

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств»

(код и наименование направления подготовки)

Организация машиностроительного производства

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование методов нанесения износостойких покрытий на  
цельные концевые фрезы малого диаметра

Студент

Р.Ю. Дятлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд. техн. наук, доцент Н.Ю. Логинов

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Содержание

	Стр.
Введение.....	3
1 Модернизация конструкции концевых фрез.....	4
2 Экспериментальные исследования методов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент.....	9
3 Анализ химических составов покрытий .....	34
4 Структуры твердых сплавов.....	36
5 Подготовка поверхностей к нанесению износостойких покрытий...	48
6 Измерение сил резания при использовании инструмента с износостойкими покрытиями.....	52
Заключение.....	60
Список используемой литературы.....	61
Приложение А Публикации.....	66

## Введение

Концевые фрезы являются многоцелевым режущим инструментом. Эти инструменты используют для обработки различных бобышек, узких пазов, карманов небольших размеров. На сегодняшний день для увеличения износостойкости режущего инструмента и увеличения его жизненного цикла применяют различные износостойкие покрытия. Причем покрытия наносят на различные виды инструментального материала, будь то инструментальные стали или твердые сплавы.

С экономической точки зрения нанесение износостойких покрытий выгодно, ведь одной из весомых статей затрат при определении себестоимости технологической операции является расход на режущий инструмент. Также нанесение износостойкого покрытия на инструмент увеличивает возможности самого инструмента, в том что открывает возможность увеличения режимов обработки, а это приводит к повышению производительности операций и снижению машинного и операционного времени.

Еще одним преимуществом использования инструмента с износостойким покрытием является то, что таким инструментом можно обрабатывать с малым расходом смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или вообще ее не использовать. Это тоже отражается на себестоимости операции, а также делает технологические операции более экологичными. Ведь испарение СОЖ сильно загрязняет рабочее место оператора станка, особенно, если рабочая зона станка не герметизирована.

Целью работы является выбор оптимального метода нанесения износостойких покрытий на цельные концевые фрезы малого диаметра.

## 1 Модернизация конструкции концевых фрез

Применение цельных твердосплавных фрез изначально было внедрено на фрезерных станках с ЧПУ при обработке изделий из высокопрочных материалов. Этот инструмент является относительно дорогим в связи с трудностью его изготовления, и в частности, с необходимостью вышлифовки стружечных канавок. Однако с течением времени все же этот инструмент пришел во все сферы авиа-, автомобиле- и судостроения, а также в нефтегазовую отрасль в связи с его высокими стойкостными характеристиками. Это привело к росту затрат на инструмент.

В отличие от инструмента из инструментальных сталей твердосплавные фрезы из-за увеличенных режимов обработки характеризуется несколько другим характером износа. Например, такой инструмент стал чаще ломаться в месте закрепления его в цанговый патрон (рисунок 1).



Рисунок 1 – Примеры поломки цельного режущего инструмента из твердых сплавов:

*а* – при обработке деталей из коррозионно-стойких сталей; *б* - при обработке деталей из алюминиевых сплавов

Данный факт привел к необходимости модернизации элементов твердосплавных фрез. Для этого провели анализ возникновения отказов фрез, представленный на рисунке 2.



Рисунок 2 – Анализ причин отказов цельных твердосплавных фрез

«Совершенствование конструкции осуществляется, например, несколькими ведущими в мире зарубежными инструментальными фирмами (Iskar, Walter, Mitsubishi, Sandvic Coromant). Ими выпускаются сборные твердосплавные концевые фрезы, у которых хвостовик и режущая часть сочленены между собой с помощью стального переходника и выполнены из разных твердосплавных материалов, а именно хвостовик выполнен из твердого сплава, модуль упругости которого соответствует максимальному сопротивлению материала усталостному разрушению на изгиб и кручение (рисунок 3). Это снижает вероятность усталостного разрушения хвостовика. Сборная конструкция такой фрезы обеспечивает возможность замены ее изнашивающейся твердосплавной режущей части. Для этого резьбовое соединение твердосплавной режущей части выполнено с переходником из конструкционной стали (трапецеидальная коническая резьба на выступе режущей части и ответная резьбовая поверхность в отверстии переходника). Соединение переходника с хвостовиком паяное. Необходимость в переходнике связана с тем, что вышлифовать резьбовую поверхность в стальном переходнике проще, чем в твердосплавном хвостовике. Такая

конструкция фрезы хороша при высокой культуре выполнения фрезерных работ, когда при достижении допустимого износа режущих кромок фрезы смена режущей части будет проведена обязательно. Ограничением в ее применении является неоправданно высокая цена таких фрез (до двух раз дороже монолитной фрезы)». [15]



Рисунок 3 – Конструкция сборной твердосплавной концевой фрезы производства фирмы Sandik Coromant со сменной рабочей частью

Еще одним вариантом исключения поломок инструмента в месте крепления в цанговый патрон является сварная конструкция фрезы, которая состоит из твердосплавной режущей части, к которой методом сварки трением приваривается стальной хвостовик.

«Совершенствование компьютерной техники открыло широкие возможности для имитационного моделирования рабочих процессов

механической обработки методом конечных элементов. Есть основания считать, что программное обеспечение SolidWorks позволяет решить стоящую задачу. Вполне очевидно, что составные фрезы по жесткости проигрывают монолитным. Проигрывают тем больше, чем больше длина хвостовика. Но не следует оценивать проигрыш в точности изготовления изделий по прогибу фрезы на длине ее консольной части, поскольку не отклонение оси (цилиндра) фрезы определяет погрешность изготовления детали, а отклонение  $\Delta$  обработанной поверхности детали, которое тем меньше, чем меньше протяженность этой поверхности (рисунок 4). С помощью компьютерного моделирования исследованы возможности применения различных материалов для изготовления хвостовика составной фрезы, в частности конструкционных сталей и инструментальных материалов. В ходе моделирования определяли напряжения в материале фрезы, по ним находили деформации корпуса фрезы, по деформациям вычисляли отклонение обработанной поверхности детали  $\Delta$ . Пример результатов таких расчетов приведен на рисунке 4. Анализ полученных результатов позволил создать несколько конкурентоспособных конструкций составных фрез, позволяющих сократить на 30...70 % инструментальные расходы без ущерба для точности и производительности обработки». [15]

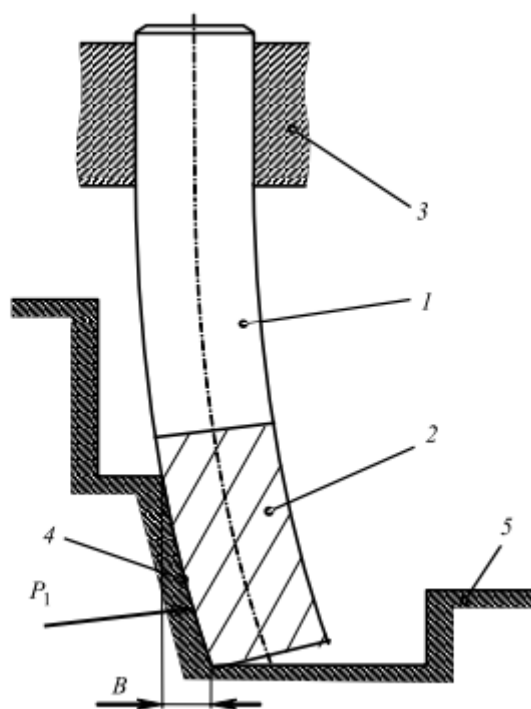


Рисунок 4 – Схема появления отклонения от вертикальности стенки обрабатываемого паза  $B$  под воздействием радиальной составляющей  $P_1$  силы резания

В заключении авторами [15] делается вывод о том, что необходимо исследовать конструкцию цельных твердосплавных фрез. Варьированием длин режущей и хвостовой части возможно нахождение наиболее выгодного соотношения. Также описывается о выгоде применения составной конструкции фрез, так как это экономит дорогой твердый сплав, таким образом, инструмент становится дешевле.



## **2 Экспериментальные исследования методов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент**

На сегодняшний день существует множество методов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент. Эти методы можно разделить на две группы:

- 1) методы химико-термического осаждения из газовой фазы (англ. Chemical Vapor Deposition) с сокращенной аббревиатурой CVD;
- 2) методы физического осаждения покрытия в вакууме (англ. Physical Vapor Deposition) с сокращенной аббревиатурой PVD.

Технологиями CVD создаются различные по химическому составу износостойкие слои покрытия толщиной до сотен микрометров.

Выбор метода и оборудования для CVD происходит в несколько этапов. На первом этапе определяются функциональные свойства, которыми должно обладать покрытие [1, 29, 30]. На втором этапе формулируются свойства верхнего слоя покрытия, где формулируются ограничения состава и его возможным примесям и так далее. На третьем этапе выбирают технологию нанесения данного покрытия, схему процесса, а также технологическое оборудование для нанесения.

Недостатком химического осаждения является то, что наибольшее налипание слоя покрытия происходит на заостренных участках инструмента, одним из которых является режущая кромка, что приводит к ее скруглению и затуплению.

Процессы, протекающие при CVD идут при значительных температурах (1000 °C и выше), что значительно снижает перечень материалов, на которые возможно нанести покрытия этими методами.

Методы PVD отличаются от методов химического осаждения более низкими температурами реализации (не более 600 °С), что позволяет их использовать не только для нанесения покрытий на тугоплавкие материалы, которыми являются, например, твердые сплавы, но и на инструментальные стали и даже на конструкционные материалы. Методы PVD характеризуются равномерностью нанесения покрытий по всей площади изделий, что делает их более привлекательными для упрочнения режущего инструмента с острой режущей кромкой. Также эти методы характеризуются более тонкой толщиной формируемого покрытия, что приводит к его более быстрому разрушению.

Основой нанесения покрытий методами PVD заключается в том, что создается испарение или распыление вещества в вакуумной камере, где находится покрываемое изделие. Далее в камеру подается реакционный газ. В результате реакции распыленного вещества и газа на поверхность изделия конденсируется получаемое покрытие.

Из методов PVD наибольшее распространение получили конденсация ионной бомбардировкой (КИБ), ионное плакирование и магнетронное распыление.

Методы PVD более выгодны для нанесения покрытий на режущий инструмент в отличие от методов CVD ввиду более эффективного управления процессами нанесения и, соответственно, управлением свойствами формируемых покрытий. [11]

Авторами [9] описано проведение трибологических испытаний образцов с многослойными покрытиями  $AlN/TiN$ ,  $TiN/CrN$ ,  $AlN/CrN$ , нанесенными на инструмент из быстрорежущей стали P6M5. Покрытие наносилось методом физического осаждения из паровой фазы (PVD).

Толщина покрытий, включая адгезионный слой, составляла 3...3,5 мкм. В таблице 1 представлены сравнительные результаты индентирования испытанных покрытий.

Таблица 1 - Сравнительные результаты индентирования испытанных покрытий

Покрытие	Скретч-тест, нагрузка, Н		Твердость по шкале Викерса, HV	Модуль упругости Е, ГПа	Твердость Н, ГПа	Толщина покрытий h, мкм
	Lc1	Lc2				
<i>TiN/CrN</i>	12,5/14,17	12,34/14,09	3315/3265	411/406	35/34	3...3,5
<i>AlN/TiN</i>	10,66/7,82	8,42/4,29	3220/3245	388/371	34/34	
<i>AlN/TiN</i>	8,64/7,82	6,05/4,00	3950/2700	355/346	31/28	
<i>TiN</i>	-	-	2800	350	28	-

«Стойкость покрытий к отслоению выбиралась по точкам Lc1 и Lc2, где происходило полное разрушение, либо наблюдались множественные очаги разрушения. Покрытие *TiN/CrN*, нанесенное на сталь 40X, имело самое высокое значение адгезионной прочности. По сравнению с другими покрытиями, критическая нагрузка в точке Lc1 составила 14,09 Н, а в точке Lc2 14,17 Н. То же покрытие, нанесенное на подложку из стали Р6М5, имеет адгезионную прочность 12,34 Н и 12,57 Н соответственно, что на 10 % меньше чем для стали 40X. Измерения критических нагрузок адгезионной прочности для покрытий *AlN/CrN* и *AlN/TiN* на подложках из разных материалов показали обратную тенденцию, а точнее критические нагрузки в точках Lc1 - Lc2 выше для быстрорежущей стали Р6М5 и ниже для стали 40X. Однако критические нагрузки для покрытия *TiN/CrN* значительно превышают аналогичные показатели для покрытий *AlN/CrN* и *AlN/TiN*, а, следовательно, покрытие *TiN/CrN* является более стойким к отслоению и сколам». [9]

«При испытании покрытий на трибометре учитывались максимальный и средний коэффициенты трения. Максимальные значения коэффициента трения на этапе притирки при испытании образцов с покрытиями составили, для  $AlN/TiN$  — 0,74, а для  $AlN/CrN$  и  $TiN/CrN$  — 0,65. После этапа притирки покрытия наблюдался стационарный режим, для которого значения коэффициента трения составили: для покрытия  $AlN/CrN$  - 0,59, для покрытия  $AlN/TiN$  - 0,64, для покрытия  $TiN/CrN$  - 0,70 и для образца без покрытия - 0,81». [9]

«Проведены экспериментальные исследования твердости, модуля упругости, коэффициента трения многослойных наноразмерных покрытий  $TiN/CrN$ ,  $AlN/CrN$  и  $AlN/TiN$ . Сравнение полученных характеристик многослойных покрытий с традиционным ( $TiN$ ) показало увеличение твердости на 2...25 %, при этом твердость многослойных наноструктурных покрытий оказалась в 3,5...6,3 раза выше твердости термообработанных сталей 40X и P6M5. Коэффициент трения покрытий составил 0,59...0,7, что на 10...25 % ниже коэффициента трения материала испытываемых образцов без покрытия. Результаты измерений позволяют рекомендовать покрытия к использованию в упрочнении инструментов и оснастки для холодной листовой штамповки, режущего инструмента, в парах трения, а так же прочих узлов и механизмов, где требуется снижение износа рабочих поверхностей». [9]

В работе [27] проводились экспериментальные исследования покрытий  $TiN$ ,  $TiCrN$ ,  $TiCrAlN$ ,  $TiCrZrN$ , нанесенные на резбонарезные пластины H13A фирмы Sandvik Coromant. Инструмент проходил испытания при точении заготовок из стали 30XГСА при скорости резания  $V = 80$  и  $120$  м/мин.

Интенсивность износа инструмента определяли по формуле:

$$J = \frac{h_3}{L} \times 10^{-4},$$

где  $h_3$  – величина фаски износа инструмента по задней поверхности, мм;

$L$  – длина пути резания, мм.

Результаты исследований представлены на рисунке 5.

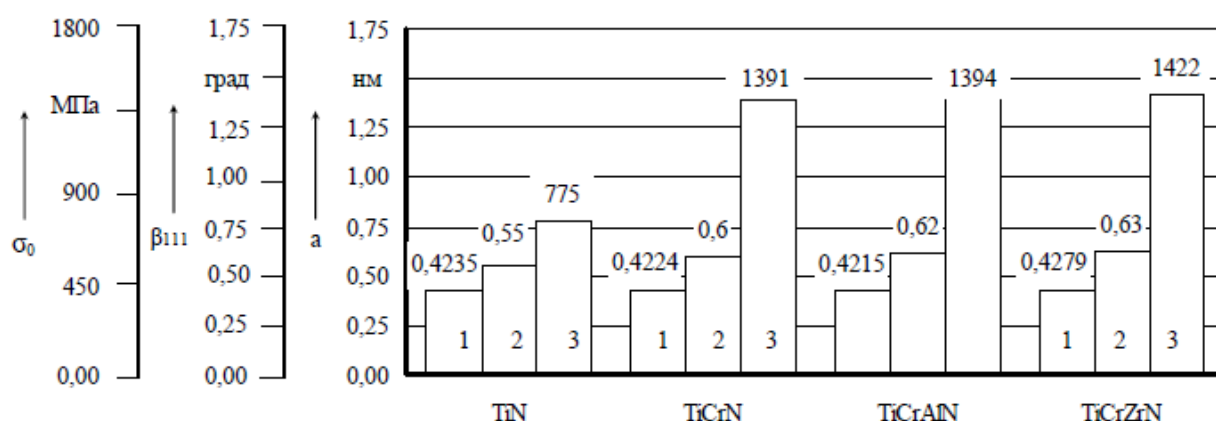


Рисунок 5 - Влияние состава покрытия на параметры структуры:

1 – период кристаллической решетки  $a$ ; 2 – полуширина рентгеновской линии  $\beta_{111}$ ; 3 – остаточные напряжения  $\sigma_0$ .

Из рисунка 5 видно, что многоэлементные покрытия, такие как  $TiCrN$ ,  $TiCrAlN$ ,  $TiCrZrN$  имеют более высокие значения остаточных сжимающих напряжений по сравнению с  $TiN$ . Это способствует более крепким связям среди звеньями и высокой стойкости покрытий с появлению трещин.

В свою очередь авторы [27] отмечают, что многоэлементные покрытия  $TiCrN$ ,  $TiCrAlN$ ,  $TiCrZrN$  имеют большую микротвердость в отличие от  $TiN$ , а покрытие  $TiN$  обладает большим коэффициентом

сцепляемости с основной, что способствует меньшему уровню отслоения покрытия от основы.

Также отмечается, что многоэлементные покрытия имеют увеличенный критический коэффициент интенсивности напряжений и больший модуль Юнга, что способствует увеличению сопротивляемости покрытия хрупкому разрушению и повышению энергии связей между атомами соответственно. [27]

В работе [27] были исследованы и контактные характеристики процесса резания. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние составов покрытий на их механические свойства

Покрытие	Модуль Юнга E, ГПа	Коэффициент интенсивности напряжений $K_{IC}$	Коэффициент отслоения $K_0$	Микротвердость $H_\mu$ , ГПа
<i>TiCrZrN</i>	354	4,10	1,25	36,5
<i>TiCrAlN</i>	348	4,05	1,25	34,5
<i>TiCrN</i>	334	3,80	1,2	33,1
<i>TiN</i>	287	3,70	1,1	26,4

Самые большие усилия резания наблюдались у инструмента без покрытия. Нанесение покрытия *TiN* способствует снижению сил резания на 6...8%. При переходе от одноэлементного покрытия к многоэлементным наблюдался рост составляющих сил резания на 2...5%.

Влияние состава покрытия на степень износа режущего инструмента представлено на рисунке 6.

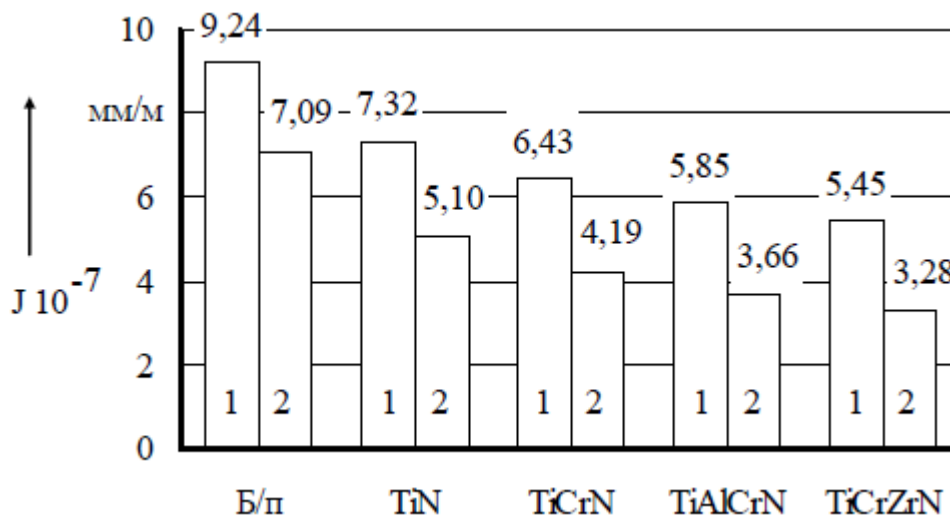


Рисунок 6 – Влияние химического состава покрытий на интенсивность износа инструмента  $J$

Инструмент с покрытием в отличие от инструмента без покрытия имеет меньшую интенсивность износа в 1,4...2,2 раза, причем при увеличении скорости резания этот эффект увеличивается. Наилучшие показатели по интенсивности износа выявились у покрытия  $TiCrZrN$ . [27]

Авторами [23] проводились исследования токарных резбовых резцов с твердосплавными пластинами. На пластины наносились следующие покрытия:  $TiN$ ,  $TiCrN$ ,  $TiCrZrN$ . Внимание акцентировалось на величину пластической деформации стружки, т.к. этот фактор зависит от теплового состояния режущего инструмента. Измеряли микротвердость стружки. По этим результатам получены регрессионные законы, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии распределения микротвердости стружки при нарезании резьбы по ширине стружки

Покрытие	Величина достоверности аппроксимации $R^2$	Коэффициенты регрессии $H_\mu = a \times b_c^k$ .	
		$k$	$a$
$TiCrZrN$	0,90	0,17	214
$TiCrN$	0,90	0,19	225
$TiN$	0,86	0,15	259
Без покрытия	0,85	0,12	301

Авторами выявлено, что при работе инструмента с износостойкими покрытиями микротвердость стружки меньше, чем у инструмента без покрытия, что говорит о ее меньшей деформации в связи с меньшей силовой нагрузкой на режущий клин. Причем снижение микротвердости стружки больше возле режущего клина, а меньше на противоположной ее стороне.

Также были в [23] исследованы температурные поля, возникающие при обработке. Наименьшие температуры наблюдались при работе инструмента с покрытием TiN. Но у инструментов с покрытиями *TiCrN*, *TiCrZrN* в отличие от образцов без покрытия снижение температур было все же заметно.

В таблице 4 представлены результаты исследования теплового баланса процесса резбонарезания резцами с различными покрытиями при профильной схеме резания.

Таблица 4 - Результаты исследования теплового баланса процесса резбонарезания резцами с различными покрытиями

Покрытие	Тепловой баланс P, %			Мощность теплового потока $Q \times 10^6$ , Вт
	Заготовка	Инструмент	Стружка	
<i>TiCrZrN</i>	11	23	66	65,74
<i>TiCrN</i>	11	25	64	63,67
<i>TiN</i>	12	26	62	59,62
Без покрытия	13	34	53	69,57

Таким образом, авторами [23] сделан вывод о положительном эффекте нанесения многоэлементных покрытий на режущий инструмент, не смотря на затратность процесса.



Исследователями [26] отмечается, что при переходе от однокомпонентных покрытий к двухкомпонентным износостойкость режущего инструмента повышается в 1,5 – 4 раза. А при переходе от двухкомпонентных к трехкомпонентным покрытиям стойкость повышается в 1,5 – 1,7 раза.

Авторами [16] отмечается, что разрушение покрытия, нанесенного на режущий инструмент характеризуется появлением и ростом сетки из трещин. Поэтому эффективными мероприятиями для увеличения износостойкости инструмента можно сгруппировать так:

1) мероприятия по снижению величины переменных тепловых и силовых нагрузок;

2) мероприятия по снижению адгезионных связей материалов покрытия и обрабатываемого материала (это достигается при кардинальном отличии кристаллохимического строения материала покрытия и обрабатываемого материала; при многослойном покрытии этими свойствами должен обладать самый верхний слой);

3) повышение диффузионных и адгезионных связей между материалами покрытия и основы инструмента (при многослойном покрытии самый нижний слой, прилегающий к основе, выполняют максимально идентичным по кристаллохимическому строению с основной);

4) повышение трещиностойкости и прочности материала покрытия.

Переходные (внутренние слои) многослойного покрытия можно делать из соединений, имеющих повышенную хрупкость, которые не совместимы по кристаллохимическим свойствам с инструментальным материалом, например,  $Si_3N_4$ ,  $HfB_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ . Кроме этого, данные соединения имеют другие важные характеристики для комплексного покрытия, такие как, например, термодинамическая устойчивость или повышенная твердость.

В работе [8] представлены результаты испытаний образцов с нанопокрывтиями, у которых размер зерен менее 100 нм. Исследования

проводились при точении заготовок из стали 45. Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты испытаний инструмента с нанопокрытиями

Пластина + износостойкое покрытие	Износ по передней поверхности, мм	Износ по задней поверхности, мм	Время обработки, мин
Исходный T5K10 без покрытия	0,732	0,150	1
	0,834	0,205	4
	0,935	0,232	7
	-	0,463	10
T5K10 + TiAlN	-	0,117	1
	0,392	0,158	4
	0,406	0,222	7
	0,427	0,309	10
	0,510	0,344	13
	0,634	0,476	16
T5K10 + TiN + TiAlN	0,075	-	1
	0,116	0,289	4
	0,166	0,398	7
	0,124	0,454	10
	0,172	0,475	13
	0,199	0,481	16
	0,228	0,502	19
	0,268	0,516	22
	0,288	0,570	25
	0,640	0,577	28

На рисунке 7 [8] представлена зависимость износа задней поверхности инструмента от времени его работы при точении стали 45.

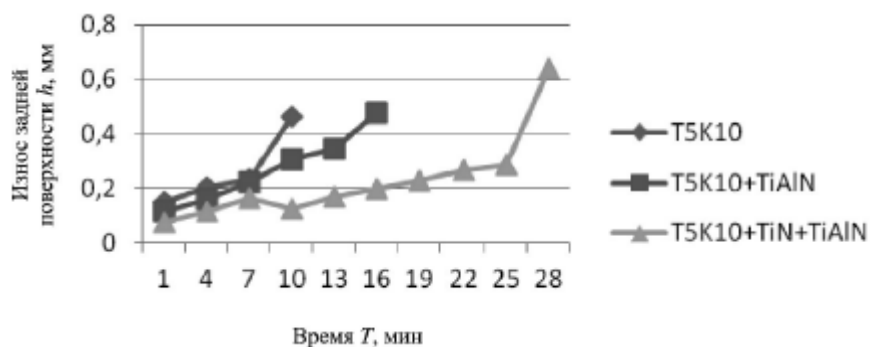


Рисунок 7 - Зависимость износа задней поверхности инструмента от времени его работы при точении стали 45

Из рисунка 7 [8] видно, что быстрее всего подвергался износу инструмент без покрытия, а наибольшую стойкость показал инструмент с покрытием  $TiN + TiAlN$ .

Наибольший эффект по износостойкости инструмента с износостойким покрытием достигается при получистовом и чистовом фрезеровании с умеренными подачами. [8]

Авторами [19] описан способ получения износостойкого покрытия на твердосплавном режущем инструменте. Покрытие наносилось вакуумно-плазменным методом. Пластины из твердого сплава МК8 помещали в вакуумную камеру установки «Булат-6» (рисунок 8).



Рисунок 8 – Установка для вакуумного нанесения покрытий «Булат-6»

В эту же камеру помещали три катода и располагали их в одной плоскости в горизонтальном положении. В камере создают давление  $6,65 \times 10^{-3}$  Па. На изделие подают отрицательное напряжение равное 1,1 кВ.

Сначала при токе дуги на катоде 100 А в камере проводят ионную очистку и разогревают пластины до температуры 560...580 °С. После этого в камеру подают реакционный газ азот при отрицательном напряжении 160 В. Таким образом, с помощью трех катодов формируют на изделии износостойкое покрытие.

Далее [19] проводились испытания пластин с покрытиями, нанесенными согласно описанному способу. Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты испытания режущих пластин с покрытиями

Материал покрытия	Химический состав покрытия (соотношение металлических компонентов), %					Микро-твердость, ГПа	Стойкость, мин
	<i>Ti</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>Nb</i>	<i>Mo</i>		
<i>TiSiAlNbMoN</i>	63,56	0,94	10,11	21,47	3,92	46,7	81
<i>TiSiAlN</i>	82,75	1,25	16,0	-	-	43,1	64
<i>TiSiN</i>	98,75	1,25	-	-	-	36,5	34

Из таблицы 6 видно, что стойкость многокомпонентного покрытия, нанесенного описанным способом, выше, чем у остальных образцов.

В источнике [20] проводились аналогичные испытания пластин с покрытиями. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты испытания режущих пластин с покрытиями

Материал покрытия	Химический состав покрытия (соотношение металлических компонентов), %					Микро-твердость, ГПа	Стойкость, мин
	<i>Ti</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>Nb</i>	<i>Fe</i>		
<i>TiSiAlNbFeN</i>	60,53	0,96	10,19	26,94	1,38	46,3	76
<i>TiSiAlN</i>	82,75	1,25	16,0	-	-	43,1	64
<i>TiSiN</i>	98,75	1,25	-	-	-	36,5	34

Авторами [10] отмечается, что в качестве химических методов осаждения покрытий на режущий инструмент применяются высокотемпературный и среднетемпературный методы химического осаждения (HT-CVD и MT-CVD соответственно), а также метод химического осаждения с плазменным сопровождением (PA-CVD). А в качестве физических методов осаждения применяются методы электронно-лучевого испарения, магнетронного распыления и вакуумно-дугового испарения.

При выборе методов [10] отмечается, что ввиду высокой производительности и малой чувствительности к незначительным отклонениям технологических параметров наибольшее распространение получили методы физического осаждения (PVD).

Технология нанесения покрытий на режущий инструмент условно включает в себя следующие пять стадий [10]:

- 1) загрузка камеры и откачка воздуха (на этой стадии в камеру загружаются пластины и заготовки, а далее в камере создается вакуум);
- 2) очистка пластин (сначала пластины очищаются методом ионного травления в газовом разряде, а далее осуществляется ионная бомбардировка пластин для их нагрева до рабочих температур);
- 3) нанесение покрытия (подается электрический ток, и ионы из газовой фазы осаждаются на поверхности изделий);
- 4) охлаждение камеры, изделий и пластин;
- 5) операции контроля нанесенного покрытия.

Авторами [18] разработано износостойкое покрытие для инструмента, работающего на высоких скоростях. В состав этого покрытия вошли титан (*Ti*), цирконий (*Zr*), гафний (*Hf*), ванадий (*V*), ниобий (*Nb*) и тантал (*Ta*).

Наносят покрытие методом вакуумно-дугового (рисунок 8) или магнетронного распыления (рисунок 9) катода в атмосфере атомарного азота. Разработанное покрытие [18] представляет собой сложный нитрид ( $Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta$ )N. В таблице 8 представлены экспериментальные исследования температурной зависимости трибологических свойств покрытия.

Авторами [18] сделан вывод, что покрытие демонстрирует высокие значения стойкости при повышенных температурах, а с ростом температуры значение коэффициента трения снижается.



Рисунок 9 – Установка для магнетронного напыления

В работе [21] разработан способ комбинированного упрочнения режущего инструмента, который приводит к заточке инструмента. Этот способ состоит из азотирования и осаждения покрытия. На первом этапе

режущий инструмент помещают в камеру, нагревают путем бомбардировки атомами аргона и выдерживают в среде азотной плазмы. Далее с помощью магнетронного распылительного устройства в плазме титана, азота и аргона синтезируют на поверхности заготовки износостойкое покрытие.

Таблица 8 - Исследования температурной зависимости трибологических свойств покрытия

Температурная зависимость трибологических свойств покрытия $(Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N$ от температуры				
Температура испытания, °С	Коэффициент трения, $\mu$		Интенсивность износа, $mm^3/N/m$	
	Начальный	В ходе испытания	Конртело	Покрытие
20	0,683	1,063	$3,84 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-5}$
500	1,15	0,827	$7,36 \times 10^{-6}$	$2,12 \times 10^{-5}$
700	0,725	0,585	$2,47 \times 10^{-6}$	$2,71 \times 10^{-5}$

На рисунке 10 представлена схема установки для реализации способа [21]. Это устройство состоит из вакуумной камеры 1, в которую помещают заготовку для нанесения покрытия (режущий инструмент) 2. Устройство имеет мишень 3 магнетронного ускорительного устройства, а также плоскую сетку 4 на боковой стенке вакуумной камеры. Внутри камеры находится анод 5 и криволинейная сетка 6. Также устройство имеет источник питания разряда 7 и пирометр 8. На схеме обозначены еще плазма 9, слой объемного заряда 10, быстрые нейтральные атомы 11, ионы 12 и молекулы газа 13.

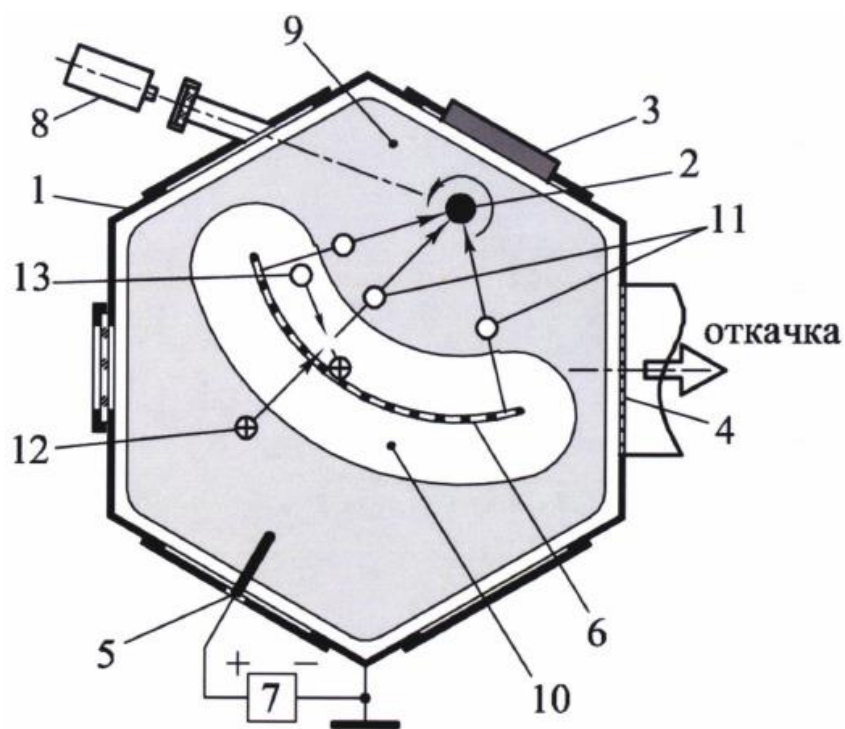


Рисунок 10 – Устройство для нанесения покрытия

«Способ комбинированного упрочнения режущего инструмента 2 заключается в заполнении газовой плазмой 9 рабочей вакуумной камеры 1 с установленным внутри нее режущим инструментом 2, нагреве и выдержке режущего инструмента 2 в азотной плазме 9, и синтез на его поверхности из плазмы износостойкого покрытия, отличающийся тем, что сначала режущий инструмент 2 нагревают и затачивают посредством бомбардировки пучком быстрых атомов аргона 11 в аргоновой плазме 9, затем в рабочую вакуумную камеру 1 подают азот и нагрев и выдержку режущего инструмента 2 проводят в азотной плазме 9 при температуре эффективной термодиффузии азота  $500^{\circ}\text{C}$ , поддерживаемой посредством бомбардировки пучком быстрых молекул азота 11, затем в рабочую вакуумную камеру 1 подают смесь аргона и азота и с помощью магнетронного распылительного устройства в плазме 9 титана, азота и аргона синтезируют на поверхности режущего инструмента 2 износостойкое покрытие из нитрида титана при бомбардировке его в



процессе синтеза импульсными пучками быстрых атомов аргона 11 и быстрых молекул азота 11». [21]

Авторами [6] обозначается, что для инструмента, имеющего прерывистый характер при резании наиболее целесообразно применять для формирования износостойкого покрытия метод осаждения из газовой фазы. Из-за наличия переходной зоны данный метод обеспечивает прочную связь покрытия с основой. Также эффективно нанесение многослойного покрытия  $TiC/TiCN/TiN$ , так как снижается количество трещин, образующихся в покрытии.

Оптимальная толщина покрытия на задней поверхности соответствует примерно 20 мкм [6], так как при большой толщине не происходит снижения интенсивности износа.

Авторами [6] описываются испытания режущего инструмента из твердого сплава ТТ21К9, на который наносили многослойное износостойкое покрытие  $TiC/TiCN/TiN$ . Покрытие наносили разной толщины в 1,5...2 и 5...7 мкм. Испытания показали, что в более тонком покрытии в меньшей степени происходит трещинообразование.

На рисунке 11 представлена схема нанесения покрытий методом осаждения из газовой фазы. [7]

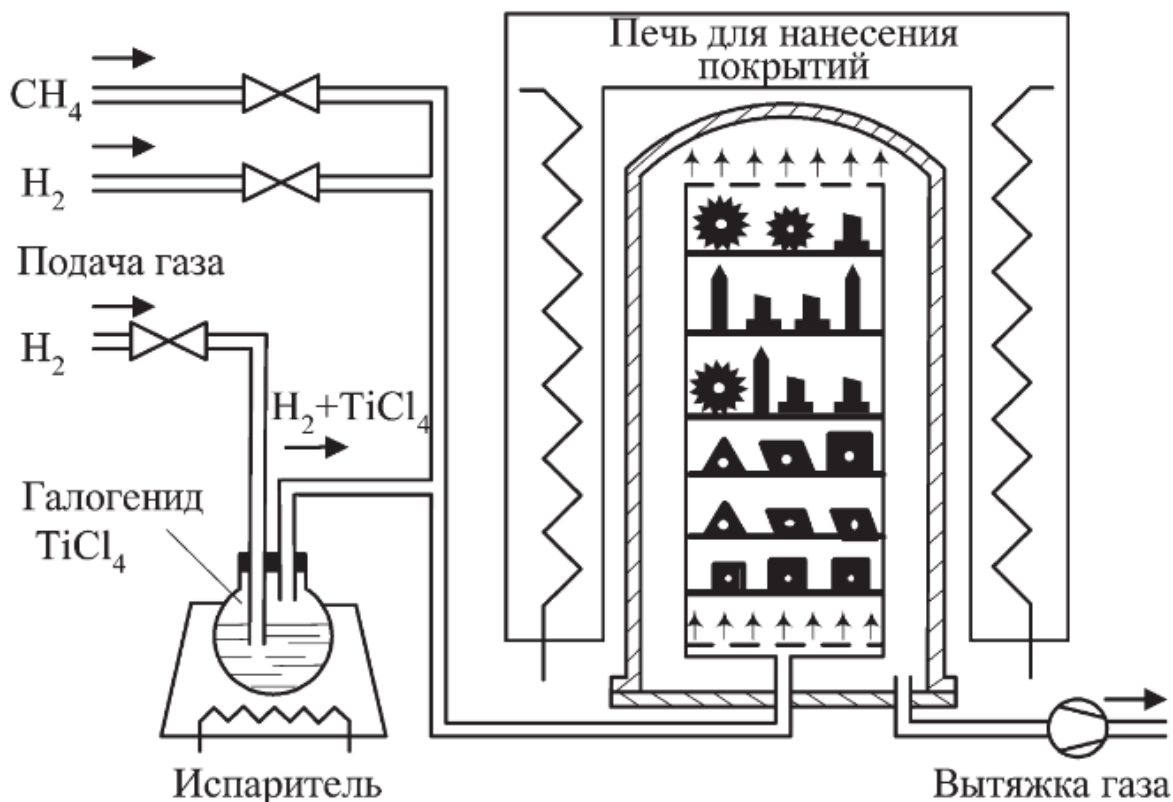


Рисунок 11 - Схема нанесения покрытий методом осаждения из газовой фазы

Для конденсации покрытия высоко- и среднетемпературным методом материал инструмента нагревают до температур от 900 до 1200°C. Диапазон температур исключает применение данного способа нанесения покрытий на инструментальные стали.

На рисунке 12 представлены микрошлифы поверхностного слоя инструмента с различными покрытиями.

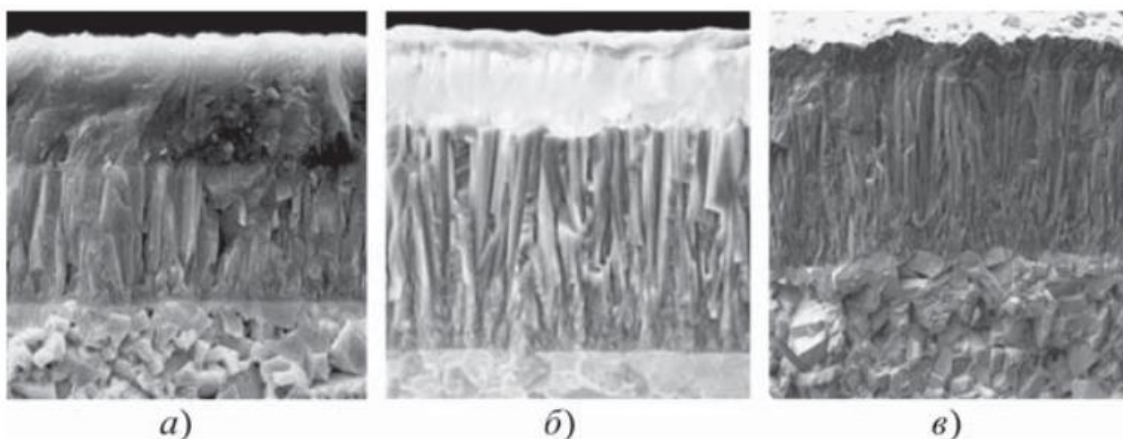


Рисунок 12 - Микрошлифы поверхностного слоя инструмента с различными покрытиями:

*a* – твердый сплав с трехкомпонентным покрытием  $TiN-TiCN-Al_2O_3$ ; *б* – твердый сплав с трехкомпонентным покрытием  $TiCN-Al_2O_3-TiN$ ; *в* - твердый сплав с двухкомпонентным покрытием  $TiCN-TiN$ .

Зачастую в инструментах с покрытием происходит диффузия вольфрама и кобальта из основы в покрытие (формируется так называемая  $\eta$ -фаза). Таким образом, переходный слой, который может достигать толщины в 4 мкм, становится более хрупким. Поэтому приходится переходить на средние температуры нанесения покрытия, которые составляют от 700 до 900°C. В этом случае образование  $\eta$ -фазы почти исключается.

Методами CVD нанесения возможно наносить покрытия как из тугоплавких металлов, так и из их нитридов, оксидов, карбидов и карбонитридов. [7]

Толщина покрытия является неоднозначным показателем. С одной стороны рост толщины приводит к повышению износостойкости площадок контакта. С другой стороны при этом увеличивается количество дефектов в поверхностном слое и снижается сила сцепления покрытия с основой. Поэтому при прерывистом характере резания, в том числе при фрезеровании, на инструмент рекомендуется наносить покрытие толщиной не более 5 мкм.

А, например, на режущих пластинах токарных резцов толщина покрытия может быть до 15 мкм. [7]

Крупный производитель инструмента – шведская фирма «Sandvik Coromant» разработала оригинальную технологию нанесения трехслойного покрытия  $TiCN-Al_2O_3-TiN$ . [7] Эта технология заключается в том, что после нанесения покрытия инструмент подвергается полированию. При полировании полностью убирается внешний слой  $TiN$  и частично удаляется средний слой  $Al_2O_3$ . Удаляемый припуск составляет 2...3 мкм. В результате у покрытия снижаются внутренние растягивающие напряжения, а также снижается количество зародышей трещин. Данный вид покрытий получил название «low stress coating» (LSC).

На рисунке 13 представлены фотографии режущих пластин после обработки.

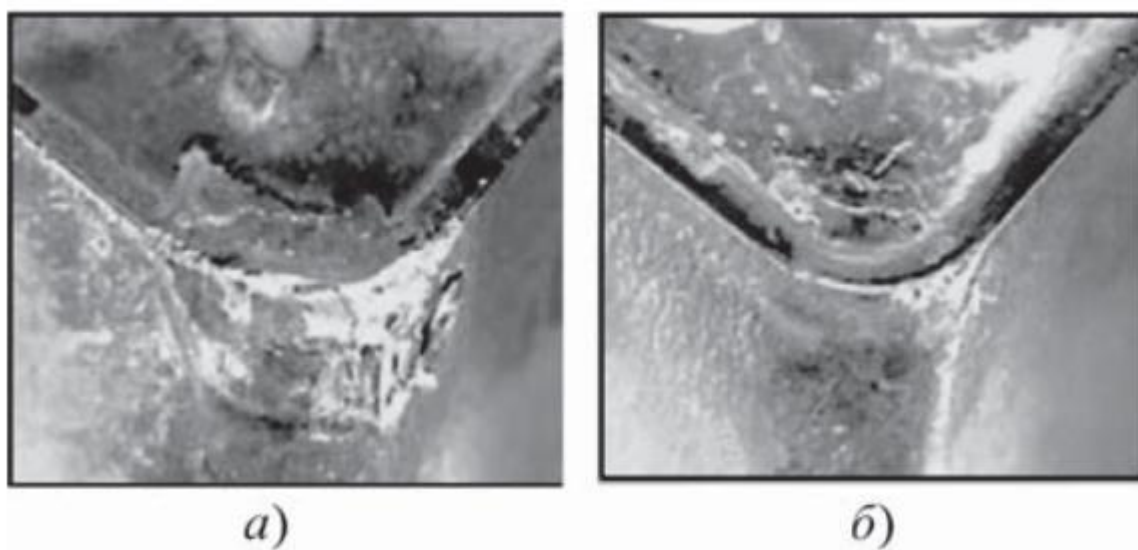


Рисунок 13 - Фотографии режущих пластин с покрытием  $TiCN-Al_2O_3-TiN$  после обработки точением 330 стальных деталей с режимами обработки  $V=300$  м/мин,  $t=3$  мм,  $S=0,4$  мм/об:

*a* – обычное покрытие; *б* – LSC-покрытие

Из рисунка 13 видно, что инструмент с покрытием «low stress coating» имеет меньший износ, следовательно, такая технология нанесения эффективна.

Авторами [2] отмечается, что при работе инструментом с износостойким покрытием уменьшается длина контакта стружки с поверхностями инструмента, снижаются силы резания, уменьшается температура в зоне обработки, а также растет угол схода стружки.

Опыт применения покрытий  $(TiSi)N$ ,  $Al_2O_3$  и  $(TiSiAl)N$  на инструменте из твердого сплава ВК6 при обработке коррозионно-стойкой стали ЭК26 и жаропрочного сплава ЭИ437Б показал, что применение покрытий  $(TiSi)N$ ,  $Al_2O_3$  при обработке стали ЭК26 снижает силу резания на величину до 15%. А при обработке инструмента с любым из перечисленных видов покрытия при обработке сплава ЭИ437Б почти не влияет на величину силы резания.

Результаты исследования температуры в зоне резания при обработке стали ЭК26 представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Результаты исследования температуры в зоне резания при обработке стали ЭК26 при следующих условиях:  $t=1$  мм,  $V=78$  м/мин

Величина подачи, мм/об	Химический состав покрытия	Расчетные величины		Экспериментальные величины	
		$\theta$ , °С	$P_z$ , Н	$\theta$ , °С	$P_z$ , Н
0,2	$(TiSiAl)N$	480	940	460	844
	$(TiSi)N$	440	815	452	794
	без покрытия	525	1010	493	940
0,14	$(TiSiAl)N$	375	880	360	797
	$(TiSi)N$	334	760	350	758
	без покрытия	392	950	380	850
0,07	$(TiSiAl)N$	220	750	185	660
	$(TiSi)N$	198	650	170	620
	без покрытия	230	780	203	701

Имитационным моделированием были исследованы величины остаточных напряжений у образцов из стали ЭК26 после обработки их инструментом с различными покрытиями (рисунок 14).

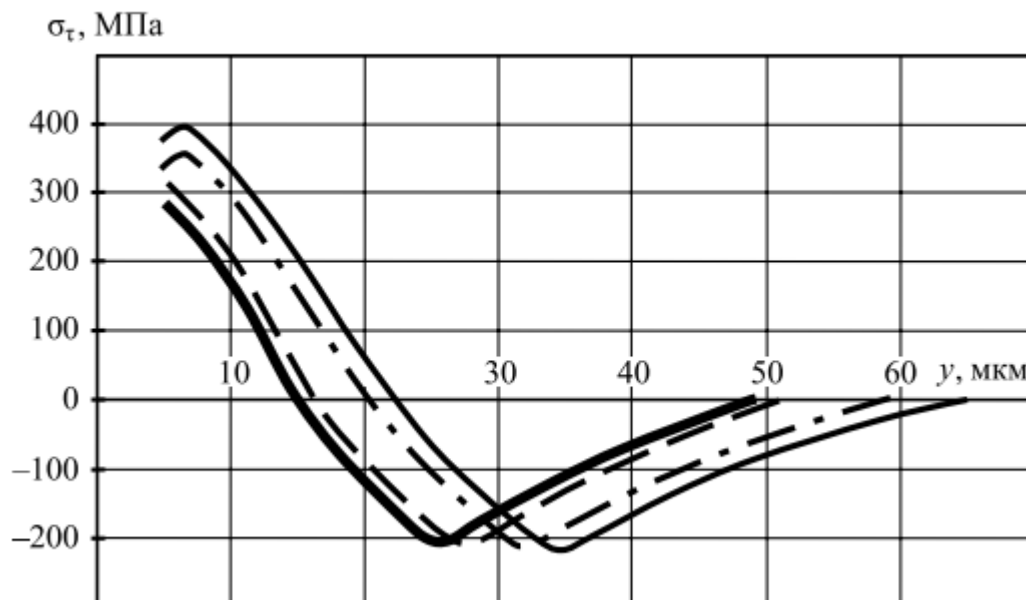


Рисунок 14 – Графики зависимости величин остаточных напряжений у образцов из стали ЭК26 после обработки их инструментом с различными покрытиями:

обычная линия – инструмент без покрытия; штриховая линия – с покрытием  $(TiSi)N$ ; штрих-пунктирная линия - с покрытием  $(TiSiAl)N$ ; утолщенная линия - с покрытием  $Al_2O_3$

Из графика видно, что наибольшие остаточные напряжения в поверхностном слое образца из стали ЭК26 возникают при обработке инструментом без покрытия. Все остальные эксперименты относятся к образцам, обработанным инструментом с покрытием. Это значит, что по данному показателю качества нанесение покрытия на инструмент выгодно. Наилучшим по показателям остаточных напряжений оказался образец, обработанный инструментом с покрытием  $Al_2O_3$ .

«Развитие технологий упрочнения режущего инструмента с использованием методов вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий

традиционно связано с рядом преимуществ от применения инструмента с упрочняющими и износостойкими покрытиями: 1) снижением затрат на инструмент за счет увеличения стойкости режущего инструмента при обработке, особенно сложнопрофильного, отличающегося высокой ценой; 2) снижением срока окупаемости дорогостоящего оборудования за счет интенсификации режимов обработки при использовании инструмента с покрытиями; 3) повышением качества обработки за счет изменения условий резания и характера протекания процессов взаимодействия обрабатываемого материала и инструмента; 4) возможностью механической обработки труднообрабатываемых материалов с повышенной твердостью; 5) реализацией процессов металлообработки без использования смазочно-охлаждающих жидкостей; 6) энергоэффективностью процесса механической обработки». [4]

В работе [4] исследовались 3 вида износостойких покрытий:

1 вид - однослойные покрытия  $TiBN$ ,  $TiCN$ ,  $HfZrN$ ;

2 вид – двухслойные покрытия  $TiCN/MoS_2$ ,  $TiBN/MoS_2$ ,  $HfZrN/MoS_2$ ;

3 вид – 3D компонентные покрытия на основе  $Ti-Al-MoS_2$ .

Первые и вторые виды покрытий наносились магнетронным распылением с использованием различных мишеней, а третий вид покрытий наносили методом распыления единой прессованной мишени в вакууме.

Толщины полученных покрытий первого и второго видов получались не более 2 мкм.

На рисунке 15 представлены графические зависимости силы резания и момента сопротивления резанию по времени.

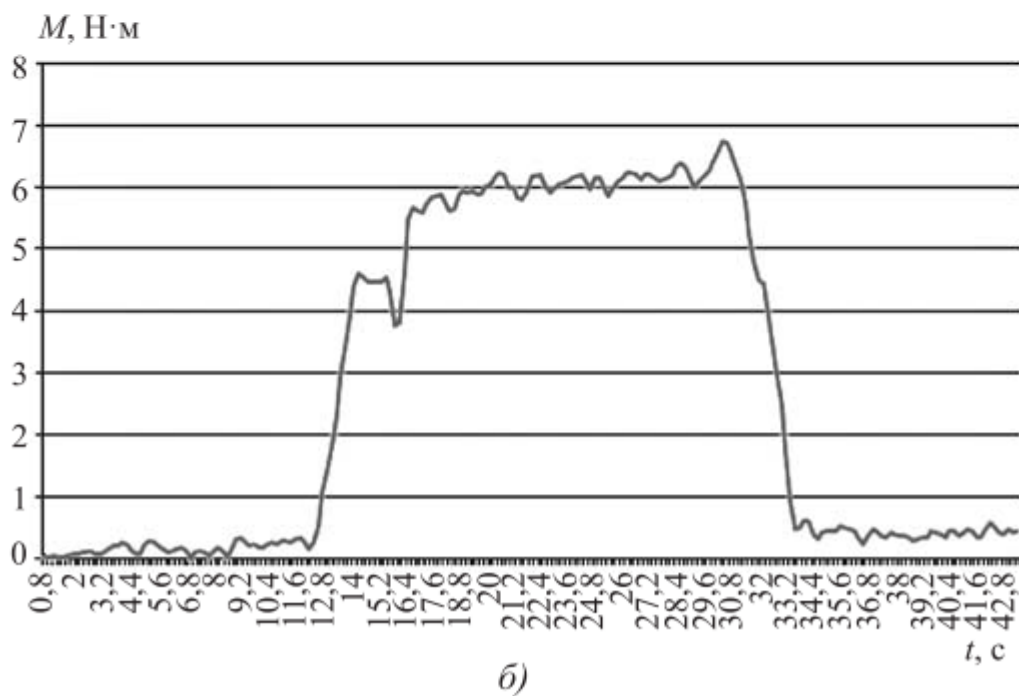
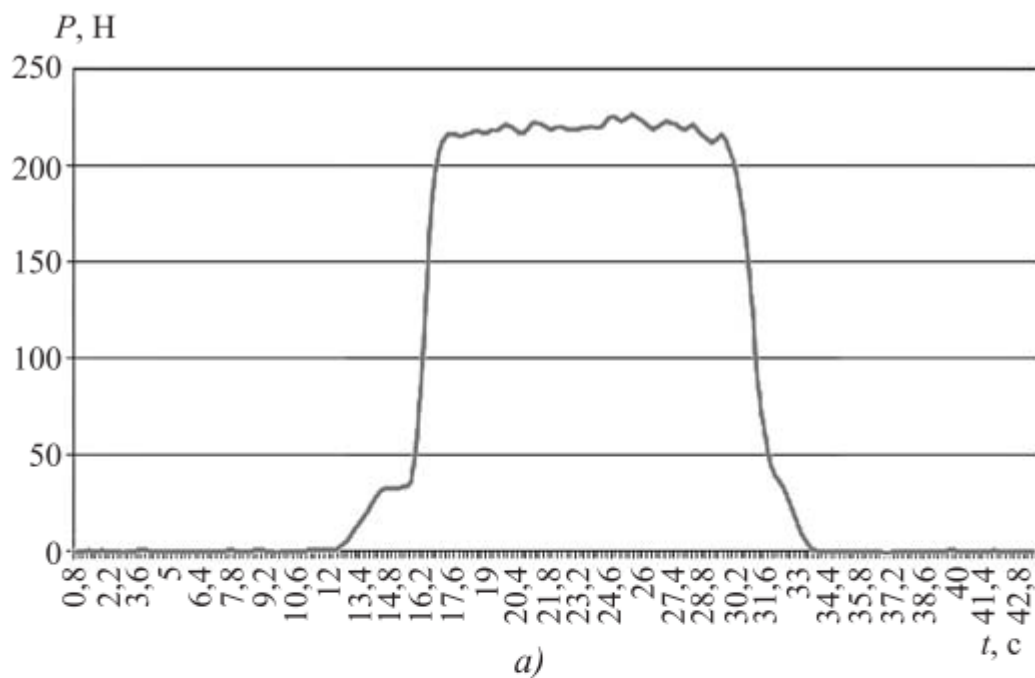


Рисунок 15 - Графики зависимости силы резания (а) и момента сопротивления резанию (б) по времени

На рисунке 16 представлены величины момента сопротивления резанию экспериментальных образцов спиральных сверл.



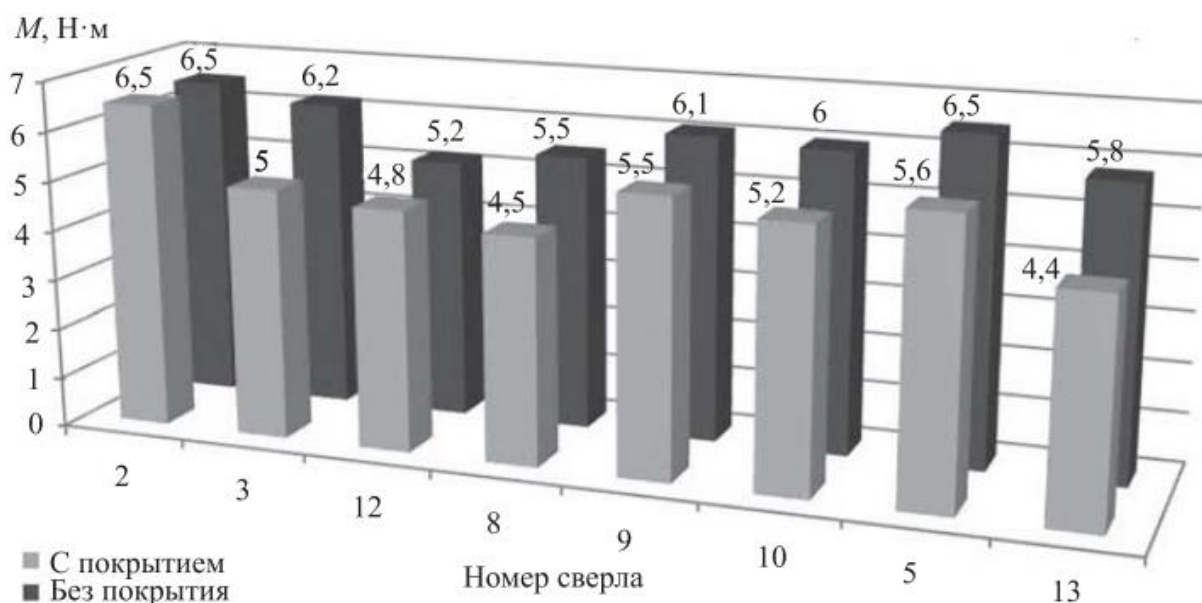


Рисунок 16 - Величины момента сопротивления резанию экспериментальных образцов спиральных сверл

В результате проведенных исследований [4] выполнены выводы о падении энергозатрат на обработку отверстий сверлами на 18...24%; о наилучших результатах величины момента сопротивления резанию образца с составом покрытия  $HfZrN$  (образец №13, рисунок 16) из числа сверл с однослойными покрытиями; о наилучших результатах величины момента сопротивления резанию образца с составом покрытия  $TiBN-MoS_2$  (образец №8, рисунок 16) из числа сверл с двухслойными покрытиями. Результаты измерения величины момента сопротивления резанию образцов с трехслойным покрытием (образец №3, рисунок 16) показали, что данные показатели в целом более высокие, если сравнивать с обозначенными лучшими однослойным и двухслойным покрытием.

### 3 Анализ химических составов покрытий

Автором [14] отмечается, что на сегодняшний день наиболее распространенным покрытием на режущий инструмент является нитрид титана  $TiN$ . Его начали наносить на инструмент еще в 80-х годах. Это покрытие имеет высокую твердость в сочетании с хорошей вязкостью, что придает инструменту высокую износостойкость. Также это покрытие имеет низкий коэффициент трения со сталью и высокую химическую стойкость, имеет низкую окисляемость на воздухе.

Более высокую твердость по сравнению с  $TiN$  имеет карбонитрид титана  $Ti(C,N)$ . Твердость его выше, чем у  $TiN$ . Обязательным условием работы инструмента с такого рода покрытием в связи с его низкой температурной стойкостью является использование СОТС.

Покрытие  $(Ti,Al)N$  отличается высокой стойкостью к окислению при низкой теплопроводности и высокой твердости. При работе это покрытие создает тепловой заслон, который практически изолирует инструментальный материал от воздействия тепловых потоков, возникающих при резании. Таким образом, уменьшаются усилия при обработке.

Структура покрытия  $(AlCr)N$  отличает его высокую стойкость к окислению при температурах до 1100 °С, при этом сохраняя его химическую стабильность. Оно наносится как на быстрорежущий инструмент, так и на инструмент из твердого сплава.

Покрытие  $(AlCr)O$  называют нанокompозитным. Оно схоже с покрытием  $(AlCr)N$ , но является более эластичным при сохранении высокой твердости.

В работе [16] отмечается, что в последнее время качественным прорывом в технологиях нанесения износостойких покрытий является

переход от однокомпонентных покрытий, таких как  $TiN$ ,  $TiC$ ,  $TiCN$ , к многокомпонентным композитным покрытиям, имеющим в составе двойные соединения нитридов, такие как  $(Ti,Al)N$ ,  $(Ti,Zr)N$ ,  $(Ti,Mo)N$ . Дальнейшее развитие привело к разработке тройных соединений нитридов, а это  $(Ti,Al,V)N$ ,  $(Ti,Zr,C)N$ .

В таблице 10 представлены химические составы наиболее распространенных покрытий, наносимых методами CVD. [7]

Таблица 10 - Параметры наиболее распространенных покрытий, наносимых методами CVD

Химический состав покрытия	Материал основы	Общая толщина покрытия, мкм
$TiN-TiCN-Al_2O_3-TiN$	ТТ7К12	6
$TiN-TiCN-TiN-TiCN$	Т5К12	6
$TiN-TiCN-Al_2O_3$	Т15К6	4
$TiN-TiCN-Al_2O_3$	Т14К8	10
$TiN-TiCN-Al_2O_3$	ВК6М	12

При многослойном нанесении износостойкого покрытия у каждого слоя имеются свои строго определенные функции.

«Например, в покрытии  $TiN-TiCN-Al_2O_3$  слои выполняют следующие функции: наружный слой  $Al_2O_3$  является барьером, который сдерживает диффузионные процессы, снижает физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов, снижает склонность инструментального материала к окислению при повышенных температурах резания. Слой  $TiN$  обладает кристаллохимической совместимостью с твердосплавной подложкой, а слой на основе карбонитрида титана  $TiCN$  является прекрасной связкой и используется для повышения прочности адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия». [7]

#### 4 Структуры твердых сплавов

Твердые сплавы в своем составе содержат зерна карбидов, соединенные кобальтовой связкой, поэтому сплавы имеют пористую структуру (рисунок 17).

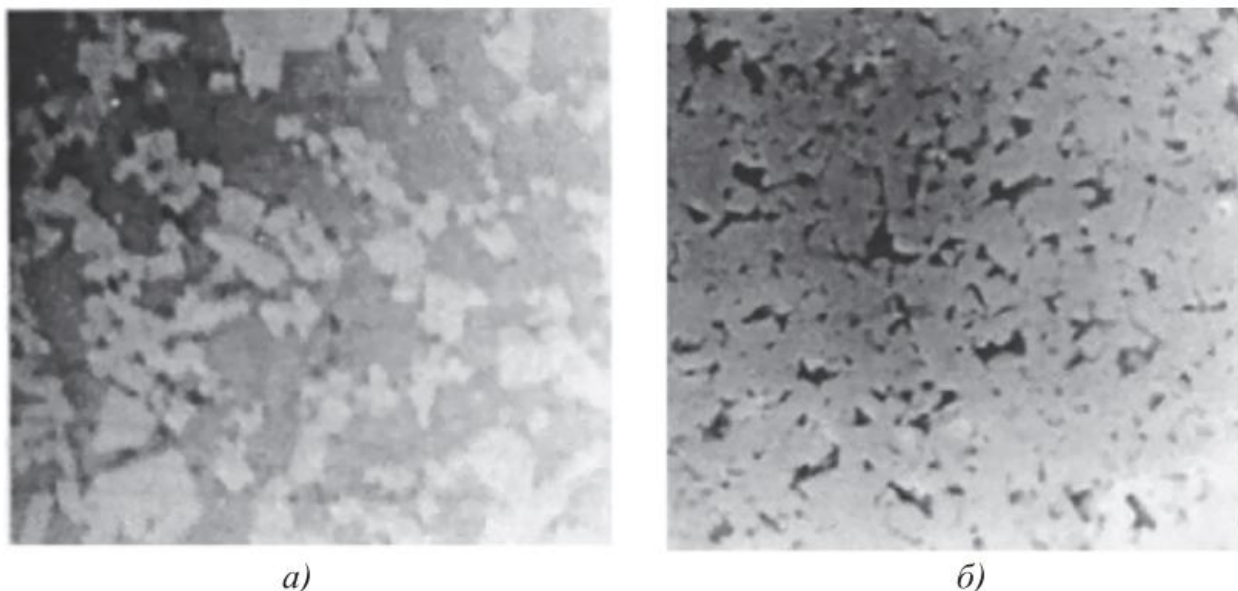


Рисунок 17 – Структура твердых сплавов:  
а – твердый сплав Т15К6; б – твердый сплав ВК8

Пористая структура, характерная для твердых сплавов, получила название фрактальной структуры. Характеристикой фрактальной структуры является такая величина, как фрактальная размерность  $D$ . Фрактальную размерность границ зерен определяют по формуле

$$D_3 = 1,5d_3 - 1,12.$$

У твердого сплава Т15К6 величина фрактальной размерности выше, нежели у сплавов ВК8 и ВК6ОМ. Характеристики твердых сплавов представлены в таблицах 11 и 12.

Таблица 11 - Химический состав и основные свойства твердых сплавов

Марка твердого сплава	Твердость, HRA	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при изгибе, МПа	Химический состав материала, %			
				Карбид вольфрама (WC)	Карбид титана (TiC)	Карбид тантала (TaC)	Кобальт (Co)
Вольфрамкобальтовые твердые сплавы							
ВК20	84	13,4...13,7	2058	80	-	-	20
ВК15	86	13,9...14,4	1862	85	-	-	15
ВК10- ХОМ	89	14,3...14,7	1470	88	-	2	10
ВК10	87	14,2...14,6	1764	90	-	-	10
ВК8	88	14,4...14,8	1666	92	-	-	8
ВК6-ОМ	90,5	14,7...15	1274	92	-	2	6
ВК6-М	90	14,8...15,1	1421	94	-	-	6
ВК6	88,5	14,6...15	1519	94	-	-	6
ВК4-В	88	14,9...15,2	1470	96	-	-	4
ВК3-М	91	15...15,3	1176	97	-	-	3
ВК3	89,5	15...15,3	1176	97	-	-	3
Титановольфрамкобальтовые							
Т8К7	90,5	12,8...13,1	1519	85	8	-	7
Т5К10	88,5	12,4...13,1	1421	85	5	-	10
Т14К8	89,5	11,2...11,6	1274	78	14	-	8
Т15К6	90	11,1...11,6	1176	79	15	-	6
Т30К4	92	9,5...9,8	980	66	30	-	4
Титанотанталовольфрамкобальтовые							
ТТ20К9	91	12...12,5	1470	71	8	12	9
ТТ10К8- Б	89	13,5...13,8	1617	82	3	7	8
ТТ8К6	90,5	12,8...13,3	1323	86	6	2	6
ТТ7К12	87	13...13,3	1666	81	4	3	12

Таблица 12 - Химический состав и основные свойства безвольфрамовых твердых сплавов

Марка твердого сплава	Твердость, HRA	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при изгибе, МПа	Химический состав материала, %			
				Каро- нитрид титана (TiCN)	Карбид ниобия (NbC)	Никель (Ni)	Молибден (Mo)
ЦТУ	89,5	6,2...6,8	1274	56	9	23	12
КНТ30	89	6...6,5	1600	70	-	23,3	6,7
КНТ16	89	5,5...6	12000	84	-	12,4	3,6
ТН20	91	5,5...6	1050	79	-	45	6

Форма зерен карбидов различных твердых сплавов различается по форме. Зерна сплава ВК8 имеют ромбическую форму близкую к квадрату. Зерна сплава Т15К6 имеют округлую форму приближенную к эллипсу. [12]

Структуры упрочняющих поверхностных слоев тоже фрактальны. У покрытий микрорельеф имеет выступы и впадины (рисунок 18).

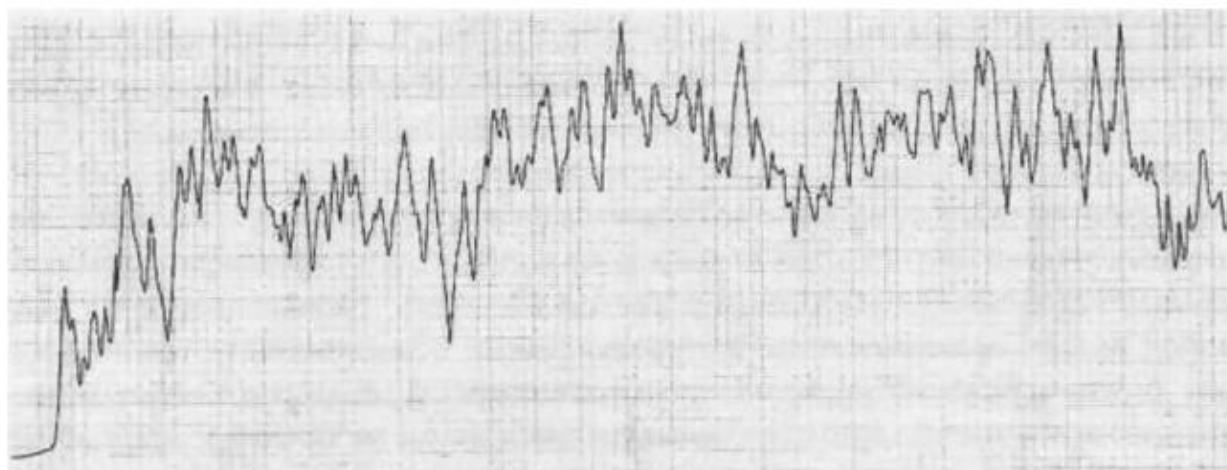


Рисунок 18 – Профилограмма трехслойного износостойкого покрытия  $TiC-TiCN-TiN$

В таблице 13 приведены фрактальная размерность, твердость, цвет и стойкость некоторых износостойких покрытий.

Таблица 13 – Характеристики некоторых износостойких покрытий

Химический состав покрытия	Стойкость, мин	Фрактальная размерность	Цвет	Твердость HV
$(TiC)N$	25	1,570	коричневый	3638
$AlSiN-AlN$	45	1,105	серо-черный	3409
$AlTiN$	28	1,597	серо-фиолетовый	3727

Из таблицы 13 видно, что покрытие  $AlTiN$  имеет наиболее высокую работоспособность. Это связано высокой устойчивостью его состава.

Основным параметром, определяющим сопротивление покрытия воздействию сдвиговых нагрузок, возникающих в процессе резания, является модуль сдвига. [13]

Еще одним качественным показателем, определяющим плотность прилегания покрытия к основе, является энергия адгезии. [13, 29] При нанесении износостойких покрытий материал покрытия в основном взаимодействует со связкой, которой является кобальт, поэтому возникает островковый характер взаимосвязи покрытия с основой. Отсюда возникает очаговый характер износа покрытия (рисунок 19). [13]

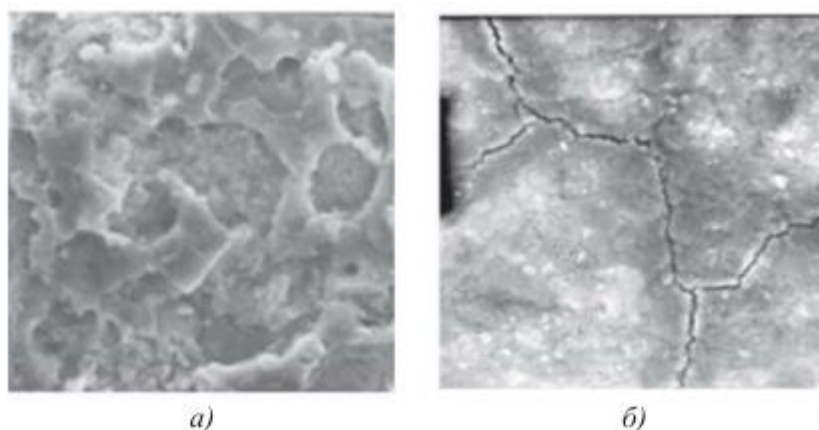


Рисунок 19 – Износ покрытия  $TiN$  (а) и растрескивание покрытия  $TiN$  (б) в районе границ зерен

«На рисунке 19 приведена схема покрытий  $TiC$  ( $TiN$ ) на железе со структурой  $\alpha$ -феррит. Кристаллическая структура  $\alpha$ -феррита представляет собой объемно-центрированную решетку со стороной 2,867 Å. Рассчитанная постоянная решетки составила 2,88 Å. Карбид и нитрид титана имеют кубическую решетку типа  $NaCl$  со стороной 4,33 Å, нитрид  $TiN$  – 4,24 Å. На первый взгляд, имеется большое несоответствие решеток и затруднительно построить модель, имеющую большую периодичность в обеих частях пластины. Однако нетрудно заметить, что удвоенный период решеток  $TiC$  и  $TiN$  близок к утроенному периоду решетки  $\alpha$ - $Fe$ . Таким образом, можно построить периодическую систему с дефектом типа ядра дислокации, которая достаточно реально отображает возможную структуру границы

покрытий  $TiC-Fe$  и  $TiN-Fe$ . Схема ячейки такой системы представлена на рисунке 20». [13]

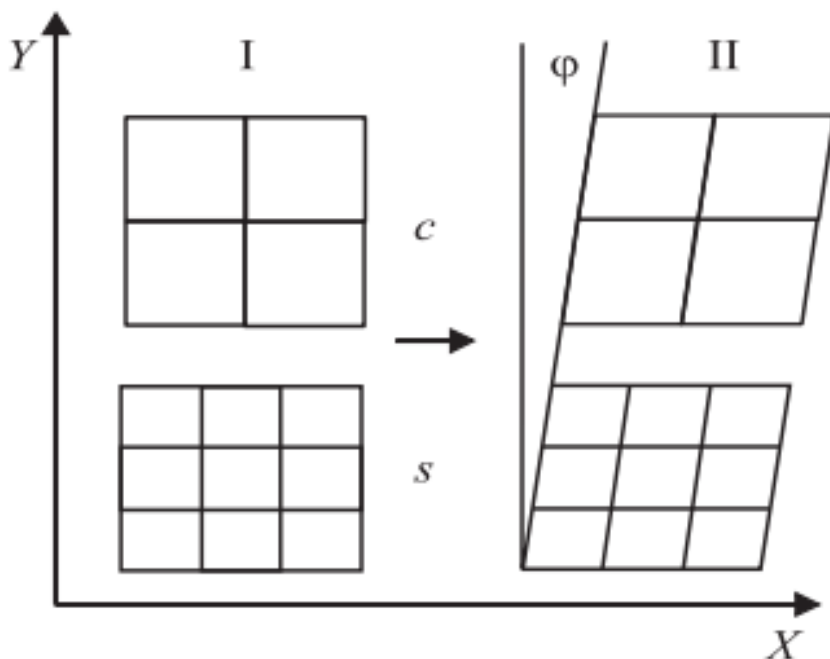


Рисунок 20 – Моделирование связи материала покрытия ( $TiN$ ,  $TiC$ ,  $TiAlN$ ) с поверхностью феррита при определении энергии адгезии (I) и модуля сдвига (II)

Смоделировать покрытие  $TiAlN$  является задачей более сложной. Оно представляется собой структуру  $TiN$ , в которой некоторые атомы  $Ti$  заменены на  $Al$ .

В начале моделирования находили равновесную структуру системы и ее равновесную полную энергию. Энергию адгезии находили из зависимости

$$E_{adh} = [E(s + c) - E(s) - E(c)]S_{XY},$$

где  $E(s)$  – энергия подложки;

$E(c)$  – энергия покрытия;

$E(s+c)$  – полная равновесная энергия;

$S_{XY}$  – площадь поверхности покрытия в плоскости XY.



Чтобы найти модуль сдвига проводили несколько исчислений, при этом атомы верхнего слоя сдвигались по направлению оси X на шаг равный  $X=0,4$  а.е. (1 а.е. = 0,0529 нм) с фиксацией на каждом шаге. Остальным же атомам разрешалось перемещаться под воздействием внутренних сил и самим находить свои положения равновесия. Так вычисляли модель сдвига

$$G = \frac{\Delta E}{\Delta X} \frac{1}{S_{XY}} \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi},$$

где  $\varphi$  – угол сдвига.

Реакция покрытий в зависимости от действия сдвиговых нагрузок представлена на рисунке 21.

Из рисунка 21 следует, что модули сдвига у рассмотренных материалов покрытий отличаются, причем

$$G(\text{TiAlN} - \text{Fe}) > G(\text{TiN} - \text{Fe}) > G(\text{TiC} - \text{Fe}).$$

Значит по модулю сдвига выгоднее покрытие *TiAlN*.

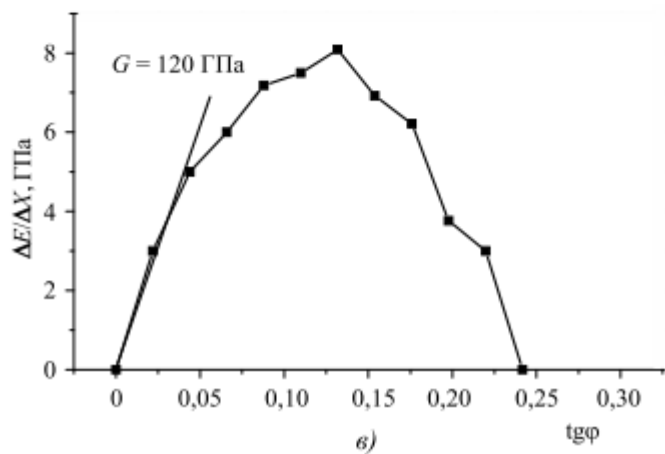
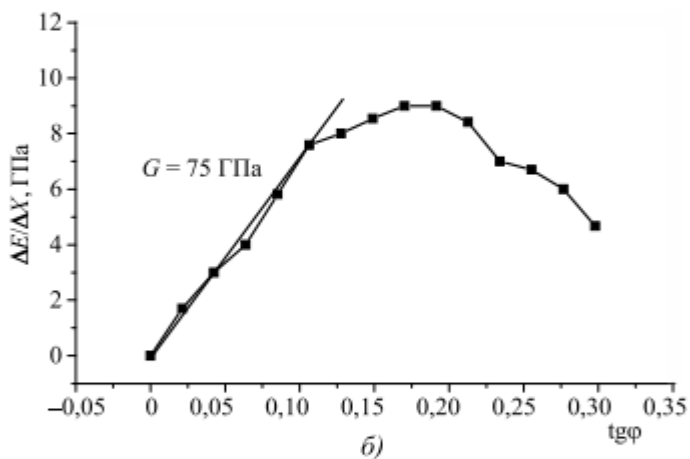
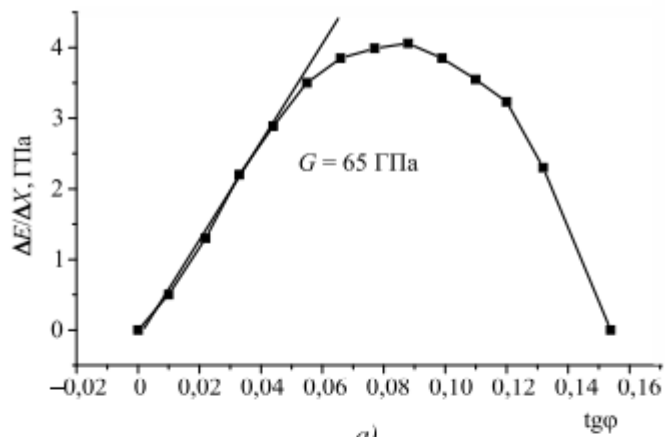


Рисунок 21 – Графики зависимости напряжения сдвига от угла сдвига для покрытий, нанесенных на Fe:

*a* – покрытие *TiN*; *б* – покрытие *TiC*; *в* – покрытие *TiAlN*

При определении энергии адгезии, в первом приближении было допущено, что кобальт в составе твердого сплава является слоем, аналогично покрытию.

На рисунке 22 представлены графики зависимостей напряжения сдвига покрытий.

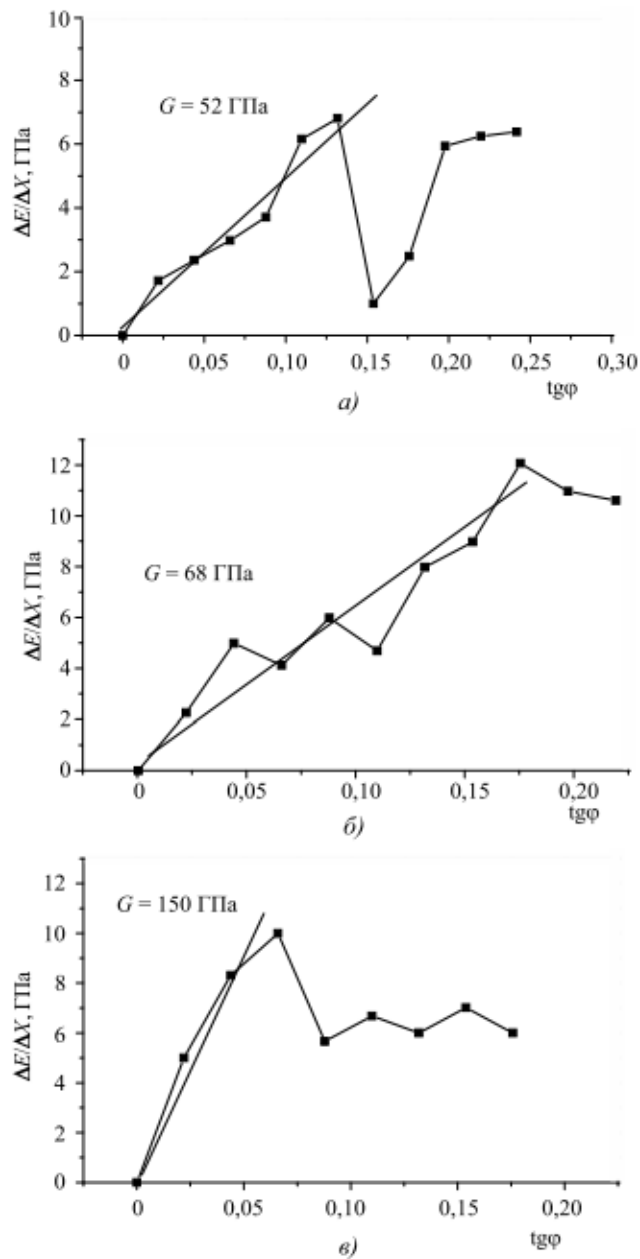


Рисунок 22 - Графики зависимостей напряжения сдвига покрытий, нанесенных на  $\text{Co}$ :

а – покрытие  $\text{TiN}$ ; б – покрытие  $\text{TiC}$ ; в – покрытие  $\text{TiAlN}$

Проведенные исследования показали, что по энергии адгезии наилучшие результаты будет иметь двухслойное покрытие  $TiC-TiAlN$ . Литературные исследования показывают, что по сравнению с однослойными покрытиями  $TiC$  и  $TiN$  такое двухслойное покрытие будет иметь повышение стойкости в 1,5... 2,0 раза.

В покрытиях  $TiN$ ,  $TiC$ ,  $TiAlN$  адгезия с кобальтом высокая и варьируется в пределах 3,5...4,1 Дж/м<sup>2</sup>. Эта величина у всех покрытий является большей, чем величины адгезии с железом, что свидетельствует о достаточной связи покрытия с основой. Наибольшую адгезионную связь имеет покрытие  $TiC$ .

Проведенные исследования показали, что двухслойное покрытие  $TiC-TiAlN$  будет иметь большую стойкость, поэтому оно рекомендовано для нанесения. При этом износостойкость инструмента будет выше, чем у инструмента с однослойным покрытием.

Твердость широко распространенных покрытий  $TiC$ ,  $TiCN$ ,  $TiAlN$  высока (более 20 ГПа). [5, 29, 30] Также для них характерны высокие коэффициенты трения скольжения (около 0,5). Многослойным композитным покрытиям, таким как  $Si_3N_4$ ,  $TiB_2$ ,  $TiSiB$ , характерны более высокие твердости (порядка 60 ГПа) и более низкие коэффициенты трения (около 0,2), так как их структура наноразмерна.

По своим свойствам твердосмазочные и тонкопленочные покрытия можно разделить на группы (рисунок 23).

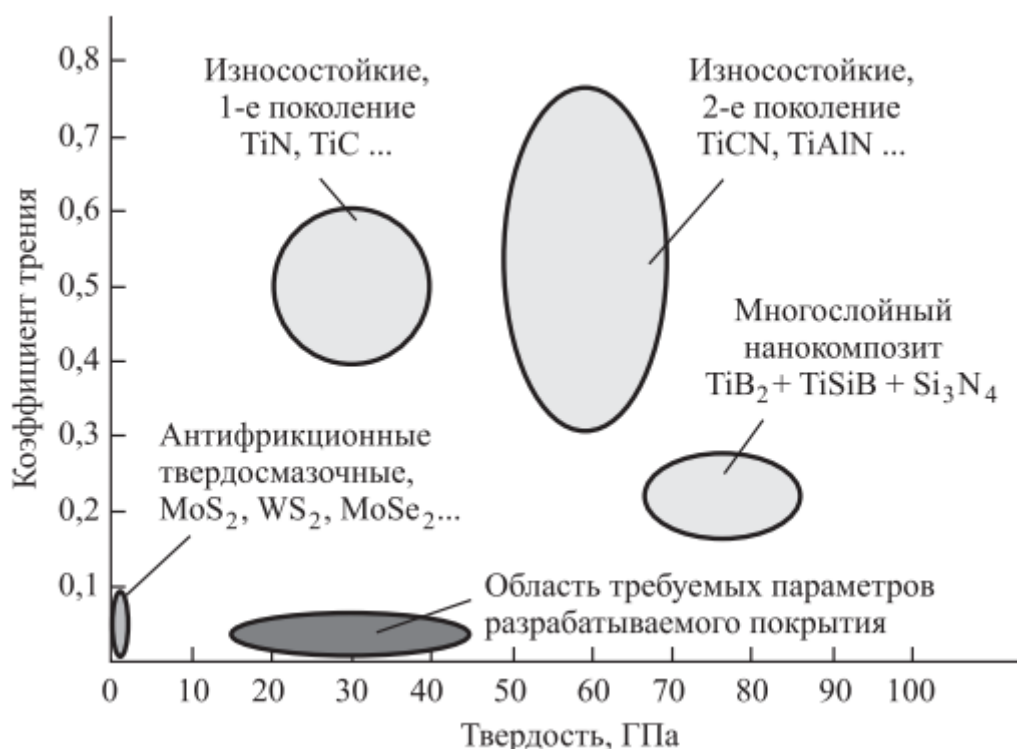


Рисунок 23 – Области механических и трибологических свойств покрытий

В работе [3] авторами проводились исследования поверхностей после обработки инструментом с различными износостойкими покрытиями. Покрытия наносились на инструмент из твердых сплавов ВК6Р и ТТ7К12. Покрытия  $(Ti; Si; Zr)CN$ ,  $(Ti; Si; Al)N$ ,  $(Ti; Si)N$  наносились ионно-плазменным методом, а покрытия  $Al_2O_3$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$  и  $Ta_2O_5$  наносились методом ионной имплантации наночастиц. Обработке такого рода инструментами подвергалась сталь ЭК26 (05X12H2K3M2AФ). При обработке измерялись возникающие силы резания.

На рисунке 24 представлены графики износа инструмента с вышеописанными покрытиями и инструмента без покрытия.

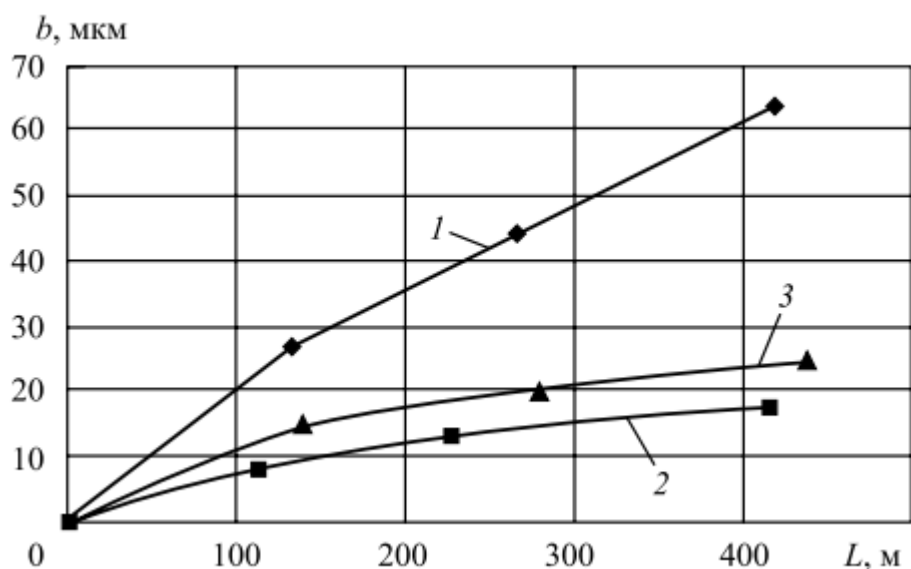


Рисунок 24 - Графики износа инструмента с покрытиями и инструмента без покрытия:

1 – ВК6 без покрытия; 2 – ВК6 с покрытием  $(Ti; Si)N$ ; 3 - ВК6 с покрытием  $(Ti; Si; Al)N$

Из графиков видно, что наибольший износ оказался у образцов ВК6 без покрытия, а наименьший – у образцов с покрытием  $(Ti; Si)N$ .

Авторами [3] по результатам исследований делаются выводы о том, что нанесение износостойких покрытий снижает температуру в зоне обработки примерно на  $50^{\circ}C$ , что дает возможность увеличить производительность обработки на 20...30%. Также нанесение покрытий снижает шероховатость обработанных данным инструментом поверхностей в среднем на 5%.

Авторами [26, 27] описаны процессы предварительной подготовки и постановки на производство партии монокристаллических твердосплавных фрез. Описаны этапы подготовки производства, вводимы коррективы перехода от математических моделей к реальному производству, описаны режимы обработки на шлифовальном станке с ЧПУ. В результате сделан вывод о достаточном качестве техпроцесса и возможности использования такого инструмента.

Авторами [16] отмечается, что на сегодняшний момент при производстве твердого сплава завод-изготовитель производит различную степень зернистости сплавов – от особо мелкозернистой карбидной фазы (доли мкм) до крупнозернистой (2-5 мкм). Отмечается, что снижение зернистости повышает твердость сплава, но при этом снижает сопротивляемость абразивному изнашиванию. Также авторами отмечается, что легирование стандартной кобальтовой связки сплава рением Re и рутением (Ru) существенно повышает сопротивление окислению твердого сплава при нагреве на воздухе до 950 °С и увеличивает прочность и твердость сплава при повышенных температурах. Однако дороговизны и дефицитности этих элементов такая технология улучшения твердых сплавов пока не нашла широкого применения.

## 5 Подготовка поверхностей к нанесению износостойких покрытий

Авторами [9] описано, что они перед нанесением многослойных покрытий из  $AlN/TiN$ ,  $TiN/CrN$ ,  $AlN/CrN$  очищали поверхность химической очисткой в ультразвуковой ванне с органическим раствором. Также заготовки подвергались ионной очистке в камере напыления в среде аргона при напряжении 800 В. Далее перед нанесением основного износостойкого покрытия наносили адгезионные слои из хрома или титана.

Перед нанесением покрытия необходимо провести очистку от пленки загрязнений и адсорбционных пленок, имеющих на поверхности режущего инструмента. А их наличие зависит от условий изготовления, хранения, транспортировки инструмента (рисунок 25). [7]

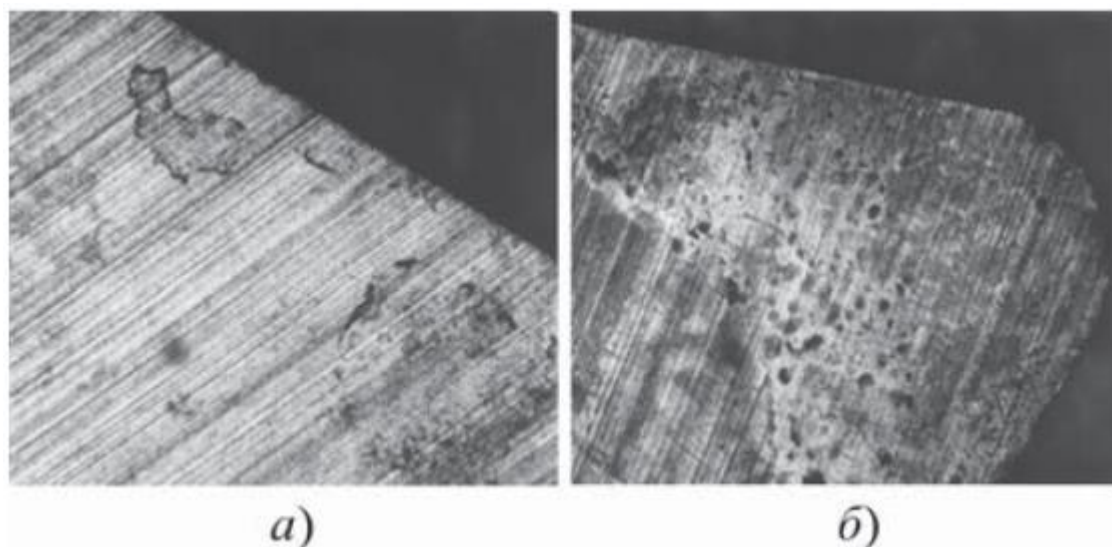


Рисунок 25 – Загрязненные поверхности режущих пластин:  
*a* – органические загрязнения; *б* – оксидные пленки.

Чаще всего первым этапом комплекса мероприятий, направленных на подготовку поверхности к нанесению покрытия является химическая очистка. Здесь удаляются видимые грубые загрязнения: остатки масел, смазочные материалы, красители, жировые пятна и так далее. В этом



процессе применяют органические растворители, такие как ацетон, бензин, этиловый спирт и так далее.

Для удаления с поверхности грубых загрязнений, таких как остатки стружки, пыль и так далее часто используется ультразвуковой метод. Эффективность этого метода очистки поверхности определяется частотой колебаний. Так этот метод позволяет удалять грубые загрязнения, то обычно после него проводят обезжиривание поверхностей в средах органических растворителей.

После проведения очистки поверхностей необходимо просушить эти поверхности. На этом этапе важно не нанести повторно загрязнения на просушиваемые поверхности. Просушивают поверхности в чистой печи или в паровом очистителе прогретым отфильтрованным воздухом или азотом. При этом используемая оснастка и транспортировочная система должна быть совершенно чистой, а воздушная среда – очищенная от загрязнений, присущих загрязнениям воздуха.

На последующем этапе выполняют промывку поверхностей деионизированной водой. Важно, чтоб после промывки на поверхности оставалось как можно меньше остатков воды, потому что капли воды при высыхании оставляют пятна. Для этого поверхности продувают или подвергают центрифугированию.

Часто для очистки поверхностей до нанесения покрытия применяют виброабразивную обработку. [7, 32]

Очистка поверхностей на таких установках осуществляется путем удаления загрязнений абразивными частицами в присутствии вибрации.

Сложным оказывается процесс удаления с подготавливаемой к нанесению покрытия поверхности оксидных пленок. Часто этот процесс выполняют комплексным путем, включающим механическую обработку (рисунок 26).

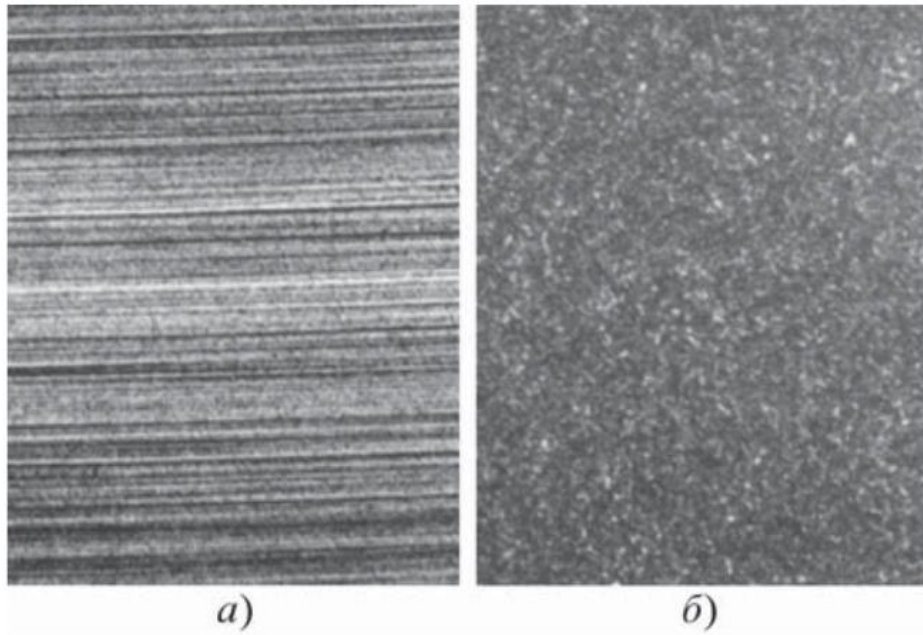


Рисунок 26 – Поверхности режущих платин с оксидными пленками:  
*a* – поверхность, прошедшая обезжиривание в спирте, ультразвуковую мойку, травление раствором ортофосфорной кислоты; *б* - поверхность, прошедшая обезжиривание в спирте, пескоструйную обработку, ультразвуковую мойку, сушку

На рисунке 27 представлен типовой процесс подготовки поверхностей пластин из твердого сплава к нанесению покрытий.



Рисунок 27 - Типовой процесс подготовки поверхностей пластин из твердого сплава к нанесению покрытий

Применение химической очистки поверхностей ограничено вследствие его сильного негативного воздействия на окружающую среду, поэтому для очистки поверхностей иногда вынужденно приходится применять другие методы.

## **6 Измерение сил резания при использовании инструмента с износостойкими покрытиями**

Для проведения исследований по выбору того или иного износостойкого покрытия необходимо смоделировать процессы обработки. Для определения характеристик параметров обработки необходимо экспериментальное оборудование, которое бы измеряло данные параметры.

Силы, возникающие при обработке металлов резанием, напрямую влияют на качество обработанных поверхностей, так как от них зависит температура в зоне резания, деформации инструмента и заготовки, форма срезаемой стружки и так далее. В качестве измерительной аппаратуры при определении сил резания применяются динамометры.

«Динамометры имеют три основные части: датчики, воспринимающие нагрузку, приемники и органы связи, соединяющие датчики и приемники. При измерении сил резания при чистовом фрезеровании рекомендуется использовать электрические динамометры, построенные на различных принципах (емкостном, индукционном, тензометрическом и т.д.)». [22]

Еще одним важным вопросом является правильный выбор программного продукта для обработки сигналов, выдаваемых динамометром. Чаще всего в такие программные продукты заложены расчеты методами конечно элементного анализа.

Авторами [22] описан выбор динамометра для измерения сил резания при фрезеровании концевыми фрезами со сферическим концом. Выбор осуществлялся среди трех моделей динамометров фирмы Kistler (рисунок 28).

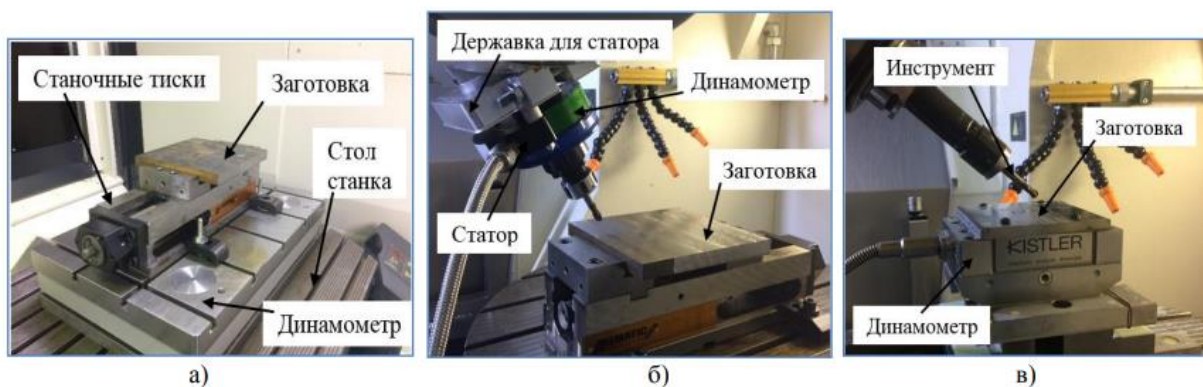


Рисунок 28 – Динамометры фирмы Kistler:

*а* – модель 9253 B23; *б* – модель 9123CQ05; - *в* – модель 9129AA

Динамометры подключают в систему по схеме, представленной на рисунке 29.



Рисунок 29 – Схема подключения динамометров

«Стационарный динамометр зачастую является соединительным элементом между столом станка и заготовкой. Заготовка фиксируется на динамометре, что позволяет измерять силы резания в производственных условиях. Результирующая сила, действующая на стационарный динамометр, пропорциональна алгебраической сумме соответствующих компонентов отдельных сил, которые образуют систему параллельных их составляющих (рисунок 30). В зависимости от конструкции возникающие силы

фиксируются одним или несколькими многокомпонентными датчиками силы. Проекции сил резания  $F_x$ ,  $F_y$  и  $F_z$  определяются в системе координат заготовки и далее рассчитываются». [22]

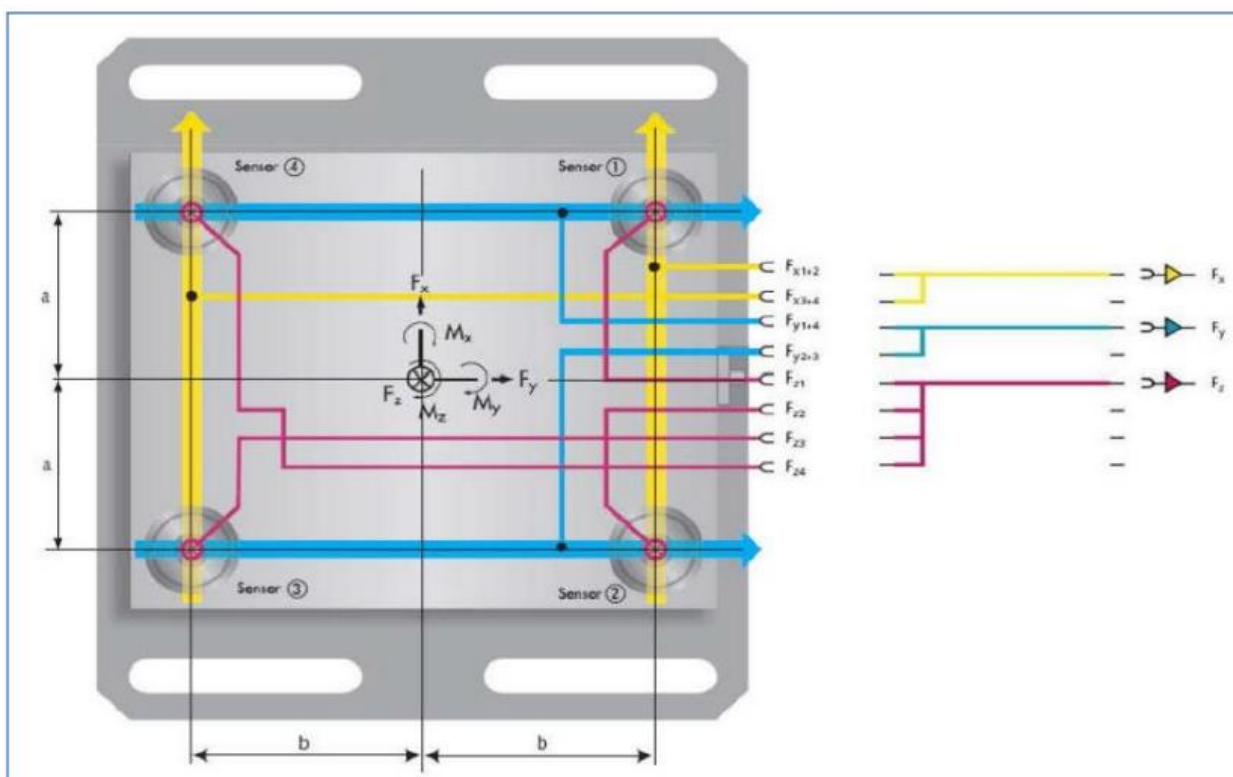


Рисунок 30 – Схема датчиков стационарного динамометра

«Ротационные динамометры устанавливаются в шпиндель станка, статор крепится к корпусу шпинделя через державку и болты, расстояние между статором и динамометром должно быть в пределах 1-2 мм (рис. 25, б). Инструмент устанавливается в ротационный динамометр с помощью держателя инструмента. В динамометре используется только один многокомпонентный датчик для измерения сил и момента непосредственно на инструменте. Помимо датчика на роторы установлены усилитель заряда и телеметрическая электроника. Телеметрия используется для передачи данных измерений в стационарную часть измерительной цепи (статор), где сила представляется в виде аналоговых сигналов напряжения. При измерении

сил резания с помощью ротационного динамометра силы определяются в системе координат инструмента». [22]

Производителями динамометров Kistler рекомендуется для обработки данных применять программный пакет DinoWare, которая устанавливается на персональные компьютеры (рисунок 31).

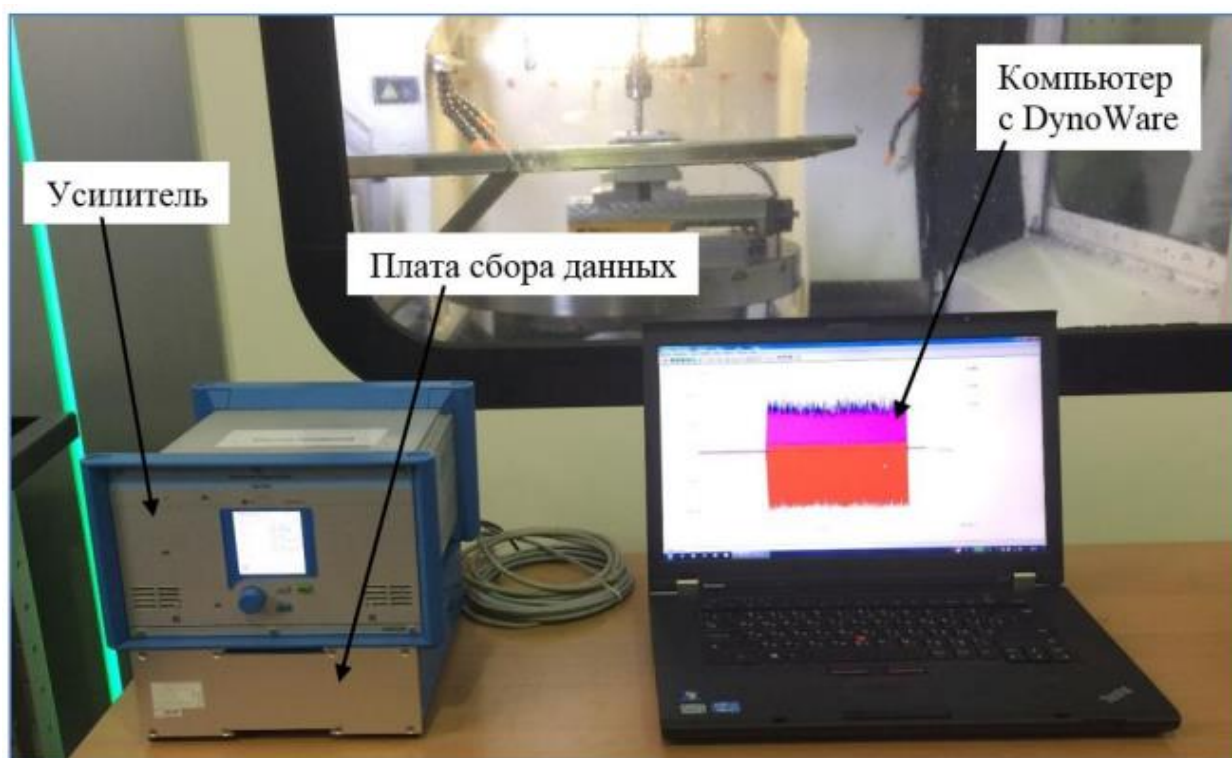


Рисунок 31 – Система фиксации и обработки данных при измерении сил резания

На рисунке 32 представлены показания измерительной системы с динамометром модели 9253B23 при холостом ходе фрезерного станка DMU 80P duoBLOCK.

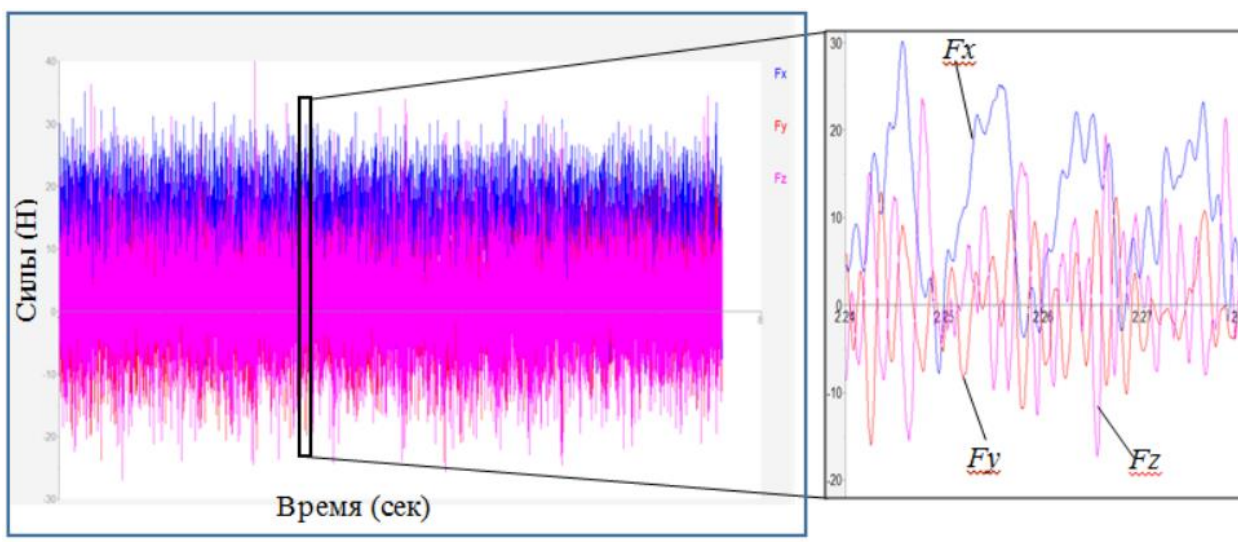


Рисунок 32 - Показания измерительной системы с динамометром модели 9253B23 при холостом ходе фрезерного станка DMU 80P duoBLOCK

Данные, представленные на рисунке 32, показывают, что вибрации и шумы, издаваемые станком, не могут дать объективной картины по силам резания, поэтому применение динамометра модели 9253B23 для измерения сил резания не целесообразно.

На рисунке 33 представлены показания измерительной системы, имеющей в своем составе ротационный динамометр модели 9123CQ05, в процессе холостого хода на фрезерном станке HSC 75 linear. Эксперимент проводился при вращении шпинделя станка с частотой  $6000 \text{ мин}^{-1}$ .

На рисунке 34 представлены показания измерительной системы, имеющей в своем составе стационарный динамометр модели 9129AA, в процессе холостого хода на фрезерном станке HSC 75 linear. Этот эксперимент проводился также при вращении шпинделя станка с частотой  $6000 \text{ мин}^{-1}$ .



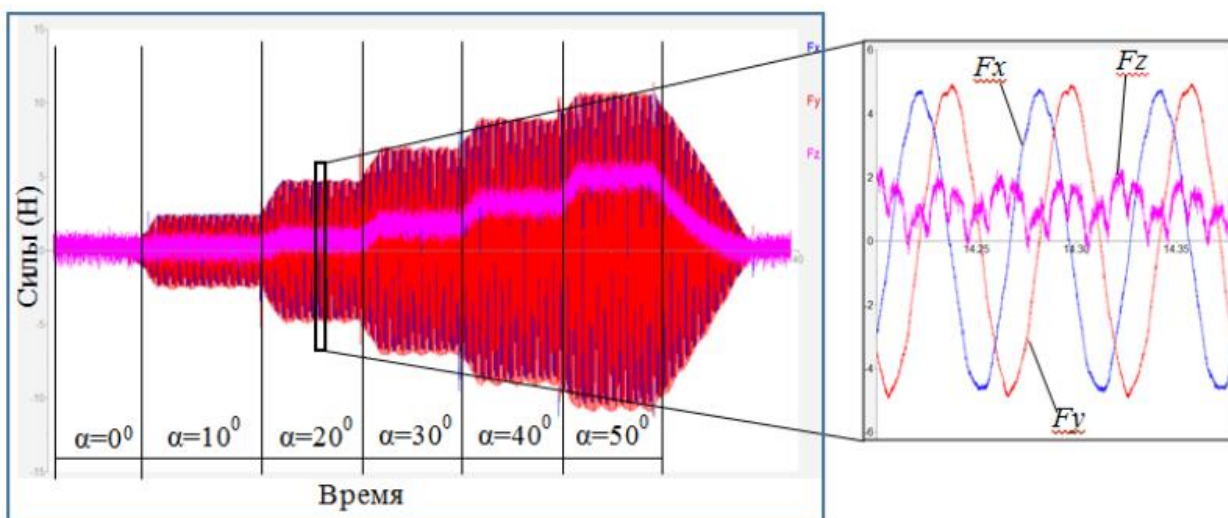


Рисунок 33 - Показания измерительной системы, имеющей в своем составе ротационный динамометр модели 9123CQ05, в процессе холостого хода на фрезерном станке HSC 75 linear

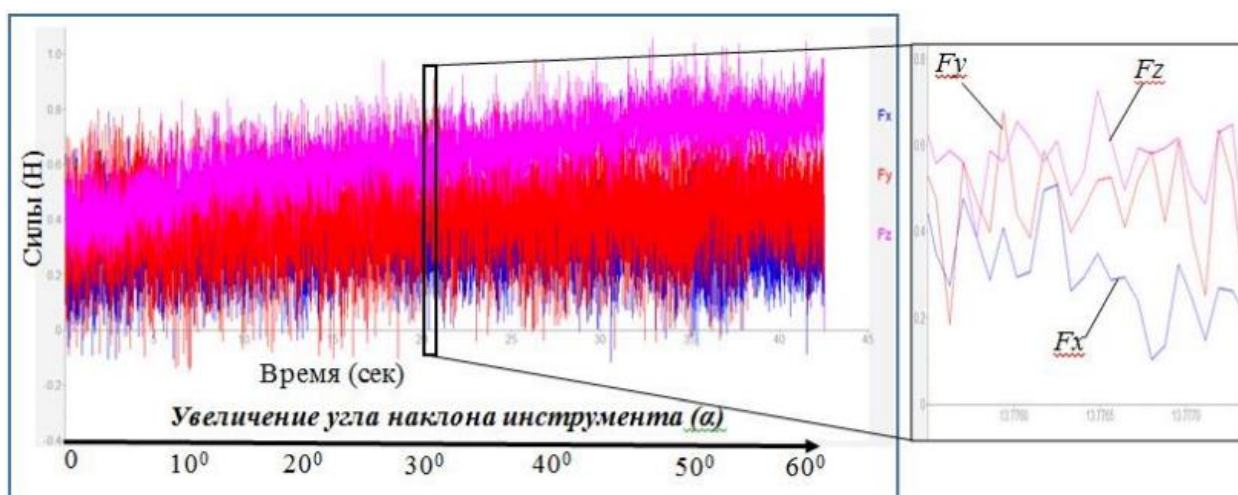


Рисунок 34 - Показания измерительной системы, имеющей в своем составе стационарный динамометр модели 9129AA, в процессе холостого хода на фрезерном станке HSC 75 linear

Применение ротационного динамометра (рисунок 33) при невертикальном расположении оси фрезы ведет к возникновению дисбалансу и возникновению ошибок результатов измерения сил. То есть при применении такого динамометра необходимо тщательно выверять систему

по ГОСТ ТСО 1940-1-2007. Таким образом, применение ротационного динамометра в составе измерительной системы исключается.

«Принято по величине силы  $P_z$  производить расчеты прочности и жесткости режущего инструмента, а также необходимой мощности на осуществление процесса резания. Более правильно было бы точные расчеты инструмента производить на деформацию косоугольного изгиба от действия силы». [25]

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}.$$

«При определении прогиба детали, прочности и жесткости отдельных деталей станка за основу принимают величину силы  $P_y$ , а прочность и жесткость механизма подачи станка рассчитывают по величине силы  $P_x$ . Для измерения сил  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  при резании используют трехкомпонентные динамометры». [25]

Из рисунка 34 видно, что шум и вибрации системы станка незначительно влияют на показания измерительной системы, в состав которой входит динамометр модели 9129АА. Помехи не превышают 1Н.

Далее были проведены испытания измерительных систем, включающих два вида стационарных динамометров моделей 9253В23 и 9129АА.

Измерения системы с динамометром модели 9253В23 дают большую ошибку из-за фиксации системой шумов станка. С помощью «фильтров», имеющихся в программном продукте MathLab убрать влияние шумов на результаты измерения не представляется возможным. Поэтому для данных измерений динамометр модели 9253В23 также не подходит.

На рисунке 35 представлены результаты измерений сил системы с динамометром модели 9129АА резания при фрезеровании.

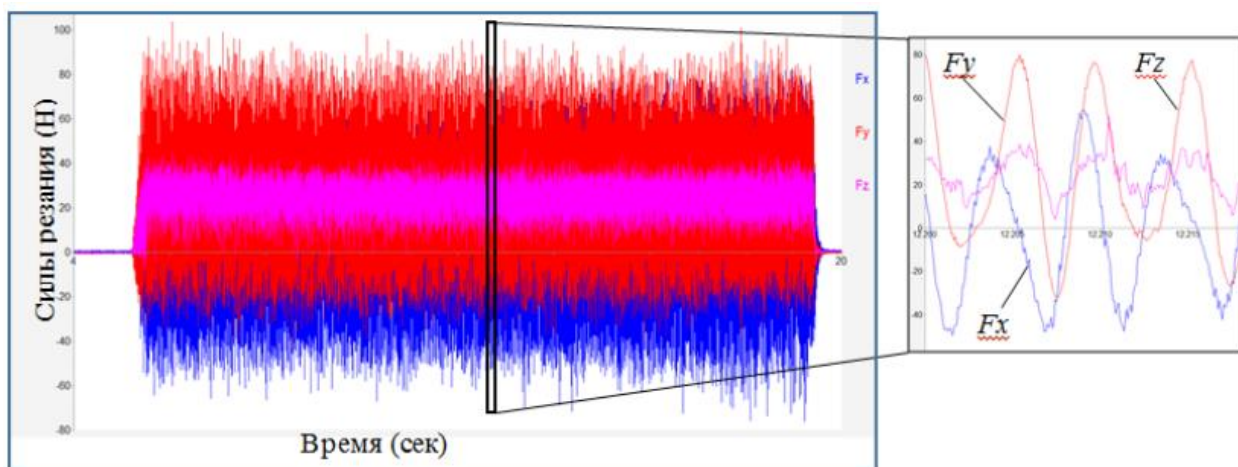


Рисунок 35 – Результаты измерений сил системы с динамометром модели 9129АА резания при фрезеровании

Из рисунка 35 видно, что измерения соответствуют теоретическим исследованиям и моделированию процесса с применением программных продуктов инженерного анализа. [28]

Таким образом, можно сделать вывод о том, что из рассмотренных динамометрических измерителей, производимых фирмой Kistler, для измерения сил резания при обработке концевыми фрезами на фрезерных станках наиболее подходящим динамометром является модель 9129АА, так как она при любой позиции инструмента относительно заготовки обладает достаточной чувствительностью и высокой точностью.

## Заключение

В работе выполнен литературный обзор последних лет по изменению конструкций твердосплавных концевых фрез в связи с характером их износа. Здесь представлены результаты ведущих производителей режущего инструмента, таких как Sandvik Coromant, Mitsubishi и так далее. Также в работе выполнен литературный обзор экспериментальных различных методов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент. Выполнена градация различных методов формирования покрытий на группы. Приводятся преимущества и недостатки различных методов нанесения на те или иные материалы основы.

Далее были рассмотрены вопросы о химическом составе износостойких покрытий режущих инструментов из различных твердых сплавов. После этого проанализированы структуры твердых сплавов, на которые наносятся износостойкие покрытия. Здесь же приводятся экспериментальные исследования по характеристикам износостойких покрытий.

В работе рассмотрен вопрос о подготовке поверхности инструмента к нанесению покрытия. Приводятся причины данных мероприятий и механизм реализации.

Таким образом, при производстве монолитных твердосплавных концевых фрез нами предлагается производить твердые сплавы с зернистостью 0,2...0,5 мкм, так как в этом случае она будет оптимальна. На инструмент наносить двух или трехслойное износостойкое покрытие, например,  $(Ti,Si)N/MoS_2$  или  $TiCN-Al_2O_3-TiN$  методами физического осаждения из газовой фазы, например, методом ионной бомбардировки. После работы предлагается полировка покрытия, предложения технологией LSC фирмы Sandvik Coromant.

## Список используемой литературы

1. Александров, В.А. Создание износостойких покрытий для режущего инструмента / В.А. Александров, В.М. Вдовин, А.С. Сергеева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. №11. С. 85-89.
2. Безъязычный, В.Ф. Влияние покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей / В.Ф.Безъязычный, М.В. Басков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Том 13. №8. С. 348-352.
3. Безъязычный, В.Ф. Исследование влияния технологических условий обработки точением режущим инструментом с износостойкими покрытиями на параметры качества поверхностного слоя деталей машин / В.Ф.Безъязычный, Р.Н. Фоменко, В.В. Непомилуев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Том 3. №3. С. 108-113.
4. Беликов, А.И. Исследование влияния антифрикционных упрочняющих покрытий на энергоэффективность обработки при сверлении стали / А.И. Беликов, Д.С. Богданец, С.Г. Васильев, В.Н. Калинин, М.А.Шарапков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Том 13. №11. С. 483-486.
5. Беликов, А.И. Нанокompозитные твердосмазочные покрытия, формируемые методом магнетронного распыления мишени состава  $Ti+MoS_2$  / А.И. Беликов, В.Н. Калинин, С.Д. Капухин, М.Г. Попова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Том 14. №11. С. 523-528.
6. Воробьев, А.А. Эффективность применения современных материалов для износостойких покрытий режущего инструмента, применяемого на ремонтных предприятиях ОАО «РЖД» / А.А. Воробьев, В.Г. Кондратенко, С.Н. Мануйлов // В сборнике: Специальная техника и

технологии транспорта. Сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2020. С. 151-156.

7. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента : учебник для студентов вузов. – М. : Машиностроение, 2009. – 368 с.

8. Григорьев, С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета. 2010. №1-1(1). С. 92-98.

9. Дрималовский, Е.И. Особенности нанесения твердых покрытий на режущий инструмент / Е.И. Дрималовский, Е.А. Памфилов // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. №29. С. 33-36.

10. Дронов, А.А. Исследование и разработка технологий создания фотоэлектродов на основе наноструктурированного оксида титана / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нац. исслед. ун-т МИЭТ. Москва, 2012.

11. Исаев, Д.Т. Методы различными покрытиями пластин из твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов / Д.Т. Исаев, З. Умарова, Г. Мажимова // В сборнике статей XXV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 47-79.

12. Кабалдин, Ю.Г. Влияние фрактальных свойств наноструктурированных покрытий на их износостойкость / Ю.Г. Кабалдин, Е.Е. Власов, А.М. Кузьмишина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Том 14. №6. С. 275-278.

13. Кабалдин, Ю.Г. Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом / Ю.Г. Кабалдин, Е.Е. Власов, А.М. Кузьмишина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Том 14. №8. С. 339-343.

14. Локтев, Д.А. Современные червячные фрезы: конструкция, инструментальные материалы и износостойкие покрытия // Известия МГТУ «МАМИ». №1(19). Т2. 2014. – С. 140-152.

15. Мокрицкий, Б.Я. Повышение конкурентоспособности твердосплавных концевых фрез / Б.Я. Мокрицкий, В.А. Соловьев, В.Ю.Верещагин, П.А. Саблин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Том 13. №6. С. 247-250.

16. Оганян, Г.В. Совершенствование твердосплавного инструмента с целью повышения производительности механической обработки / Г.В. Оганян, М.Г. Оганян // Вестник МГТУ «Станкин», №4(43). 2017. С. 22-27.

17. Палина, О.В. Изготовление концевых твердосплавных фрез на универсально-заточном станке с ЧПУ / О.В.Палина, А.А. Жусалина, А.С. Серков, О.П. Евдокимова // В сборнике: УЧЕННЫЕ ОМСКА – РЕГИОНУ, Материалы II Региональной научно-технической конференции. 2017. С. 131-139.

18. Патент 2620521 Российская Федерация МПК С 23 С 14/24; С 23 С 14/22; В 23 В 27/14. Износостойкое покрытие для режущего инструмента / Новиков В.Ю., Колесников Д.А., Береснев В.М.; ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (RU). – 2015142248 заявл. 06.10.2015; опубл. 26.05.2017, Бюл. №15. – 7 с.

19. Патент 2648814 Российская Федерация МПК С 23 С 14/24. Способ получения износостойкого покрытия для режущего инструмента / Табаков В.П., Чихранов А.В., Сагитов Д.И., Полозов М.В.; ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (RU). – 2017107926 заявл. 10.03.2017; опубл. 28.03.2018, Бюл. №10. – 5 с.

20. Патент 2648927 Российская Федерация МПК С 23 С 14/24. Способ получения износостойкого покрытия для режущего инструмента / Табаков В.П., Чихранов А.В., Сагитов Д.И., Полозов М.В.; ФГБОУ ВО

«Ульяновский государственный технический университет» (RU). – 2017107997 заявл. 10.03.2017; опубл. 28.03.2018, Бюл. №10. – 5 с.

21. Патент 2708024 Российская Федерация МПК С 23 С 14/35; С 23 С 8/36. Способ комбинированного упрочнения режущего инструмента / Метель А.С., Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мельник Ю.А.; ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (RU). – 2018145828 заявл. 24.12.2018; опубл. 03.12.2019, Бюл. №34. – 10 с.

22. Пономарев, Б.Б. Выбор динамометра для измерения силы резания при концевом фрезеровании // Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // Вестник Брянского государственного университета. №5(78). 2019. – С. 15-23.

23. Сагитов, Д.И. Исследование влияния износостойких покрытий на характеристики теплового состояния токарных резьбовых резцов / Д.И.Сагитов, В.П. Табаков // В сборнике трудов: Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства. Труды IV Международной научно-технической конференции. 2015. С. 145-149.

24. Скуратов, Д.Л. Конструирование и изготовление концевых фрез на современных многоосевых заточных станках / Д.Л. Скуратов, А.В. Кузнецов, В.М. Опарин, М.Б. Сазонов // Авиационная и ракетно-космическая техника. 2012. С. 77-86.

25. Солоненко, В.Г. Резание металлов и режущие инструменты : учебное пособие / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 415 с.

26. Табаков, В.П. Износостойкие ионно-плазменные покрытия режущих инструментов / В.П. Табаков, Н.А. Ширманов, М.Ю. Смирнов, А.В. Циркин // Фундаментальные исследования, №8. 2005. С. 92-93.

27. Табаков, В.П. Применение износостойких покрытий при резьбонарезании / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». №1(19). 2012. – С. 15-19.



28. Altintas, Y. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling / Y. Altintas, P. Lee // ASME J. Manufact. Science and Eng. – 1998. - Vol. 120. – P. 684-691.
29. Kern W. Thin film processes II. – Academic press, 2012. T. 2.
30. Loginov, N. Y., Gulyaev, V. A., Kozlov, A. A., & Voronov, D. Y. (2019). Testing of the mathematical model application of the wear coating electro-spark method. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, , 537(2) doi:10.1088/1757-899X/537/2/022006.
31. Martin, J.W. Stability of microstructure in metallic systems / J.W. Martin, R.D. Doherty. – London, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1978. – 280 p.
32. Wang P. Polycrystalline ZrB<sub>2</sub> coating prepared on graphite by chemical vapor deposition // Physica status solidi. – 2016. – T. 253. №8. – C. 1590-1595.

## Приложение А

### Публикации



United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



International  
Competence Centre for  
Mining-Engineering Education

**Санкт-Петербургский горный университет**

**VIII Международная научно-практическая конференция  
«ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ГОРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ  
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ: IPDME-2021»**



**22-23 апреля 2021  
Санкт-Петербург**

**ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:**

**В.В. МАКСАРОВ**, профессор, декан механико-машиностроительного факультета, Горный университет

**ЧЛЕНЫ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА:**

**В.А. ШПЕНСТ** – профессор, декан энергетического факультета, зав. кафедрой электроэнергетики и электромеханики, Горный университет;

**В.И. АЛЕКСАНДРОВ** – профессор кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Горный университет;

**А.С. АФАНАСЬЕВ** – профессор, зав. кафедрой транспортно-технологических процессов и машин, Горный университет;

**К.В. ГОГОЛИНСКИЙ** – зав. кафедрой метрологии, приборостроения и управления качеством, Горный университет;

**В.А. ЛЕБЕДЕВ** – профессор, зав. кафедрой теплотехники и теплоэнергетики, Горный университет;

**А.В. МИХАЙЛОВ** – профессор кафедры машиностроения, Горный университет;

**В.В. НОСОВ** – профессор кафедры метрологии, приборостроения и управления качеством, Горный университет;

**Е.И. ПРЯХИН** – профессор, зав. кафедрой материаловедения и технологии художественных изделий, Горный университет;

**И.И. РАСТВОРОВА** – профессор, зав. кафедрой электронных систем, Горный университет;

**В.А. СЯСЬКО** – профессор, генеральный директор ООО «КОНСТАНТА»;

**Я.Э. ШКЛЯРСКИЙ** – профессор, зав. кафедрой общей электротехники, Горный университет;

**А.Д. ХАЛИМОНЕКО** – зам. декана механико-машиностроительного факультета, доцент кафедры машиностроения, Горный университет;

**Д.М. ШАРАПОВА** – зам. декана механико-машиностроительного факультета, ассистент кафедры материаловедения и технологии художественных изделий, Горный университет.

**ЧЛЕНЫ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:**

**ФРАНК ЯНАС** – генеральный директор ООО «Цеппелин Русланд»;

**PETER HENNIG** – заместитель генерального директора Siemens Tesberg (Германия);

**STANISŁAW PIROG** – профессор, Краковская Горно-металлургическая Академия (Польша);

**LIERI OLT** – профессор, университет естественных наук г. Тарту (Эстония);

**EGBERT VAAKE** – профессор, Ганноверский университет им. Готфрида Вильгельма Лейбница (Германия);

**LILIANA MEDIC PEJIC** – заместитель декана по международным связям, Мадридский Технический университет (Испания);

**ШАРАВЫН БЯМБА** – профессор, Механический транспортный институт, Монгольский государственный университет науки и технологий;

**А.С. БОНДАРЧУК** – председатель Комитета по энергетике и инженерному обеспечению Санкт-Петербурга;

**А.А. ЗАГРИЦЕНКО** – генеральный директор ИКЦ «Северная Корона»;

**Р.А. КОНДРАТЬЕВ** – генеральный директор ООО «Завод Буровых Технологий»;

**А.А. ПОПОВИЧ** – директор института металлургии, машиностроения и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

**О.А. ПРОДУС** – генеральный директор ООО «ИНКО-инжиниринг»;

**А.В. СТЕБНЕВ** – директор электромеханической дирекции – главный механик АО «СУЭК-Кузбасс»;

**А.Л. СТРЕКАЛОВ** – генеральный директор ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П.Г. Коробкова»;

**В.И. ШМИДТ** – директор подразделения Горной и карьерной техники ООО «Цеппелин Русланд».

## ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

**22 апреля 2021 г.**

**10.00 – 13.40**

- 10<sup>00</sup> – 10<sup>20</sup> **Максаров Вячеслав Викторович** (декан механико-машиностроительного факультета, Горный университет)  
*Перспективы развития горного машиностроения*
- 10<sup>20</sup> – 10<sup>40</sup> **Шпенст Вадим Анатольевич** (декан энергетического факультета, Горный университет)  
*Новые научные направления в развитие энергетики*
- 10<sup>40</sup> – 11<sup>00</sup> **Пряхин Евгений Иванович** (профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии художественных изделий, Горный университет);  
*Диффузионное насыщение легирующими элементами поверхности деталей в расплавах легкоплавких металлов*
- 11<sup>00</sup> – 11<sup>20</sup> **Афанасьев Александр Сергеевич** (профессор, заведующий кафедрой транспортно-технологических процессов и машин, Горный университет)  
*Перспективное оборудование для диагностирования автомобильной техники*
- 11<sup>20</sup> – 11<sup>40</sup> **Михайлов Александр Викторович** (профессор кафедры машиностроения, Горный университет)  
*Инновации при освоении торфяных месторождений*
- 11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup> **Гоголинский Кирилл Валерьевич** (профессор, заведующий кафедрой метрологии, приборостроения и управления качеством, Горный университет)  
*Современные тенденции развития метрологии и приборостроения в эпоху четвертой промышленной революции*
- 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup> **Растворова Ирина Ивановна** (заведующая кафедрой электронных систем, Горный университет)  
*Тренд в подготовке специалистов электронной промышленности*

**Международная научно-практическая конференция IPDME-2021**

- 12<sup>00</sup>– 12<sup>40</sup> *Васильева Мария Александровна (доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин)  
Исследование распределения усилия в магнитном перистальтическом насосе в зависимости от концентрации магнитоактивного наполнителя в материале рабочего канала*
- 12<sup>40</sup>– 13<sup>00</sup> *Ложкин Владимир Николаевич (профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России»)  
О глобальной эффективности применения топливных микрозмольсий и каталитических конверторов в секторе минерально-сырьевой энергетики России*
- 13<sup>00</sup>– 13<sup>20</sup> *Петер Хенинг (заместитель генерального директора ООО «ЗИМАГ ТЕКБЕРГ»)  
Горно-шахтное и промышленное подъемно-транспортное оборудование компании ЗИМАГ ТЕКБЕРГ*
- 13<sup>20</sup>– 13<sup>40</sup> *Шибанов Даниил Александрович (менеджер дирекции по конструированию горного оборудования ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова»)  
Перспективы развития горного оборудования компании ИЗ-КАРТЭКС*

## СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЕ

23 апреля 2021 г.

### Секция 1. Автоматизация производства и технологии машиностроения

**Председатель:**

**В.В. Максаров** – д.т.н., профессор, декан механико-машиностроительного факультета, Горный университет

**Сопредседатель:**

**А.Д. Халимоненко** – к.т.н., зам. декана механико-машиностроительного факультета, Горный университет

*Басова Татьяна Владимировна, Андреев Юрий Сергеевич, Басова Мария Владимировна.* Активный контроль резбовых фрез на станке с ЧПУ при помощи бесконтактных систем измерения инструмента.

*Васильев Алексей Константинович, Владимир Алексеевич Дьяченко.* Новый привод мехатронного ударного стенда.

*Васильков Дмитрий Витальевич, Александров Александр Сергеевич, Голикова Варвара Валентиновна, Кочина Татьяна Борисовна.* Неразрушающий контроль остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из жаропрочных сплавов после механической обработки.

*Ершов Дмитрий Юрьевич, Злотников Евгений Глебович.* Разбег привода при линейном изменении управляющего воздействия.

*Ефимов Александр Евгеньевич.* Моделирование динамических характеристик процесса растачивания изделий из разнородных сталей.

*Кексин Александр Игоревич, Филипенко Ирина Анатольевна.* Способ подготовки кромок алюминиевых изделий перед сваркой.

*Козлович Андрей Владимирович, Волков Андрей Николаевич, Шабанов Дмитрий Вячеславович.* Исследование сил сопротивления в зоне контакта уплотнения и пола мобильной роботизированной платформы на воздушной подушке.

*Колесникова Дарья Викторовна, Юрьева Радда Алексеевна.* Повышение надежности принятия решений в процессе технологической подготовки производства.

Международная научно-практическая конференция IPDME-2021

*Ларин Михаил Юрьевич, Волков Андрей Николаевич.* Понижение максимальной потребляемой мощности группы глубинных штанговых насосов с мехатронным приводом путем оптимизации алгоритма управления.

*Логинов Николай Юрьевич, Дятлов Роман Юрьевич, Салабаев Денис Евгеньевич.* Выбор износостойкого покрытия для концевых фрез.

*Лутов Денис Александрович.* Пример рационального подбора пар трения механизма.

*Любич Валерий Константинович, Сочава Марианна Валерьевна, Хомицевич Нина Анатольевна.* Разработка макета двухзвенного манипулятора для исследования алгоритмов согласованного управления.

*Мацко Ольга Николаевна.* Оптимизация мехатронных приводов автоматизированного оборудования.

*Перешило Кирилл Николаевич, Андреев Юрий Сергеевич.* Влияние метода изготовления деталей датчика уровня топлива летательных аппаратов на параметры надежности данных изделий.

*Сайпулаев Гасан Русланович, Меркурьев Игорь Владимирович, Орлов Игорь Викторович, Чан ТуанЧунг.* Роботизированное устройство для автоматизации контроля состояния тросов в горнодобывающей промышленности.

*Синюков Алексей Владимирович, Синюкова Татьяна Викторовна, Лесникова Виктория Викторовна.* Модернизация оборудования транспортировки грузов для горнодобывающей промышленности.

*Тимофеев Дмитрий Юрьевич, Халимоненко Алексей Дмитриевич.* Обоснование конструкции инструмента для отрезной операции.

*Хрусталева Ирина Николаевна, Ларионова Татьяна Анатольевна, Любомудров Сергей Александрович, Черных Лариса Георгиевна, Леонтьева Надежда Владимировна.* Определение рациональных режимов резания технологических переходов поточной линии на основе имитационного моделирования.

*Цветков Максим Борисович, Меркурьев Игорь Владимирович, Ястремский Артем Валерьевич, Чан Туан Чунг.* Разработка макета робота для исследования физико-механических свойств конструкционного материала

*Штрекер Денис Сергеевич, Полищук Михаил Нусимович, Попов Аркадий Николаевич.* Исследование факторов, влияющих на параметры ударных импульсов.



Продолжение Приложения А

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ГОРНЫЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# СЕРТИФИКАТ

ВЫДАН

**ДЯТЛОВУ  
РОМАНУ ЮРЬЕВИЧУ**

ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УЧАСТНИКУ

**МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ГОРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ  
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ: IPDME-2021**

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского  
горного университета



М.В. Иванов

Санкт-Петербург  
2021

Продолжение Приложения А

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ГОРНЫЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# СЕРТИФИКАТ

ВЫДАН

**ЛОГИНОВУ  
НИКОЛАЮ ЮРЬЕВИЧУ**

ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УЧАСТНИКУ

МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ГОРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ  
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ: IPDME-2021

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского  
горного университета



М.В. Иванов

Санкт-Петербург  
2021

## Продолжение Приложения А

**Дятлов Роман Юрьевич**  
**Логинов Николай Юрьевич**  
**Салабаев Денис Евгеньевич**

Тольяттинский государственный университет

### **ВЫБОР ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ**

**Аннотация.** В статье проводится обзор износостойких покрытий для концевых фрез. Анализируются различные методы и химические составы покрытий. Сделаны выводы и даны рекомендации по способу и составу покрытий применительно к данному режущему инструменту.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, концевые фрезы.

### **CHOICE OF WEAR-RESISTANT COATING FOR END MILLS**

**Dyatlov Roman**  
**Loginov Nikolay**  
**Salabaev Denis**  
Togliatti State University

**Abstract.** The article provides an overview of wear-resistant coatings for end mills. Various methods and chemical compositions of coatings are analyzed. Conclusions are drawn and recommendations are given on the method and composition of coatings applied to this cutting tool.

**Keywords:** wear-resistant coatings; end mills.

Концевые фрезы являются многоцелевым режущим инструментом. Эти инструменты используют для обработки различных бобышек, узких пазов, карманов небольших размеров. На сегодняшний день для увеличения износостойкости режущего инструмента и увеличения его жизненного цикла применяют различные износостойкие покрытия. Причем покрытия наносят на различные виды инструментального материала, будь то инструментальные стали или твердые сплавы.

С экономической точки зрения нанесение износостойких покрытий выгодно, ведь одной из весомых статей затрат при определении себестоимости технологической операции является расход на режущий инструмент. Также нанесение износостойкого покрытия на инструмент увеличивает возможности самого инструмента, в том что открывает возможность увеличения режимов обработки, а это приводит к повышению производительности операций и снижению машинного и операционного времени. Еще одним преимуществом использования инструмента с износостойким покрытием является то, что таким инструментом можно обрабатывать с малым расходом СОЖ или вообще ее не использовать. Это тоже отражается на себестоимости операции.

На сегодняшний день существует множество методов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент. Эти методы можно разделить на две группы:

1) методы химико-термического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition) с сокращенной аббревиатурой CVD;

2) методы физического осаждения покрытия в вакууме (Physical Vapor Deposition) с сокращенной аббревиатурой PVD.

Технологиями CVD создаются различные по химическому составу износостойкие слои покрытия толщиной до сотен микрометров.

Выбор метода и оборудования для CVD происходит в несколько этапов. На первом этапе определяются функциональные свойства, которыми должно обладать покрытие [1, 2, 3]. На втором этапе формулируются свойства верхнего слоя покрытия, где формулируются ограничения состава и его возможным примесям и так далее. На третьем этапе выбирают технологию нанесения данного покрытия, схему процесса, а также технологическое оборудование для нанесения.

Недостатком химического осаждения является то, что наибольшее налипание слоя покрытия происходит на заостренных участках инструмента, одним из которых является режущая кромка, что приводит к ее скруглению и затуплению.

Процессы, протекающие при CVD идут при значительных температурах (1000°C и выше), что значительно снижает перечень материалов, но которые возможно нанести покрытия этими методами.

Методы PVD отличаются от методов химического осаждения более низкими температурами реализации (не более 600°C), что позволяет их использовать не только для нанесения покрытий на тугоплавкие материалы, которыми являются, например, твердые сплавы, но и на инструментальные стали и даже на конструкционные материалы. Методы PVD характеризуются равномерностью нанесения покрытий по всей площади изделий, что делает их более привлекательными для упрочнения режущего инструмента с острой режущей кромкой. Также эти методы характеризуются более тонкой толщиной формируемого покрытия, что приводит к его более быстрому разрушению.

Основой нанесения покрытий методами PVD заключается в том, что создается испарение или распыление вещества в вакуумной камере, где находится покрываемое изделие. Далее в камеру подается реакционный газ. В результате реакции распыленного вещества и газа на поверхность изделия конденсируется получаемое покрытие.

Из методов PVD наибольшее распространение получили конденсация ионной бомбардировкой (КИБ), ионное плакирование и магнетронное распыление.

Методы PVD более выгодны для нанесения покрытий на режущий инструмент в отличие от методов CVD ввиду более эффективного управления процессами нанесения и, соответственно, управлением свойствами формируемых покрытий. [32]

Авторами [11] описано проведение трибологических испытаний образцов с многослойными покрытиями  $AlN/TiN$ ,  $TiN/CrN$ ,  $AlN/CrN$ , нанесенными на инструмент из быстрорежущей стали Р6М5. Покрытие наносилось методом физического осаждения из паровой фазы (PVD). Толщина покрытий, включая адгезионный слой, составляла 3...3,5 мкм.

В работе [9] проводились экспериментальные исследования покрытий  $TiN$ ,  $TiCrN$ ,  $TiCrAlN$ ,  $TiCrZrN$ , нанесенные на резбонарезные пластины Н13А фирмы Sandvik Coromant. Инструмент проходил испытания при точении заготовок из стали 30ХГСА при скорости резания  $V = 80$  и  $120$  м/мин.

Авторы [9] отмечают, что многоэлементные покрытия  $TiCrN$ ,  $TiCrAlN$ ,  $TiCrZrN$  имеют большую микротвердость в отличие от  $TiN$ , а покрытие  $TiN$  обладает большим коэффициентом сцепляемости с основной, что способствует меньшему уровню отслоения покрытия от основы. Также отмечается, что многоэлементные покрытия имеют увеличенный критический коэффициент интенсивности напряжений и больший модуль Юнга, что способствует увеличению сопротивляемости покрытия хрупкому разрушению и повышению энергии связей между атомами соответственно.

Самые большие усилия резания наблюдались у инструмента без покрытия. Нанесение покрытия  $TiN$  способствует снижению сил резания на 6...8%. При переходе от одноэлементного покрытия к многоэлементным наблюдался рост составляющих сил резания на 2...5%. Инструмент с покрытием в отличие от инструмента без покрытия имеет меньшую интенсивность износа в 1,4...2,2 раза, причем при увеличении скорости

резания этот эффект увеличивается. Наилучшие показатели по интенсивности износа выявились у покрытия  $TiCrZrN$ . [9]

Авторами [27] проводились исследования токарных резбовых резцов с твердосплавными пластинами. На пластины наносились следующие покрытия:  $TiN$ ,  $TiCrN$ ,  $TiCrZrN$ . Внимание акцентировалось на величину пластической деформации стружки, т.к. этот фактор зависит от теплового состояния режущего инструмента. Измеряли микротвердость стружки.

Выявлено, что при работе инструмента с износостойкими покрытиями микротвердость стружки меньше, чем у инструмента без покрытия, что говорит о ее меньшей деформации в связи с меньшей силовой нагрузкой на режущий клин. Причем снижение микротвердости стружки больше возле режущего клина, а меньше на противоположной ее стороне. [27]

Также были в [27] исследованы температурные поля, возникающие при обработке. Наименьшие температуры наблюдались при работе инструмента с покрытием  $TiN$ . Но у инструментов с покрытиями  $TiCrN$ ,  $TiCrZrN$  в отличие от образцов без покрытия снижение температур было все же заметно.

Таким образом, сделан вывод о положительном эффекте нанесения многоэлементных покрытий на режущий инструмент, не смотря на затратность процесса. [32]

Авторами [23] отмечается, что разрушение покрытия, нанесенного на режущий инструмент характеризуется появлением и ростом сетки из трещин. Поэтому эффективными мероприятиями для увеличения износостойкости инструмента можно сгруппировать так:

- 1) мероприятия по снижению величины переменных тепловых и силовых нагрузок;
- 2) мероприятия по снижению адгезионных связей материалов покрытия и обрабатываемого материала (это достигается при кардинальном отличии кристаллохимического строения материала покрытия и обрабатываемого материала; при многослойном покрытии этими свойствами должен обладать самый верхний слой);
- 3) повышение диффузионных и адгезионных связей между материалами покрытия и основы инструмента (при многослойном покрытии самый нижний слой, прилегающий к основе, выполняют максимально идентичным по кристаллохимическому строению с основной);
- 4) повышение трещиностойкости и прочности материала покрытия.

Переходные (внутренние слои) многослойного покрытия можно делать из соединений, имеющих повышенную хрупкость, которые не совместимы по кристаллохимическим свойствам с инструментальным материалом, например,  $Si_3N_4$ ,  $HfB_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ . Кроме этого, данные соединения имеют другие важные характеристики для комплексного покрытия, такие как, например, термодинамическая устойчивость или повышенная твердость.

Исследователями [26] отмечается, что при переходе от однокомпонентных покрытий к двухкомпонентным износостойкость режущего инструмента повышается в 1,5 – 4 раза. А при переходе от двухкомпонентных к трехкомпонентным покрытиям стойкость повышается в 1,5 – 1,7 раза.

В работе [16] представлены результаты испытаний образцов с нанопокрытиями, у которых размер зерен менее 100 нм. Исследования проводились при точении заготовок из стали 45. Быстрее всего подвергался износу инструмент без покрытия, а наибольшую стойкость показал инструмент с покрытием  $TiN + TiAlN$ .

Наибольший эффект по износостойкости инструмента с износостойким покрытием достигается при получистовом и чистовом фрезеровании с умеренными подачами. [8]

Авторами [19] описан способ получения износостойкого покрытия на твердосплавном режущем инструменте. Покрытие наносилось вакуумно-плазменным методом. Пластины из твердого сплава МК8 помещали в вакуумную камеру установки

«Булат-6». В эту же камеру помещали три катода и располагали их в одной плоскости в горизонтальном положении. В камере создают давление  $6,65 \times 10^{-3}$  Па. На изделие подают отрицательное напряжение равное 1,1 кВ.

Далее [19] проводились испытания пластин с покрытиями. Стойкость многокомпонентного покрытия, нанесенного описанным способом, выше, чем у остальных образцов.

Авторами [20] отмечается, что в качестве химических методов осаждения покрытий на режущий инструмент применяются высокотемпературный и среднетемпературный методы химического осаждения (HT-CVD и MT-CVD соответственно), а также метод химического осаждения с плазменным сопровождением (PA-CVD). А в качестве физических методов осаждения применяются методы электронно-лучевого испарения, магнетронного распыления и вакуумно-дугового испарения.

При выборе методов [20] отмечается, что ввиду высокой производительности и малой чувствительности к незначительным отклонениям технологических параметров наибольшее распространение получили методы физического осаждения (PVD).

Толщина покрытия является неоднозначным показателем. С одной стороны рост толщины приводит к повышению износостойкости площадок контакта. С другой стороны при этом увеличивается количество дефектов в поверхностном слое и снижается сила сцепления покрытия с основой. Поэтому при прерывистом характере резания, в том числе при фрезеровании, на инструмент рекомендуется наносить покрытие толщиной не более 5 мкм. А, например, на режущих пластинах токарных резцов толщина покрытия может быть до 15 мкм. [10]

Возможно упрочнение режущих поверхностей фрез из инструментальных сталей методом электроискрового нанесения покрытий. Этим методом на поверхности наносится слой из упрочняющего материала, который, перемешиваясь с материалом основы, изменяет химический состав поверхностного слоя, насыщая его карбидами вольфрама, титана и другими соединениями, содержащимися в составе упрочняющего электрода. [15, 16]

Таким образом, острозаточенный режущий инструмент с режущей кромкой небольших размеров рекомендуется упрочнять методами PVD (физического осаждения), а крупный на инструмент покрытие лучше наносить методами CVD (химического осаждения), так как они менее затратны.

Многослойные покрытия имеют большую износостойкость при правильном подборе их химического состава по функциональности. Наружный слой должен являться барьером, который снижает физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов, снижает склонность инструментального материала к окислению при повышенных температурах резания. Средний слой должен обладать кристаллохимической совместимостью с подложкой. А нижний слой должен являться хорошей связкой и повышать прочность адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.А. Создание износостойких покрытий для режущего инструмента / В.А. Александров, В.М. Вдовин, А.С. Сергеева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. №11. С. 85-89.
2. Kern W. Thin film processes II. – Academic press, 2012. Т. 2.
3. Wang P. Polycrystalline ZrB<sub>2</sub> coating prepared on graphite by chemical vapor deposition // Physica status solidi. – 2016. – Т. 253. №8. – С. 1590-1595.
4. Исаев Д.Т. Методы различными покрытиями пластин из твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов / Д.Т. Исаев, З. Умарова, Г. Мажимова // В сборнике статей XXV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 47-79.

5. Дрималовский Е.И. Особенности нанесения твердых покрытий на режущий инструмент / Е.И. Дрималовский, Е.А. Памфилов // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. №29. С. 33-36.
6. Табаков В.П. Применение износостойких покрытий при резьбонарезании / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». №1(19). 2012. – С. 15-19.
7. Сагитов Д.И. Исследование влияния износостойких покрытий на характеристики теплового состояния токарных резьбовых резцов / Д.И. Сагитов, В.П. Табаков // В сборнике трудов: Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства. Труды IV Международной научно-технической конференции. 2015. С. 145-149.
8. Оганян Г.В. Совершенствование твердосплавного инструмента с целью повышения производительности механической обработки / Г.В. Оганян, М.Г. Оганян // Вестник МГТУ «Станкин», №4(43). 2017. С. 22-27.
9. Табаков В.П. Износостойкие ионно-плазменные покрытия режущих инструментов / В.П. Табаков, Н.А. Ширманов, М.Ю. Смирнов, А.В. Циркин // Фундаментальные исследования, №8. 2005. С. 92-93.
10. Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровтий для применения в инструментальном производстве // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета. 2010. №1-1(1). С. 92-98.
11. Исаев Д.Т. Методы различными покрытиями пластин из твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов / Д.Т. Исаев, З. Умарова, Г. Мажимова // В сборнике статей XXV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 47-79.
12. Патент 2648814 Российская Федерация МПК С 23 С 14/24. Способ получения износостойкого покрытия для режущего инструмента / В.П. Табаков, А.В. Чихранов, Д.И.Сагитов, М.В. Полозов; ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (RU). – 2017107926 заявл. 10.03.2017; опубл. 28.03.2018, Бюл. №10. – 5 с.
13. Дрималовский Е.И. Особенности нанесения твердых покрытий на режущий инструмент / Е.И. Дрималовский, Е.А. Памфилов // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. №29. С. 33-36.
14. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента : учебник для студентов втузов. – М. : Машиностроение, 2009. – 368 с.
15. Логинов Н.Ю. Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 2 (146). С. 67-70.
16. Логинов Н.Ю. Исследование величины коэффициента трения образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 3 (29). С. 72-76.