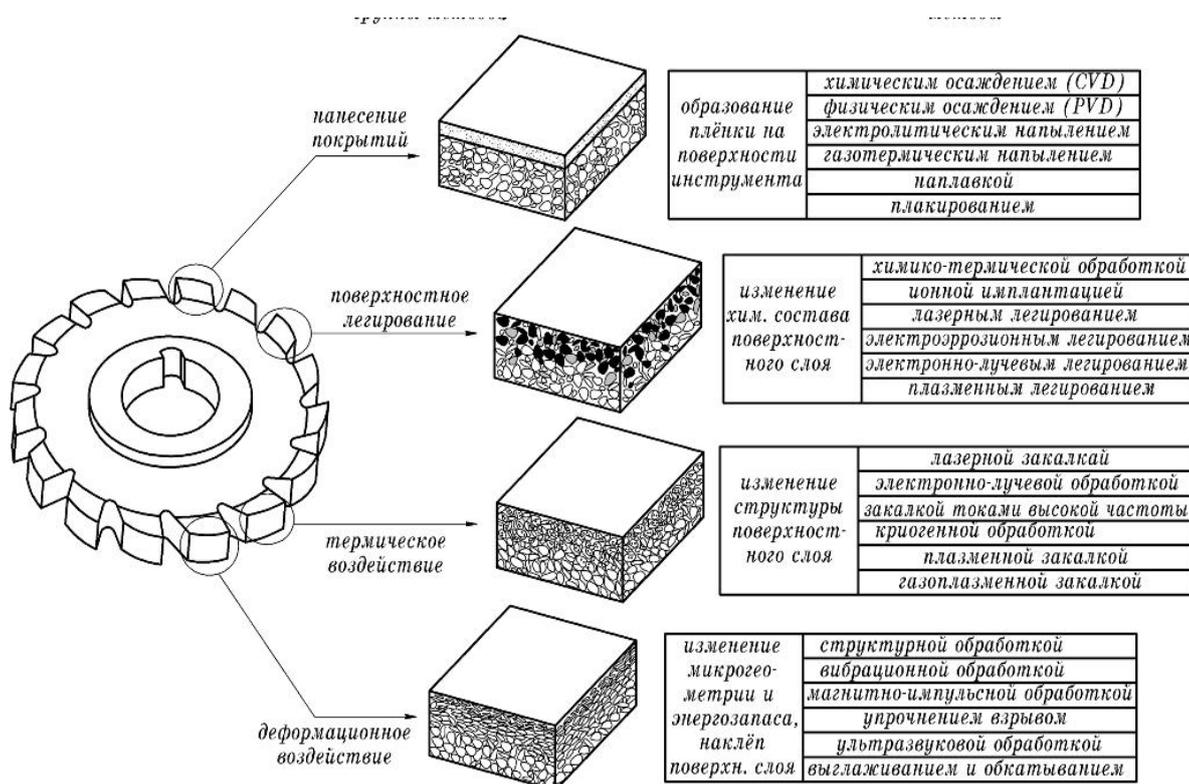


**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

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).



**Рис. 1. Классификация методов поверхностного упрочнения инструментальных материалов**

При деформационном воздействии происходит наклеп поверхностного слоя режущего инструмента, изменяется его микрogeометрия 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.

Наиболее эффективным методом повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение износостойких покрытий.

Задача нанесения покрытий вытекает из анализа физико-механических свойств инструментальных материалов, классификация которых представлена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация инструментальных материалов по их свойствам

Главная задача нанесения покрытий заключается в создании инструментального материала с износостойким поверхностным слоем и вязкой прочной основой. Следовательно, нанесению износостойких покрытий должны подвергаться инструментальные материалы, имеющие вязкую и прочную основу и недостаточную твердость и износостойкость. Это – инструментальные и быстрорежущие стали, твердые сплавы групп ВК и ТТК, твердые сплавы группы ТК, имеющих высокую прочность-Т5К10, Т14К8, Т8К7.

### 1.1. Требования, предъявляемые к износостойким покрытиям, и материалы, используемые в качестве покрытий

Рассмотрим требования, предъявляемые к износостойким покрытиям. Исходя из общих эксплуатационных требований, покрытие должно иметь твердость, в 1,5 – 2 раза превышающую твердость инструментального материала; низкую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом и минимальную склонность к диффузионному растворению в обрабатываемом материале; быть устойчивым против коррозии и окисления; сохранять свои свойства при высоких температурах.

Кристаллохимические и физико-механические свойства покрытия и инструментального материала должны быть достаточно близкими и совместимыми. В связи с этим желательно обеспечить 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.

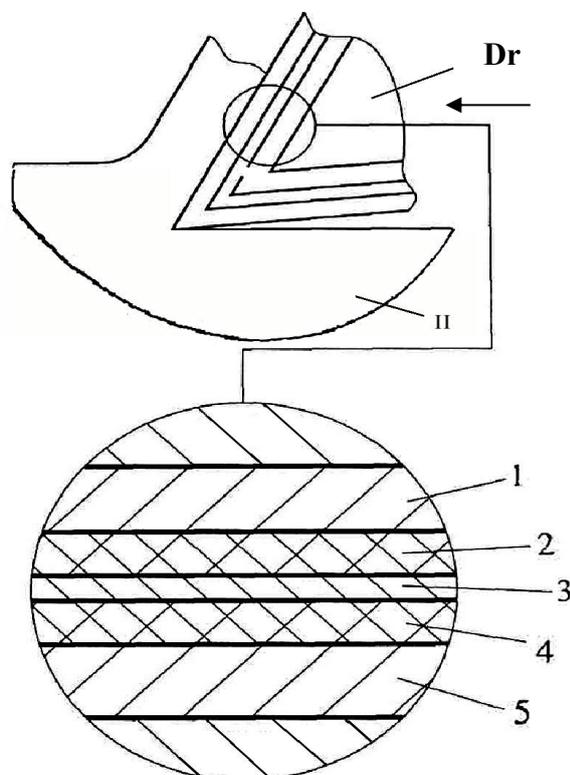
Несмотря на значительное количество существующих соединений, которые потенциально могут быть использованы в качестве покрытий для режущего инструмента, широкое распространение в инструментальном производстве на сегодняшний день получили порядка пятнадцати соединений, которые используются как в качестве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

### 1.2. Классификация износостойких покрытий

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

Одноэлементные покрытия – это покрытия на основе соединения одного тугоплавкого металла (например, TiC, TiN, ZrN); многоэлементные – на основе соединения двух и более тугоплавких металлов (например, (Ti,Zr)N, (Ti,Cr)N, (Ti,Zr,Cr)N). Однослойные характеризуются постоянным составом, структурой и свойствами по объему покрытия; многослойные - переменным составом, структурой и свойствами по объему покрытия. Адгезионные характеризуются отсутствием переходной зоны между покрытием и инструментальной основой; диффузионные - наличием переходной зоны между покрытием и инструментальной основой, соизмеримой по размерам с толщиной покрытия; адгезионно-диффузионные – для них также характерно формирование переходной зоны между покрытием и инструментальной основой, но меньше размером, чем толщина покрытия.

В настоящее время в практике производства режущих инструментов все чаще используют многослойные



**Рис. 3. Идеализированная схема многослойного покрытия:**  
I – режущий инструмент, II – заготовка

покрытия. Многослойное покрытие (рис. 3) содержит несколько слоев, каждый из которых имеет собственное функциональное назначение. Слой 5, непосредственно примыкающий к инструментальной основе, обеспечивает прочную адгезионную связь между покрытием и инструментальным материалом. Основную функцию выполняет слой 1, непосредственно контактирующий с обрабатываемым материалом. Данный слой определяет условия контактного взаимодействия стружки и передней поверхности РИ, которые в свою очередь влияют на механизм разрушения ИП и изнашивания РИ. Слой 3 может выполнять барьерные функции, например, существенно замедлять интердиффузионные процессы между инструментальным и обрабатываемым материалами, снижать интенсивность теплового потока в инструмент, иметь повышенную трещиностойкость, чтобы сдерживать интенсивность процессов трещинообразования в многослойном покрытии. Промежуточные слои 2 и 4 с переменными свойствами осуществляют связь между слоями 1, 3 и 3, 5.

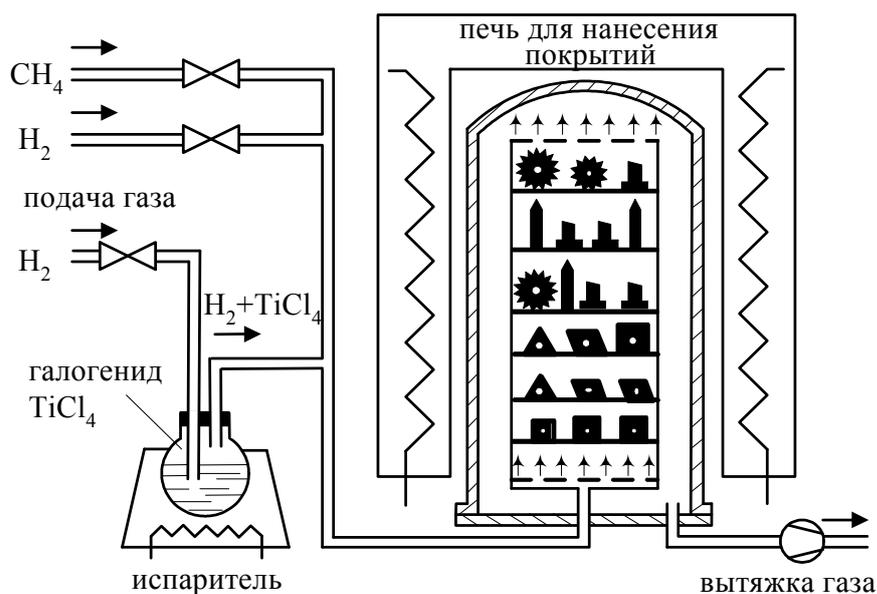
### **1.3. Методы нанесения износостойких покрытий**

#### **1.3.1. Методы химического осаждения износостойких покрытий**

Разновидностями метода химического осаждения (ХОП) являются высокотемпературное осаждение покрытий, среднетемпературное осаждение и осаждение покрытий с плазменным сопровождением.

##### 1.3.1.1. Высоко- и среднетемпературные методы химического осаждения

В общем случае процессы ХОП основаны на протекании гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей режущие инструменты, в результате которых образуется износостойкое покрытие.



**Рис. 4. Принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавные инструменты**

На 4 представлена принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы (CVD).

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.

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  $\eta$ -фаза ( $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_6C$ ), толщина которой может достигать 4 мкм (рис. 5).

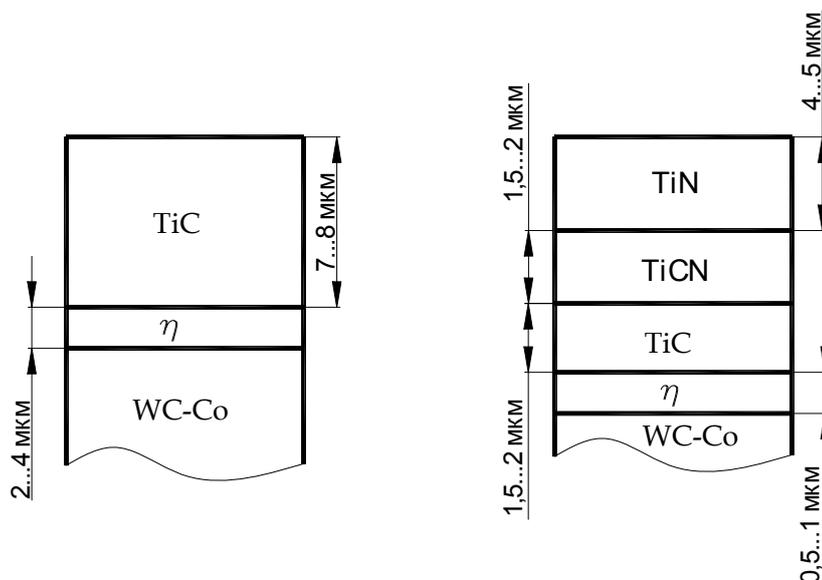


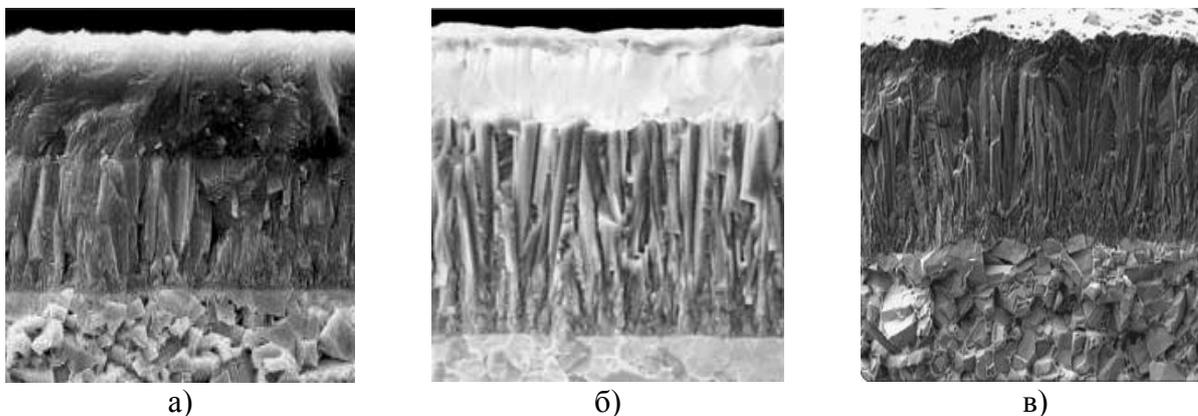
Рис. 5. Схема однослойного и многослойного покрытия ХОП

Формирование  $\eta$ -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  $\eta$ -фазы практически не происходит при использовании метода химического осаждения покрытий при средних температурах – medium-temperature CVD (MT-CVD), который реализуется при температурах 700...900 °С.

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, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Указанные соединения применяются как в качестве однослойных покрытий, так и в качестве отдельных слоев многослойного покрытия (рис. 6).



**Рис. 6. Фрактограммы излома твердосплавных пластин с различными CVD-покрытиями:**

а – твердый сплав + TiN-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; б – твердый сплав + TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN; в – твердый сплав + TiCN-TiN

Основным направлением совершенствования твердого сплава с CVD-покрытиями является снижение хрупкости его поверхностного слоя.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день порядка 80% всего выпускающегося твердосплавного инструмента имеют различные покрытия, большую часть которых составляют покрытия, нанесенные по технологиям CVD. 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 (Ti,Me)N, (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N.

### 1.3.2. Химическое осаждение с плазменным сопровождением (РА-CVD)

Основные преимущества процесса РА-CVD по сравнению с CVD заключаются в том, что при его реализации температуры процессов не превышают 600 °С, достигается более высокая прочность адгезионной связи покрытия и инструментальной основы.

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 РА-CVD часто достаточно сложно.

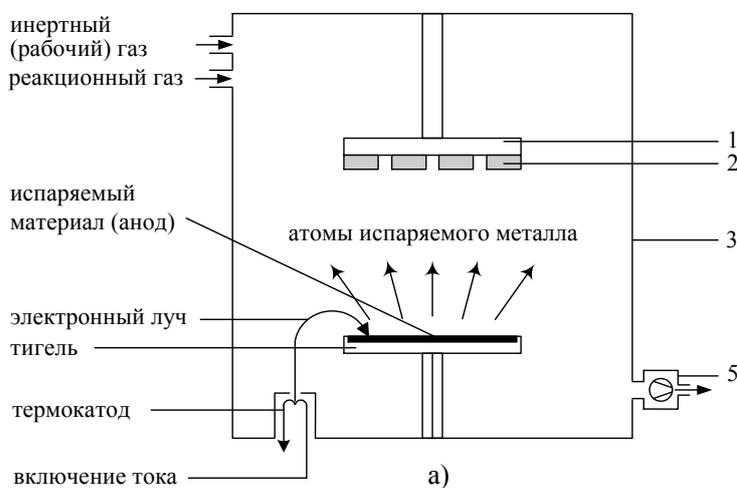
### 1.4. Методы физического осаждения износостойких покрытий

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.

Все вакуумно-плазменные методы, используемые для нанесения покрытий, можно условно разбить на три самостоятельные группы: ионно-термическое испарение (электронно-лучевое испарение), электродуговое испарение (метод КИБ) и осаждение распылением (магнетронное распыление).

**Ионно-термическое испарение.** Наибольшее распространение среди всех методов ионно-термического испарения получил метод электронно-лучевого испарения, принципиальная схема которого представлена на рис. 7.

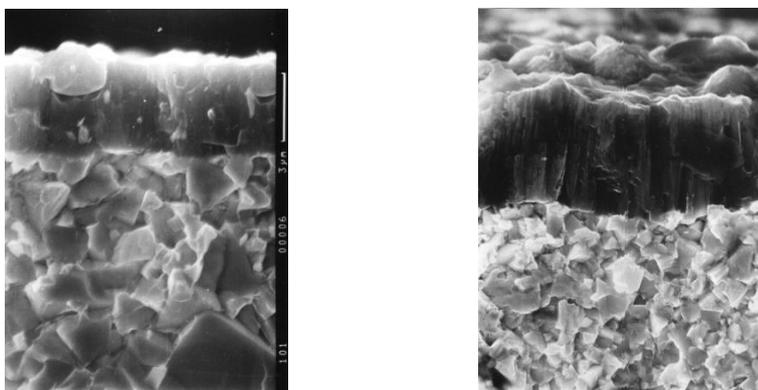


**Рис. 7. Принципиальная схема нанесения покрытий на режущие инструменты электронно-лучевым испарением:**  
**1 – держатель инструментов;**  
**2 – инструменты;**  
**3 – вакуумная камера;**  
**5 – вакуумный насос**

Процессы ионного осаждения, использующие термический перевод наносимого материала из твердого в парообразное состояние, получили в отечественной литературе название реактивных электронно-лучевых плазменных (РЭП).

В системах, реализующих метод РЭП, металл нагревается и испаряется с помощью электронно-лучевой пушки. В результате взаимодействия электронного луча с испаряемым металлом над его поверхностью возникает плазменная область - металлический пар, который взаимодействует с ионами реакционного газа, ускоряется в электрическом или магнитном поле и конденсируется на поверхности подложки (инструмента).

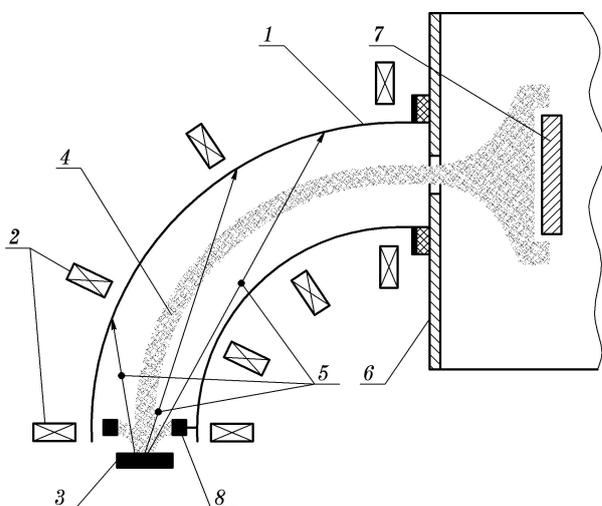
**Электродуговое испарение.** Особенности метода электродугового испарения, выгодно отличающими его от других, являются универсальность спектра наносимых покрытий (с точки зрения нанесения покрытий как на твердосплавный, так и на быстрорежущий инструмент и с точки зрения получения гаммы однослойных, многослойных, композиционных покрытий на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, оксидов и боридов тугоплавких металлов 4...6 группы периодической системы Менделеева), высокая производительность процесса (скорость осаждения до 40 мкм/ч) и высокая прочность адгезионной связи покрытия с инструментальной основой. Самым главным недостатком этого метода является наличие в генерируемом плазменном потоке большого количества микрокапель (рис. 8) 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 (рис. 9), что существенно их усложняет и удорожает.



а)

б)

**Рис. 8. Фотографии излома пластин ВК6 с покрытием TiAlN (КИБ):**  
а- капельная фаза в покрытии, б- капельная фаза на поверхности покрытия



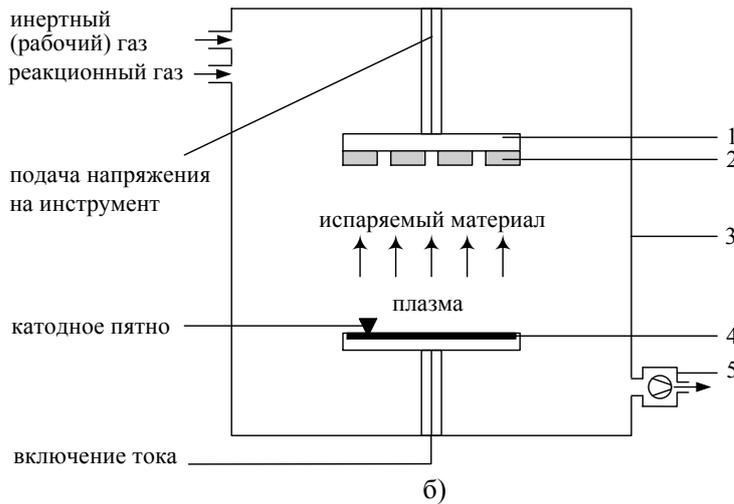
**Рис. 9. Схема очистки плазмы вакуумной дуги от микрокапель металла в магнитном поле:**

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

В нашей стране наибольшее промышленное распространение получил метод конденсации покрытий в условиях ионной бомбардировки

(КИБ). Его суть заключается в испарении материалов (получения металлического пара) 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.

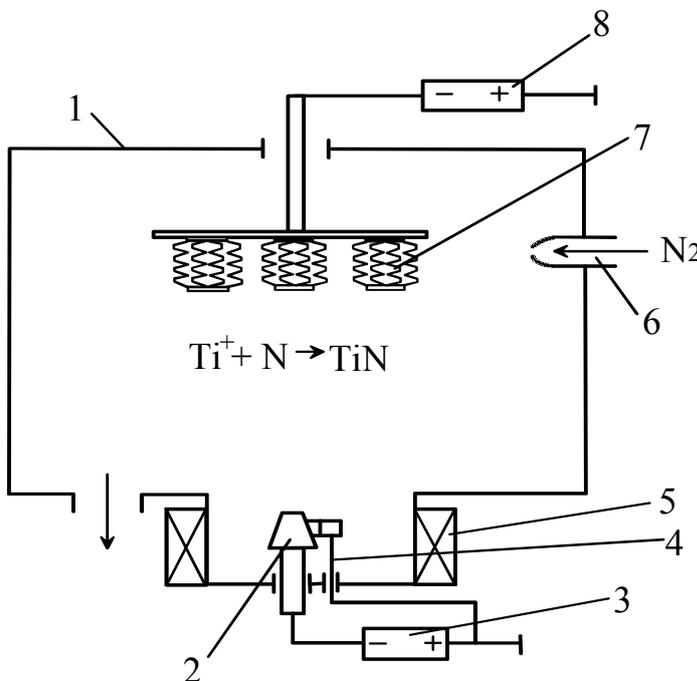
На рис. 10 и 11 представлены принципиальная схема установки для реализации описанного процесса.



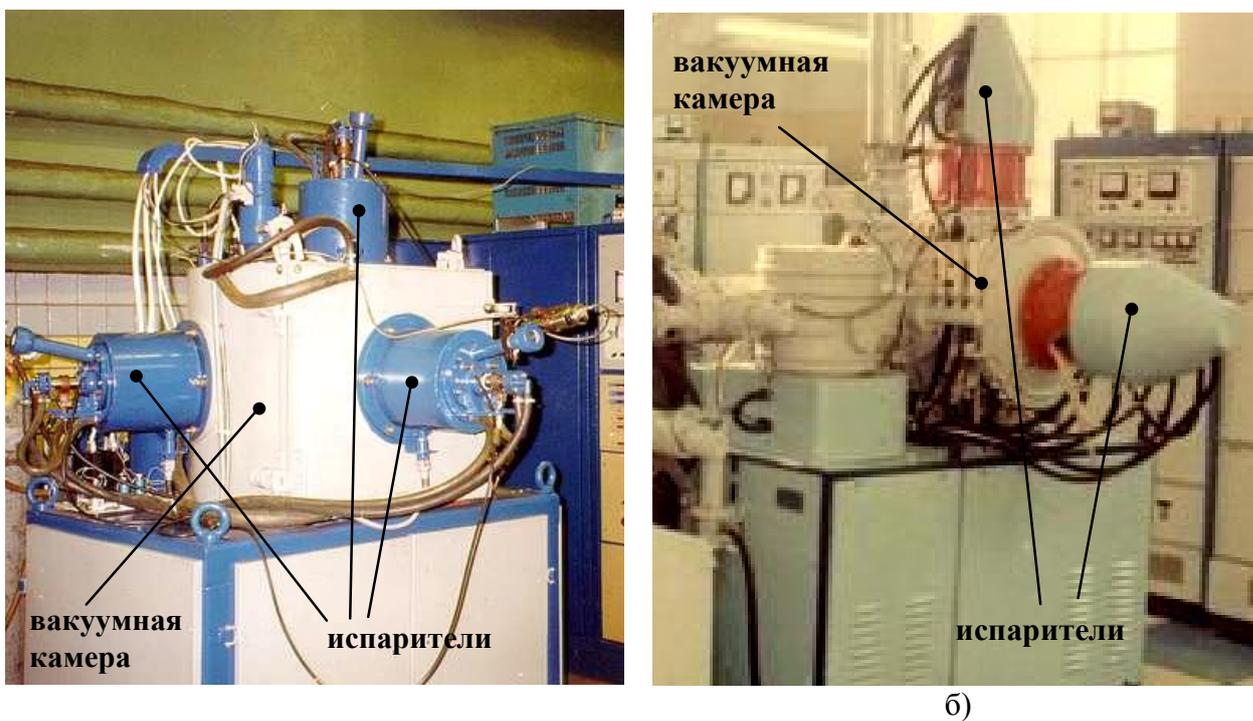
**Рис. 10. Принципиальная схема нанесения покрытий на режущие инструменты электродуговым испарением:**  
**1 – держатель инструментов;**  
**2 – инструменты;**  
**3 – вакуумная камера;**  
**4 – осаждаемый материал;**  
**5 – вакуумный насос**

Важную роль в технологии КИБ играет ионная бомбардировка, роль которой состоит в очистке и

термоактивации поверхности инструмента и «залечивании» поверхностных дефектов, которые могут быть на поверхности инструмента.



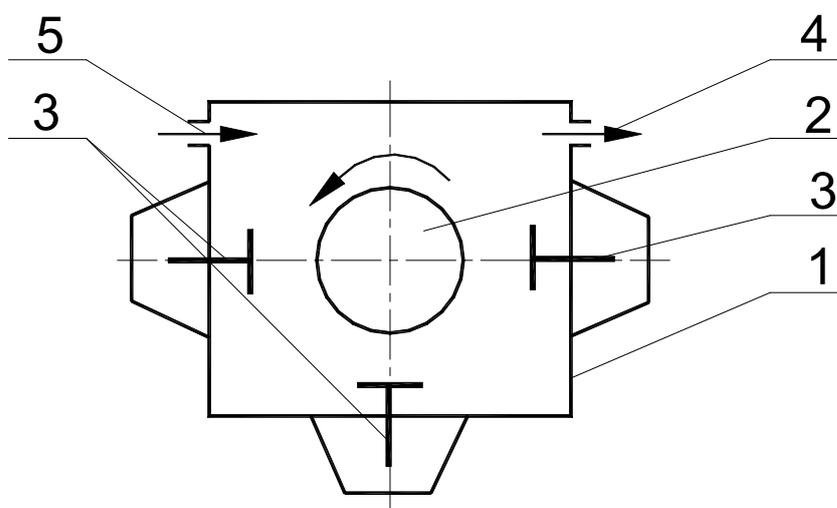
**Рис. 11. Принципиальная схема установки для нанесения покрытий на режущий инструмент методом конденсации с ионной бомбардировкой:**  
**1 – корпус вакуумной камеры;**  
**2 – титановый катод; 3 – источник питания разряда;**  
**4 – устройство поджига;**  
**5 – магнитная катушка; 6 – ввод реакционного газа;**  
**7 – режущий инструмент;**  
**8 – источник опорного напряжения**



а)

б)

**Рис. 12. Общий вид установок для электродугового осаждения покрытий, выпускавшихся в СССР: ННВ6.6-И1 (а) и «Булат-6» (б)**



**Рис. 13. Схема установки типа «БУЛАТ»:**

**1 – корпус установки, 2 – стол с РИ, 3 – катоды, 4 и 5 – системы создания вакуума и подачи реакционного газа**

Очистка и термоактивация обеспечивают прочность адгезии покрытия с инструментальной основой, «залечивание» - способствует повышению и стабилизации прочности на изгиб композиции «покрытие-инструментальный материал».

Общий вид установок для нанесения покрытий по методу КИБ представлен на рис. 12, а схемы установок - на рис. 13 и 14. На рис. 13 показана схема установки типа «БУЛАТ». Данная установка имеет три

катода-испарителя и вращающийся стол установки, что позволяет реализовать все преимущества метода КИБ с точки зрения получения различных покрытий, как по составу, так и по конструкции, высокого качества.

На рис. 14 представлена схема установки типа «ННВ». Данная установка имеет все преимущества установки «БУЛАТ». Но в отличие от нее на данной установке кроме вращения стола, имеется дополнительное вращение инструмента вокруг своей оси. Это позволяет получать на данной установке более равномерные по толщине покрытия.

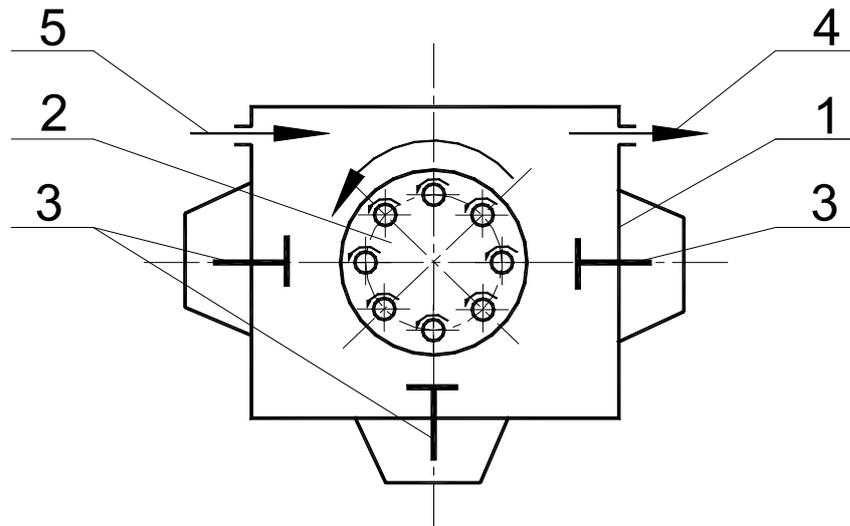


Рис. 14. Схема установки типа «ННВ» (позиции см. на рис. 12)

Схемы размещения различных режущих инструментов в камере установки для нанесения покрытий представлены на рис. 1.16 учебного пособия.

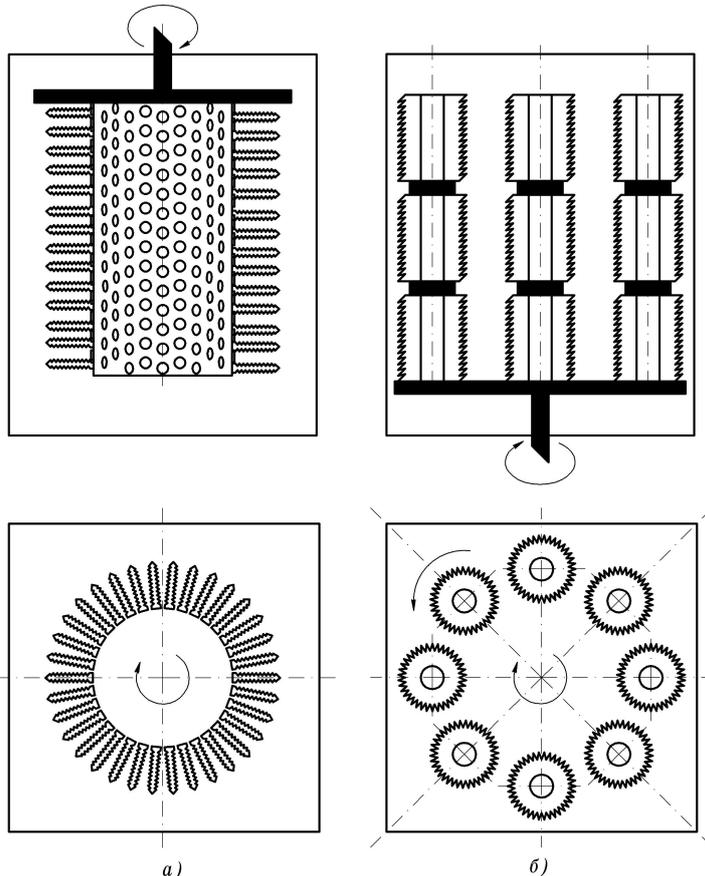


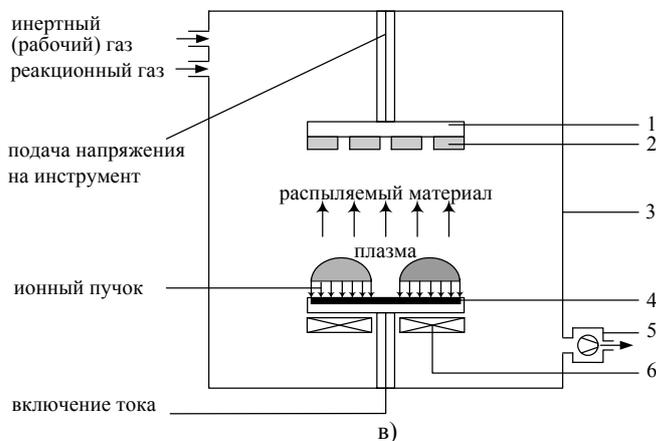
Рис. 15. Варианты расположения партии мелкогабаритного (а) и крупногабаритного (б) инструмента в вакуумной камере установки

Типовой технологический процесс осаждения покрытий электродуговым испарением на установке типа ННВ включает в себя последовательное выполнение следующих процедур: 1- Загрузка инструмента, прогрев и откачка вакуумной камеры; 2 - Очистка поверхности инструмента ионами инертного газа; 3 - Очистка поверхности катодов

инструмента бомбардировкой ионами металла и нагрев до рабочих температур; 4 - Нанесение покрытия; 5 - Охлаждение и выгрузка инструмента; 6 - Контроль качества инструмента с покрытием.

**Осаждение распылением.** Методы ионного (катодного) распыления основаны на распылении материала мишени, выполненной в форме диска, путем бомбардировки ее поверхности ионами инертного газа с одновременной подачей реакционного газа и последующей конденсации образовавшихся соединений на поверхность подложки (инструмента).

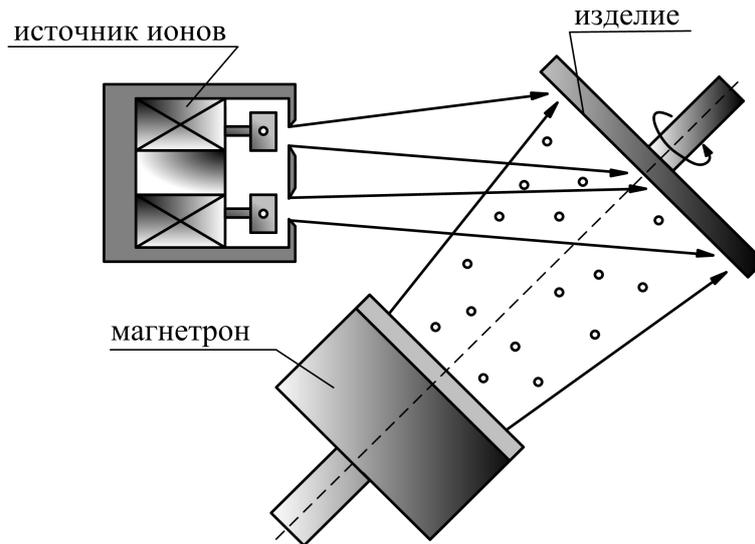
Разновидностью данного метода является магнетронное распыление, принципиальная схема которого приведена на рис. 16. Отличительной чертой методов распыления, в первую очередь магнетронных систем, является формирование высококачественных покрытий, не имеющих дефектов в виде капель и мелких частиц, нарушающих сплошность покрытия.



**Рис. 16. Принципиальная схема нанесения покрытий на режущие инструменты магнетронным распылением:**  
**1 – держатель инструментов;**  
**2 – инструменты; 3 – вакуумная камера;**  
**4 – осаждаемый материал;**  
**5 – вакуумный насос;**  
**6 – магнитная система для магнетронного распыления**

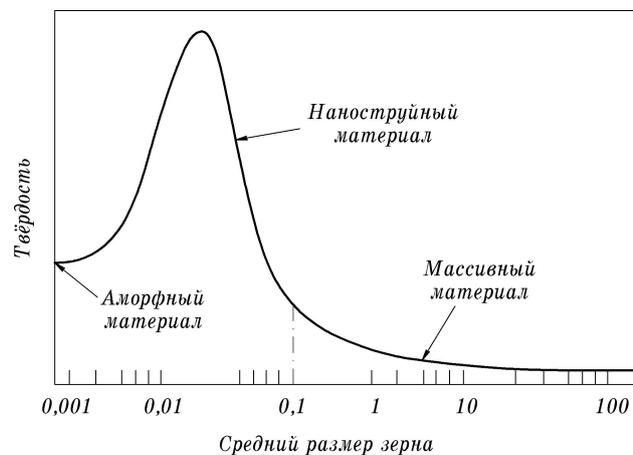
В то же время этим методам свойственен один серьезный недостаток, сдерживающий их более широкое распространение в инструментальном производстве – низкая скорость осаждения покрытий.

**Осаждение покрытий в сопровождении пучка ускоренных частиц и осаждение нанопокровий.** Технологии осаждения покрытий с ассистированием сегодня являются одними из наиболее перспективных и бурно развивающихся направлений. Данная технология заключается в том, что на подложку из отдельных источников поступает металлический пар и ускоренные частицы. Это позволяет получить покрытия более плотной структуры. Изменение кинетической энергии ассистирующих ионов позволяет управлять микротвердостью, остаточными напряжениями и другими характеристиками формируемого покрытия. Схема осаждения покрытий магнетронным распылением в сопровождении ионным пучком представлена на рис. 17.



**Рис. 17. Схема осаждения покрытий магнетронным распылением в сопровождении ионного пучка**

В настоящее время особый интерес во всем мире вызывают исследования, связанные с получением нанопокровтий с размерами зерен менее 100 нм, позволяющие реализовать в одном покрытии уникальный комплекс свойств.



**Рис. 18. Влияние среднего размера зерна на твердость материала**

На рис. 18 представлена зависимость изменения микротвердости покрытия от среднего размера его зерна. Видно, что измельчение структуры (уменьшение размера зерна) 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). Для дальнейшего повышения твердости требуется затормозить процесс скольжения по межзеренным границам, что 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.

На сегодняшний день в нашей стране и за рубежом для нанесения нанопокровтий, используются три основных технологических подхода: осаждение покрытий в условиях ионного ассистирования (данный подход был рассмотрен выше); осаждение многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины и осаждение многофазных покрытий.

### ***1.6. Подготовка поверхности РИ 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.

Назначение очистки удаление загрязнений и адсорбционных пленок с поверхностей РИ. По механизму протекания процессов все методы очистки классифицируют на физические и химические, а по применяемым средам – на жидкостные и сухие (рис. 1.22 из учебного пособия).

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. 1.23 учебного пособия представлена типовая схема подготовки твердосплавных пластин перед нанесением покрытий.

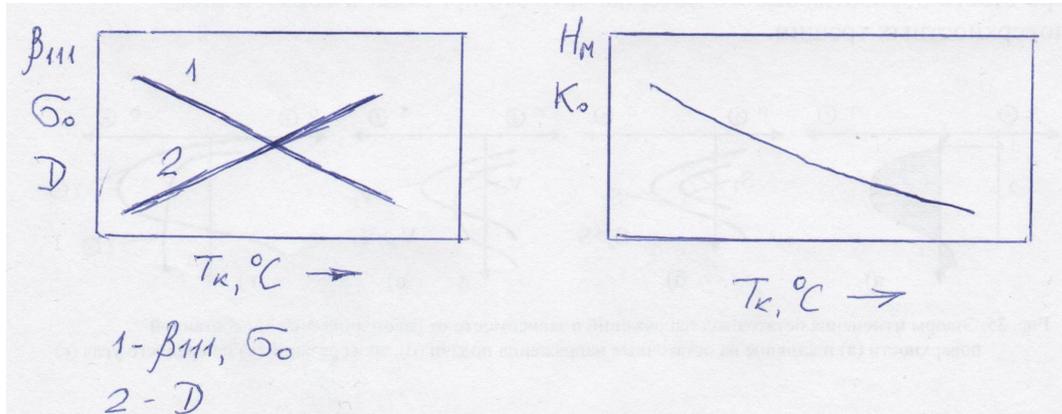
## **2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

### ***2.1. Изменение механических свойств износостойкого покрытия путем варьирования температурой конденсации***

Одним из основных факторов, определяющих работоспособность режущего инструмента с покрытием, является температура конденсации покрытия (рис. 2.13 учебного пособия).

Влияние температуры конденсации на параметры структуры и механические свойства представлено на рис. 19. Снижение температуры конденсации  $T_k$  ведет к повышению ширины рентгеновской линии ( $\beta_{111}$ ), микродеформации кристаллической решетки ( $\Delta a/a$ ), уменьшению размеров кристаллитов (зерен) ( $D$ ) и росту сжимающих остаточных напряжений  $\sigma_0$ . Увеличение микродеформации кристаллической решетки и уменьшение

размеров кристаллитов при снижении температуры конденсации вызывает рост микротвердости  $H_\mu$  покрытия. В то же время снижение температуры конденсации ведет к уменьшению прочности адгезии покрытия с твердосплавной основой, о чем свидетельствует повышение коэффициента отслоения  $K_0$ . (см. примеры из учебного пособия – табл.2.4 и 2.5 стр. 78.)

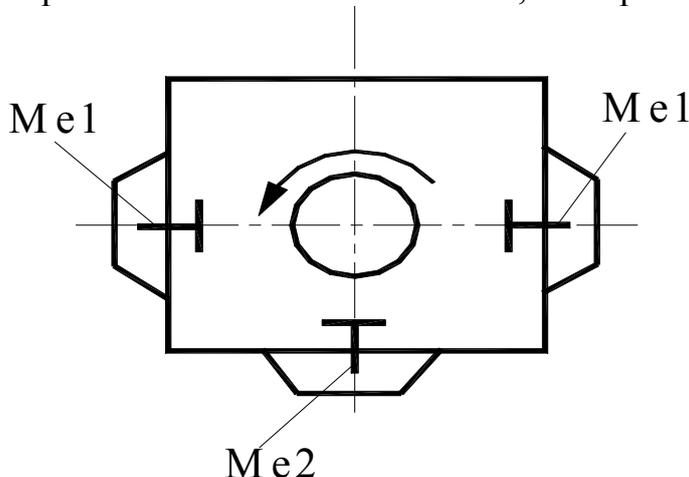


**Рис. 19.** Влияние температуры осаждения  $T_k$  °С на остаточные сжимающие напряжения  $\sigma_0$ , полуширину рентгеновской линии  $\beta_{III}$ , размеры блоков ОКР  $D$ , микротвердость  $H_\mu$  и коэффициент отслоения  $K_0$

Таким образом, варьируя температурой конденсации покрытия можно направленно изменять его физико-механические свойства.

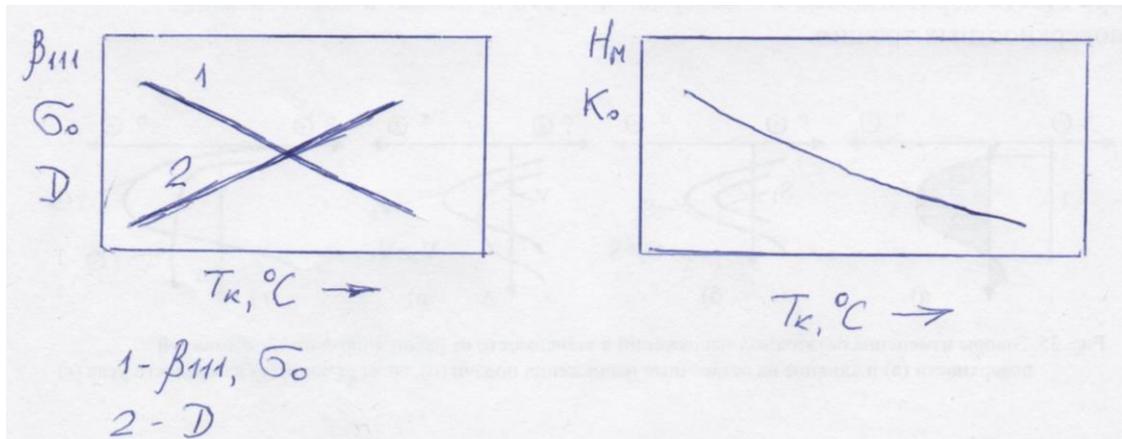
## **2.2. Изменение механических свойств износостойкого покрытия путем изменения его состава**

Направленное изменение механических свойств покрытий рассмотрим на примере двухэлементных нитридных покрытий  $Me_1Me_2N$ , компоновочная схема нанесения которых представлена на рис. 20. Покрытие наносится с использованием отдельных катодов (катодов полностью изготовленных из одного металла). Из двух противоположных катодов испаряется основной металл  $Me_1$ , а из расположенного между ними –  $Me_2$ .



**Рис.20.** Компоновочная схема установки для нанесения покрытия  $Me_1Me_2N$

размеров кристаллитов при снижении температуры конденсации вызывает рост микротвердости  $H_\mu$  покрытия. В то же время снижение температуры конденсации ведет к уменьшению прочности адгезии покрытия с твердосплавной основой, о чем свидетельствует повышение коэффициента отслоения  $K_0$ . (см. примеры из учебного пособия – табл.2.4 и 2.5 стр. 78.)

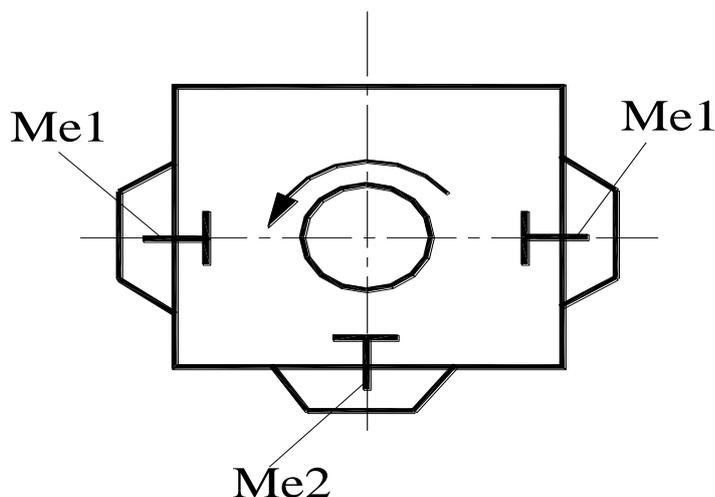


**Рис. 19. Влияние температуры осаждения  $T_k$   $^\circ C$  на остаточные сжимающие напряжения  $\sigma_0$ , полуширину рентгеновской линии  $\beta_{III}$ , размеры блоков ОКР  $D$ , микротвердость  $H_\mu$  и коэффициент отслоения  $K_0$**

Таким образом, варьируя температурой конденсации покрытия можно направленно изменять его физико-механические свойства.

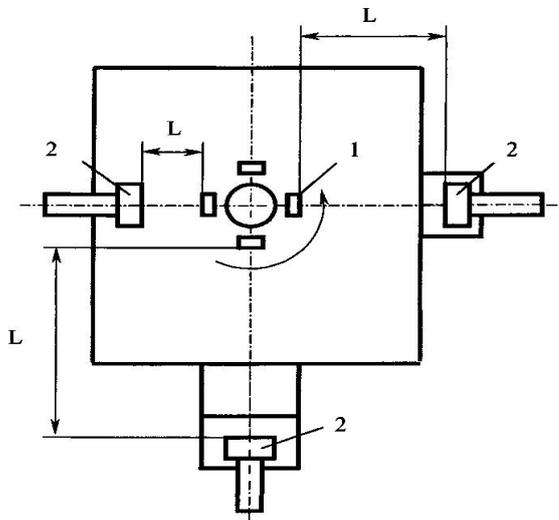
## **2.2. Изменение механических свойств износостойкого покрытия путем изменения его состава**

Направленное изменение механических свойств покрытий рассмотрим на примере двухэлементных нитридных покрытий  $Me_1Me_2N$ , компоновочная схема нанесения которых представлена на рис. 20 – из двух противоположных катодов испаряется основной материал  $Me_1$ , а из расположенного между ними –  $Me_2$ .



**Рис.20. Компоновочная схема установки для нанесения покрытия  $TiMe_1Me_2N$**

Варьирование состава покрытий обеспечивается путем изменения компоновочной схемы установки: количества катодов, их взаимного расположением в камере установки, расстояния от катода испарителя до режущего инструмента (рис. 21).

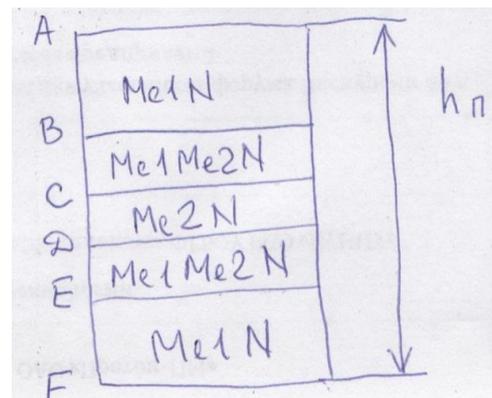
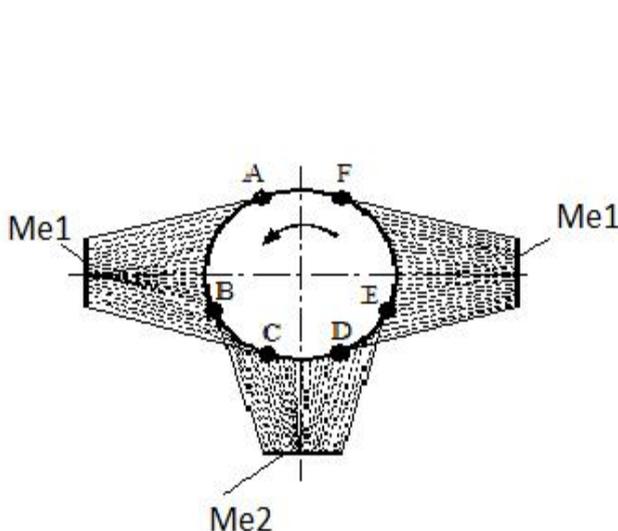


**Рис. 21. Схема варьирования составом покрытия:**

**1 – режущий инструмент,  
2 – катоды испарители**

Как следует из рис. 22, при вращении стола установки инструмент будет поочередно проходить мимо каждого из катодов. При этом за один оборот стола на его поверхность будут осаждаться мультислои нитридов отдельных компонентов – участки АВ, CD и EF – и мультислои нитридов сложного

состава – участки ВС и DE, где происходит смешивание ионных потоков от двух соседних катодов-испарителей (строение покрытия за один оборот стола установки показана на рис. 23). Таким образом, планетарное перемещение режущего инструмента в камере установки приводит к образованию за один оборот стола установки мультислойной структуры с чередованием мультислоев отдельных фаз покрытия  $Me_1N$  и  $Me_2N$ , разделенных друг от друга переходными мультислоями переменного состава  $Me_{1-x}Me_{2-x}N$  (см. рис. 2.12 из учебного пособия).

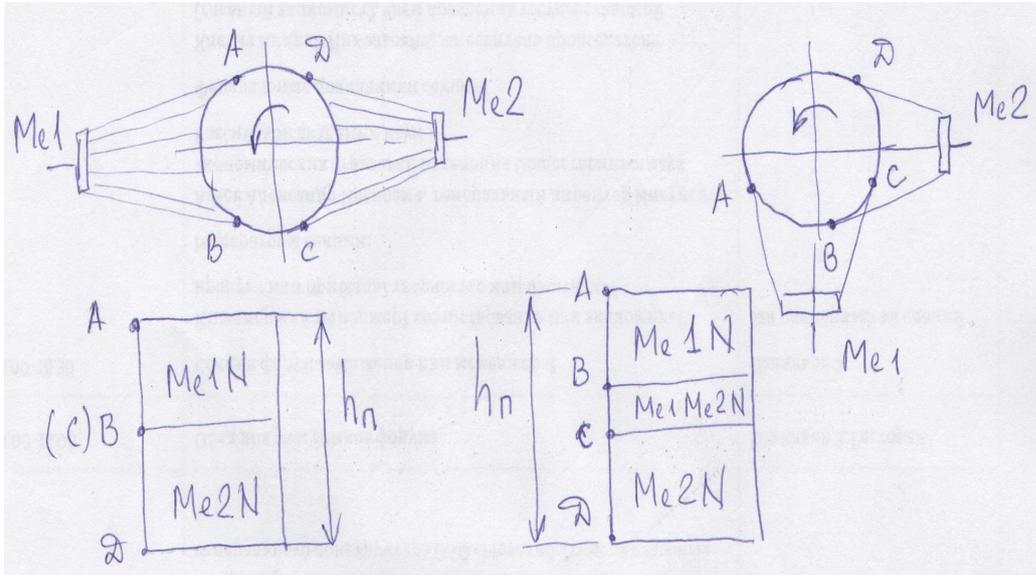


a)

б)

**Рис. 22. Схема движения плазменных потоков (а) и строение слоя за один оборот стола установки (б) при нанесении покрытия  $Me_1Me_2N$**

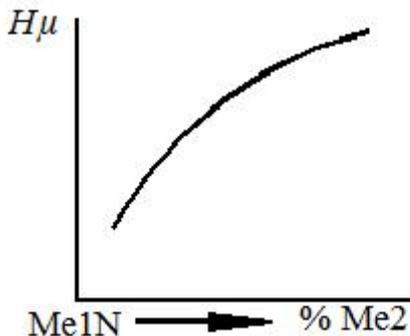
Строение слоя покрытия, полученного за один оборот стола установки, зависит от компоновочной схемы. Примеры влияния компоновочной схемы установки на строение покрытия за один оборот установки показаны на рис. 23.



**Рис. 23. Влияние компоновочной схемы на строение слоя покрытия, нанесенного за один оборот стола установки**

Как видно из рис. 23, строение слоя покрытия, полученное за один оборот установки, для различных компоновочных схем отличается количеством мультислоев, их толщиной и расположением. Учитывая, что мультислои имеют различные механические свойства, покрытие  $Me_1Me_2N$ , сформированное при различных компоновочных схемах, будет иметь различные свойства.

Таким образом, изменяя компоновочную схему установки, можно варьировать составом покрытия и направленно управлять его механическими свойствами (рис. 24).



**Рис. 24. Влияние содержания элемента  $Me_2$  на микротвердость покрытия  $Me_1Me_2N$**

Повышение микротвердости покрытия  $Me_1Me_2N$ , полученного с использованием отдельных катодов, объясняется действием двух механизмов упрочнения материала покрытия при его конденсации: механизм твердорастворного упрочнения за счет образования твердого раствора  $Me_1Me_2N$  и механизм

упрочнения микроструктурными барьерами за счет образования границ между отдельными мультислоями покрытия.

### 2.3. Изменение механических свойств износостойкого покрытия путем изменения состава газовой среды при конденсации

Изменение механических свойств за счет варьирования состава газовой среды рассмотрим на примере нанесения карбонитридного покрытия MeCN. Компоновочная схема нанесения покрытия представлена на рис. 25.

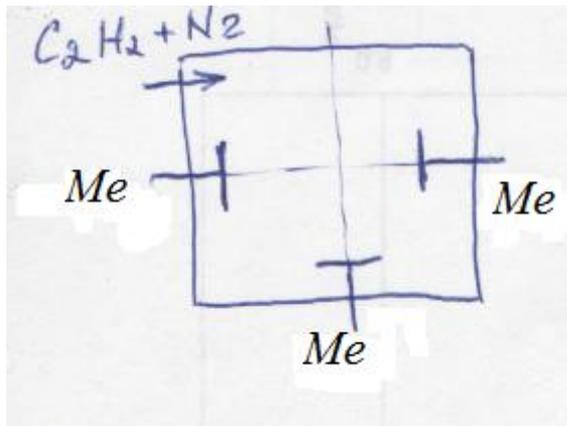


Рис. 25. Компоновочная схема нанесения покрытия MeCN

При нанесении покрытий на основе карбонитридов в камеру установки подается смесь реакционных газов азота  $N_2$  и ацетилена  $C_2H_2$ .

Повышение содержания ацетилена (рис. 26) в составе реакционного газа вызывает рост периода кристаллической решетки, ширины рентгеновской линии, что, как и в случае с покрытием  $Me_1Me_2N$ , свидетельствует о повышении уровня микродеформации кристаллической решетки и повышает сжимающие остаточные напряжения.

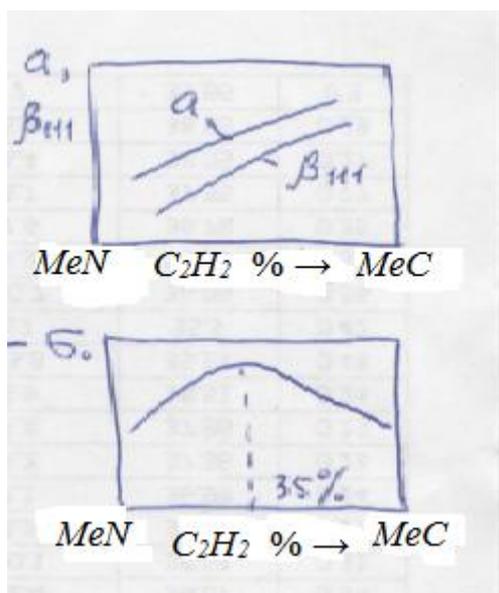


Рис. 26. Влияние содержания ацетилена в составе реакционного газа на структурные параметры и остаточные напряжения покрытия MeCN

Изменение параметров структуры и остаточных сжимающих напряжений вызывают изменение механических свойств покрытия MeCN.

Повышение содержания ацетилена ведет к росту микротвердости покрытия и других механических свойств (рис. 27).

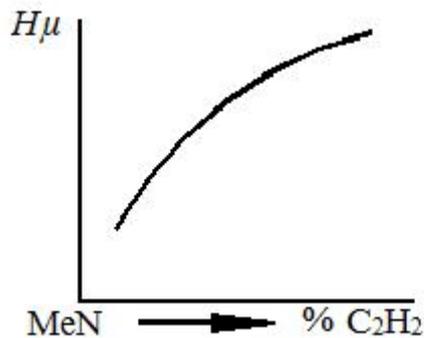


Рис. 27. Влияние содержания  $C_2H_2$  на микротвердость (а) и коэффициент отслоения (б) покрытия MeCN

Таким образом, изменяя содержание ацетилена в составе реакционного газа при нанесении карбонитридных покрытий позволяет направленно управлять механическими свойствами покрытия.

### 3. НАНЕСЕНИЕ ОДНОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

#### 3.1. Нанесение износостойких покрытий в комбинированном температурном режиме (КТР)

Влияние температуры конденсации на период стойкости инструмента с покрытием TiN показано на рис. 28. Как видно, имеет место оптимальная температура, при которой достигается максимальный период стойкости режущего инструмента. Снижение периода стойкости РИ с ИП при конденсации ИП при низкой температуре, связано с недостаточной прочностью адгезии ИП с инструментальной основой. Снижение периода стойкости РИ с ИП при конденсации ИП при высокой температуре объясняется уменьшением микротвердости покрытия и снижением сжимающих остаточных напряжений, которые в меньшей степени сдерживают процессы трещинообразования в покрытиях в процессе резания.

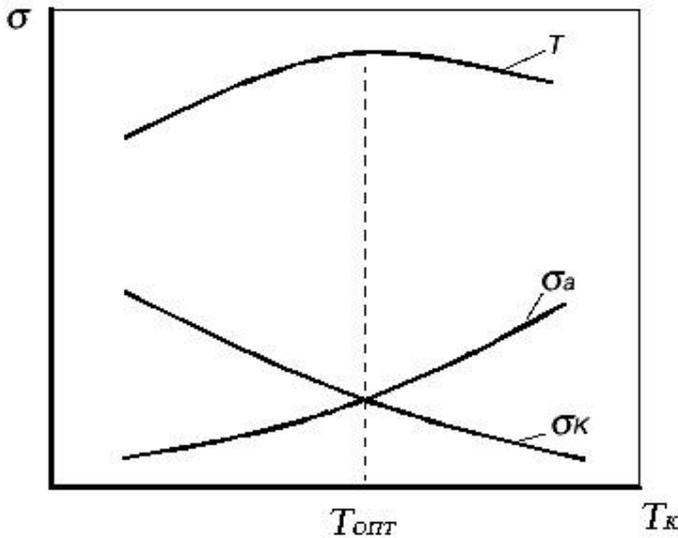


Рис. 28. Влияние температуры конденсации  $T_k$  на период стойкости  $T$  режущего инструмента, адгезионную прочность  $\sigma_a$  (1/Ко) и когезионную прочность  $\sigma_k$  (Нц)

Для эффективного использования свойств материала покрытия, полученного при низких температурах конденсации (высокая микротвердость, меньший размер блоков, высокие сжимающие остаточные напряжения)

необходимо обеспечить его достаточную прочность адгезии с инструментальной основой, которая при низких температурах невысока.

Для реализации этого конденсацию покрытия необходимо проводить в два этапа: нанесение внутреннего слоя покрытия при высокой температуре, при этом обеспечивается прочная адгезия покрытия с инструментальной основой, и последующее нанесение покрытия при возможно низкой температуре, что обеспечит высокие микротвердость и износостойкость покрытия.

Такая технология нанесения покрытия получила название – осаждение покрытий в комбинированном температурном режиме (КТР).

По технологии КТР покрытие наносится в два этапа: внутренний слой толщиной  $h_v$  осаждается при температуре 450...650 °С (в зависимости от материала инструментальной основы – быстрорежущая сталь или твердый сплав); внешний слой толщиной  $h_n$  – при температуре 250...300 °С (рис. 29).

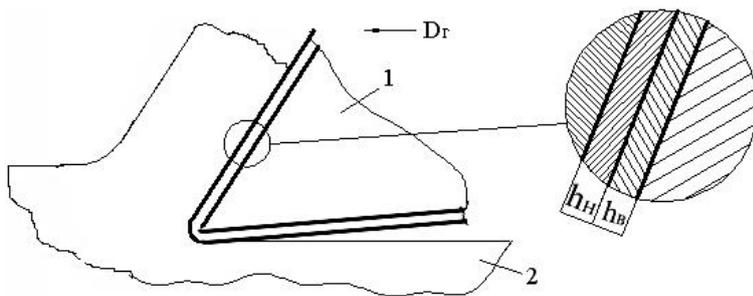
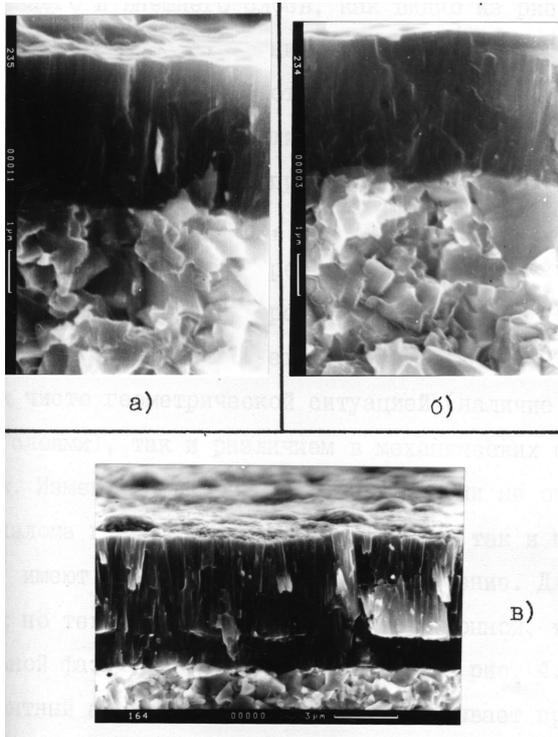


Рис. 29. Схема конструкции покрытия, полученного в комбинированном температурном режиме:

$h_v$  и  $h_n$  – соответственно внутренний и внешний слой покрытия;

1 – режущий инструмент, 2 – заготовка

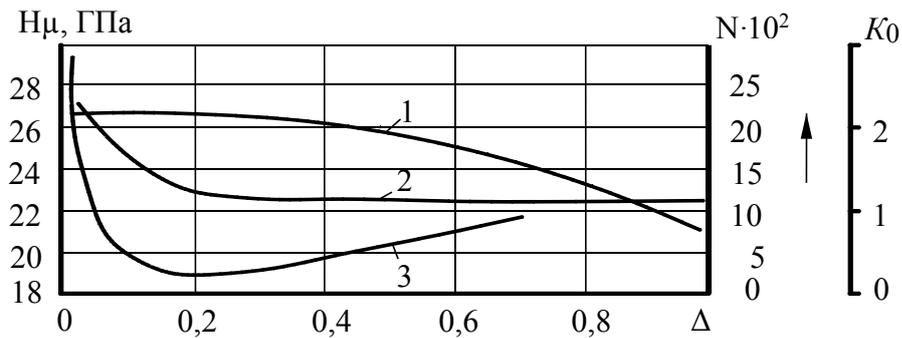
На рис. 30 показаны фрактограммы излома твердосплавных пластин с покрытием TiN, полученных по традиционной технологии (а, б) и технологии КТР (в). Видно, что для покрытия, полученного по технологии КТР, наблюдается четкая граница между верхним и нижним слоями, которая отсутствует у покрытий, нанесенных по традиционной технологии.



**Рис. 30. Фотографии излома покрытий TiN, полученных по традиционной технологии (а, б) и технологии КТР (в)**

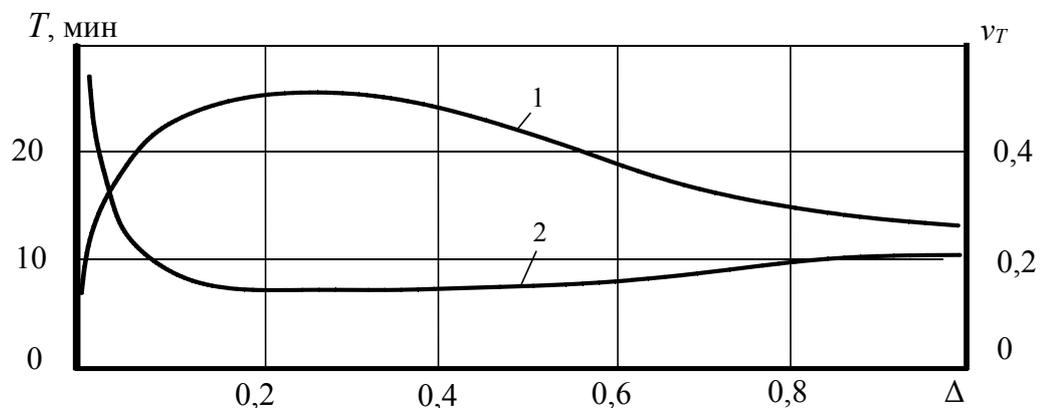
Эффективность таких покрытий определяется соотношением толщин верхнего и нижнего слоя  $\Delta = h_{\text{в}}/h_{\text{н}}$ .

Сочетание высокой твердости, трещиностойкости покрытия и прочности его адгезионной связи с инструментальной основой обеспечивается при соотношении толщин слоев покрытия ( $\Delta = h_{\text{в}}/h_{\text{н}}$ ), равном 0,2 (рис. 31).



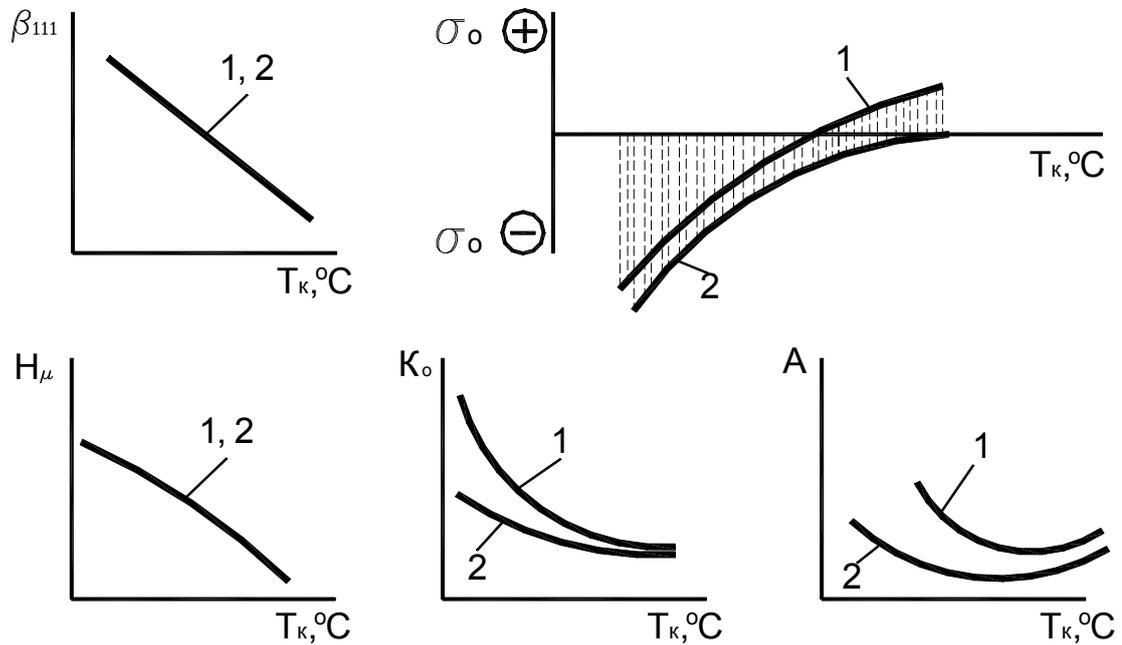
**Рис. 31. Влияние соотношения слоев покрытия  $\Delta$  на микротвердость  $H_{\mu}$  (1), коэффициент отслоения  $K_0$  (2) и трещиностойкость  $N$  (3)**

Данному соотношению толщин слоев покрытия соответствует максимальный период стойкости режущего инструмента (рис. 32).



**Рис. 32. Влияние соотношения слоев покрытия  $\Delta$  на период стойкости  $T$  (1) и коэффициент вариации периода стойкости  $\nu_T$  (2)**

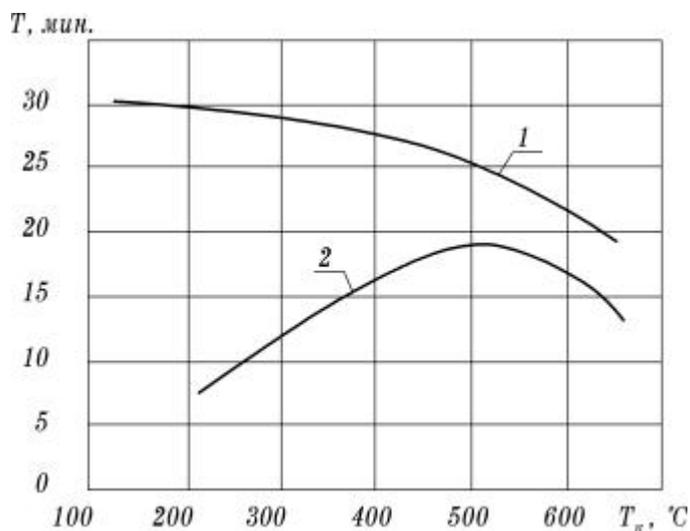
На рис. 33 показано сравнение параметров структуры, прочности адгезии и микротвердости покрытий TiN, полученных в комбинированном температурном режиме и по традиционной технологии, при различной температуре конденсации.



**Рис. 33. Влияние температуры конденсации ( $T_k$ ) на структурные параметры, механические свойства покрытия и работоспособность режущего инструмента:**  
1 – традиционная технология; 2 – технология КТР

Как и для покрытий, полученных по традиционной технологии, снижение температуры конденсации ведет к увеличению рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , остаточных напряжений  $\sigma_0$  и микротвердости покрытий КТР. Наличие внутреннего слоя в данных покрытиях повышает трещиностойкость покрытия и прочность его адгезионной связи с инструментальной основой.

Более высокая трещиностойкость покрытий, полученных в комбинированном температурном режиме, обусловлена не только высокой прочностью адгезионной связи с основой инструмента, но и формированием при относительно низких температурах  $T_k$  мелкозернистой структуры с высоким уровнем микроискажений кристаллической решетки.



более высокой прочностью адгезионной связи с основой инструмента, но и формированием при относительно низких температурах  $T_k$  мелкозернистой структуры с высоким уровнем микроискажений кристаллической решетки.

**Рис. 34. Влияние температуры конденсации на период стойкости РИ:**  
1 – технология КТР,  
2 – традиционная технология

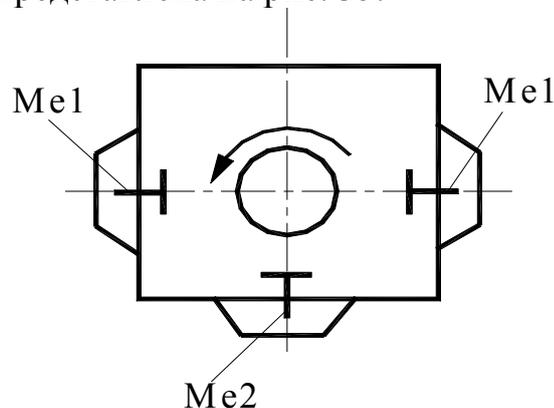
Нанесение покрытий, полученных в таких условиях, изменяет характер зависимости периода стойкости режущего инструмента от температуры конденсации (рис. 34).

С уменьшением температуры  $T_k$  период стойкости пластин с покрытиями, полученными в комбинированном температурном режиме, постепенно возрастает, в то время как для пластин с покрытием, полученным по традиционной технологии, он начинает уменьшаться после снижения  $T_k$  ниже так называемой оптимальной температуры. Повышение периода стойкости пластин с покрытиями КТР при температурах выше оптимальной связано с их более высокой прочностью адгезии с инструментальной основой и трещиностойкостью, а также появлением границы между слоями покрытия (рис. 31), которая способствует сдерживанию процесса развития трещин в покрытии. Повышение периода стойкости режущего инструмента с покрытиями КТР в 1,5 – 2 раза по сравнению с аналогичными покрытиями, полученными по традиционной технологии.

### ***3.2. Нанесение многоэлементных износостойких покрытий на основе нитрида и карбонитрида титана***

#### *3.2.1. Нанесение двухэлементных нитридных покрытий*

Компоновочная схема установки для нанесения двухэлементных износостойких покрытий на основе нитрида титана с использованием отдельных катодов представлена на рис. 35.



**Рис. 35. Компоновочная схема установки для нанесения двухэлементных покрытий**

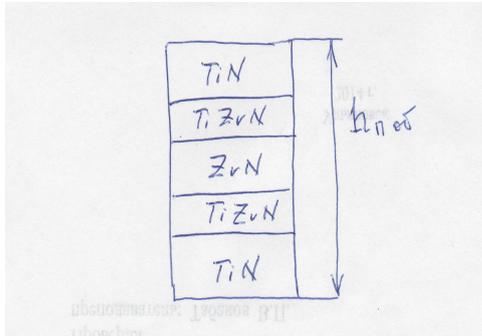
Варьирование состава покрытий, например, TiZrN, TiMoN, TiCrN обеспечивается путем изменения компоновочной схемы установки: количества катодов, их взаимным расположением в камере установки, расстоянием от катода испарителя до режущего инструмента.

Так, при нанесении покрытий: TiZrN – используются катоды Me1 – Ti и Me2 – Zr; покрытий TiCrN – катоды Me1 – Ti и Me2 – Cr; покрытий ZrMoN – катоды Me1 – Zr и Me2 – Mo; покрытий TiNbN – катоды Me1 – Ti и Me2 – Nb.

Рассмотрим в качестве примера двухэлементные покрытия TiZrN, полученные из отдельных катодов. Данные покрытия являются

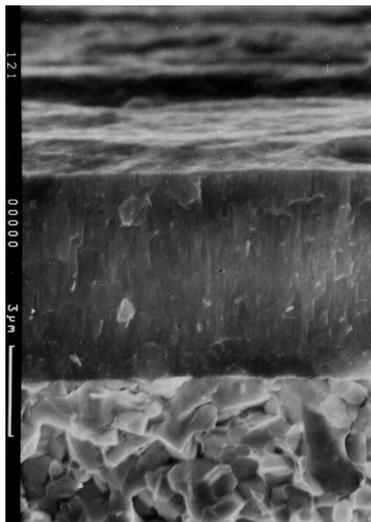
двухфазными. В них одновременно присутствуют две ГЦК фазы, близкие по составу соответственно нитриду титана и нитриду циркония.

При осаждении покрытия, а один оборот стола установки образуется мультислоистая структура, состоящая из мультислоев отдельных фаз TiN и ZrN, разделенных между собой переходным мультислоем  $Ti_xZr_{1-x}N$  (рис. 36).

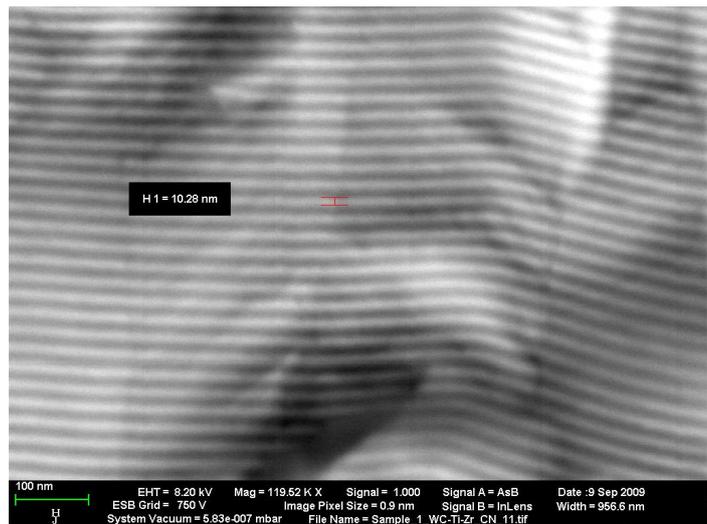


**Рис. 36. Структура слоя покрытия TiZrN, нанесенного за один оборот стола установки**

Фотографии излома твердосплавной пластины с покрытием TiZrN и его мультислоистой структуры представлены на рис. 37, на котором четко видны мультислои фаз покрытия TiN и ZrN.



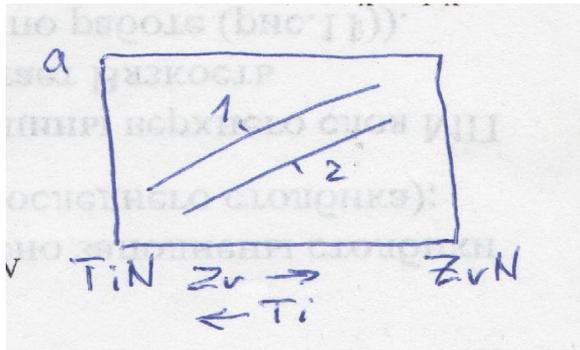
а)



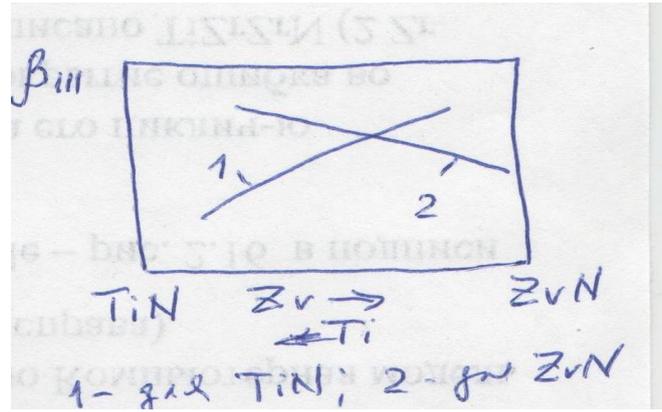
б)

**Рис. 37. Фотография поперечного излома (а) и мультислоистая структура (б) покрытия TiZrN в отраженных электронах: светлые слои – ZrN, темные - TiN**

Увеличение содержания Zr в покрытии повышает величину линии  $\beta_{111}$  для фазы TiN, аналогично, как и повышение содержания Ti ведет к повышению величины  $\beta_{111}$  для фазы ZrN (рис. 38, б), что свидетельствует о повышении уровня микродеформации кристаллической решетки и уменьшении размеров блоков ОКР.



а)



б)

Рис. 38. Влияние состава покрытия TiZrN на период кристаллической решетки (а) и ширину рентгеновской линии (б)

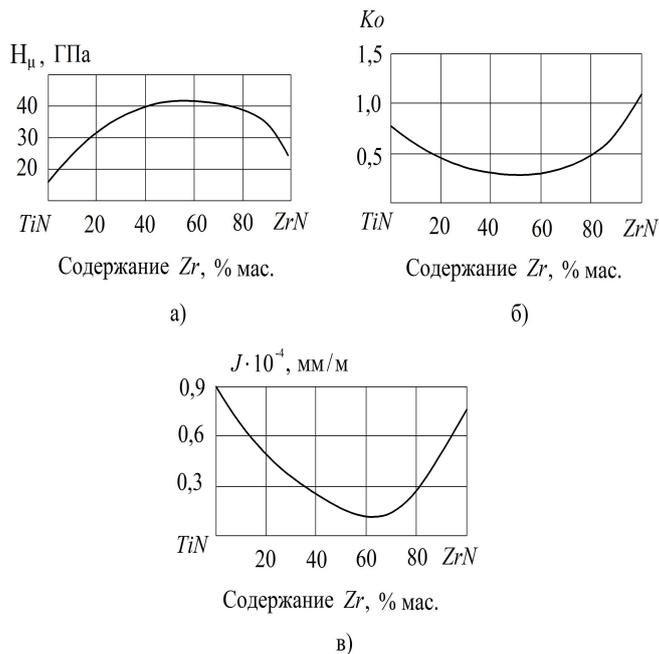


Рис. 39. Влияние состава покрытия TiZrN на микротвердость  $H_{\mu}$  (а), коэффициент отслоения  $K_0$  (б) и интенсивность износа  $J$  (в)

Это в свою очередь вызывает рост микротвердости покрытия (рис. 39, а). Зависимость микротвердости от состава покрытия имеет экстремальный характер, аналогичный изменению величины  $\beta_{111}$ . Повышение содержания Zr в покрытии TiZrN ведет к росту прочности адгезии, что объясняется мультислойной структурой покрытия, а зависимость  $K_0$  от состава покрытия имеет экстремальный характер (рис. 39, б).

Изменение механических свойств покрытия сказывается на интенсивности износа режущего инструмента (рис. 39, в). При этом зависимость интенсивности износа от состава также имеет вид кривой с экстремумом, как и аналогичные зависимости структурных параметров и механических свойств покрытий.

Для каждого двухэлементного покрытия имеет место оптимальное содержание элементов, обеспечивающее максимальное повышение работоспособности режущих пластин при обработке заготовок из различных материалов. (см. пример из учебного пособия – рис. 3.9 и 3.10, стр. 95). Применение двухэлементных нитридных покрытий повышает период стойкости твердосплавных пластин в 1,5 – 4 раза по сравнению с одноэлементными покрытиями.

Повышение микротвердости двухэлементных покрытий связано с изменением структурных параметров при их легировании. В этой связи появляется возможность замены в двухэлементных покрытиях легирующих тугоплавких элементов, таких как цирконий, молибден, хром и другие, на алюминий, железо и кремний.

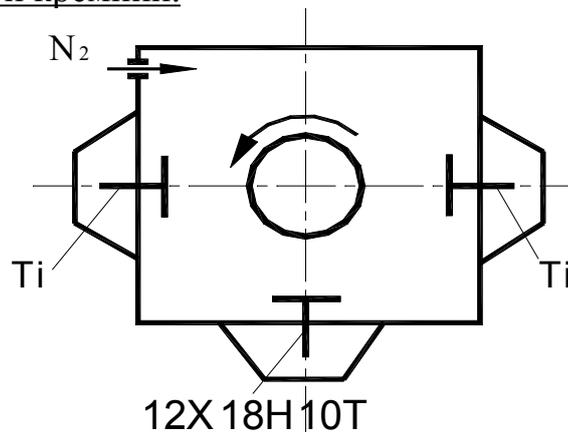


Рис. 40. Компоновочная схема нанесения покрытия **TiFeN**

При нанесении покрытия TiFeN (так как содержание железа в суммарном проценте примесных атомов Fe, Ni, Cr наибольшее, в формуле покрытия присутствует только железо) устанавливается два катода из титана и катод из нержавеющей стали 12X18H10T (рис. 40).

Пример из учебного пособия табл. 3.7, 3.8 и 3.9, стр. 96-97.

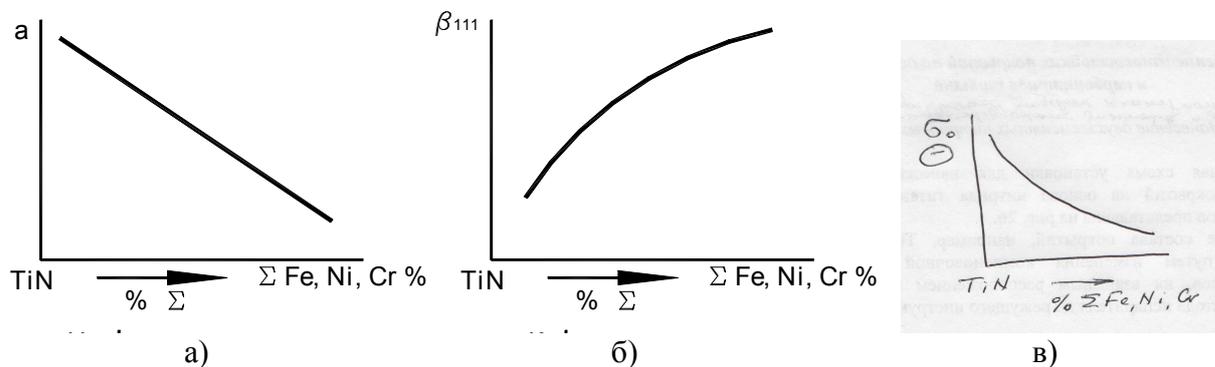


Рис. 41. Влияние содержания железа (примесных атомов) на период решетки (а), ширину рентгеновской линии (б) и остаточные сжимающие напряжения (в) покрытия **TiFeN**

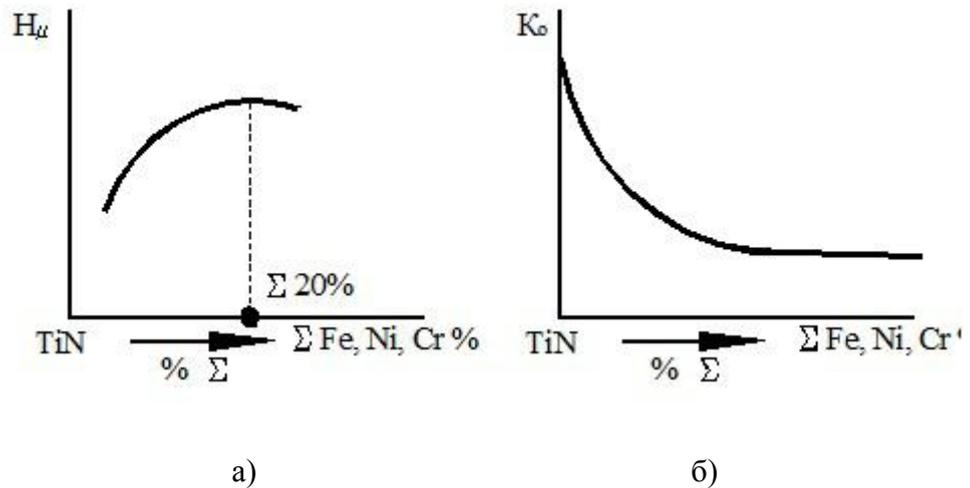


Рис. 42. Влияние содержания железа (примесных атомов) на микротвердость (а) и коэффициент отслоения (б) покрытия TiFeN

Покрытие TiFeN является однофазным. Присутствует фаза TiN. За один оборот стола установки образуется мультислойная структура с чередованием слоев нитрида титана TiN, TiFeN и мультислоя чистого железа (Fe, Ni, Cr) (рис. 43).

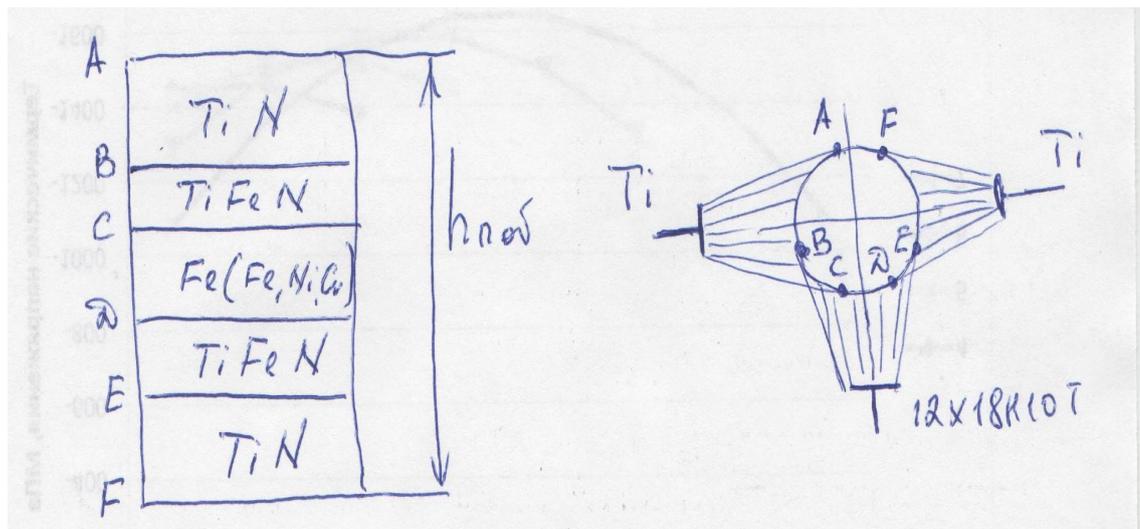
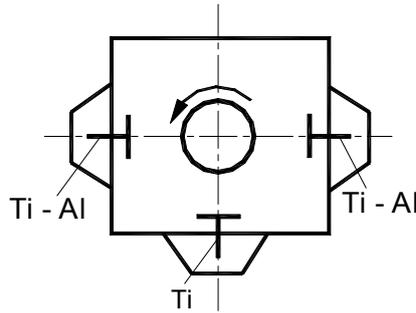


Рис. 43. Структура слоя покрытия TiFeN, нанесенного за один оборот стола установки

Повышение содержания в покрытии железа вызывает аналогичные изменения параметров структуры (рис. 41) и механических свойств (рис. 42), как это имело место для покрытий TiZrN, полученных из отдельных катодов (повышается величина  $\beta_{111}$ , микротвердость). Наличие в покрытии чистых слоев железа и увеличение их толщины при его повышении ведет к снижению остаточных напряжений и коэффициента отслоения  $K_{\sigma}$ , что свидетельствует о росте прочности адгезии покрытия..

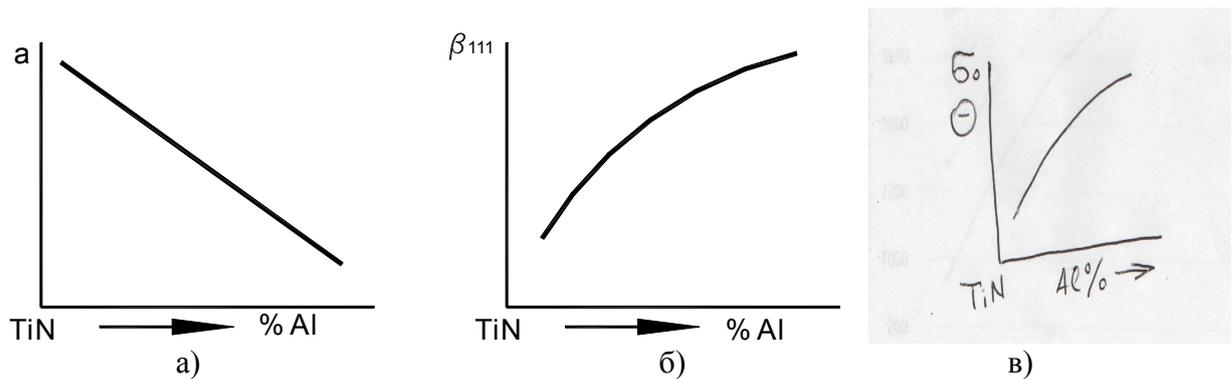
Максимальное значение микротвердости покрытия, которая выше в 1,2 раза выше по сравнению с нитридом титана, имеет место при содержании железа порядка 20%. Дальнейшее увеличение содержания примеси ведет к

росту толщины слоев чистого железа в общей толщине покрытия, и микротвердость снижается.



**Рис. 44. Компоновочная схема установки для нанесения покрытия TiAlN**

При нанесении покрытия TiAlN используются три катода из сплава титана и алюминия или два катода из сплава титана и алюминия и катода из титана (рис. 44).



**Рис. 45. Влияние содержания алюминия на период решетки (а), ширину рентгеновской линии (б) и остаточные сжимающие напряжения (в) покрытия TiAlN**

Покрытия TiAlN также имеет однофазную структуру с ГЦК решеткой, аналогичной решетке нитрида титана. Увеличение Al вызывает аналогичные изменения параметров структуры – увеличиваются величина  $\beta_{111}$  (рис. 45, б)), микротвердость (рис. 46) и остаточные напряжения (рис. 45, в), как это имело место для покрытия TiZrN, полученных из отдельных катодов. Микротвердость покрытий TiAlN ( $40 \pm 2,5$ ) ГПа в 1,5 раза выше по сравнению с покрытием TiN.

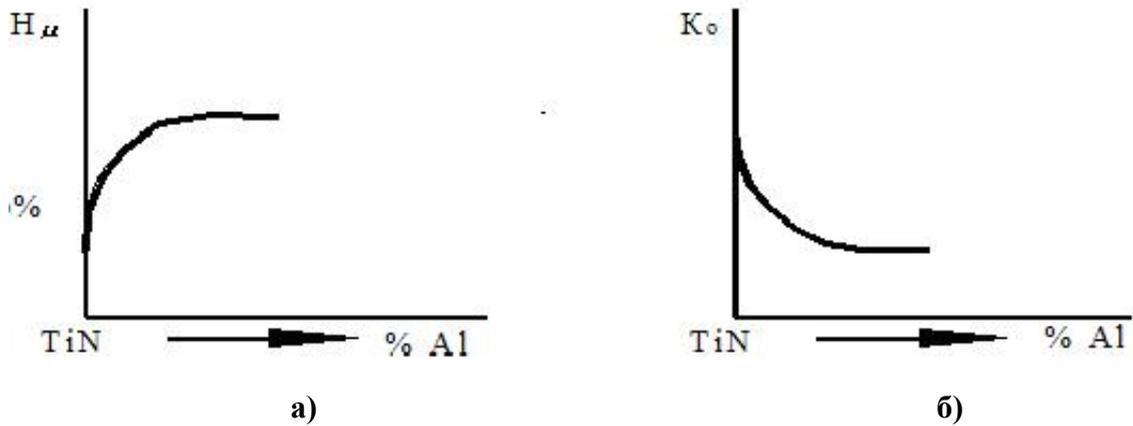


Рис. 46. Влияние содержания алюминия на микротвердость (а) и коэффициент отслоения (б) покрытия TiAlN

Для покрытий TiAlN характерна более высокая прочность адгезии с инструментальной основой по сравнению с покрытием TiN (рис. 46,б). Применение покрытий TiFeN и TiAlN позволяет повысить период стойкости твердосплавного инструмента в 2,0 – 2,8 раза по сравнению с покрытием TiN при обработке заготовок из конструкционных сталей.

### 3.2.2. Нанесение карбонитридных покрытий

Нанесение карбонитридных покрытий рассмотрим на примере покрытия TiZrCN, полученного из отдельных катодов.

Компоновочная схема установки для нанесения покрытия представлена на рис. 47,а. Покрытие наносится из отдельных катодов, изготовленных из титана и циркония. Покрытие является двухфазным (фазы TiCN и ZrCN). За один оборот стола установки образуется мультислойная структура (рис. 47,б), аналогичная той, которая имела место для покрытий TiZrN.

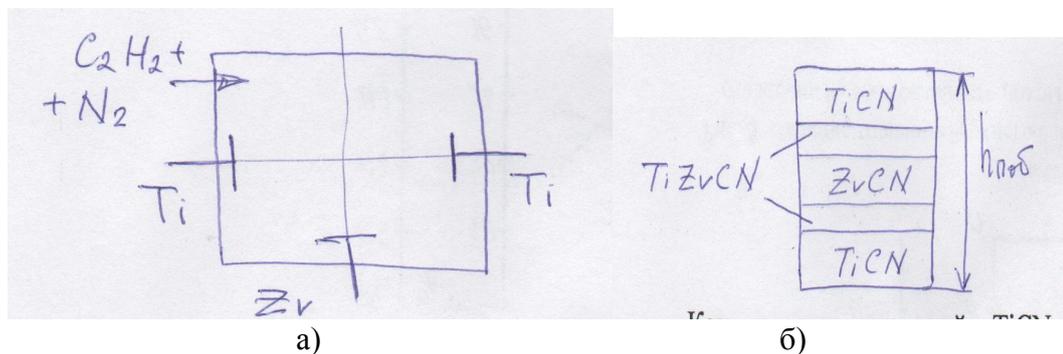
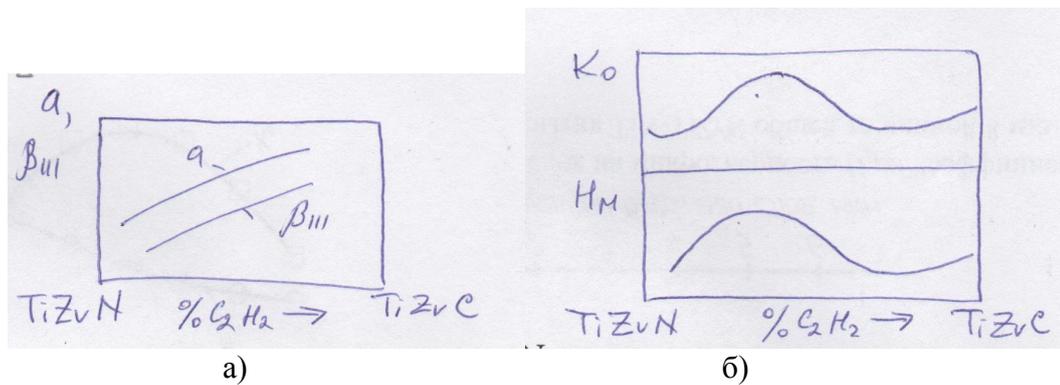


Рис. 47. Компоновочная схема установки для нанесения покрытия (а) и строение слоя покрытия (б), нанесенного за один оборот стола установки



**Рис. 48.** Влияние содержания ацетилена на период решетки и ширину рентгеновской линии (а) и микротвердость и коэффициент отсложения (б)

Как и для покрытий MeCN, рассмотренных ранее, увеличение содержания ацетилена в составе реакционного газа повышает период решетки покрытий и ширину рентгеновской линии (рис. 48). Характер изменения микротвердости и коэффициента отсложения от содержания ацетилена аналогичен тому, что имело место для покрытия TiCN.

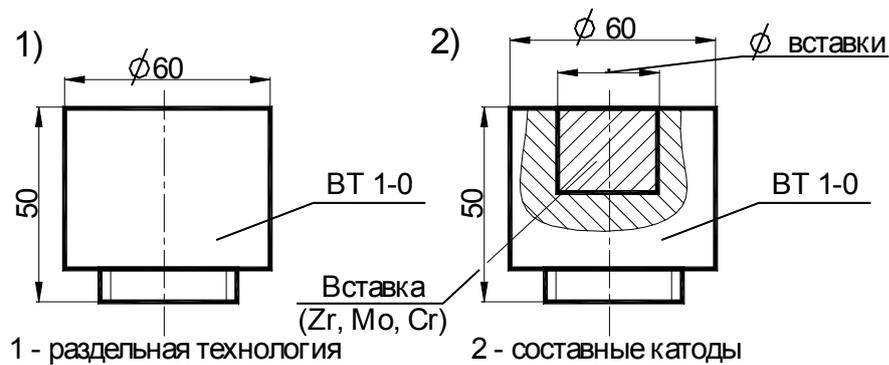
Микротвердость двухэлементных карбонитридных покрытий TiZrCN на 28...35% выше по отношению к одноэлементным карбонитридным покрытиям TiCN, а ее максимальная величина наблюдается при том же содержании ацетилена.

Более высокая микротвердость двухэлементных карбонитридных покрытий по сравнению с одноэлементными карбонитридными покрытиями объясняется действием двух механизмов упрочнения, как это было в случае двухэлементных нитридных покрытий.

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 (см. табл. 3.13 и 3.14 из учебного пособия, рис. 3.13 стр. 101 и 102).

### 3.2.3. Нанесение покрытий с использованием составных катодов

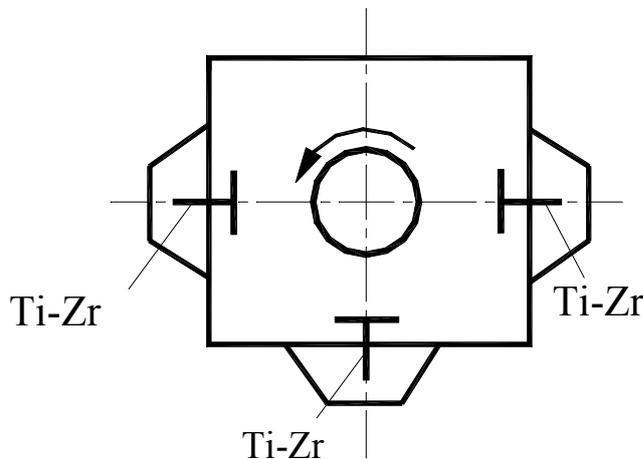
Как отмечалось выше, для нанесения двухэлементных покрытий можно использовать составные катоды. Конструкция такого катода представлена на рис. 49. Корпус такого катода изготавливается из материалов, которые применяются для изготовления обычных катодов. В корпус катода вставляется (прессованием, методом полужидкой штамповки и др.) вставка из материала, содержащий легирующий элемент. Например, как показано на рис. 49, катод изготовлен из титанового сплава VT1-0 и в него запрессована вставка из циркония (или молибдена или хрома).



**Рис. 49. Конструкция катода**

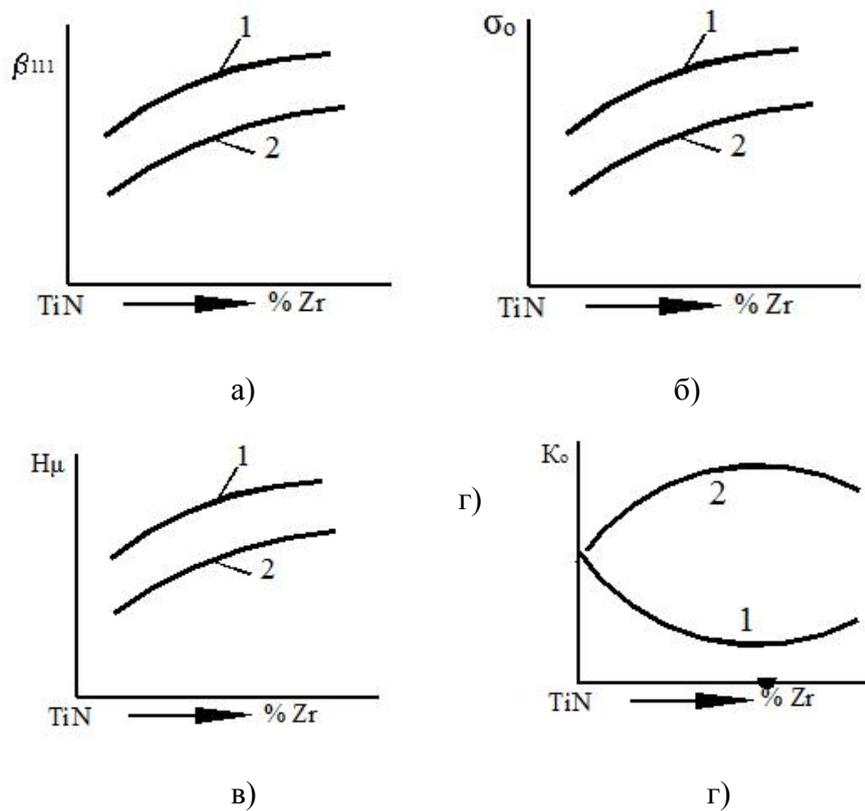
Покрyтия, полученные с их использованием, по своим структурным параметрам и механическим свойствам отличаются от аналогичных покрyтий, полученных из раздельных катодов. При этом изменение содержания легирующего элемента приводит к аналогичным изменениям структурных параметров и механических свойств, как это имело место для покрyтий, полученных из раздельных катодов.

Рассмотрим структурные параметры и механические свойства покрyтий TiZrN, полученных из составных катодов. Компоновочная схема установки для нанесения покрyтия показана на рис. 50.



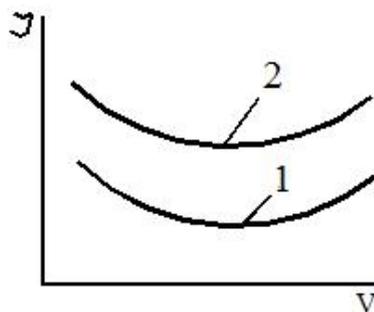
**Рис. 50. Компоновочная схема установки для нанесения покрyтия TiZrN**

Покрyтие на основе титана и циркония TiZrN, полученное из составных катодов, является однофазным. Повышение содержания циркония в покрyтии (табл. 3.15 из учебного пособия, стр. 102) ведет к увеличению периода кристаллической решетки, ширины рентгеновской линии, как это имело место для покрyтия TiZrN, полученного из раздельных катодов (рис. 51, а) и остаточных сжимающих напряжений (рис. 51, в).



**Рис. 51.** Влияние содержания Zr на полуширину рентгеновской линии (а), остаточные напряжения (б), микротвердость (в) и коэффициент отслоения (г) покрытий Ti ZrN:

1 и 2 – покрытия, полученные соответственно с использованием отдельных и составных катодов

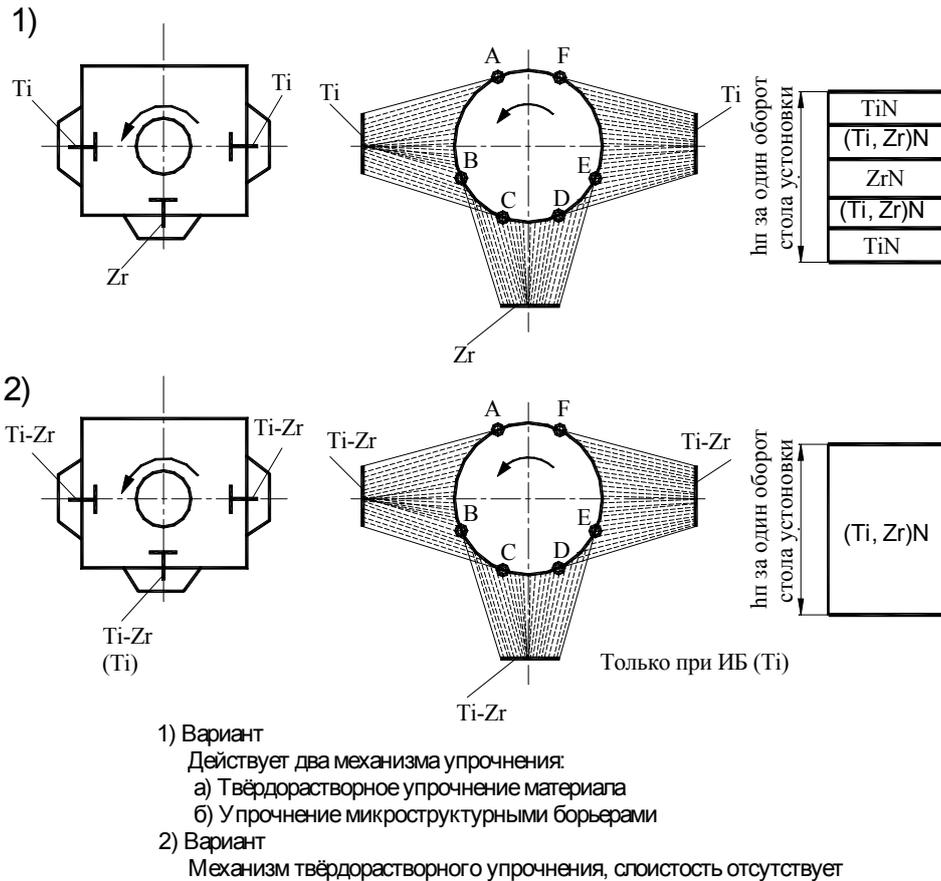


**Рис. 52.** Влияние скорости резания на интенсивность изнашивания режущего инструмента с покрытиями TiZrN:

1 и 2 – покрытия, полученные соответственно с использованием отдельных и составных катодов

Величина  $\beta_{111}$  покрытий, полученных с использованием составных катодов, меньше соответствующей величины  $\beta_{111}$  покрытий, полученных с использованием отдельных катодов, что свидетельствует о меньшей деформации кристаллической решетки данных покрытий. В покрытиях формируются сжимающие остаточные напряжения, которые возрастают по мере повышения в покрытии содержания

циркония.



**Рис. 53. Структура слоя покрытий, нанесенного за один оборот стола установки при использовании отдельных и составных катодов**

Повышение содержания циркония в покрытиях, полученных из составных катодов, увеличивает микротвердость (рис. 51, б).

Микротвердость покрытий TiZrN, полученных из составных катодов, меньше чем у покрытий, полученных из отдельных. Разная величина микротвердости покрытий, полученных из отдельных и составных катодов, объясняется действием различных механизмов упрочнения материала покрытия при их конденсации. Более высокая микротвердость покрытий, полученных из отдельных катодов, связана с действием двух механизмов упрочнения – твердорастворным и упрочнением микроструктурными барьерами.

При конденсации покрытий из составных катодов имеет место однофазная структура и, следовательно, границы между микрослоями покрытий отсутствуют. В этом случае протекает механизм только твердорастворного упрочнения материала покрытия (рис. 53).

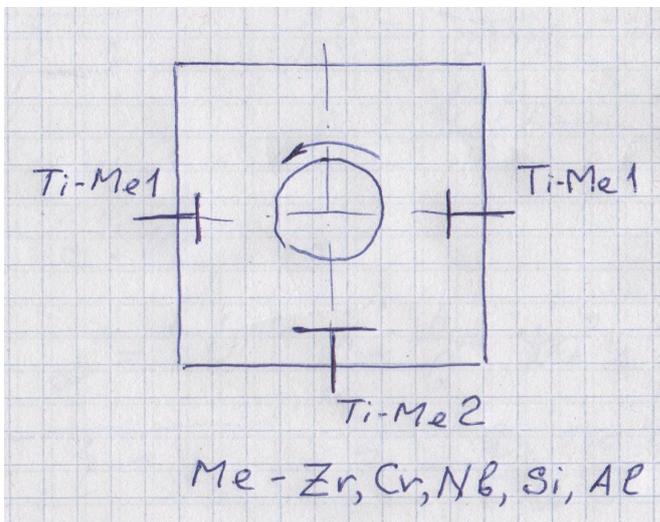
Повышение содержания циркония в покрытиях, полученных из составных катодов, увеличивает коэффициент отслоения  $K_0$  (рис. 51, г), что свидетельствует о снижении прочности адгезии с инструментальной основой. Повышение коэффициента отслоения покрытий связано с ростом микротвердости при увеличении циркония в покрытии. Меньшая величина

коэффициента  $K_0$  для покрытий, полученных из отдельных катодов, как уже говорилось, объясняется наличием в них микрослоистости, которая, несмотря на высокую микротвердость данных покрытий, сдерживает в нем процессы трещинообразования и отслоения покрытия.

Для карбонитридных покрытий характерны аналогичные изменения параметров структуры и механических свойств (табл. 3.17 и 3.18 из учебного пособия стр. 105).

Меньшая микротвердость и прочность адгезии с инструментальной основой покрытий, полученных из составных катодов, являются причиной большей интенсивности износа режущего инструмента с такими покрытиями по сравнению с аналогичными покрытиями, нанесенными с использованием отдельных катодов (рис. 53, табл. 3.19, стр. 105 из учебного пособия).

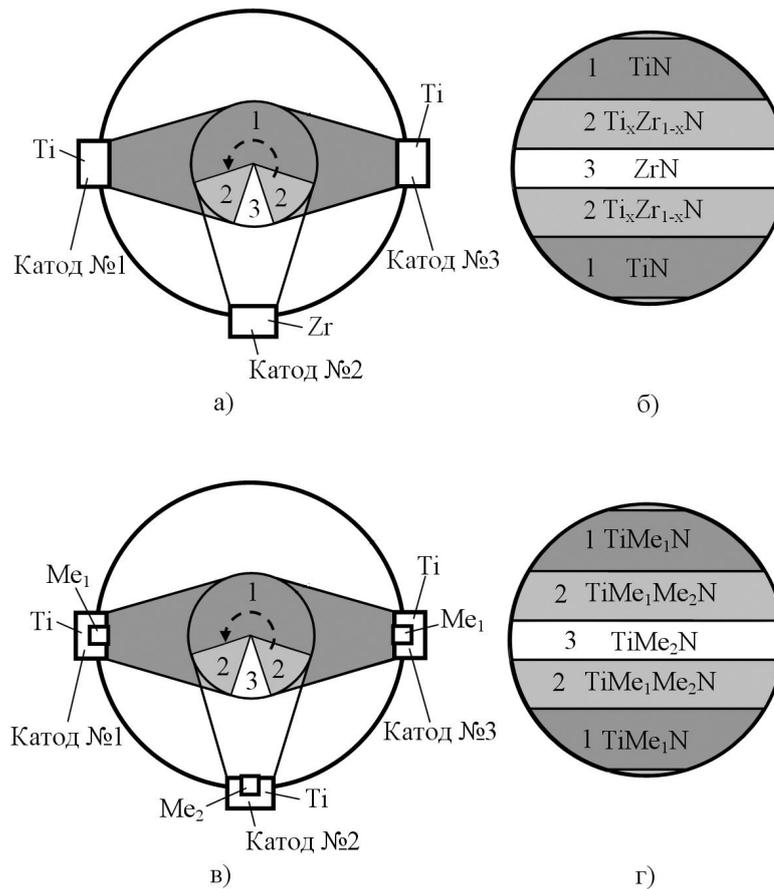
### 3.2.4. Нанесение трехэлементных нитридных покрытий



Еще большие изменения механических свойств одноэлементных покрытий можно получить при легировании их двумя элементами.

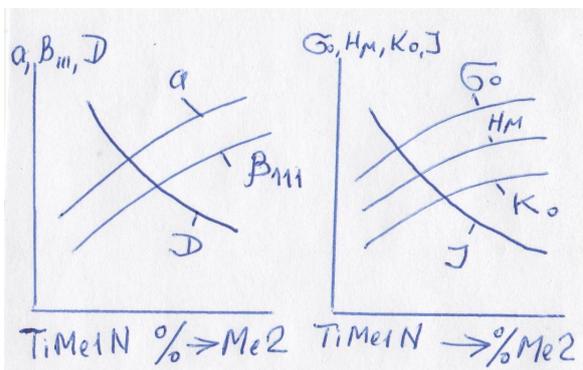
**Рис. 54. Компоновочная схема установки для нанесения трехэлементных покрытий**

Рассмотрим нанесение трехэлементных покрытий  $(Ti, Me_1, Me_2)N$  с использованием составных катодов. Компоновочная схема установки представлена на рис. 54. При нанесении таких покрытий за один его оборот также будет образовываться мультислойная структура, подобная той, которая имела место при нанесении покрытий из отдельных катодов (рис. 55): мультислои нитрида титана, легированного элементами  $Me_1$  и  $Me_2$  (соответственно  $(Ti, Me_1)N$  и  $(Ti, Me_2)N$ ), чередующиеся с мультислоями нитрида титана, легированного одновременно двумя элементами  $Me_1$  и  $Me_2$  (соответственно  $(Ti, Me_1, Me_2)N$ ), состав которых может быть различен в зависимости от компоновочной схемы установки (рис. 54). Таким образом, при такой компоновочной схеме с тремя составными катодами, имеющими вставки из различных легирующих элементов, несмотря на использование составных катодов при конденсации покрытия  $(Ti, Me_1, Me_2)N$  будут действовать два механизма упрочнения материала покрытия – твердорастворный и упрочнения микроструктурными барьерами.



**Рис. 55. Технологические компоновочные схемы установки и микроструктура осаждаемых покрытий за один оборот стола установки: нанесение двухэлементных нитридных покрытий из отдельных катодов (а, б) и трехэлементных нитридных покрытий из составных катодов (в, г)**

Следовательно, трехэлементные покрытия на основе модифицированного нитрида титана  $(\text{Ti}, \text{Me}_1, \text{Me}_2)\text{N}$  должны иметь более высокие физико-механические свойства по сравнению с двухэлементными нитридными покрытиями  $(\text{Ti}, \text{Me}_1)\text{N}$ , также полученными из составных катодов.



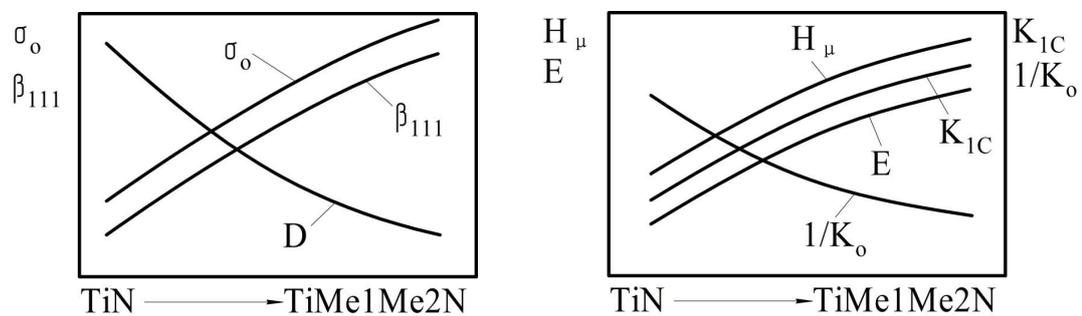
**Рис. 56. Влияние легирующего элемента  $\text{Me}_2$  на остаточные напряжения, механические свойства покрытия  $(\text{Ti}, \text{Me}_1, \text{Me}_2)\text{N}$  и интенсивность износа инструмента**

Рассмотрим трехэлементные нитридные покрытия на примере легирования двухэлементных покрытий  $(\text{Ti}, \text{Me}_1)\text{N}$ , где  $\text{M}_1$  – Zr, Al и Si. Трехэлементные покрытия, полученные из составных катодов, являются однофазными с ГЦК-решеткой, аналогичной решетке нитрида титана. Введение в состав покрытия  $(\text{Ti}, \text{Me}_1)\text{N}$  легирующего элемента  $\text{Me}_2$  вызывает аналогичные изменения параметров структуры и механических свойств (рис.

56), что имело место для двухслойных покрытий  $\text{TiZrN}$ , полученных из составных катодов (увеличивается полуширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , сжимающие остаточные напряжения, микротвердость, модуль упругости, вязкость разрушения, уменьшаются размеры кристаллитов (зерен)). Введение в состав покрытия  $(\text{Ti}, \text{Me}_1)\text{N}$  легирующего элемента  $\text{Me}_2$  неоднозначно сказывается на его прочности адгезии с инструментальной основой.

Добавление элемента  $\text{Me}_2$  снижает прочность адгезии, исключение составляют алюминий и железо, введение которых в состав двухэлементного покрытия повышает прочность адгезии.

Переход от одно- к двух- и трехэлементным покрытиям сопровождается повышением сжимающих остаточных напряжений, механических свойств, снижением прочности адгезии покрытия с инструментальной основой и уменьшением размеров блоков ОКР (рис. 57).



**Рис. 57. Влияние состава покрытий на остаточные напряжения ( $\sigma_0$ ), полуширину рентгеновской линии ( $\beta_{111}$ ), размер кристаллитов (блоков ОКР) ( $D$ ) и механические свойства- микротвердость ( $H_\mu$ ), модуль упругости ( $E$ ), коэффициент интенсивности напряжений ( $K_{1C}$ ) и прочность адгезии ( $1/K_0$ )**

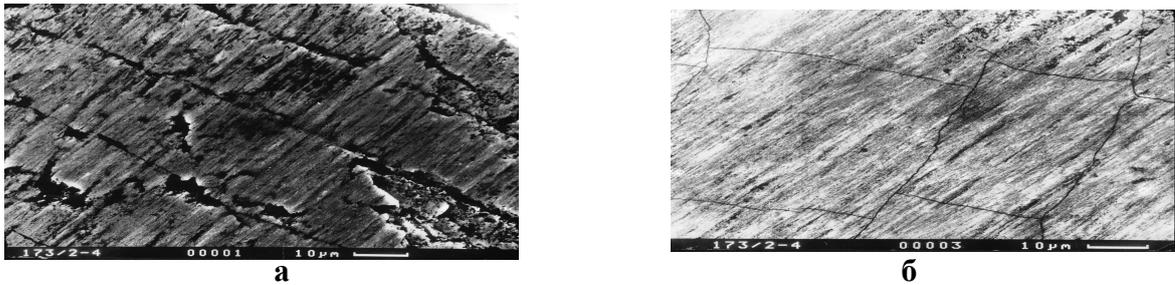
Применение трехэлементных покрытий повышает период стойкости инструмента при обработке заготовок из конструкционной стали по сравнению с двухэлементными.

## 4. НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

### 4.1. Нанесение многослойных покрытий для условий непрерывного резания

#### 4.1.1. Принцип формирования и конструкции многослойных покрытий для условий непрерывного резания

При непрерывном продольном течении разрушение покрытия происходит в результате образования трещин (рис. 58) на передней поверхности, причиной образования которых являются эквивалентные напряжения.

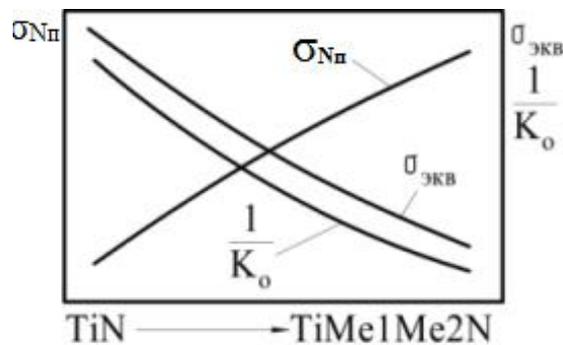


**Рис. 58. Вид контактных площадок на передней поверхности пластин MS318 с покрытием TiN при точении заготовок из стали 30ХГСА:  
а, б – соответственно на участке пластического и упругого контактов**

Эквивалентные напряжения влияют на формоустойчивость режущего клина РИ, которая характеризуется упругопластическими прогибами вершины режущего клина. Чем выше данные напряжения, тем больше упругопластические прогибы и тем самым меньше время работы РИ до начала образования трещин в покрытии.

Нанесение покрытий снижает величину эквивалентных напряжений по сравнению с РИ без покрытия.

При этом при переходе от одно к двух-и трехэлементным покрытиям эквивалентные напряжения уменьшаются ((например, от TiN к TiZrN, TiZrCrN,  $\sigma_{\text{ЭКВ TiN}} > \sigma_{\text{ЭКВ TiZrN}} > \sigma_{\text{ЭКВ TiZrCrN}}$ ), также как и при переходе от карбонитридных покрытий к нитридным аналогичного состава (например, от TiCN к TiN, от TiZrCN к TiZrN;  $\sigma_{\text{ЭКВ TiZrCN}} > \sigma_{\text{ЭКВ TiZrN}}$ ) (рис. 59).



**Рис. 59. Влияние состава покрытий на эквивалентные напряжения ( $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ ), напряжения в покрытиях в процессе резания ( $\sigma_{\text{Нп}}$ ) и прочность адгезии ( $1/K_0$ )**

В процессе резания в покрытиях формируются нормальные сжимающие напряжения  $\sigma_N$ , тормозящие процессы образования и развития трещин. Уровень данных напряжений тем выше, чем выше собственные остаточные сжимающие напряжения покрытия и его механические свойства. Наибольшие нормальные сжимающие напряжения в материале покрытий в процессе резания характерны для многоэлементных нитридных покрытий по сравнению с одноэлементными (например, TiZrN, TiZrCrN по сравнению с TiN;  $\sigma_{\text{Нп TiN}} < \sigma_{\text{Нп TiZrN}} < \sigma_{\text{Нп TiZrCrN}}$ ), а также для покрытий на основе карбонитридов по сравнению с покрытиями аналогичного типа на основе нитридов (например, TiCN по сравнению с TiN; TiZrCN по сравнению с

TiZrN, TiZrCrCN по сравнению с TiZrCrN,  $\sigma_{Nп TiZrN} < \sigma_{Nп TiZrCN}$ ). Таким образом, при переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным напряжения  $\sigma_N$  возрастают (рис. 59).

Для повышения сопротивляемости покрытий процессам трещинообразования в условиях непрерывного резания к ним должны предъявляться следующие требования: во-первых, покрытие должно обеспечить благоприятные условия контактного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов на передней поверхности режущего инструмента, которые бы способствовали максимальному времени его работы до начала образования в покрытии трещин. Это может быть обеспечено за счет максимального снижения эквивалентных напряжений на передней поверхности инструмента при нанесении покрытия и, следовательно, повышения формоустойчивости режущего клина. Во-вторых, для сдерживания процессов трещинообразования и снижения их интенсивности механические свойства покрытия и уровень собственных сжимающих остаточных напряжений должны способствовать формированию в них в процессе резания высоких нормальных сжимающих напряжений; в-третьих, покрытие должно обеспечить высокую прочность адгезии с инструментальной основой.

Перечисленные выше требования можно реализовать только в многослойном покрытии, каждый слой которого имеет свое функциональное назначение. Принцип формирования многослойного покрытия, работающего в условиях непрерывного резания, заключается в следующем:

*верхний слой*, непосредственно контактирующий со стружкой, должен обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений на передней поверхности и тем самым обеспечить повышение формоустойчивости режущего клина инструмента;

*нижележащий слой* должен обеспечить повышение сопротивляемости многослойного покрытия процессам трещинообразования;

*нижний слой*, непосредственно прилегающий к инструментальной основе, должен обеспечить высокую прочность адгезии с инструментальной основой.

Анализ данных, представленных на рис. 59, показывает, что наибольшее снижение эквивалентных напряжений на передней поверхности инструмента обеспечивают многоэлементные покрытия. В тоже время, данные покрытия имеют высокие механические свойства и собственные сжимающие напряжения, которые способствуют формированию в них в процессе резания наибольших нормальных сжимающих напряжений, сдерживающих процессы трещинообразования. Следовательно, верхний слой многослойного покрытия, предназначенного для непрерывного резания, одновременно может обеспечить выполнение двух требований, предъявляемых к покрытиям – обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений и эффективно сдерживать процессы трещинообразования и интенсивность их протекания. Отсюда следует, что многослойное покрытие, предназначенное для условий непрерывного резания, может иметь минимум два слоя – верхний слой, обеспечивающий выполнение первых двух требований и

нижний слой, обеспечивающий прочность адгезии покрытия с инструментальной основой. Такая архитектура многослойного покрытия обеспечит ему достаточную трещиностойкость. Необходимость введения в архитектуру многослойного покрытия промежуточного слоя может быть продиктована другими причинами. Например, обеспечение еще более высокой трещиностойкости или использования его в качестве барьерного слоя, сдерживающего протекание каких-либо процессов.

Рассмотрим формирование МП, в качестве слоев которого можно использовать нитриды TiN, TiZrN и TiZrCrN. Сравнение характеристик данных покрытий приведено в таблице.

	TiN	TiZrN	TiZrCrN
$\sigma_{\text{ЭКВ}}$	max	среднее	min
$\sigma_N$	min	среднее	max
Ko	min	среднее	max

Учитывая вышеперечисленные требования к покрытиям, работающим в условиях непрерывного резания (пример, токарная обработка), и данные

таблицы можно предложить следующие варианты многослойных покрытий и компоновочные схемы установки для их нанесения (рис. 60). Строение многослойных покрытий представлено на рис. 61.

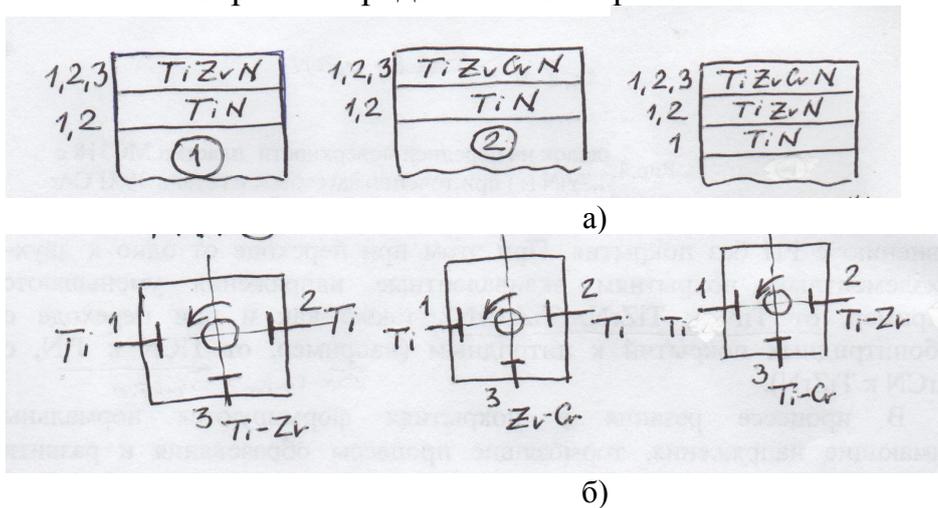


Рис. 60. Схемы конструкций многослойных покрытий (а) и компоновочные схемы (б) для их нанесения

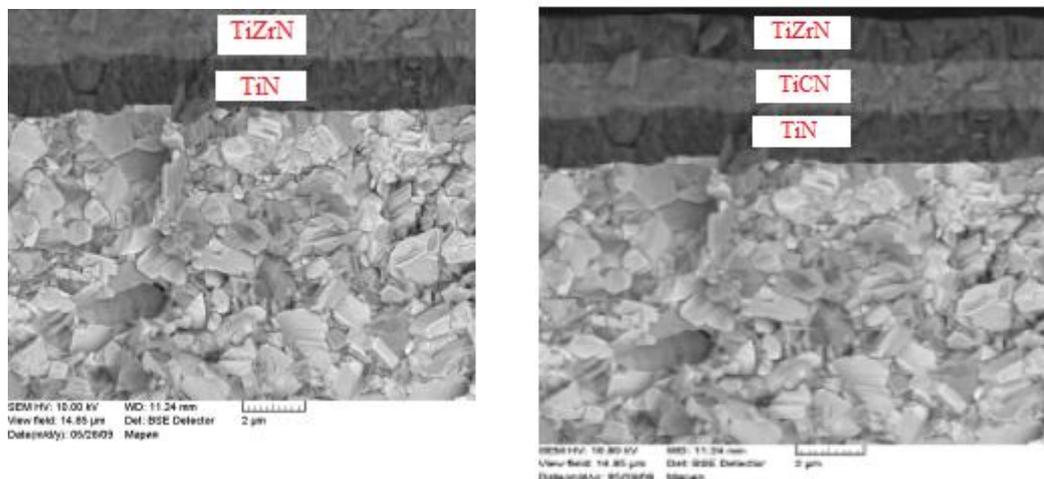
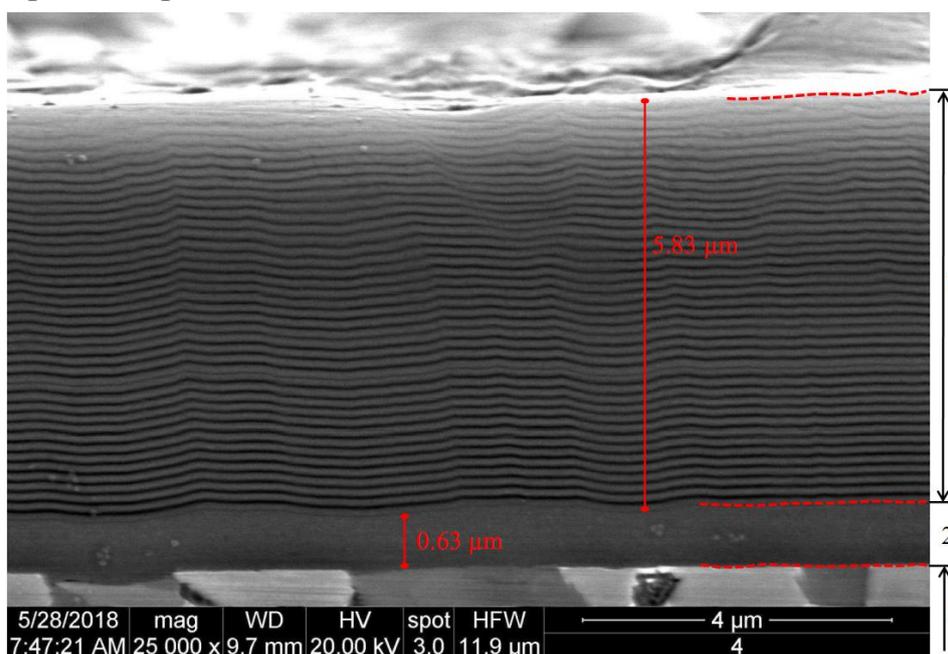


Рис. 61. Строение многослойных покрытий для непрерывного резания

Цифры 1, 2, 3 на рис. 60,а обозначают материал катода и количество одновременно работающих катодов, необходимых для нанесения конкретного слоя многослойного покрытия. Например, двухслойное покрытие TiN-TiZrN наносится в следующей последовательности: нижний слой TiN осаждается при работе двух катодов из титана (1 и 2) с подачей в камеру установки азота; после нанесения необходимой толщины нижнего слоя включается третий составной катод (3) из титана со вставкой из циркония и осаждается верхний слой покрытия TiZrN заданной толщины. Промежуточный слой TiCN в данном покрытии (рис. 61) наносится при работе двух испарителей из титана при подаче в камеру установки азота и ацетилена. Трехслойное покрытие TiN-TiZrN-TiZrCrN наносится в следующей последовательности. Нижний слой TiN – катодом из титана (1), промежуточный слой TiZrN – катодом из титана (1) и составным катодом из титана со вставкой из циркония (2), верхний слой TiZrCrN – катодом из титана (1) и составными катодами из титана со вставкой из циркония (2) и вставкой из хрома (3). Толщина каждого слоя многослойного покрытия зависит от времени его осаждения. Аналогично наносятся слои и других многослойных покрытий, представленных на рис. 60.

Прочность адгезии во всех многослойных покрытиях (рис. 61) обеспечивает слой TiN, имеющий минимальный коэффициент отслоения. Верхние слои в двухслойных покрытиях TiZrN и TiZrCrN обеспечивают формоустойчивость режущего клина инструмента и сопротивляемость процессам трещинообразования. Для повышения трещиностойкости двухслойного покрытия TiN-TiZrCrN можно нанести промежуточный слой TiZrN, а для двухслойного покрытия TiN-TiZrN – промежуточный слой карбонитрида титана TiCN (рис. 61), которые еще в большей степени будут способствовать торможению процессов трещинообразования в покрытии в процессе резания.



**Рис. 62.**  
**Микроструктура**  
**покрытия**  
**TiN-TiZrCrN:**  
 1 – твердый сплав,  
 2 – слой TiN, 3 –  
 слой TiZrCrN

На рис. 62 и 63 представлены примеры микроструктур двухслойных покрытий. Нижние слои TiN данных покрытий имеют монокристаллическую структуру, а верхние слои – мультислойную структуру, характерную для покрытий, полученных из отдельных катодов и рассмотренную ранее. Например, верхний слой TiZrCrN имеет нанослойную структуру, с толщиной нано слоев порядка 30-50 нм (рис. 62).

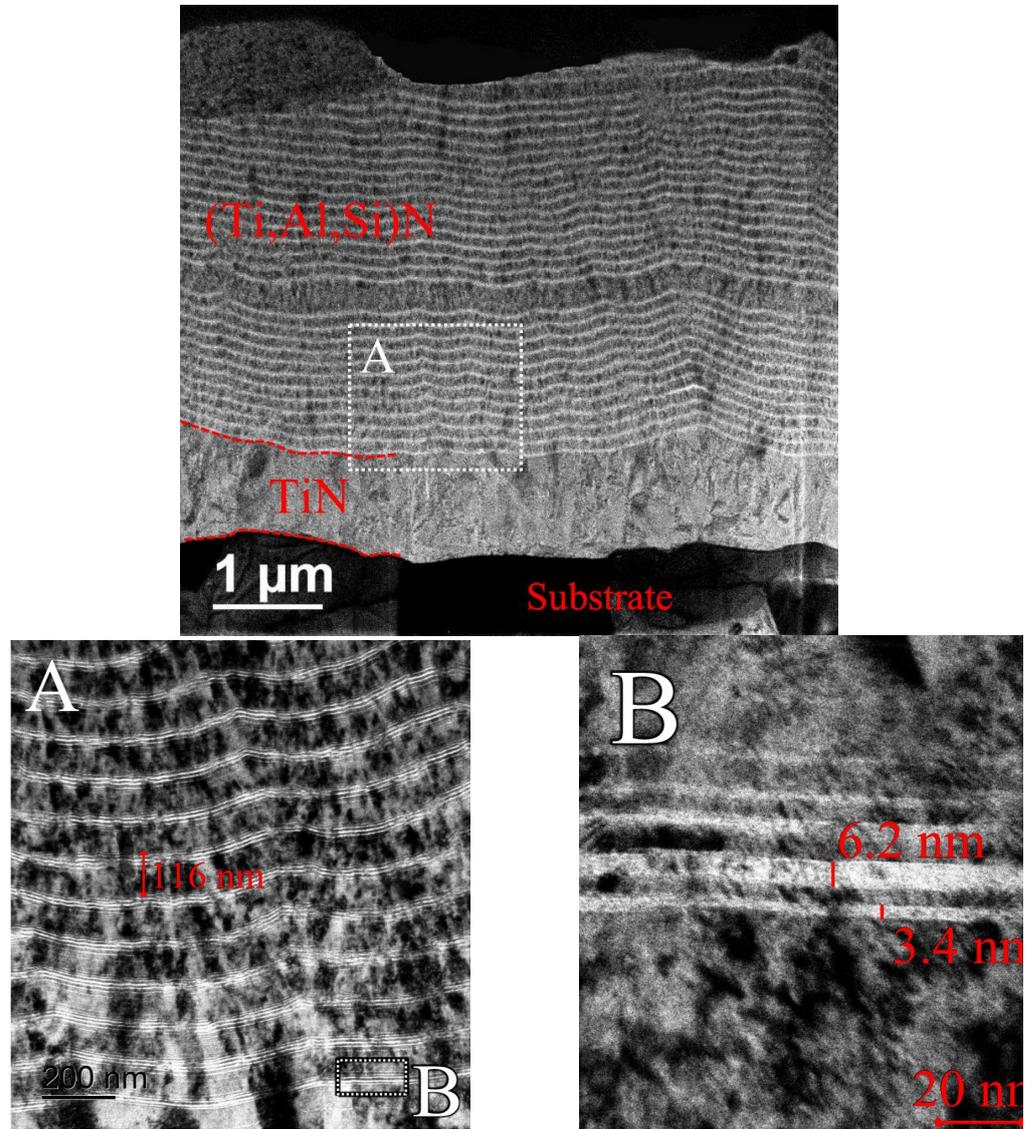
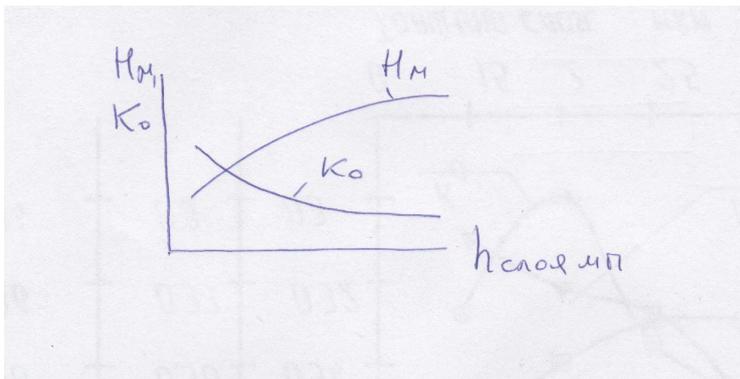


Рис. 63. Микроструктура покрытия TiN-TiAlSiN

Верхний слой TiAlSiN покрытия TiN-TiAlSiN толщиной 4 мкм состоит из 38 нано слоев со средней толщиной 110 нм. При этом, каждый нано слой TiAlSiN (A) также имеет слоистую структуру и состоит из субнано слоев (B) с шагом данной слоистой структуры 3 - 6 нм.

Структурные параметры и механические свойства многослойных покрытий определяются их конструкцией - составами и толщинами отдельных слоев и толщиной покрытия в целом (рис. 64 и рис. 4.2 и 4.3 из учебного пособия стр. 135). Например, микротвердость многослойного

покрытия TiN-TiZrN-TiZrCrN определяется толщиной и составом верхнего слоя TiZrCrN. Прочность адгезии определяется толщиной нижнего слоя TiN. Многослойные покрытия по сравнению с однослойным покрытием TiN имеют более высокую микротвердость (выше на 15 – 45 %), прочность адгезии (коэффициент отслоения ниже до 5 раз) и трещиностойкость. Пример из учебного пособия рис. 4.5 стр.142.



**Рис. 64. Влияние толщины слоя МП на его механические свойства**

Применение многослойных покрытий увеличивает период стойкости твердосплавного инструмента при токарной обработке заготовок из конструкционных сталей по сравнению с покрытием TiN в 1,4 – 2,9 раза в зависимости от конструкции многослойного покрытия.

#### ***4.2. Нанесение многослойных покрытий для условий прерывистого резания***

##### *4.1.2. Принцип формирования и конструкции многослойных покрытий для условий прерывистого резания*

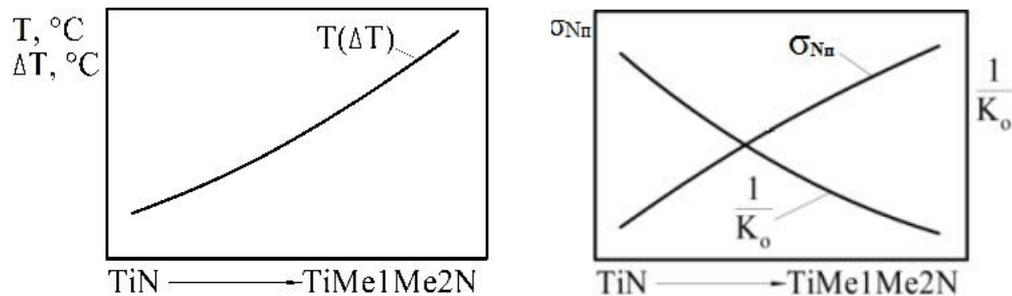
При прерывистом резании (например, торцовое фрезерование) покрытие также разрушается в результате образования в них трещин (рис. 65). Например, при торцовом фрезеровании, образование трещин в покрытии происходит в результате переменных тепловых и силовых нагрузок, возникающих при чередовании рабочего и холостого ходов режущего инструмента.



**Рис. 65. Вид контактных площадок на передней поверхности твердосплавных пластин с покрытием TiN**

При этом, чем больше амплитуда колебаний данных нагрузок за время рабочего цикла инструмента, тем выше величина напряжений, действующих на передней поверхности и в режущем клине инструмента, вызывающих образование трещин в покрытии.

Наибольшее снижение температур и наименьшую амплитуду их колебания за время рабочего цикла инструмента обеспечивают одноэлементные нитридные покрытия по сравнению с многоэлементными нитридными покрытиями (например, TiN и TiZrN или TiZrCrN), а также одноэлементные и многоэлементные нитридные покрытия по сравнению с соответствующими типами покрытий на основе карбонитридов (например, TiN и TiCN; TiZrN и TiZrCN, TiZrCrN и TiZrCrCN). Т.е. при переходе от одноэлементного покрытия к многоэлементным температура резания и амплитуда ее колебания увеличивается -  $T^0_{TiN} < T^0_{TiZrN} < T^0_{TiZrCrN}$ ;  $\Delta T^0_{TiN} < \Delta T^0_{TiZrN} < \Delta T^0_{TiZrCrN}$ , также как при переходе от нитридных покрытий к карбонитридным аналогичного состава (например,  $T^0_{TiZrN} < T^0_{TiZrCN}$ ;  $\Delta T^0_{TiZrN} < \Delta T^0_{TiZrCN}$ ) (рис. 66).



**Рис. 66. Влияние состава покрытия на температуру резания (Т), амплитуду температуры (ΔТ), напряжения в покрытиях в процессе резания ( $\sigma_{Nп}$ ) и прочность адгезии ( $1/K_0$ )**

В процессе резания, также как и при непрерывном резании, в покрытиях формируются нормальные сжимающие напряжения  $\sigma_N$ , тормозящие процессы образования и развития трещин. Как уже отмечалось выше (см. принцип формирования многослойных покрытий для условий непрерывного резания), нормальные сжимающие напряжения в материале покрытий в процессе резания возрастают при переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным (например, от TiN к TiZrN и TiZrCrN) и от нитридных покрытий к карбонитридным аналогичного строения ( $\sigma_{Nп TiN} < \sigma_{Nп TiZrN} < \sigma_{Nп TiZrCrN}$ ;  $\sigma_{Nп TiZrN} < \sigma_{Nп TiZrCN}$ ) (рис. 66).

Для повышения сопротивляемости покрытий процессам трещинообразования в условиях прерывистого резания к ним должны предъявляться следующие требования. Во-первых, покрытие должно обеспечить наибольшее снижение температуры и наименьшую амплитуду ее колебания за время рабочего цикла инструмента. Выполнение данного требования приведет к увеличению времени работы режущего инструмента до начала процесса трещинообразования в покрытиях. Во-вторых, для

сдерживания процессов трещинообразования и снижения их интенсивности, как и при непрерывном резании, механические свойства покрытия и уровень собственных сжимающих остаточных напряжений должны способствовать формированию в них в процессе резания высоких нормальных сжимающих напряжений. В-третьих, как и при непрерывном резании, покрытие должно обеспечить высокую прочность адгезии, которая выше для одноэлементных нитридных покрытий по сравнению с многоэлементными покрытиями (например, TiN и TiZrCrN).

Сочетание данных требований, можно получить только в многослойном покрытии, принцип формирования которого заключается в следующем:

*верхний слой* должен обеспечить максимальное снижение температуры и минимальную амплитуду ее колебания за время рабочего и холостого ходов инструмента;

*нижележащий слой* должен обеспечить повышение сопротивляемости многослойного покрытия процессам трещинообразования;

*нижний слой* - высокую прочность адгезии покрытия с инструментальной основой.

Анализ требований, предъявляемых к покрытиям, и данных, представленных на рис. 66, показывает, что в отличие от многослойных покрытий, предназначенных для непрерывного резания, высокая трещиностойкость многослойных покрытий, предназначенных для прерывистого резания, может быть обеспечена при трехслойной архитектуре, когда каждый слой покрытия выполняет свое функциональное назначение.

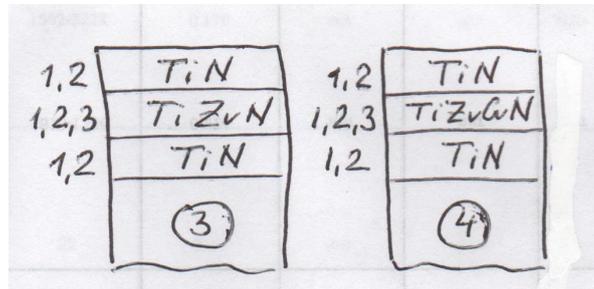
	TiN	TiZrN	TiZrCrN
T <sup>0</sup>	max	среднее	min
ΔT <sup>0</sup>	min	среднее	max
σ <sub>N</sub>	min	среднее	max
K <sub>0</sub>	min	среднее	max

Рассмотрим формирование многослойного покрытия, слоями которого могут быть нитриды TiN, TiZrN и TiZrCrN. Сравнение механических характеристик данных покрытий приведено в таблице.

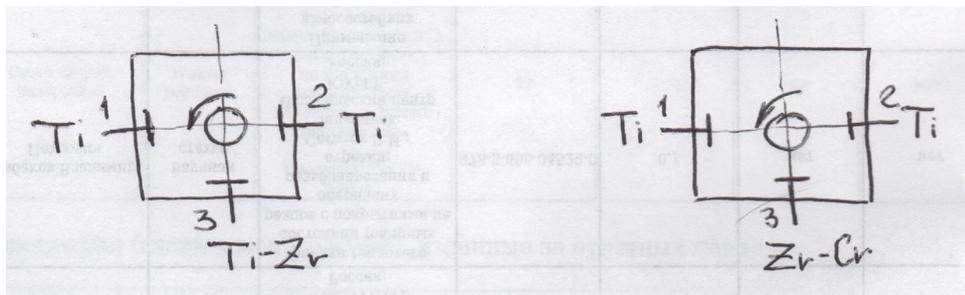
Учитывая принцип формирования многослойного покрытия, работающих в условиях прерывистого резания, и данные таблицы можно предложить следующие архитектуры многослойных покрытий и компоновочные схемы установки для их нанесения, представленные на рис. 67.

Строение многослойных покрытий представлено на рис. 68. Нанесение слоев многослойного покрытия проводится в той же последовательности, что и для рассмотренных ранее многослойных покрытий, предназначенных для условий непрерывного резания. Например, нанесение слоев многослойного покрытия TiN-TiZrN-TiN проводится в следующей последовательности: нижний слой TiN наносится при работе двух катодов из титана (1 и 2) подачей в камеру установки азота; после нанесения необходимой толщины нижнего слоя включается третий составной катод (3) из титана со вставкой из циркония и осаждается промежуточный слой покрытия TiZrN заданной толщины, затем составной катод отключается и двумя катодами из титана

наносится верхний слой TiN. Толщина каждого слоя МП зависит от времени его осаждения. Аналогично наносятся слои и многослойного покрытия TiN-TiZrCrN-TiN.



a)



б)

Рис. 67. Схемы конструкций МП (а) и компоновочные схемы установки (б) для их нанесения

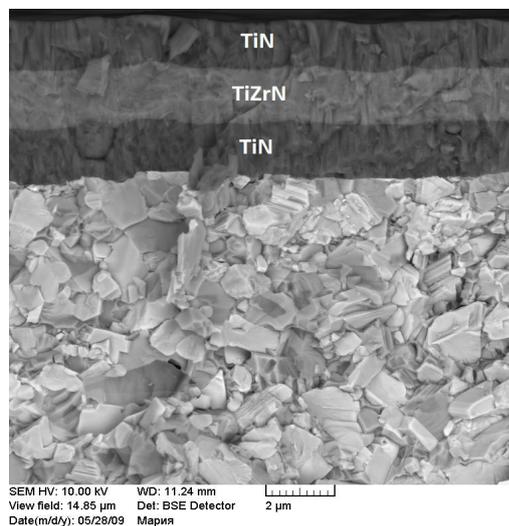


Рис. 68. Строение многослойного покрытия для условий прерывистого резания

Прочность адгезии всех многослойных покрытий обеспечивает слой TiN, имеющий минимальный коэффициент отслоения. Верхний слой TiN обеспечивает максимальное снижение температуры резания и амплитуды ее колебания за рабочий цикл работу режущего инструмента. Промежуточный

слой способствует торможению процессов трещинообразования в покрытии в процессе резания.

Промежуточный слой для большей эффективности сдерживания процессов трещинообразования может иметь мультислойную структуру в случае нанесения данного слоя с использованием составных катодов, а также при совместном использовании отдельных и составных катодов, как показано на рис. 67, б.

Механические свойства и прочность адгезии многослойных покрытий, предназначенных для прерывистого резания, выше по сравнению с однослойными покрытиями.

Механические свойства многослойных покрытий определяются их конструкцией: составами и толщинами отдельных слоев и толщиной покрытия в целом как это имело место для многослойных покрытий, рассмотренных ранее для условий непрерывного резания.

Влияние слоев МП на его механические свойства показано на рис. 4.31, 4.32, 4.33 стр. 173-174 учебного пособия.

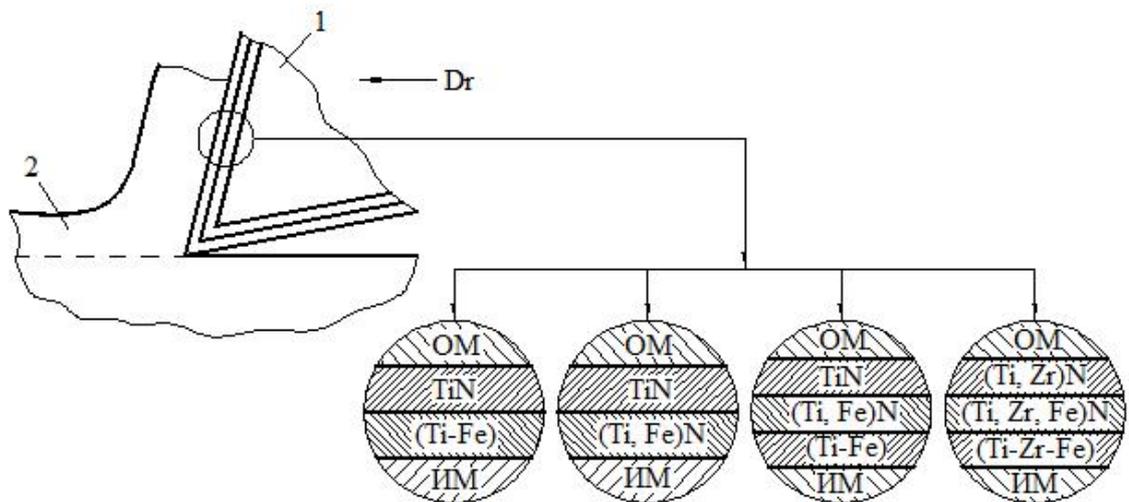
Эффективность многослойных покрытий может быть повышена за счет правильно выбранной архитектуры с учетом требований к отдельным слоям покрытия и учетом принципа построения многослойного покрытия.

Применение многослойных покрытий повышает период стойкости инструмента по сравнению с однослойными одно- и двухэлементными покрытиями TiN и TiZrN в 1,3 – 3,5 раза в зависимости от конструкции покрытия, обрабатываемого материала и режима фрезерования.

Сравнивая принципы формирования МП для различных условий резания, можно отметить, что требования к покрытиям, предназначенным для прерывистого резания, отличаются от требований к покрытиям, предназначенным для непрерывного резания, только первым требованием, определяющим условия контактного взаимодействия на передней поверхности режущего инструмента, вызывающим причины, приводящие к образованию трещин в покрытии.

### ***4.3. Нанесение многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями***

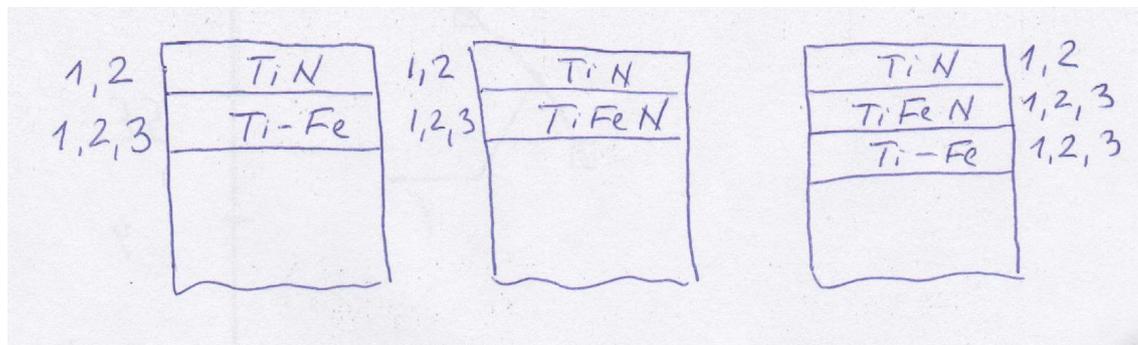
Высокие остаточные сжимающие напряжения, возникающие в износостойких покрытиях после нанесения их на режущий инструмент, способствуют снижению интенсивности процессов их разрушения в процессе резания. С другой стороны, наличие перепада напряжений на границе покрытия с инструментальной основой отрицательно сказывается на прочности адгезии с инструментальной основой. 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 адгезии может быть получена при нанесении переходных слоев, в состав которых входят элементы покрытия и инструментальной основы.



**Рис. 69. Схемы конструкций покрытий:**  
1 – режущий инструмент, 2 – заготовка

Схемы конструкций многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями для быстрорежущего РИ показаны на рис. 69-71, а компоновочные схемы установки для их нанесения – на рис. 72.

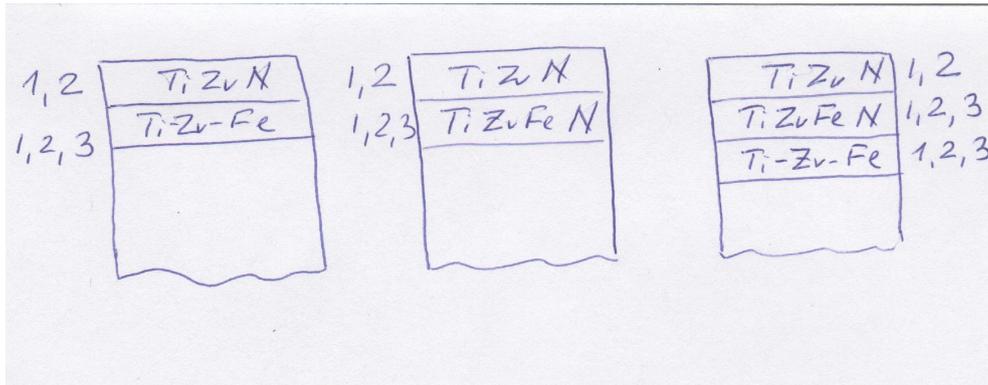
В качестве переходных адгезионных слоев для покрытий TiN и TiZrN можно использовать слои на основе чистых металлов (например, Ti-Fe, Ti-Zr-Fe), на основе их нитридов (например, TiFeN, TiZrFeN) или их сочетание (например, (Ti-Fe)-TiFeN, (Ti-Zr-Fe)-TiZrFeN) (рис. 69-71).



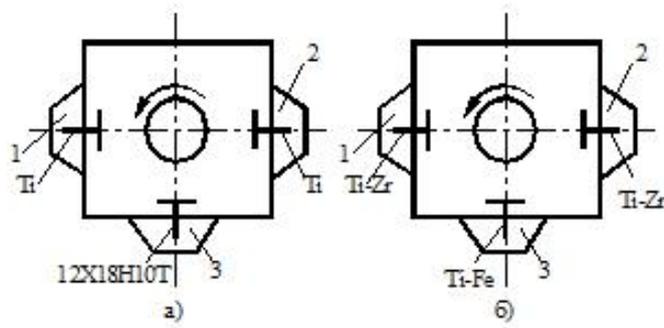
**Рис. 70. Конструкции многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями на основе покрытия TiN**

Последовательность нанесения слоев данных покрытий аналогична рассмотренным выше многослойным покрытиям, предназначенным для условий непрерывного и прерывистого резания. Например, нанесение покрытия с верхним слоем TiN и переходными слоями на основе титана и железа и их нитрида наносится в следующей последовательности: нижний слой Ti-Fe, контактирующий с инструментальной основой, осаждается при работе всех трех катодов – двух титановых и одного, изготовленного из нержавеющей стали 12X18H19Т, без подачи в камеру установки реакционного газа (рис. 72). После нанесения данного слоя при работе всех трех испарителей в камеру установки подается азот и осаждается слой TiFeN. Затем выключается катод из нержавеющей стали и осаждается слой нитрида

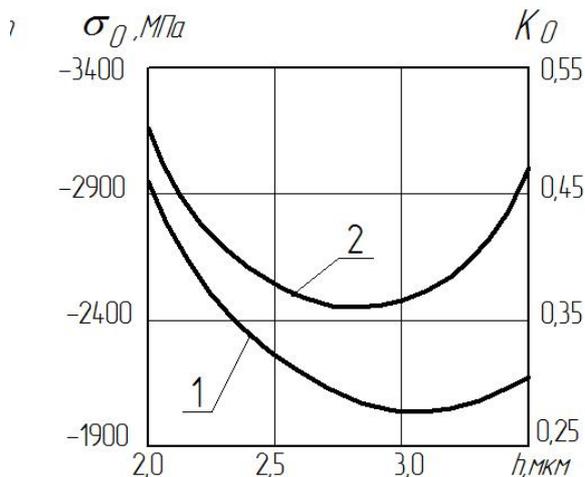
титана TiN. Аналогично наносится покрытие с переходными адгезионными слоями на основе нитрида TiZrN.



**Рис. 71. Конструкции многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями на основе покрытия TiZrN**



**Рис. 72. Компонвочные схемы установки для нанесения многослойных покрытий с переходными слоями: 1,2 и 3 - катоды**



**Рис. 73. Влияние толщины переходного адгезионного слоя на остаточные сжимающие напряжения (2) и коэффициент отслоения (1) покрытия на основе TiN**

Нанесение переходных слоев практически не отражается на периоде кристаллической решетки и полуширине рентгеновской линии покрытий, но способствует снижению в них сжимающих остаточных напряжений, величина которых существенно зависит от химического состава и толщины переходного адгезионного слоя (рис. 73 и рис. 4.47, 4.48, 4.49 стр.187 и 189

из учебного пособия). Наличие переходных адгезионных слоев практически не влияет на микротвердость покрытий (см. примеры из учебного пособия табл. 4.23 – 4.26 стр. 189, 190). В тоже время, при использовании в качестве переходных слоев сложных нитридов, микротвердость которых больше микротвердости верхнего слоя покрытия, вызывает небольшое ее повышение.

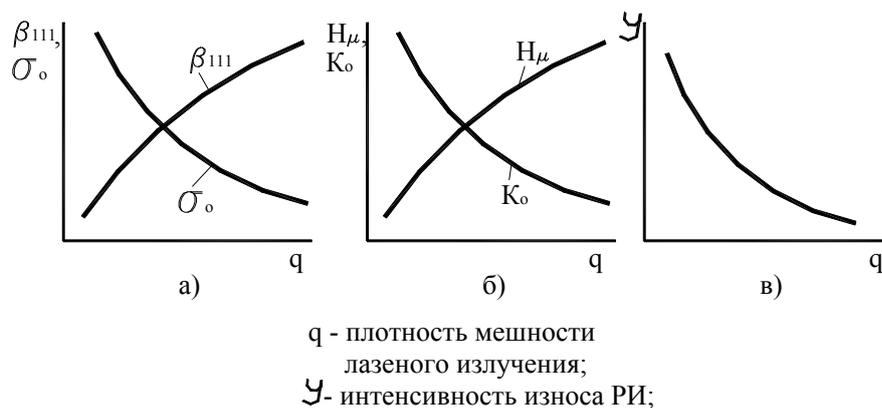
Снижение остаточных сжимающих напряжений способствует повышению прочности адгезии покрытия с инструментальной основой (рис. 73 и рис. 4.48 и 4.49 стр из учебного пособия).

Применение многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями позволяет повысить период стойкости быстрорежущего инструмента по сравнению с соответствующими однослойными покрытиями в 1,4 – 4,5 раза в зависимости от состава покрытия и режима резания.

## 5. КОМБИНИРОВАННАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Эффективность режущего инструмента с покрытиями может быть повышена путем воздействия на него дополнительной поверхностной упрочняющей обработки. Дополнительная упрочняющая обработка изменяет механические свойства покрытия, что в свою очередь оказывает влияние на работоспособность режущего инструмента. В качестве дополнительной упрочняющей обработки может использоваться импульсное лазерное излучение.

Импульсная лазерная обработка контактных площадок режущего инструмента с покрытием повышает полуширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$  и уменьшает сжимающие остаточные напряжения (рис. 74, а).



**Рис. 74. Влияние плотности мощности лазерного излучения на структурные параметры покрытий (а), механические свойства (б) и интенсивность изнашивания (в) режущего инструмента**

Изменение параметров структуры покрытий после импульсной лазерной обработки находит свое отражение в изменении их физико-механических свойств (рис. 74, б). Микротвердость  $H_\mu$  покрытий, нанесенных как на твердосплавную, так и быстрорежущую основу, увеличивается на 10...16 % в зависимости от его состава.

С ростом плотности мощности лазерного излучения прочность адгезии покрытия с инструментальной основой повышается (коэффициент отслоения  $K_0$  снижается), что объясняется релаксацией макронапряжений на границе раздела «покрытие – инструментальная основа». Повышение микротвердости покрытий и прочности их сцепления с инструментальной основой после импульсной лазерной обработки способствуют снижению интенсивности износа режущего инструмента.

Применение импульсной лазерной обработки покрытий повышает период стойкости режущего инструмента в 1,5 – 3,2 раза в зависимости от состава покрытия и обрабатываемого материала.