равномерность наносимых покрытий. Магнетронная система с коническим катодом также

Дальнейшее развитие магнетронных распылительных систем привело к созданию планарных систем. Планарные магнетронные системы позволяют создавать в области распыления еще более высокие плотности тока и достигать

скоростей осаждения, сравнимых со скоростями, характерными для методов термического испарения в высоком вакууме. В то же время недостатком такой системы является то, что распылению подвергается узкая кольцеобразная область мишени и коэффициент использования материала составляет не более 26% объема мишени.

4.4.4. Осаждение в сопровождении пучка ускоренных частиц.
Технологии осаждения покрытий с ассистированием (сопровождением) пучком ускоренных частиц, за рубежом получившие название «Ion beam assisted deposition», сегодня являются одними из наиболее перспективных и бурно развивающихся направлений. Ассистирование пучком при конденсации покрытия обеспечивает поддержание высокой подвижности поверхностных атомов, что способствует формированию покрытия более плотной структуры. Изменение кинетической энергии ассистирующих ионов позволяет управлять микротвердостью, остаточными напряжениями и другими характеристиками формируемого покрытия.

Принципы, которые используются для осаждения покрытий с ассистированием пучком, в основном заключаются в том, что на подложку из отдельных источников поступает металлический пар и ускоренные частицы. Схема осаждения покрытий магнетронным распылением и электронно-лучевым испарением в сопровождении ионным пучком представлена на рис. 4.29.

Изменяя плотность тока и энергию ионов, сопровождающих осаждение покрытия, можно не только регулировать микротвердость и плотность покрытия, но и модифицировать его структуру, стехиометрию, а также в широком диапазоне регулировать остаточные напряжения.

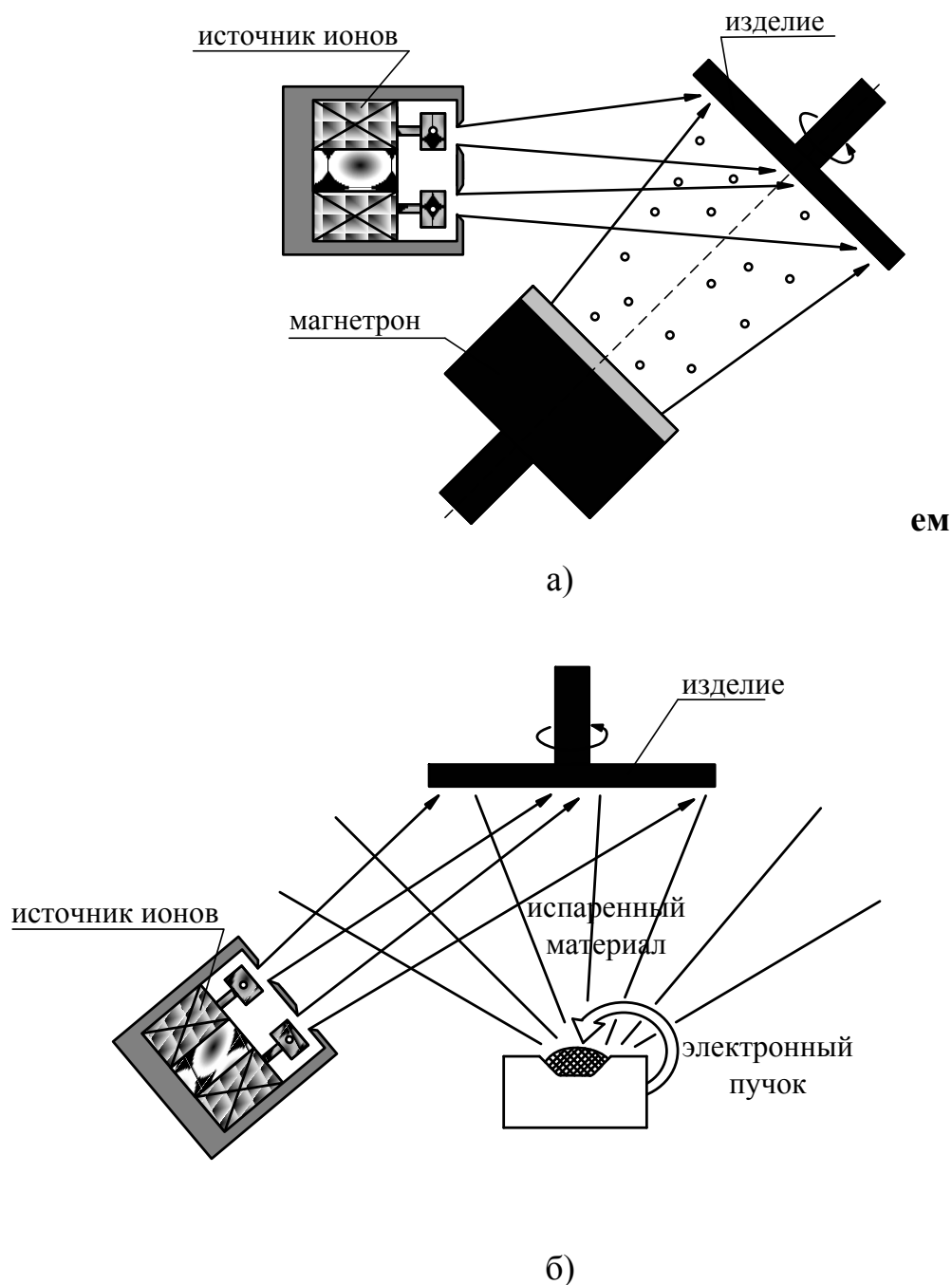


Рис. 4.29. Принципиальная схема осаждения покрытий магнетронным распылением (а) и электронно-лучевым испарением (б) в сопровождении ионным пучком

Доказательством того, что бомбардировка осаждаемого покрытия ионами высокой энергии может кардинально улучшить его характеристики, могут являться результаты зарубежных исследований.

В первом случае покрытие из нитрида титана осаждалось на подложки из нержавеющей и быстрорежущей сталей с использованием магнетронного

распыления титановой мишени в смеси аргона и азота и постоянном отрицательном напряжении смещения на подложке 100–200 В и температуре 330 °С. Получаемое в этом случае покрытие имело микротвердость 22...26 ГПа. При этом между подложкой и покрытием наблюдался переходный слой из титана толщиной около 1 мкм (рис. 4.30, а).

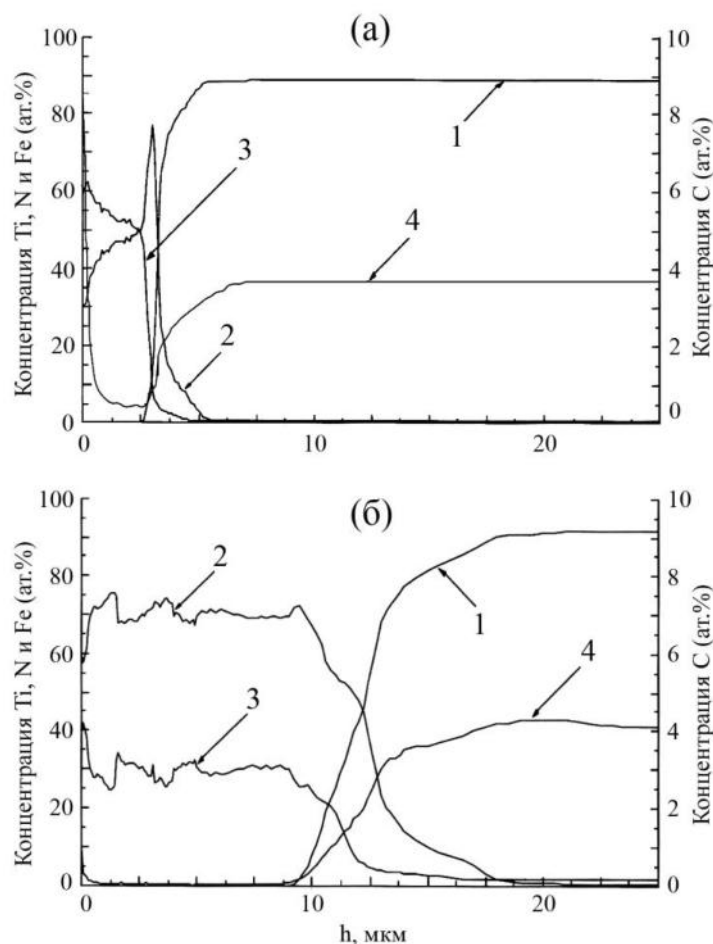


Рис. 4.30. Распределение атомов железа (1), титана (2), азота (3) и углерода (4) по глубине подложки от поверхности покрытия:
а – осаждение при постоянном напряжении смещения подложки 100 – 200 В,
б – осаждение при подаче на подложку импульсов напряжения амплитудой 30 – 50 кВ с частотой 25 Гц

Во втором случае вместо постоянного напряжения смещения на подложку подавались импульсы напряжения отрицательной полярности длительностью 20 мкс и амплитудой в 30 – 50 кВ, следовавшие друг за другом с частотой 25 Гц. В результате за то же время и при той же температуре подложки на нее осаждалось покрытие (рис. 4.30, б) с микротвердостью 45...55

ГПа и толщиной в 2..3 раза превышающей соответствующий показатель для покрытия, формируемого в предыдущем случае. Вместо переходного слоя из титана между подложкой и Ti_2N покрытием наблюдается интерфейс шириной 5...6 мкм с плавным и монотонным снижением концентраций железа, углерода и монотонным ростом концентраций титана и азота. При этом во втором случае скорость осаждения покрытия примерно в 4 раза выше.

4.5. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровтий

В настоящее время особый интерес во всем мире вызывают исследования, связанные с получением нанопокровтий с размерами зерен менее 100 нм, позволяющее реализовать в одном покрытии уникальный комплекс свойств. Впервые концепция наноматериалов была отчетливо сформулирована Г. Глейтером, который ввел в научный оборот термин «нанокристаллические материалы», а затем «наноструктурные», «нанофазные», «нанокомпозитные» и т.д.

Механическими свойствами наноматериалов можно варьировать в широких пределах путем изменения формы и структуры входящих в них наночастиц, а также структуры и свойств границ их раздела. У наноматериала с уменьшением размеров частиц наблюдается рост теплоемкости и, как следствие, внутренней энергии и энтропии системы. Это означает, что у поверхности при увеличении внутренней энергии и повышении твердости может увеличиваться пластичность вследствие роста энтропийного фактора, в то время как в обычных материалах с увеличением твердости возрастает хрупкость.

Все без исключения материалы в виде тонкой пленки имеют характеристики, значительно отличающиеся от объемного (монолитного) материала, причем, чем тоньше покрытие, тем сильнее отличаются его

свойства. На рис. 4.31,а показана тенденция изменения предела прочности материала от толщины пленки. Такая тенденция связана с тем, что в процессе формирования тонкая пленка сначала не сплошная, а состоит из отдельных островков, которые затем увеличиваются, сливаются друг с другом вплоть до образования сплошного слоя. При этом изменяется и плотность формируемой пленки (рис. 4.77,б).

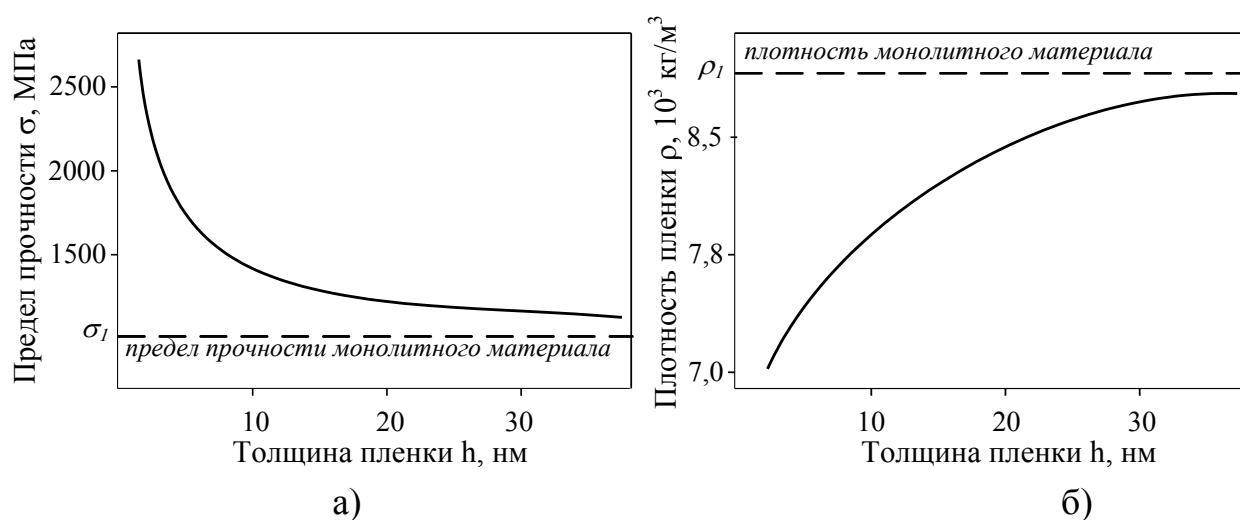


Рис. 4.31. Зависимости предела прочности σ (а) и плотности ρ (б) пленки от ее толщины h .

За последние несколько лет работы в области создания наноматериалов получили значительное развитие. Было доказано, что роль поверхностей раздела между элементами структуры (нанозерна, нанокристаллиты, нанофазы и т.д.) наноматериала очень важна, но не всегда определяющая. Роль среднего размера элемента структуры наноматериала сегодня остается ключевой.

На рис. 4.32 представлена зависимость изменения микротвердости покрытия от среднего размера его зерна. Видно, что измельчение зеренной структуры материала покрытия сопровождается ростом твердости до некоторого критического среднего размера нанозерна (наноразмерный эффект). Снижение твердости при дальнейшем уменьшении среднего размера зерна в покрытии происходит из-за проскальзывания по межзеренным границам (ротационный эффект). В этом случае для дальнейшего повышения твердости

требуется затормозить процесс скольжения по межзеренным границам. Такое торможение может быть достигнуто за счет формирования соответствующей наноструктуры с упрочнением межзеренных границ. Эта проблема может быть решена синтезом многофазной (нанокомпозитной) структуры, которая имеет наноразмерные поверхности раздела с высокой когезионной прочностью. Развитие исследований в указанном направлении в скором времени сделает возможным синтез ультратвердых покрытий нового поколения – имеющих твердость до 100 ГПа в сочетании с достаточно высокой трещиностойкостью.

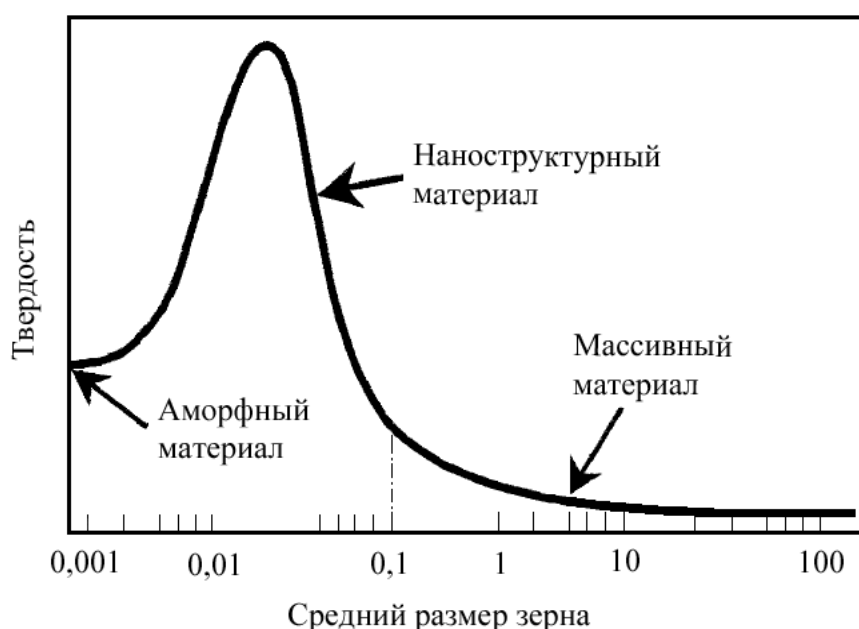


Рис. 4.32. Зависимость твердости материала от среднего размера зерна

На сегодняшний день в нашей стране и за рубежом для нанесения нанопокровов, используется 3 основных технологических подхода: осаждение покровов в условиях ионного ассистирования (данный подход уже был рассмотрен выше); осаждение многослойных покровов со слоями нанометрической толщины; осаждение многофазных покровов; комбинация перечисленных способов.

4.5.1. Осаждение нанопокровтий в условиях ионного ассистирования.

Процессы физического осаждения покровтий в сопровождении ионным пучком (ионно-стимулированное осаждение) сегодня являются наиболее простым средством для формирования нанопокровтий.

Ионная бомбардировка управляет механизмом роста конденсируемого покровтия при помощи энергии, поставляемой в плёнку ионами. Кинетическая энергия бомбардирующих ионов превращается в тепловую в очень малых объёмах, которые затем охлаждаются с крайне высокими скоростями. Ионная бомбардировка в процессе осаждения также увеличивает плотность центров зародышеобразования, подвижность атомов, уменьшает количество вакансий и пор, вводит тепловую энергию непосредственно в поверхностную зону, стимулируя реакции и диффузионные процессы. Это приводит к уменьшению размеров зёрен, способствует формированию нанокристаллических плёнок. Регулируя энергию и плотность потока бомбардирующих ионов можно регулировать размеры и ориентацию зёрен и, как следствие, управлять микротвёрдостью, плотностью, стехиометрией и остаточными напряжениями в покровтиях.

Примером влияния энергии ионов (определяемой потенциалом подложки) на размеры кристаллитов могут служить зависимости размеров кристаллитов TiCrN от потенциала подложки при осаждении этих покровтий электродуговым способом (рис. 4.33,а). Видно, что минимальные размеры кристаллитов находятся в пределах 8–10 нм при потенциале порядка 200 В (имеется ввиду отрицательный потенциал, ускоряющий положительные ионы к подложке). При дальнейшем повышении потенциала размеры кристаллитов несколько увеличиваются за счёт повышения температуры в зоне конденсации. При этом размеры кристаллитов покровтия, осаждённого на подложку из твёрдого сплава, несколько больше, чем на подложку из быстрорежущей стали.

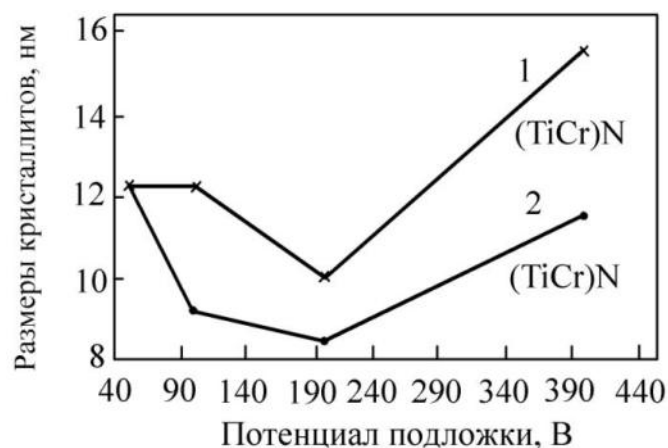


Рис. 4.33. Зависимости размеров кристаллитов покрытия TiCrN от потенциала подложки из твёрдого сплава (1) и быстрорежущей стали (2)

Влияние содержания азота на размеры кристаллитов в покрытиях из нитрида титана представлено на рис. 4.34. Видно, что их минимальные размеры (9 нм) достигаются при нестехиометрическом составе TiN_x ($x = 38 - 40 \%$). При минимальных размерах кристаллитов покрытие обладает минимальными остаточными напряжениями и максимальным сопротивлением эрозионному износу.

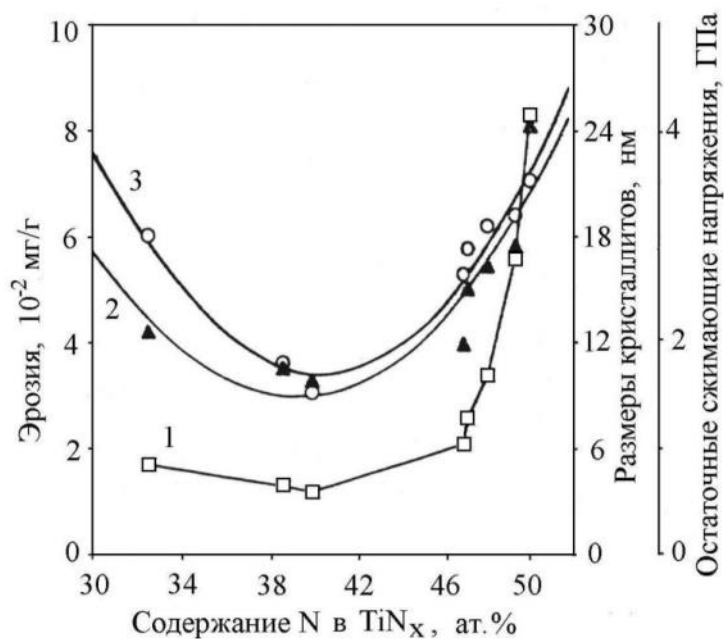


Рис. 4.34. Изменение эрозионного износа (1), остаточных напряжений (2) и размеров кристаллитов (3) в зависимости от содержания азота в покрытии TiN_x .

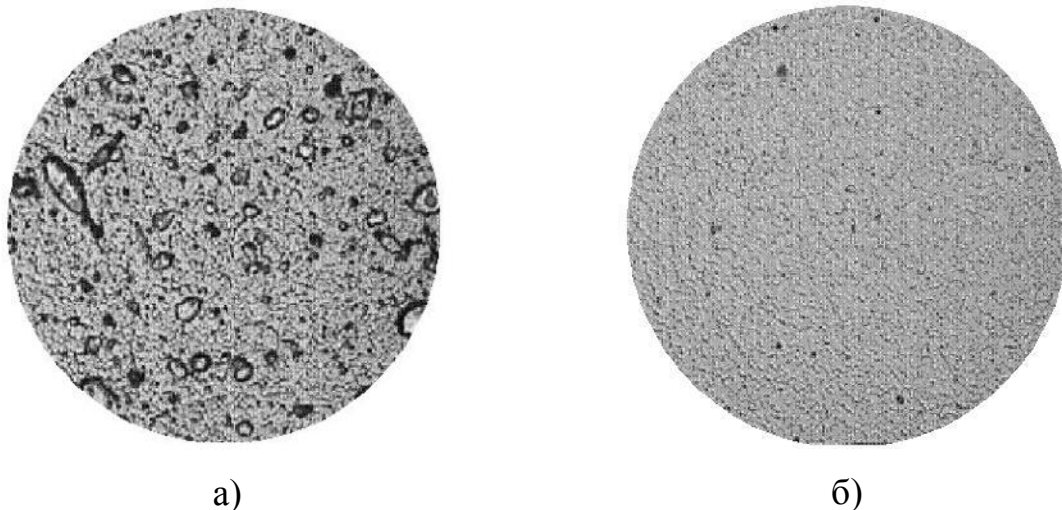


Рис. 4.35. Структура покрытий (TiAl)N при осаждении традиционным электродуговым способом (а) и в сопровождении ионным пучком (б).

Таким образом, на размеры кристаллитов влияют не только энергия ионов, но и состав покрытия, материал и температура подложки, давление, а также целый ряд других факторов. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо оптимизировать процесс осаждения в зависимости от конкретных условий эксплуатации инструмента с покрытием.

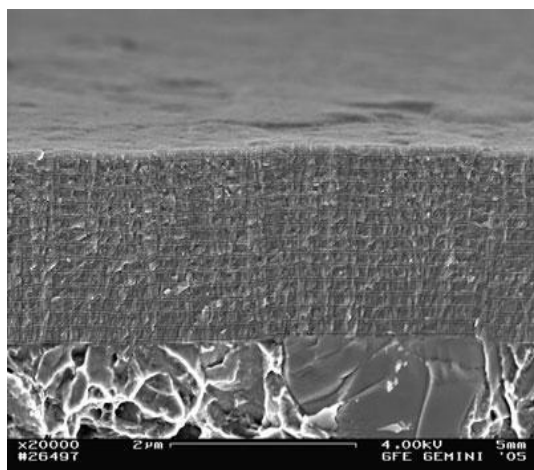
Для сравнения на рис. 4.35 приведены фотографии микроструктуры покрытий, полученных двумя различными методами – традиционным электродуговым испарением и осаждением в сопровождении ионным пучком с энергией 120 эВ. Хорошо видно, что покрытия, осажденные в сопровождении ионным пучком, характеризуются повышенной однородностью, в то время как в покрытиях, полученных стандартным методом, присутствует значительное количество микрокапель и других дефектов.

4.5.2. Осаждение многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины

Идея увеличения трещиностойкости твердых покрытий за счет создания многослойных композиций была выдвинута более пятнадцати лет назад. Она заключалась в создании многослойных покрытий типа TiN/NbN, TiN/VN,

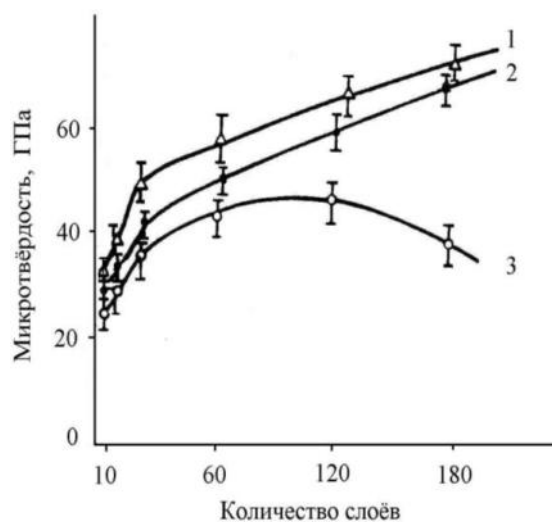
TiAlN/CrN и др. с чередующимися слоями металлов или соединений, обладающих различными внутренними напряжениями (модулями упругости) и близкими по величине коэффициентами термического расширения. Толщина отдельных слоёв должна быть настолько малой, чтобы внутри них не появлялся источник дислокаций, а дислокации, которые под действием напряжений двигались бы к границе раздела из более мягкого слоя, отталкивались бы силами, создающимися упругими напряжениями в более твёрдом слое. Общее количество слоев покрытия выбирается в зависимости от решаемых технологических задач и в ряде случаев может достигать двухсот.

Эксперименты показывают, что микротвёрдость многослойных нанопокровтий, содержащих соединения с микротвёрдостью ≥ 20 ГПа, увеличивается приблизительно в 2 раза, т.е. достигает значений ≥ 40 ГПа. Например, максимальная твердость, получаемая для покрытия TiN/NbN с толщиной отдельных слоев 4 нм, составляет 50 ГПа, а для TiN/VN – около 55 ГПа.



(увеличение в 20000 раз)

а)



б)

Рис. 4.36. Стрoение многослойного нанопoкpытия TiN-AlN (a) и зависимости микpoтвёpдoсти многoслoйных пoкpытий TiN-NbN (1), TiN-ZrN (2) и TiN-CrN (3) oт тoлщины их слoёв (при oбщeй тoлщине плёнки ~ 2 мкм)

В качестве примера на рис. 4.36 представлена структура многослойного нанопокрyтия и приведены сведения о зависимостях микротвёрдости многослойных нанопокрyтий различного состава от количества слоёв, входящих в их состав (общая толщина покрyтий ~ 2 мкм). Видно, что покрyтия, состоящие из 60 слоёв при толщине каждого из слоев ~ 33 нм, имеют высокую микротвердость. Это связано с тем, что зёрна такого покрyтия не успевают коагулировать в процессе осаждения. С увеличением количества слоев покрyтия до 180 (т.е. с уменьшением толщины каждого из слоёв до 10 нм) размеры зёрен еще больше уменьшаются и микротвёрдость покрyтий TiN-NbN и TiN-ZrN достигает значений 70 ГПа. Хорошо известно, что микротвердость традиционных однослойных покрyтий на основе этих же соединений в зависимости от режимов их осаждения находится в пределах 20 – 30 ГПа. В тоже время необходимо понимать, что отмеченная выше закономерность не является универсальной и применимой для всех химических соединений. Например, при увеличении количества слоев многослойного покрyтия TiN-CrN свыше 80 (уменьшении их толщины менее 25 нм) его твердость наоборот снижется.

4.5.3. Осаждение многофазных покрyтий

Комбинация двух или более нанокристаллических фаз в составе одного покрyтия обеспечивает сложную конфигурацию межзеренных границ, что приводит к повышению микротвердости. Такие покрyтия состоят из основной твёрдой нанокристаллической фазы, на границах зёрен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или аморфной фазы, препятствующий росту зёрен основной фазы. Другими словами, твёрдые зёрна первой фазы отделены друг от друга, покрыты тонкой сетью атомов другой фазы, сегрегированных на их поверхностях.

Структурные составляющие таких покрытий должны удовлетворять целому ряду требований: иметь ограниченную смешиваемость в твердом состоянии, термодинамически обусловленную сегрегацию в ходе синтеза, определенное химическое сродство друг к другу для усиления межфазного взаимодействия на границах нанозерен.

В качестве удачных примеров можно привести покрытия, синтезированные на основе систем $\text{TiN}-\text{TiB}$, $\text{Ti}-\text{B}-\text{N}$, $(\text{TiSiAl})\text{N}$, $\text{TiN}-\text{Cu}$, $\text{ZrN}-\text{Cu}$, $\text{AlN}-\text{Cu}$, а также некоторые другие системы на основе комбинаций металл-нитриды, карбид-бориды и др.

Например, при осаждении покрытия $\text{TiN}-\text{Cu}$, добавление меди в количестве 1,5 ат. % Cu обеспечивает формирование покрытий с размерами зерен 22 нм (рис. 4.37) и приводит к увеличению микротвёрдости с 22 до 30 ГПа. При этом покрытие обладает большей трещиностойкостью, чем чистый TiN . При дальнейшем увеличении содержания меди до ~ 2 ат % и более, размеры зёрен снижаются примерно до 5 нм, но в тоже время уменьшается микротвёрдость покрытия до 10–12 ГПа, а ориентация зёрен TiN и Cu становится хаотичной. При содержании меди около 12 ат % уровень пластической деформации покрытия составляет 53 % (почти как у чистой меди). Таким образом, присутствие атомов меди (≥ 2 ат.%) на поверхности растущих зёрен TiN приводит к их измельчению, но в тоже время увеличивает трещиностойкость и пластичность покрытий за счёт скольжения по границам зёрен.

Другим примером является покрытие ZrN/Cu в котором максимальная микротвёрдость 54 ГПа и достаточно высокая трещиностойкость может быть достигнута введением 1,2 ат.% Cu. При этом размеры зёрен покрытия составляют около 35–38 нм. При увеличении содержания меди свыше 6 ат. % физико-механические характеристики покрытия значительно ухудшаются.

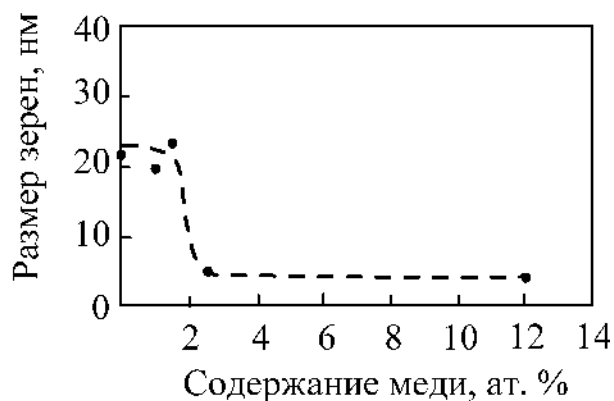


Рис. 4.37. Зависимость размеров зёрен покрытия TiN/Cu от содержания меди

Еще одним вариантом формирования многофазных покрытий является случай, когда зерна нанокристаллической фазы внедрены в аморфную матрицу. Целый ряд твердых материалов может быть использован для создания таких композиций. На сегодняшний день одним из наиболее удачных примеров такой композиции является система TiN/Si₃N₄.

На рис. 4.38 приведена зависимость микротвердости многофазного покрытия TiN/Si₃N₄ от содержания в нем нитрида кремния. Структура покрытий, полученных без легирования, представляет собой поликристаллический нитрид титана со средним размером столбчатых зёрен несколько сотен нанометров в высоту и несколько десятков нанометров в диаметре. Введение даже небольших количеств нитрида кремния в процессе конденсации покрытия приводит к дополнительному измельчению структуры и резкому росту величины микротвердости. При содержании аморфной фазы нитрида кремния в материале покрытия в количестве 15...20 ат.% средний размер нанокристаллов TiN не превышает 7 нм. В тоже время при увеличении концентрации аморфной фазы нитрида кремния среднее расстояние между нанозернами TiN становится достаточным для возникновения и развития трещин в аморфной матрице. При этом твердость покрытия с преобладанием аморфной фазы монотонно приближается к твердости нитрида кремния.

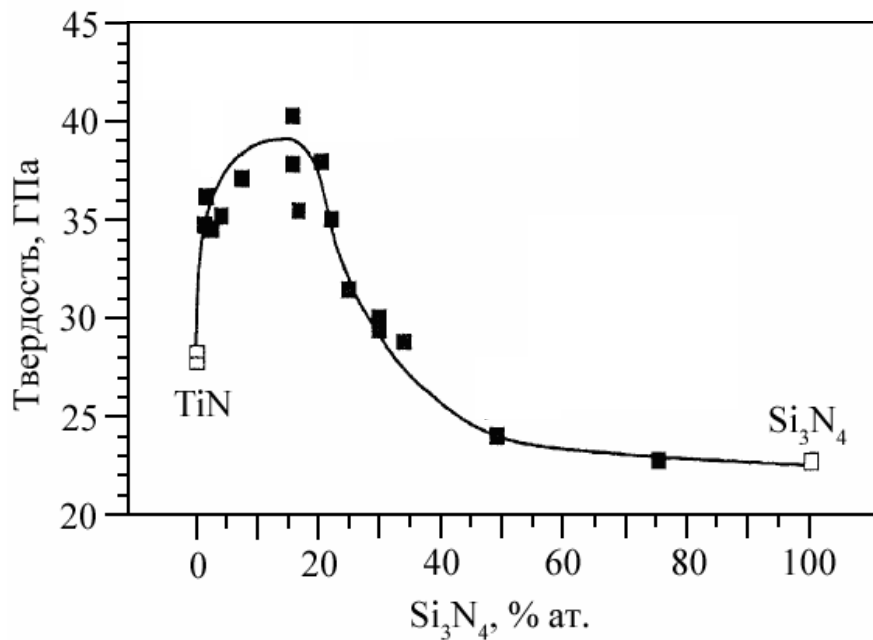


Рис. 4.38. Влияние концентрации нитрида кремния на твердость системы $\text{TiN}/\text{Si}_3\text{N}_4$

Таким образом, в настоящее время существует достаточное количество технологических приемов, обеспечивающих формирование нанопокровтий самого различного химического состава и обладающих повышенными физико-механическими свойствами. Однако практически все из рассмотренных выше подходов находятся еще на стадии лабораторных испытаний. В самом ближайшем будущем можно ожидать более масштабного производственного внедрения результатов, полученных в лабораториях. Применение нанопокровтий позволит не только повысить работоспособность инструментов с покрытиями, но и существенно расширить область их применения. В первую очередь речь идет о тех операциях механической обработки, где возникают нагрузки, зачастую приводящие к разрушению обычных покрытий уже в самом начале работы инструмента – резбонарезание и черное точение заготовок из труднообрабатываемых материалов, черновое фрезерование и др.

Контрольные вопросы

1. Перечислите требования, предъявляемые к износостойким покрытиям
2. Дайте классификацию покрытий для режущего инструмента
3. Назовите основные методы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент
4. Перечислите методы химического осаждения износостойких покрытий
5. Перечислите методы физического осаждения износостойких покрытий
6. Назовите области применения методов химического и физического осаждения износостойких покрытий.
7. Охарактеризуйте метод электронно-лучевого испарения
8. Дайте характеристику методу электродугового испарения
9. Перечислите особенности нанесения покрытий методом КИБ и назовите области его применения
10. В чем заключается роль ионной бомбардировки при нанесении покрытий методом КИБ
11. Опишите технологический процесс подготовки поверхности режущего инструмента под нанесение покрытий
12. Охарактеризуйте процесс нанесения покрытий в комбинированном температурном режиме
13. Опишите процесс нанесения многоэлементных покрытий. Какие катоды могут использоваться при их нанесении.
14. Опишите технологию нанесения многослойных покрытий.
15. Дайте характеристику магнетронного распыления и назовите его преимущества.
16. Охарактеризуйте процесс осаждения покрытий в сопровождении пучка ускоренных частиц.
17. Перечислите технологические приемы получения нанопокровтий.

Глава 5. КОМБИНИРОВАННАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Эффективность режущего инструмента с покрытиями может быть повышена путем воздействия на покрытие дополнительной поверхностной упрочняющей обработки. Дополнительная упрочняющая обработка изменяет механические свойства покрытия, что в свою очередь оказывает влияние на работоспособность режущего инструмента. Рассмотренные выше методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента могут использоваться в сочетании друг с другом, однако производственное применение нашли лишь некоторые из них. Рассмотрим несколько характерных примеров комбинированной обработки режущего инструмента.

5.1. Нанесение износостойких покрытий и лазерная обработка

Лазерная обработка может предшествовать нанесению покрытий, а также осуществляться после нанесения. Предварительная лазерная обработка позволяет повысить сопротивляемость режущего клина инструмента упруго-пластическим прогибам и его способность сохранять свою форму. Лазерная обработка после нанесения покрытия обеспечивает дополнительное повышение его микротвердости, прочности адгезионной связи с инструментальной основой, а также способствует образованию мелкозернистой структуры, которая существенно повышает устойчивость покрытия к процессам трещинообразования.

При обработке импульсным лазерным излучением упрочняемый профиль образуется совокупностью отдельных зон термического влияния, полученных от воздействия единичных импульсов. Поэтому от формы пятен лазерного излучения, степени заполнения ими упрочняемого профиля, а также частоты следования импульсов в значительной мере зависит производительность процесса упрочнения, его эффективность.

Импульсная лазерная обработка контактных площадок режущего инструмента с покрытием изменяет его структурные параметры.

Снижается период кристаллической решетки a , что свидетельствует о получении структуры более плотного кристаллического строения и объясняется перестройкой структуры материала покрытия под воздействием лазерного излучения. Рост плотности мощности импульсной лазерной обработки ведет к искажению кристаллической решетки и разориентации микрообъемов покрытий, что вызывает увеличение полуширины рентгеновской линии β_{111} . В то же время снижаются параметр текстуры J_{111}/J_{200} и величина остаточных напряжений σ_0 .

Изменение текстуры, вызванное преимущественно уменьшением интенсивности линии $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ TiN, связано с разориентацией кристаллических плоскостей материала покрытия при воздействии на него лазерного излучения, а снижение остаточных напряжений – их релаксацией на границе покрытия с инструментальной основой в результате высокоскоростного лазерного нагрева и охлаждения.

Более высокий уровень остаточных напряжений в многоэлементных покрытиях определяет большую интенсивность их снижения при лазерном воздействии по сравнению с одноэлементными покрытиями. Изменение структурных параметров под воздействием импульсного лазерного излучения покрытий, нанесенных на твердосплавную основу, менее значительно по сравнению с покрытиями, нанесенными на быстрорежущую основу. Это связано с тем, что при лазерной обработке инструмента из твердого сплава материал основы не претерпевает значимых изменений. В случае быстрорежущей стали лазерное воздействие приводит к трансформации кристаллической структуры как покрытия, так и поверхностных слоев материала основы.

Изменение параметров структуры покрытий после импульсной лазерной обработки находит свое отражение в изменении их физико-механических свойств.

Микротвердость H_μ покрытий, нанесенных как на твердосплавную, так и быстрорежущую основу, увеличивается на 10...16 % в зависимости от его состава (рис. 5.1; на данном и других рисунках и в таблицах введено обозначение ЛО – лазерная обработка). Снижение темпа роста микротвердости покрытия по мере увеличения плотности мощности лазерного излучения связано с появлением микротрещин в объеме твердосплавной основы.

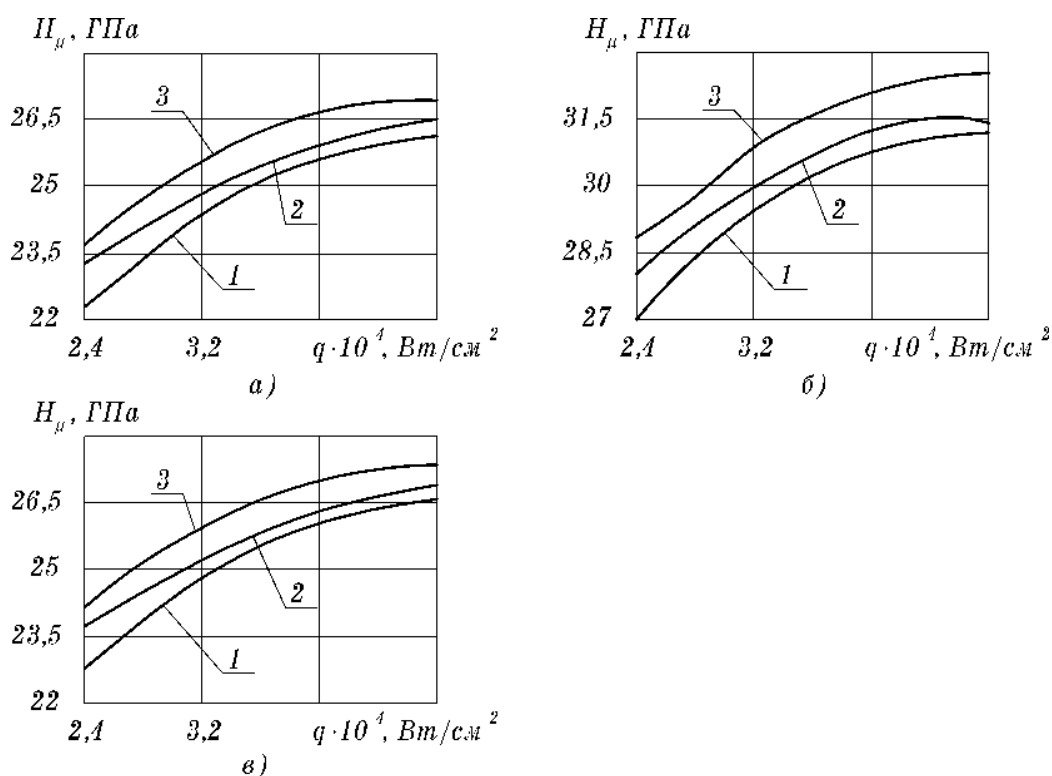


Рис. 5.1. Влияние плотности мощности лазерного излучения на микротвердость покрытия:

а – TiN+ЛО, *б* – (Ti,Zr)N+ЛО, *в* – (Ti,Zr)CN+ЛО; 1,2,3 – толщина покрытий, соответственно, 3, 5 и 7 мкм; инструментальная основа – твердый сплав МК8

С ростом плотности мощности лазерного излучения прочность сцепления покрытия с инструментальной основой вначале повышается (коэффициент отслоения K_0 снижается), что объясняется релаксацией макронапряжений на границе раздела «покрытие – инструментальная основа», а затем снижается (рис. 5.2). Увеличение коэффициента отслоения после некоторого значения плотности мощности лазерного излучения для быстрорежущего инструмента

связано с оплавлением инструментальной основы и снижением ее твердости, а для твердого сплава – с интенсивным трещинообразованием в его объеме.

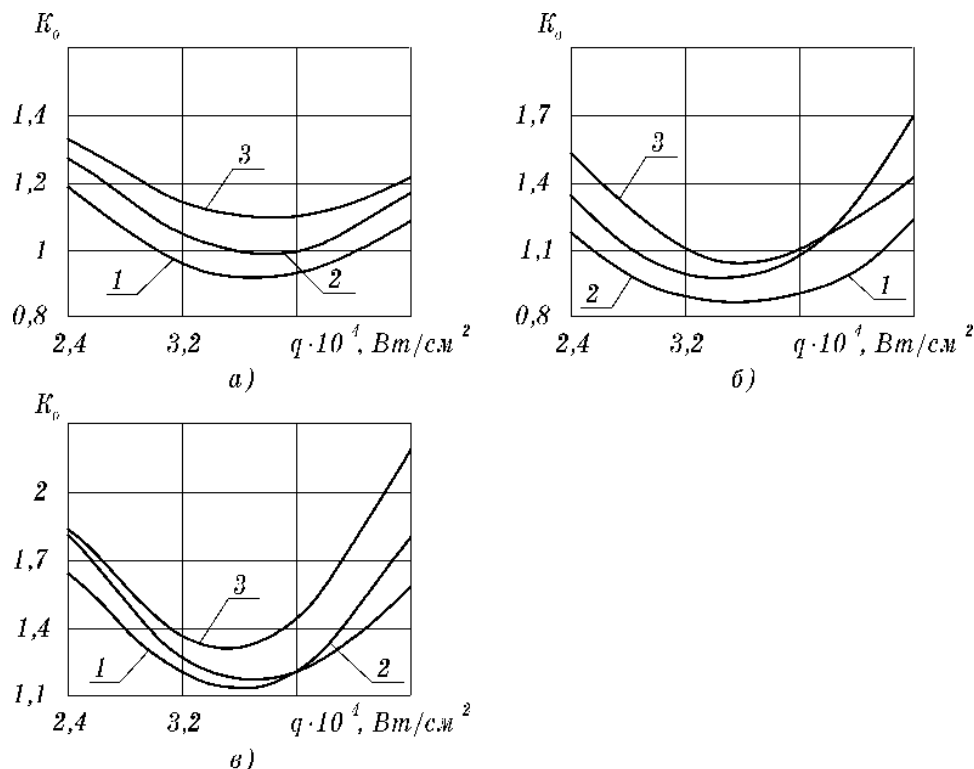


Рис. 5.4. Влияние плотности мощности лазерного излучения на коэффициент отсложения:

а – TiN+ЛО, *б* – (Ti,Zr)N+ЛО, *в* – (Ti,Zr)CN+ЛО; 1,2,3 – толщина покрытий, соответственно, 3, 5 и 7 мкм; инструментальная основа – твердый сплав МК8

Повышение микротвердости покрытий и прочности их сцепления с инструментальной основой после импульсной лазерной обработки способствуют снижению интенсивности износа режущего инструмента. Как видно из рис. 5.3, поверхности, характеризующие интенсивность изнашивания от плотности мощности лазерного излучения, имеют минимум, координаты которого определяют режимы комбинированной упрочняющей обработки, обеспечивающие минимальную интенсивность изнашивания контактных площадок инструмента.

С ростом плотности мощности лазерного излучения до определенного значения, интенсивность износа инструмента снижается, что объясняется ростом микротвердости покрытий и повышением прочности адгезионной связи с инструментальной основой. Дальнейшее повышение плотности мощности лазерного излучения ведет к увеличению интенсивности износа, что связано с

повышением коэффициента отслоения покрытия, а для быстрорежущей стали дополнительно и со снижением микротвердости инструментальной основы.

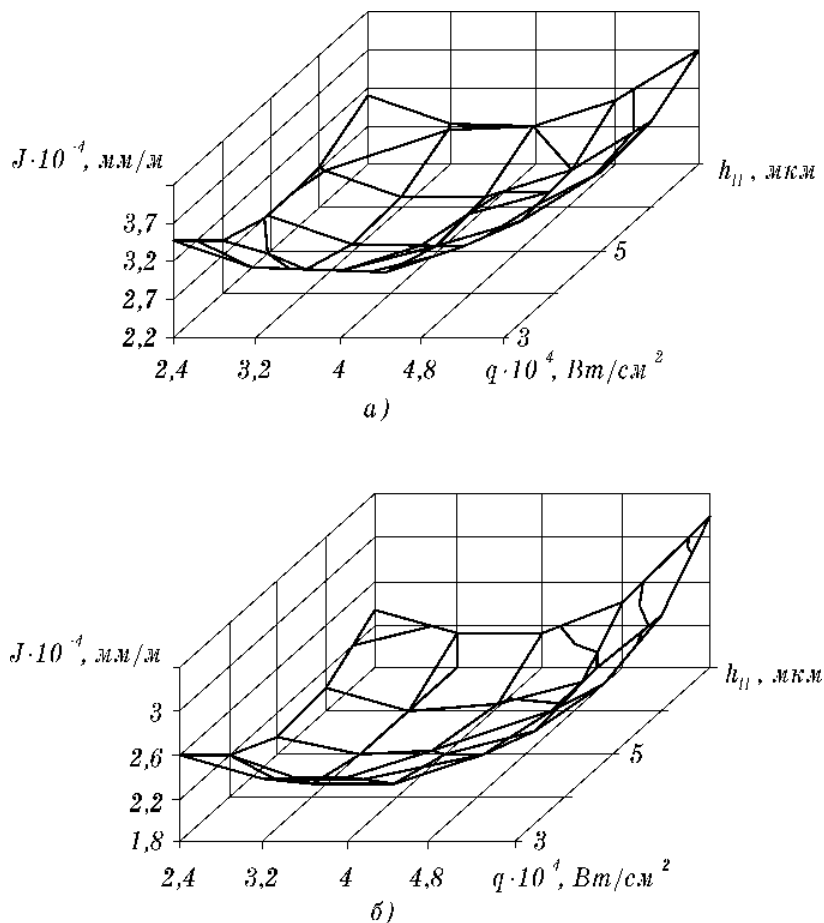


Рис. 5.3. Зависимости интенсивности изнашивания (J) твердосплавных пластин МК8 от плотности мощности лазерного излучения (q), состава и толщины покрытия (h_l) при точении стали 30ХГСА:

a – TiN+ЛО; b – (Ti,Zr)N+ЛО; $V = 170$ м/мин, $s = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм

Плотность мощности лазерного излучения, при которой наблюдается минимум интенсивности износа режущего инструмента после импульсного лазерного излучения, зависит от состава покрытия. Интенсивность износа режущего инструмента с покрытиями после импульсной лазерной обработки снижается в 1,5 – 1,9 раза в зависимости от состава покрытия и обрабатываемого материала.

5.2. Ионное азотирование и нанесение износостойких покрытий

Для повышения сопротивления режущего клина инструмента упруго-пластическим прогибам можно использовать ионное азотирование. При этом

азотированный слой, формируемый перед нанесением покрытия, в зависимости от конкретных условий эксплуатации инструмента должен обладать определенными структурой, толщиной и микротвердостью. На практике такой обработке обычно подвергаются инструменты из быстрорежущих сталей.

Для ионного азотирования и последующего нанесения покрытия целесообразным является использование установки на базе вакуумно-дугового разряда в которой за один технологический цикл без перегрузки обрабатываемых инструментов можно реализовать все этапы комбинированного упрочнения.

Принцип работы такой установки заключается в следующем (рис. 5.8).

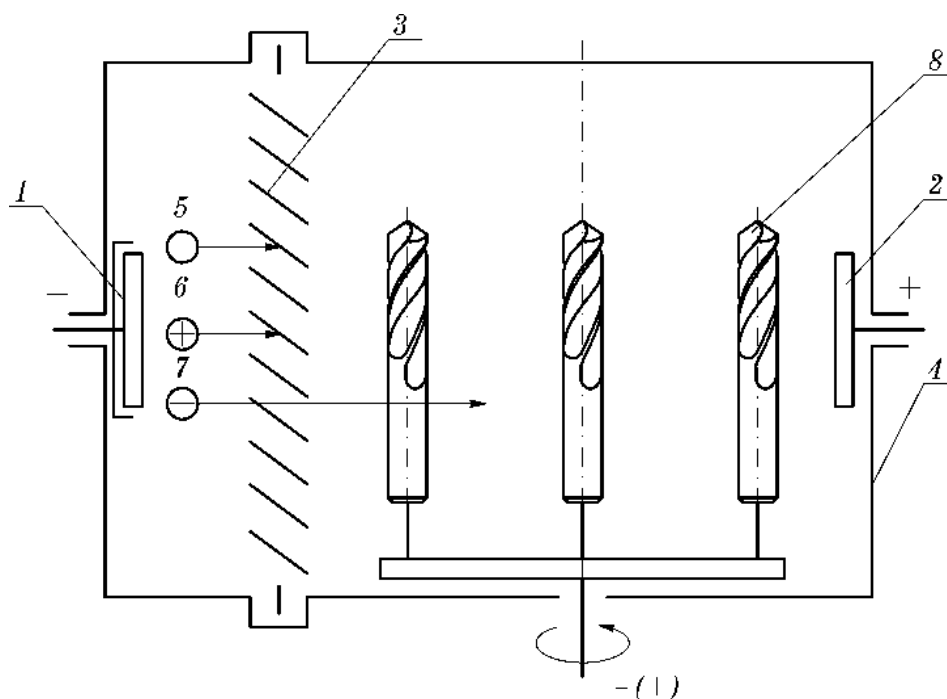


Рис. 5.4. Принципиальная схема вакуумно-дуговой установки для проведения комбинированной обработки инструмента, включающей ионное азотирование и нанесение покрытий:

1 – мишень; 2 – анод; 3 – экран; 4 – вакуумная камера; 5 – нейтральные атомы, 6 – ионы; 7 – электроны; 8 – обрабатываемые инструменты

Мишень испаряется катодными пятнами вакуумной дуги и используется в качестве катода дугового разряда. Специальный экран, расположенный между мишенью и анодом делит камеру на две зоны, заполненные металло-газовой

плазмой (слева от экрана) и газовой плазмой (справа). Этот экран непроницаем для микрокапель, нейтральных атомов и ионов металла, эмитируемых катодными пятнами на поверхности мишени. Через экран проникают только электроны, которые ионизуют по пути к аноду подаваемый в камеру газ и таким путем образуют не содержащую металлических частиц газовую плазму. Погруженные в плазму инструменты нагреваются электронами при подаче на них положительного потенциала, а при подаче отрицательного потенциала осуществляется их азотирование. После окончания азотирования экран смещается в сторону и после того, как частицы металлической мишени начинают поступать на поверхность инструмента, осуществляется синтез покрытия.

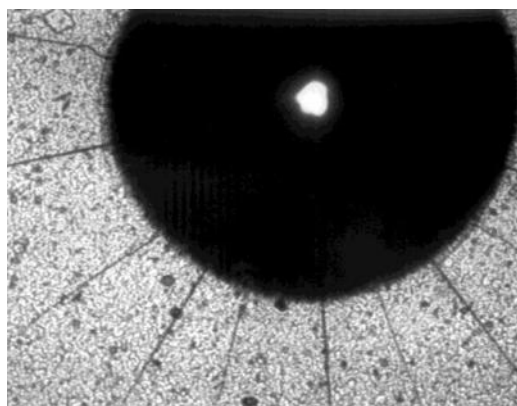
Осаждение покрытий является весьма энергоемким процессом, сопровождающимся воздействием высокоэнергетического потока плазмы, особенно в момент ионной бомбардировки, в результате чего, характеристики слоя, полученного при ионном азотировании, могут существенно изменяться. Поэтому при оптимизации процесса комбинированной обработки быстрорежущего инструмента необходимо учитывать не только факторы процесса азотирования, но и факторы последующего процесса нанесения износостойкого покрытия – в первую очередь, время нанесения, от которого напрямую зависит толщина покрытия. С одной стороны ее увеличение благоприятно сказывается на повышении износостойкости контактных площадок инструмента, с другой – приводит к заметному увеличению количества дефектов в покрытии, снижению прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом и уменьшению способности покрытия сопротивляться упругопластическим деформациям.

Важнейшими факторами проведения комбинированной обработки являются температура и продолжительность процесса азотирования, объемная доля азота в газовой смеси с аргоном, а также время последующего процесса нанесения износостойкого покрытия. Другие факторы процесса нанесения

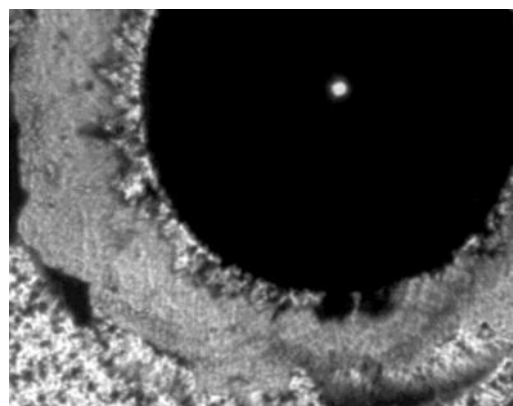
покрытия – давление азота, опорное напряжение, ток дуги на катоде оказывают влияние, главным образом, на характеристики покрытия и должны оставаться такими же, как и в случае осаждения традиционных покрытий.

Практика эксплуатации инструментов из быстрорежущих сталей после комбинированного упрочнения на различных операциях механообработки показывает, что наличие под покрытием азотированного слоя в котором присутствует хрупкая нитридная зона (ϵ и γ^3 -фазы) существенно ограничивает эффект от применения комбинированной обработки. Данная структура формируется при азотировании в атмосфере чистого азота с использованием плазмы вакуумно-дугового разряда. Наличие сравнительно толстой нитридной зоны (более 0,5 мкм) при непрерывном резании (точении и сверлении) не обеспечивает существенного увеличения стойкости инструмента по сравнению с инструментом с традиционным покрытием, а при прерывистом резании (фрезеровании и долблении) часто ведет к выкрашиванию режущих кромок уже в первые минуты работы инструмента.

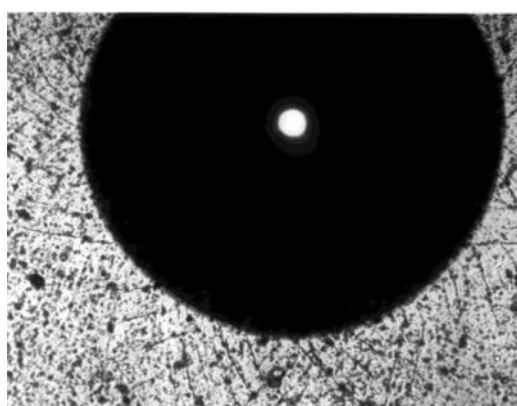
На рис. 5.5 представлены фотографии, характеризующие влияние структуры азотированного слоя на прочность адгезионной связи широко применяемого покрытия TiAlN с быстрорежущей основой P6M5. При внедрении алмазного индентора в образец со структурой, которая формируется при азотировании в среде 100% N₂ (рис. 5.5, а), отслаивание покрытия не наблюдается, но на поверхности покрытия видно большое количество трещин, распространяющихся в радиальном направлении от места приложения нагрузки. Для сравнения на рис. 5.5, б представлена фотография зоны укола индентором неазотированного образца с покрытием TiAlN. В этом случае из-за резкой разницы в твердости покрытия и подложки при воздействии нагрузки покрытие вдавливается и отслаивается.



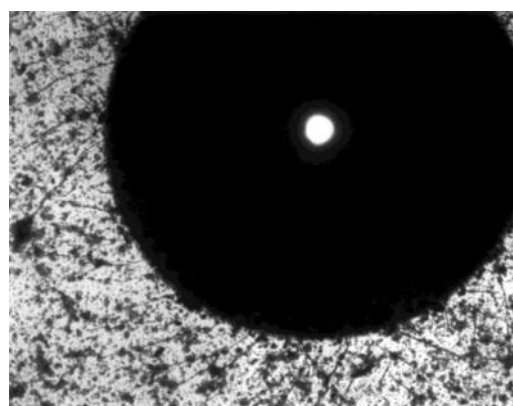
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.5. Отпечаток индентора на образцах из стали Р6М5 с азотированием в различных газовых смесях и покрытием TiAlN ($\times 200$):

а - азотирование при 100% N_2 ; б - без азотирования; в - азотирование при 60% N_2 и 40% Ar; г - азотирование при 30% N_2 и 70% Ar

Введение аргона в состав азотосодержащей атмосферы при азотировании, предшествующем нанесению покрытия, позволяет управлять фазовым составом формируемого слоя и в зависимости от конкретных условий эксплуатации режущего инструмента и его служебного назначения получать необходимую структуру.

При эксплуатации быстрорежущего инструмента с комбинированной обработкой в условиях прерывистого резания, оптимальной структурой азотированного слоя является вязкий и устойчивый к переменным нагрузкам твердый раствор азота в мартенсите, в котором допустимо образование незначительного количества дисперсных нитридов легирующих компонентов.

Указанная структура может быть получена при азотировании в среде, содержащей ~ 30% N₂ и 70% Ar.

В случае эксплуатации инструмента в условиях непрерывного резания наибольшей работоспособностью характеризуется слой, состоящий из азотистого мартенсита и специальных нитридов легирующих элементов (W, Mo, Cr, V). Кроме того, допустимо наличие очень небольшого количества γ' -фазы. Данная структура повышает сопротивление поверхностного слоя инструмента термическим нагрузкам и может быть сформирована при азотировании в среде, содержащей ~ 60% N₂ и 40% Ar.

Покрытие TiAlN, нанесенное на образцы, азотированные в газовых смесях содержащих 60% N₂ + 40% Ar и 30% N₂ + 70% Ar, имеет удовлетворительную прочность адгезионной связи (рис. 5.9, в,г). На образцах не наблюдается ни отслаивания покрытия, ни явных трещин, которые были обнаружены на образцах, азотированных при 100% N₂.

Создание на контактных площадках режущего инструмента износостойкого комплекса, формируемого путем ионного азотирования с последующим нанесением покрытий в плазме вакуумно-дугового разряда, оказывает значительное влияние на интенсивность и характер изнашивания инструмента.

Производственный опыт показывает, что комбинированная обработка, предусматривающая предварительное азотирование и последующее нанесение покрытий, позволяет увеличить стойкость быстрорежущего инструмента самой широкой номенклатуры до 5 раз по сравнению с инструментом без упрочнения и до 3 раз по сравнению с инструментом с традиционным покрытием.

5.3. Лазерное легирование и азотирование

Перспективным методом комбинированного воздействия на поверхностный слой режущего инструмента является лазерное легирование

нитридообразующими элементами с последующим азотированием. При этом вторая стадия комбинированной обработки (азотирование) может осуществляться как в низкотемпературной плазме газового разряда, так и по традиционным технологиям – в газовой или жидкой средах.

Указанная технология комбинированного упрочнения сталей не снижает преимуществ лазерного легирования, а напротив, позволяет получить комплекс физико-механических свойств, существенно превышающий тот, который может быть достигнут лазерной обработкой или азотированием в отдельности.

Применение указанной комбинированной обработки, во-первых, увеличивает растворимость азота в инструментальном материале, что позволяет увеличить микротвердость и толщину азотированного слоя, а, во-вторых, способствует формированию в поверхностном слое более благоприятного распределения остаточных напряжений.

После лазерного легирования в поверхностном слое часто можно наблюдать неблагоприятное распределение остаточных напряжений: под областью сжимающих напряжений расположена область с растягивающими напряжениями, что способствует зарождению и распространению трещин.

Если после лазерного легирования провести азотирование, растягивающие напряжения, возникшие на границе зоны легирования с материалом инструментальной основы при лазерном воздействии, компенсируются сжимающими, формирующимися при образовании азотистых фаз.

На величину остаточных напряжений, возникающих после лазерного легирования, существенное влияние оказывает содержание углерода в материале матрицы. Чем больше углерода в стали, тем выше уровень сжимающих напряжений в центре зоны лазерного легирования и тем выше уровень растягивающих напряжений на границе легированной зоны с основой. Последующее азотирование сталей снижает уровень сжимающих напряжений в центре зоны легирования, а в случае возникновения после лазерного легирования растягивающих напряжений – меняет их знак на

противоположный. В качестве иллюстрации сказанному, на рис. 5.6 представлено распределение остаточных напряжений в стали 45 после лазерного легирования ванадием и после комбинированной обработки, сочетающей лазерное легирование ванадием и азотирование.

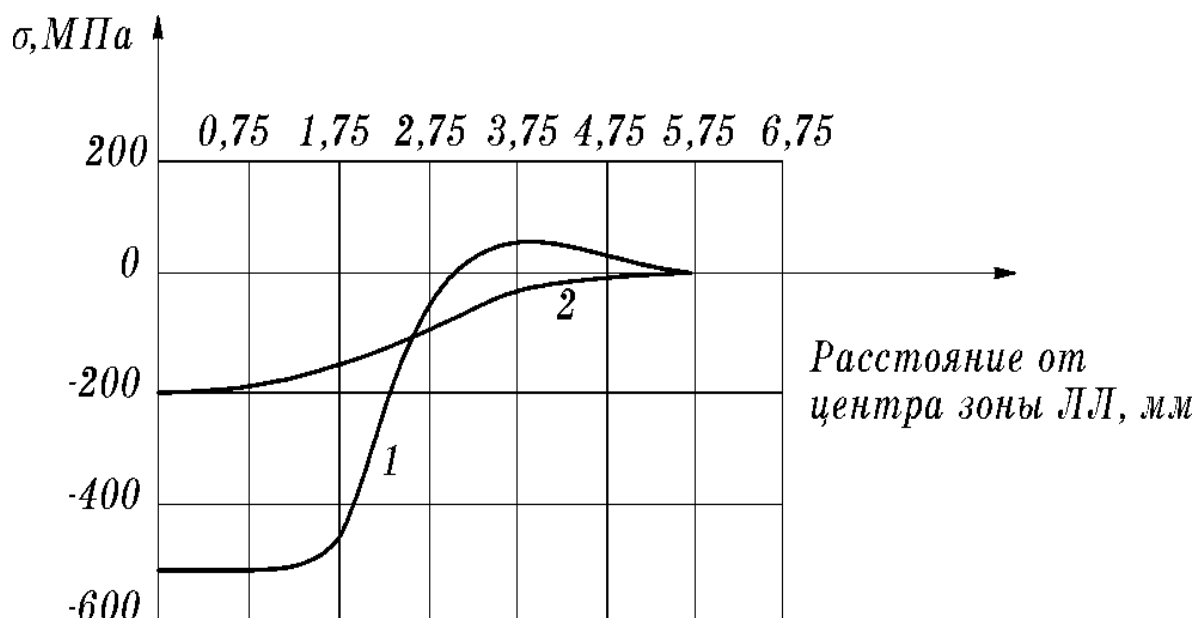


Рис. 5.6. распределение остаточных напряжений на поверхности стали 45 в направлении, перпендикулярном дорожке лазерного легирования:
1 – лазерное легирование; 2 – лазерное легирование и азотирование

Эффективность применения комбинированной обработки, сочетающей лазерное легирование и последующее азотирование, зависит от правильного выбора легирующего элемента. Наиболее высокая растворимость азота наблюдается при легировании железа ванадием, титаном и хромом. Причем эффект повышения растворимости азота наиболее сильно растет с увеличением концентрации титана. Несколько ниже степень повышения растворимости азота в присутствии молибдена, марганца и вольфрама.

Предварительное лазерное легирование нитридообразующими элементами наиболее рационально проводить при упрочнении углеродистых и легированных сталей. Для быстрорежущих сталей эффект от предварительного легирования будет не столь существенен, так как в их составе и так имеется значительное количество нитридообразующих элементов.

Необходимо учитывать еще одну особенность рассматриваемой комбинированной технологии – ее эффективность снижается с увеличением содержания углерода в инструментальной стали. Практика показывает, что в сталях с содержанием углерода больше 0,5 % прирост твердости менее значителен, чем в сталях с меньшим содержанием углерода. Это связано с тем, что в этих сталях уже в процессе легирования достигается достаточно высокий уровень упрочнения за счет образования карбидных фаз. Образующиеся после азотирования карбонитриды легирующих элементов повышают твердость поверхностного слоя в меньшей степени, чем нитриды.

Практика показывает, что наиболее эффективными легирующими элементами при обработке сталей самого разнообразного химического состава являются ванадий, хром и алюминий.

5.4. Криогенно-эрозионная обработка

Сочетание криогенной и эрозионной обработки является еще одной разновидностью комбинированного упрочнения. Применение указанной обработки может заметно повысить работоспособность инструмента за счет нивелирования различных дефектов, поверхностного слоя – трещин, кратеров и др., возникающих на предшествующих операциях технологической цепочки изготовления инструмента – термической, механической и др.

Механизм криогенно-эрозионного упрочнения схематично представлен на рис. 5.7. Процесс протекает в среде жидкого азота, подаваемого в зону обработки поливом. Инструментом-анодом служит игла из технически чистого титана или его сплава. После установки электродов (инструмента-анода и изделия-катода) в исходное положение (рис. 5.7, а) и подачи жидкого азота, в зоне микроуглублений начинается резкое охлаждение поверхностного слоя заготовки до стабильной температуры. При этом микроуглубления (рассматриваются дефекты с раскрытием 1...5 мкм, наиболее часто

возникающие, например, при шлифовании) частично или полностью сжимаются (рис. 5.7, б).

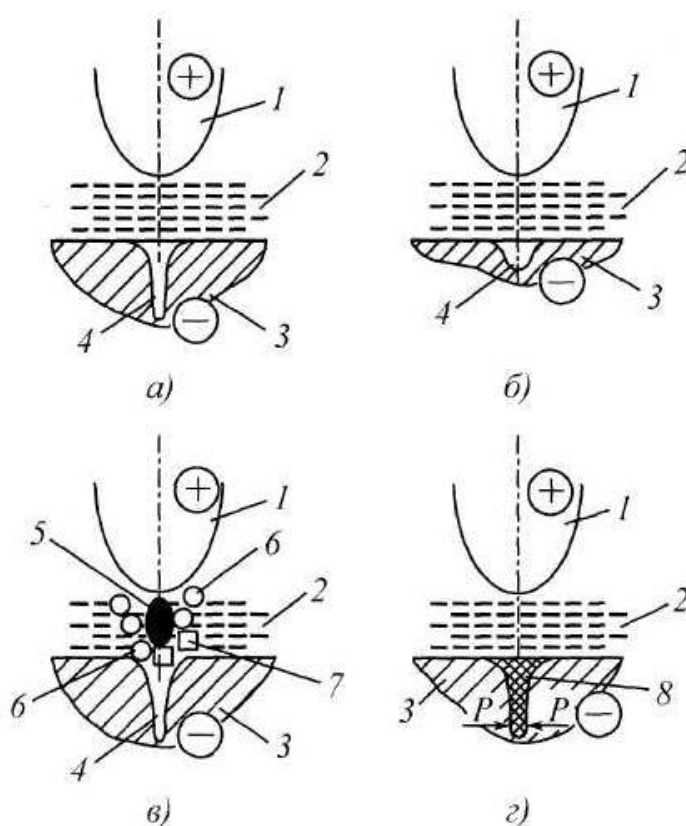


Рис. 5.7. Модель заполнения микротрещин нитридом титана:

а – исходное положение; *б* – окончание периода стабилизации теплового режима; *в* – момент прохождения импульса тока (разряда); *г* – охлаждение зоны разряда; *1* – инструмент-анод; *2* – жидкий азот; *3* – изделие-катод; *4* – микроуглубление; *5* – зона разряда; *6* – газообразный ионизированный азот; *7* – микрочастицы титанового материала с инструмента-анода; *8* – нитрид титана

Далее происходит разряд (рис. 5.7, в), длительность которого обычно составляет до 0,3 мс, а плотность энергии импульса может достигать $10^5 \dots 10^8$ Дж/мм², что по значению соизмеримо с удельной мощностью лазера. Он приводит к местному нагреву материала изделия, образованию расплава и плазмы на аноде и выбросу в межэлектродное пространство микрочастиц расплавленного металла (например, титана). Под действием тепловой энергии разряда часть жидкого азота испаряется и переходит в ионное состояние. Микроуглубление резко раскрывается, возникает насосный эффект, при

котором частицы газообразного ионизированного азота и титана с инструментального анода втягиваются в микроуглубление и заполняют его. За счет высокой температуры образуется нитрид титана (рис. 5.7,г), который диффундирует в стенки микроуглубления.

После прекращения действия источника тепловой энергии (импульса разряда) холодный жидкий азот вновь вызывает закрытие микроуглубления, заполненного нитридом титана. Возникают силы сжатия P , способствующие усилению диффузии нитрида титана в стенки микроуглубления. Образуется монолитная структура с высокими эксплуатационными свойствами, не имеющая концентраторов напряжений.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм снижения интенсивности изнашивания режущего инструмента с покрытием при использовании импульсного лазерного излучения инструментальной основы перед нанесением покрытия.
2. Опишите процесс и объясните механизм снижения интенсивности изнашивания режущего инструмента при импульсной лазерной обработке и последующем нанесении покрытия.
3. Опишите технологический процесс ионного азотирования и последующего нанесения покрытия.
4. Сущность комбинированной обработки с применением лазерного легирования и азотирования.
5. Опишите процесс сочетания криогенной и эрозионной обработки.