

**В.П. Табаков, Д.И. Сагитов**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ  
ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.П. Табаков, Д.И. Сагитов

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НАНЕСЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА**

Сборник лабораторных и практических работ

Ульяновск 2013

УДК 621.9.025 (076)

ББК 34.663 я7

Т

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор, директор корпоративного института высоких технологий в автомобилестроении УлГУ Варнаков В.В.,  
кафедра «Технология машиностроения» СамГТУ.

*Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

## **Табаков, В. П.**

Технологические процессы нанесения износостойких покрытий. Сборник лабораторных и практических работ: учебное пособие / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 94 с.

ISBN

В сборнике представлены лабораторные работы и тематика практических занятий по дисциплине «Технологические методы нанесения износостойких покрытий». Лабораторные работы и практические занятия составлены в соответствии с учебной программой курса и предназначены для магистрантов, обучающихся по направлению 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

**УДК 621.9.025 (076)**

**ББК 34.663 я7**

ISBN **xxx-x-xxx-xxxx**

©Табаков В.П., Сагитов Д.И., 2013

© Оформление. УлГТУ, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	5
1.1. Технологические процессы нанесения износостойких покрытий.....	5
1.2. Исследование влияния компоновочной схемы установки для нанесения износостойких покрытий на их состав, структуру и механические свойства....	15
1.3. Исследование влияния температуры конденсации на механические свойства износостойких покрытий.....	22
1.4. Исследование влияния состава на механические свойства износостойких покрытий.....	28
1.5. Исследование влияния состава газовой среды при конденсации на механические свойства износостойких покрытий.....	36
2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	42
2.1. Принцип формирования многослойных покрытий для режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания.....	42
2.2. Принцип формирования многослойных покрытий для режущего инструмента, работающего в условиях прерывистого резания.....	50
2.3. Многослойные износостойкие покрытия с переходными адгезионными слоями.....	63
2.4. Многослойные износостойкие покрытия на основе модифицированного нитрида титана.....	70
2.5. Многоэлементные износостойкие покрытия на основе модифицированного нитрида титана.....	77
2.6. Формирование механических свойств износостойкого покрытия путем дополнительного энергетического воздействия.....	87
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	93

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие машиностроения на основе комплексной механизации и автоматизации, использования прогрессивных технологий механической обработки, применения новых высокопрочных материалов ужесточает условия эксплуатации режущего инструмента, увеличивая его расход. Поэтому повышение работоспособности режущего инструмента является актуальной и одной из важнейших проблем технологии машиностроения.

Нанесение износостойких покрытий (ИП) является эффективным способом повышения работоспособности режущих инструментов (РИ).

Актуальной задачей при их конструировании является определение физико-механических свойств, таких как упругие модули, поверхностная энергия, трещиностойкость и т.д. Информация о данных свойствах, а также о взаимосвязи их с технологическими режимами нанесения и конструкцией ИП необходима при разработке новых ИП, в том числе многослойных.

Данные лабораторные работы посвящены изучению технологических методов получения ИП, исследованию свойств ИП и их взаимосвязи с технологическими режимами нанесения и конструктивными параметрами покрытий.

Целью выполнения лабораторных работ является закрепление теоретических знаний студентов, полученных на лекциях, и развитие навыков научно-исследовательской работы.

В данном сборнике изложены методические указания к выполнению лабораторных работ и краткие теоретические положения соответствующих разделов курса «Технологические методы нанесения износостойких покрытий».

# 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## 1.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

### *ЦЕЛЬ РАБОТЫ*

Целью работы является изучение технологических процессов нанесения износостойких покрытий для режущих инструментов.

### *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

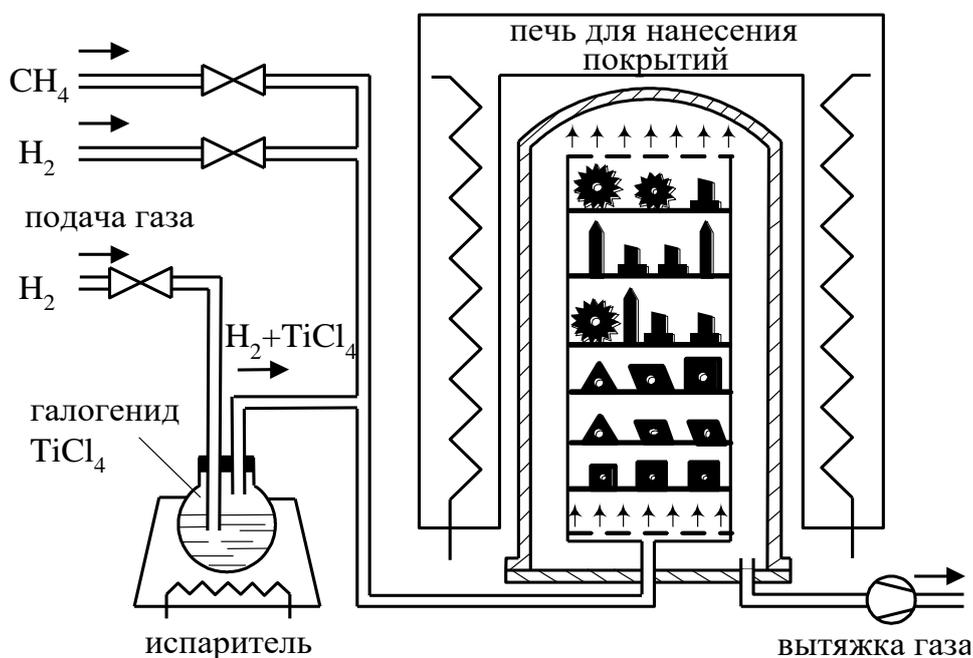
#### *Методы химического осаждения износостойких покрытий (CVD – Chemical Vapour Deposition)*

В общем случае процессы CVD (высоко- и среднетемпературные методы химического осаждения (НТ-CVD, МТ-CVD)) основаны на протекании гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей режущие инструменты, в результате которых образуется износостойкое покрытие. Получение покрытий из тугоплавких соединений путём осаждения их из газовой фазы основано на восстановлении летучих соединений металлов водородом в присутствии активных составляющих газовой смеси, которые, взаимодействуя с выделяющимся в свободном виде металлом, образуют соответствующие тугоплавкие соединения [1, 5].

На рис. 1.1 представлена принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы (CVD). Конденсация покрытий в процессах НТ-CVD осуществляется на поверхности инструмента, нагретого до необходимой температуры 900...1200 °С при давлении близком или равном атмосферному. Для получения покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов в качестве активной (науглероживающей) составляющей газовой смеси обычно используются углеводороды, при необходимости получения покрытий на основе нитридов – азот, а при осаждении карбонитридов – метан. Осаждение покрытий в основном производят на неподвижные подложки. Однако известны конструкции установок, в которых подложки перемещаются вдоль реакционной зоны, качаются или вращаются в ней, а также находятся в подвешенном состоянии.

В нашей стране компании-производители режущих инструментов для нанесения CVD-покрытий в основном используют оборудование зарубежных производителей.

Высокие температуры исключают возможность применения этого метода для инструмента из быстрорежущей стали. Однако и при нанесении покрытий на твердосплавные инструменты нагрев до столь высоких температур часто неблагоприятно сказывается на его работе. Твердосплавные инструменты с CVD-покрытиями часто имеют повышенную склонность к хрупкому разрушению в виде выкрашиваний и сколов. Это особенно проявляется при прерывистом резании, когда действуют циклические нагрузки, при обработке труднообрабатываемых сплавов, при обработке с большими толщинами срезаемого слоя.



**Рис. 1.1. Принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавные инструменты [5]**

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 ( $\text{W}_6\text{Co}_6\text{C}$ ,  $\text{W}_3\text{Co}_6\text{C}$ ), толщина которой может достигать 4 мкм. 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 [5].

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.

Основным направлением совершенствования твердого сплава с CVD-покрытиями является снижение хрупкости его поверхностного слоя. Появление технологий MT-CVD также не смогло до конца решить эту проблему.

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.

Мощным инструментом воздействия на кинетику процессов нанесения CVD-покрытий и свойства самих покрытий, является плазменное сопровождение (ассистирование) в англоязычной литературе получившее название plasma-assisted CVD (PA-CVD) или plasma-enhanced CVD (PE-CVD). Применение различных приемов возбуждения плазмы в реакционном объеме и управление ее параметрами позволяет интенсифицировать процессы роста покрытий, сдвигать их в область более низких температур (температуры процессов PA-CVD не превышают 600 °С), делать более управляемыми процессы формирования покрытий требуемой структуры и состава.

*Методы физического осаждения износостойких покрытий  
(PVD – Physical Vapour Deposition)*

Для всех методов физического осаждения покрытий генерация наносимого вещества осуществляется в результате термического перевода

твердого вещества в парообразное (испарением, вакуумной дугой или ионным распылением), а дополнительное повышение средней энергии осаждаемых частиц производится за счет их ионизации, осуществляемой различными способами (наложением тлеющего, дугового или высокочастотного разряда или подмешиванием ионов, получаемых от автономных источников).

Методы физического осаждения покрытий универсальны с точки зрения получения гаммы однослойных и многослойных покрытий практически любого состава, в том числе с алмазоподобной и наноразмерной структурой. Они позволяют реализовывать процессы нанесения покрытий при температурах 500...600 °С, что обеспечивает возможность их применения для быстрорежущих сталей, твердых сплавов и керамики [1, 5].

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

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

Рассмотрим более подробно вторую группу нанесения покрытий методом PVD *электродуговое испарение*. В основе метода осаждения покрытий посредством электродугового (вакуумно-дугового) испарения лежит процесс генерации металлической плазмы в вакууме сильноточным низковольтным разрядом (дугой), горящим в парах материала электрода. Особенности метода электродугового испарения, выгодно отличающими его от других, являются универсальность спектра наносимых покрытий, высокая производительность процесса (скорость осаждения до 40 мкм/ч) и высокая прочность адгезионной связи покрытия с инструментальной основой.

Последнее обеспечивается за счет наличия на границе раздела «инструментальный материал – покрытие» переходного металлического подслоя, формируемого при очистке поверхности инструмента бомбардировкой ионами материала катода. Самым главным недостатком этого метода является наличие в генерируемом плазменном потоке большого количества микрокапель испаряемого материала (катода), что ухудшает качество и эксплуатационные показатели формируемого покрытия. Для устранения капельной фазы в вакуумно-дуговые установки вводятся дополнительные узлы для сепарации плазменного потока, что существенно их усложняет и удорожает.

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

В нашей стране наибольшее промышленное распространение получил метод конденсации покрытий в условиях ионной бомбардировки (КИБ). За рубежом этот метод известен как Ion Bond или Cathode Arc Deposition. Его сущность заключается в испарении материалов катодными пятнами вакуумной дуги в рабочее пространство камеры с одновременной подачей реакционноспособных газов и последующей конденсации паров материалов либо их соединений с газами на рабочих поверхностях инструмента в условиях ионной бомбардировкой последнего. Все процессы испарения, плазмохимических реакций, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. Процесс КИБ можно представить в виде двух последовательно протекающих процессов: ионной бомбардировки, предназначенной для термомеханической активации, залечивания дефектов и очистки поверхности основы ионами испаряемого электрода, ускоренными до энергии (1 – 3) кэВ и собственно конденсации покрытия. На рис. 1.2 представлена принципиальная схема установки для реализации описанного процесса.

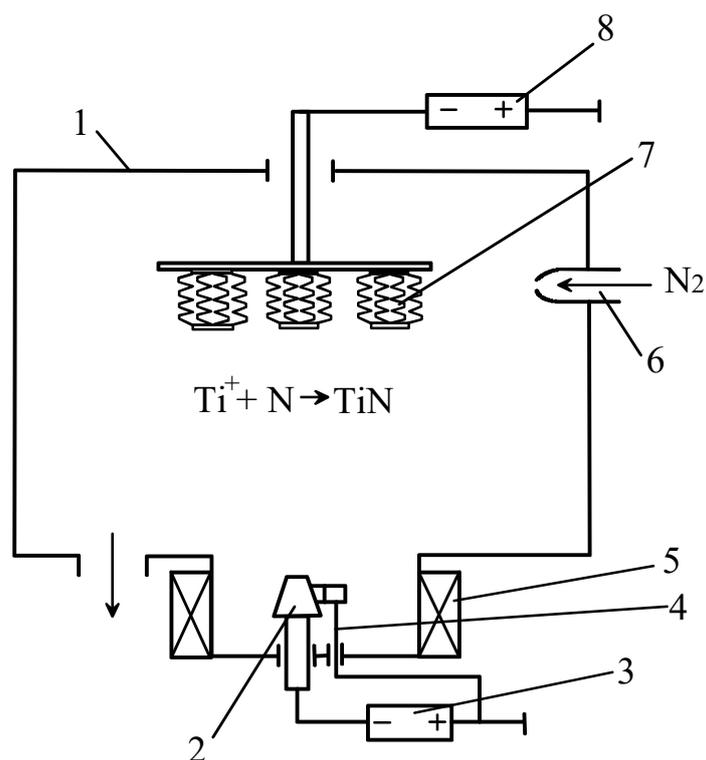
В бывшем Советском Союзе, начиная с 1980 года, был налажен серийных выпуск установок, предназначенных для реализации процессов нанесения покрытий электродуговым испарением. В табл. 1.1 приведены характеристики серийно выпускавшихся установок типа «Булат», ННВ, «Пуск», «Юнион», ВУ и некоторых других, а на рис. 1.3 представлены фотографии двух наиболее распространенных отечественных установок - ННВ6.6-И1 и «Булат-6».

**1.1. Характеристики серийно выпускавшихся установок для электродугового осаждения покрытий**

Наименование показателя	Тип установки						
	Булат-3Т	Булат-9	ННВ 6.6-И1	ЮНИОН УРМЗ	Пуск 83	ВУ-2Б	ИЭТ-8-И2
1. Габариты вакуумной камеры, мм: диаметр впис. окружн. высота	500 500	600 650	600 500	600 500	360 250	500 500	900 500
2. Кол-во испарителей	3	4	3	2	2	2	2
3. Скорость роста покрытия, мкм/ч	до 20	до 40	до 40	до 40	30-60	10-20	10-30
4. Время типового технологического цикла, мин	120-150	60-90	60-90	60-90	20-30	75	90
5. Диапазон регулирования напряжения на инструменте, В	0-250 (плавно) 700-1200 (ступ.)	30-1700 (плавно)	0-280 (плавно) 100-1500 (ступ.)	0-180 (плавно) 200-1000 (ступ.)	0-1200 (плавно)	0-200 (плавно) 700-1000 (ступ.)	0-1500 (ступ.)
6. Макс. размеры обрабатыв. инструментов, мм: диаметр высота	200 250	- -	200 250	30 200	100 250	60 200	200 250
7. Разработчик	Харьковский физ.-тех. институт	Харьковский физ.-тех. институт	ВНИИЭТО	НПО «Ритм»	НИИТ-Автопром	Завод оптического машиностроения (г. Сморгонь)	ВНИИ ЭТО, ЗЭТО г. Саратов

8. Изготовитель	Киевское произв. станкос- строител. объеди- нение, Чугуевс- кий за- вод топ- ливной аппара- туры	Киевское произв. станкос- строител. объеди- нение, Чугуевс- кий за- вод топ- ливной аппара- туры	Саратов- ский завод электро- терми- ческого оборудо- вания (ЗЭТО)	Заводы Мин- элект- рон- прома	«Авто- промав- томати- ка» (г. Кара- чаево), АТЭ-1 (г. Моск- ва)		ЗЭТО г. Саратов, ЗЭТО г. Новоси- бирск
-----------------	---	---	--	---	--	--	--

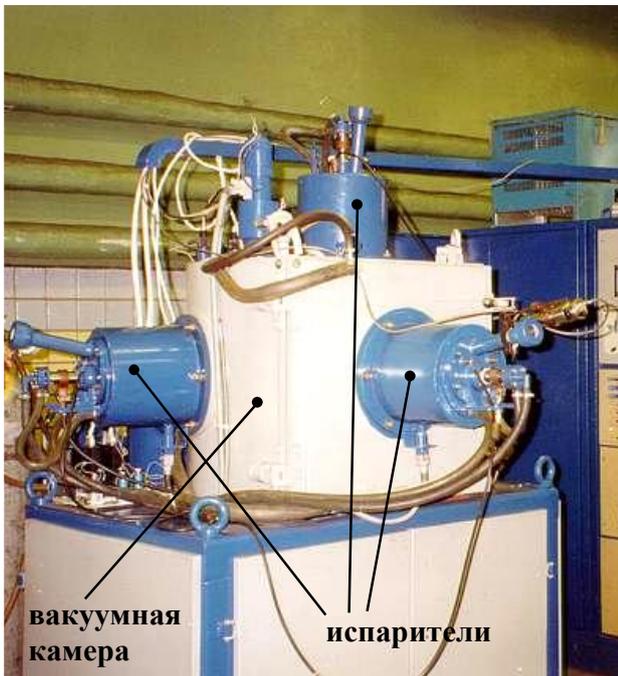
Установки, характеристики которых представлены в табл. 1.1, в основном отличаются габаритными размерами, схемой размещения режущего инструмента в камере, количеством испарителей и др. Кроме того, в некоторых конструкциях установок анодом является режущий инструмент, а в других – металлический корпус вакуумной камеры.



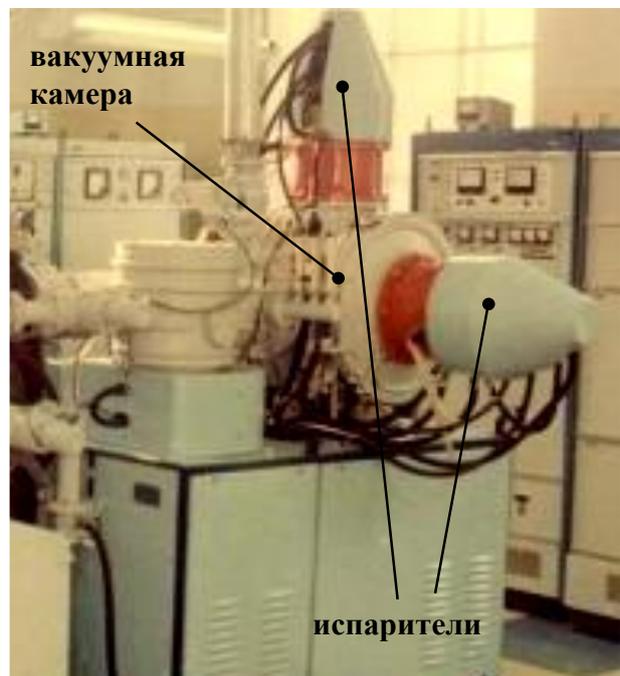
**Рис. 1.2. Принципиальная схема установки для нанесения покрытий на режущий инструмент методом конденсации с ионной бомбардировкой [1]:**

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

Отечественные разработки в области электродугового нанесения покрытий прошлых лет вызывали огромный интерес во всем мире.

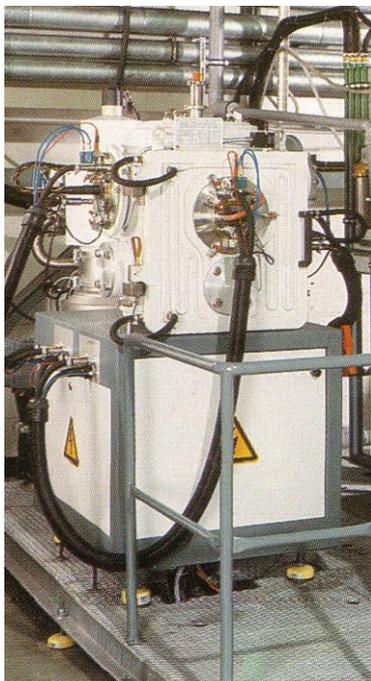


а)



б)

**Рис. 1.3. Общий вид установок для электродугового осаждения покрытий, выпускавшихся в СССР: ННВ6.6-И1 (а) и «Булат-6» (б)**



а)



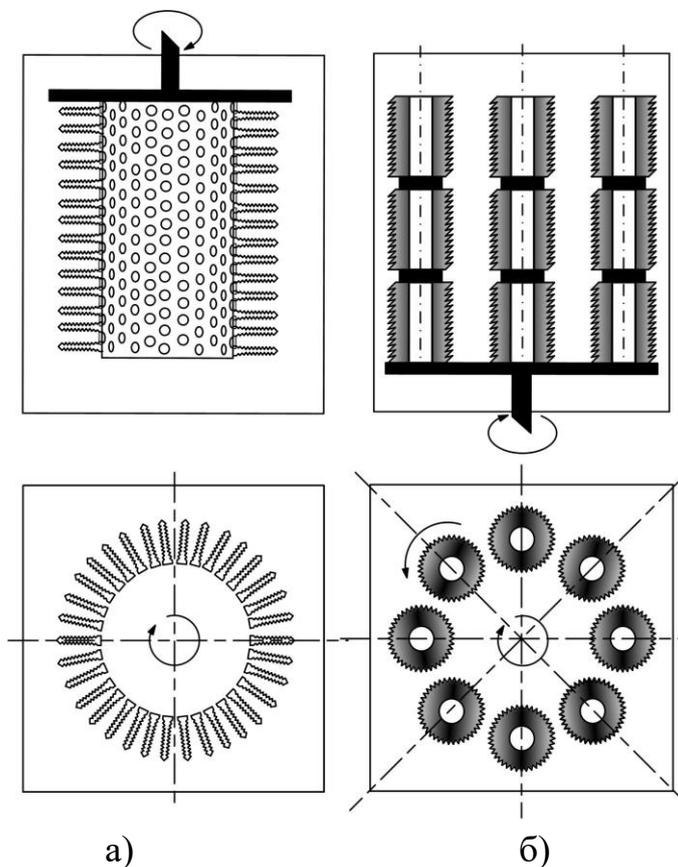
б)

**Рис. 1.4. Общий вид установок, выпускавшихся Multi-Arc Vacuum System (США): PVD 20 (а) и с 6 испарителями для нанесения покрытий на длинномерные инструменты (б).**

В качестве примера можно привести тот факт, что в 1980 году американская фирма Multi-Arc Vacuum System купила у СССР лицензию на технологию и установку «Булат» и на их базе наладила серийный выпуск установок моделей PVD 20 (рис. 1.4, а).

Для нанесения покрытий на длинномерные и крупногабаритные инструменты (протяжки, прошивки и др.) применяются установки с высотой рабочей камеры от 1000 мм и более. На рис. 1.4, б представлена одна из таких установок, ранее выпускавшаяся фирмой Multi-Arc Vacuum System.

Электродуговое оборудование состоит из следующих основных узлов: вакуумной камеры, электродуговых испарителей, вакуумной системы, системы водоохлаждения, системы газонапуска, основания и шкафов электропитания.



**Рис. 1.5. Варианты расположения партии мелкогабаритного (а) и крупногабаритного (б) инструмента в вакуумной камере установки**

В зависимости от типоразмера инструмента, используются различные схемы его размещения в вакуумной камере установки в процессе нанесения покрытия (рис. 1.5). Например, для закрепления мелкогабаритного инструмента может использоваться многоместное приспособление, располагаемое на поворотном устройстве (рис. 1.5, а). В зависимости от конфигурации изделий

нанесение на них покрытий осуществляется без вращения, с осевым планетарным вращением и т.д. Для равномерного нанесения покрытий на партию крупногабаритного инструмента (крупномодульные червячные фрезы и др.) на многих установках предусмотрена система планетарного вращения (рис. 1.5, б).

### *СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ*

Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Технологические процессы нанесения износостойких покрытий». В ходе выполнения лабораторной работы необходимо изучить основные методы нанесения износостойких покрытий, их технологические возможности и технологическое оборудование.

#### *ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ*

1. Ознакомиться с методикой, содержанием работы и компьютерной программой.
2. Изучить основные методы нанесения износостойких покрытий, их технологические возможности и технологическое оборудование.

#### *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Назовите основные методы нанесения износостойких покрытий и укажите их технологические возможности.
2. Какие методы нанесения износостойких покрытий можно использовать для быстрорежущего инструмента.
3. Нарисуйте компоновочную схему установки для нанесения покрытий, получаемых методом КИБ.
4. Перечислите основные этапы процесса нанесения покрытий методом КИБ.
5. Объясните назначение ионной бомбардировки при нанесении покрытий методом КИБ.

## 1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ СОСТАВ, СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение структуры и свойств покрытий сложного состава на основе нитрида титана и циркония, получаемых с применением отдельных катодов.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Многоэлементные покрытия могут быть получены с использованием отдельных и составных катодов [1].

Рассмотрим нанесение двухэлементного покрытия из отдельных катодов (рис. 1.6).

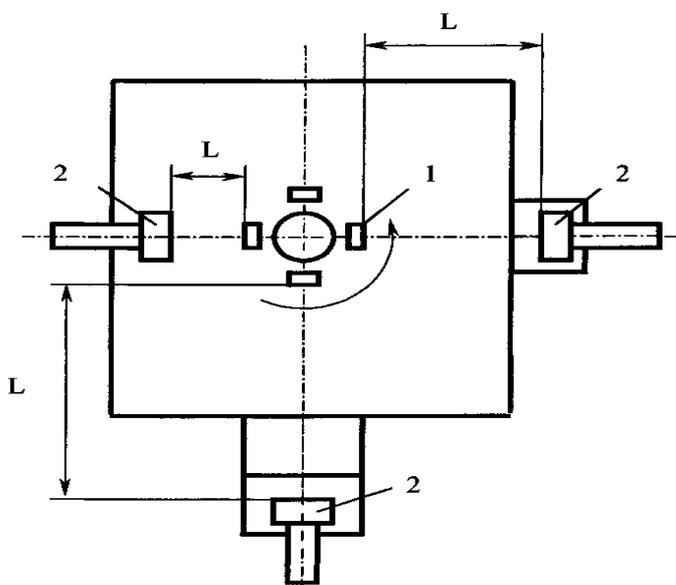


Рис. 1.6. Компонировочная схема установки для нанесения покрытия [1]:

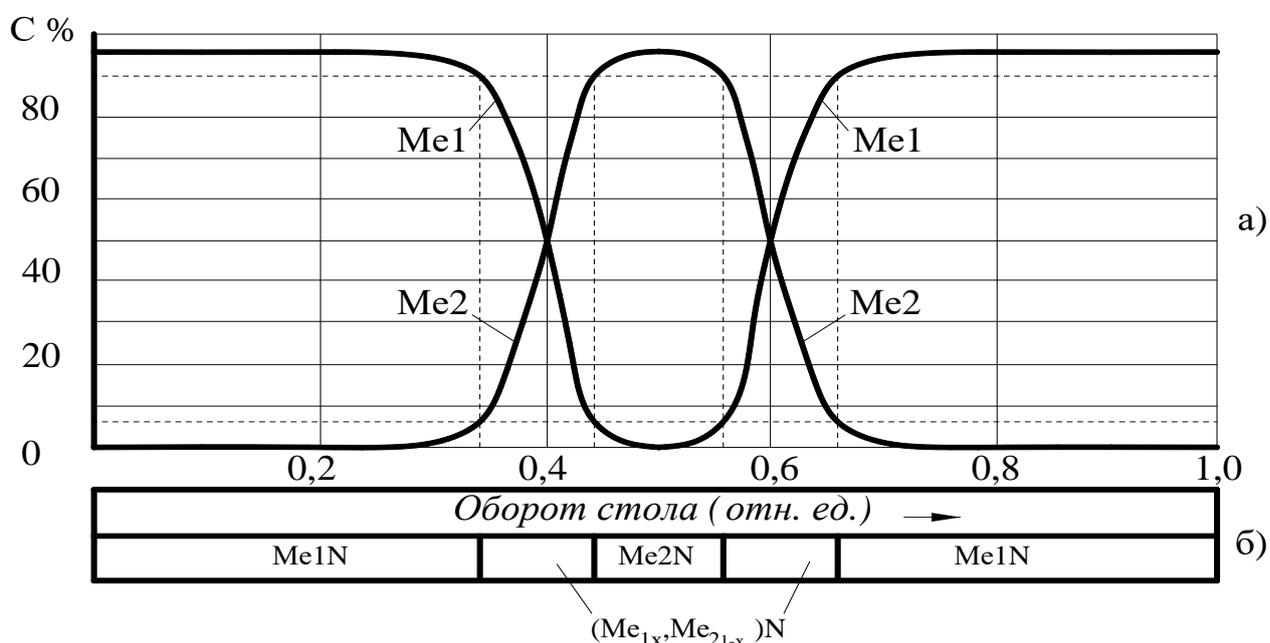
1- режущий инструмент, 2- катоды испарители

Если предположить, что из двух противоположных (обозначим их первый и третий) катодов осаждается основной элемент (например,  $Me_1$ ), а из расположенного между ними – легирующий (например,  $Me_2$ ), то за время одного полного оборота рабочего стола установки наносится мультислой, состоящий из слоев чистых компонентов покрытия (слои нитридов  $Me_1N$  и  $Me_2N$ ), разделенных в зависимости от компоновки установки либо переходным

слоем переменного состава ( $\text{Me}_{1-x}\text{Me}_{21-x}\text{N}$ ), либо – резкой границей (рис. 1.7, б).

Изменяя компоновку установки (расположение катодов относительно друг друга, их количество, расстояние от катодов до режущего инструмента (рис. 1.6), можно варьировать толщинами слоев чистых компонентов и переходных слоев.

Таким образом, при нанесении покрытий сложного состава из отдельных катодов имеет место мультислойная структура, с чередованием тонких мультислоев нитридов отдельных элементов покрытия и переходных мультислоев нитрида сложного состава.



**Рис. 1.7. Распределение концентрации элементов покрытия (а) и схема формирования покрытия за один оборот стола установки (б) [1]**

Зная время нанесения покрытия, его толщину и угловую скорость вращения рабочего стола установки, можно оценить толщину слоя, наносимого за один оборот. В случае нанесения одноэлементного покрытия толщина слоя, наносимого за один оборот стола установки, составляет порядка 250-300 Å. При одновременном распылении катодов из различных материалов чередующиеся слои покрытия будут иметь толщину от 50 Å до 200 Å в зависимости от компоновочной схемы установки.

Из рис. 1.7 следует, что при нанесении многоэлементного покрытия с использованием отдельных катодов действуют два механизма упрочнения

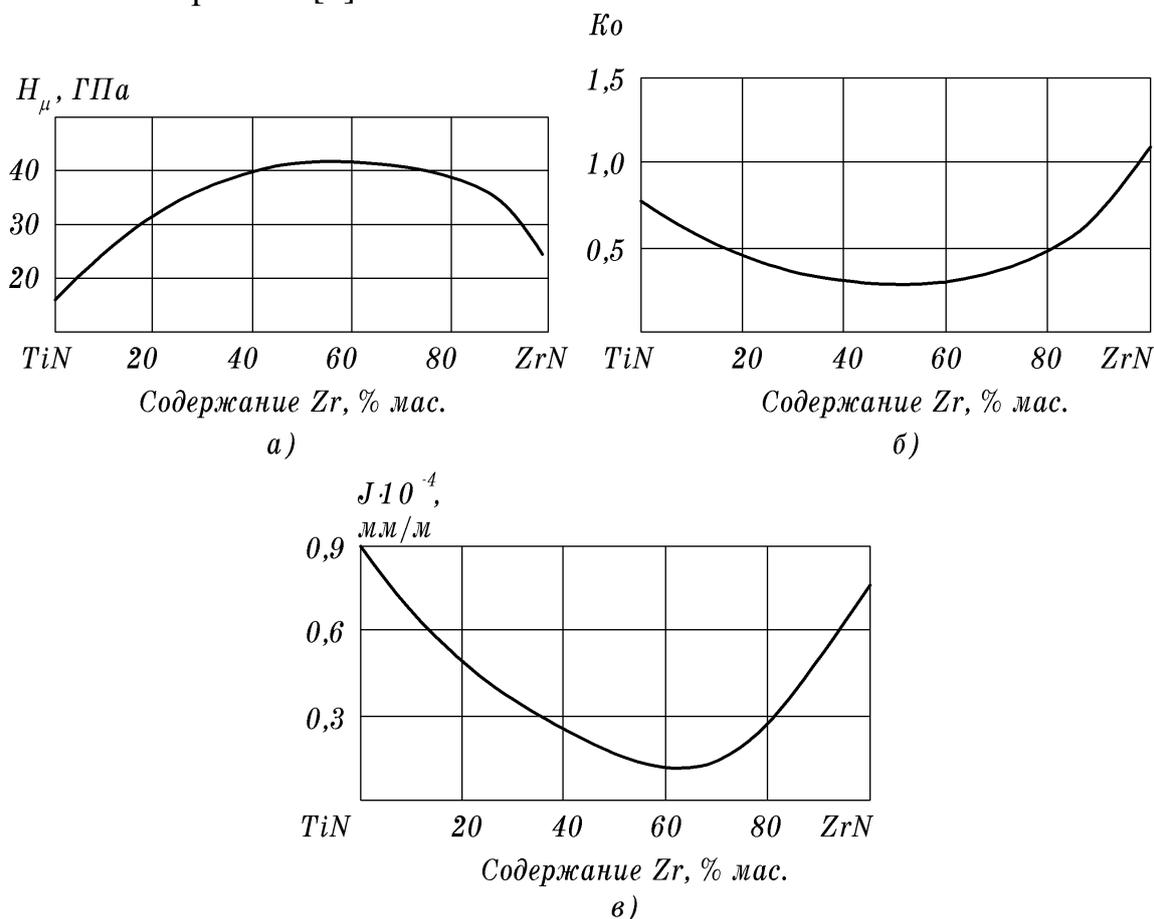
материала покрытия: упрочнение микроструктурными барьерами за счет образующейся мультислоистости и механизм твердорастворного упрочнения за счет легирования основного материала покрытия, что подтверждается наличием переходных слоев в общей толщине покрытия, полученного за один оборот рабочего стола установки. Следовательно, варьируя составом покрытия путем изменения компоновочной схемы установки можно обеспечить различное его строение (толщину и количество отдельных мультислоев покрытия) и, следовательно, направленно изменять его механические свойства (микротвердость, трещиностойкость и др.).

На рис. 1.8 показано влияние состава на механические свойства двухэлементного покрытия (Ti,Zr)N. Микротвердость двухэлементных покрытий, нанесенных на твердосплавную основу, в 1,5-1,9 раза выше микротвердости одноэлементных покрытий. Более высокая микротвердость данных покрытий по сравнению с одноэлементными объясняется, как было сказано выше, действием двух механизмов упрочнения при их конденсации. Максимальное увеличение микротвердости для покрытия (Ti,Zr)N наблюдается при содержании циркония в покрытии 30...50 %.

Изменение состава двухэлементных покрытий отражается на прочности их сцепления с инструментальной основой. Повышение содержания циркония в покрытиях (Ti,Zr)N, нанесенных на твердосплавную основу, приводит к снижению коэффициента  $K_o$ , который достигает минимального значения при концентрации Zr в покрытии равном 30...50 %. Дальнейшее повышение циркония в покрытии увеличивает коэффициент отслоения. Наличие минимума на кривых зависимости коэффициента отслоения от состава двухэлементных покрытий можно объяснить исходя из следующих позиций. Известно, что повышение твердости материала ведет к снижению его пластичности. Отсюда следовало ожидать, что увеличение твердости двухэлементных покрытий при повышении содержания легирующего компонента должно способствовать повышению площади отслоения при индентировании покрытий (прочность сцепления покрытия с инструментальной основой определяется путем индентирования его поверхности на твердомере) и, следовательно, приводить к увеличению коэффициента  $K_o$ . Кривая зависимости коэффициента  $K_o$  от состава покрытия в этом случае должна иметь экстремум, при котором максимальной твердости должен соответствовать максимальный коэффициент отслоения. Наблюдаемое снижение коэффициента  $K_o$  до некоторого значения объясняется мультислойной структурой покрытий, полученных из отдельных катодов. Граница между мультислоями покрытия тормозит рост трещины,

образовавшейся при внедрении в него индентора, что способствует снижению отслоения покрытия и, следовательно, повышает его трещиностойкость.

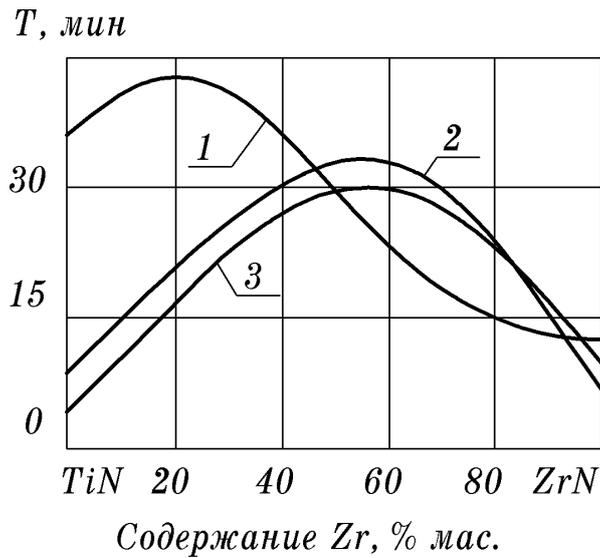
Как видно из рис. 1.9 и 1.10, для двухэлементных покрытий имеет место оптимальное содержание элементов, обеспечивающее максимальное повышение работоспособности режущих пластин при обработке заготовок из различных материалов [4].



**Рис. 1.8.** Влияние состава покрытия TiZrN на микротвердость  $H_\mu$  (а), коэффициент отслоения  $K_0$  (б) и интенсивность износа  $J$  (в)

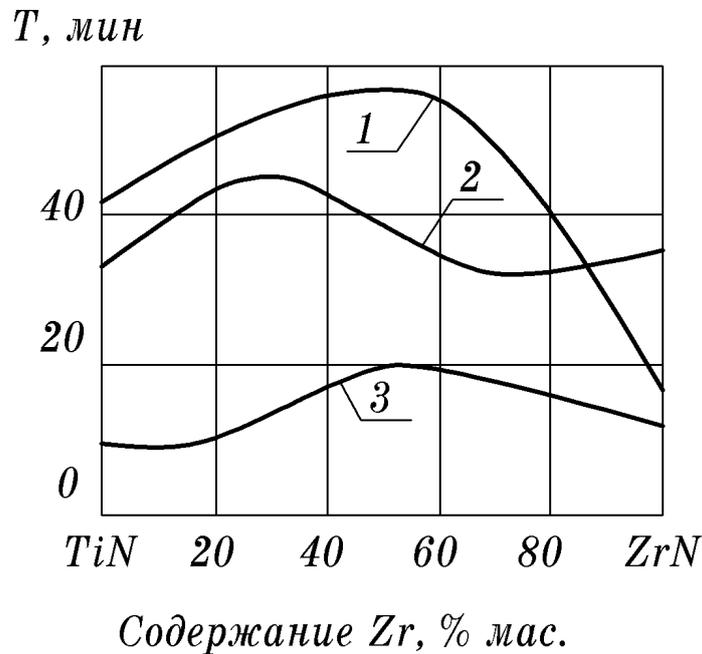
Так, например, при обработке заготовок из стали 30ХГСА наибольший период стойкости твердосплавных пластин обеспечивают покрытия TiZrN при содержании 40...60 % Zr; при обработке заготовок из стали 12Х18Н10Т – 30...80 % Zr для твердосплавных пластин и 40...60 % Zr для быстрорежущих; при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 – при содержании 20 % Zr для твердосплавных пластин и 50 % Zr – для быстрорежущих.

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



**Рис. 1.9.** Влияние состава покрытия TiZrN на период  $T$  стойкости пластин ВК6 при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 (1) и сталей 30ХГСА (2), 12Х18Н10Т (3):

1 –  $V=40^M/\text{мин}$ ,  $S=0,15^{\text{мм}}/\text{об}$ ,  $t=0,5\text{мм}$ ; 2 –  $V=200^M/\text{мин}$ ,  $S=0,3^{\text{мм}}/\text{об}$ ;  $t=1,0\text{мм}$ ;  
3 –  $V=160^M/\text{мин}$ ,  $S=0,15^{\text{мм}}/\text{об}$ ,  $t=0,5\text{мм}$



**Рис. 1.10.** Влияние состава покрытия TiZrN на период  $T$  стойкости пластин Р6М5 при обработке заготовок из сталей 40Х (1), 12Х18Н10Т (2) и титанового сплава ВТ22 (3):

1 –  $V=75^M/\text{мин}$ , 2 –  $V=10^M/\text{мин}$ , 3 –  $V=28^M/\text{мин}$ ;  $S=0,3^{\text{мм}}/\text{об}$ ,  $t=1,0\text{мм}$ ;

## СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Влияние компоновочной схемы установки для нанесения покрытий «Булат-3Е» на состав, структуру и механические свойства композиционных покрытий».

Исследования влияния компоновочной схемы установки для нанесения износостойких покрытий на их состав, структуру и механические свойства проводятся в следующей последовательности.

1. Исследование влияния частоты вращения стола установки на толщину слоя покрытия, наносимого за один его оборот.

2. Исследование влияния радиуса стола установки на толщину слоя покрытия, наносимого за один его оборот.

3. Исследование влияния расстояния до катодов на химический состав покрытия.

5. Исследование влияния расположения и количества катодов на строение слоя покрытия, наносимого за один оборот стола установки.

6. Исследование влияния расположения и расстояния до катодов на микротвердость и коэффициент отслоения покрытия.

Исходные данные для проведения исследований приведены в табл. 1.1.

### 1.1. Исходные данные для проведения исследований

Задание
<b>Расчет толщины мультислоев покрытия</b>
<b>Компоновка установки Ti-Zr-Ti.</b> Частота вращения стола 6-12 об/мин, радиус стола 75 мм, расстояние до катодов 150 мм.
Радиус стола 50-100 мм, частота вращения стола 10 об/мин, расстояние до катодов 150 мм.
<b>Расчет химического состава покрытия</b>
<b>Компоновка установки Ti-Zr-Ti.</b> Расстояние до катодов 150-250 (250-400) мм, частота вращения стола 10 об/мин, радиус стола 75 мм.
<b>Расчет микротвердости и коэффициента отслоения покрытия</b>
<b>Компоновки установки Ti-Zr-Ti и Zr-Ti-Zr.</b> Частота вращения стола 10 об/мин, радиус стола 75 мм, Расстояние до катодов 150-250 (250-400) мм.

### *ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ*

1. Ознакомиться с методикой, содержанием работы и компьютерной программой.
2. Провести исследования по влиянию компоновочной схемы установки для нанесения износостойких покрытий на их состав, структуру и механические свойства.
3. Провести анализ и объяснить полученные результаты исследований.

### *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Нарисуйте и поясните компоновочную схему для нанесения многоэлементных покрытий с использованием отдельных катодов.
2. Перечислите механизмы упрочнения материала покрытия при нанесении их с использованием отдельных катодов.
3. Объясните образование мультислойной структуры покрытия, полученного за один оборот стола установки.
4. Объясните влияние компоновочной схемы установки на состав и механические свойства покрытия.

### 1.3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНДЕНСАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

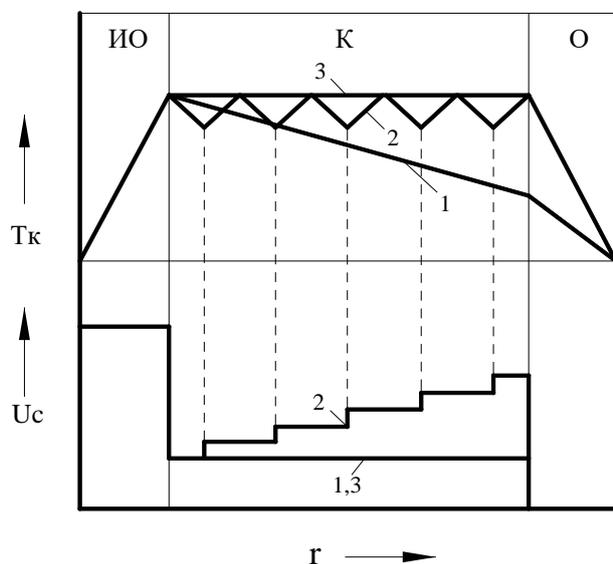
Целью работы является изучение влияния температуры конденсации на механические свойства износостойких покрытий.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Одним из основных факторов, определяющих работоспособность режущего инструмента с покрытием, являются условия теплового режима при его конденсации [1, 5]. Схематизация процесса нанесения покрытия, получаемого методом *КИБ*, показывает (рис. 1.11), что на всех этапах процесса температура определяет свойства покрытия и, следовательно, режущую способность инструмента. Так на этапе ионной очистки температура определяет прочность сцепления покрытия с инструментальной основой, на этапе конденсации – параметры структуры и механические свойства покрытия, а на этапе остывания невыполнение технологических условий может привести к растрескиванию и даже отслоению покрытия из-за высокого уровня в них остаточных напряжений. Условия теплового режима конденсации покрытия определяются не только определенным уровнем температуры, но и стабилизацией ее на протяжении всего процесса нанесения покрытия.

Конденсация покрытия может осуществляться при постоянных технологических параметрах процесса и, следовательно, при постоянной интенсивности ионного потока (рис. 1.11, б, поз. 1), но при этом будет постоянно снижаться температура (рис. 1.11, а, поз. 1). Снижение температуры конденсации связано с условиями теплообмена между инструментом и приспособлением. При недостаточном прогреве инструмента или приспособления на этапе ионной очистки тепловой поток может быть направлен из инструмента в приспособление и тогда температура  $T_k$  будет уменьшаться в процессе нанесения покрытия или наоборот. Для поддержания температуры конденсации на определенном уровне (рис. 1.11, а, поз. 2) можно периодически изменять технологические параметры, например, повышать величину опорного напряжения  $U_c$  (рис. 1.11, б, поз. 2), но при этом будет

изменяться скорость ионного потока. Снижение температуры конденсации в первом случае и изменение скорости ионного потока во втором приводят к изменению выходных параметров покрытия (толщины, механических свойств и т.д.), что в итоге отражается на режущих свойствах инструмента.



**Рис. 1.11. Изменение температуры конденсации  $T_k$  (а) и опорного напряжения  $U_c$  (б) при различных вариантах температурного режима процесса нанесения покрытия: ИО – этап ионной очистки, К – этап конденсации покрытия; О – этап остывания**

Постоянство выходных параметров покрытия и, следовательно, стабилизация режущих свойств инструмента обеспечивается при нанесении покрытия при постоянных значениях температуры конденсации и технологических параметрах процесса (рис. 1.11, а и б, поз. 3). Для этого инструмент с приспособлением на этапе ионной очистки необходимо нагреть до требуемой температуры и обеспечить минимальный теплоотвод из инструмента в приспособление, что

достигается специальной его конструкцией.

## 1.2. Влияние вариантов температурного режима на период стойкости инструмента при обработке заготовок из стали 30ХГСА

Инструментальный материал	Вариант режима	$T_{max}$ , мин	$T$ , мин	$T_{min}$ , мин	$v_T$	Режим резания
ТТ10К8Б	1	28,0	22,4	18,0	0,21	$V=2,5$ м/с
	2	32,0	27,2	23,0	0,14	$S=0,3$ мм/об
	3	45,0	41,4	39,2	0,07	$t=0,5$ мм
Р6М5	1	9,3	7,2	6,5	0,18	$V=1,0$ м/с
	2	9,8	8,5	7,0	0,12	$S=0,3$ мм/об
	3	14,2	13,6	13,0	0,05	$t=1,0$ мм

Примечание:  $T_{max}$ ,  $T$ ,  $T_{min}$  - соответственно максимальный, средний и минимальный период стойкости;  $v_T$  – коэффициент вариации периода стойкости; 1,2,3 – варианты температурного режима конденсации согласно рис. 1.11

Нанесение покрытий при стабильных технологических параметрах процесса и температуре конденсации обеспечивает повышение периода стойкости режущего инструмента и снижение коэффициента его вариации (табл. 1.2).

Температура конденсации оказывает существенное влияние на параметры структуры и механические свойства покрытия. Снижение температуры конденсации ведет к увеличению периода кристаллической решетки ( $a$ ), повышению ширины рентгеновской линии ( $\beta_{111}$ ) и микроискажению кристаллической решетки ( $\Delta a/a$ ), что свидетельствует о повышении степени искажения дефектности материала покрытия (табл. 1.3). Уменьшение температуры  $T_k$  вызывает рост сжимающих остаточных напряжений, повышение микротвердости и снижение прочности его сцепления с инструментальной основой (табл. 1.4) (прочность сцепления характеризуется коэффициентом отслоения  $K_0$  и снижается при его увеличении).

Снижение прочности сцепления покрытия с инструментальной основой при уменьшении температуры конденсации связано с недостаточной термоактивацией поверхности инструмента и, следовательно, недостаточным количеством активных центров для образования прочной связи покрытия и инструментальной основы.

### 1.3. Структурные параметры покрытия нитрида титана в зависимости от температуры конденсации

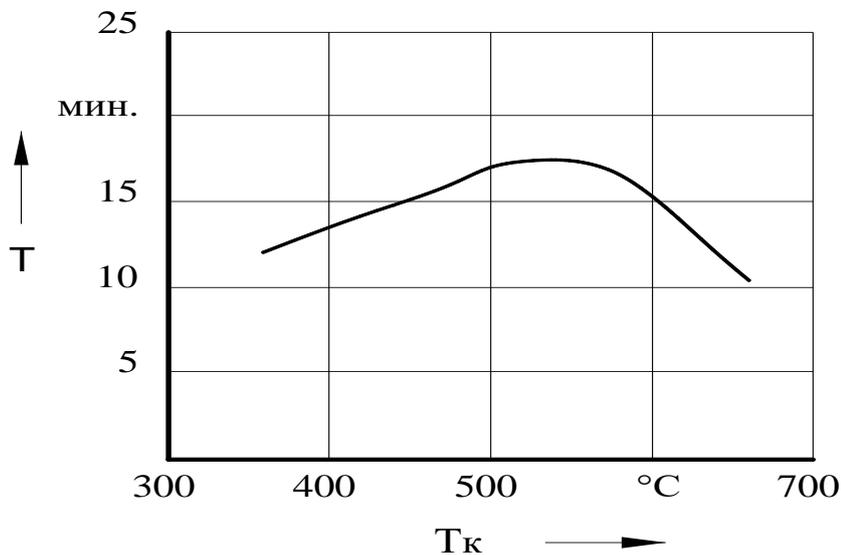
Температура конденсации $T_k, ^\circ\text{C}$	Структурные параметры				
	Период решетки $a, \text{Å}$	Ширина линии $\beta_{111}, \text{микрад}$	Степень искажения решетки $\Delta a/a * 10^3$	Размер ОКР, $\text{Å}$	Макронапряжения $\sigma_0, \text{МПа}$
350	$4,250 \pm 0,00$ 4	$14,0 \pm 0,5$	$5,6 \pm 0,2$	$230 \pm 10$	$-420 \pm 50$
450	$4,250 \pm 0,00$ 4	$11,0 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,2$	$300 \pm 10$	$-150 \pm 20$
550	$4,249 \pm 0,00$ 4	$9,0 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,1$	$370 \pm 10$	$-100 \pm 20$

Влияние температуры конденсации на период стойкости инструмента с покрытием TiN показано на рис. 1.12. Как видно имеет место оптимальная температура, при которой достигается максимальный период стойкости режущего инструмента.

#### 1.4. Влияние температуры конденсации на механические свойства покрытия нитрида титана

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

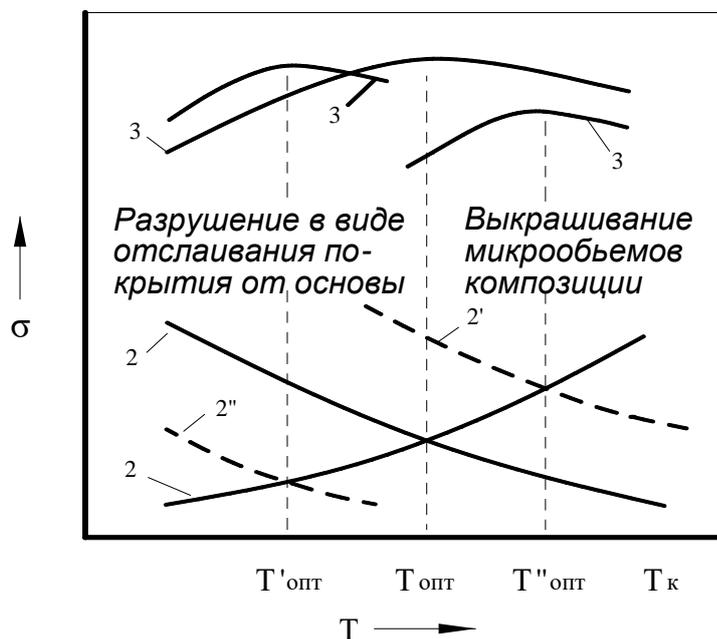
На рис. 1.13 представлена физическая модель, объясняющая влияние температуры конденсации на период стойкости инструмента с покрытием. Согласно данной модели снижение температуры конденсации определяет структурное упрочнение материала покрытия. Уменьшение температуры  $T_k$  повышает когезионную прочность материала покрытия  $\sigma_k$  и снижает его адгезионную прочность  $\sigma_a$ . Точка пересечения кривых  $\sigma_a = f(T_k)$  и  $\sigma_k = f(T_k)$  определяет значение оптимальной температуры  $T_{opt}$ .



**Рис. 1.12. Влияние температуры конденсации  $T_k$  на период стойкости  $T$  пластин ТТ10К8Б с покрытием TiN при обработке заготовок из стали 30ХГСА:  
 $V = 150 \text{ м/мин}$ ,  $S = 0,3 \text{ мм/об}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$**

Как следует из данной модели, в случае  $T_k < T_{opt}$  работоспособность режущего инструмента с покрытием лимитируется адгезионной прочностью сцепления покрытия с инструментальной основой, в случае  $T_k > T_{opt}$

когезионной прочностью покрытия, износостойкостью и твердостью материала покрытия.



**Рис. 1.13.** Гипотетическая схема механизма повышения работоспособности инструмента путем изменения температурного режима конденсации покрытия:  
 1 – адгезионная прочность сцепления покрытия с основой  $\sigma_a$ , 2 – когезионная прочность материала покрытия  $\sigma_k$ , 3 – период стойкости инструмента

Как следует из рис. 1.13, для эффективного использования свойств материала покрытия, полученного при низких температурах конденсации, необходимо обеспечить его достаточную прочность сцепления с инструментальной основой, которая при низких температурах невысока. Для реализации вышесказанного положения конденсацию покрытия необходимо проводить в два этапа: нанесение внутреннего слоя покрытия при высокой температуре, при этом обеспечивается прочное сцепление покрытия с инструментальной основой (высокие значения  $\sigma_a$ ), и последующее нанесение покрытия при возможно низкой температуре, что обеспечит высокие микротвердость и износостойкость покрытия.

### СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Физико-механические свойства износостойких покрытий».

Исследуется влияние температуры конденсации покрытия TiN на период кристаллической решетки, микротвердость, модуль Юнга, поверхностную

энергию, предел текучести, критический коэффициент интенсивности напряжений.

### *ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ*

1. Ознакомиться с методикой, содержанием работы и компьютерной программой расчета механических свойств покрытия.

2. Провести исследования по влиянию температуры конденсации покрытия на механические свойства.

3. Построить графики зависимости механических свойств покрытия от температуры конденсации.

4. Проанализировать и объяснить полученные результаты исследований.

### *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Назовите основные этапы конденсации покрытий, получаемых по методу КИБ и объясните роль температуры на данных этапах.

2. Объясните назначение режима термодинамического равновесия.

3. Объясните влияние температуры конденсации на параметры структуры и механические свойства покрытий.

4. Объясните влияние температуры конденсации на период стойкости режущего инструмента.

5. Объясните технологию нанесения покрытия в комбинированном температурном режиме.

6. Объясните можно ли использовать технологию комбинированного температурного режима конденсации для многоэлементных и многослойных покрытий.

## 1.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

### *ЦЕЛЬ РАБОТЫ*

Целью работы является изучение влияния состава износостойких покрытий на механические свойства.

### *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

Компоновочная схема установки для нанесения двухэлементных износостойких покрытий представлена на рис. 1.6. Нанесение данных покрытий, как было сказано выше, возможно с использованием отдельных катодов, полностью изготовленных из требуемых материалов, или с помощью составных, корпус которых изготавливается из титанового сплава, в котором закрепляется вставка из легирующего материала.

Состав покрытий оказывает существенное влияние на их структурные параметры и механические свойства. Варьирование состава покрытий ((Ti,Zr)N, (Ti,Mo)N, (Ti,Cr)N и др.) обеспечивается путем изменения компоновочной схемы установки: количества катодов, их взаимным расположением в камере установки, расстоянием от катода испарителя до режущего инструмента.

Данные покрытия по аналогии с покрытием (Ti,Zr)N, рассмотренным ранее в лабораторной работе 1, являются двухфазными. В них одновременно присутствуют две ГЦК фазы, близкие по составу соответственно нитриду титана и нитриду второго элемента покрытия (например, MoN, CrN и др.). В табл. 1.5 в качестве примера представлены структурные параметры покрытий (Ti,Mo)N и (Zr,Mo)N. Изменение состава покрытия способствует росту периода решетки для нитрида циркония и уменьшения его для нитрида молибдена. В покрытиях на основе титана и молибдена разделение фаз нитридов титана и молибдена затруднено из-за близости параметров кристаллической решетки, в связи с этим параметры структуры для данных покрытий представлены в табл. 1.5 условно как для однофазной системы.

Двухэлементные покрытия имеют мультислойную структуру с чередующимися слоями соответствующих нитридов и переходными слоями переменного состава компонентов покрытий, как и покрытие (Ti,Zr)N.

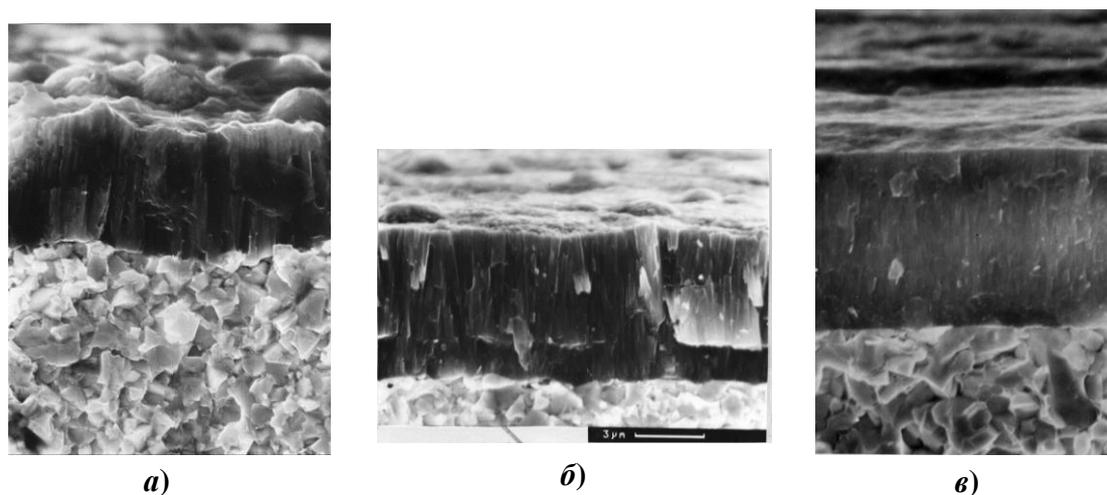
### 1.5. Структурные параметры покрытий (Ti,Mo)N и (Zr,Mo)N

Хим. состав, % мас.			Параметры структуры								
Ti	Zr	Mo	Период решетки <i>a</i> , нм			Ширина линии $\beta_{111}$ , град			Текстура $J_{111}/J_{200}$		
			TiN	ZrN	MoN	TiN	ZrN	MoN	TiN	ZrN	MoN
100	-	-	0,4250	-	-	0,6	-	-	18,4	-	-
80	-	10	0,4257	-	-	0,7	-	-	6,7	-	-
75	-	25	0,4267	-	-	1,2	-	-	2,6	-	-
50	-	50	0,4260	-	-	1,6	-	-	1,0	-	-
38	-	42	0,4240	-	-	1,8	-	-	0,4	-	-
30	-	70	0,42290	-	-	1,5	-	-	0,8	-	-
-	-	100	-	-	0,4200	-	-	0,8	-	-	14,4
-	12	88	-	0,4500	0,4223	-	2,8	1,2	-	0,3	0,2
-	52	48	-	0,4570	0,4254	-	1,7	2,0	-	0,5	1,0
-	63	37	-	0,4590	0,4264	-	1,5	2,4	-	0,6	1,4
-	70	30	-	0,4600	0,4275	-	1,3	2,7	-	2,5	2,5
-	90	10	-	0,4607	0,4297	-	0,8	3,0	-	6,0	5,8
-	100	-	-	0,4610	-	-	0,6	-	-	9,5	-

Анализ фрактограмм изломов твердосплавных пластин с данными покрытиями показывает, что наличие мультислойности различных фаз покрытий и, следовательно, границы между отдельными слоями покрытия сдерживает рост зерен нитридов. Для них не наблюдается выраженного столбчатого строения (рис. 1.14, в), как для одноэлементных покрытий TiN, ZrN и др. Имеет место значительная рельефность поверхности излома. Наличие геометрического фактора (границы между слоями различных фаз покрытия) благоприятно сказывается на энергопоглощении при росте трещины через покрытие. Трещина проходит стадии зарождения множество раз со значительным увеличением поглощения энергии. Различие в механических свойствах мультислоев покрытия, еще больше увеличивает вероятность возникновения ситуации зарождения трещин. Как следствие этих процессов является отсутствие выраженной столбчатости и наличие существенной рельефности поверхности излома двухэлементных покрытий.

Изменение составов двухэлементных покрытий отражается на величине ширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$ . Зависимость ее от состава покрытий также носит экстремальный характер. Увеличение рентгеновской линии свидетельствует о повышении уровня микродеформации кристаллической

решетки данных покрытий, что отражается на их механических свойствах. Для двухэлементных покрытий зависимость микротвердости и коэффициента отслоения от состава носит экстремальный характер и соответствует характеру изменения параметров структуры. Микротвердость двухэлементных покрытий, нанесенных на твердосплавную основу, в 1,5 – 1,9 раза выше микротвердости одноэлементных покрытий TiN, ZrN, MoN. Максимальное увеличение микротвердости для покрытия (Ti,Mo)N имеет место при содержании молибдена 20...60 %, для покрытия (Zr,Mo)N – при содержании молибдена 20...60 %. Максимальную микротвердость имеет покрытие (Ti,Mo)N – 50...54 ГПа, для покрытий (Zr,Mo)N она несколько меньше – 50...53 ГПа. Микротвердость двухэлементных покрытий, нанесенных на быстрорежущую основу, выше по сравнению с одноэлементными покрытиями в 1,4 – 1,8 раза, а максимальные их значения для различных покрытий соответствуют примерно тем же концентрациям элементов, входящих в них, что и для покрытий, нанесенных на твердый сплав.



**Рис. 1.14. Фрактограммы излома твердосплавных пластин: с покрытием TiN, полученным по традиционной технологии (а) и в комбинированном температурном режиме (б), и с покрытием (Ti,Zr)N (в)**

Для покрытий (Ti,Mo)N и (Zr,Mo)N повышение содержания молибдена до 20 % также ведет к снижению коэффициента отслоения, а дальнейшее повышение молибдена вызывает его увеличение (табл. 1.6).

Минимальный коэффициент отслоения и, следовательно, наибольшая прочность сцепления с инструментальной основой имеет место для покрытий (Ti,Mo)N и (Zr,Mo)N при содержании молибдена соответственно 10...25 % и 20

%. Для данных покрытий, нанесенных на быстрорежущую основу, характерны аналогичные изменения коэффициента отслоения.

**1.6. Влияние состава покрытий на коэффициент отслоения  
(инструментальная основа – сталь Р6М5)**

Состав покрытия, % мас.	Коэффициент отслоения, $K_0$
100 Ti	0,75
80 Ti + 20 Zr	0,55
60 Ti + 40 Zr	0,34
50 Ti + 50 Zr	0,2
40 Ti + 60 Zr	0,43
20 Ti + 80 Zr	0,95
100 Zr	0,46
80 Ti + 20 Mo	0,31
60 Ti + 40 Mo	0,23
40 Ti + 60 Mo	0,35
20 Ti + 80 Mo	0,55
100 Mo	0,75
80 Zr + 20 Mo	0,32
60 Zr + 40 Mo	0,49
40 Zr + 60 Mo	1,03
20 Zr + 80 Mo	1,3

Как отмечалось выше, для нанесения двухэлементных покрытий можно использовать составные катоды. Покрытия, полученные с их использованием, по своим структурным параметрам и механическим свойствам отличаются от аналогичных покрытий, полученных из отдельных катодов. 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.

Прочность сцепления покрытий, полученных из составных катодов несколько меньше по сравнению с покрытиями, полученными из отдельных катодов. Это связано с тем, что наличие мультислойной структуры покрытий,

полученных из отдельных катодов, сдерживает процессы трещинообразования и отслоения покрытия.

Меньшая микротвердость и прочность сцепления 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.

Механические свойства двухэлементных покрытий могут быть повышены путем их легирования [1]. Получаемое покрытие ((Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N, где Me<sub>1</sub> и Me<sub>2</sub> – легирующие элементы) может быть нанесено с использованием составных катодов. Технологическая компоновочная схема установки для нанесения таких покрытий показана на рис. 1.15, а. Покрытие наносится с помощью трех составных катодов, два из которых с легирующим элементом Me<sub>1</sub> расположены напротив друг друга, а третий с легирующим элементом Me<sub>2</sub> находится между ними. Как видно, в данном случае за один оборот стола установки также будет образовываться слоистая структура (рис. 1.15, б) как и в случае нанесения двухэлементных покрытий из отдельных катодов: мультислои нитрида титана, легированные элементами Me<sub>1</sub> и Me<sub>2</sub> (соответственно (Ti,Me<sub>1</sub>)N и (Ti,Me<sub>2</sub>)N), чередующиеся с мультислоями нитрида титана, легированного одновременно элементами Me<sub>1</sub> и Me<sub>2</sub> (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N, состав которых может быть различен в зависимости от компоновочной схемы установки. Таким образом, несмотря на использование составных катодов, при конденсации покрытия (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N действуют два механизма упрочнения материала покрытия – твердорастворный и упрочнение микроструктурными барьерами и покрытия на основе модифицированного нитрида титана (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N имеют более высокие физико-механические свойства по сравнению с двухэлементными нитридными покрытиями (Ti,Me<sub>1</sub>)N, также полученными из составных катодов.

Варьируя содержание легирующего элемента в двухэлементном покрытии можно направленно изменять его параметры структуры и физико-механические свойства. Легирование покрытий (Ti,Me<sub>1</sub>)N железом и алюминием повышает прочность их сцепления с инструментальной основой, все остальные легирующие элементы повышают его величину. Все легирующие элементы, за исключением железа, вызывают рост остаточных сжимающих напряжений. Введение легирующих элементов в покрытие (Ti,Me<sub>1</sub>)N ведет к росту его механических свойств – микротвердости, модуля Юнга, предела текучести, вязкости разрушения и др.

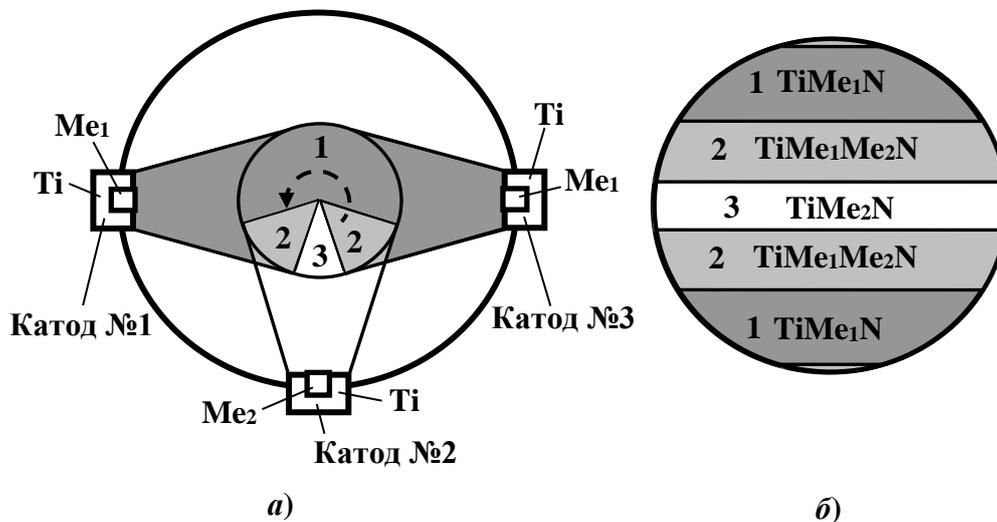
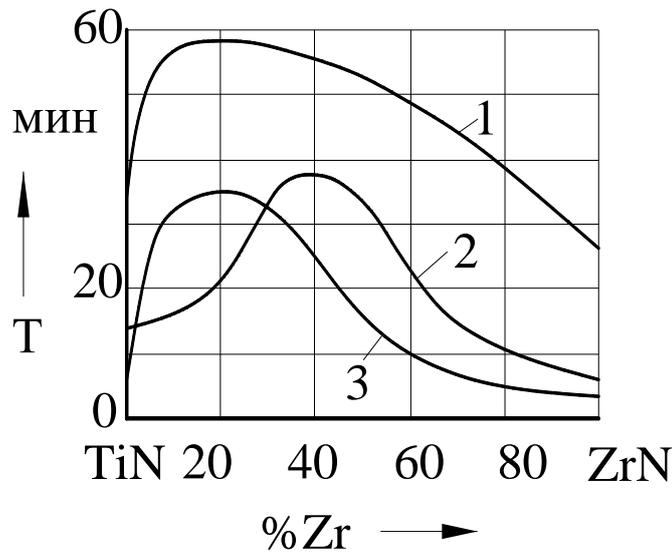


Рис. 1.15. Технологическая компоновочная схема нанесения покрытия (а) и строение осаждаемого покрытия за один оборот стола установки (б)

### 1.7. Влияние состава покрытия (Zr,Mo)N на период стойкости пластин ВК6

Состав покрытия, % мас	Период стойкости $T$ , мин при обработке заготовок из		
	стали 30ХГСА $V=200\text{м/мин}$ $S=0,3\text{мм/об}$ , $t=1\text{мм}$	стали 12Х18Н10Т $V=160\text{м/мин}$ $S=0,15\text{мм/об}$ , $t=0,5\text{мм}$	сплава ВТ22 $V=40\text{м/мин}$ $S=0,15\text{мм/об}$ , $t=1\text{мм}$
100 Zr	6	8,5	14
90 Zr + 10 Mo	5	12,5	37
75 Zr + 25 Mo	7	15,5	49,5
64 Zr + 36 Mo	4,5	11,5	20
52 Zr + 48 Mo	3	9	19
12 Zr + 88 Mo	3	6	14
100 Mo	2	7,5	25

Влияние состава двухэлементных покрытий на период стойкости режущих пластин показано на рис. 1.16 и в табл. 1.7.



**Рис. 1.16. Влияние состава покрытия  $(Ti, Mo)N$  на период стойкости пластин ВК6 при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 (1) и сталей 30ХГСА (2), 12Х18Н10Т (3):**

$1 - V=40^M/\text{мин}, S=0,15^{MM}/\text{об}, t=0,5\text{мм}; 2 - V=200^M/\text{мин}, S=0,3^{MM}/\text{об}, t=1,0\text{мм}; 3 - V=160^M/\text{мин}, S=0,15^{MM}/\text{об}, t=0,5\text{мм}$

Как видно, для двухэлементного покрытия имеет место оптимальное содержание элементов, обеспечивающее максимальное повышение работоспособности режущих пластин при обработке заготовок из различных материалов.

Применение двухэлементных нитридных покрытий повышает период стойкости твердосплавных пластин в 1,5 – 4 раза по сравнению с одноэлементными покрытиями.

### СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Физико-механические свойства износостойких покрытий».

Исследуется влияние содержания легирующих элементов в покрытиях TiZrN, TiMoN и ZrMoN на период кристаллической решетки, микротвердость, модуль Юнга, поверхностную энергию, предел текучести, критический коэффициент интенсивности напряжений.

## *ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ*

1. Ознакомиться с методикой, содержанием работы и компьютерной программой расчета механических свойств покрытия.
2. Провести исследования по влиянию состава покрытий на их механические свойства.
3. Построить графики зависимости механических свойств от состава покрытий.
4. Проанализировать и объяснить полученные результаты исследований.

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Нарисуйте и объясните компоновочные схемы нанесения многоэлементных нитридных покрытий с использованием отдельных и составных катодов.
2. Перечислите механизмы упрочнения материала многоэлементных покрытий, получаемых с использованием отдельных и составных катодов.
3. Объясните различие механических свойств многоэлементных покрытий, полученных с использованием отдельных и составных катодов.
4. Назовите легирующие элементы, вызывающие снижение величины остаточных сжимающих напряжений в покрытии.
5. Назовите легирующие элементы, вызывающие повышение прочности сцепления покрытия с инструментальной основой.
6. Назовите легирующие элементы, в наибольшей степени повышающие механические свойства покрытий.
7. Объясните различную работоспособность режущего инструмента с двухэлементными покрытиями, полученными с использованием отдельных и составных катодов.

## 1.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

### *ЦЕЛЬ РАБОТЫ*

Целью работы является изучение влияния состава газовой среды при конденсации на механические свойства покрытий.

### *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

Компоновочная схема установки для нанесения двухэлементных износостойких покрытий представлена на рис. 1.6. При нанесении карбонитридных покрытий в качестве реакционного газа используется смесь азота и ацетилена. Двухэлементные покрытия на основе карбонитрида титана являются двухфазными. В нем присутствуют две фазы, близкие по своему составу соответственно к карбонитриду титана и карбонитриду второго элемента. Например, покрытие  $(\text{Ti,Zr})\text{CN}$  состоит из чередующихся слоев соответствующих карбонитридов ( $\text{TiCN}$  и  $\text{ZrCN}$ ) и переходных слоев переменного состава, описываемых формулой  $(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{C}_y\text{N}_z$ .

В табл. 1.8 и 1.9 представлены параметры структуры и механические свойства некоторых карбонитридных покрытий. Как видно из табл. 1.8, увеличение содержания ацетилена в составе реакционного газа повышает период решетки покрытий и ширину рентгеновской линии, уменьшает параметр текстурированности покрытий. Кривая зависимости ширины линии  $\beta_{111}$  от содержания ацетилена имеет экстремальный характер. Остаточные напряжения в покрытиях являются сжимающими и увеличиваются по мере повышения содержания ацетилена, достигая максимального значения при содержании  $\text{C}_2\text{H}_2$  в составе реакционного газа 35 %. Дальнейшее повышение ацетилена снижает величину напряжений более чем в два раза. Остаточные напряжения в карбонитридных покрытиях выше на 30 % по сравнению с покрытиями  $\text{TiN}$  и в два раза по отношению к покрытиям карбида титана  $\text{TiC}$ .

Фрактограммы излома покрытий  $\text{TiCN}$  имеют ярко выраженное столбчатое строение, как и покрытия  $\text{TiN}$ . Наличие двух фаз в двухэлементных покрытиях  $(\text{Ti,Zr})\text{CN}$  приводит к формированию границы между слоями,

которая сдерживает рост зерен соответствующих фаз покрытия. Это находит свое отражение на строении покрытия, столбчатости зерен не наблюдается.

Повышение степени дефектности материала покрытий изменяет механические свойства карбонитридных покрытий (рис. 1.17). Максимальная микротвердость одноэлементных карбонитридных покрытий TiCN наблюдается при содержании ацетилена 25...35 % в составе реакционного газа. Микротвердость двухэлементных покрытий на основе титана и циркония на 28...35 % выше по отношению к одноэлементным карбонитридным покрытиям, а ее максимальная величина наблюдается при том же содержании ацетилена.

### 1.8. Структурные параметры покрытия TiCN

Содержание ацетилена, %	Параметры структуры			
	Период решетки $a$ , нм	Ширина линии $\beta_{111}$ , град	Текстура $J_{111}/J_{200}$	Остаточные напряжения $\sigma_0$ , МПа
0	0,4276	0,5	100	-3,0
15	0,4280	0,5	43	-3,25
25	0,4285	0,64	35	-3,51
35	0,4292	0,78	16	-3,9
50	0,4303	1,55	0,9	-1,5
75	0,4329	1,85	0,8	-1,05
100	0,4354	1,4	0,6	-1,8

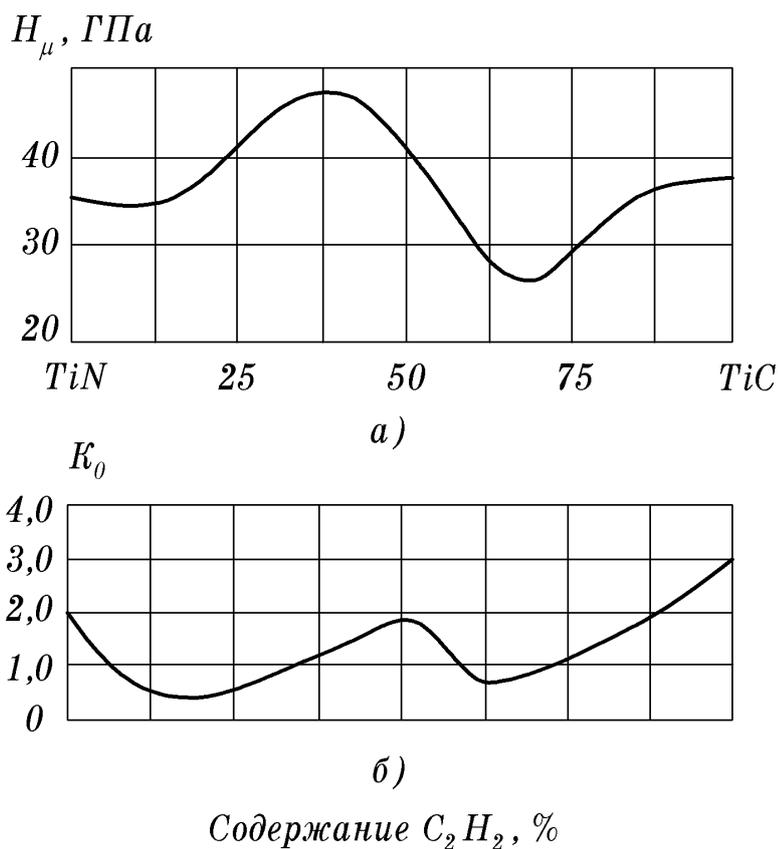
### 1.9. Структурные параметры и механические свойства карбонитридных покрытий

Материал покрытия	Параметры структуры		Микротвердость $H\mu$ , ГПа	Коэффициент отслоения $K_0$
	Период решетки $a$ , нм	Ширина линии $\beta_{200}$ , град		
(Ti,Al)CN	0,4220	1,2	42,3	0
(Ti,Fe)CN	0,4240	1,7	42,0	0
(Ti,Si)CN	0,4300	0,9	51,8	2,1

Более высокая микротвердость двухэлементных карбонитридных покрытий по сравнению с покрытием TiCN объясняется действием различных механизмов упрочнения материалов данных покрытий при их конденсации. Для покрытий TiCN повышение микротвердости материала покрытия происходит только за счет твердорастворного упрочнения материала при

изменении состава реакционного газа, а для покрытий (Ti,Zr)CN действует механизм твердорастворного упрочнения за счет легирования материала покрытия цирконием, а также механизм упрочнения микроструктурными барьерами, вызванный вращением инструмента в камере установки.

Кривая зависимости коэффициента отслоения  $K_0$  от содержания ацетилена носит немонотонный характер, практически повторяя зависимость микротвердости (рис. 1.17, б).



**Рис. 1.17. Влияние содержания ацетилена в составе реакционного газа на микротвердость  $H_\mu$  (а) и коэффициент отслоения  $K_0$  (б) покрытия TiCN, нанесенного на твердый сплав ВК6**

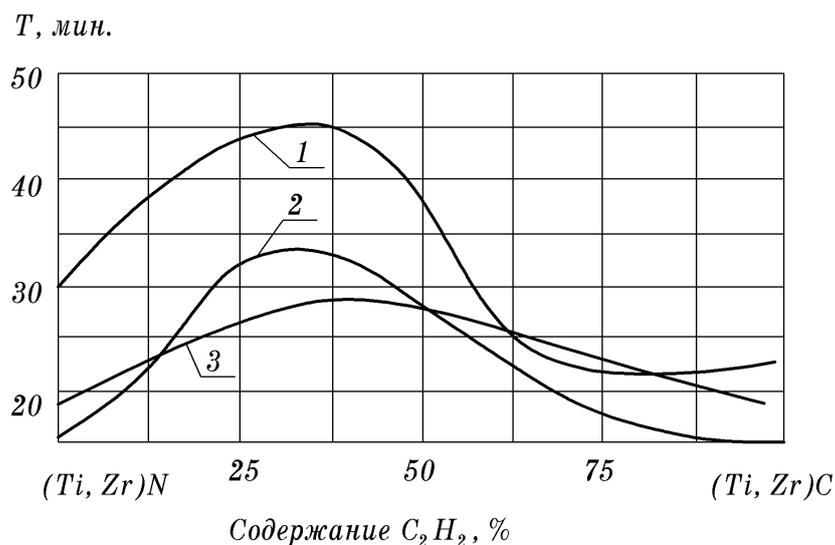
Повышение содержания ацетилена до 10...15 % несколько снижает коэффициент  $K_0$ , затем он достигает максимального значения при содержании  $C_2H_2$  40 %. Дальнейшее повышение ацетилена до 50 % ведет к снижению коэффициента отслоения, а затем наблюдается его рост. Такое поведение зависимости коэффициента  $K_0$  при изменении состава реакционного газа связано с изменением его микротвердости. Повышение твердости материала покрытия ведет к потере пластичности и, как следствие, к разрушению и отслаиванию покрытия от инструментальной основы. Карбонитридные

двухэлементные покрытия имеют меньшую прочность сцепления с основной инструмента по сравнению с одноэлементными. Так, например, коэффициент  $K_0$  для покрытия (Ti,Zr)CN при содержании ацетилена в составе реакционного газа 35 % равен 2,1, а для покрытия TiCN – 1,8. Меньшая прочность сцепления двухэлементных карбонитридных покрытий связана с более высокой их микротвердостью. С другой стороны, при существенной разнице в твердости (28...35 %), различие в коэффициентах  $K_0$  менее значительно (14 %). Последнее объясняется слоистой структурой двухэлементных покрытий.

Содержание ацетилена в составе реакционного газа существенно влияет на режущие свойства инструмента с карбонитридными покрытиями. Наибольший период стойкости режущего инструмента наблюдается при содержании  $C_2H_2$  в составе реакционного газа равном 25...40 %. Режущие инструменты с покрытиями на основе карбонитридов имеют более высокую работоспособность по сравнению с аналогичными по составу нитридными покрытиями (табл. 1.10 и рис. 1.18). Период стойкости пластин с покрытиями TiCN в 1,4 – 2,2 раза выше по сравнению с покрытием TiN, а с покрытиями (Ti,Zr)CN в 1,4 – 2 раза выше по сравнению с покрытием TiCN в зависимости от марки обрабатываемого материала.

#### 1.10. Влияние состава карбонитридных покрытий на период стойкости пластин P6M5

Обрабат. материал	Материал покрытия	Период стойкости $T$ , мин при содержании $C_2H_2$ , %						
		0	20	30	40	60	80	100
30ХГСА	TiCN	16,5	25,0	27,5	22,5	17,5	15,0	14,0
	ZrCN	12,5	21,5	22,5	20,0	13,5	11,0	10,0
	(Ti, Zr)CN	23,5	32,5	35,0	32,5	22,5	19,0	17,5
	(Ti Mo)CN	27,5	35,0	37,5	34,5	25,0	20,0	17,5
12X18H10T	TiCN	14,0	21,0	20,0	17,5	13,5	12,0	10,5
	ZrCN	12,5	17,5	16,5	14,5	13,5	9,5	7,0
	(Ti, Zr)CN	20,0	28,0	30,0	27,5	21,0	17,0	15,0
	(Ti Mo)CN	22,5	30,0	31,5	29,5	23,5	18,5	15,0
BT22	TiCN	7,5	12,5	15,5	16,5	10,0	7,5	6,5
	ZrCN	10,0	13,0	14,5	13,0	8,5	5,0	3,5
	(Ti, Zr)CN	13,5	20,0	22,0	22,0	13,0	9,0	6,5
	(Ti Mo)CN	13,5	22,5	25,0	23,5	15,0	10,0	7,5



**Рис. 1.18. Влияние содержания ацетилена в покрытии  $(Ti, Zr)CN$  на период стойкости пластин ВК6 при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 (1) и сталей 12Х18Н10Т (2), 30ХГСА (3):**

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

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

### СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Физико-механические свойства износостойких покрытий».

Исследуется влияние содержания ацетилена в составе реакционного газа на период кристаллической решетки, микротвердость, модуль Юнга, поверхностную энергию, предел текучести, критический коэффициент интенсивности напряжений покрытий  $TiCN$  и  $TiZrCN$ .

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с методикой, содержанием работы и компьютерной программой расчета механических свойств покрытия.
2. Провести исследования по влиянию содержания ацетилена в составе реакционного газа на их механические свойства.

3. Построить графики зависимости механических свойств от содержания ацетилена в составе реакционного газа.

4. Проанализировать и объяснить полученные результаты исследований.

### *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Нарисуйте и объясните компоновочные схемы нанесения карбонитридных покрытий различного состава.

2. Объясните влияние содержания ацетилена в среде реакционного газа на структурные параметры покрытий.

3. Объясните влияние содержания ацетилена в среде реакционного газа на механические свойства покрытий

4. Объясните различие механических свойств одноэлементных и двухэлементных карбонитридных покрытий.

5. Назовите причины более высокой работоспособности режущего инструмента с карбонитридными покрытиями по сравнению с аналогичными по составу нитридными покрытиями.

## 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Практические занятия проводятся в форме научного семинара, на который выносятся обсуждаемые вопросы. Вопросы, выносимые на обсуждение, приводятся в каждом задании. Кроме того, каждое практическое занятие предусматривает выполнение исследовательской работы.

### 2.1. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЗАНИЯ

#### *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

При непрерывном резании, в частности при токарной обработке, разрушение покрытия на контактных площадках режущего инструмента происходит в результате образования в них трещин [1, 4]. По мере работы инструмента количество трещин увеличивается, происходит их распространение, как в сторону режущей кромки, так и от нее, и, таким образом, на участке упругого контакта передней поверхности возникает сетка трещин.

В процессе резания на площадке контакта по передней поверхности инструмента возникают эквивалентные напряжения, величина которых определяется контактными нагрузками, температурой в зоне резания и остаточными напряжениями в материале покрытия. Нанесение покрытий ведет к снижению эквивалентных напряжений, а их величина определяется составом покрытия. Высокий уровень данных напряжений у вершины режущего клина является причиной разрушения режущей кромки и образования площадки износа на задней поверхности. Действие эквивалентных напряжений вызывает упругопластические деформации режущего клина, в результате чего на участке пластического контакта образуются поперечные трещины, расположенные вдоль режущей кромки, перпендикулярно направлению схода стружки. Данные трещины имеют более значительные размеры по сравнению с трещинами на участке упругого контакта. В самих покрытиях в процессе резания формируются нормальные сжимающие напряжения, которые снижают интенсивность процессов трещинообразования и способствует торможению трещин в материале покрытия. Время работы инструмента до образования таких трещин определяется величиной эквивалентных напряжений и

напряжений, действующих в покрытии в процессе резания. Рост количества поперечных трещин вдоль режущей кромки и мелких трещин на участке упругого контакта приводит сначала к скалыванию покрытия по краям трещин, а затем к ослаблению отдельных объемов покрытия и удалению их сходящей стружкой с обнажением инструментальной основы, что вызывает повышение интенсивности изнашивания режущего инструмента.

К износостойким покрытиям инструмента, работающего в условиях непрерывного течения, должны предъявляться следующие требования. Во-первых, для повышения формоустойчивости режущего клина покрытие за счет создания благоприятных условий контактного взаимодействия на передней поверхности должно обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений. Выполнение данного требования ведет к увеличению времени работы режущего инструмента до начала образования трещин в покрытии. Во-вторых, покрытие должно иметь высокий уровень остаточных сжимающих напряжений, способствующих возникновению в нем в процессе резания высоких сжимающих нормальных напряжений. Выполнение этого требования также будет способствовать повышению времени работы инструмента до образования трещин и снижению интенсивности процесса трещинообразования. В-третьих, покрытие должно иметь высокую прочность сцепления с инструментальной основой, что позволит увеличить время работы инструмента до полного разрушения покрытия на контактной площадке на передней поверхности.

Выполнение перечисленных требований невозможно реализовать в однослойном покрытии [1, 2]. Например, наименьшие значения эквивалентных напряжений обеспечивают нитридные покрытия, при этом минимальная их величина имеет место для инструмента с многоэлементными нитридными покрытиями. Максимальный уровень остаточных напряжений и нормальных сжимающих напряжений, возникающих в процессе резания, характерен для нитридных многоэлементных покрытий и карбонитридных покрытий. С другой стороны, карбонитридные и многоэлементные нитридные покрытия уступают одноэлементным нитридным покрытиям по прочности сцепления с инструментальной основой и наоборот. Таким образом, перечисленные выше требования можно реализовать только в многослойном покрытии, которое должно иметь как минимум два слоя. Верхний слой такого покрытия должен обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений для повышения формоустойчивости режущего клина и иметь высокие остаточные сжимающие напряжения для обеспечения в покрытии в процессе резания

высоких нормальных сжимающих напряжений, снижающих интенсивность процесса трещинообразования; нижний слой должен обеспечить высокую прочность сцепления покрытия с инструментальной основой.

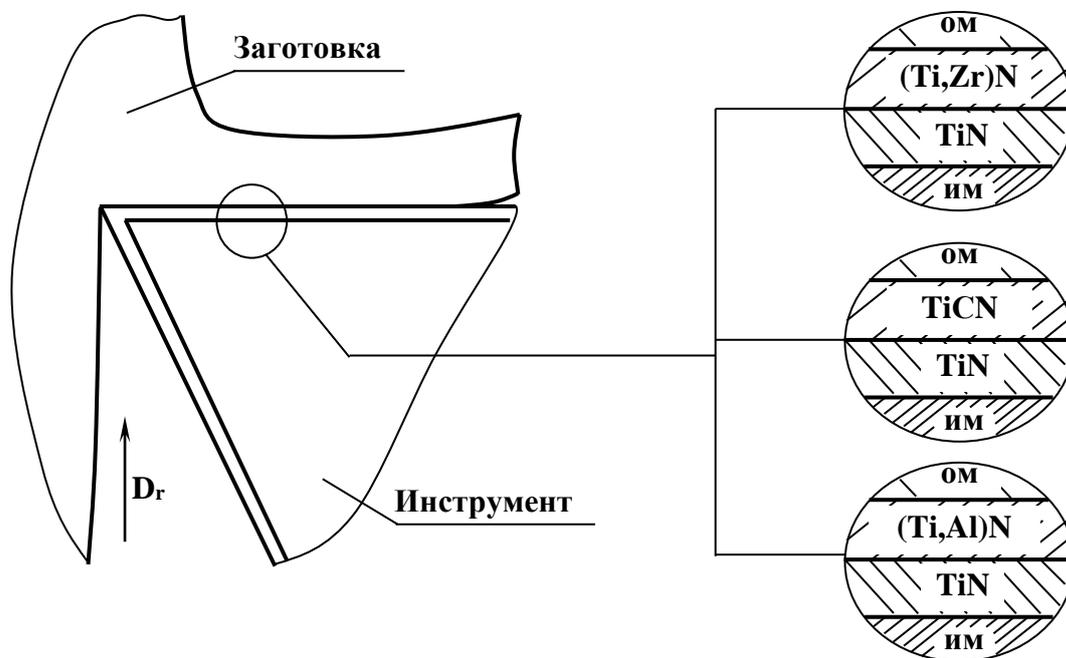


Рис. 2.1. Схемы конструкций многослойных покрытий

Схемы возможных конструкций многослойных покрытий, удовлетворяющих вышеизложенному принципу, приведены на рис. 2.1.

Структурные параметры (табл. 2.1) и механические свойства (табл. 2.2) многослойных покрытий во многом определяются их конструкцией: толщинами отдельных слоев и толщиной покрытия в целом.

Увеличение толщины верхнего слоя повышает период кристаллической решетки покрытия, что свидетельствует о росте степени ее искажения. Независимо от толщины покрытия характер изменения периода решетки одинаковый. Параметр текстуры  $J_{111}/J_{200}$  в целом имеет тенденцию к росту с увеличением общей толщины покрытия, что говорит об увеличении доли кристаллитов с ориентацией в кристаллической плоскости  $\{111\}$ . При этом необходимо отметить, что наибольшее отличие по абсолютной величине параметра  $J_{111}/J_{200}$  между покрытиями разной толщины наблюдается при малой толщине верхнего слоя. С увеличением толщины этого слоя это различие уменьшается, при этом абсолютные значения параметра текстуры снижаются.

Преимущественная ориентация кристаллитов в одинаковом направлении способствует анизотропии свойств материала покрытия, что с одной стороны

может благоприятно влиять на эксплуатационные параметры, приводя, например, к росту микротвердости и износостойкости. Однако, при разрушении покрытия в результате процессов трещинообразования, развитие трещин может происходить по границам кристаллитов, и в этом случае одинаковая ориентация может сыграть отрицательную роль [4].

Изменение толщины отдельных слоев покрытия практически не влияет на ширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$ . Данный параметр изменяется в пределах 10 % при различном сочетании слоев покрытия. Превалирующее влияние на него оказывает общая толщина многослойного покрытия. Например, увеличение толщины покрытия с 6 мкм до 10 мкм приводит к росту величины  $\beta_{111}$  на 30...35 % . Для многослойных покрытий с верхним слоем (Ti,Zr)N характерны более высокие значения величины  $\beta_{111}$ , что позволяет говорить о более высоких механических свойствах данных покрытий.

### 2.1. Влияние толщины слоев на структурные параметры покрытия TiN-TiCN

Толщина покрытия $h_n$ , мкм	Толщина слоя, мкм		Период кристаллической решетки $a$ , нм	Полуширина рентгеновской линии $\beta_{111}$ , град	Параметр текстуры $J_{111}/J_{200}$	Остаточные напряжения $\sigma_0$ , МПа
	TiCN	TiN				
8	2	6	0,42714	0,61	23,2	700
	4	4	0,43035	0,63	21,6	1145
	6	2	0,43088	0,62	13,1	1413
10	2	8	0,42271	0,70	28,4	464
	4	6	0,42580	0,73	22,1	1117
	6	4	0,42572	0,72	8,9	1591
	8	2	0,42245	0,67	0,01	1887

Учитывая, что величина  $\beta_{111}$  свидетельствует об упрочнении материала покрытия, можно предположить, что большую микротвердость будут иметь многослойные покрытия с толщиной верхнего слоя в пределах 3...5 мкм, для которых отмечаются большие значения полуширины рентгеновской линии.

Изменение толщины отдельных слоев многослойных покрытий существенно отражается на величине остаточных напряжений (рис. 2.2), величина которых растет с повышением общей толщины покрытия. Так, например, для покрытия TiN-TiCN увеличение толщины слоя TiCN вызывает рост  $\sigma_0$ , уровень которых выше для более толстых покрытий. Согласно [7, 29], увеличение уровня остаточных напряжений косвенно свидетельствует об

увеличении микротвердости покрытия, рост которой положительно отражается на работоспособности инструмента. Повышение толщины слоев TiN или TiCN приводит к сближению структурных параметров многослойного покрытия к значениям соответствующих параметров однослойных покрытий TiN и TiCN, что указывает на отсутствие, либо слабое влияние слоев на структурные параметры друг друга.

Максимальные остаточные напряжения имеют покрытия общей толщиной 10 мкм. Для покрытий с толщинами 6 и 8 мкм уровень напряжений на 26...31 % ниже в зависимости от толщины верхнего слоя, что связано с меньшим количеством дефектов в более тонких покрытиях.

## 2.2. Влияние толщины слоев на механические свойства покрытия TiN-(Ti,Zr)N

Толщина покрытия $h_n$ , мкм	Толщина слоя, мкм		Микротвердость $H_\mu$ , ГПа	Коэффициент отслоения $K_0$
	(Ti,Zr)N	TiN		
8	2	6	25,98	0,21
	4	4	31,10	0,10
	6	2	34,85	0,14
10	2	8	25,91	0,39
	4	6	31,25	0,23
	6	4	35,22	0,22
	8	2	37,82	0,38

Микротвердость многослойного покрытия также определяется толщиной и составом верхнего слоя. Независимо от общей толщины многослойного покрытия увеличение толщины верхнего слоя ведет к росту микротвердости. При этом влияние слоя (Ti,Zr)N на величину  $H_\mu$  более значительно, чем TiCN. Так, при общей толщине многослойного покрытия 6 мкм, увеличение толщины верхнего слоя с 2 до 4 мкм приводит к росту микротвердости покрытия TiN-TiCN на 14 %, а покрытия TiN-(Ti,Zr)N – на 23,5 %. Данный факт объясняется большей микротвердостью покрытия (Ti,Zr)N по сравнению с TiCN. Такая же тенденция изменения микротвердости наблюдается и для более толстых многослойных покрытий. Увеличение общей толщины многослойного покрытия в меньшей степени сказывается на ее величине.

Максимальную микротвердость имеют многослойные покрытия толщиной 8 мкм и 10 мкм при толщине верхнего слоя 65...80 % от общей толщины покрытия. Большую микротвердость (на 18...34 % в зависимости от

толщины верхнего слоя и общей толщины покрытия) имеют покрытия TiN-(Ti,Zr)N по сравнению с покрытием TiN-TiCN.

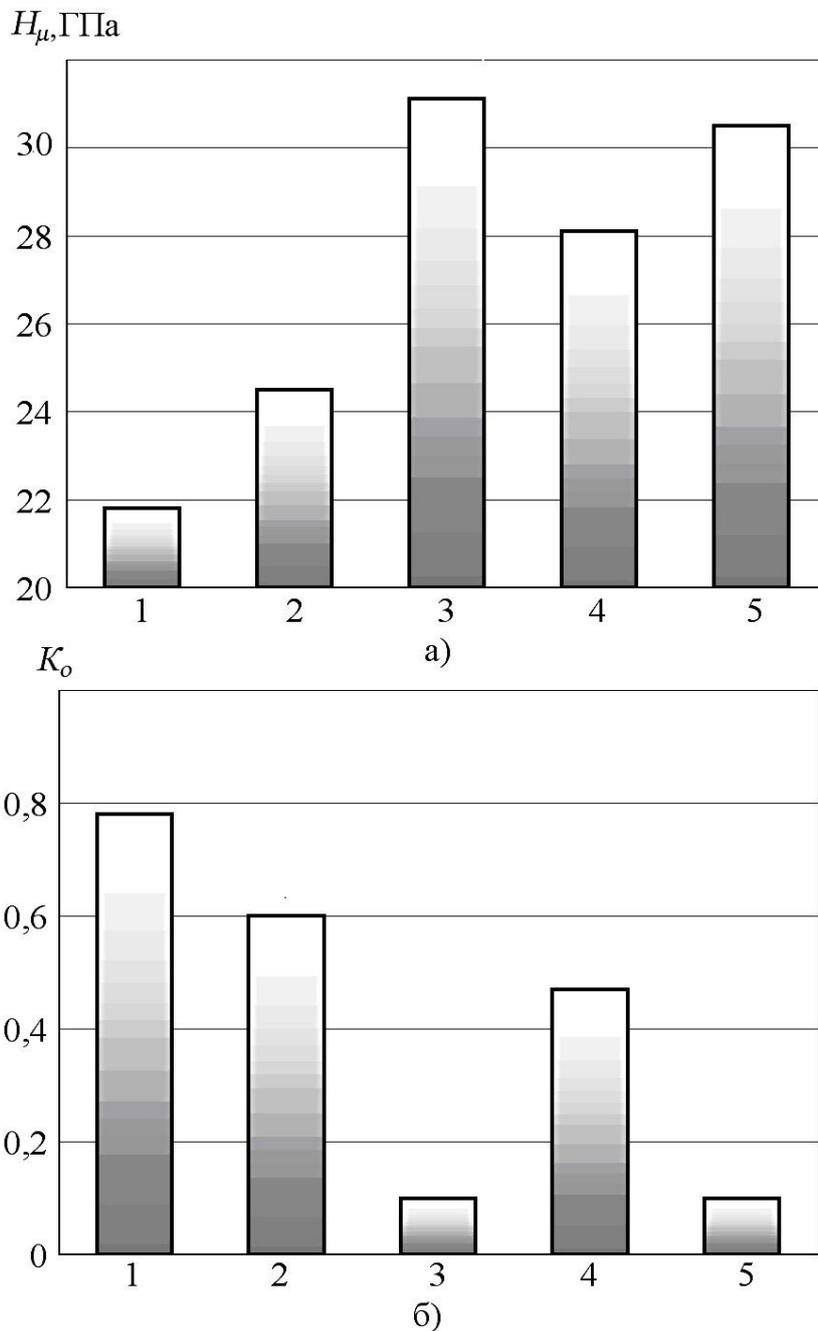
Прочность сцепления многослойного покрытия определяется толщиной нижнего слоя TiN (рис. 2.3). При этом зависимость коэффициента отслоения от толщины слоев имеет экстремальный характер и определяется соотношением толщин верхнего и нижнего слоя и общей толщиной покрытия. Минимум данных зависимостей наблюдается при толщине слоя TiN в пределах 3...5 мкм в зависимости от общей толщины покрытия. С ростом общей толщины покрытия наблюдается тенденция повышения толщины слоя TiN, при которой значения коэффициента отслоения минимальны. Так, например, для покрытия TiN-TiCN толщиной 6 мкм минимальное значение коэффициента  $K_0$  наблюдается при толщине слоя TiN равной 3 мкм, при толщине 8 мкм и 10 мкм – толщина слоя TiN соответственно равна 4 мкм и 5 мкм. Наименьший коэффициент отслоения и, следовательно, наибольшая прочность сцепления с инструментальной основой покрытия TiN-TiCN имеет место при толщине нижнего слоя TiN, равной 50 % от общей толщины покрытия; для покрытия TiN-(Ti,Zr)N толщиной 6, 8 и 10 мкм толщина нижнего слоя составляет, соответственно 50 %, 50...63 % и 70 %.

Сравнивая многослойные покрытия различной толщины, можно отметить, что минимальный коэффициент отслоения, а, следовательно, наибольшую прочность сцепления имеют покрытия толщиной 8 мкм. Кроме того, для данных покрытий характерен меньший разброс значений  $K_0$  при различных соотношениях толщин отдельных слоев. Большую прочность сцепления с инструментальной основой имеют покрытия TiN-(Ti,Zr)N, коэффициент отслоения для которых в 3,0 – 6,7 раза ниже по сравнению с покрытием TiN-TiCN. При этом их микротвердость выше микротвердости покрытий TiN-TiCN аналогичной конструкции всего на 17...36 %. Сопоставление механических свойств многослойных покрытий и однослойных TiCN, (Ti,Zr)N показывает, что микротвердость покрытий отличается незначительно, в то время как прочность сцепления существенно различна. Так коэффициент отслоения  $K_0$  покрытия TiN-TiCN в 2,5 раза ниже по сравнению с однослойным покрытием TiCN, а TiN-(Ti,Zr)N – в 12 раз по сравнению с покрытием (Ti,Zr)N.

На рис. 2.3 представлены сравнительные данные по микротвердости и коэффициенту отслоения различных многослойных покрытий.

Интенсивность износа инструмента с многослойными покрытиями определяется соотношением толщин верхнего и нижнего слоя. При этом влияние

толщины слоя (Ti,Zr)N выше по сравнению с TiCN. С увеличением общей толщины многослойного покрытия влияние верхнего слоя на интенсивность износа возрастает.



**Рис. 2.3. Влияние состава многослойного покрытия на микротвердость  $H_\mu$  (а) и коэффициент отслоения  $K_0$  (б):**  
**1 – TiN; 2 – TiN-TiCN; 3 – TiN-(Ti,Zr)N; 4 – TiN-(Ti,Al)N; 5 – TiN-TiCN-(Ti,Zr)N**

### 2.1.1. Вопросы, выносимые на практическое занятие

- механизм влияния износостойкого покрытия на изнашивание контактных площадок режущего инструмента в условиях непрерывного резания;
- требования, предъявляемые к износостойким покрытиям, работающим в условиях непрерывного резания;
- принцип формирования многослойных покрытий для инструмента работающего в условиях непрерывного резания;
- влияние конструкции многослойного покрытия на параметры структуры и механические свойства.

2.1.2. Исследовательская работа «Исследование влияния конструкции многослойных покрытий на структурные параметры, механические свойства и изнашивание режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания». Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Многослойные покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания», подпрограммы «Структурные параметры», «Механические свойства», «Интенсивность изнашивания режущего инструмента».

Исследования проводятся в следующей последовательности:

1. Исследование толщины верхнего слоя многослойных покрытий TiN-TiCN и TiN-TiZrN на их структурные параметры и механические свойства.
2. Исследование влияния конструкции многослойных покрытий TiN-TiCN, TiN-TiZrN, TiN-TiAlN и TiN-TiCN-TiZrN на микротвердость и коэффициент отслоения.
3. Исследование толщины верхнего слоя многослойных покрытий TiN-TiCN и TiN-TiZrN на интенсивность изнашивания режущего инструмента.
4. Исследование влияния конструкции многослойных покрытий TiN-TiCN, TiN-TiZrN, TiN-TiAlN и TiN-TiCN-TiZrN на интенсивность изнашивания режущего инструмента.

По результатам исследований строятся диаграммы и графики структурных параметров, механических свойств и интенсивности изнашивания режущего инструмента в зависимости от конструктивных параметров многослойного покрытия.

## 2.2. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ

### *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

Характер разрушения покрытия, тепловое и напряженное состояние режущего инструмента в условиях прерывистого резания определяют требования, предъявляемые к покрытиям. Износостойкие покрытия, предназначенные для режущего инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, должны отвечать следующим требованиям [3]. Во-первых, с точки зрения теплового состояния режущего инструмента покрытие должно обеспечить возможно большее снижение температур как на его контактных площадках, так и в режущем клине и меньшую амплитуду их колебания за время рабочего и холостого ходов. Соблюдение такого требования позволит снизить эквивалентные напряжения в режущем клине и амплитуду их колебания, повысить количество циклов работы инструмента до образования и развития трещин как в режущем клине, так и в материале покрытия и, следовательно, долговечность покрытий на контактных площадках инструмента. Во-вторых, для сдерживания процессов трещинообразования в материале покрытия и режущем клине инструмента, покрытие должно иметь высокие адгезионно-прочностные свойства и высокий уровень остаточных сжимающих напряжений, способствующий формированию в нем и на его границе с инструментальной основой в процессе резания и во время холостого хода инструмента высоких сжимающих напряжений.

Как показано в [3], наибольшее снижение температур и наименьшая амплитуда их колебания за время рабочего цикла инструмента характерны для одноэлементных и двухэлементных покрытий на основе нитридов по сравнению с соответствующими типами покрытий на основе карбонитридов (например, TiN и TiCN; (Ti,Zr)N и (Ti,Zr)CN), а также для одноэлементных покрытий на основе нитридов по сравнению с двухэлементными покрытиями (например, TiN и (Ti,Zr)N; TiN и (Ti,Zr)CN). В то же время наибольшие сжимающие напряжения в материале покрытий в процессе резания и во время холостого хода обеспечивают одноэлементные и двухэлементные покрытия на основе карбонитридов по сравнению с покрытиями аналогичного типа на основе нитридов (например, TiCN и TiN; (Ti,Zr)CN и (Ti,Zr)N), а также двухэлементные покрытия по сравнению с одноэлементными (например,

(Ti,Zr)N и TiN; (Ti,Zr)CN и TiN). Таким образом, наибольшие сжимающие напряжения в материале покрытия в процессе резания и во время холостого хода инструмента будут обеспечивать покрытия, имеющие высокие прочностные свойства и большие остаточные сжимающие напряжения, в то время как наибольшее снижение температур и меньшую амплитуду их колебания обеспечивают покрытия с меньшим уровнем прочностных свойств и остаточных напряжений.

Как следует из вышесказанного, сочетание указанных требований к материалу покрытия, обеспечивающих высокую эффективность инструмента при прерывистом резании, невозможно получить в однослойных покрытиях. Их возможно реализовать только в покрытии многослойного типа, принцип формирования которого должен обеспечить сочетание сформулированных выше требований.



Рис. 2.4. Схема конструкции многослойного покрытия

Такое покрытие должно иметь минимум два слоя (рис. 2.4): верхний слой 1 покрытия за время рабочего и холостого ходов должен обеспечить максимальное снижение контактных температур и минимальную амплитуду их колебания, а нижний слой 2 – высокий уровень сжимающих напряжений в материале покрытия. Кроме того, наличие в таком покрытии границ раздела между слоями с различными прочностными свойствами будет дополнительно препятствовать процессам распространения в нем трещин.

Многослойные покрытия, сформированные по предложенному принципу, позволяют повысить эффективность работы инструмента как на высоких скоростях резания и подачах, так и на низких. Кроме того, при фрезеровании с большими скоростями резания и подачами, когда наблюдается

преимущественный износ инструмента по передней поверхности, с точки зрения сохранения покрытия на передней поверхности желательно увеличивать его толщину. Работа инструмента на высоких скоростях резания и подачах сопровождается высокими температурами на передней поверхности, при которых интенсифицируются диффузионный и коррозионно-окислительный износ. В этих условиях покрытие должно не только сопротивляться адгезионному разрушению, но и предотвращать диффузионные процессы, способствующие разупрочнению объемов инструментального материала под покрытием. Для снижения интенсивности диффузионных процессов необходимо увеличивать толщину покрытия. Кроме того, рост толщины покрытия ведет к повышению стойкости инструмента к высокотемпературной коррозии и окислению, что особенно важно для прерывистого резания [3]. Поэтому при работе инструмента на высоких скоростях резания и подачах более эффективны покрытия большей толщины. При фрезеровании на малых скоростях резания и подачах, износ происходит преимущественно по задней поверхности инструмента. В данных условиях более эффективны тонкие покрытия, имеющие большую прочность сцепления с основой и пластичность, меньшее количество дефектов по сравнению с более толстыми покрытиями. При работе инструмента на низких скоростях резания и подачах вклад диффузионных и коррозионно-окислительных процессов в износ передней поверхности незначителен, поэтому в данных условиях предпочтительны более тонкие покрытия, эффективно сопротивляющиеся адгезионно-усталостному и абразивному износу.

Если сформировать многослойное покрытие по предложенному выше принципу, то на задней поверхности инструмента нижний его слой, обладающий высокими прочностными свойствами, будет первым вступать в работу и эффективно тормозить рост площадки износа по задней поверхности как при работе на высоких, так и на низких скоростях резания и подачах (рис. 2.4). В то же время большая толщина покрытия будет обеспечивать снижение интенсивности износа на передней поверхности инструмента при работе его на высоких скоростях резания и подачах. При работе на низких скоростях резания и подачах эффективное сопротивление покрытия разрушению на передней поверхности в результате адгезионно-усталостного износа будет обеспечиваться за счет более высокой прочности отдельных слоев покрытия в результате их малой толщины и возможности торможения роста трещин в покрытии на границах раздела слоев.

Рассмотрим многослойные покрытия на основе нитридов и карбонитридов титана TiCN-TiN и TiN-TiCN-TiN. Многослойные покрытия по сравнению с однослойным покрытием имеют более высокое значение периода кристаллической решетки и полуширины рентгеновской линии, что свидетельствует о росте степени искажения его кристаллической решетки и об изменении его механических свойств. Увеличение толщины слоя TiCN в многослойных покрытиях вызывает снижение параметра текстуры  $J_{111}/J_{200}$ , что свидетельствует о снижении доли кристаллитов с ориентацией в плоскости {111}, и рост остаточных сжимающих напряжений (табл. 2.3).

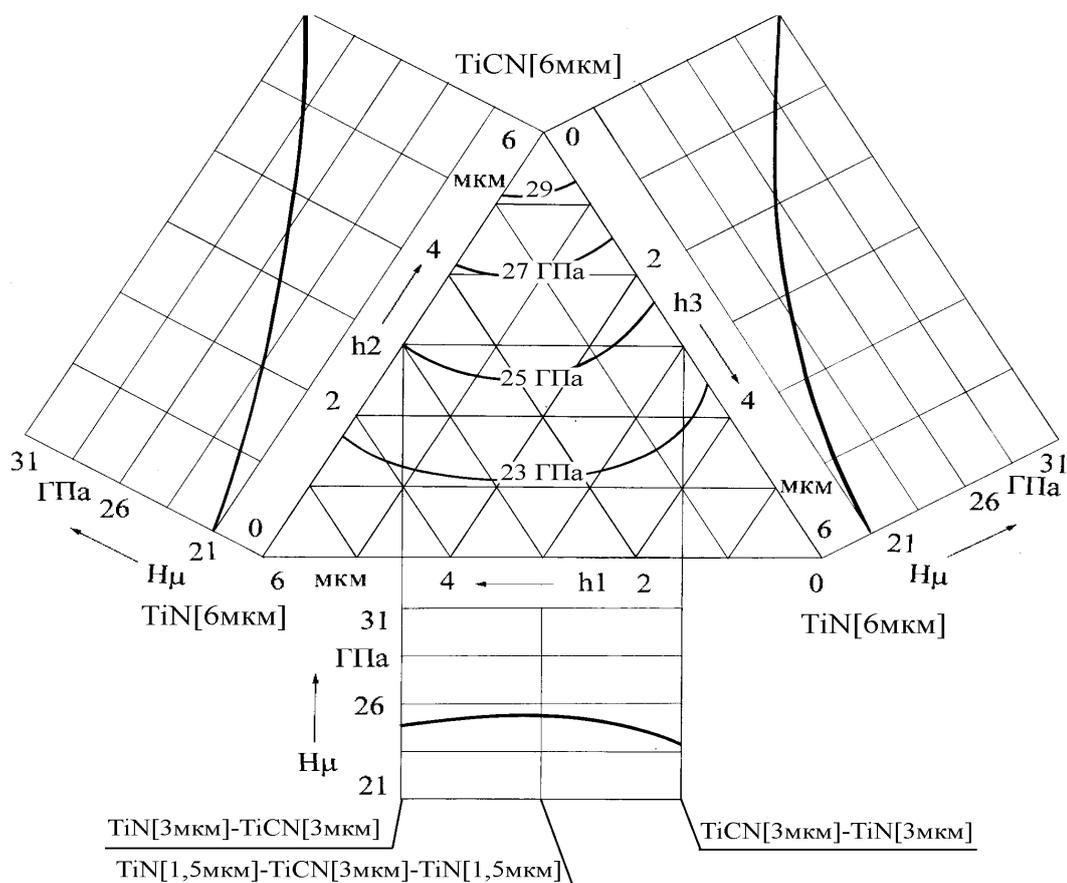
### 2.3. Влияние конструкции покрытия на основе нитрида и карбонитрида титана на его структурные параметры

№	Тип покрытия	Толщина слоев, мкм	Параметр решетки $a$ , нм	Текстура $J_{111}/J_{200}$	Полуширина $\beta_{111}$ , град	Напряжения 1-го рода $\sigma$ , МПа
1	TiN	6	0,4249	76	0,43	– (1130±100)
2	TiN-TiCN	4,5 – 1,5	0,4253	44	0,56	– (1380±40)
3	TiN-TiCN	1,5 – 4,5	0,4259	30	0,54	– (2250±170)
4	TiCN	6	0,4260	11,8	0,60	– (2300±270)
5	TiCN-TiN	4,5 – 1,5	0,4248	32	0,47	– (1330±50)
6	TiCN-TiN	1,5 – 4,5	0,4250	46	0,46	– (1200±110)
7	TiN-TiCN-TiN	3-1,5-1,5	0,4250	44	0,53	– (1310±70)
8	TiN-TiCN-TiN	1,5-3-1,5	0,4247	36	0,53	– (1400±170)

Микротвердость многослойных покрытий больше по сравнению с однослойными покрытиями (рис. 2.5). При этом увеличение толщины более твердого слоя из карбонитрида титана вызывает рост микротвердости покрытий. Для трехслойных покрытий характерны более высокие значения величины  $H_\mu$  по сравнению с двухслойными при той же толщине слоя TiCN.

Прочность сцепления многослойных покрытий определяется соотношением толщин слоев в покрытии, а ее зависимость от толщины этих слоев имеет экстремальный характер (рис. 2.6). Наличие в многослойных покрытиях более твердых карбонитридных слоев снижает их прочность сцепления с инструментальной основой по сравнению с однослойным нитридным покрытием TiN, а повышение их толщины увеличивает величину коэффициента отслоения. Наличие в трехслойном покрытии TiN-TiCN-TiN нижнего слоя TiN, имеющего большую прочность сцепления с

инструментальной основой по сравнению с карбонитридом титана TiCN, существенно снижает коэффициент отслоения покрытия.



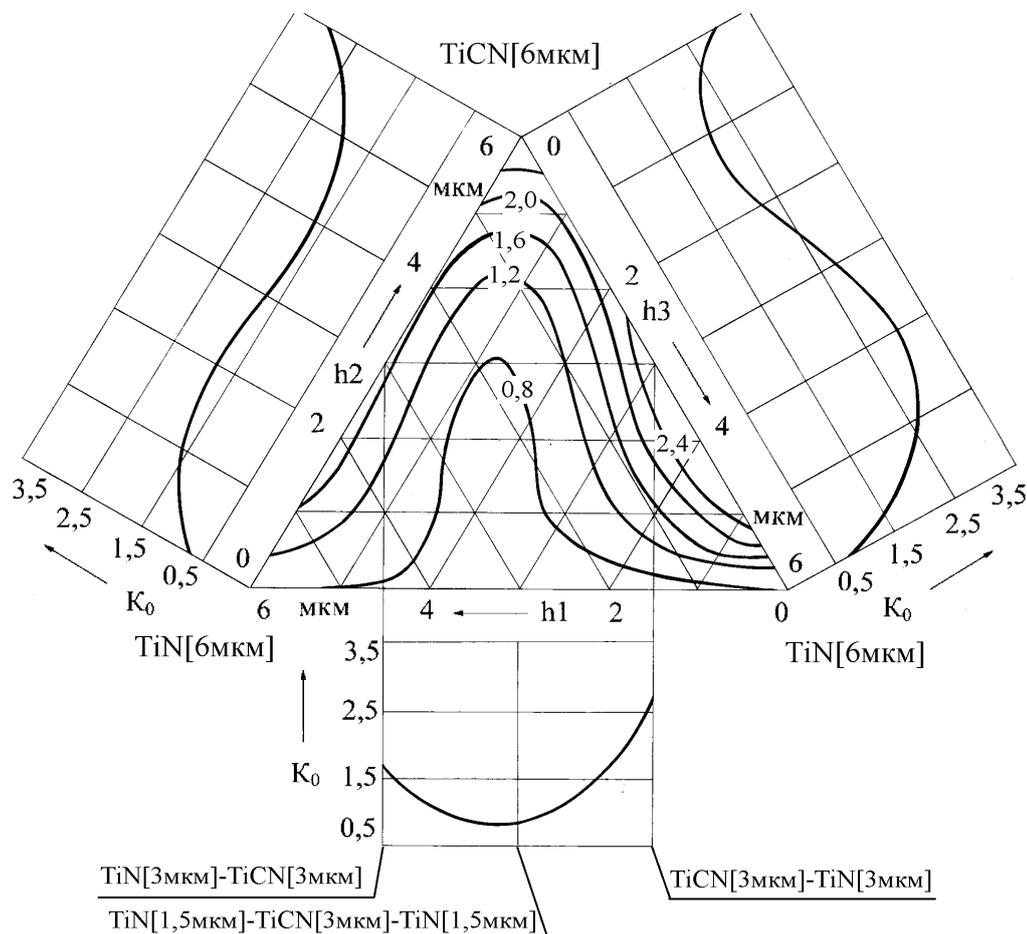
**Рис. 2.5. Зависимость микротвердости многослойных покрытий от толщины слоев [3]:**

$h_1, h_2, h_3$  – толщины нижнего, промежуточного и верхнего слоев покрытия

Более высокая прочность сцепления трехслойного покрытия, кроме наличия нижнего слоя TiN, связана также с увеличением прочности самого покрытия и его способности тормозить рост трещин с увеличением количества слоев и уменьшением их толщины.

Нанесение многослойных покрытий существенно снижает износ инструмента по передней и задней поверхности по сравнению с однослойными покрытиями. Наименьшая интенсивность изнашивания инструмента с двухслойными покрытиями имеет место при толщине нижнего слоя TiCN, составляющей 30...50 % от общей толщины покрытия, а трехслойного – при толщинах нижнего слоя TiN и промежуточного слоя TiCN, равных соответственно 18...25 % и 45...55 % от общей толщины покрытия.

Многослойные покрытия, построенные по предложенному принципу, в наибольшей степени снижают интенсивность процессов трещинообразования в материале покрытия и инструментальной основе (рис. 2.7).

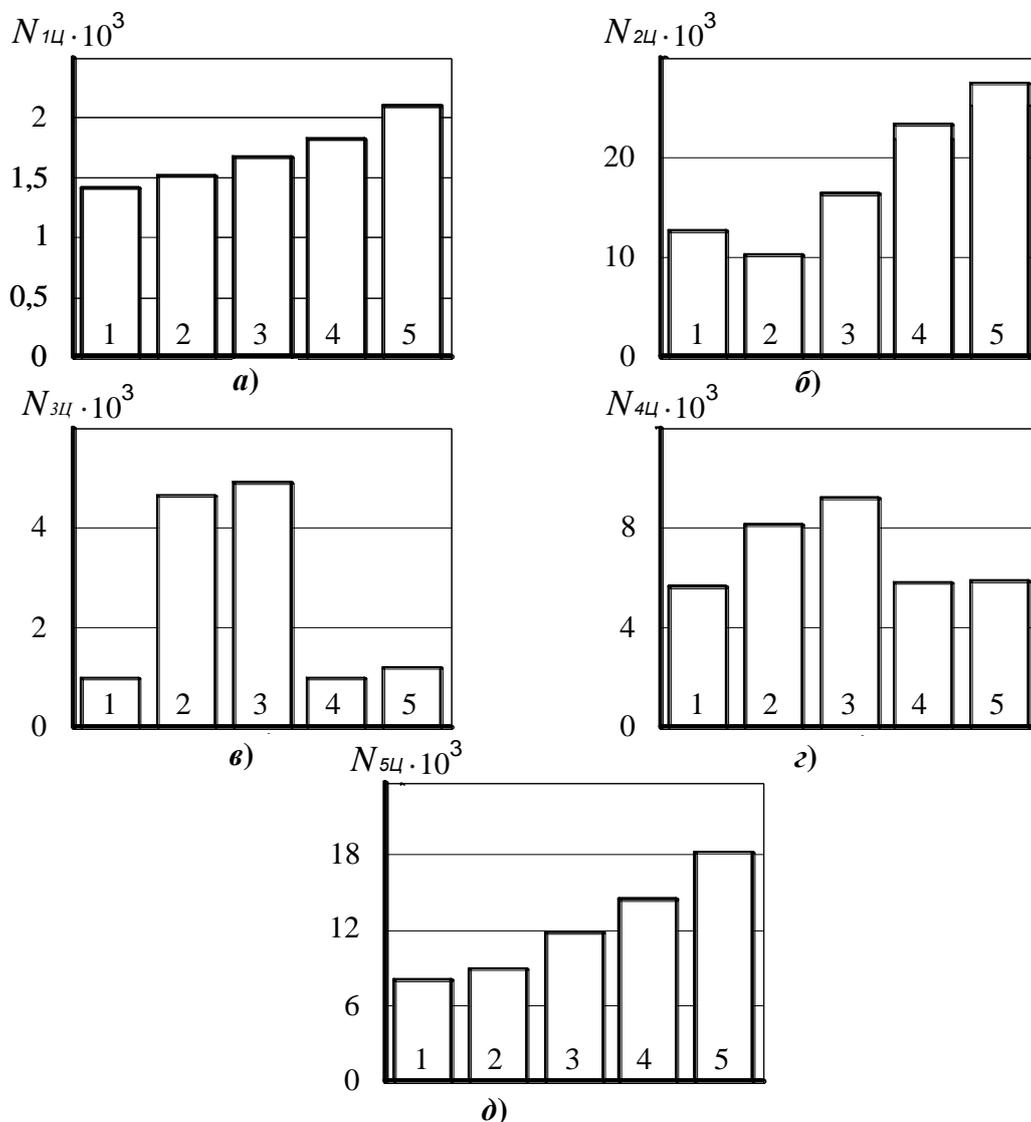


**Рис. 2.6. Зависимость коэффициента отслоения многослойных покрытий от толщины слоев [3]:**

$h_1, h_2, h_3$  – толщины нижнего, промежуточного и верхнего слоев

Нанесение двухслойного покрытия TiCN-TiN увеличивает количество циклов работы до образования продольных трещин в инструментальной основе (трещины 1-го типа) по сравнению с покрытием TiN на 29 %, а по сравнению с TiCN на 20 %. Для инструмента с покрытием TiN-TiCN, не отвечающем предложенному принципу формирования многослойных покрытий, количество циклов до образования трещин 1-го типа увеличивается в меньшей степени – соответственно на 18 % и 11 %. Как видно из рис. 2.8, на контактной площадке инструмента с многослойным покрытием TiCN-TiN наблюдается значительно меньше трещин, чем для двухслойного покрытия TiN-TiCN, конструкция которого не отвечает предложенному принципу формирования многослойных

покрытий. Трехслойные покрытия по сравнению с двухслойными сдерживают процессы трещинообразования в режущем клине инструмента еще в большей степени.



**Рис. 2.7. Влияние конструкции покрытия на количество циклов до образования  $N_{1ц}$  и выхода  $N_{2ц}$  продольных трещин в инструментальной основе на режущую кромку (а, б), образования продольных  $N_{3ц}$  и поперечных  $N_{4ц}$  трещин в покрытии (в, г) и разрушения покрытия  $N_{5ц}$  (д):**

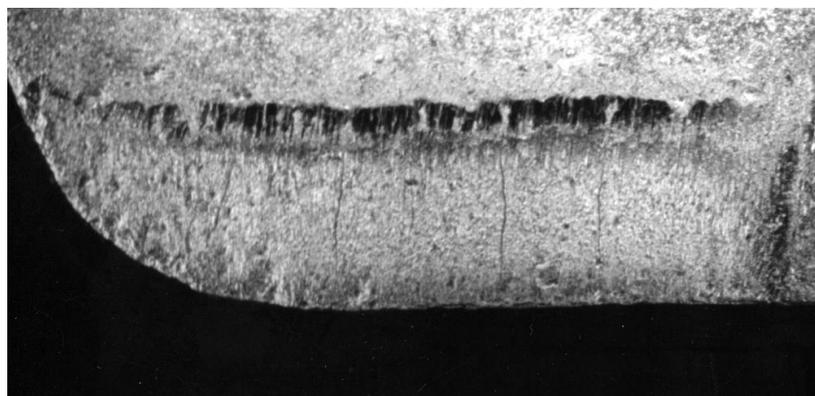
1 – TiN, 2 – TiCN, 3 – TiN-TiCN, 4 – TiCN-TiN, 5 – TiN-TiCN-TiN;  $V = 247$  м/мин,  $S_z = 0,4$  мм/зуб,  $t = 1,5$  мм,  $B = 20$  мм

Количество циклов работы инструмента до начала образования трещин в покрытии (трещины 2-го типа) определяется составом верхнего слоя многослойного покрытия. Например, для инструмента с покрытиями TiCN-TiN

и TiN-TiCN-TiN время до образования трещин 2-го типа практически не изменяется и остается на уровне, характерном для инструмента с однослойным покрытием TiN, также как и для инструментов с покрытиями TiN-TiCN и TiCN. Кроме того, количество циклов работы до образования продольных  $N_{3ц}$  и поперечных  $N_{4ц}$  трещин для покрытия TiN-TiCN больше по сравнению с покрытием TiCN-TiN соответственно в 5,3 раза и 1,6 раза. В то же время для покрытий TiCN-TiN и TiN-TiCN-TiN, отвечающих предложенному принципу построения многослойных покрытий, количество циклов работы инструмента до начала разрушения покрытия  $N_{5ц}$  значительно больше, чем для покрытия TiN-TiCN (рис. 2.7).



а)



б)

**Рис. 2.8. Вид контактных площадок на передней поверхности пластин МК8 с покрытием TiN-TiCN (а) и TiCN-TiN (б) при торцовом фрезеровании заготовок из стали 5XHM:**

$V = 247$  м/мин,  $S_z = 0,4$  мм/зуб,  $t = 1,5$  мм,  $B = 20$  мм,  $\tau = 15$  мин

Эффективность многослойных покрытий может быть повышена путем увеличения их трещиностойкости.

Трещиностойкость двухслойных покрытий может быть повышена путем введения между верхним и нижним слоем промежуточного слоя, обладающего высокой трещиностойкостью. В качестве промежуточного слоя можно

использовать двухэлементные нитридные покрытия. Наиболее предпочтительным из них является нитрид титана и циркония (Ti,Zr)N, полученный с использованием отдельных катодов. Исходя из выше сказанного, конструкция многослойного покрытия повышенной трещиностойкости будет состоять из нижнего слоя карбонитрида титана, промежуточного слоя из нитрида титана и циркония и верхнего слоя из нитрида титана – TiCN-(Ti,Zr)N-TiN. Изменяя механические свойства верхнего и нижнего слоя данного многослойного покрытия, можно влиять на прочность сцепления слоев покрытия и его трещиностойкость.

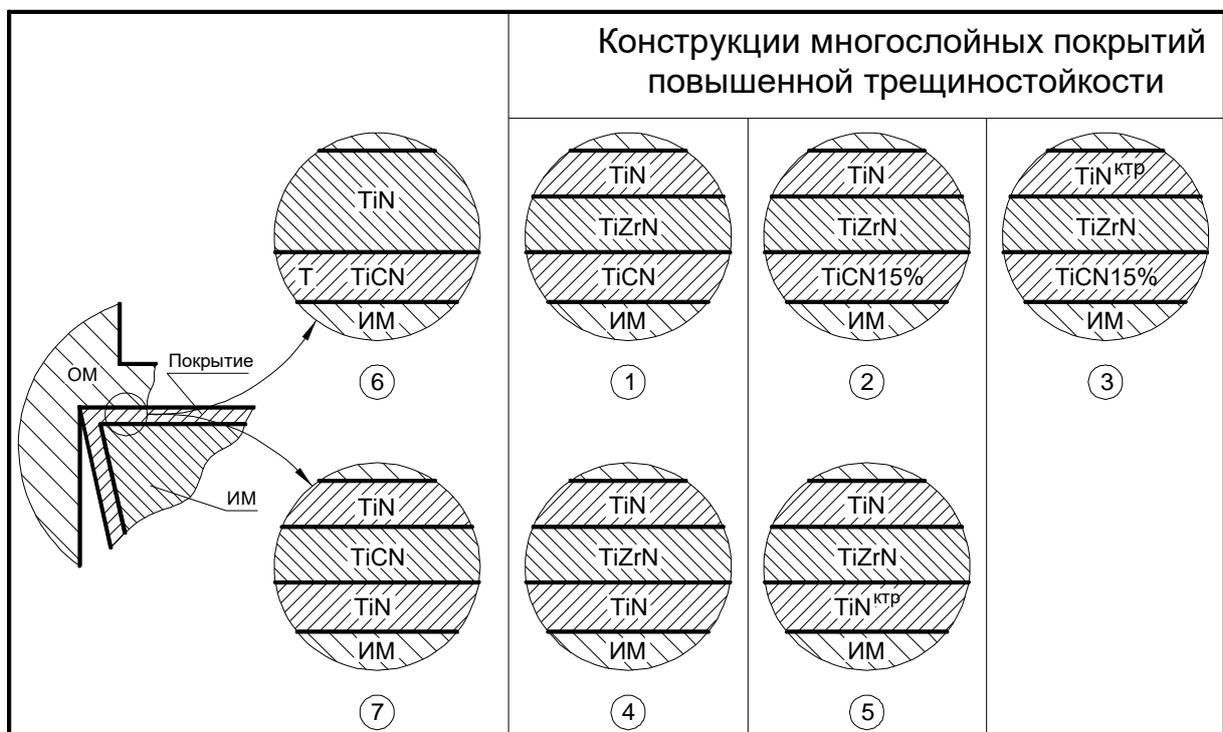
Например, для повышения прочности связи верхнего слоя TiN с нижележащим (Ti,Zr)N его можно нанести при низкой температуре конденсации (TiN<sub>КТР</sub>). Покрытия TiN, полученные в таких условиях, имеют более высокую микротвердость (на 29 %) и сжимающие остаточные напряжения (больше в 1,8 раза) по сравнению с таким же покрытием, полученном по традиционной технологии.

Прочность сцепления нижнего слоя TiCN с инструментальной основой можно повысить путем снижения перепада напряжений на их границе, что может быть достигнуто за счет уменьшения разницы в значениях твердости данного слоя и инструментального материала. Для этого конденсацию нижнего слоя необходимо вести при содержании ацетилена в газовой смеси равном 15 % (TiCN15%). Такое карбонитридное покрытие имеет более низкую микротвердость (на 20 %) и несколько меньшую величину  $\sigma_0$  по сравнению со слоем TiCN, которое осаждается при 30 % содержании ацетилена в газовой смеси [1]. Кроме того, для него меньше в два раза и коэффициент отслоения  $K_0$ .

Прочность сцепления можно повысить, если в качестве нижнего слоя использовать покрытие TiN, полученное в комбинированном температурном режиме при высокой температуре конденсации (TiN<sup>КТР</sup>), которое имеет большую прочность сцепления с инструментальной основой и меньший уровень остаточных напряжений. Схемы конструкций многослойных покрытий повышенной трещиностойкости представлены на рис. 2.9.

Многослойные покрытия повышенной трещиностойкости имеют более высокую микротвердость (на 9...13 %) и прочность сцепления с инструментальной основой по сравнению с двухслойным и трехслойным покрытиями на основе нитрида и карбонитрида титана (покрытия № 6 и № 7). Так, использование нижнего слоя TiN<sup>КТР</sup> в покрытии № 5 ведет к повышению прочности сцепления более чем в 1,5 раза по сравнению с

покрытием TiN-(Ti,Zr)N-TiN; нанесение в покрытиях № 2 и № 3 нижнего слоя TiCN15% снижает коэффициент  $K_0$  на 10...16 % по сравнению с покрытием TiCN-(Ti,Zr)N-TiN, имеющим нижний слой из карбонитрида титана, осажденного при 30 % ацетилена в газовой смеси. В то же время покрытия TiN-TiCN-TiN и TiN-(Ti,Zr)N-TiN с нижними слоями TiN, полученными по традиционной технологии, имеют практически одинаковые коэффициенты  $K_0$  (соответственно 0,98 и 0,99). Наибольшую прочность сцепления с инструментальной основой имеют покрытия с нижним слоем TiCN15% (№ 2 и № 3), коэффициент  $K_0$  для которых в 5,4 – 6 раз ниже по сравнению с покрытиями TiCN-TiN и TiN-TiCN-TiN.

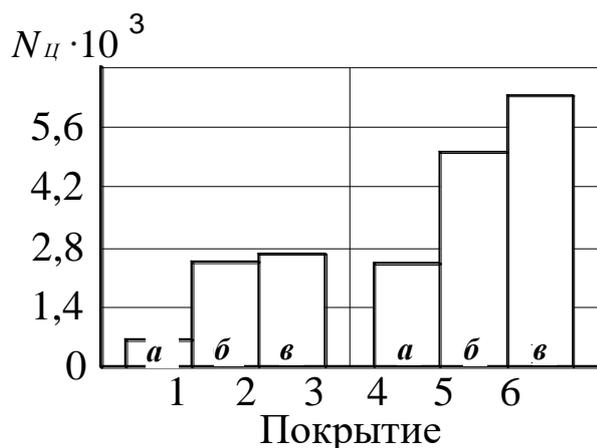


**Рис. 2.9. Схемы конструкций многослойных покрытий**

Трехслойные покрытия повышенной трещиностойкости имеют большую трещиностойкость по сравнению с двухслойными, что существенно повышает количество циклов работы инструмента до выхода продольных трещин 1-го типа на режущую кромку ( $N_{2ц}$ ), образования сетки трещин в покрытии на контактной площадке по передней поверхности ( $N_{3,4ц}$ ) и разрушения покрытия ( $N_{5ц}$ ) (рис. 2.10).

Использование в качестве промежуточных слоев покрытий (Ti,Al)N и (Ti,Mo)N, имеющих меньшую трещиностойкость по сравнению с покрытием (Ti,Zr)N, снижает трещиностойкость многослойных покрытий. Поэтому для

инструмента с данными многослойными покрытиями по сравнению с покрытием TiCN-(Ti,Zr)N-TiN количество циклов его работы до выхода продольных трещин 1-го типа на режущую кромку ( $N_{2Ц}$ ), образования сетки трещин в покрытии на контактной площадке по передней поверхности ( $N_{3,4Ц}$ ) и разрушения покрытия ( $N_{5Ц}$ ) уменьшается. Для данных покрытий характерно большее количество трещин по сравнению с покрытием TiCN-(Ti,Zr)N-TiN и большая площадь отслоения покрытия (рис. 2.11).



**Рис. 2.10.** Влияние конструкции многослойного покрытия на число циклов  $N_{2Ц}$  (а),  $N_{3,4Ц}$  (б) и  $N_{5Ц}$  (в):  
 $V = 247$  м/мин,  $S_Z = 0,4$  мм/зуб,  
 $B = 80$  мм; 1 – TiCN-TiN,  
 2 – TiCN-(Ti,Zr)N-TiN



а)



б)

**Рис. 2.11.** Фотографии контактных площадок инструмента с многослойными покрытиями:

$V = 247$  м/мин,  $S_Z = 0,4$  мм/зуб,  $B = 20$  мм,  $t = 1,5$  мм,  $\tau = 35$  мин;  
 а - TiCN-(Ti,Zr)N-TiN, б - TiCN-(Ti,Mo)N-TiN

Механические свойства многослойных покрытий и интенсивность износа режущего инструмента зависят от общей толщины покрытий и толщин отдельных его слоев. Изменяя данные параметры и состав слоев многослойного покрытия направленно можно влиять на его механические свойства и,

следовательно, на процессы разрушения покрытия на контактных площадках инструмента и его изнашивания.

#### 2.1.1. Вопросы, выносимые на практическое занятие

- механизм влияния износостойкого покрытия на изнашивание контактных площадок режущего инструмента в условиях прерывистого резания;

- требования, предъявляемые к износостойким покрытиям, работающим в условиях прерывистого резания;

- принцип формирования многослойных покрытий для инструмента, работающего в условиях прерывистого резания;

- влияние конструкции многослойного покрытия на параметры структуры и механические свойства.

2.1.2. Исследовательская работа «Исследование влияния конструкции многослойных покрытий на структурные параметры, механические свойства и изнашивание режущего инструмента, работающего в условиях прерывистого резания». Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Многослойные покрытия режущего инструмента, работающего в условиях прерывистого резания», подпрограммы «Структурные параметры», «Механические свойства», «Интенсивность изнашивания режущего инструмента».

Исследования проводятся в следующей последовательности:

1. Исследуется влияние конструкции многослойных покрытий  $\text{TiCN-TiN}$ ,  $\text{TiN-TiCN-TiN}$ ,  $\text{TiN-TiZrN-TiN}$ ,  $\text{TiN}^{\text{КТР}}\text{-TiZrN-TiN}_{\text{КТР}}$ ,  $\text{TiCN-TiZrN-TiN}$ ,  $\text{TiCN}^{15\%}\text{-TiZrN-TiN}$  и  $\text{TiCN}^{15\%}\text{-TiZrN-TiN}_{\text{КТР}}$  на микротвердость, коэффициент отслоения покрытий и коэффициент трещиностойкости.

2. Исследуется влияние состава промежуточного слоя многослойных покрытий  $\text{TiCN-TiZrN-TiN}$ ,  $\text{TiCN-TiAlN-TiN}$  и  $\text{TiCN-TiMoN-TiN}$  на микротвердость, коэффициент отслоения покрытий и коэффициент трещиностойкости.

3. Исследование толщин слоев многослойного покрытия  $\text{TiCN-TiZrN-TiN}$  на микротвердость, коэффициент отслоения покрытий и коэффициент трещиностойкости.

4. Исследование толщин слоев многослойного покрытия  $\text{TiCN-TiZrN-TiN}$  на интенсивность изнашивания торцовых фрез.

5. Исследуется влияние многослойных покрытий TiCN-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiN-TiZrN-TiN, TiN<sup>КТР</sup>-TiZrN-TiN<sub>КТР</sub>, TiCN-TiZrN-TiN, TiCN<sup>15%</sup>-TiZrN-TiN и TiCN<sup>15%</sup>-TiZrN-TiN<sub>КТР</sub>, состава промежуточных слоев и обрабатываемого материала на параметры процесса трещинообразования в покрытиях.

По результатам исследований строятся диаграммы и графики структурных параметров, механических свойств, параметров процесса трещинообразования в покрытиях и интенсивности изнашивания режущего инструмента в зависимости от конструктивных параметров многослойного покрытия.

## 2.3. МНОГОСЛОЙНЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ С ПЕРЕХОДНЫМИ АДГЕЗИОННЫМИ СЛОЯМИ

### *ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ*

При разработке конструкций многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями важной задачей является определение остаточных напряжений [1]. Расчет остаточных напряжений (табл. 2.4 и 2.5 – в таблицах в знаменателе указаны напряжения в переходном слое, в числителе – в покрытии) показывает, что их величина определяется химическим составом переходного адгезионного слоя. Применение переходного слоя из чистого титана способствует снижению остаточных напряжений в покрытии TiN. Введение в состав данного слоя хрома, циркония, молибдена повышает величину остаточных напряжений. При этом увеличение массовой доли данных элементов ведет к росту величины остаточных напряжений как в переходном адгезионном слое, так и в покрытии в целом. Последнее объясняется меньшими значениями коэффициентов термического расширения хрома, циркония и молибдена по сравнению с титаном и увеличение доли каждого из них в составе переходного слоя ведет к снижению его коэффициента термического расширения. В результате этого повышается разница между коэффициентами термического расширения переходного адгезионного слоя и инструментальной основы и остаточные напряжения возрастают. Кроме того, для хрома и молибдена характерны большие значения модуля упругости по сравнению с титаном, что также способствует росту остаточных напряжений в данных покрытиях. Введение железа в состав переходного слоя из чистого титана, коэффициент термического расширения которого больше по сравнению с титаном, способствует увеличению данной величины для переходного слоя в целом. Это ведет к снижению разницы между коэффициентами термического расширения переходного слоя и инструментальной основы и как следствие к уменьшению в них остаточных напряжений.

Использование в качестве переходных адгезионных слоев сложных нитридов типа (Ti,Me)N приводит к аналогичным изменениям остаточных напряжений.

## 2.4. Результаты расчета величины остаточных напряжений в покрытии (Ti- Me)-TiN

(толщина переходного адгезионного слоя (Ti-Me) 1,5 мкм; толщина слоя TiN 4,5 мкм)

Состав переходного адгезионного слоя Ti-Me	Остаточные напряжения в переходном адгезионном слое и покрытии $\sigma$ , МПа при процентном содержании Me в переходном адгезионном слое (Ti-Me)					
	0	20	40	60	80	100
(Ti-Cr)	<u>-1354</u> -960	<u>-1536</u> -1323	<u>-1740</u> -1731	<u>-1966</u> -2184	<u>-2215</u> -2682	<u>-2487</u> -3225
(Ti-Zr)	<u>-1354</u> -960	<u>-1382</u> -1015	<u>-1406</u> -1063	<u>-1427</u> -1105	<u>-1445</u> -1142	<u>-1460</u> -1172
(Ti-Mo)	<u>-1354</u> -960	<u>-1661</u> -1574	<u>-2031</u> -2314	<u>-2464</u> -3181	<u>-2962</u> -4176	<u>-3522</u> -5297
(Ti-Fe)	<u>-1354</u> -960	<u>-1345</u> -941	<u>-1303</u> -858	<u>-1230</u> -711	<u>-1124</u> -500	<u>-987</u> -225

## 2.5. Результаты расчета величины остаточных напряжений в покрытии (Ti,Me)N-TiN

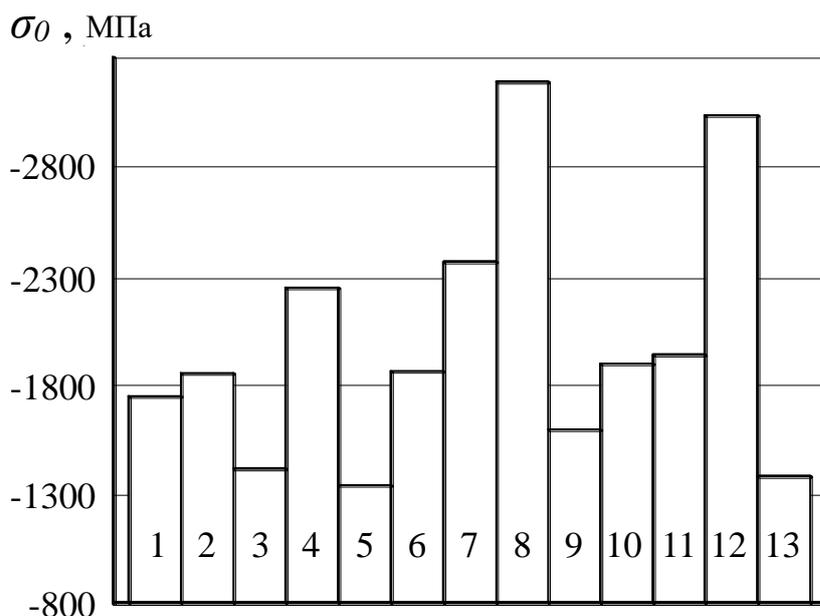
(толщина переходного адгезионного слоя (Ti,Me)N 1,5 мкм; толщина слоя TiN 4,5 мкм)

Состав переходного адгезионного слоя (Ti,Me)N	Остаточные напряжения в переходном адгезионном слое и покрытии $\sigma$ , МПа при процентном содержании MeN в переходном адгезионном слое (Ti,Me)N					
	0	20	40	60	80	100
(Ti,Cr) N	<u>-1748</u> -1748	<u>-1795</u> -1842	<u>-1842</u> -1935	<u>-1888</u> -2027	<u>-1934</u> -2119	<u>-1979</u> -2209
(Ti,Zr) N	<u>-1748</u> -1748	<u>-1977</u> -2205	<u>-2231</u> -2715	<u>-2513</u> -3278	<u>-2821</u> -3894	<u>-3155</u> -4562
(Ti,Mo) N	<u>-1748</u> -1748	<u>-2245</u> -2743	<u>-2850</u> -3954	<u>-3562</u> -5379	<u>-4383</u> -7020	<u>-5310</u> -8875
(Ti,Fe) N	<u>-1748</u> -1748	<u>-1596</u> -1444	<u>-1382</u> -1016	<u>-1105</u> -461	<u>-765</u> +218	<u>-363</u> +1023

Как видно из табл. 2.5, остаточные напряжения в покрытиях, имеющих переходные адгезионные слои на основе нитридов тугоплавких металлов, больше по сравнению с покрытием TiN, что объясняется различием модулей упругости данных соединений и покрытия TiN. Кроме того, коэффициенты термического расширения сложных нитридов меньше, чем у TiN, что также

способствует росту остаточных напряжений в покрытии. Переходный слой на основе нитрида титана и железа (Ti,Fe)N снижает остаточные напряжения.

Нанесение переходных слоев на основе тугоплавких металлов (Ti-Cr), (Ti-Mo) увеличивает перепад остаточных напряжений на границе с инструментальной основой, а на основе (Ti-Zr) и (Ti-Fe) – уменьшает. При этом более существенное снижение характерно для переходного слоя на основе (Ti-Fe).



**Рис. 2.12. Влияние состава покрытия на остаточные напряжения:**  
 1 – TiN; 2 – (Ti-Cr)+TiN; 3 – (Ti-Zr)-TiN; 4 – (Ti-Mo)-TiN; 5 – (Ti-Fe)-TiN;  
 6 – (Ti,Cr)N-TiN; 7 – (Ti-Zr)N-TiN; 8 – (Ti,Mo)N-TiN; 9 – (Ti,Fe)N-TiN;  
 10 – (Ti-Cr)-(Ti,Cr)N-TiN; 11 – (Ti-Zr)-(Ti,Zr)N-TiN;  
 12 – (Ti-Mo)-(Ti,Mo)N-TiN; 13 – (Ti-Fe)-(Ti,Fe)N-TiN; толщина переходного  
 слоя 1,5 мкм; общая толщина покрытий 6 мкм

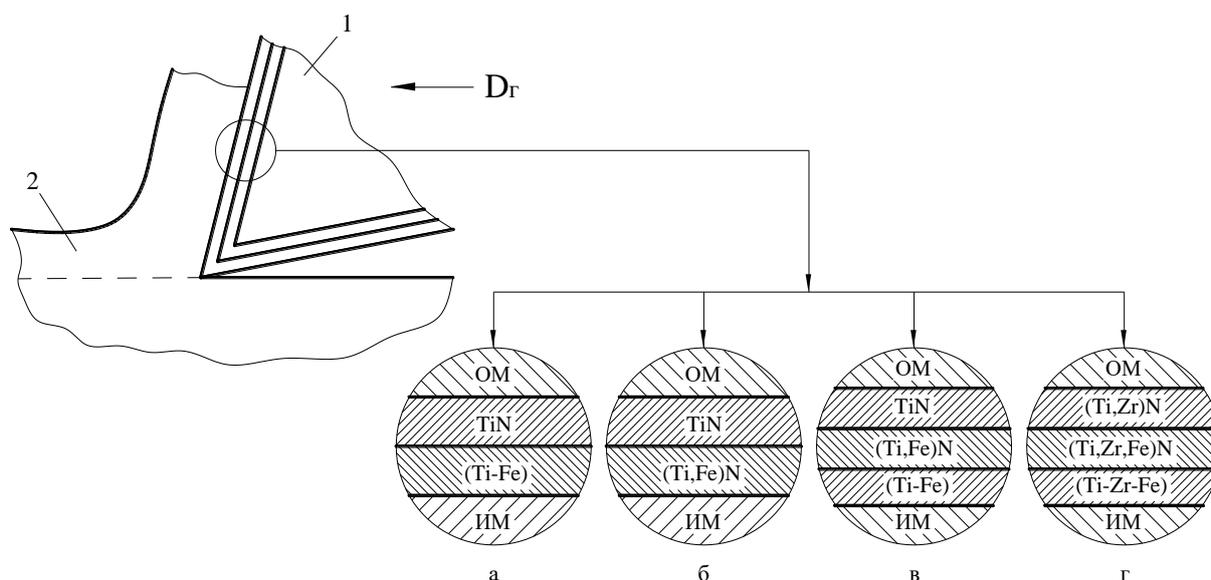
Переходные слои на основе нитридов тугоплавких металлов еще в большей степени увеличивают перепад напряжений на границе с инструментальной основой, а использование нитрида (Ti,Fe)N ведет к его снижению. Аналогичные изменения остаточных напряжений и их перепада на границе с инструментальной основой имеют место при сочетании переходных адгезионных слоев на основе чистых металлов и их нитридов. При этом сочетание переходных слоев на основе титана и железа и их нитрида не только снижает градиент напряжений на границе с инструментальной основой, но и ведет к плавному изменению остаточных напряжений от внешнего слоя TiN к инструментальной основе. Сочетание переходных адгезионных слоев на основе тугоплавких металлов и их нитридов способствует появлению «пиков»

остаточных напряжений на границах отдельных слоев покрытия, обусловленных большими их значениями в соответствующих переходных слоях.

На рис. 2.12 представлены результаты расчета остаточных напряжений в многослойных покрытиях с верхним слоем TiN с различными переходными адгезионными слоями. Наименьшие остаточные напряжения характерны для покрытий с переходными слоями на основе титана и железа. Их применение снижает остаточные напряжения на 9...23 % в зависимости от конструкции многослойного покрытия по сравнению с однослойным покрытием TiN. Использование переходных слоев на основе тугоплавких металлов увеличивает остаточные напряжения, а наибольшая их величина имеет место при использовании титана и молибдена.

Схемы конструкции многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями и верхним слоем из нитрида титана TiN и сложного нитрида (Ti,Zr)N представлены на рис. 2.13.

Нанесение переходных слоев практически не отражается на периоде кристаллической решетки и полуширине рентгеновской линии покрытий, но способствует снижению в них остаточных напряжений, величина которых существенно зависит от химического состава и толщины переходного адгезионного слоя.



**Рис. 2.13. Схемы конструкций покрытий с переходными адгезионными слоями:**  
1 - режущий инструмент, 2 – заготовка

Нанесение переходных адгезионных слоев из чистых металлов практически не влияет на микротвердость покрытий. Использование переходных слоев на основе сложных нитридов, микротвердость которых больше верхнего слоя покрытия, вызывает небольшое ее повышение.

Снижение остаточных напряжений при нанесении переходных слоев способствует повышению прочности сцепления покрытия с инструментальной основой. Зависимость коэффициента отслоения от толщины переходного адгезионного слоя имеет характер, аналогичный изменению остаточных напряжений. Имеет место тенденция смещения минимума коэффициента отслоения в сторону более высоких значений толщин переходного слоя с ростом общей толщины покрытия. Наибольшая прочность сцепления покрытий с инструментальной основой наблюдается примерно при тех же толщинах переходных адгезионных слоев, которые обеспечивали максимальное снижение остаточных напряжений.

Создание между инструментальной основой и внешним слоем многослойного покрытия переходных адгезионных слоев уменьшает интенсивность износа быстрорежущего инструмента.

Таким образом, изменяя конструкцию многослойного покрытия с переходными адгезионными слоями можно направленно подбирать необходимые свойства покрытия, обеспечивающие наибольшее снижение интенсивности износа режущего инструмента.

Более высокая работоспособность режущего инструмента с многослойными покрытиями, имеющими переходные адгезионные слои, по сравнению с инструментом с однослойным покрытием, объясняется снижением остаточных напряжений в покрытии и повышением прочности их сцепления с инструментальной основой. Кроме того, снижению интенсивности износа инструмента также способствуют более высокая микротвердость переходных слоев на основе сложных нитридов и наличие в покрытии дополнительных границ, повышающих его трещиностойкость.

### *2.3.1. Вопросы, выносимые на практическое занятие*

- принцип формирования многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями;
- влияние переходных адгезионных слоев на структурные параметры и механические свойства износостойких покрытий.

*2.3.2. Исследовательская работа* «Исследование влияния переходных адгезионных слоев многослойного покрытия на работоспособность

быстрорежущего инструмента». Работа выполняется на персональном компьютере с использованием программы «Многослойные покрытия с переходными адгезионными слоями», подпрограмм «Влияние толщины адгезионного слоя на механические свойства», «Влияние толщины адгезионного слоя на интенсивность изнашивания».

Исследования проводятся в следующей последовательности:

1. Исследование влияния общей толщины многослойных покрытий TiFeN-TiN, TiFe-TiFeN-TiN и TiZrFe-TiZrFeN-TiZrN на их структурные параметры и механические свойства.
2. Исследование влияния толщины переходного адгезионного слоя многослойных покрытий TiFeN-TiN, TiFe-TiFeN-TiN и TiZrFe-TiZrFeN-TiZrN на их структурные параметры и механические свойства.
3. Исследование влияния общей толщины многослойных покрытий TiFeN-TiN, TiFe-TiFeN-TiN и TiZrFe-TiZrFeN-TiZrN с переходным адгезионным слоем на интенсивность изнашивания режущего инструмента.
4. Исследование влияния толщины переходного адгезионного слоя многослойных покрытий TiFeN-TiN, TiFe-TiFeN-TiN и TiZrFe-TiZrFeN-TiZrN на интенсивность изнашивания режущего инструмента.

По результатам исследований строятся диаграммы и графики структурных параметров, механических свойств и интенсивности изнашивания режущего инструмента в зависимости от конструктивных параметров многослойного покрытия.

## 2.4. МНОГОСЛОЙНЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО НИТРИДА ТИТАНА

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Многоэлементные покрытия на основе модифицированного нитрида титана имеют более высокие механические свойства и обеспечивают большее повышение периода стойкости режущего инструмента по сравнению с двухэлементными покрытиями. Применение многослойных покрытий, имеющих слои на основе модифицированного нитрида титана, обеспечивает дальнейшее повышение работоспособности режущего инструмента [1-2, 5].

Формирование многослойных покрытий, предназначенных для режущего инструмента, работающего на операциях непрерывного резания, производится по известному принципу: верхний слой должен обеспечивать максимальное снижение эквивалентных напряжений в режущем клине для повышения его формоустойчивости и иметь высокие остаточные сжимающие напряжения для обеспечения высоких нормальных напряжений в материале покрытия в процессе резания, снижающих интенсивность трещинообразования; нижний слой должен обеспечивать высокую прочность сцепления покрытия с инструментальной основой.

Учитывая высокую эффективность многоэлементных покрытий, в качестве верхнего слоя многослойного покрытия можно использовать покрытия на основе модифицированного нитрида титана, легированного двумя элементами. Такие покрытия обладают более высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами по сравнению с двухэлементными покрытиями (табл. 2.6). Применение трехэлементных покрытий оптимального состава, таких как  $\text{TiAlSiN}$ ,  $\text{TiAlZrN}$ ,  $\text{TiZrSiN}$ ,  $\text{TiZrAlN}$ ,  $\text{TiSiAlN}$ ,  $\text{TiSiZrN}$  и  $\text{TiSiCrN}$ , обеспечивает минимальную интенсивность износа режущего инструмента и следовательно данные покрытия можно использовать в качестве верхнего слоя исследуемых многослойных покрытий [1, 2].

В качестве нижнего слоя многослойных покрытий необходимо использовать покрытие, которое обеспечивает повышение прочности сцепления с инструментальной основой (то есть покрытия, отличающиеся наименьшим коэффициентом отслоения  $K_0$ ). Анализ представленных в табл. 2.6 данных позволяет предложить в качестве нижних слоев многослойного двухэлементные покрытия  $\text{TiAlN}$ ,  $\text{TiZrN}$  и  $\text{TiSiN}$ . Как видно, данные двухэлементные покрытия имеют более низкие значения коэффициента

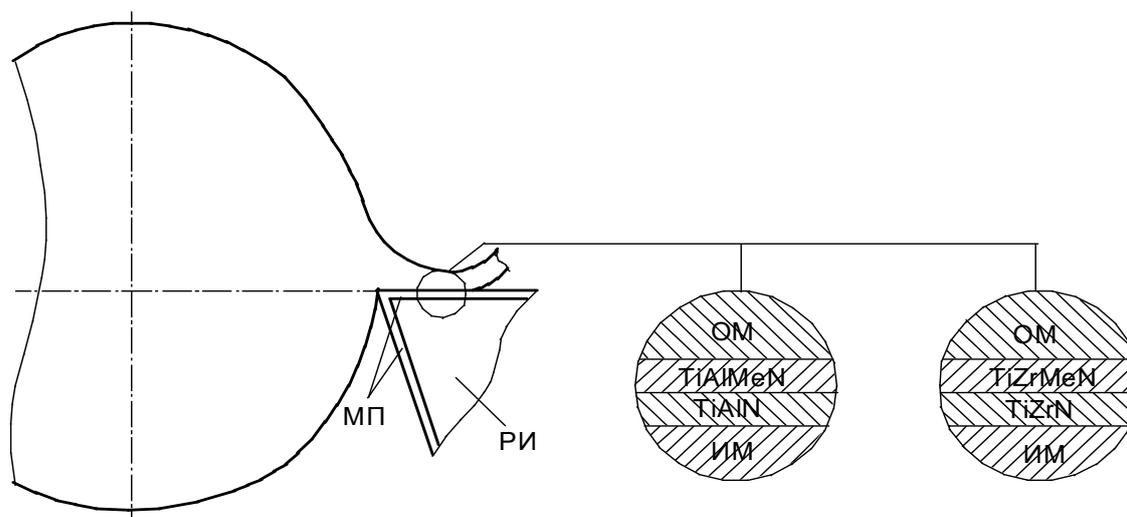
отслоения  $K_0$  по сравнению с трехэлементными, что свидетельствует о более высокой прочности их сцепления с инструментальной основой. Учитывая вышесказанное, в качестве нижнего слоя можно использовать покрытия TiAlN и TiZrN.

## 2.6. Физико-механические и эксплуатационные свойства износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана [4]

№	Покрытие	Содержание легирующего элемента $Me_2$ , % мас.	E, ГПа	$\sigma_T$ , ГПа	$K_{1sp}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$H_\mu$ , ГПа	$H^0_\mu$ , ГПа	$K_0$	$T_{ц}$ , мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	TiN	–	307	9,53	12,29	31,45	29,16	1,073	7,65
2	TiAlN	–	369	12,26	14,77	37,78	38,39	0,907	16,48
3	TiAlCrN	1,35	378	13,08	14,53	40,75	41,25	1,002	20,63
4		5,96	399	14,52	14,12	44,89	46,48	1,215	29,55
5		11,12	403	14,28	14,55	44,49	45,62	1,303	29,16
6	TiAlZrN	4,61	396	13,46	15,24	41,73	42,67	1,076	26,35
7		12,17	417	14,48	15,58	45,31	46,39	1,262	38,02
8		23,39	419	14,29	15,76	44,48	45,72	1,363	32,73
9	TiAlSiN	0,25	411	13,59	16,01	42,53	43,17	1,06	34,22
10		0,49	432	14,47	16,58	45,31	46,41	1,224	43,77
11		0,83	442	14,59	17	45,67	46,88	1,276	43,29
12	TiSiN	–	350	11,17	14,46	33,24	34,67	1,493	24,18
13	TiSiCrN	6,12	383	12,65	14,88	38,73	39,79	1,811	34,26
14		11,37	388	12,84	14,97	39,39	40,46	1,924	34,82
15	TiSiAlN	6,45	413	13,49	16,05	40,44	42,84	1,212	45,21
16		9,16	418	13,57	16,28	41,11	43,15	1,176	46,41
17	TiSiZrN	7,81	392	12,71	15,08	38,42	40,04	1,608	39,43
18		24,74	403	13,09	15,79	39,72	41,39	1,726	39,41
19	TiZrN	–	379	12,38	14,44	36,57	38,85	1,316	13,8
20	TiZrCrN	1,44	387	12,81	14,41	38,11	40,36	1,412	17,2
21		6,09	404	14,01	14,37	41,83	44,66	1,55	27,96
22		11,28	405	14,18	14,35	42,19	45,25	1,575	28,06

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	TiZrAlN	6,36	425	14,29	16,1	42,56	45,72	0,916	40,11
24		9,25	428	14,47	16,17	43,31	46,39	0,882	43,53
25	TiZrSiN	0,25	399	13,06	14,84	39,06	41,29	1,421	29,38
26		0,49	414	13,7	15,32	41,11	43,6	1,489	40,01
27		0,84	423	13,91	15,83	41,83	44,38	1,549	43,73

Схемы возможных конструкций многослойных покрытий представлены на рис. 2.14 – TiAlN-TiAlMeN и TiZrN-TiZrMeN (где Me – Zr, Cr, Mo, Si, Al).

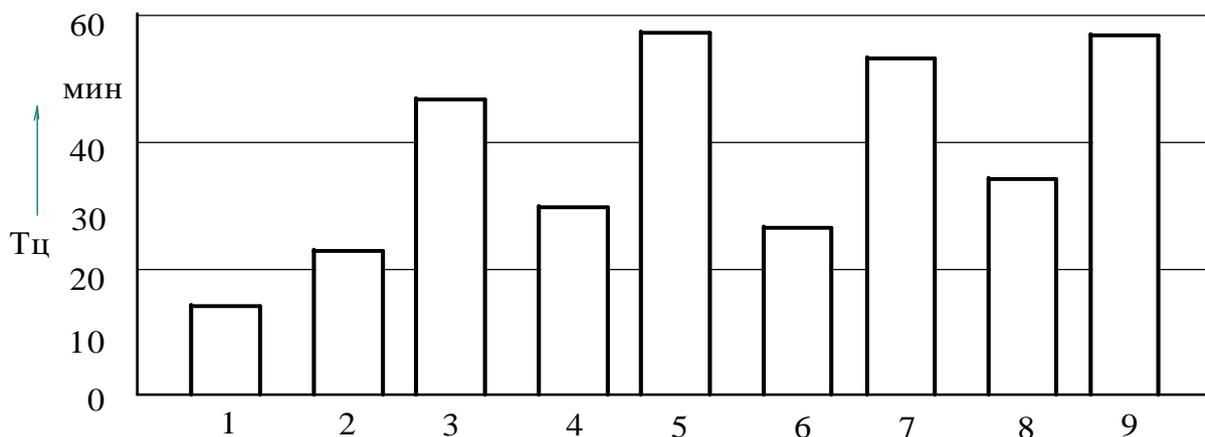


**Рис. 2.14. Схемы конструкций многослойных покрытий  
TiAlN-TiAlMeN и TiZrN-TiZrMeN**

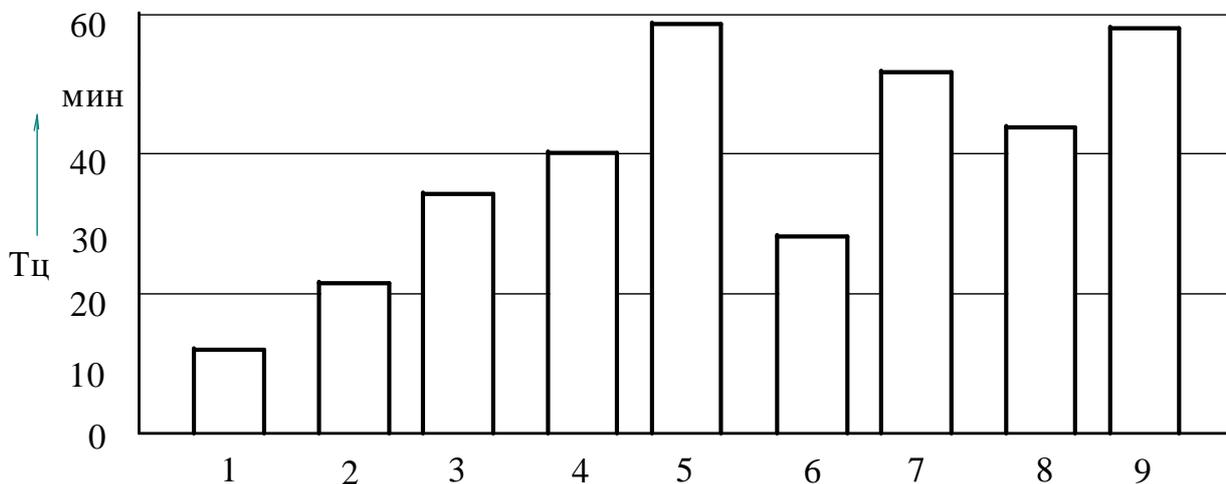
Работоспособность режущего инструмента с покрытиями в значительной степени определяется его циклической трещиностойкостью, т.е. временем его работы до образования в покрытии трещин. Трещиностойкость многослойных покрытий по сравнению с однослойными двухэлементными выше в 2,9 – 4,3 раза и по сравнению с трехэлементными покрытиями в 1,4 – 2,3 раза в зависимости от конструкции покрытия (рис. 2.15 и 2.16). При этом циклическая трещиностойкость многослойного покрытия зависит от состава отдельных его слоев.

Конструкция многослойного покрытия оказывает существенное влияние на суммарные напряжения, действующие в слоях многослойного покрытия, вязкость разрушения и трещиностойкость. С увеличением толщины верхнего слоя многослойного покрытия суммарные напряжения, вязкость разрушения и трещиностойкость возрастают. Влияние общей толщины многослойного

покрытия влияет на изменение указанных параметров значительно меньше. При этом с ростом общей толщины многослойного покрытия наблюдается снижение указанных параметров. Максимальная трещиностойкость многослойных покрытий наблюдается при толщинах верхнего слоя равного 40 – 60 % от общей толщины покрытия [1].



**Рис. 2.15. Циклическая трещиностойкость многослойных покрытий TiAlN-TiAlMeN:**  
 1 – TiAlN; 2 – TiAlMoN; 3 – TiAlN-TiAlMoN; 4 – TiAlCrN;  
 5 – TiAlN-TiAlCrN; 6 – TiAlZrN; TiAlN-TiAlZrN; 7 – TiAlSiN;  
 9 – TiAlN-TiAlSiN



**Рис. 2.16. Циклическая трещиностойкость многослойных покрытий TiZrN-TiZrMeN:**  
 1 – TiZrN; 2 – TiZrMoN; 3 – TiZrN-TiZrMoN; 4 – TiZrCrN;  
 5 – TiZrN-TiZrCrN; 6 – TiZrAlN; TiZrN-TiZrAlN; 7 – TiZrSiN;  
 9 – TiZrN-TiZrSiN

Конструкция многослойного покрытия (общая толщина покрытия и соотношение его слоев) оказывает различное влияние на структурные

параметры. Период кристаллической решетки практически не зависит от толщины слоев покрытий и общей толщины многослойного покрытия. Толщина верхнего слоя многослойного покрытия влияет на ширину рентгеновской линии и параметр текстуры. При этом на характер изменения данных параметров оказывает влияние не только толщина верхнего слоя, но и составы как верхнего, так и нижнего слоя. Повышение или уменьшение указанных выше параметров определяется свойствами верхнего и нижнего слоя покрытия. Рост толщины слоя покрытия, имеющего более высокие механические свойства, вызывает увеличение ширины рентгеновской линии и уменьшение параметра текстуры. Повышение величины  $\beta_{111}$  свидетельствует об искажении кристаллической решетки материала покрытия. Следовательно, для многослойных покрытий, рост толщины верхнего слоя которых ведет к повышению ширины рентгеновской линии, следует ожидать повышения микротвердости покрытия в целом. И наоборот, снижение величины  $\beta_{111}$  характерное для покрытий с нижним слоем, обладающим более высокими механическими свойствами, рост толщины верхнего слоя должен привести к снижению микротвердости многослойного покрытия.

Прочность сцепления многослойного покрытия с инструментальной основой определяется составом и толщиной нижнего слоя покрытия. Наибольшая прочность сцепления с инструментальной основой имеют многослойные покрытия с толщиной нижнего слоя, равной 33...40 % от общей толщины покрытия в зависимости от конструкции покрытия. Увеличение общей толщины многослойного покрытия ведет к снижению прочности сцепления на 16...33 % в зависимости от их общей толщины.

Микротвердость многослойного покрытия определяется составом верхнего слоя покрытия и незначительно возрастает с увеличением его толщины [1].

Сравнение данные по механическим свойствам многослойных покрытий представлены в табл. 2.7.

Применение многослойных покрытий со слоями на основе модифицированного нитрида титана увеличивает период стойкости режущего инструмента по сравнению с инструментом с покрытием TiN в 2,4 – 3,4 раза, а по сравнению с инструментом без покрытия – в 4 – 6 раз в зависимости от конструкции покрытия и обрабатываемого материала. Наибольшая эффективность от применения многослойных покрытий имеет место при обработке заготовок из конструкционных сталей.

## 2.7. Механические свойства многослойных покрытий и период стойкости режущего инструмента с покрытиями

Покрытие	K <sub>0</sub>	H <sub>μ</sub> , ГПа	K <sub>1СП</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup>	T <sub>ц</sub> , мин	T, мин	
					1	2
TiN	1,07	24,4	12,29	7,65	18	15
TiAlN- TiAlCrN	0,18	37,9	18,0	55,4	52	38
TiZrN- TiZrAlN	0,10	39,8	19,0	56,7	60	48

Примечание: K<sub>0</sub> – коэффициент отслоения; H<sub>μ</sub> – микротвердость; K<sub>1СП</sub> – вязкость разрушения; T<sub>ц</sub> – циклическая трещиностойкость; T – период стойкости; 1 и 2 – соответственно данные, полученные при обработке заготовок из стали 30ХГСА пластинами MC146 (V = 180 м/мин; S = 0,3 мм/об; t = 0,5 мм) и заготовок из стали 12Х18Н10Т пластинами HTi10 (V = 140 м/мин; S = 0,3 мм/об; t = 0,5 мм)

### 2.1.1. Вопросы, выносимые на практическое занятие

- принцип формирования многослойных покрытий на основе модифицированного нитрида титана;
- влияние конструкции многослойных покрытий на напряжения, действующие в покрытиях, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента.

2.1.2. Исследовательская работа «Исследование влияния конструкции многослойного покрытия на напряжения, действующие в покрытиях, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента». Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Многослойные покрытия на основе модифицированного нитрида титана», подпрограммы «Механические свойства», «Циклическая трещиностойкость», «Интенсивность изнашивания режущего инструмента».

Исследуются многослойные покрытия TiAlN-TiAlCrN, TiZrN-TiZrAlN и TiZrAlN-TiZrSiN.

Исследования проводятся в следующей последовательности.

1. Исследуется влияние толщины верхнего слоя многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN на структурные параметры и механические свойства.

2. Исследуется влияние состава слоев многослойных покрытий TiAlN-TiAlMeN и TiZrN-TiZrMe на циклическую трещиностойкость в сравнении с однослойными одно-двух- и трехэлементными покрытиями.

3. Исследуется влияние толщины верхнего слоя многослойных покрытий TiAlN-TiAlCrN, TiZrN-TiZrAlN и TiZrAlN-TiZrSiN на напряжения,

действующие в покрытиях, вязкость разрушения и циклическую трещиностойкость.

4. Исследуется влияние толщины верхнего слоя многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN на интенсивность изнашивания режущего инструмента.

По результатам исследований строятся диаграммы и графики зависимостей структурных параметров, механических свойств, напряжений, действующих в покрытиях, вязкости разрушения, циклической трещиностойкости и интенсивности изнашивания режущего инструмента от конструктивных параметров многослойного покрытия.

## 2.5. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО НИТРИДА ТИТАНА

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как было сказано выше, легирование покрытия TiN, например, цирконием, может осуществляться с использованием отдельных и составных катодов. При этом покрытие (Ti,Zr)N, полученное из отдельных катодов, за один оборот стола установки имеет мультислойную структуру, состоящую из мультислоев отдельных фаз покрытия TiN и ZrN, разделенных, в зависимости от компоновочной схемы установки, переходными мультислоями переменного состава (Ti<sub>x</sub>Zr<sub>1-x</sub>)N. Для покрытия (Ti,Zr)N, полученного из составных катодов, слоистость отсутствует: за один оборот стола установки осаждается микрослой постоянного состава (Ti,Zr)N. Из-за действия двух механизмов упрочнения покрытие, полученное из отдельных катодов, имеет более высокую микротвердость.

При легировании покрытия TiN одновременно двумя элементами, получаемое покрытие ((Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N, где Me<sub>1</sub> и Me<sub>2</sub> – легирующие элементы) может быть нанесено с использованием составных катодов. Технологическая компоновочная схема установки для нанесения таких покрытий показана на рис. 2.18, а. Покрытие наносится с помощью трех составных катодов, два из которых с легирующим элементом Me<sub>1</sub> расположены напротив друг друга, а третий с легирующим элементом Me<sub>2</sub> находится между ними. В данном случае за один оборот стола установки также будет образовываться мультислойная структура (рис. 2.18, б), как и в случае нанесения двухэлементных покрытий из отдельных катодов: мультислои нитрида титана, легированные элементами Me<sub>1</sub> и Me<sub>2</sub> (соответственно (Ti,Me<sub>1</sub>)N и (Ti,Me<sub>2</sub>)N), чередующиеся с мультислоями нитрида титана, легированного одновременно элементами Me<sub>1</sub> и Me<sub>2</sub> (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N, состав которых может быть различен в зависимости от компоновочной схемы установки. Таким образом, при такой компоновочной схеме установки, несмотря на использование составных катодов, при конденсации покрытия (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N будут действовать два механизма упрочнения материала покрытия – твердорастворный и упрочнение микроструктурными барьерами [2].

Следовательно, покрытия на основе модифицированного нитрида титана (Ti,Me<sub>1</sub>,Me<sub>2</sub>)N должны иметь более высокие физико-механические свойства по

сравнению с двухэлементными нитридными покрытиями (Ti,Me1)N, также полученными из составных катодов.

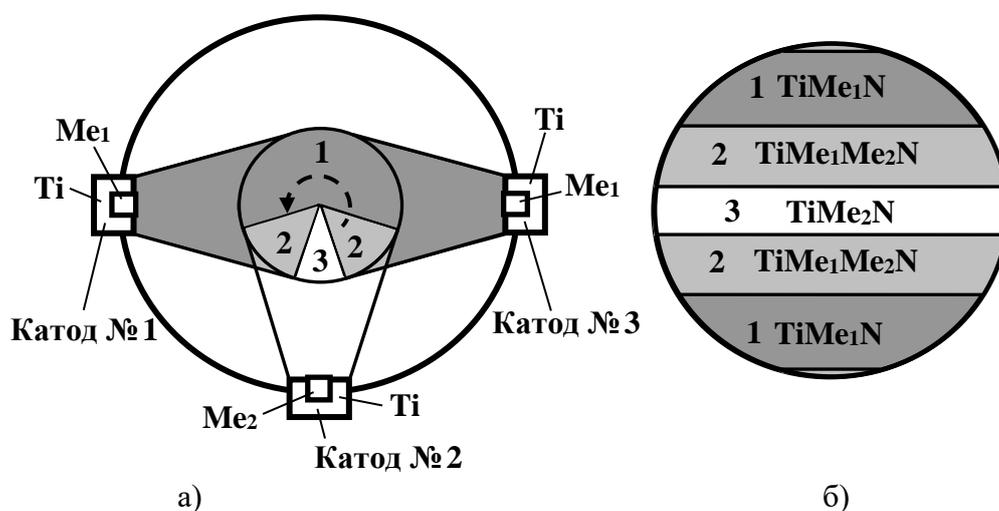


Рис. 2.18. Технологическая компоновочная схема нанесения покрытия (а) и строение осаждаемого покрытия за один оборот стола установки (б)

Трехэлементные покрытия являются однофазными с ГЦК-решеткой, аналогичной решетке нитрида титана. Легирование двухэлементных покрытий приводит к изменению их структурных параметров и физико-механических свойств (табл. 2.8 и 2.9, рис. 2.19 и 2.20). При этом степень влияния одного и того же легирующего элемента Me2 на структурные параметры и физико-механические свойства для различных трехэлементных покрытий примерно одинакова.

## 2.8 Влияние состава многоэлементных покрытий на структурные параметры и физико-механические свойства [4]

№	Покрытие	a, нм	$\beta_{III}$ , град		$H_{\mu}$ , ГПа		$\sigma_{ост}$ , МПа		$K_0$	
			МК8	Р6М5К5	МК8	Р6М5К5	МК8	Р6М5К5	МК8	Р6М5К5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	TiAlN	0,4230	0,57	0,53	37,78	36,53	-903	-2443	0,907	0,295
2	TiAlFeN	0,4214	0,66	0,62	42,21	41,13	-804	-1933	0,795	0,232
3	TiAlMoN	0,4226	0,64	0,63	42,56	41,92	-1177	-3100	1,438	0,543
4	TiAlCrN	0,4221	0,65	0,60	44,49	43,34	-1472	-3384	1,303	0,429
5	TiAlZrN	0,4245	0,73	0,65	45,31	43,26	-1702	-3064	1,350	0,398
6	TiAlSiN	0,4228	0,73	0,64	45,31	43,47	-1688	-2948	1,174	0,357
7	TiSiN	0,4243	0,56	0,51	33,24	32,87	-1020	-2541	1,493	0,531

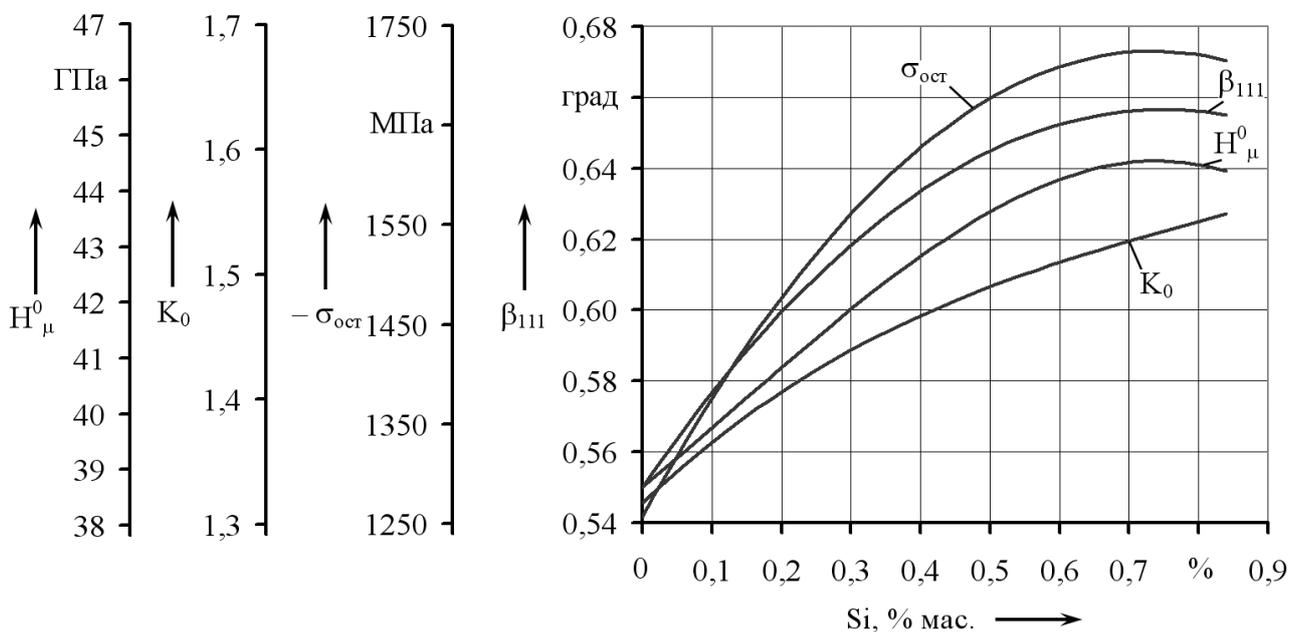
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	TiSiFeN	0,4240	0,59	0,55	36,26	35,41	-932	-2443	1,287	0,457
9	TiSiMoN	0,4245	0,61	0,58	37,16	35,88	-1354	-2835	1,967	0,690
10	TiSiCrN	0,4241	0,63	0,59	39,39	38,12	-1473	-2860	1,904	0,667
11	TiSiAlN	0,4225	0,68	0,63	41,11	39,41	-1561	-2959	1,251	0,432
12	TiSiZrN	0,4252	0,63	0,59	38,42	37,77	-1461	-3058	1,718	0,624
13	TiZrN	0,4293	0,55	0,51	36,57	35,42	-1256	-2619	1,316	0,478
14	TiZrFeN	0,4289	0,65	0,58	40,09	39,01	-1138	-2148	0,977	0,370
15	TiZrMoN	0,4287	0,61	0,59	39,72	39,97	-1599	-2904	1,613	0,712
16	TiZrCrN	0,4282	0,63	0,62	41,83	41,04	-1413	-2923	1,550	0,628
17	TiZrAlN	0,4305	0,67	0,64	43,31	43,21	-1408	-3001	0,982	0,366
18	TiZrSiN	0,4289	0,66	0,62	41,83	40,62	-1721	-3080	1,481	0,563

### 2.9. Влияние состава многоэлементных покрытий на физико-механические свойства [4]

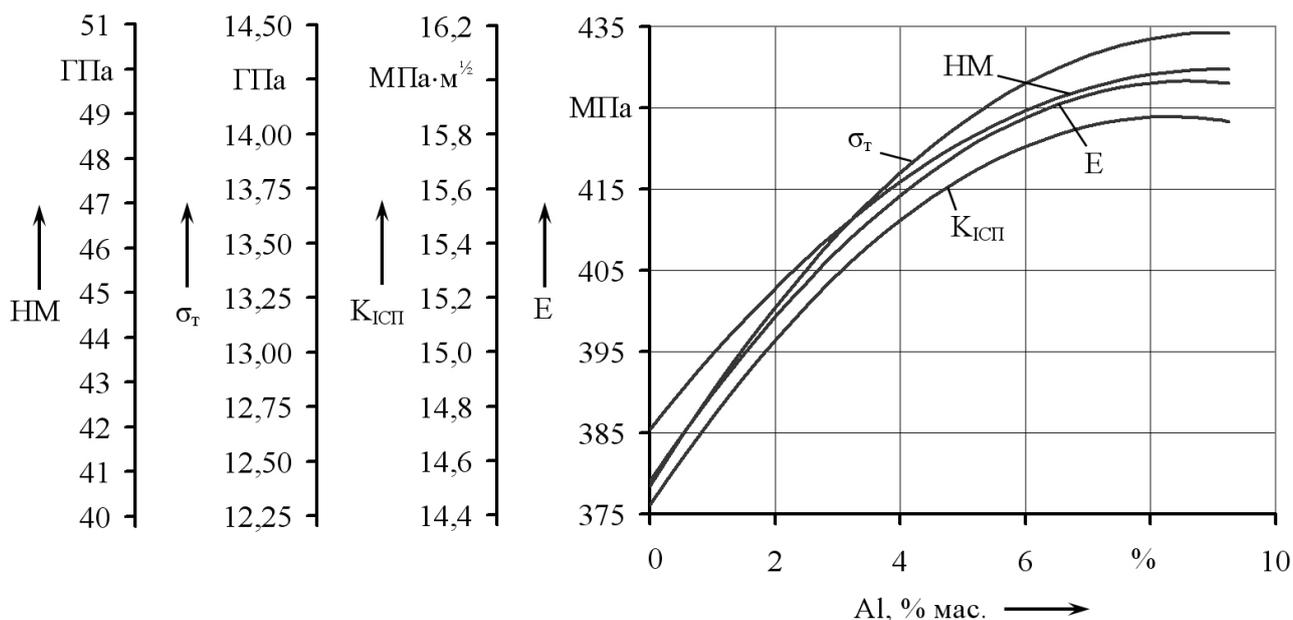
№ п/п	Покрытие	E, ГПа	НМ, ГПа	$\sigma_r$ , ГПа	$K_{1сп}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
1	2	3	4	5	6
1	TiAlN	369	41,40	12,26	14,77
2	TiAlFeN	392	47,13	13,76	14,52
3	TiAlMoN	397	47,43	13,82	14,55
4	TiAlCrN	403	49,30	14,28	14,55
5	TiAlZrN	419	49,31	14,29	15,72
6	TiAlSiN	442	50,56	14,59	16,92
7	TiSiN	350	37,39	11,17	14,46
8	TiSiFeN	368	41,53	12,29	14,27
9	TiSiMoN	383	41,61	12,29	14,73
10	TiSiCrN	388	43,64	12,84	14,96
11	TiSiAlN	418	46,54	13,57	16,29
12	TiSiZrN	403	44,64	13,09	15,53
13	TiZrN	379	41,91	12,38	14,44
14	TiZrFeN	388	45,45	13,32	13,94
15	TiZrMoN	399	46,12	13,8	14,48
16	TiZrCrN	387	43,53	12,81	14,41
17	TiZrAlN	428	50,03	14,47	16,18
18	TiZrSiN	423	47,87	13,91	15,79

Легирование двухэлементных покрытий практически не изменяет период кристаллической решетки, но увеличивает (на 8...30 %) полуширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , что свидетельствует о микродеформации кристаллической решетки. Наибольшее повышение величины  $\beta_{111}$  вызывает легирование покрытий кремнием, цирконием и алюминием. Все легирующие элементы, за исключением железа, вызывают рост остаточных сжимающих напряжений  $\sigma_{ост}$ . Введение железа в состав двухэлементных покрытий ведет к снижению значений  $\sigma_{ост}$ . Бóльшее влияние на рост остаточных сжимающих напряжений оказывает легирование двухэлементных покрытий кремнием, цирконием и алюминием.

Микродеформация кристаллической решетки, вызванная легированием двухэлементных покрытий, ведет к росту их микротвердости. При этом бóльшие значения величины микротвердости характерны для покрытий, легированных цирконием, алюминием и кремнием, меньшие – хромом, железом и молибденом.



**Рис. 2.19.** Влияние содержания второго легирующего элемента (Si) на полуширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , остаточные сжимающие напряжения  $\sigma_{ост}$ , микротвердость  $H^0_{\mu}$  и коэффициент отслоения  $K_0$  покрытия TiZrSiN [4]



**Рис. 2.20.** Влияние содержания второго легирующего элемента (Al) на модуль Юнга E, твердость по Мейеру HM, предел текучести  $\sigma_T$  и вязкость разрушения  $K_{ICSP}$  покрытия TiZrAlN [4]

Легирование двухэлементных покрытий увеличивает модуль Юнга E. Наибольшее его повышение вызывает легирование алюминием, цирконием и кремнием. Увеличение микротвердости трехэлементных покрытий ведет к росту твердости по Мейеру HM, что наряду с изменением модуля Юнга E вызывает повышение предела текучести  $\sigma_T$ . Наибольший рост предела текучести наблюдается при легировании покрытий цирконием, кремнием, алюминием и хромом.

Увеличение модуля Юнга E и предела текучести  $\sigma_T$  приводит к изменению вязкости разрушения  $K_{ICSP}$  трехэлементных покрытий. Введение в состав покрытия TiAlN железа, хрома и молибдена несколько уменьшает величину  $K_{ICSP}$ , а циркония и кремния, наоборот, повышает. Для покрытия TiZrN дополнительное легирование кремнием и алюминием вызывает рост вязкости разрушения  $K_{ICSP}$ , хромом и молибденом практически ее не изменяет, а железом – несколько снижает. Легирование покрытия TiSiN железом также ведет к некоторому снижению величины  $K_{ICSP}$ , молибденом и хромом незначительно ее увеличивает.

Таким образом, трехэлементные нитридные покрытия имеют более высокие механические свойства по сравнению с двухэлементными.

Легирование двухэлементных покрытий ведет к изменению действующих в них напряжений (табл. 2.10). При этом влияние одного и того же

легирующего элемента на изменение напряжений в двухэлементных покрытиях аналогично тому, что имеет место при легировании одноэлементных покрытий.

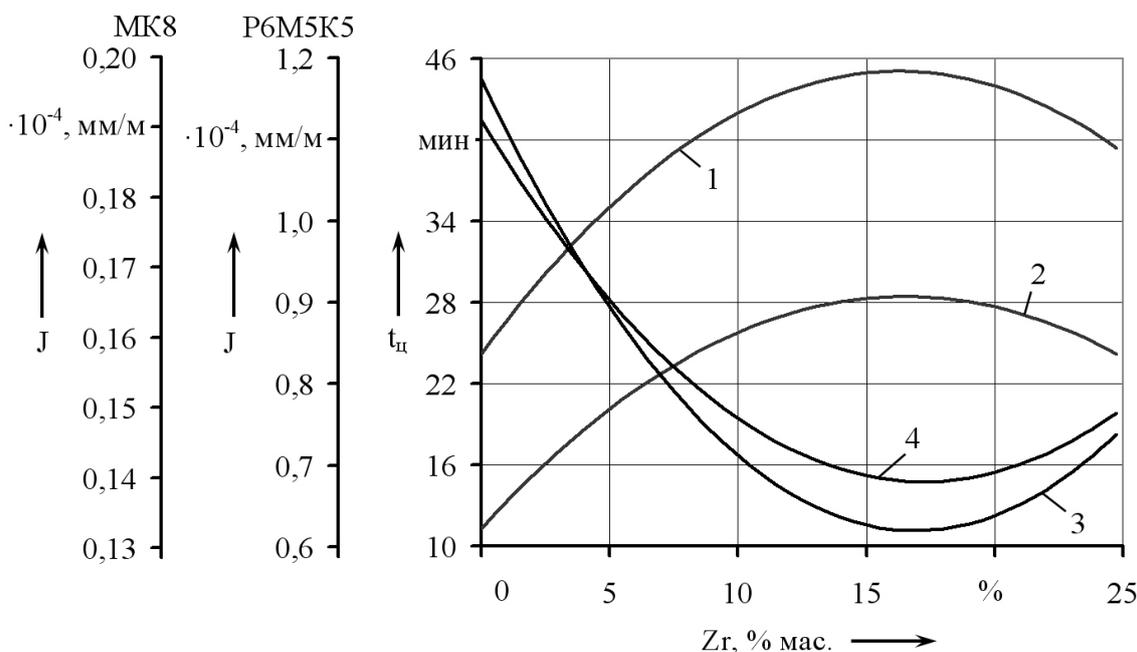
### 2.10. Характеристики напряженного состояния многоэлементных покрытий, нанесенных на пластины МК8 [4]

№	Покрытие	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_{ост}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа
1	2	4	5	6	7
1	TiAlN	589	-903	-1890	-2204
2	TiAlFeN	589	-804	-2076	-2291
3	TiAlMoN	605	-1177	-2090	-2662
4	TiAlCrN	614	-1472	-2132	-2990
5	TiAlZrN	621	-1570	-2176	-3125
6	TiAlSiN	642	-1609	-2278	-3245
7	TiSiN	565	-1069	-1857	-2361
8	TiSiFeN	572	-863	-1934	-2225
9	TiSiMoN	582	-1354	-2010	-2782
10	TiSiCrN	585	-1511	-2014	-2936
11	TiSiAlN	628	-1560	-2156	-3088
12	TiSiZrN	611	-1373	-2079	-2841
13	TiZrN	613	-1256	-1906	-2549
14	TiZrFeN	592	-1148	-2067	-2623
15	TiZrMoN	611	-1599	-2106	-3090
16	TiZrCrN	612	-1422	-2145	-2955
17	TiZrAlN	629	-1413	-2234	-3018
18	TiZrSiN	624	-1746	-2189	-3311

Изменение напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_0$  и  $\sigma_T$  отражается на суммарных напряжениях  $\sigma_\Sigma$ , действующих в покрытии. При этом степень влияния легирующих элементов на величину  $\sigma_\Sigma$  различна. Легирование покрытий, нанесенных на твердосплавный инструмент, ведет к существенному повышению суммарных сжимающих напряжений. Исключение составляет железо: введение его в состав покрытий (Ti,Al)N и (Ti,Zr)N увеличивает суммарные сжимающие напряжения незначительно, а в состав покрытия (Ti,Si)N их несколько снижает [4].

При легировании большинства двухэлементных покрытий, нанесенных на быстрорежущую сталь, суммарные напряжения  $\sigma_\Sigma$  также являются сжимающими, но величина их существенно меньше по сравнению с покрытиями, нанесенными на твердосплавную основу. Исключением является покрытие (Ti,Al)N, легированные железом, для которых суммарные напряжения являются растягивающими. Данный факт объясняется

значительным снижением остаточных сжимающих напряжений в данном покрытии при легировании их железом. Меньшая величина суммарных напряжений в трехэлементных покрытиях, нанесенных на быстрорежущую сталь, объясняется действием в них растягивающих термических напряжений. Наибольшее влияние на рост напряжений  $\sigma_{\Sigma}$  оказывают алюминий и цирконий, меньшее – молибден и хром.



**Рис. 2.21. Влияние содержания второго легирующего элемента (Al) на циклическую трещиностойкость  $t_{ц}$  (1, 2) покрытия TiSiAlN и интенсивность износа J режущего инструмента из твердого сплава МК8 (3) и быстрорежущей стали Р6М5К5 (4) при обработке заготовок из стали 30ХГСА [4]:**  
1, 3 – МК8, 2, 4 – Р6М5К5

Легирование покрытий (Ti,Al)N, (Ti,Zr)N и (Ti,Si)N приводит к значительному увеличению времени  $t_{ц}$  работы режущего инструмента до появления в них трещин (рис. 2.21 и табл. 2.11), что свидетельствует о повышении их трещиностойкости и объясняется более высокими физико-механическими свойствами и лучшим напряженным состоянием в процессе резания.

Как видно из табл. 2.11, для режущего инструмента с многоэлементными нитридными покрытиями наблюдается снижение интенсивности износа по сравнению с двухэлементными покрытиями TiAlN, TiZrN и TiSiN. Наибольшую эффективность показывают покрытия, обладающие более высокой циклической трещиностойкостью. При этом оптимальному содержанию легирующего элемента Me<sub>2</sub> в покрытии, обеспечивающему

максимальное повышение времени циклической трещиностойкости  $t_{ц}$ , соответствует минимальная интенсивность износа  $J$  режущего инструмента (рис. 2.21).

**2.11. Влияние состава многоэлементных покрытий на время циклической трещиностойкости покрытий и интенсивность износа режущего инструмента [4]**

№ п/п	Покрытие	МК8			P6M5K5		
		Циклическая трещино- стойкость $t_{ц}$ , мин	Интенсивность износа режущего инструмента $J, \cdot 10^{-4}$ мм/м		Циклическая трещино- стойкость $t_{ц}$ , мин	Интенсивность износа режущего инструмента $J, \cdot 10^{-4}$ мм/м	
			30ХГСА	12Х18Н10Т		30ХГСА	12Х18Н10Т
1	2	3	4	5	6	7	8
1	TiAlN	16,48	0,249	0,834	8,03	1,027	3,278
2	TiAlFeN	22,79	0,205	0,689	8,81	0,783	2,644
3	TiAlMoN	22,37	0,206	0,632	15,02	0,799	2,407
4	TiAlCrN	29,55	0,194	0,657	17,98	0,780	2,461
5	TiAlZrN	39,92	0,180	0,561	28,31	0,666	2,213
6	TiAlSiN	45,40	0,146	0,520	34,30	0,608	2,140
7	TiSiN	24,18	0,197	0,724	11,29	1,124	3,221
8	TiSiFeN	26,02	0,168	0,633	13,83	0,913	2,704
9	TiSiMoN	29,42	0,153	0,596	15,86	0,870	2,597
10	TiSiCrN	35,42	0,140	0,541	18,64	0,814	2,344
11	TiSiAlN	46,51	0,127	0,501	28,68	0,663	2,304
12	TiSiZrN	45,01	0,134	0,519	28,41	0,684	2,314
13	TiZrN	13,80	0,226	0,826	6,79	1,076	3,094
14	TiZrFeN	19,28	0,179	0,664	9,54	0,816	2,506
15	TiZrMoN	21,53	0,179	0,647	13,14	0,846	2,457
16	TiZrCrN	28,06	0,169	0,662	15,72	0,790	2,481
17	TiZrAlN	43,40	0,133	0,501	28,51	0,676	2,164
18	TiZrSiN	44,13	0,130	0,511	33,13	0,638	2,203

Примечание: Интенсивность износа режущего инструмента с покрытиями определяли при следующих режимах резания: для твердого сплава МК8 – скорость резания  $V = 180$  м/мин; продольная подача  $S = 0,15$  мм/об; глубина резания  $t = 0,5$  мм для быстрорежущей стали P6M5K5 –  $V = 55$  м/мин;  $S = 0,3$  мм/об;  $t = 0,75$  мм

Применение трехэлементных покрытий в зависимости от условий резания и состава покрытий позволяет повысить период стойкости режущего

инструмента при обработке заготовок из конструкционных материалов в 1,25 – 2,2 раза по сравнению с двухэлементными покрытиями и в 3,2 – 5,5 раза по сравнению с покрытием TiN [4].

#### 2.1.1. Вопросы, выносимые на практическое занятие

- формирование многоэлементных покрытий на основе модифицированного нитрида титана;
- влияние состава трехэлементных покрытий на параметры структуры, механические свойства, напряжения, действующие в покрытиях, циклическую трещиностойкость и интенсивность изнашивания режущего инструмента.

2.1.2. Исследовательская работа «Исследование влияния влияния состава трехэлементных покрытий на параметры структуры, механические свойства, циклическую трещиностойкость и интенсивность изнашивания режущего инструмента». Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Многоэлементные покрытия на основе модифицированного нитрида титана», подпрограммы «Структурные параметры», «Механические свойства», «Циклическая трещиностойкость», «Интенсивность изнашивания режущего инструмента».

Исследуются многоэлементные покрытия TiAlMeN, TiZrMeN и TiSiMeN, где Me – Fe, Mo, Cr, Si, Zr, Al.

Исследования проводятся в следующей последовательности.

1. Исследуется влияние состава трехэлементных покрытий на параметры структуры – период кристаллической решетки, полуширину рентгеновской линии и остаточные напряжения.

2. Исследуется влияние состава трехэлементных покрытий на механические свойства – микротвердость, коэффициент отслоения, модуль Юнга и вязкость разрушения.

3. Исследуется влияние состава трехэлементных покрытий циклическую трещиностойкость.

4. Исследуется влияние состава трехэлементных покрытий на интенсивность изнашивания быстрорежущего и твердосплавного инструмента при обработке заготовок из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т.

По результатам исследований строятся графики зависимостей структурных параметров, механических свойств, циклической трещиностойкости и интенсивности изнашивания режущего инструмента от состава многоэлементного покрытия.



## 2.6. ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ПУТЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

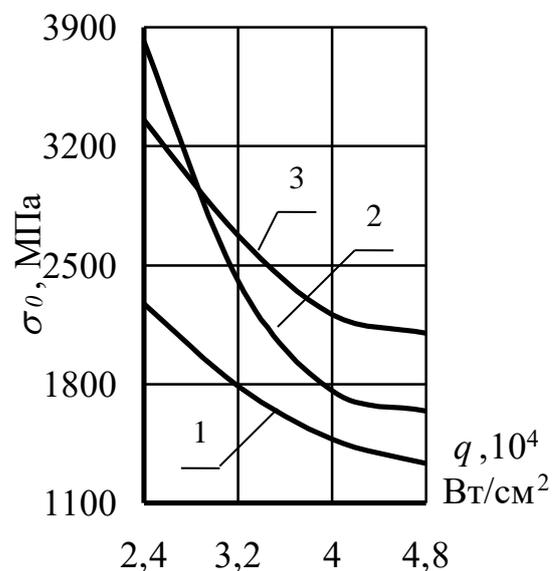
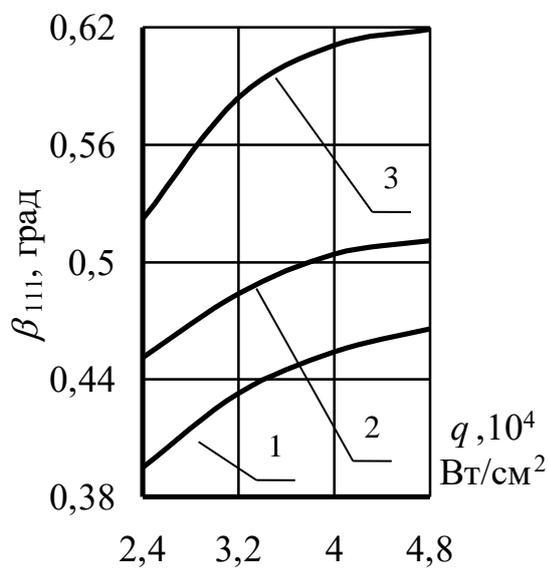
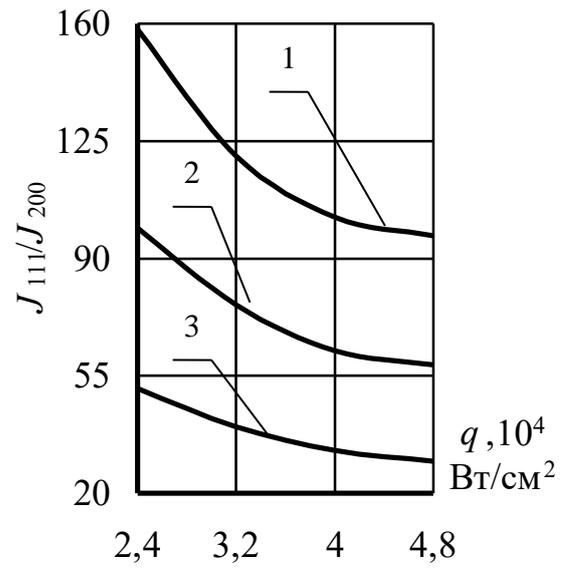
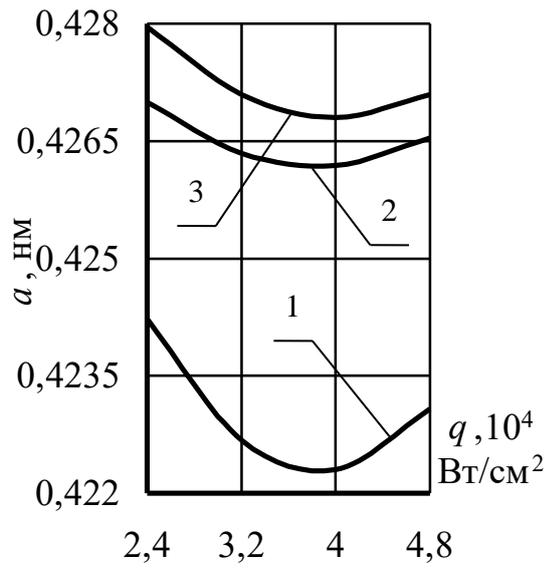
### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Эффективность режущего инструмента с покрытиями может быть повышена путем воздействия на покрытие дополнительной поверхностной упрочняющей обработки. [1, 5] Дополнительная упрочняющая обработка изменяет механические свойства покрытия, что в свою очередь оказывает влияние на работоспособность режущего инструмента. В качестве дополнительной упрочняющей обработки можно использовать импульсное лазерное излучение.

Импульсная лазерная обработка покрытия изменяет его структурные параметры (рис. 2.22). Снижается период кристаллической решетки  $a$ , что свидетельствует о получении структуры более плотного кристаллического строения и объясняется перестройкой структуры материала покрытия под воздействием лазерного излучения. Более значительное снижение периода решетки наблюдается для одноэлементных покрытий TiN и менее значительное – для двухэлементных покрытий (Ti,Zr)N и (Ti,Zr)CN.

Рост плотности мощности импульсной лазерной обработки ведет к искажению кристаллической решетки и разориентации микрообъемов покрытий, что вызывает увеличение полуширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$ . В то же время снижаются параметр текстуры  $J_{111}/J_{200}$  и величина остаточных напряжений  $\sigma_0$ .

Изменение текстуры, вызванное преимущественно уменьшением интенсивности линии [111] TiN, связано с разориентацией кристаллических плоскостей материала покрытия при воздействии на него лазерного излучения, а снижение остаточных напряжений – их релаксацией на границе покрытия с инструментальной основой в результате высокоскоростного лазерного нагрева и охлаждения. Более высокий уровень остаточных напряжений в двухэлементных покрытиях определяет большую интенсивность их снижения при лазерном воздействии по сравнению с одноэлементными покрытиями. Изменение структурных параметров под воздействием импульсного лазерного излучения покрытий, нанесенных на твердосплавную основу, менее значительно по сравнению с покрытиями, нанесенными на быстрорежущую основу. Это связано с тем, что при лазерной обработке инструмента из твердого



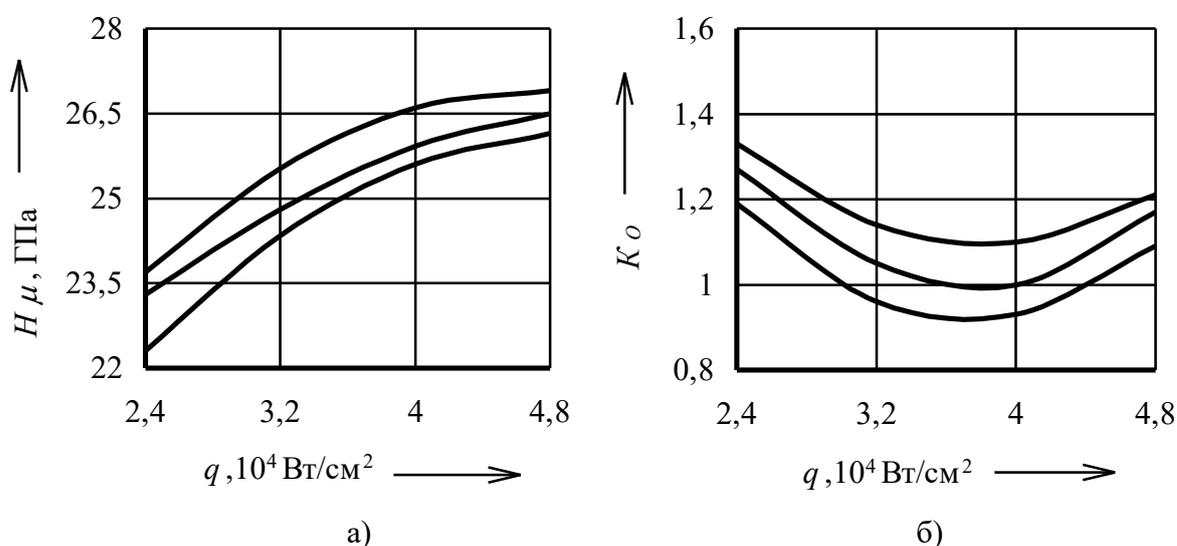
**Рис. 2.22. Влияние плотности мощности лазерного излучения на структурные параметры покрытий:**

*1* – TiN, *2* – (Ti, Zr)N, *3* – (Ti, Zr)CN;

инструментальная основа – быстрорежущая сталь P6M5K5

сплава материал основы не претерпевает значимых изменений и изменение структурных параметров отражает лишь трансформацию кристаллической структуры материала покрытия. В случае быстрорежущей стали лазерное воздействие приводит к трансформации кристаллической структуры как покрытия, так и поверхностных слоев материала основы.

Импульсная лазерная обработка вызывает изменение их физико-механических свойств (рис. 2.23). Микротвердость  $H_\mu$  покрытий, нанесенных как на твердосплавную, так и быстрорежущую основу, увеличивается на 10...16 % в зависимости от его состава. Прочность сцепления с инструментальной основой с ростом плотности мощности лазерного излучения повышается (снижается коэффициент отслоения  $K_0$ ), что объясняется релаксацией макронапряжений на границе раздела «покрытие – инструментальная основа», а затем снижается (рис. 2.23, б). Увеличение коэффициента отслоения после некоторого значения плотности мощности лазерного излучения связано с оплавлением быстрорежущей основы и снижением ее твердости, а для твердого сплава с интенсивным трещинообразованием в его объеме.



**Рис. 2.23. Влияние плотности мощности лазерного излучения на микротвердость (а) и коэффициент отслоения (б) покрытия TiN:**

1,2,3 – толщина покрытия, соответственно, 3, 5 и 7 мкм;  
инструментальная основа – твердый сплав МК8

Повышение микротвердости покрытий и прочности их сцепления с инструментальной основой после импульсной лазерной обработки способствуют снижению интенсивности износа режущего инструмента (рис. 2.24). Зависимость интенсивности изнашивания от плотности мощности

лазерного излучения имеет минимум, координаты которого определяют режимы импульсной лазерной обработки, обеспечивающие минимальную интенсивность изнашивания контактных площадок инструмента.

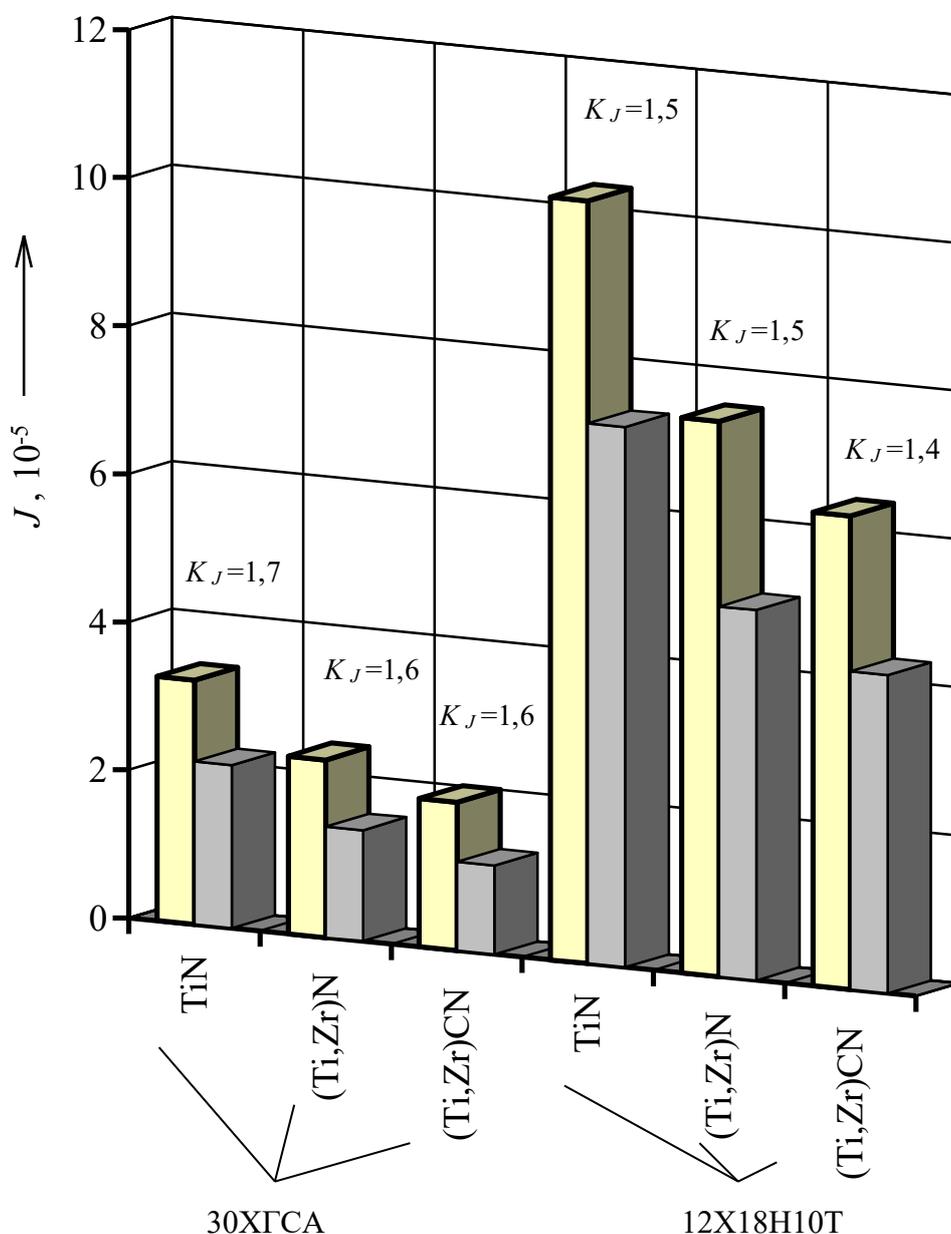


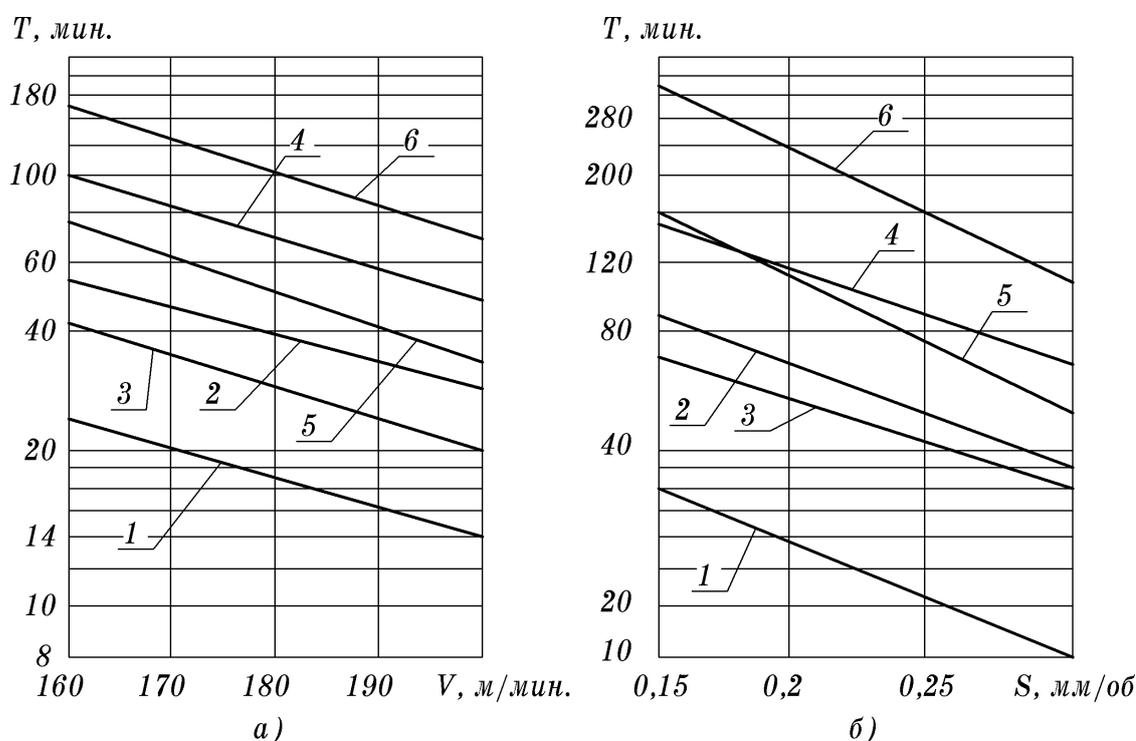
Рис. 2.24. Влияние импульсной лазерной обработки на интенсивность изнашивания твердосплавных пластин МК8:

■ - без ЛО,                      ■ - покрытие + ЛО

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

лазерного излучения ведет к увеличению интенсивности износа, что связано с повышением коэффициента отслоения покрытия, а для быстрорежущей стали дополнительно и со снижением микротвердости инструментальной основы. Плотность мощности лазерного излучения, при которой наблюдается минимум интенсивности износа режущего инструмента после импульсного лазерного излучения, зависит от состава покрытия. Интенсивность износа режущего инструмента с покрытиями после импульсной лазерной обработки снижается в 1,5 – 1,9 раза в зависимости от состава покрытия и обрабатываемого материала.

Применение импульсной лазерной обработки покрытий повышает период стойкости режущего инструмента в 1,5 – 3,2 раза в зависимости от состава покрытия и обрабатываемого материала (рис. 2.25).



**Рис. 2.25. Влияние скорости резания  $V$  (а) и подачи  $S$  (б) на период стойкости инструмента из твердого сплава МК8 при точении заготовок из стали 30ХГСА:**  
 а –  $S = 0,3$  мм/об,  $t = 0,5$  мм; б –  $V = 180$  м/мин,  $t = 0,5$  мм; 1 – TiN, 2 – TiN+ЛО,  
 3 – (Ti,Zr)N, 4 – (Ti,Zr)N+ЛО, 5 – (Ti,Zr)CN, 6 – (Ti,Zr)CN+ЛО

### 2.1.1. Вопросы, выносимые на практическое занятие

- механизм влияния импульсной лазерной обработки на формирование механических свойств износостойких покрытий;

- влияние плотности мощности импульсной лазерной обработки на параметры структуры, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента.

2.1.2. Исследовательская работа «Исследование влияния импульсного лазерного излучения на параметры структуры, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента». Работа выполняется на ЭВМ с использованием программы «Дополнительная упрочняющая обработка режущего инструмента с износостойкими покрытиями», подпрограммы «Структурные параметры», «Механические свойства», «Интенсивность изнашивания режущего инструмента».

Исследуются износостойкие покрытия TiN, TiZrN и TiZrCN. Исследования проводятся в следующей последовательности.

1. Исследуется влияние плотности мощности импульсного лазерного излучения на параметры структуры – период кристаллической решетки, полуширину рентгеновской линии, текстуру и остаточные напряжения.

2. Исследуется влияние плотности мощности импульсного лазерного излучения на механические свойства – микротвердость и коэффициент отслоения.

3. Исследуется влияние плотности мощности импульсного лазерного излучения на интенсивность изнашивания быстрорежущего и твердосплавного инструмента при обработке заготовок из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т.

По результатам исследований строятся графики влияния плотности мощности импульсной лазерной обработки на структурные параметры, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
2. Табаков В.П., Верещака А.С., Григорьев С.Н. Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 200 с.
3. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 151 с.
4. Табаков В.П., Чихранов А.В. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 255 с.
5. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 380 с.

Учебное издание

ТАБАКОВ Владимир Петрович  
САГИТОВ Дамир Ильдарович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ  
Сборник лабораторных и практических работ  
Учебное пособие

Редактор О.С. Бычкова

Подписано в печать 02.05.2007. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,63. Тираж 50 экз. Заказ

Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.