МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт
Кафедра «Технология машиностроения»

Утверждено на заседании кафедры
«Технология машиностроения»
«19» января 2022 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой
_____А.А. Маликов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических занятий
по дисциплине

«Условия рациональной эксплуатации инструментальной техники»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств

с профилем
Инструментальные системы машиностроительных производств

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 150305-01-22

Тула 2022 год

Разработчик(и) методических указаний

Якушенков Александр Владимирович, доцент, к.т.н. _____

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись)*

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ [4]

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.

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 точения, 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.

Схемы возможных конструкций многослойных покрытий, удовлетворяющих вышеизложенному принципу, приведены на рисунке 1.

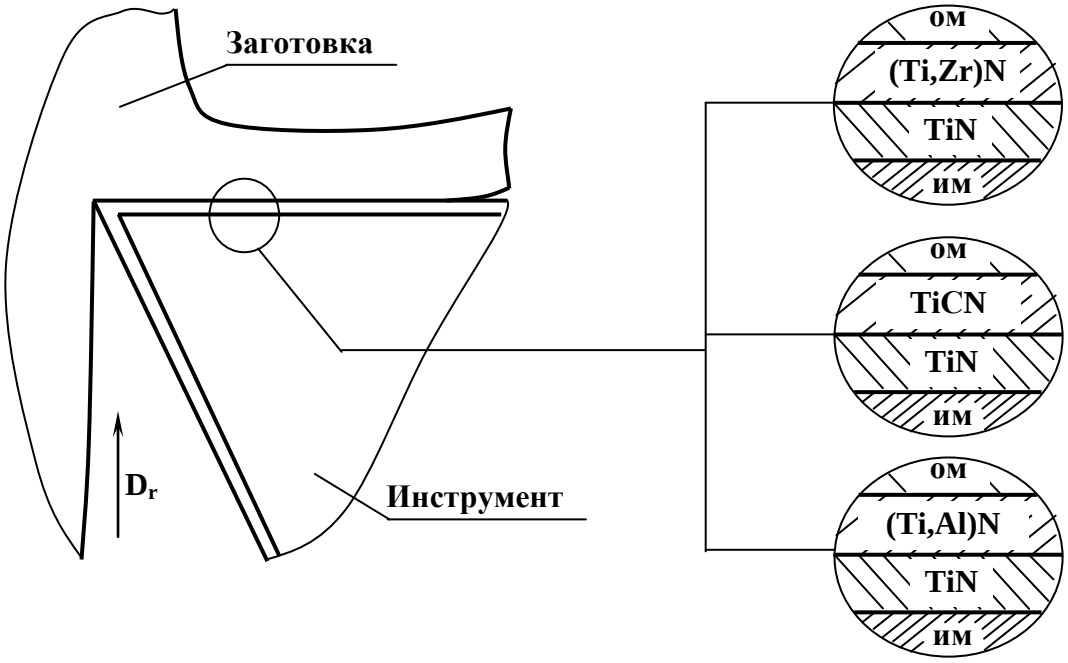


Рисунок 1. Схемы конструкций многослойных покрытий

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 β_{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 β_{111} на 30–35 %. Для многослойных покрытий с верхним слоем (Ti,Zr)N характерны более высокие значения величины β_{111}, что позволяет говорить о более высоких механических свойствах данных покрытий.

Таблица **1. Влияние толщины слоев на структурные параметры покрытия TiN-TiCN**

Толщина покрытия $h_п$, мкм	Толщина слоя, мкм		Период кристаллической решетки *a*, нм	Полуширина рентгеновской линии β_{111}, град	Параметр текстуры J_{111}/J_{200}	Остаточные напряжения σ_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 β_{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, величина которых растет с повышением общей толщины покрытия. Так, например, для покрытия TiN-TiCN увеличение толщины слоя TiCN вызывает рост σ_0, уровень которых выше для более толстых покрытий. Согласно [1, 2], 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.

Таблица **2. Влияние толщины слоев на механические свойства покрытия TiN-(Ti,Zr)N**

Толщина покрытия $h_п$, мкм	Толщина слоя, мкм		Микротвердость $H_μ$, ГПа	Коэффициент отслоения K_o
	(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 $H_μ$ 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.

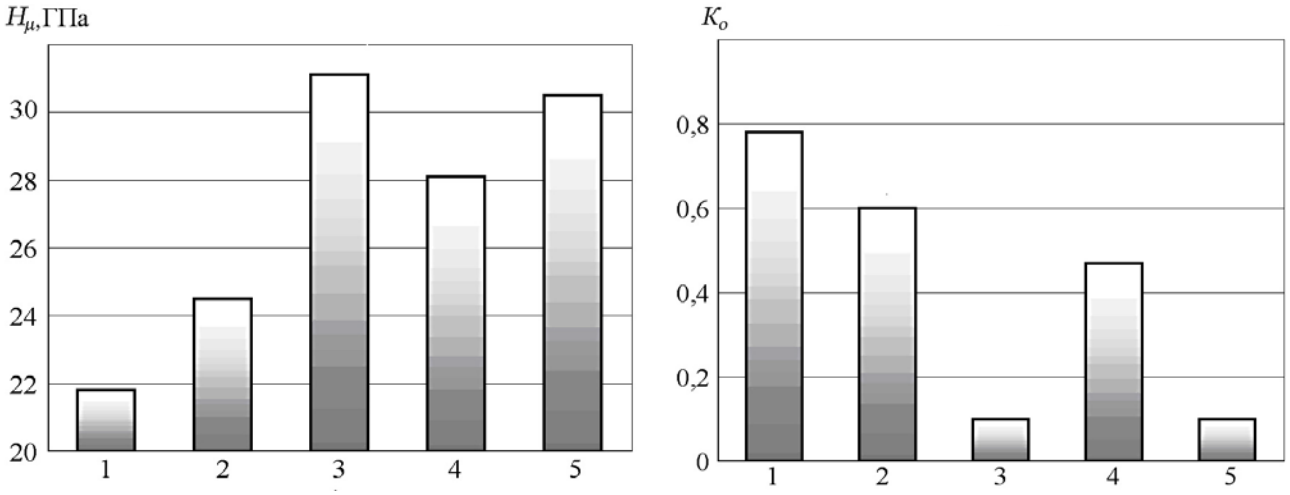
Прочность сцепления многослойного покрытия определяется толщиной нижнего слоя TiN. При этом зависимость коэффициента отслоения от толщины слоев имеет экстремальный характер и определяется соотношением толщин верхнего и нижнего слоя и общей толщиной покрытия. Минимум данных зависимостей наблюдается при 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 $К_о$ 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 $К_о$ 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 $К_о$ 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 рисунке 2 представлены сравнительные данные по микротвердости и коэффициенту отслоения различных многослойных покрытий.

Интенсивность износа инструмента с многослойными покрытиями определяется соотношение 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.



а) б)

Рисунок 2- Влияние состава многослойного покрытия на микротвердость H_μ (а) и коэффициент отслоения K_o (б):
***1* – TiN; *2* – TiN-TiCN; *3* – TiN-(Ti,Zr)N; *4* – TiN-(Ti,Al)N; *5* – TiN-TiCN-(Ti,Zr)N**

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 персональном компьютере 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. 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.

Такое покрытие должно иметь минимум два слоя (рисунок 3): 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.

Рис 3. Схема конструкции многослойного покрытия

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. 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 (таблица 3).

Таблица **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 β_{111}, град	Напряжения 1-го рода σ_0, 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. 4). При этом увеличение толщины более твердого слоя из карбонитрида титана вызывает рост микротвердости покрытий. Для трехслойных покрытий характерны более высокие значения величины H_μ 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. 5). 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.

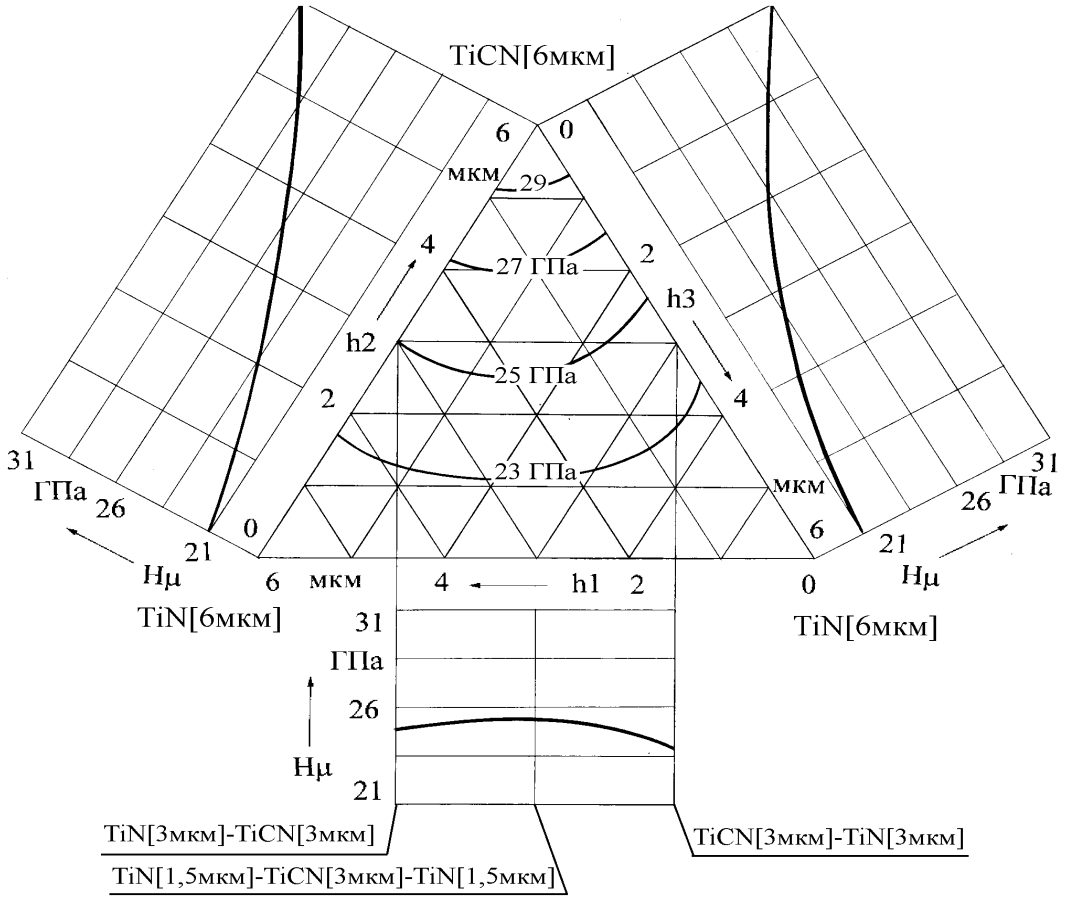


Рисунок 4 - Зависимость микротвердости многослойных покрытий от толщины слоев [3]:

h1, h2, h3 – толщины нижнего, промежуточного и верхнего слоев покрытия, мкм

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 (рисунок 2.6).

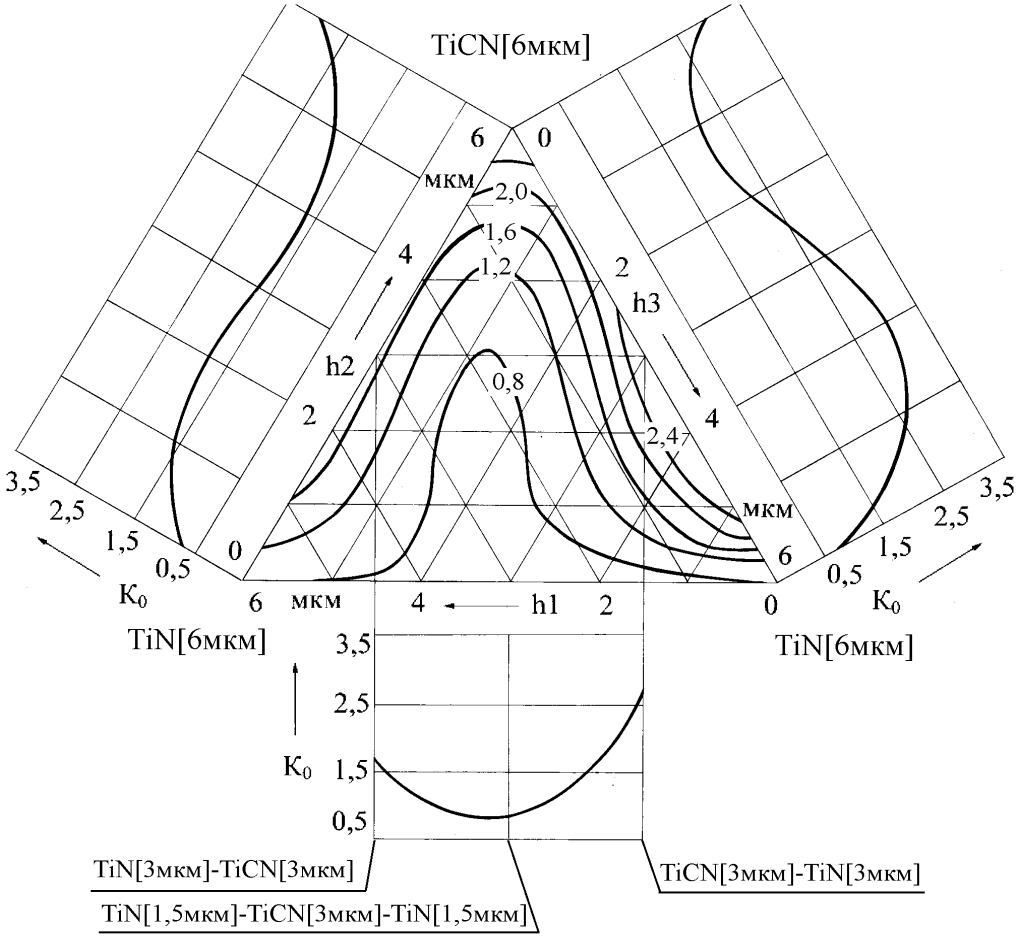


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента отслоения многослойных покрытий от толщины слоев [3]:

h1, h2, h3 – толщины нижнего, промежуточного и верхнего слоев покрытия, мкм

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 рисунка 7, 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.

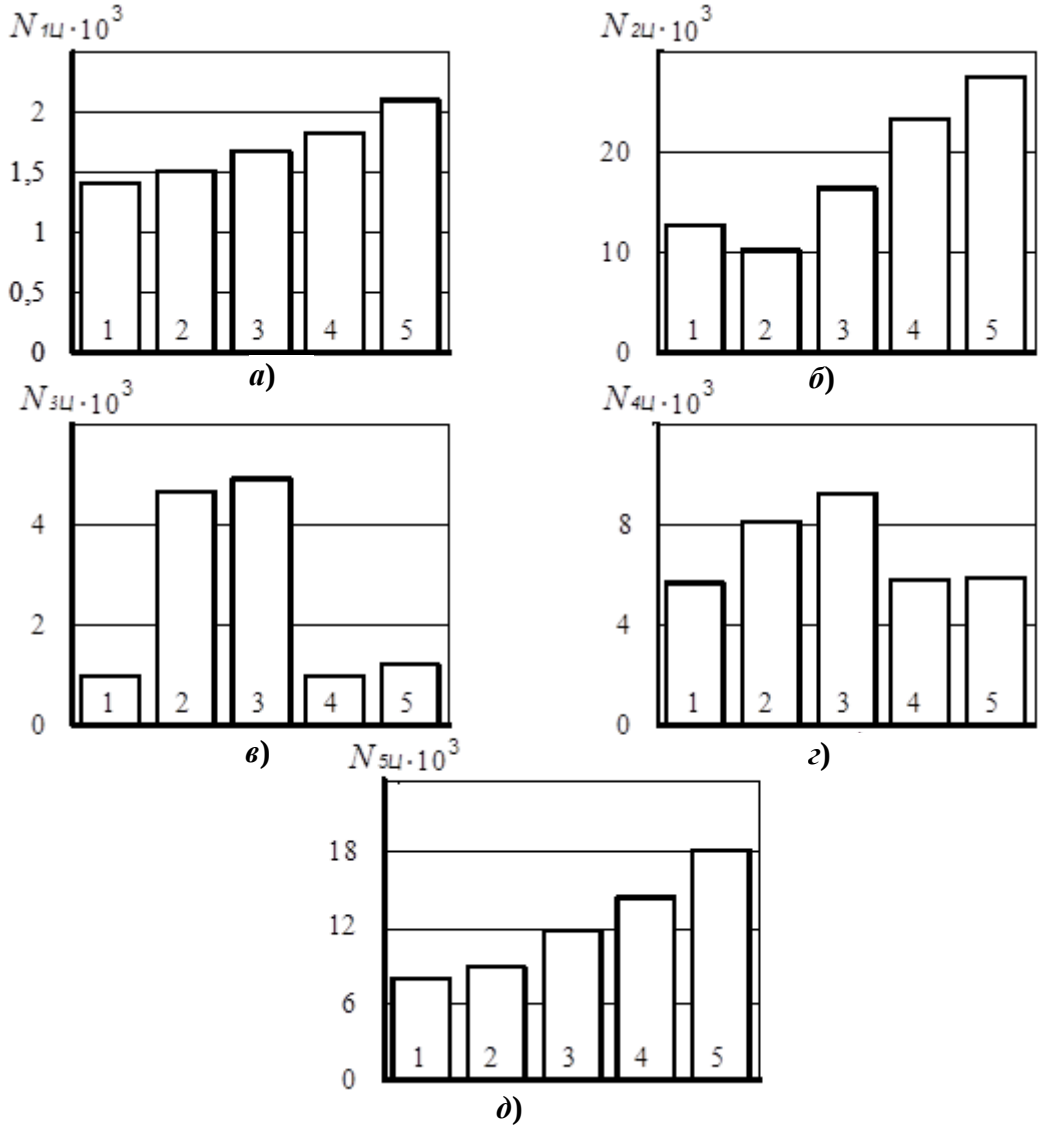


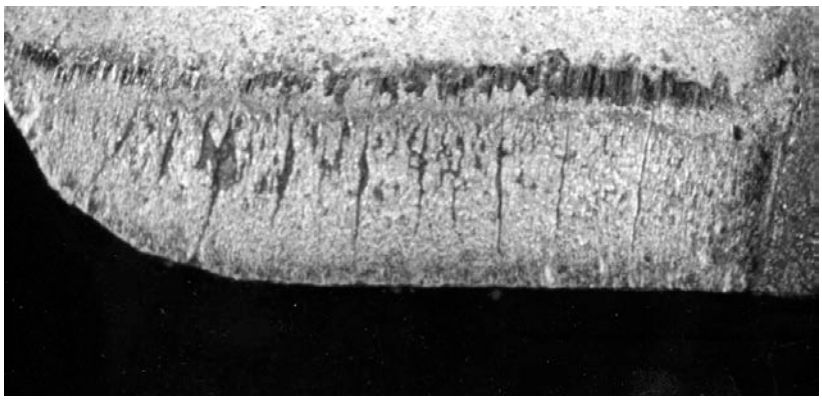
Рисунок 6 - Влияние конструкции покрытия на количество циклов до образования $N_{1Ц}$ и выхода $N_{2Ц}$ продольных трещин в инструментальной основе на режущую кромку (а, б), образования продольных $N_{3Ц}$ и поперечных $N_{4Ц}$ трещин в покрытии (в, г) и разрушения покрытия $N_{5Ц}$ (д):

1 – TiN, *2* – TiCN, *3* – TiN-TiCN, *4* – TiCN-TiN, *5* – TiN-TiCN-TiN;

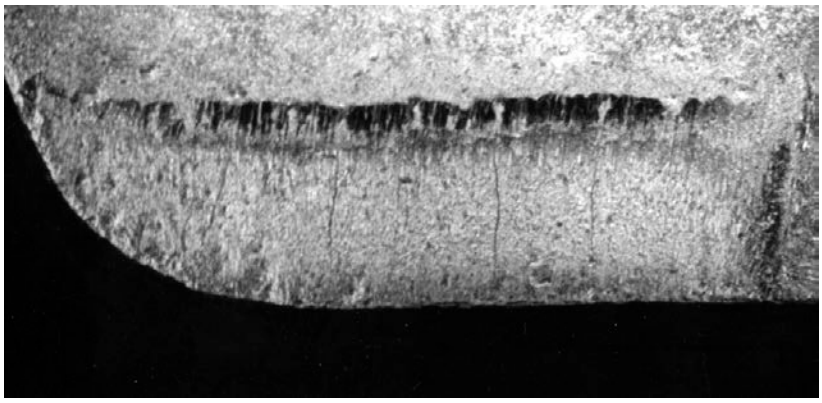
V = 247 м/мин, Sz = 0,4 мм/зуб, t = 1,5 мм, B = 20 мм

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 (рисунок 7).



а)



б)

Рисунок 7. Вид контактных площадок на передней поверхности пластин МК8 с покрытием TiN-TiCN (а) и TiCN-TiN (б) при торцовом фрезеровании заготовок из стали 5ХНМ:

V = 247 м/мин, S_z = 0,4 мм/зуб, t = 1,5 мм, B = 20 мм, τ =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 раздельных катодов. Исходя из вышесказанного, 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 ($TiN_{КТР}$). 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 % ($TiCN^{15\,\%}$). Такое карбонитридное покрытие имеет более низкую микротвердость (на 20 %) и несколько меньшую величину σ_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 $К_о$.

Прочность сцепления можно повысить, если в качестве нижнего слоя использовать покрытие TiN, полученное в комбинированном температурном режиме при высокой температуре конденсации ($TiN^{КТР}$), которое имеет большую прочность сцепления с инструментальной основой и меньший уровень остаточных напряжений. Схемы конструкций многослойных покрытий повышенной трещиностойкости представлены на рисунок 8.

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 $TiN^{КТР}$ 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

$TiCN^{15\%}$ снижает коэффициент K_o 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_o (соответственно 0,98 и 0,99). Наибольшую прочность сцепления с инструментальной основой имеют покрытия с нижним слоем $TiCN^{15\ \%}$ (№ 2 и № 3), коэффициент K_o для которых в 5,4–6 раз ниже по сравнению с покрытиями TiCN-TiN и TiN-TiCN-TiN.

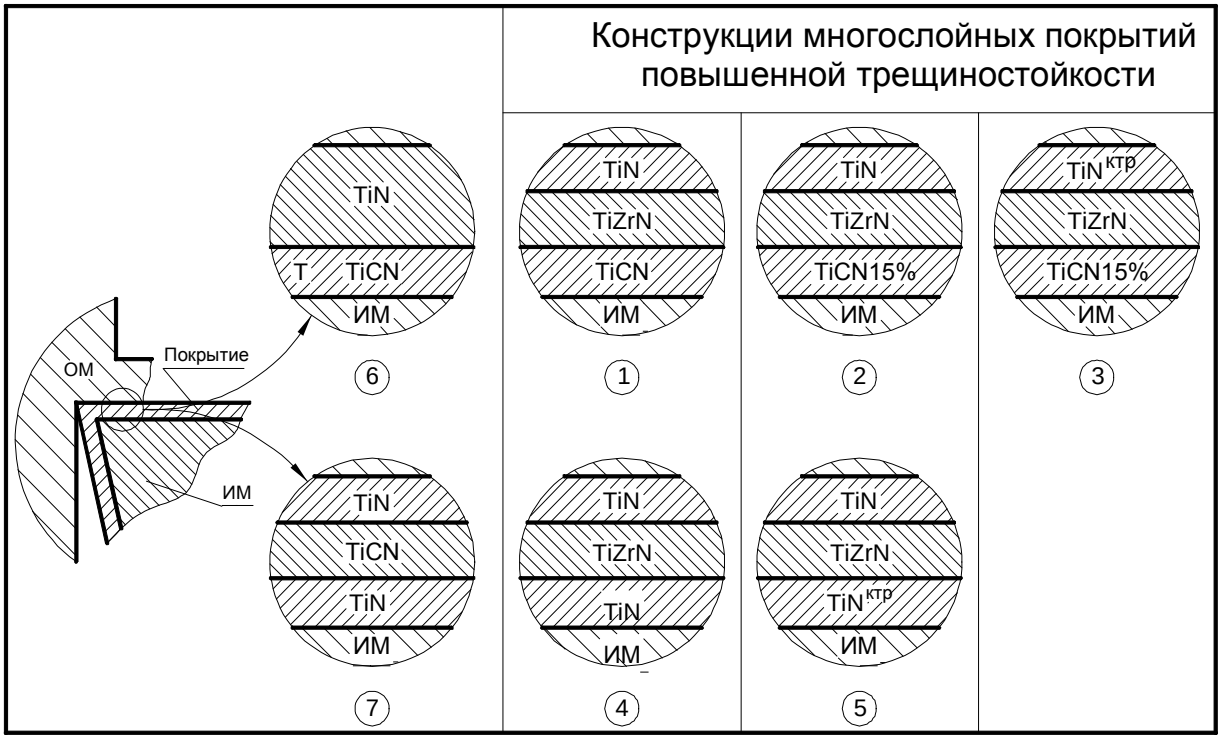


Рисунок 8. Схемы конструкций многослойных покрытий

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 ($N_{5Ц}$) (рисунок 9).

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. 2.10).

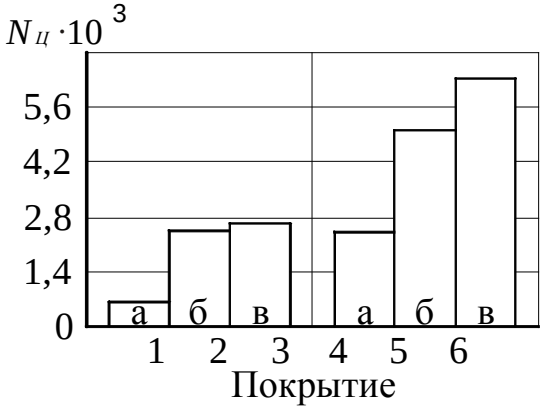
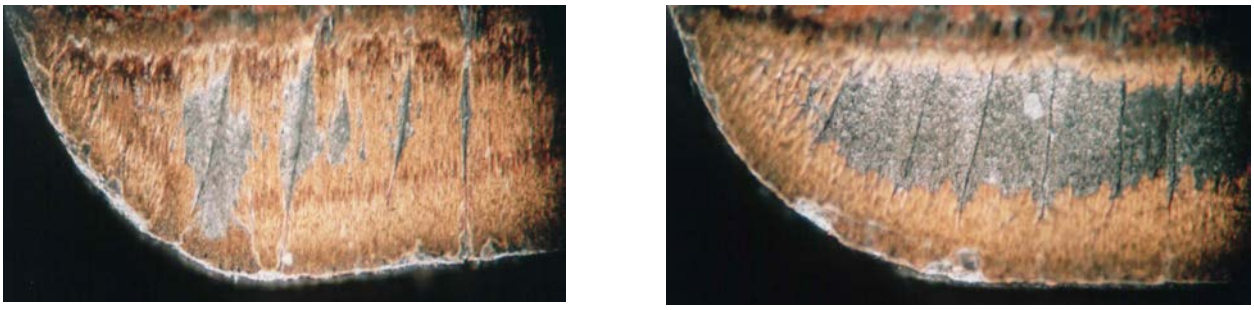


Рисунок 9 - Влияние конструкции многослойного покрытия на число циклов $N_{2Ц}$ (а), $N_{3,4Ц}$ (б) и $N_{5Ц}$ (в):
V = 247 м/мин, S_z = 0,4 мм/зуб,
B = 80 мм; *1* – TiCN-TiN,
2 –TiCN-(Ti,Zr)N-TiN



а) б)

Рисунок 10 - Фотографии контактных площадок инструмента с многослойными покрытиями:
V = 247 м/мин, S_z = 0,4 мм/зуб, B = 20 мм, t = 1,5 мм, τ = 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.

2.2.1. 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.

2.2.2. Исследовательская работа «Исследование влияния конструкции многослойных покрытий на структурные параметры, механические свойства и изнашивание режущего инструмента, работающего в условиях прерывистого резания». Работа выполняется на персональном компьютере 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 TiCN-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiN-TiZrN-TiN, $TiN^{КТР}$-TiZrN-$TiN_{КТР}$, TiCN-TiZrN-TiN, $TiCN^{15\%}$-TiZrN-TiN и $TiCN^{15\%}$-TiZrN-$TiN_{КТР}$ на микротвердость, коэффициент отслоения покрытий и коэффициент трещиностойкости.

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

3. Исследование толщин слоев многослойного покрытия TiCN-TiZrN-TiN на микротвердость, коэффициент отслоения покрытий и коэффициент трещиностойкости.

4. Исследование толщин слоев многослойного покрытия TiCN-TiZrN-TiN на интенсивность изнашивания торцовых фрез.

5. Исследуется влияние многослойных покрытий TiCN-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiN-TiZrN-TiN, $TiN^{КТР}$-TiZrN-$TiN_{КТР}$, TiCN-TiZrN-TiN, $TiCN^{15\%}$-TiZrN-TiN и $TiCN^{15\%}$-TiZrN-$TiN_{КТР}$, 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.

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 (таблицы 4 и 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

Таблица 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 σ_0, МПа при процентном содержании Me в переходном адгезионном слое (Ti-Me)					
	0	20	40	60	80	100
(Ti-Cr)	-1354 -960	-1536 -1323	-1740 -1731	-1966 -2184	-2215 -2682	-2487 -3225
(Ti-Zr)	-1354 -960	-1382 -1015	-1406 -1063	-1427 -1105	-1445 -1142	-1460 -1172
(Ti-Mo)	-1354 -960	-1661 -1574	-2031 -2314	-2464 -3181	-2962 -4176	-3522 -5297
(Ti-Fe)	-1354 -960	-1345 -941	-1303 -858	-1230 -711	-1124 -500	-987 -225

Таблица 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 σ_0, МПа при процентном содержании MeN в переходном адгезионном слое (Ti,Me)N					
	0	20	40	60	80	100
(Ti,Cr)N	-1748 -1748	-1795 -1842	-1842 -1935	-1888 -2027	-1934 -2119	-1979 -2209
(Ti,Zr)N	-1748 -1748	-1977 -2205	-2231 -2715	-2513 -3278	-2821 -3894	-3155 -4562
(Ti,Mo)N	-1748 -1748	-2245 -2743	-2850 -3954	-3562 -5379	-4383 -7020	-5310 -8875
(Ti,Fe)N	-1748 -1748	-1596 -1444	-1382 -1016	-1105 -461	-765 +218	-363 +1023

Как видно из таблицы 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).

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 рисунке 11 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 рисунке 12.

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.

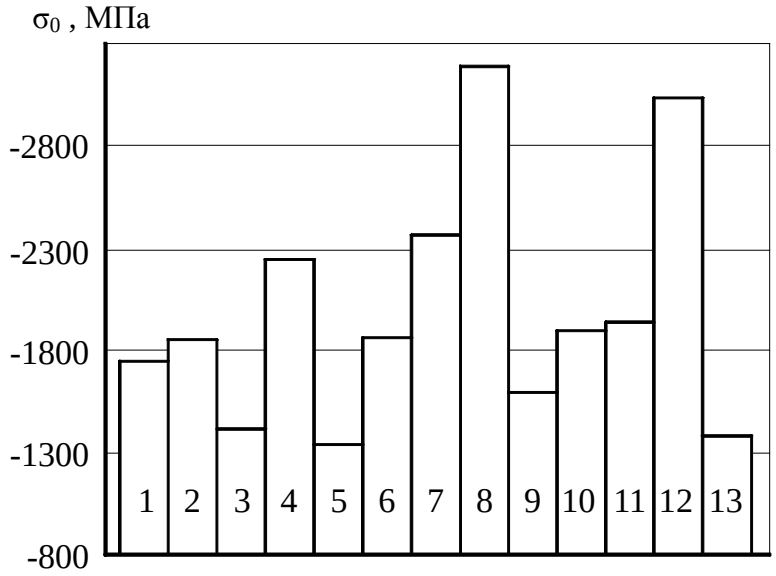


Рисунок 11- Влияние состава покрытия на остаточные напряжения:
1 – TiN; *2* – (Ti-Cr)+TiN; *3* – (Ti-Zr)-TiN; *4* – (Ti-Mo)-TiN; *5* – (Ti-Fe)-TiN; *6* – (Ti,Cr)N-TiN; *7* – (Ti-Zr)N-TiN; *8* – (Ti,Mo)N-TiN; *9* – (Ti,Fe)N-TiN; *10* – (Ti-Cr)-(Ti,Cr)N-TiN; *11* – (Ti-Zr)-(Ti,Zr)N-TiN; *12* – (Ti-Mo)-(Ti,Mo)N-TiN;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

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.

Таким образом, изменяя конструкцию многослойного покрытия с переходными адгезионными слоями, можно направленно подбирать

необходимые свойства покрытия, обеспечивающие наибольшее снижение интенсивности износа режущего инструмента.

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

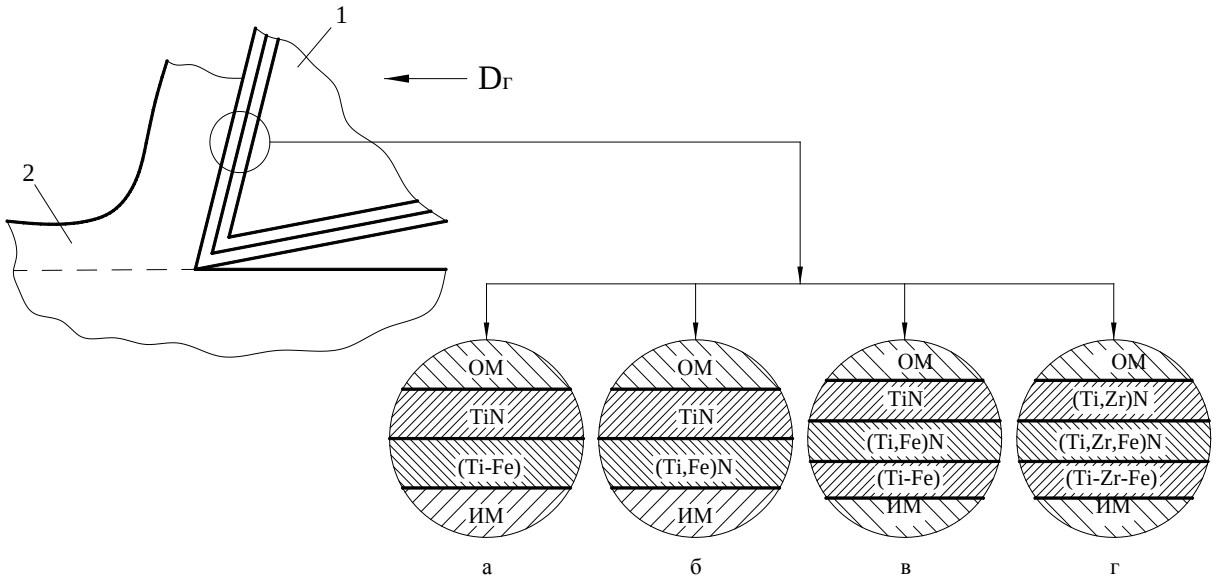


Рисунок 12 - Схемы конструкций покрытий с переходными адгезионными слоями:
1 – режущий инструмент, 2 – заготовка

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.

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 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.

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 TiAlSiN, TiAlZrN, TiZrSiN, TiZrAlN, TiSiAlN, TiSiZrN и 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_o). Анализ представленных в табл. 2.6 данных позволяет предложить в качестве нижних слоев многослойного покрытия двухэлементные покрытия TiAlN, TiZrN и TiSiN. Как видно, данные двухэлементные покрытия имеют более низкие значения коэффициента

отслоения K_o 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.

Таблица 6. Физико-механические и эксплуатационные свойства износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана [4]

№	Покрытие	Содержание легирующего элемента Me_2, % мас.	E, ГПа	$\sigma_т$, ГПа	$K_{1СП}$, МПа·м^{½}	$H_μ$, ГПа	$H^0_μ$, ГПа	K_o	$T_ц$, 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

Окончание табл. 2.6

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 рисунке 13 – TiAlN-TiAlMeN и TiZrN-TiZrMeN (где Me – Zr, Cr, Mo, Si, Al).

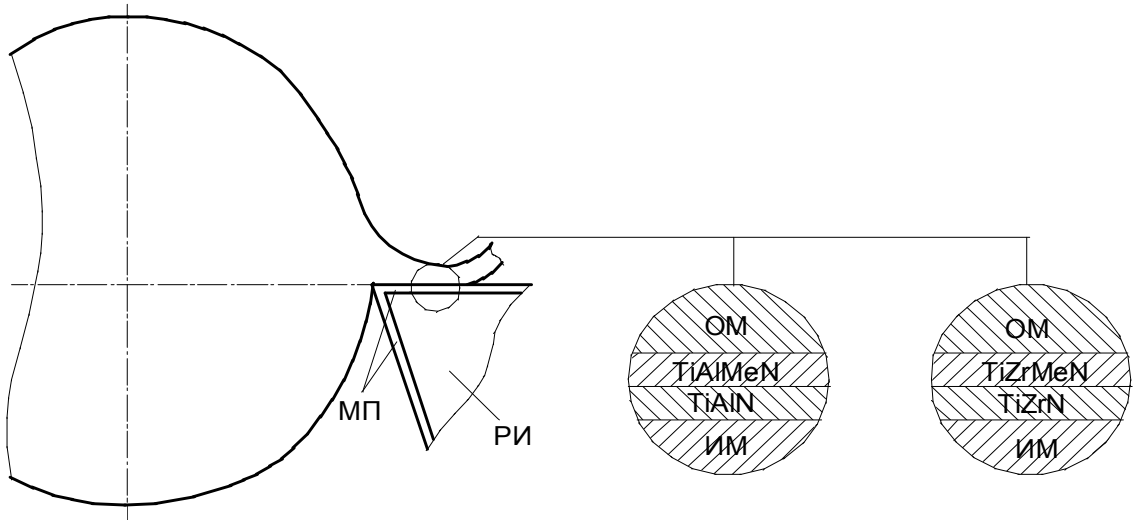
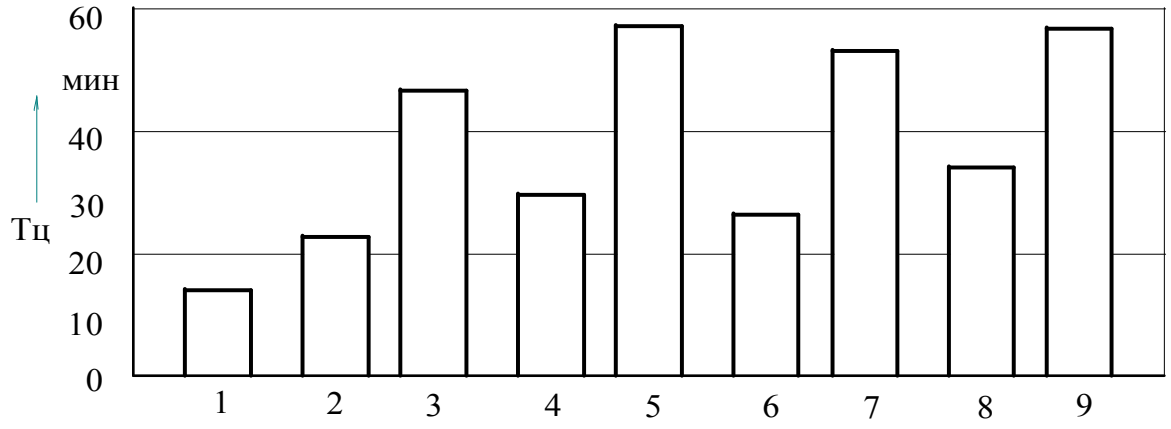


Рисунок 13 - Схемы конструкций многослойных покрытий TiAlN-TiAlMeN и TiZrN-TiZrMeN

Работоспособность режущего инструмента с покрытиями в значительной степени определяется его циклической трещиностойкостью, т.е. временем его работы до образовании 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. 2.14 и 2.15). 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].



Рисунко 14 - Циклическая трещиностойкость многослойных покрытий TiAlN-TiAlMeN:

1 – TiAlN; 2 – TiAlMoN; 3 – TiAlN-TiAlMoN; 4 – TiAlCrN; 5 – TiAlN-TiAlCrN; 6 – TiAlZrN; 7 – TiAlN-TiAlZrN; 8 – TiAlSiN; 9 – TiAlN-TiAlSiN

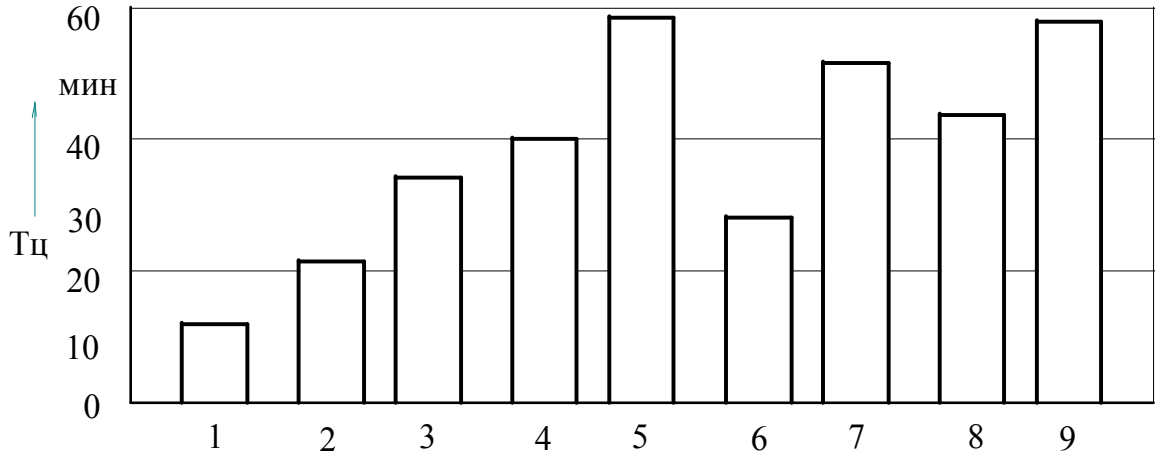


Рисунок 15 - Циклическая трещиностойкость многослойных покрытий TiZrN-TiZrMeM:

1 – TiZrN; 2 – TiZrMoN; 3 – TiZrN-TiZrMoN; 4 – TiZrCrN; 5 – TiZrN-TiZrCrN; 6 – TiZrAlN; 7 – TiZrN-TiZrAlN; 8 – 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 β_{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 β_{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 данных 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.

Таблица 7. Механические свойства многослойных покрытий и период стойкости режущего инструмента с покрытиями

Покрытие	$К_о$	$Н_μ$, ГПа	$К_{1СП}$, МПа·м$^{1/2}$	$Т_Ц$, мин	Т, 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: $К_о$ – коэффициент отслоения; $Н_μ$ – микротвердость; $К_{1СП}$ – вязкость разрушения; $Т_Ц$ – циклическая трещиностойкость; Т – период стойкости; 1 и 2 – соответственно данные, полученные при обработке заготовок из стали 30ХГСА пластинами МС146 (V = 180 м/мин; S = 0,3 мм/об; t = 0,5 мм) и заготовок из стали 12Х18Н10Т пластинами НТi10 (V = 140 м/мин; S = 0,3 мм/об; t = 0,5 мм)

4.1. 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.

4.2. Исследовательская работа «Исследование влияния конструкции многослойного покрытия на напряжения, действующие в покрытиях, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента». Работа выполняется на персональном компьютере 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.

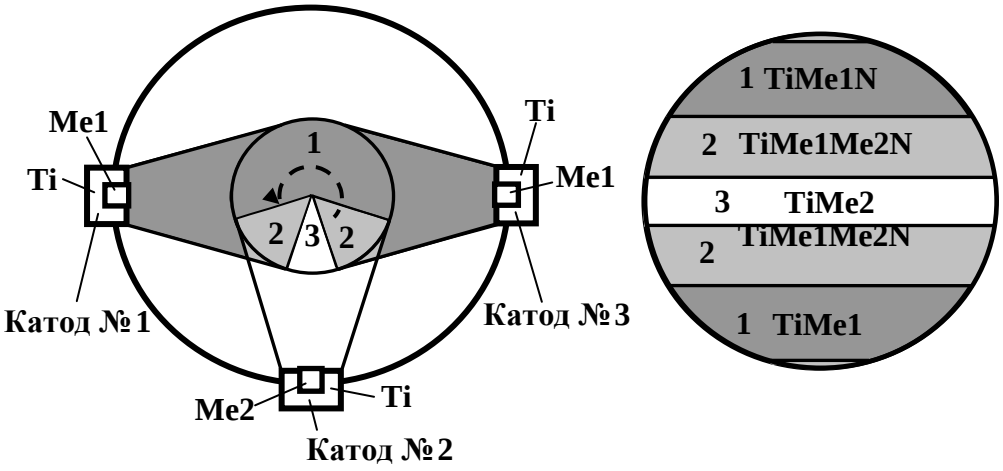
5. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО НИТРИДА ТИТАНА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как было сказано выше, легирование покрытия TiN, например, цирконием, может осуществляться с использованием раздельных и составных катодов. При этом покрытие (Ti,Zr)N, полученное из раздельных 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 (Tix,Zr1–x)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 раздельных катодов, имеет более высокую микротвердость.

При легировании покрытия TiN одновременно двумя элементами, получаемое покрытие ((Ti,Me1,Me2)N, где Me1 и Me2 – легирующие элементы) может быть нанесено с использованием составных катодов. Технологическая компоновочная схема установки для нанесения таких покрытий показана на рисунке 16, а. Покрытие наносится с помощью трех составных катодов, два из которых с легирующим элементом Me1 расположены напротив друг друга, а третий с легирующим элементом Me2 находится между ними. В данном случае за один оборот стола установки также будет образовываться мультислойная структура (рисунок 16, б), как и в случае нанесения двухэлементных покрытий из раздельных катодов: мультислои нитрида титана, легированные элементами Me1 и Me2 (соответственно (Ti,Me1)N и (Ti,Me2)N), чередующиеся с мультислоями нитрида титана, легированного одновременно элементами Me1 и Me2 (Ti,Me1,Me2)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,Me1,Me2)N будут действовать два механизма упрочнения материала покрытия – твердорастворный и упрочнение микроструктурными барьерами [2].

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



а) б)

Рисунок 16 - 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 (таблицы 8 и 9, рисунки 17 и 18). При этом степень влияния одного и того же легирующего элемента Me2 на структурные параметры и физико-механические свойства для различных трехэлементных покрытий примерно одинакова.

Табоица 8 - Влияние состава многоэлементных покрытий на структурные параметры и физико-механические свойства [4]

№	Покрытие	a, нм	β_{111}, град		H_μ, ГПа		$\sigma_{ост}$, МПа		K_o	
			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

Окончание табл. 2.8

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

Табл.9. Влияние состава многоэлементных покрытий на физико-механические свойства [4]

№ п/п	Покрытие	E, ГПа	НМ, ГПа	$\sigma_т$, ГПа	$K_{1СП}$, МПа·м^{½}
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 β_{111}, что свидетельствует о микродеформации кристаллической решетки. Наибольшее повышение величины β_{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.

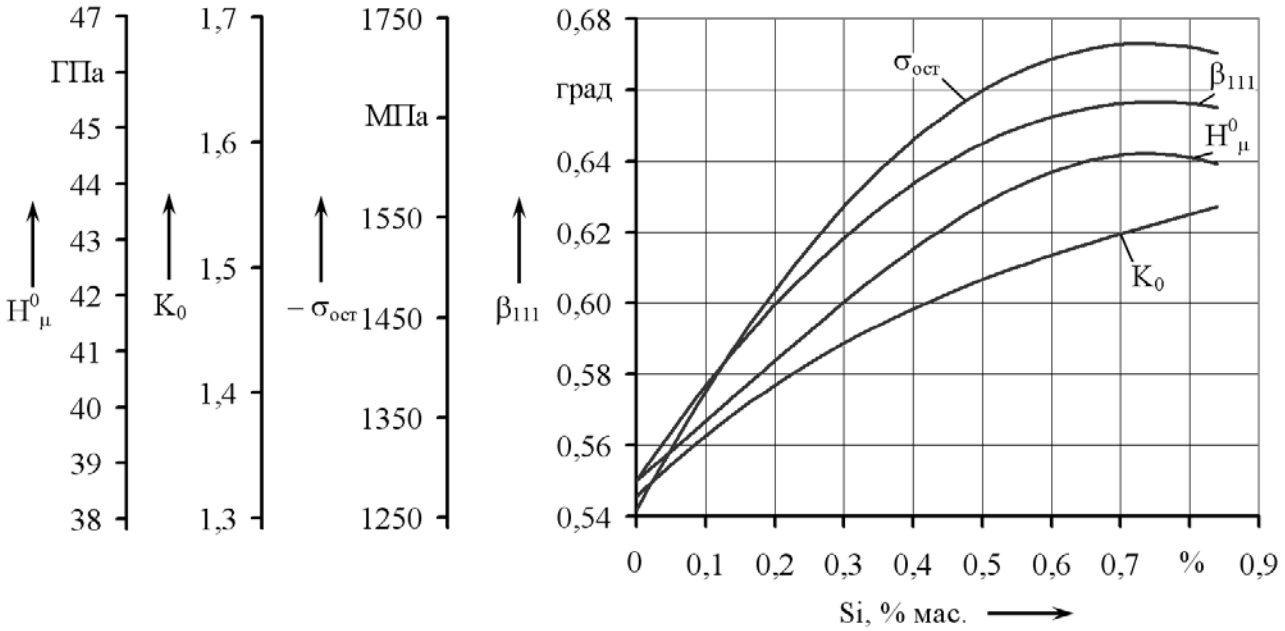


Рисунок 17 - Влияние содержания второго легирующего элемента (Si) на полуширину рентгеновской линии β_{111}, остаточные сжимающие напряжения $\sigma_{ост}$, микротвердость H^0_μ и коэффициент отслоения K_0 покрытия TiZrSiN [4]

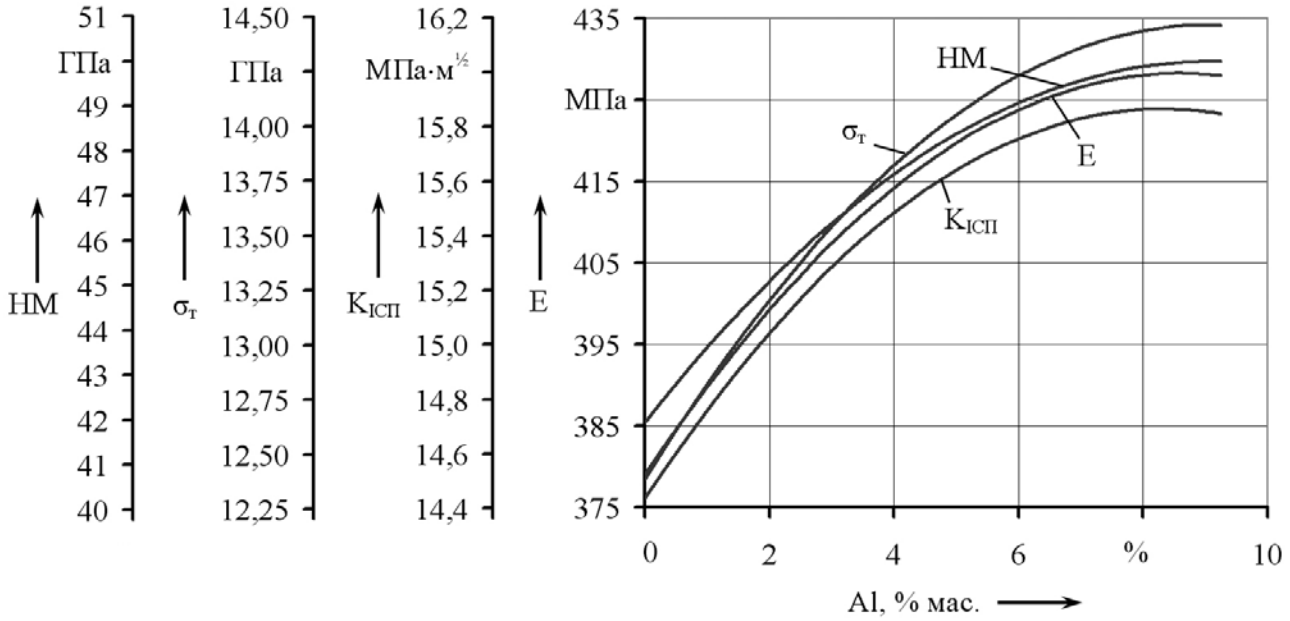


Рисунок 18 - Влияние содержания второго легирующего элемента (Al) на модуль Юнга E, твердость по Мейеру НМ, предел текучести $\sigma_т$ и вязкость разрушения $K_{1СП}$ покрытия TiZrAlN [4]

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 НМ, что наряду с изменением модуля Юнга E вызывает повышение предела текучести $\sigma_т$. Наибольший рост предела текучести наблюдается при легировании покрытий цирконием, кремнием, алюминием и хромом.

Увеличение модуля Юнга E и предела текучести $\sigma_т$ приводит к изменению вязкости разрушения $K_{1СП}$ трехэлементных покрытий. Введение в состав покрытия TiAlN железа, хрома и молибдена несколько уменьшает величину $K_{1СП}$, а циркония и кремния, наоборот, повышает. Для покрытия TiZrN дополнительное легирование кремнием и алюминием вызывает рост вязкости разрушения $K_{1СП}$, хромом и молибденом практически ее не изменяет, а железом – несколько снижает. Легирование покрытия TiSiN железом также ведет к некоторому снижению величины $K_{1СП}$, 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 (таблица 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.

Таблица **10 -Характеристики напряженного состояния многоэлементных покрытий, нанесенных на пластины МК8 [4]**

№	Покрытие	σ_1, МПа	$\sigma_{ост}$, МПа	σ_T, МПа	σ_0, МПа
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 σ_1, σ_0 и σ_T отражается на суммарных напряжениях σ_Σ, действующих в покрытии. При этом степень влияния легирующих элементов на величину σ_Σ 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 σ_Σ также являются сжимающими, но величина их существенно меньше по сравнению с покрытиями, нанесенными на твердосплавную основу. Исключением является

покрытия (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 σ_{Σ} оказывают алюминий и цирконий, меньшее – молибден и хром.

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 (рисунок 19 и таблица 11), что свидетельствует о повышении их трещиностойкости и объясняется более высокими физико-механическими свойствами и лучшим напряженным состоянием в процессе резания.

Как видно из таблицы 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 Me2 в покрытии, обеспечивающему максимальное повышение времени циклической трещиностойкости $t_ц$, соответствует минимальная интенсивность износа J режущего инструмента (рисунок 19).

Таблица .11 - Влияние состава многоэлементных покрытий на время циклической трещиностойкости покрытий и интенсивность износа режущего инструмента [4]

№ п/п	Покрытие	МК8			Р6М5К5		
		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

Окончание табл. 2.11

1	2	3	4	5	6	7	8
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 Р6М5К5 – V = 55 м/мин; S = 0,3 мм/об; t = 0,75 мм

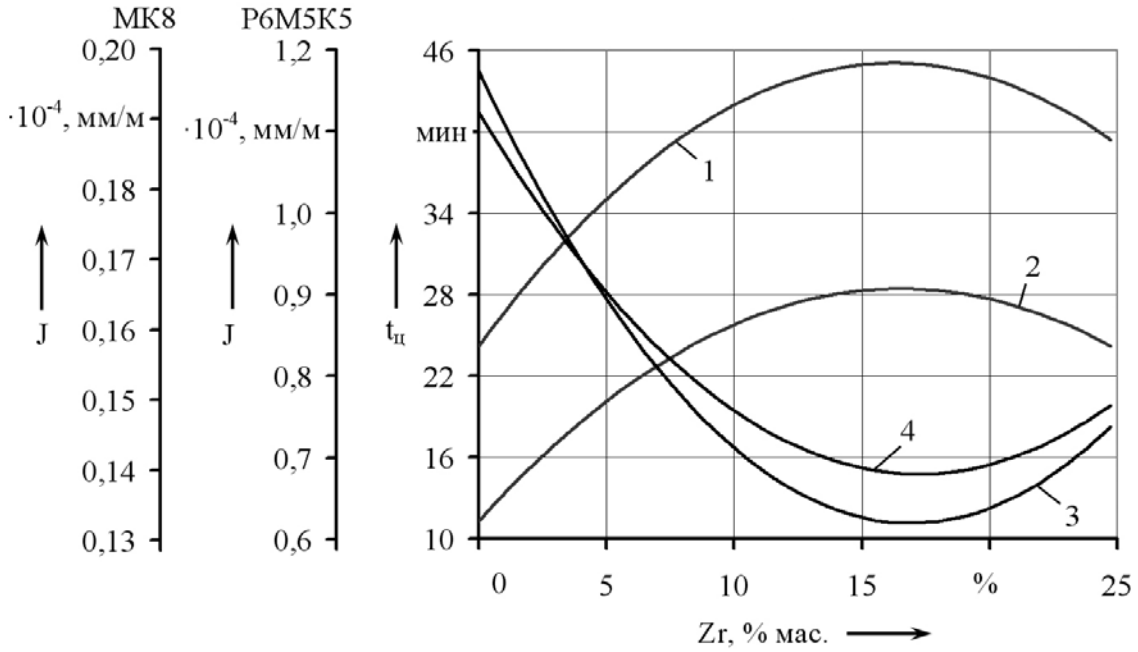


Рисунок 19. Влияние содержания второго легирующего элемента (Al) на циклическую трещиностойкость $t_ц$ (1, 2) покрытия TiSiAlN и интенсивность износа J режущего инструмента из твердого сплава МК8 (3) и быстрорежущей стали Р6М5К5 (4) при обработке заготовок из стали 30ХГСА [4]:
1, 3 – МК8, 2, 4 – Р6М5К5

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].

5.1. 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.

5.2. Исследовательская работа «Исследование влияния состава трехэлементных покрытий на параметры структуры, механические свойства, циклическую трещиностойкость и интенсивность изнашивания режущего инструмента». Работа выполняется на персональном компьютере 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 на 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.

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 . 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. 2.20). 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 β_{111}. В то же время снижаются параметр текстуры J_{111}/J_{200} и величина остаточных напряжений σ_0.

Изменение текстуры, вызванное преимущественно уменьшением интенсивности линии [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

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.

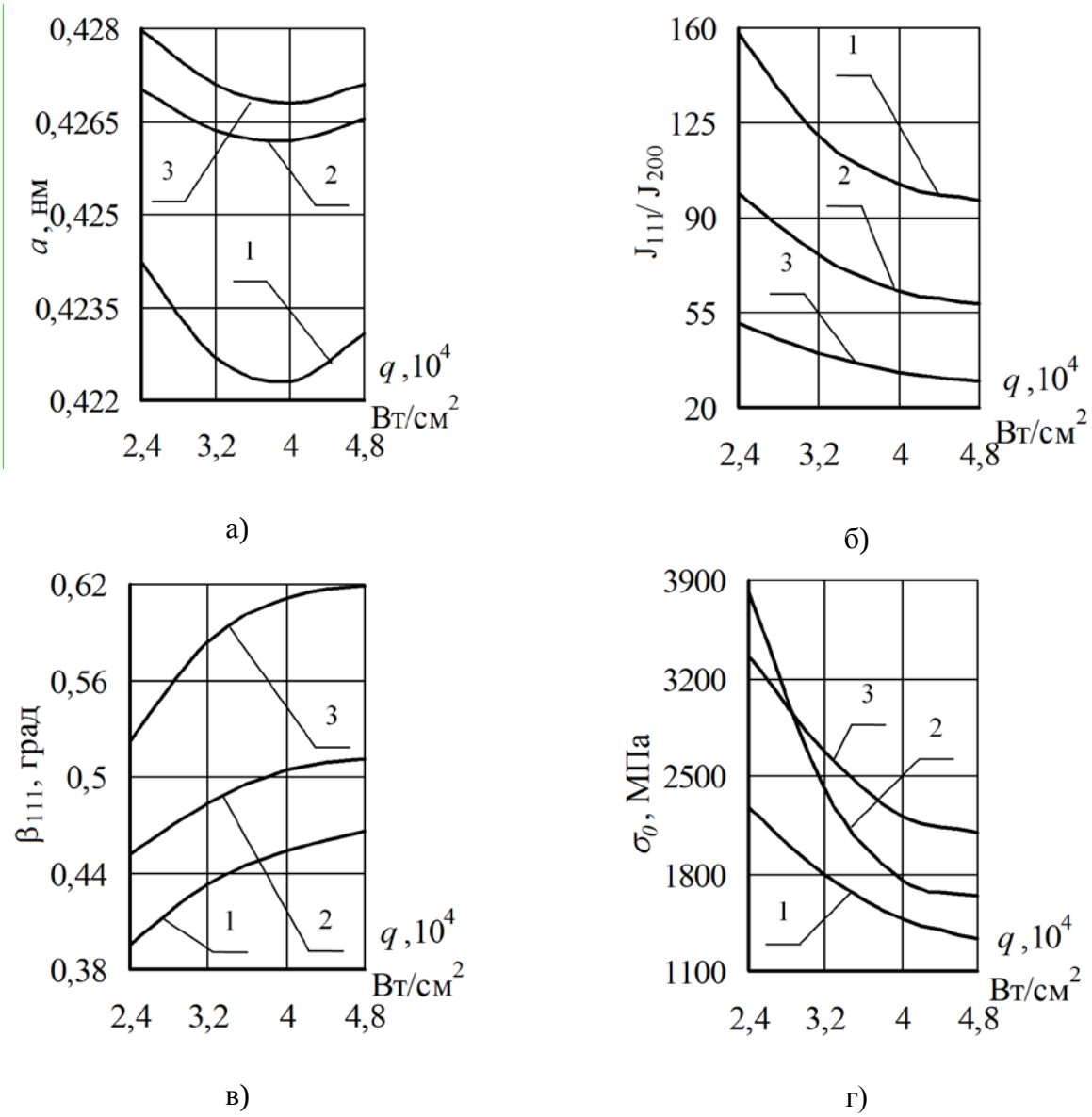
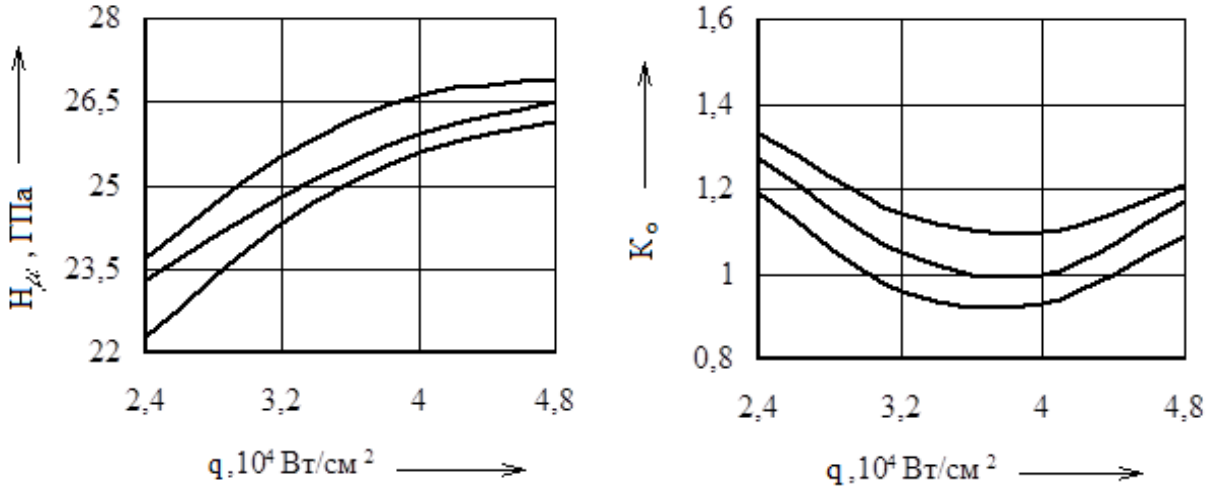


Рисунок 20 - Влияние плотности мощности лазерного излучения
На структурные параметры покрытий:
1 – TiN, *2* – (Ti, Zr)N, *3* – (Ti, Zr)CN;
инструментальная основа – быстрорежущая сталь Р6М5К5

Импульсная лазерная обработка вызывает изменение их физико-механических свойств (рисунок 21). Микротвердость H_μ 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 $К_о$), что объясняется релаксацией макронапряжений на границе раздела «покрытие – инструментальная основа», а затем снижается (рисунок 21, 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.



а) б)

Рисунок 21 - 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 (рисунок 22). Зависимость интенсивности изнашивания от плотности мощности лазерного излучения имеет минимум, координаты которого определяют режимы импульсной лазерной обработки, обеспечивающие минимальную интенсивность изнашивания контактных площадок инструмента.

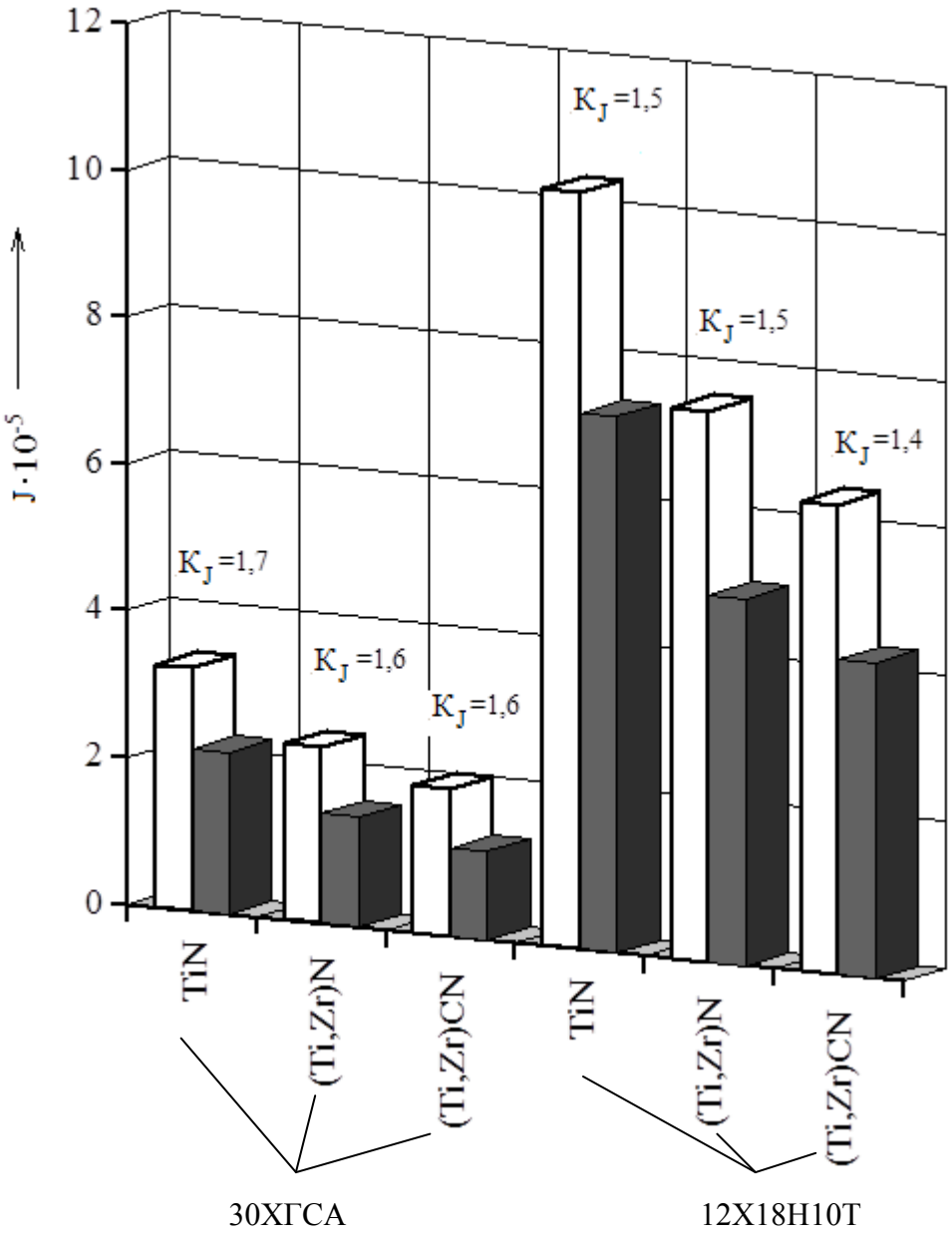


Рисунок 22 - Влияние импульсной лазерной обработки на интенсивность изнашивания твердосплавных пластин МК8:

□ – 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 (рисунок .23).

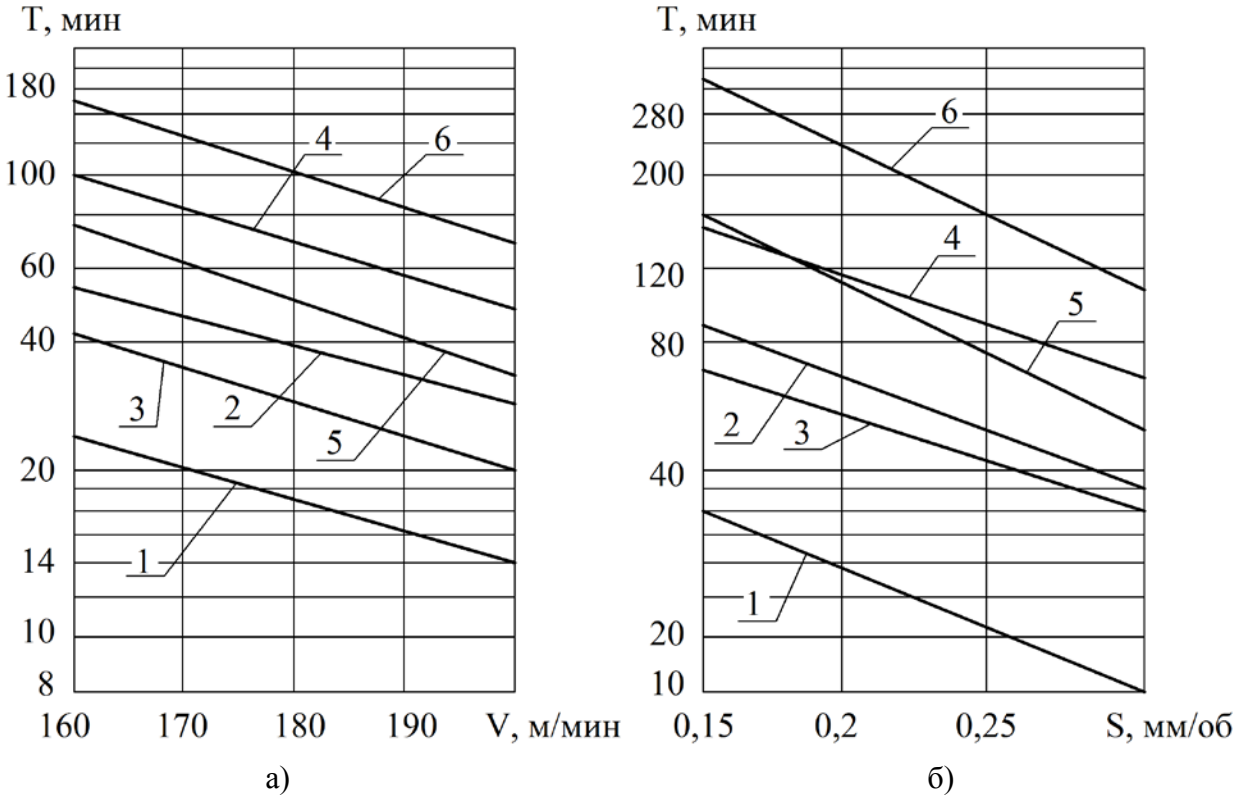


Рис.унок 23 - Влияние скорости резанияV (а) и подачи S (б) на период стойкости инструмента из твердого сплава МК8 при точении заготовок из стали 30ХГСА: *а* – S = 0,3 мм/об, t = 0,5 мм; *б* – V =180 м/мин, t = 0,5 мм; *1* – TiN, *2* – TiN+ЛО,
3 – (Ti,Zr)N, *4* – (Ti,Zr)N+ЛО, *5* – (Ti,Zr)CN, *6* – (Ti,Zr)CN+ЛО

6.1. 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.

.*6.2. Исследовательская работа* «Исследование влияния импульсного лазерного излучения на параметры структуры, механические свойства и интенсивность изнашивания режущего инструмента». Работа выполняется на персональном компьютере 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

Основная литература

1.Завистовский С. Э. Обработка материалов и инструмент и учебное пособие / С. Э. Завистовский - Обработка материалов и инструмент, 2025-03-10 - Электрон. дан. (1 файл) - Минск и Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 201е - 44о с.

2.Кожевников Д. В.Режущий инструмент [Электронный ресурс] / Кожевников Д. В., Гречишников В. А., Кирсанов С. В., Григорьев С. Н. к Схиртладзе А.Г. Под. общ. ред. Кирсанова С.В. - 4-е, изд. - Москва и Машиностроение, 2014 - 520 с.

3.Фельдштейн Е. Э.Режущий инструмент. Эксплуатация [Электронный ресурс] / Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А. - Минск и Новое знание, 2012 - 25е с.

4.Табаков В. П. Технологические методы нанесения износостойких покрытий режущего инструмента : учебное пособие / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. –Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 90 с.

Дополнительная литература

1.Бурочкин Ю. П.Расчет параметров сборных режущих инструментов и практикум / Ю. П. Бурочкин .- Расчет параметров сборных режущих инструментов, 2025-02-0е .- Электрон. дан. (1 файл) .- Самара и Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 201о .- 11е с.

2.Григорьев С.Н. Резание материалов. Режущий инструмент в 2 ч. Часть 2 и Учебник для вузов / под общ. ред. Чемборисова Н.А.Электрон. дан.Москва и Юрайт, 202024е с

3.Зубарев Ю. М. Инструменты из сверхтвердых материалов и их применение [Электронный ресурс] и учебное пособие / Зубарев Ю. М., Юрьев В. Г.-Санкт-Петербург и Лань, 201у.-1еу с.

4.Шагун В.И. Режущий инструменти Проектирование. Производство. Эксплуатация и Учеб.пособие для вузов / В.И.Шагун .- Минск НПООО”ПИОН”, 2002 .- 496с.