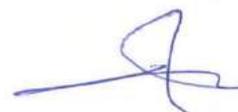


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



АЛЬ-КАДХИМИ МОХАММЕД ФАЙЯДХ ДЖАССАМ

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ  
СВЕРЛ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ  
МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор **ТАБАКОВ В.П.**

Ульяновск – 2022

## Содержание

Список основных сокращений и обозначений .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ .....	11
1.1. Технологии формирования отверстий в стальных заготовках спиральными сверлами.....	12
1.2. Физико-технические особенности процесса сверления спиральными сверлами с износостойкими покрытиями.....	19
1.3. Пути и средства разработки высокоэффективных износостойких покрытий спиральных сверл.....	31
1.4. Выводы. Цель и задачи работы .....	43
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ С ОДНОСЛОЙНЫМИ ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ.....	46
2.1. Методика экспериментальных исследований .....	46
2.2. Технология нанесения однослойных износостойких покрытий .....	55
2.3. Исследование параметров структуры и механических свойств однослойных износостойких покрытий.....	59
2.4. Исследование процесса резания спиральными сверлами с однослойными износостойкими покрытиями .....	64
2.5. Выводы .....	69
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ.....	71
3.1. Принцип формирования и выбор состава функциональных слоев многослойного покрытия спиральных сверл.....	71
3.2. Численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спиральных сверл с однослойными износостойкими покрытиями .....	74
3.3. Архитектура и технология нанесения многослойных покрытий .....	85
3.4. Исследование параметров структуры и механических свойств многослойных покрытий .....	88
3.5. Исследование интенсивности изнашивания спиральных сверл с многослойными покрытиями.....	98
3.6. Выводы .....	100

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ .....	102
4.1. Исследование процесса сверления спиральными сверлами с многослойными покрытиями.....	102
4.2. Исследование работоспособности спиральных сверл с многослойными покрытиями.....	105
4.3. Опытно-промышленные испытания спиральных сверл с многослойными покрытиями .....	108
4.4. Экономическая эффективность применения спиральных сверл с многослойными покрытиями .....	109
4.5. Выводы.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	118
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	135

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ARE – реактивный ионно-плазменный метод осаждения покрытий;
- $\sigma_0$  – остаточные напряжения, МПа;
- $\sigma_{1,2}$  – главные нормальные напряжения, МПа;
- $\beta_{111}$  – величина полуширины рентгеновской линии, град;
- $\tau_F$  – касательные контактные напряжения, МПа;
- $\sigma_N$  – нормальные контактные напряжения, МПа;
- $\Theta_z$  – температура на задней поверхности, °С;
- $\Theta_n$  – температура на передней поверхности, °С;
- $\sigma_{экс}$  – эквивалентные напряжения, МПа;
- $a$  – период кристаллической решетки, нм;
- $C_y$  – полная длина контакта стружки по передней поверхности, мм;
- $C_n$  – длина лунки износа по передней поверхности, мм;
- $C_n$  – длина полочки на передней поверхности, мм;
- $E$  – модуль Юнга, МПа;
- $H_\mu$  – микротвердость, МПа;
- $h_\gamma$  – величина опускания вершины режущего клина, мкм;
- $h_z$  – фаска износа по задней поверхности, мм;
- $h_{z.в.}$  – фаска износа по задней поверхности у вершины инструмента, мм;
- $h_{z.п.}$  – фаска износа по задней поверхности у поверхности заготовки, мм;
- $h_n$  – глубина лунки износа по передней поверхности, мм;
- $h_n$  – износ инструмента в направлении передней поверхности, мм;
- $h_{n.n.}$  – опускание поверхности полочки, мм;
- $h_m$  – глубина усов износа на передней поверхности инструмента, мм;
- $J$  – интенсивность износа по задней поверхности, мм/м;
- $J_{111}/J_{200}$  – параметр текстуры покрытия;
- $K_{IC}$  – Коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м<sup>1/2</sup>;
- $K_L$  – коэффициент укорочения стружки;
- $Kn_m$  – коэффициент повышения запаса пластической прочности;
- $K_o$  – коэффициент отслоения;
- $P_z$  – главная составляющая силы резания, Н;
- $P_x$  – осевая составляющая силы резания, Н;
- $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;
- $Q$  – мощность итогового теплового потока в режущий инструмент, Вт;
- $q_\delta$  – интенсивность источника теплоты деформации, Вт/м<sup>2</sup>;
- $q_z$  – интенсивность источника теплоты со стороны задней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_3$  – мощность теплового потока со стороны задней поверхности, Вт;  
 $q_n$  – интенсивность источника теплоты со стороны передней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $Q_n$  – мощность теплового потока со стороны передней поверхности, Вт;  
 $q_{mn}$  – интенсивность источника теплоты трения на передней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $S$  – подача, мм/об;  
 $t$  – глубина резания, мм;  
 $T$  – период стойкости, мин;  
 $T_1$  – время работы режущего инструмента до образования трещин на участке упругого контакта стружки с передней поверхностью, мин;  
 $T_2$  – время работы режущего инструмента до образования трещин на участке пластического контакта стружки с передней поверхностью, мин;  
 $V$  – скорость резания, м/мин;  
 $V_o$  – оптимальная скорость резания, интенсивность износа при которой минимальна, м/мин;  
КИБ – метод конденсации покрытия из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности инструмента;  
МИР – магнетронно-ионное распыление;  
РЭП – реактивный электронно-лучевой плазменный метод осаждения покрытий;  
ФОП – физическое осаждение покрытия;  
ХОП – химическое осаждение покрытия.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Сверление отверстий является одной из самых распространённых операций механической обработки в современном производстве. Процесс сверления протекает в сложных условиях, связанных с затрудненным теплоотводом и отводом стружки из зоны обработки. Одновременная работа большого числа режущих кромок и наличие поперечной кромки, которая сминает металл, усложняет процесс стружкообразования при сверлении и вызывают интенсивный износ инструмента. Повышение эффективности процесса сверления можно добиться путем нанесения на контактные площадки сверл износостойких покрытий, которые находят очень широкое применение.

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в области разработки и применения износостойких покрытий для режущего инструмента, остаются нерешенными вопросы, связанные с влиянием покрытий на функциональные процессы резания при сверлении, не раскрыто влияние покрытий на тепловое состояние спиральных сверл с покрытием. Не раскрыто влияние покрытий на контактные процессы при сверлении и интенсивность изнашивания спиральных сверл.

Учитывая, что на данный момент отсутствуют методика оценки теплового состояния спиральных сверл с покрытиями, учитывающая особенности процесса сверления, и рекомендации по формированию архитектуры и конструкции многослойных износостойких покрытий, а именно – толщинам слоев и их взаимному расположению, общей толщине многослойного покрытия, можно утверждать, что настоящее диссертационное исследование, посвященное повышению работоспособности спиральных сверл путем разработки и применения многослойных износостойких покрытий является актуальным.

**Цель диссертационной работы** заключается в повышении работоспособности спиральных сверл путем разработки и применения многослойных износостойких покрытий.

**Объектом исследований** является процесс сверления спиральными сверлами с износостойкими покрытиями.

**Предметом исследований** являются закономерности взаимосвязи состава и конструкции износостойких покрытий с функциональными параметрами процесса сверления и работоспособностью спиральных сверл.

Для достижения цели работы в диссертации решены **следующие задачи:**

1. Выявлены доли деформационно-силовой нагрузки, приходящиеся на главные и вспомогательные режущие кромки и поперечную кромку для сверл без покрытия и с износостойкими покрытиями различного состава.

2. Разработана методика расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла, учитывающая долю деформационно-силовой нагрузки, приходящейся на различные кромки сверла.

3. Исследованы структурные параметры и механические свойства износостойких покрытий, выбранных в качестве функциональных слоев многослойных покрытий и установлено влияние состава износостойких покрытий на функциональные параметры процесса сверления.

4. На основе комплексной оценки результатов численного моделирования теплового состояния режущего клина инструмента, влияния состава износостойких покрытий на функциональные процессы при сверлении, механических свойств износостойких покрытий и интенсивности изнашивания спиральных сверл определены требования, предъявляемые к покрытиям, и предложены архитектуры многослойных покрытий для спиральных сверл.

5. На основе выявленных взаимосвязей структурных параметров и механических свойств износостойких покрытий и интенсивности

изнашивания сверл разработаны конструкции многослойных покрытий для спиральных сверл и технологические режимы их нанесения.

6. Экспериментально показана повышенная работоспособность сверл с разработанными многослойными покрытиями, подтвержденная опытно-промышленными испытаниями в условиях действующего производства.

**Методы исследования.** Реализация цели и решение поставленных задач в работе обеспечиваются применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, теории резания, материаловедения, математического моделирования и подтверждается корректным соотношением результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**На защиту выносятся следующие основные положения составляющие научную новизну:**

1. Методика расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла, учитывающая доли деформационно-силовой нагрузки, приходящиеся на главные и вспомогательные режущие и поперечную кромки.

2. Результаты численного моделирования теплового состояния спирального сверла, позволившие выявить влияние износостойких покрытий на процесс теплообразования на режущих и поперечной кромках.

3. Закономерности влияния конструкции многослойных покрытий на параметры структуры, механические свойства и интенсивность изнашивания спиральных сверл.

4. Математические модели периода стойкости спиральных сверл с разработанными многослойными покрытиями.

**Практическая ценность работы заключается в следующем:**

1. Рекомендации по формированию архитектуры многослойных покрытий спиральных сверл, соотношению толщин слоёв и общей

толщины покрытия, обеспечивающих высокую работоспособность инструмента.

2. Технологические параметры процесса нанесения многослойных покрытий: компоновочные схемы, время осаждения слоёв, опорное напряжение, ток дуги, ток фокусирующих катушек.

#### **Достоверность полученных результатов.**

Работа выполнена с использованием основных положений теории резания металлов, современных методов микрорентгеноструктурного анализа, математических методов моделирования и статистической обработки экспериментальных данных на ЭВМ. Теоретические положения работы подтверждены лабораторными исследованиями и производственными испытаниями, а также сопоставимы с результатами работ других авторов по аналогичным исследованиям.

**Реализация результатов работы.** Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях завода АО «Ульяновский механический завод» (г. Ульяновск), подтвердили высокую работоспособность спиральных сверл с разработанными многослойными покрытиями. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (Приложение 2).

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы доложены на 3 научно-технических конференциях, на научно-техническом семинаре кафедры «Инновационные технологии в машиностроении» (УлГТУ, г. Ульяновск).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ и 1 статья в издании из базы цитирования Scopus.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (183 наименования) и

одного приложения, включает 137 страниц машинописного текста, 37 рисунков и 25 таблиц.

# **ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

Режущий инструмент на операциях сверления заготовок работает в условиях воздействия ряда разрушающих факторов, обусловленных высокими температурами, контактными напряжениями, активным протеканием физико-химических процессов, что приводит к его изнашиванию в условиях абразивного воздействия обрабатываемого материала, адгезионных, диффузионных и окислительных процессов, разупрочнению локальных объемов инструментального материала. Очевидно, что работоспособность инструмента может быть повышена за счет такого изменения свойств инструментального материала, при котором контактные площадки режущего инструмента будут наиболее эффективно сопротивляться различным видам изнашивания и термомеханическим нагрузкам [1-9].

Исследованию вопросов повышения работоспособности режущего инструмента вообще, и сверлильного инструмента в частности, посвящено большое количество работ российских и зарубежных исследователей: А.С. Верещаки, Г.И. Грановского, С.Н. Григорьева, Н.Н. Зорева, Ю.Г. Кабалдина, М.В. Касьяна, Т.И. Лоладзе, А.Х. Маджида, М.Ф. Полетики, А.Н. Резникова, С.С. Силина, В.А. Синопальникова, В.К. Старкова, В.П. Табакова, Н.В. Талантова, Л.Н. Феника и др. Результаты исследований этих авторов позволили выявить механизмы изнашивания режущих инструментов из различных инструментальных материалов, в том числе и с покрытиями, и сыграли важную роль в решении ряда задач теории резания [85-101, 126-177].

Одним из наиболее существенных способов повышения работоспособности сверл является применение износостойких покрытий. Целенаправленное изменение и оптимизация свойств покрытий позволяет наиболее эффективно использовать режущий инструмент в процессе его эксплуатации.

Перед тем, как проанализировать и оценить пути повышения эффективности сверл, рассмотрим специфику и особенности процесса резания при сверлении.

### **1.1. Технологии формирования отверстий в стальных заготовках спиральными сверлами**

Сверление – это один из наиболее распространенных способов получения глухих и сквозных цилиндрических отверстий в сплошном материале.

Сверла применяются для получения отверстий в сплошном материале, рассверливания уже имеющихся отверстий, сверления конических углублений для центров, сверления под резьбу, высверливания и т.д. В зависимости от конструкции и назначения сверла можно классифицировать следующим образом [10, 11]:

- перовые, используемые в основном для сверления отверстий малого диаметра в неметаллических материалах и глубоких отверстий;
- центровочные специальные ( $2\phi=60^0$  и  $2\phi=120^0$ ) одно- и двухсторонние;
- спиральные обычные быстрорежущие и монокристаллические твёрдосплавные с прессованными или вышлифованными канавками;
- для глубокого сверления (перовые, ружейные, пушечные, шнековые, эжекторные, кольцевые);

- специальные (с пластмассовым хвостовиком, спиральные с различными заточками, для сверления и высверливания отверстий в листовых материалах, под нарезание резьбы, под заклепки и т. д.).

Т.к. 80-90% всех сверлильных работ выполняются спиральными (винтовыми) сверлами, то именно на их примере и будем рассматривать особенности процесса резания.

Процесс сверления совершается при двух совместных движениях (рис. 1.1): вращении сверла или детали вокруг оси отверстия (главное движение  $D_T$  со скоростью  $V$ ) и поступательном движении сверла вдоль оси (движение подачи  $D_s$  со скоростью  $V_s$ ). При работе на сверлильном станке сверло совершает оба движения – вращательное вокруг своей оси и поступательное вдоль оси; заготовка закрепляется неподвижно на столе станка. При работе на токарных и револьверных станках, а также на токарных автоматах вращается обрабатываемая заготовка, а сверло совершает перемещение вдоль оси [5].

Процесс резания при сверлении во многом аналогичен точению, но имеет и ряд особенностей [4]. Например, такие физические явления как: укорочение стружки и ее завивание, выделение тепла, наростообразование, упрочнение поверхностного слоя (наклеп), трение стружки о поверхность винтовой канавки, трение задней поверхности о поверхность резания и др. Наряду с этим, процесс резания при сверлении протекает в иных, более тяжелых условиях. Прежде всего, наличие поперечной кромки, которая не режет, а мнет металл, вызывая значительные силы сопротивления на этом участке сверла; в процессе резания принимают участие две главные режущие кромки и две вспомогательные режущие кромки.

По сравнению с точением выход стружки при сверлении более стеснен, подвод смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания также затруднен. Кроме того, режущие кромки сверла на протяжении от периферии к центру имеют переменный передний угол. Изменяется также и скорость резания по длине режущей кромки, что, в свою очередь,

сказывается на изменении деформации в смежных элементах по всей длине режущей кромки: деформация стружки к центру сверла увеличивается.

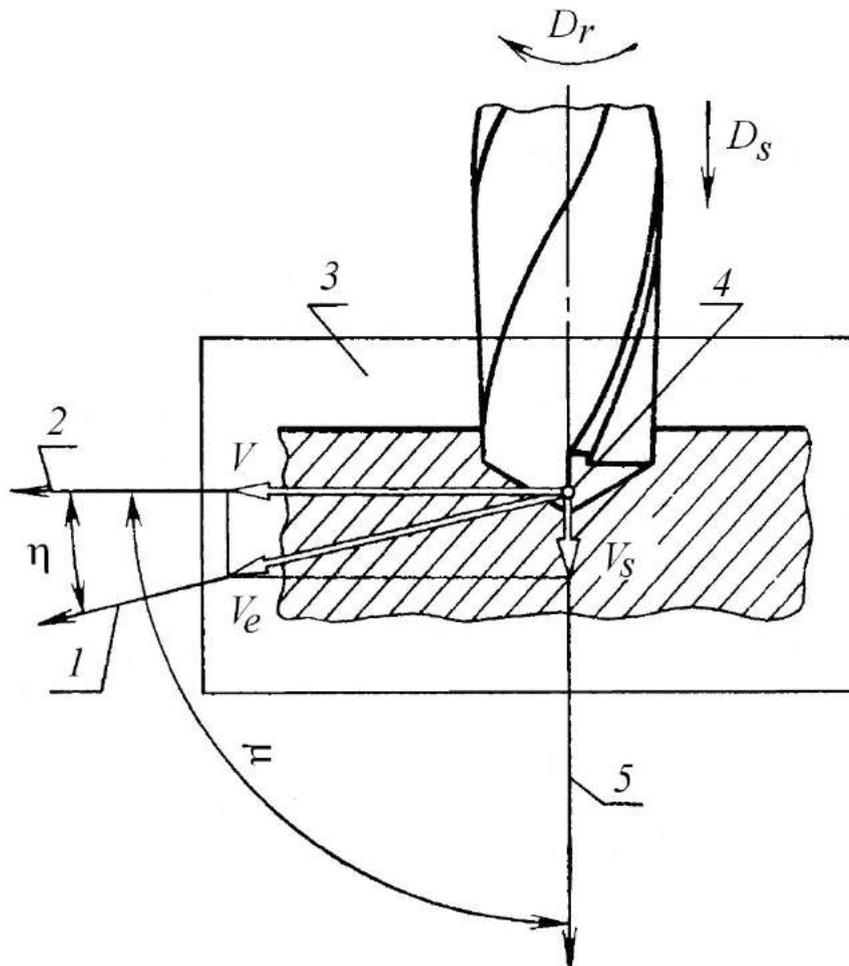


Рис. 1.1. Элементы движений в процессе резания при сверлении [5]:

1 – направление скорости результирующего движения резания; 2 –  
 Направление скорости главного движения резания; 3 – Рабочая плоскость  
 $P_s$ ; 4 – рассматриваемая точка режущей кромки; 5 – Направление скорости  
 движения подачи

Поперечная кромка, имея угол резания больше  $90^\circ$ , работает в тяжелых условиях [10]: она еще значительно деформирует металл, создает повышенные напряжения на этом участке режущего инструмента, что вызывает усиленный износ поперечной кромки сверла. К тому же часть

режущих кромок, примыкающих к перемычке, при более стесненных условиях выхода стружки имеет скорость резания, близкую к нулю. Направляющие ленточки, не имея заднего угла, создают при сверлении значительное трение о поверхность обрабатываемого отверстия, в результате чего сильно изнашиваются.

При сверлении заготовок из пластичных металлов (конструкционные стали) образуется, как и при точении, сливная стружка и режест – элементная; при сверлении заготовок из хрупких металлов (чугуна и бронзы) получают стружку надлома. При сверлении также наблюдаются явления укорочения стружки, образование нароста и теплообразование. Принципиально роль тепла, нароста и условий их образования та же, что и при токарной обработке.

Рассмотрим кратко влияние различных параметров сверла и операции сверления на осевую силу  $P_0$  и момент резания  $M_{кр}$  [6, 7].

Влияние диаметра сверла  $D$  и подачи  $S$ . С увеличением  $D$  и  $S$  увеличивается площадь сечения среза, приходящаяся на главную режущую кромку, вследствие чего осевая сила  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$  возрастают. Однако так же, как и при точении,  $S$  и  $D$  влияют на осевую силу  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$  неодинаково. Если  $S$  влияет на осевую силу  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$  примерно одинаково, то диаметр сверла влияет на  $M_{кр}$  значительно больше, чем на осевую силу  $P_0$ . Последнее объясняется тем, что при увеличении  $D$  одновременно с увеличением сил  $P_z$  увеличивается и плечо, на котором эти силы действуют.

Влияние угла наклона винтовой канавки сверла  $\omega$ . С увеличением  $\omega$  соответственно возрастает и  $\gamma$ , что ведет к снижению работы деформации и, следовательно, к снижению осевой силы  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$ . Экспериментально установлено, что увеличение  $\omega$  более  $25...35^\circ$  существенного влияния на силы резания не оказывает.

Влияние угла при вершине  $2\phi$ . Влияние  $2\phi$  на осевую силу  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$  при сверлении аналогично влиянию угла  $\phi$  на силы

$P_x$  и  $P_z$  при точении. При увеличении угла  $2\phi$  уменьшается сила  $P_z$  на главной режущей кромке и, как следствие, величина  $M_{кр}$ . Так же, как и при точении, увеличение угла  $2\phi$  приводит к увеличению угла между главной режущей кромкой и направлением движения подачи, что увеличивает осевую составляющую  $P_x$  на режущей кромке и, следовательно, осевую силу  $P_0$ .

Влияние длины перемычки  $l_{п}$  и угла ее наклона. Поперечная режущая кромка имеет отрицательное значение переднего угла  $\gamma$ , следовательно, с ее увеличением осевая сила будет расти, поскольку при этом увеличивается сопротивление врезанию. На крутящий момент  $M_{кр}$  этот фактор существенного влияния не оказывает, так как длина поперечной режущей кромки крайне мала по сравнению с длиной главных режущих кромок.

Влияние смазочно-охлаждающей жидкости. Исследованиями установлено положительное влияние жидкости на величину осевой силы  $P_0$  и крутящего момента  $M_{кр}$ . Применение при сверлении жидкостей, и особенно поверхностно-активных, способствует уменьшению осевой силы и момента: на 10...35 % при обработке пластичных металлов (сталей); 10...18 % при обработке чугуна; 30...40 % при сверлении алюминиевых сплавов по сравнению с обработкой всухую.

Влияние качества обрабатываемого металла. С изменением механических и физико-химических свойств обрабатываемых металлов изменяется и их сопротивление сверлению. Характеристиками качества обрабатываемого металла, от которых зависит величина силы резания при сверлении, являются: при обработке стали – предел прочности  $\sigma_b$ ; при обработке чугуна и бронзы – твердость HB.

В процессе сверления режущая часть сверла с течением времени изнашивается. Сверла изнашиваются в результате трения задних поверхностей о поверхность резания, стружки о переднюю поверхность,

направляющих ленточек об обработанную поверхность и смятия поперечной кромки.

Износ сверла по задней поверхности происходит неравномерно: у поперечной кромки износ меньше, чем у периферии. Наиболее опасным видом износа у сверл является износ по уголкам, образуемым главными режущими кромками и ленточками [12]. Эти места являются наиболее напряженными, так как скорость резания в этих местах сверла наибольшая, наибольшее здесь и выделение тепла и соответственно наблюдается и самый интенсивный износ. Например, при обработке стальных заготовок в качестве критерия затупления для сверл из быстрорежущей стали принят износ по задней поверхности у периферии  $h_3 = 1 \dots 1,2$  мм; при сверлении чугунных заготовок сверлами, оснащенными твердым сплавом, за критерий затупления принимается износ по уголкам  $\delta = 0,5 \dots 1,2$  мм. Износ сверл, оснащенных твердым сплавом, при сверлении труднообрабатываемых материалов (жаропрочных и титановых сплавов, а также тугоплавких металлов, например, вольфрама, молибдена и других) обычно происходит по задним поверхностям. Допустимая величина износа лежит в пределах  $h_3 = 0,35 \dots 0,5$  мм, что и необходимо принимать за критерий затупления.

На данный момент разработано и внедрено на предприятиях множество методов повышения стойкости и эффективности спиральных сверл [178-183].

В работе [13] исследовалась стойкость отдельных участков режущей кромки сверла и влияние ее геометрии на общую стойкость. Отмечается, что основной вклад в изменение, а следовательно, в выравнивание стойкости точек режущей кромки вносит выравнивание скорости резания. Полученные результаты показали, что повышение общей стойкости сверла может быть достигнуто путем повышения стойкости самого нагруженного участка режущей кромки, что, в свою очередь, обеспечивается

изготовлением сверла не с прямолинейной режущей кромкой, а с криволинейной.

В работе [14] исследовалась эффективность плазменной поверхностной обработки спиральных сверл из быстрорежущей стали, проводились стойкостные испытания данного инструмента. По результатам работы были выявлены преимущества сверл после плазменной обработки в сравнении со сверлами, обработанными по классической технологии:

- повышение твердости материала сверла, что позволило повысить производительность и эффективность сверления;
- повышение стойкости сверла за счет создания поля сжимающих остаточных напряжений;
- снижение износа задней поверхности сверла за счет оплавления выступов микронеровностей и уменьшения шероховатости.

В работе [15] были исследованы характеристики и эксплуатационная стойкость диффузионных защитных слоев, полученных методом низкотемпературной нитроцементации быстрорежущих сталей. Проведен замер таких важных для характеристики процесса резания при сверлении параметров, как величина крутящего момента и осевой составляющей силы резания при сверлении, величины износа по задней поверхности и ленточке. Было установлено, что низкотемпературная нитроцементация сверл из быстрорежущей стали положительно сказывается на параметрах процесса резания – величины крутящего момента и осевой составляющей силы резания при сверлении уменьшились соответственно в 1,4 и 1,5 раза, эксплуатационная стойкость инструмента по сравнению со стандартным неупрочненным инструментом повысилась в 1,7...1,9 раза, повысилась эксплуатационная стойкость в 2,2 раза.

В работе [16] отмечается, что основными причинами высокой интенсивности износа главных задних поверхностей сверла являются погрешности поверхностного слоя при заточке инструмента, а также

большие контактные напряжения на первоначально малой ширине площадки износа. Автор предлагает как один из основных путей повышения стойкости, а следовательно, и эффективности сверл, повышение износостойкости ленточек и уголков, например посредством применения износостойких покрытий.

Анализируя техническую литературу, можно сделать вывод о том, что изменение и оптимизация конструктивных параметров сверла, режимов резания, а также инструментальных материалов (быстрорежущая сталь, твердый сплав) в вопросах повышения эффективности и производительности сверления практически исчерпали себя.

## **1.2. Физико-технические особенности процесса резания спиральными сверлами с износостойкими покрытиями**

В процессе резания в результате взаимодействия обрабатываемого и инструментального (твердосплавного) материалов контактные площадки на передней и задней поверхности режущего инструмента изнашиваются. На задней поверхности инструмента образуется фаска износа размером  $h_z$ , размер которой может быть различным. В ряде случаев ее величина больше около вершины режущего инструмента, что связано с повышением температуры контактной площадки по задней поверхности по мере приближения к вершине резца. В других случаях, таких как черновая обработка заготовок после термообработки, имеющих корку, величина фаски износа по задней поверхности больше ближе к обрабатываемой поверхности заготовки. Это связано, во-первых, с интенсификацией абразивного изнашивания, а также возможной интенсификацией микросколов, во-вторых, с появлением термических напряжений и трещин в материале режущего клина [4, 34, 143-153].

Изнашивание режущего инструмента может иметь различную физическую природу, и могут существовать различные механизмы изнашивания, что определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого и инструментального материала, видом контактного взаимодействия, контактными температурами, контактными напряжениями, возможностью протекания диффузионных процессов через границу «обрабатываемый материал – инструментальный материал» и т.п. [4].

Существует установившаяся классификация видов изнашивания, в соответствии с которой при резании металлов могут иметь место следующие виды изнашивания: абразивный, адгезионно-усталостный, диффузионный, окислительный, изнашивание в результате микросколов режущей кромки [4, 18, 24, 34, 35].

В работах [4, 19, 34, 36] показано, что к износу твердосплавного инструмента приводят три процесса: диссоциация карбида вольфрама и растворение зерен карбида вольфрама в стали; микроразрушение зерен карбидов; разупрочнение связующей кобальтовой фазы железом и износ частично растворившихся зерен  $WC$  и нерастворившихся зерен  $(W,Ti)C$  перемещающимися объемами стали.

Одним из основных путей уменьшения износа, увеличения стойкости, форсирования режимов резания, т.е. повышения эффективности сверл как экономического фактора процесса сверления является нанесение и применение износостойких покрытий [17 - 19, 22 - 36].

При работе инструмента с покрытием характерно смещение зависимости «интенсивность износа – скорость резания» в область более высоких скоростей. То есть значение оптимальной скорости резания  $V_0$  (скорость, при которой интенсивность износа минимальна) смещается в сторону больших ее значений [18 - 19, 24, 26, 35].

Смещение связано с уменьшением термомеханической напряженности режущей части твердосплавного инструмента с покрытием

за счет снижения уровня действующих контактных напряжений и температур. В результате происходит изменение видов контактного взаимодействия и связанное с этим изменение механизма изнашивания при одной и той же скорости резания для режущего инструмента с покрытием и без покрытия.

В работах [37 - 39] показано, что покрытия, снижая сток тепла в режущий инструмент, приводят, во-первых, к образованию особого вида контактного взаимодействия – «зоне относительного застоя» и, во-вторых, к уменьшению значений сил резания и укорочения стружки. Обладая высоким сопротивлением диффузионному растворению, покрытие является барьером, препятствующим протеканию диффузионных процессов между твердым сплавом и сталью, следствием которых является износ инструмента.

Возникновение трещин прежде всего связано с действием двух типов источников дислокаций: поверхностных и объемных [40]. В сплавах с покрытиями, не содержащими  $\eta$ -фазу (полученными по технологии ФОП), при низких скоростях резания (температура контакта не более 0,2 температуры плавления кобальта) и высоких контактных напряжениях скорость и плотность дислокаций, вызванных поверхностными источниками, значительно больше, чем объемными.

Анализ научно-технической литературы показывает, что покрытие принципиально не меняет механизмы изнашивания твердосплавного инструмента, но сдвигает их в область более высоких скоростей резания за счет снижения уровня термомеханической напряженности зоны резания. Разрушение покрытий различного состава имеет одинаковый характер, при этом динамика изнашивания определяется его составом и режимами резания. Для режущего инструмента с покрытием сложного состава характерна меньшая интенсивность трещинообразования на контактных площадках. Образование сетки трещин в материале покрытия на участке упругого контакта стружки с передней поверхностью инструмента вызвано

адгезионно-усталостными процессами. Для снижения интенсивности процесса образования и развития таких трещин покрытие должно иметь высокую прочность и трещиностойкость, которая может быть обеспечена либо за счет высоких остаточных напряжений, возникающих в покрытии, либо за счет его микрослоистости.

Покрытия, работающие в условиях непрерывного резания (в частности, сверления), должны, в первую очередь, обеспечивать высокую сопротивляемость процессам образования и развития трещин, с другой стороны – иметь высокую прочность сцепления с инструментальной основой. Высокая сопротивляемость материала покрытия процессам трещинообразования будет определяться условиями контактного взаимодействия, высокой трещиностойкостью и уровнем сжимающих остаточных напряжений, а прочность сцепления – хорошей адгезионной связью на границе «покрытие – инструментальный материал».

В работах [41, 42] показано, что для режущего инструмента с покрытием износ на передней поверхности начинается с образования продольных трещин в материале покрытия на некотором удалении от режущей кромки. По мере работы режущего инструмента происходит образование продольных трещин в материале инструментальной основы, которые со временем выходят на режущую кромку и заднюю поверхность (аналогично продольным трещинам на контактной площадке инструмента без покрытия). Дальнейшее увеличение времени работы инструмента не приводит к росту количества продольных трещин в инструментальной основе. В то же время на участке упругого контакта инструмента со стружкой в материале покрытия образуется большое количество поперечных трещин (параллельных режущей кромке инструмента), в результате чего образуется сетка трещин. Это приводит к отделению объемов покрытия и удалению их сходящей стружкой с обнажением инструментальной основы. Одновременно с образованием поперечных трещин в материале покрытия на передней поверхности инструмента

наблюдается образование трещин в инструментальной основе вдоль режущей кромки на расстоянии от нее, равном в среднем (в зависимости от режима резания)  $(0,08 - 0,1) C_{\gamma}$ . Эти трещины далее сливаются в единую вдоль все режущей кромки. Дальнейшее разрушение режущего инструмента с покрытием происходит так же, как и для инструмента без покрытия.

Для уменьшения процессов трещинообразования в покрытии можно отметить следующие направления:

- дополнительное энергетическое воздействие на материал покрытия;
- повышение прочности сцепления с инструментальным материалом;
- применение покрытий на основе модифицированного нитрида титана
- разработку многослойно-композиционных покрытий и совершенствование конструкции покрытия.

Снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента может быть достигнуто за счет применения тройных покрытий на основе нитрида титана, легированного двумя элементами [43, 44]. Дополнительное легирование износостойкого покрытия вторым элементом приводит к изменению периода кристаллической решетки  $a$  и повышению полуширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , что свидетельствует об увеличении степени микродеформаций кристаллической решетки и изменении физико-механических свойств. Дополнительное легирование двухэлементных инструментальных материалов изменяет остаточные сжимающие напряжения  $\sigma_{ост}$  (рис 1.2). Использование в качестве легирующих элементов железа и алюминия повышает прочность сцепления инструментального материала с инструментальной основой, о чем свидетельствует снижение коэффициента отслоения  $K_0$  (рис. 1.2). Многоэлементные покрытия на основе модифицированного нитрида титана обладают более высокой микротвердостью  $H_{\mu}$ , модулем Юнга  $E$ , пределом текучести  $\sigma_T$  по сравнению с базовыми двухэлементными

нитридными износостойкими покрытиями. При этом большее влияние на указанные свойства оказывает введение в состав покрытия алюминия, кремния и циркония.

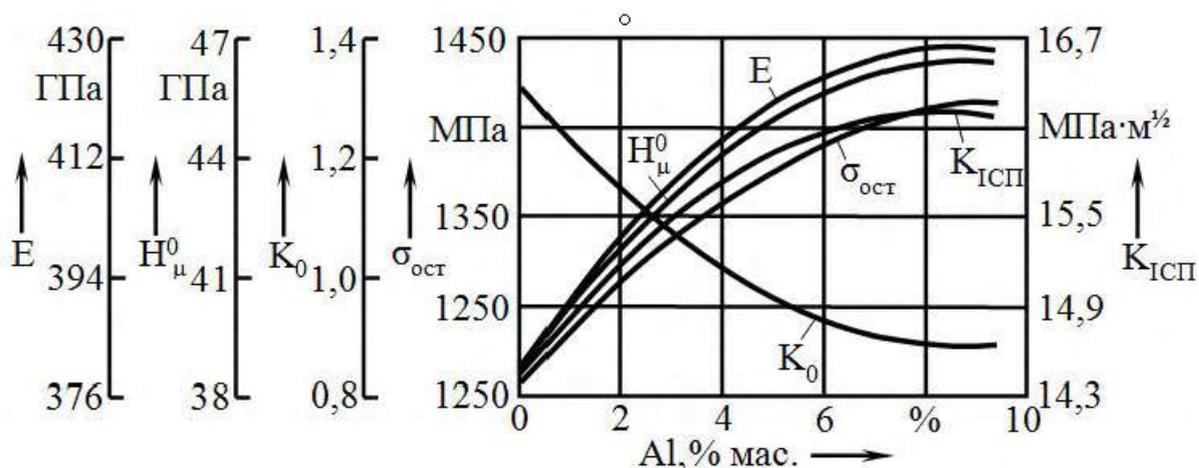


Рис. 1.2. Влияние содержания второго легирующего элемента  $Me_2$  на физико-механические свойства покрытия  $TiZrAlN$ . Инструментальная основа – МК8 [44]

В работе [44] показано, что дополнительное легирование покрытия приводит к повышению длины контакта стружки  $C_\gamma$  с передней поверхностью инструмента, коэффициента укорочения стружки  $K_L$ , составляющих силы резания ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ). В то же время большее увеличение длины контакта  $C_\gamma$  по сравнению с ростом силы резания снижает средние нормальные  $q_N$  и касательные  $q_F$  удельные нагрузки на переднюю поверхность режущего инструмента. При этом большее снижение величин  $q_N$  и  $q_F$  вызывает легирование покрытий кремнием, алюминием и цирконием.

Более существенный рост величины  $C_\gamma$  по сравнению с мощностью теплового потока  $Q_n$  на передней поверхности режущего инструмента ведет к уменьшению интенсивности теплового потока  $q_n$ . При этом изменяется мощность  $Q_s$  и его интенсивность  $q_n$  на задней поверхности инструмента. Увеличение  $Q_n$  вызывает рост средних температур на

передней  $T_{\text{пер}}$  и задней  $T_{\text{зсп}}$  поверхностях инструмента. При этом для всех типов покрытий большее изменение температур вызывает наличие в покрытии хрома, железа и молибдена, меньшее – кремния, алюминия и циркония. Для режущего инструмента с многоэлементными покрытиями наблюдается смещение изотерм от задней поверхности и режущей кромки, что связано с увеличением  $C_{\gamma}$ , и в сторону, противоположную передней поверхности, что объясняется прогревом инструмента из-за увеличения  $Q_{\text{п}}$ . Все это вместе взятое приводит к снижению износа режущего инструмента.

Следовательно, сложное легирование покрытий на основе нитрида титана двумя элементами позволяет получить покрытия с более высокими механическими характеристиками, что способствует повышению износостойкости инструмента.

В работе [45] для снижения износа режущего инструмента из быстрорежущей стали предлагаются конструкции многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями. Нанесение многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями применяется для повышения адгезионно-прочностных свойств покрытия для инструмента из быстрорежущей стали. Переходные адгезионные слои создаются между износостойким покрытием и инструментальной основой, причем наибольший эффект получается при использовании переходных адгезионных слоев, в состав которых входят элементы износостойкого покрытия и инструментальной основы. Применение переходных адгезионных слоев способствует снижению перепада напряжений на границе «покрытие – инструментальная основа».

Наличие переходных адгезионных слоев незначительно изменяет микротвердость покрытия в целом (рис 1.3), увеличение которой составляет не более 11 %, но существенно повышает прочность адгезионной связи покрытия с инструментальной основой, о чем

свидетельствует снижение коэффициента отслоения на 55 – 79 % по сравнению с соответствующим однослойным покрытием.

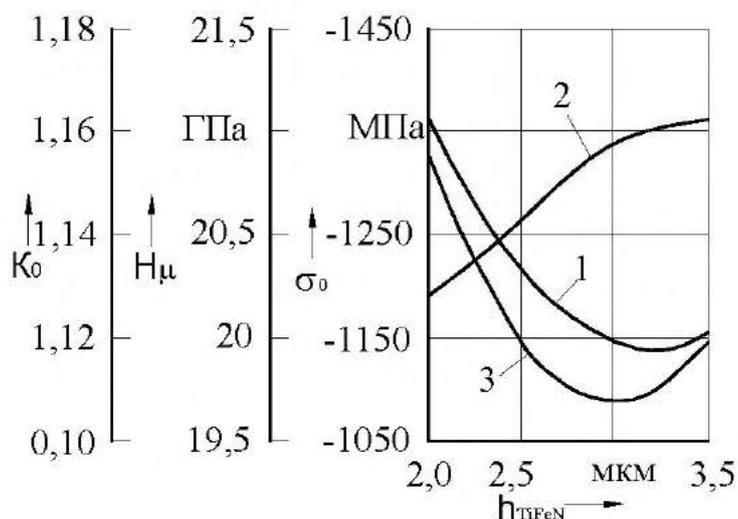


Рис. 1.3. Влияние толщины переходного слоя  $TiFeN$  в многослойном покрытии  $TiFe-TiFeN-TiN$  на остаточные напряжения в покрытии  $\sigma_0$  (1), микротвердость покрытия (2) и коэффициент отслоения покрытия  $K_0$  (3) [45]

Применение покрытий с переходными адгезионными слоями позволяет снизить износ и повысить период стойкости инструмента из быстрорежущей стали Р6М5К5 в 1,4 – 4,2 раза по сравнению с режущим инструментом с однослойным покрытием  $TiN$ , при этом коэффициент повышения стойкости определяется конструкцией покрытия, обрабатываемым материалом и режимом резания.

Наиболее широкие перспективы снижения интенсивности износа режущего инструмента открывают многослойные покрытия. При переходе к многослойным покрытиям возникла необходимость разработки концепции выбора материала слоев, а также их сочетаний, что привело к созданию ряда принципов формирования многослойных покрытий. Наиболее удачным, учитывающим условия резания, в которых работает режущий инструмент, является принцип, сформулированный в работе [46]

для инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. Автором предлагаются многослойные покрытия, которые имеют как минимум два слоя: верхний слой обеспечивает повышение запаса пластической прочности и, следовательно, формоустойчивость режущего клина и снижает интенсивность процессов трещинообразования за счет высокого уровня остаточных сжимающих напряжений, а нижний слой - высокую прочность сцепления с инструментальной основой.

Как видно из рис. 1.4, при работе на  $V=160$  м/мин и  $S=0,3$  мм/об наибольшее время до образования трещин  $T_2$  имеет трехслойное покрытие  $TiN-TiCN-TiZrN$ , для которого величина  $T_2$  была выше по сравнению с двухслойными  $TiN-TiCN$  и однослойными  $TiN$  соответственно в 2,1 и 2,5 раза. Нанесение многослойных покрытий снижает интенсивность износа инструмента по сравнению с покрытием  $TiN$  как на режиме предварительной, так и окончательной обработки. При точении заготовок из стали 5ХНМ нанесение многослойных покрытий по сравнению с  $TiN$  повышает период стойкости твердосплавных пластин в 1,4 – 1,7 раза при использовании покрытий  $TiN-TiCN$ , в 1,5 – 2,0 раза – покрытий  $TiN-TiAlN$  в 2,9 – 4,4 раза – покрытий  $TiN-TiCN-TiZrN$ .

Разработаны многослойные покрытия и принципы их формирования для инструмента, работающего в условиях прерывистого резания. Наиболее интересным является принцип, предложенный в работе [41], учитывающий механизм разрушения режущего инструмента при прерывистом резании в результате действия переменных теплосиловых нагрузок. Согласно данному принципу [41] многослойное покрытие должно включать как минимум два слоя износостойких материалов: наружный слой, предназначенный для снижения тепловыделения и амплитуды термоциклирования; внутренний (прилегающий к основе) слой, имеющий высокие остаточные сжимающие напряжения, сдерживающий процессы трещинообразования [6]. На основе исследований теплового и напряженного состояния автором работы [6] предложена конструкция с

верхним слоем из  $TiN$  и нижним слоем из  $TiCN$ . Использование слоя  $TiN$  обеспечивает наибольшее снижение температуры и амплитуды ее колебания. Нижний слой  $TiCN$ , имеющий высокие сжимающие остаточные напряжения, сдерживает процессы образования и роста трещин. Исследования динамики образования трещин на контактной площадке на передней поверхности интенсивности изнашивания режущего инструмента при фрезеровании показали эффективность предложенной конструкции многослойных покрытий (рис. 1.5).

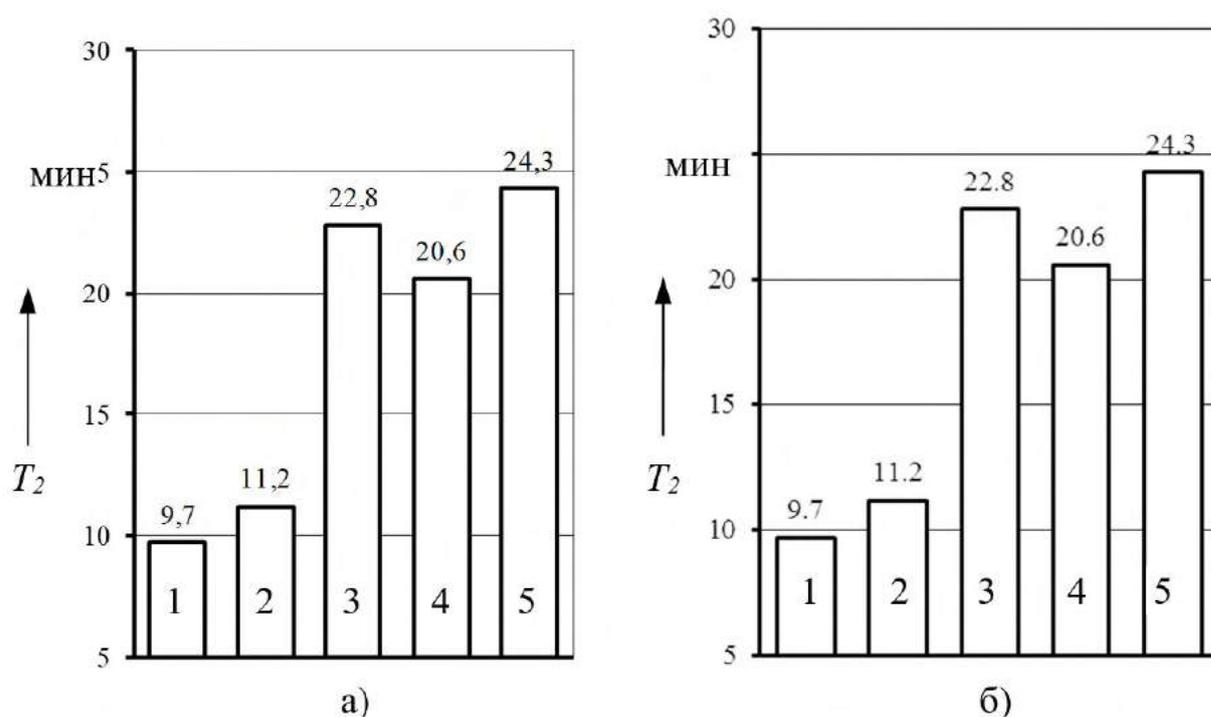


Рис. 1.4. Влияние состава многослойного покрытия на время  $T_2$  до образования поперечных трещин на участке пластического контакта стружки с передней поверхностью [46]:

а –  $V=160$  м/мин,  $S=0,3$  мм/об, б –  $V=200$  м/мин,  $S=0,1$  мм/об;  
 1 –  $TiN$ , 2 –  $TiN-TiCN$ , 3 –  $TiN-TiZrN$ , 4 –  $TiN-TiAlN$ , 5 –  $TiN-TiCN-TiZrN$

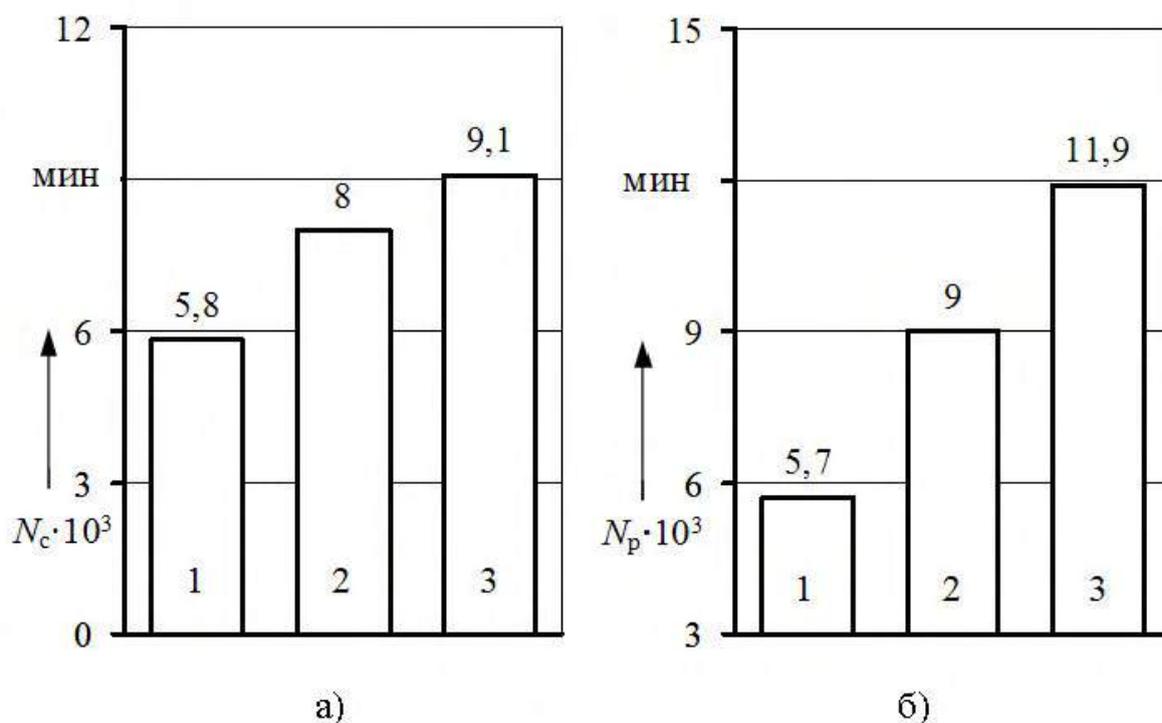


Рис. 1.5. Число циклов работы пластин МК8 до образования сетки трещин на передней поверхности (а) и разрушения многослойного покрытия (б) [47]:

$$V = 247 \text{ м/мин}, S_z = 0,4 \text{ мм/зуб}, t = 1,5 \text{ мм}, B = 20 \text{ мм},$$

1 –  $TiN$ , 2 –  $TiCN$ , 3 –  $TiCN-TiN$

Дальнейшее развитие данного принципа получило в работе [47]. Для повышения трещиностойкости автором предложено наносить между верхним и нижним слоями покрытия промежуточный слой. Повышение трещиностойкости многослойного покрытия обеспечивается за счет создания препятствий на пути движения трещин, что приведет к их торможению. Автором делается заключение, что промежуточный слой многослойного покрытия должен иметь более высокую твердость по сравнению с выше- и нижележащими слоями. Вместе с тем промежуточный слой для эффективного торможения трещин должен иметь высокую трещиностойкость, поэтому в качестве промежуточного слоя был выбран сложный нитрид титана и циркония  $TiZrN$ . В качестве верхнего и нижнего слоев многослойного покрытия использовались слои  $TiN$  и  $TiCN$ .

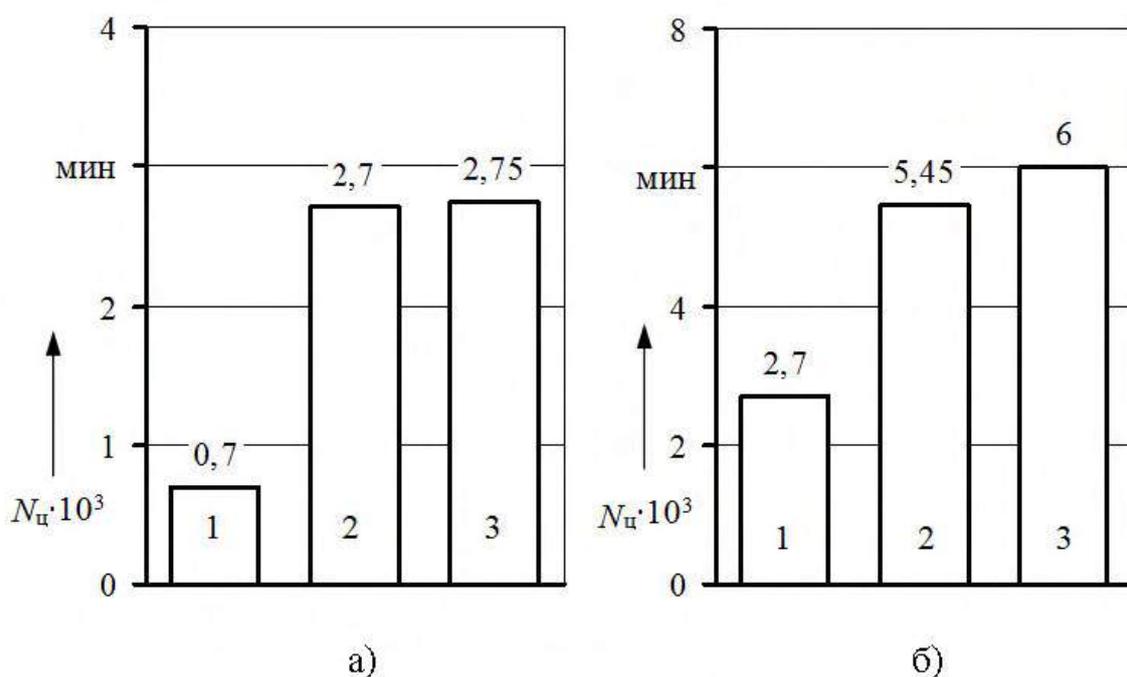


Рис. 1.6. Влияние конструкции многослойного покрытия на число циклов работы  $N_{ц1}$  (1),  $N_{ц2}$  (2) и  $N_{ц3}$  (3) [47]:

$$V = 247 \text{ м/мин}, S_z = 0,4 \text{ мм/зуб}, B = 80 \text{ мм};$$

а –  $TiCN-TiN$ , б –  $TiCN-TiZrN-TiN$

Введение в состав покрытия  $TiCN-TiN$  промежуточного слоя  $TiZrN$  увеличивает число циклов работы инструмента до начала образования продольных трещин 1-го типа  $N_{ц1}$ , до выхода трещин на режущую кромку  $N_{ц2}$  и до образования продольных трещин 2-го типа  $N_{ц3}$  в 1,5 – 2 раза в зависимости от режимов резания при ширине фрезерования  $B = 20$  мм и в 1,5 – 4 раза – при  $B = 80$  мм (рис. 1.6). Нанесение покрытия  $TiN-TiZrN-TiN$  повышает период стойкости в 1,48 – 1,5 раза по сравнению с двухслойным покрытием  $TiCN-TiN$  и в 2,8–3,5 раза по сравнению с однослойным покрытием  $TiN$ .

Несмотря на большое количество работ в области применения износостойких покрытий для повышения эффективности режущего инструмента все известные работы посвящены изучению влияния покрытий в основном на операциях точения и фрезерования, и только малая часть - для сверления. Можно предположить, что для специфических

условий резания при сверлении необходимы износостойкие покрытия специального состава и конструкции.

### **1.3. Пути и средства разработки высокоэффективных износостойких покрытий спиральных сверл**

Износостойкие покрытия для режущего инструмента нашли широкое применение в промышленности. Служебные свойства покрытия, их структурно-параметрические и кристаллохимические характеристики сильно зависят от метода получения, но в любом случае инструмент с покрытием по своим свойствам превосходит инструмент без покрытия.

Нанесение на рабочие поверхности инструмента износостойких твердых покрытий является эффективным путем повышения работоспособности инструмента. Данные покрытия могут наноситься различными способами, отличающимися по своей сути. С учетом специфики протекания процессов формирования упрочняющих покрытий существующие методы можно разделить на три основные группы (рис. 1.7).

К первой группе относятся методы, при которых формирование покрытия осуществляется преимущественно за счет диффузионных реакций между насыщающими элементами и инструментальным материалом. Ко второй группе относятся методы, в которых покрытия образуются в результате химических реакций, протекающих между компонентами покрытия на поверхности инструментального материала. В третью группу объединяются методы, в которых покрытие удерживается на поверхности инструментальной основы в основном за счет механической связи.

Наиболее широкое промышленное применение нашли методы химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (методы ХОП),

имеющие в мире наименование *CVD (Chemical Vapor Deposition)*, и методы физического осаждения покрытий (методы ФОП), имеющие международную аббревиатуру *PVD (Physical Vapor Deposition)*. Эти методы значительно эффективнее методов химико-термического образования покрытия как по производительности, так и с точки зрения стойкости режущего инструмента [18-22]. Особенно широкими возможностями по управлению свойствами покрытия и по номенклатуре инструментальных подложек обладают методы ФОП. Поэтому рассмотрим подробнее только методы ХОП и ФОП.

Методы ХОП получили широкое распространение для нанесения покрытий на основе карбидов, нитридов, карбонитридов титана, а также окисла алюминия на многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины. На основе методов ХОП разработаны технологии [48], применяемые известными фирмами-производителями твердосплавного инструмента: *Sandvik Coromant* (Швеция) - технология *GC*, *Teledyne* (США), *Plansee* (Австрия) - технология *GM*, *Crupp Vidia* (Германия), *Eugene Carbone* (Франция) и другие. В России разработан метод нанесения карбидтитановых покрытий на неперетачиваемые твердосплавные пластинки (ВНИИТС), получивший наименование метод ГТ [23].

Нанесение покрытий методом ХОП позволяет повысить стойкость твердосплавного режущего инструмента в 3 – 5 раз [18, 24]. Рекомендуемые области применения покрытий, наносимых методами ХОП, – это чистовая и получистовая обработка заготовок из сталей и чугунов при высоких скоростях с малыми и умеренными подачами. Методами ХОП наносят покрытия только на сменные пластины и монолитный режущий инструмент из вольфрамсодержащих твердых сплавов [20].

Среди методов ФОП наибольшее промышленное применение получил метод конденсации покрытий из плазменной фазы в вакууме с

ионной бомбардировкой поверхности инструмента (КИБ), разработанный Харьковским физико-техническим институтом АН УССР [21]. Используют

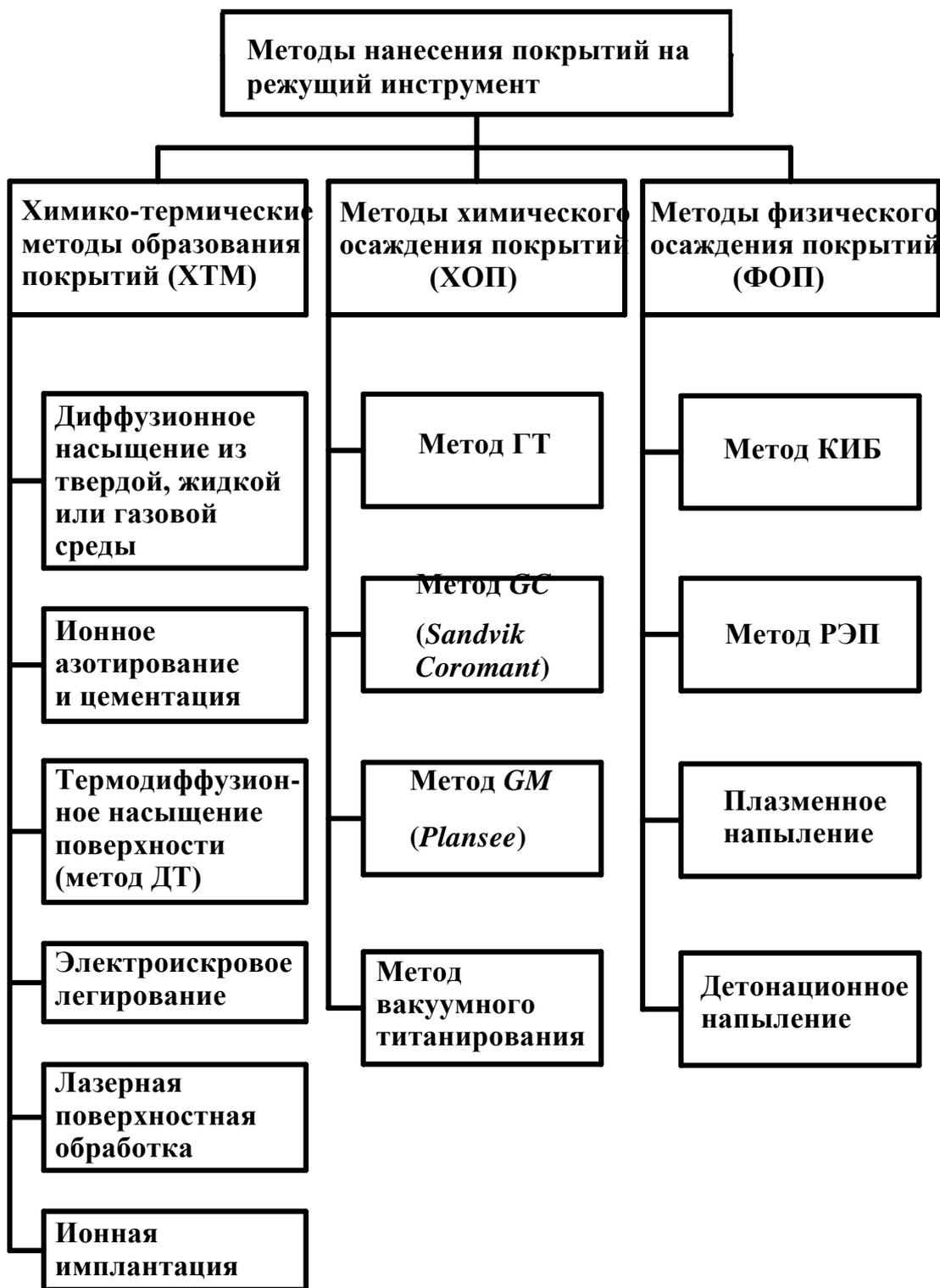


Рис. 1.7. Классификация методов нанесения покрытий [18]

также и другие методы, основанные на физическом принципе осаждения вещества в вакууме – реактивный электронно-лучевой плазменный метод (метод РЭП), разработанный в НИИТМ, ионное плакирование, магнетронно-ионное распыление (МИР) и реактивный ионно-плазменный метод (метод *ARE*) [22]. В настоящей работе использовался метод КИБ, как самый универсальный, технологичный и эффективный.

Возможность широкого варьирования температурой в зонах нанесения покрытий позволяет использовать методы ФОП в качестве универсальных методов для нанесения покрытия на режущий инструмент из твердых сплавов и быстрорежущей стали. Эти методы универсальны и с точки зрения возможности получения широкой гаммы монослойных, многослойных и композиционных покрытий на базе нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных соединений тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической системы. Применение методов ФОП значительно расширяет технологические возможности режущего инструмента с покрытием за счет более эффективного, чем для методов ХОП, управления процессами получения покрытия и их свойствами, а также направленного воздействия на геометрические, кристаллохимические и физико-механические дефекты поверхностных слоев инструментального материала.

Метод КИБ основан на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода. Подача в вакуумное пространство реагирующих газов ( $N_2$ ,  $NH_3$  и др.) в условиях ионной бомбардировки приводит к конденсации покрытия на поверхности режущего инструмента благодаря протеканию плазмохимических реакций [21, 25].

Все процессы испарения, образования соединений, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в вакуумной камере,

металлический корпус которой служит анодом. Катод изготавливают из тугоплавкого материала, подлежащего испарению.

Под действием первичных электронов и ионов, генерирующихся в дуговой промежутке катодом, происходит ионизация испарившегося вещества и реагирующих газов, что приводит к образованию потоков плазмы, состоящих как из заряженных, так и нейтральных частиц материала катода и реагирующих газов.

Особенностью метода КИБ является возможность ускорения ионов вещества путем создания отрицательного заряда (относительно корпуса камеры) на режущий инструмент.

Процесс КИБ можно представить в виде двух последовательно протекающих процессов – ионной бомбардировки и конденсации покрытия. Для достижения больших плотностей ионного потока используют специальные плазмооптические устройства, называемые «холловскими эррозионно-плазменными ускорителями» [22], которые позволяют эффективно управлять как скоростью, так и плазменно-физическими характеристиками ионного потока. Наибольшее распространение в промышленности получили установки с плазмооптической системой управления плазменным потоком типа «Булат» и ННВ, принципиальная схема которых показана на рис. 1.8.

Применение износостойких покрытий, наносимых методами ФОП, позволяет существенно повысить стойкость режущего инструмента. Область применения инструмента с покрытиями, наносимыми методами ФОП, – это получерновое и черновое точение, точение с ударом, по корке, а также обработка заготовок из закаленных сталей; чистовое точение протяженных поверхностей, к точности которых предъявляются повышенные требования, растачивание, получерновое и черновое фрезерование, нарезание резьбы, резание жаропрочных сплавов и т.д. [24]. Методами ФОП покрытия наносятся на сменные пластины как из вольфрамсодержащих, так и безвольфрамовых твердых сплавов, на

твердосплавные пластины напайного режущего инструмента, цельный твердосплавный инструмент, особенно с малым радиусом скругления режущей кромки, а также, благодаря низкой температуре процесса, на инструмент из быстрорежущей стали.

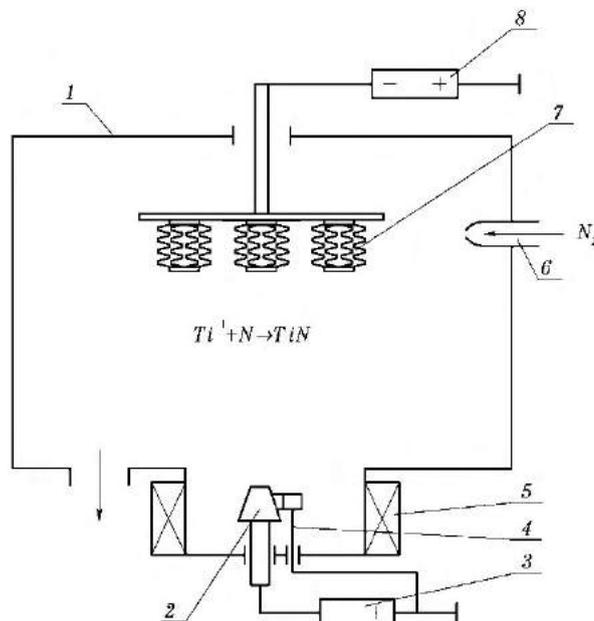


Рис. 1.8. Принципиальная схема установки для нанесения покрытий методом КИБ с плазменнооптической системой [20]:

- 1 – корпус камеры, 2 – катод-испаритель, 3 – источник питания дуги, 4 – система поджига дуги (триммер), 5 – электромагниты, 6 – подача реакционного газа, 7 – режущий инструмент, 8 – источник подачи опорного (ускоряющего) напряжения на инструмент

В работах [18 – 22, 24, 26 – 28] приведены результаты исследования влияния износостойких покрытий и методов их нанесения на работоспособность режущего инструмента (рис. 1.9–1.13).

Результаты стойкостных исследований показали высокую эффективность покрытий при нанесении их как на быстрорежущий, так и на твердосплавный режущий инструмент. В частности, для инструмента из быстрорежущей стали (рис. 1.9 и 1.10) отмечается наибольшая эффективность покрытий КИБ. Покрытия однослойного одноэлементного типа увеличивают среднее значение стойкости инструмента из P6M5 в 2 – 5 раз по сравнению со стойкостью инструмента без покрытия [26].

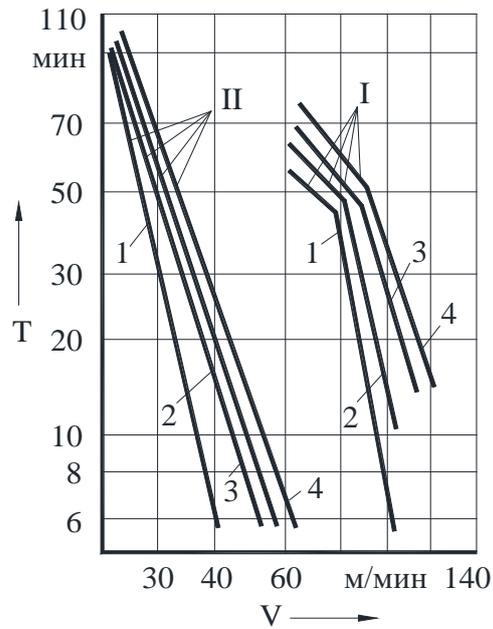


Рис. 1.9. Влияние скорости резания  $V$  на период стойкости резцов  $T$  из быстрорежущей стали Р6М5 при точении стали 45 (180  $HВ$ ) [24]:  
 $t = 2$  мм; I –  $S = 0,15$  мм/об, II –  $S = 0,57$  мм/об; 1 – Р6М5, 2 – Р6М5-  
 $MoN$ , 3 – Р6М5- $CrN$ , 4 – Р6М5- $TiN$

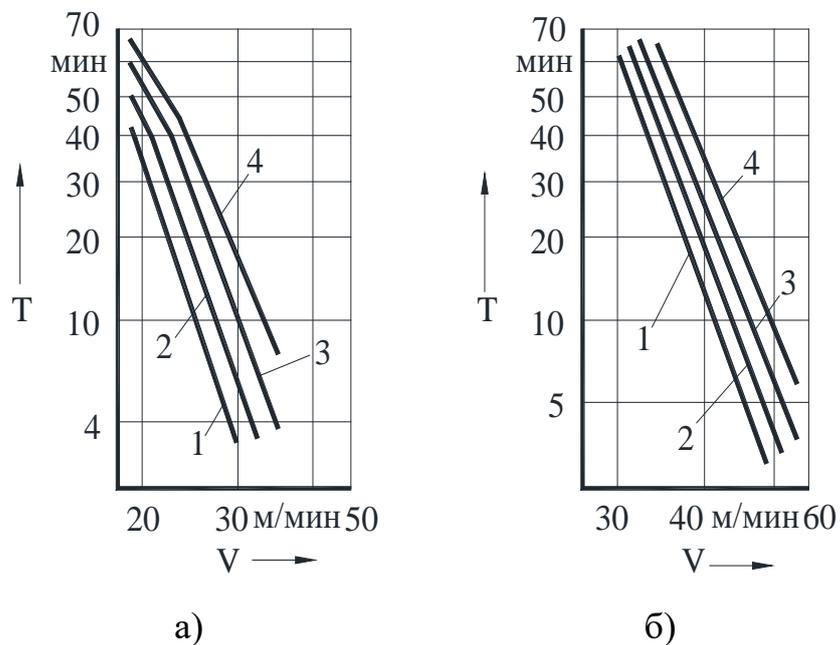


Рис. 1.10. Влияние скорости резания  $V$  при обработке стали 40X (200  $HВ$ ) на период стойкости  $T$  контрольных резцов из Р6М5 (1) и резцов из Р6М5- $MoN$  (2), Р6М5- $CrN$  (3), Р6М5- $TiN$  (4) [24]:  
 а – сверление отверстий, б – симметричное торцовое фрезерование

На рис. 1.10 – 1.13 представлены данные стойкостных испытаний твердосплавного режущего инструмента с различными вариантами покрытий. При точении чугуна СЧ32 максимальное значение стойкости имеют пластины ВК6-*TiC* ДТ, МС3210, МС3215, которые превосходят стойкость пластин из сплава ВК6 в 4 – 8 раз (рис. 1.11). При точении стали (рис. 1.12) лучшие режущие свойства были отмечены у пластин из МС2215 и ВП1255 с многослойными покрытиями *TiC-TiCN-TiN GM*.

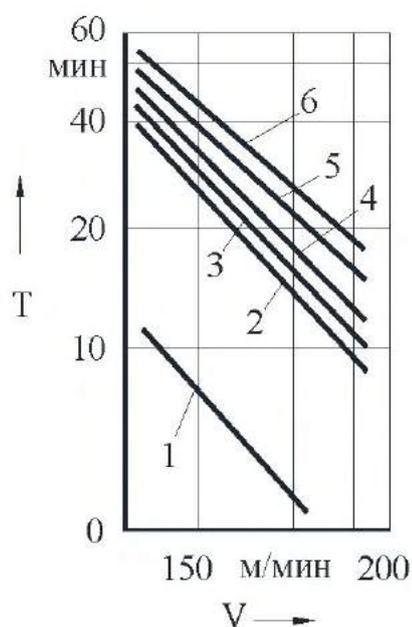


Рис. 1.11. Влияние скорости резания  $V$  на период стойкости

твердосплавных пластин  $T$  при точении чугуна СЧ32 (200  $HВ$ ),  $t = 1$  мм,  $S = 0,34$  мм/об [24]:  
1 – ВК6, 2 – ВК6-*TiN* КИБ,  
3 – ВК6-*TiC* ГТ, 4 – МС3210,  
5 – ВК6-*TiC* ДТ, 6 – МС2115

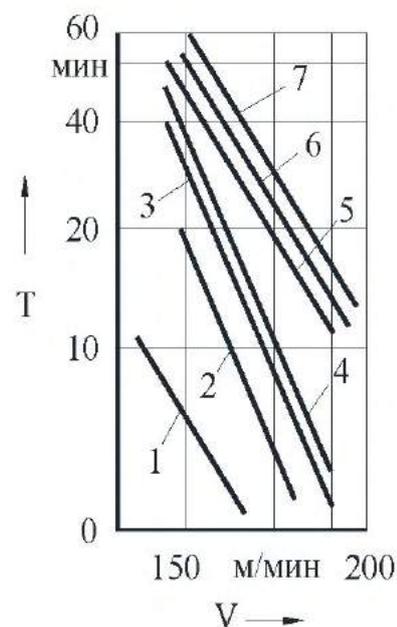


Рис. 1.12. Влияние скорости резания  $V$  на период стойкости

твердосплавных пластин  $T$  при точении стали 45 (180  $HВ$ ),  $t = 1$  мм,  $S = 0,45$  мм/об [24]:  
1 – ТТ10К8-Б,  
2 – ТТ10К8-Б-*TiN* КИБ, 3 – МС1460,  
4 – ТТ10К8-Б-*TiC* ГТ, 5 – МС2210, 6  
– ВП1255, 7 – МС2115

В настоящее время все большее применение находят многослойные покрытия. Так в работе [20] приведены результаты исследований

работоспособности токарных резцов с покрытиями  $TiN$ ,  $TiN-TiCN$ ,  $TiN-TiZrN$ ,  $TiN-TiCN-TiZrN$  при обработке заготовок из стали 5ХНМ. Наибольшей эффективностью обладают износостойкие покрытия общей толщиной 8 мкм. При этом в зависимости от вида обработки эффективность многослойных покрытий различной конструкции не одинакова. Так, на режиме предварительной обработки ( $V = 160$  м/мин,  $S = 0,3$  мм/об) наименьшую интенсивность износа режущего инструмента обеспечивают покрытия с толщиной верхнего слоя, составляющей 35...60 % от общей толщины покрытия, а на режиме окончательной обработки ( $V = 200$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об) – 50...80 %. При этом интенсивность износа инструмента с многослойным покрытием и верхним слоем из  $TiZrN$  в 1,5 – 2 раза меньше интенсивности износа покрытий с верхним слоем из  $TiCN$ . Наличие в трехслойном многослойном покрытии дополнительных границ между слоями повышает время до образования трещин на 6,5...18 % по сравнению с двухслойным покрытием  $TiN-TiZrN$  в зависимости от режима обработки. Результаты стойкостных испытаний твердосплавных пластин МК8 с данными многослойными покрытиями приведены на рис. 1.13.

Существует несколько современных работ по применению износостойких покрытий для сверл и их эффективности на операциях сверления.

В работе [29] рассмотрены современные технологии нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на сверла: CVD и PVD-процессы, а также новая технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ). Данный метод относится к процессам бескамерного химического осаждения покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой. Приведены сравнительные физико-механические и трибологические характеристики различных износостойких покрытий, а также результаты

модельных и промышленных испытаний технологии финишного плазменного упрочнения применительно к упрочнению сверл, изготовленных из порошковой быстрорежущей стали. Сравнительный анализ покрытий между собой показал, что минимальным коэффициентом трения обладает покрытие системы Si—O—C—N и он более чем в 2,5 раза меньше коэффициента трения ближайшего покрытия TiN и в 5 раз меньше

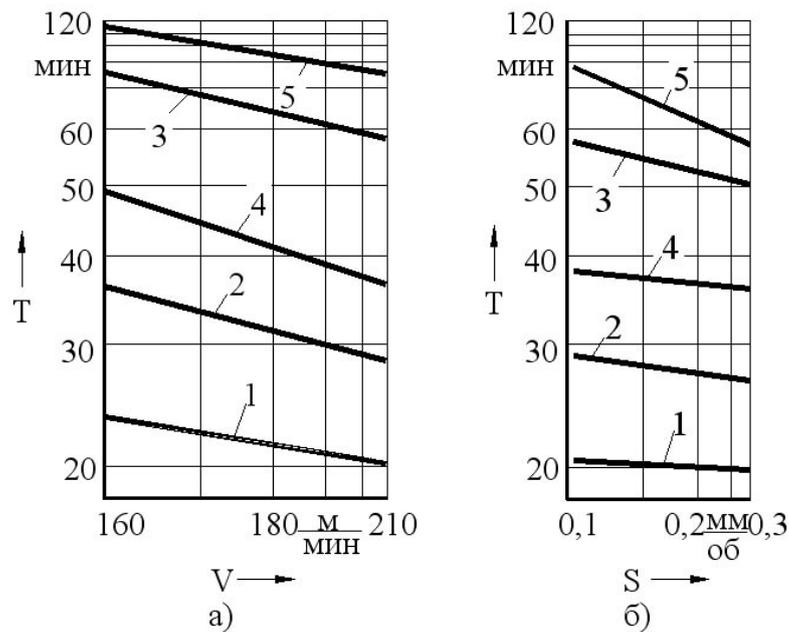


Рис. 1.13. Влияние скорости резания  $V$  (а) и подачи на оборот  $S$  (б) на период стойкости  $T$  инструмента с многослойными покрытиями при токарной обработке заготовок из стали 5ХНМ [20]:

а –  $S = 0,11$  мм/об, б –  $V = 210$  м/мин; 1 –  $TiN$ , 2 –  $TiN-TiCN$ , 3 –  $TiN-TiZrN$ , 4 –  $TiN-TiAlN$ , 5 –  $TiN-TiCN-TiZrN$

материала основы. Наличие резких амплитудных изменений глубины износа может определяться образующимися продуктами износа, влияющими непосредственно на процесс трения. Также на основании данных модельных испытаний выявлено, что наиболее высокой стойкостью обладают сверла из порошковой быстрорежущей стали Р6М5Ф3-МП (Vanadis-23) с покрытием системы Si—O—C—N. При данных условиях испытаний они в 3 раза более долговечны по сравнению

со сверлами из аналогичного материала, но без данного покрытия и в 2–6 раз имеют более высокую стойкость, чем покрытия из TiN и TiAlN.

В работе [30] исследовалась эффективность нанесения тонких износостойких вакуумных ионно-плазменных покрытий TiN на рабочую часть спиральных сверл из стали Р6М5. Для повышения качества изготовления и повышения стойкости спиральных сверл из быстрорежущих сталей, авторами предлагается нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий TiN на их функциональные элементы. По результатам исследований был составлен график износа (см. рис. 1.14). При анализе графика видно, что при одинаковой величине износа на уровне ~1,1 мм стойкость сверл с покрытиями составляет 84 мин, что по сравнению со сверлами без покрытий (48 мин) в 1,75 раза выше.

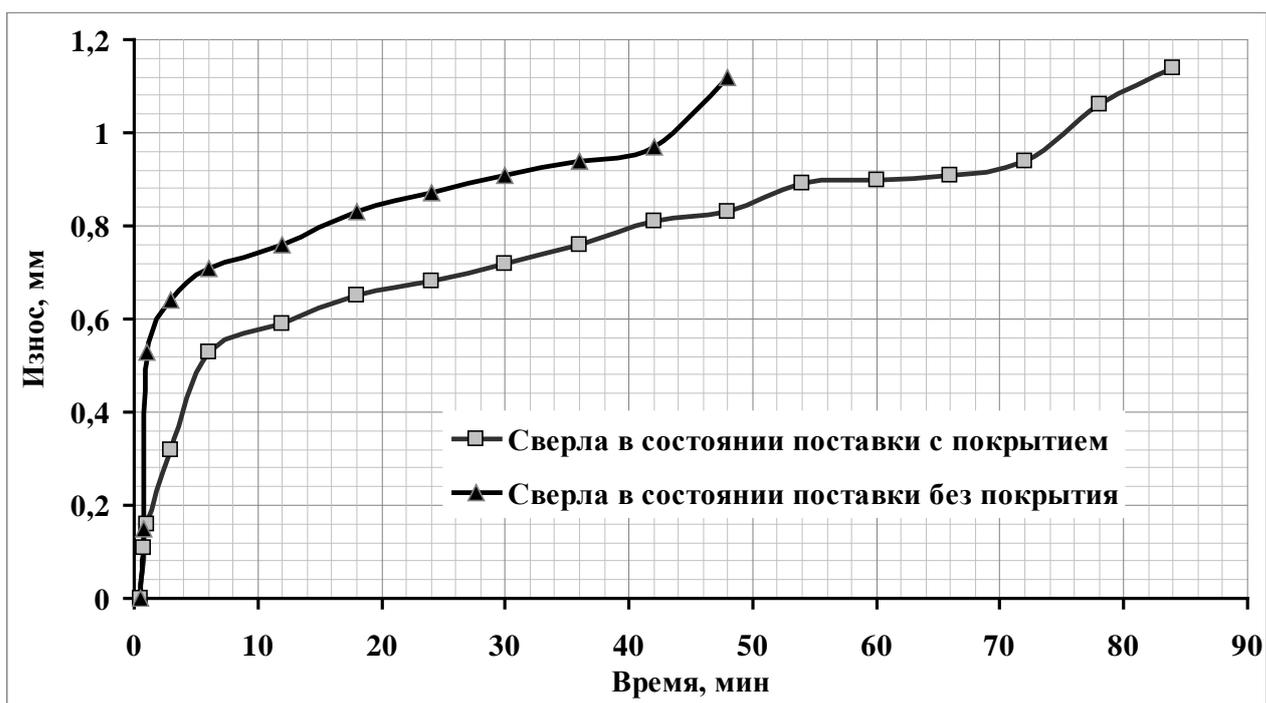


Рис. 1.14. Средний износ сверл в зависимости от длительности сверления [30]

Причем было отмечено, что сверла с покрытиями при такой величине износа еще сохраняют свою работоспособность в отличие от

сверл с заводской заточкой, которые при величине износа более 1,0 мм теряют работоспособность. Сохранение работоспособности сверл с покрытиями объясняется более равномерным износом по длине режущей кромки в отличие от сверл без покрытий, поскольку нарушаются геометрические параметры режущей части сверл за счет сильного износа периферийных участков режущих кромок. В результате проведенных исследований [30] по определению эффективности нанесения тонких износостойких вакуумных ионно-плазменных покрытий TiN на рабочую часть спиральных сверл из быстрорежущих сталей установлена целесообразность применения исследуемого технологического процесса, который позволяет получить инструмент с более высокими эксплуатационными свойствами.

Несмотря на достаточное количество работ в области применения износостойких покрытий для повышения эффективности режущего инструмента (в том числе и сверл) актуальность и перспективность вопросов разработки и внедрения эффективных покрытий на операциях сверления заготовок растет. К тому же, накоплен большой практический опыт применения износостойких покрытий, в том числе и для сверления, который отражен в каталогах режущего инструмента зарубежных фирм производителей режущего инструмента [31 - 33].

Учитывая, что процесс сверления имеет свои особенности, указанные ранее в п. 1.1, разработка износостойких покрытий требует проведения дополнительных исследований по влиянию покрытий на характеристики процесса резания, по оценке теплового состояния различных элементов сверла. Вместе с этим, можно предположить, что для таких специфических условий необходимы износостойкие покрытия специального состава и конструкции.

#### **1.4. Выводы. Цель и задачи исследований**

Из обзора литературы в области исследования проблемы создания и эксплуатации сверл с покрытием видно, что нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности инструмента является эффективным путем повышения его работоспособности. Покрытия могут наноситься различными методами, но наибольшими преимуществами обладает метод ФОП, как по номенклатуре наносимых покрытий, так и материалов инструментальной основы.

Установлено, что покрытия существенно уменьшают окислительный износ, а также снижает термомеханическую напряженность режущей части инструмента. Разрушение же самого покрытия в процессе резания происходит в результате образования в нем трещин, вызванных упруго-пластическими деформациями режущих клиньев и в результате действия касательных напряжений на передней поверхности инструмента.

Наиболее широкое применение в промышленности имеют однослойные одноэлементные покрытия. Дальнейшим путем совершенствования инструментов с покрытием является создание многослойных композиционных покрытий, обладающих свойствами, отличными от свойств каждого слоя в отдельности. Однако в настоящее время практически отсутствуют данные по эффективности применения многослойных и многокомпонентных износостойких покрытий для сверл, не выявлен механизм влияния покрытия на тепловое состояние инструмента, не сформулированы требования, которым должны отвечать многослойные покрытия для обеспечения максимальной эффективности сверления. Кроме того, отсутствуют рекомендации по количеству слоев многослойного покрытия, общей толщине износостойкого покрытия и толщинам отдельных слоев и их составу. В то же время возможность широкого варьирования свойств многослойных покрытий за счет изменения количества слоев, их состава и толщины, а также большой спектр обрабатываемых и инструментальных материалов значительно затрудняют создание эффективных композиций «покрытие –

инструментальный материал» путем проведения экспериментальных исследований.

Таким образом, видно, что проблема повышения эффективности применения сверл из быстрорежущей стали и твердого сплава со сложными покрытиями требует дальнейшего развития.

На основании вышесказанного целью работы является повышение работоспособности спиральных сверл путем разработки и применения многослойных покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выявить доли деформационно-силовой нагрузки, приходящиеся на главные и вспомогательные режущие кромки и поперечную кромку для сверл без покрытия и с износостойкими покрытиями различного состава.

2. Разработать методику расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла.

3. Установить влияние состава износостойких покрытий на функциональные параметры процесса сверления.

4. Исследовать структурные параметры и механические свойства износостойких покрытий, выбранных в качестве функциональных слоев многослойных покрытий.

5. На основе комплексной оценки результатов численного моделирования теплового состояния режущего клина инструмента, влияния состава износостойких покрытий на функциональные процессы при сверлении, механических свойств износостойких покрытий и интенсивности изнашивания спиральных сверл предложить архитектуры многослойных покрытий для спиральных сверл.

6. На основе выявленных взаимосвязей структурных параметров и механических свойств износостойких покрытий и интенсивности изнашивания сверл разработать конструкции многослойных покрытий для спиральных сверл.

7. Разработать технологические режимы нанесения многослойных покрытий.

8. Провести опытно-промышленные испытания спиральных сверл с разработанными многослойными покрытиями.

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ С ОДНОСЛОЙНЫМИ ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

В данной главе приведены использовавшиеся методики при проведении экспериментальных исследований. Представлены результаты исследований влияния состава однослойных износостойких покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN на структурные параметры и механические свойства, а также исследованы особенности процесса резания спиральными сверлами.

### **2.1. Методика экспериментальных исследований**

Для исследования контактных характеристик процесса сверления и работоспособности режущего инструмента с износостойкими покрытиями использовали сверла из однокарбидного твердого сплава производства фирмы «DORMER» (Германия) (российские аналоги ВК6, ВК8) стандартной геометрии. Диаметр сверл составлял 5 мм, диаметр сердцевины 0,8 мм.

При проведении исследований параметров структуры и механических свойств покрытий для удобства измерения использовали четырёхгранные неплетачиваемые твердосплавные пластины из сплава ВК6 производства ЗАО «Твердосплавная компания» (Россия). Твёрдость образцов по шкале Роквелла составляла 63...65 HRC.

Физико-механические свойства инструментальных материалов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

## Физико-механические свойства инструментального материала

Инструментальный материал	Предел прочности на изгиб $\sigma_{и}$ , МПа	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	Коэффициент термического расширения $\alpha$ , К <sup>-1</sup>	Модуль Юнга $E$ , ГПа
ВК6	1500	3800	$5,0 \cdot 10^{-6}$	610

При проведении экспериментальных исследований использовали заготовки из нормализованной конструкционной легированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71). Физико-механические свойства обрабатываемых материалов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

## Физико-механические свойства обрабатываемых материалов

Обрабатываемый материал	Предел прочности при растяжении $\sigma_{в}$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{т}$ , МПа	Твердость, НВ
30ХГСА	1470	1270	220-300

Осаждение износостойких покрытий производили на вакуумно-плазменной установке «Булат-6», компоновочная схема которой показана на рис. 2.1. [65].

Инструмент устанавливался в приспособление, которое вращалось с частотой 8 об/мин, что гарантировало равномерный прогрев пластин.

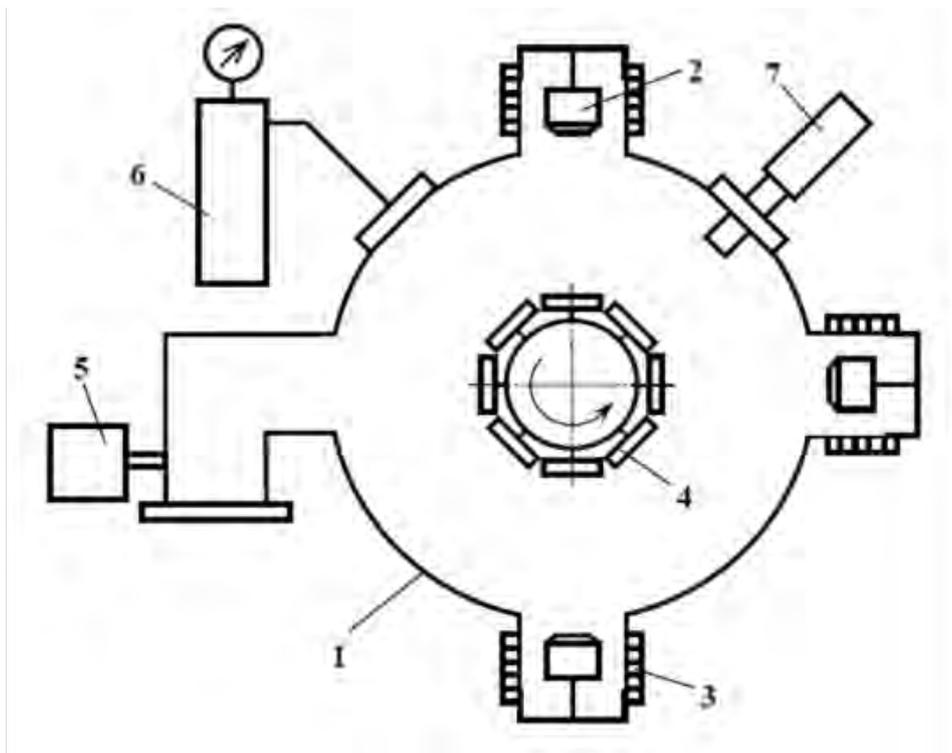


Рис. 2.1. Схема установки «Булат – 6» [65]:

- 1 – камера; 2 – катод-испаритель;  
 3 – фокусирующая катушка; 4 – образец; 5 – вакуумные насосы;  
 6 – система подачи рабочего газа; 7 – пирометр

Подготовка поверхностей пластин включала следующие этапы:

- промывание в бензине Б-70 (БР-1) или растворителе;
- промывание в ультразвуковой установке типа УЗУ-0,25 с применением моющего технического средства КМ-1 в концентрации 60–80 г/л при температуре 60–80 °С в течение 15–20 мин;
- промывание в дистиллированной воде;
- протирание тканью, смоченной этиловым спиртом;
- сушка при температуре 120–140 °С в течение 15–20 мин.

Ионную очистку проводили при следующих режимах: ток дуги  $I_d = 110$  А, ток фокусирующей катушки  $I_\phi = 0,4 - 0,6$  А, остаточное

давление  $p_o = 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па, напряжение  $U_{от} = 1000$  В, время ионной очистки  $\tau_o = 6 - 10$  минут при температуре 550-650 °С. Процесс осаждения износостойкого покрытия протекал при давлении  $p_o = 3,9 \cdot 10^{-1}$  Па, температура пластин поддерживалась в пределах 560 – 580 °С. После осаждения покрытия выполняли выдержку режущего инструмента в вакууме. Камера установки разгерметизировалась при достижении температуры 150 – 200 °С на режущем инструменте, после чего происходило извлечение инструмента [51].

Экспериментально температуру пластин из твёрдого сплава определяли оптическим микропирометром ВИПМ-015М [51].

При осаждении нитридных покрытий в качестве рабочего газа применяли азот (ГОСТ 9293-74). Для катодов-испарителей применялись следующие материалы: технический титан марки ВТ1-0; составные катоды с корпусом из ВТ1-0 и вставками из *Cr*, *Zr*, *Nb* и литые катоды из сплава *Ti* и *Al*.

Толщину покрытий определяли на изломе пластины из твёрдого сплава при помощи сканирующего электронного микроскопа Phenom proX (FEI).

Химический состав износостойких покрытий определяли методом количественного рентгеноспектрального анализа на установке MAP-4. Для учета матричных эффектов применяли метод ZAF-поправок (учет атомного номера элемента *Z*, корректировка на абсорбционное поглощение в матрице *A*, учет поправки на вторичную флуоресценцию *F*) [52].

Структурные исследования образцов с покрытиями проводили методами рентгеновской дифрактометрии. В качестве параметров структуры покрытий были выбраны: период кристаллической решетки *a*, нм; полуширина рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , град, характеризующая степень дефектности структуры покрытий; остаточные напряжения

первого рода  $\sigma_0$ , МПа, параметр текстуры  $J_{111}$ , относительную микродеформацию кристаллической решетки  $\Delta a/a$  и размеры блоков областей когерентного рассеивания (ОКР)  $D$  рассчитывали по методикам [52-56].

Исследование дефектов кристаллического строения методами рентгеновской дифрактометрии основывается на использовании явления дифракции рентгеновского излучения в образце [53].

Измерение параметров структуры проводили по методике, изложенной в работе [51], на дифрактометре «ДРОН-3М» с использованием фильтрованного  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучения. С целью повышения контрастности рентгеновских линий и снижения фона от флуоресцентного излучения применяли пирографитовый монохроматор на выходном пучке. Для получения узких главных интерференционных максимумов проводили специальный подбор щелей источника излучения и счетчика. Управление дифрактометром «ДРОН-3М», а также обработка результатов рентгеновской съемки осуществляли с помощью ПК.

Определение остаточных напряжений проводили методом  $\sin^2\psi$  в фильтрованном  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучении [53]. Для покрытий сложного состава, учитывая их малую толщину, наложение рентгеновских линий от различных фаз покрытия, текстура покрытия не позволяет общепринятыми методами корректно разделить вклад от микродеформации и размеров блоков в уширение рентгеновских линий. Поэтому для данных покрытий в качестве параметра, характеризующего дефектность кристаллической решетки, использовали полуширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$  (ширину на половине высоты дифрактометрического пика).

Измерение микротвёрдости  $H_\mu$  покрытий проводили пирамидой Кнуппа при нагрузке 0,98 Н на микротвердомере *Mitutoyo NH-125*. До проведения измерений выполняли подполировку поверхности пластин с

покрытием алмазной пастой. Измерение отпечатков, которые имели хрупкое разрушение и искажения не выполняли.

Определение модуля Юнга покрытий проводили согласно методике, предложенной в работе [57]. Измерение отпечатков индентора Кнуппа проводили при нагрузке 0,98 Н на микротвердомере *Mitutoyo NH-125*.

Значение модуля упругости рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{H_{\mu} \cdot \alpha}{\frac{b_1}{d_1} - \frac{b}{d}}, \quad (2.1)$$

где  $H_{\mu}$  – микротвердость по Кнуппу, МПа;  $\alpha$  – коэффициент ( $\alpha = 0,45$ );  $b$  и  $d$  – длины меньшей и большей диагоналей отпечатка, мм;  $\frac{b_1}{d_1} = 0,1406$ .

Для оценки трещиностойкости композиции «износостойкое покрытие-инструментальная основа» проводили измерение длины радиальных трещин у отпечатков для определения критического коэффициента интенсивности напряжений. Критический коэффициент интенсивности напряжений определяли согласно методике, предложенной в работах [56, 58] методом внедрения в образец индентора Виккерса при нагрузке 600 Н на твердомере ТК-2М.

Критический коэффициент интенсивности напряжений определяется из выражения:

$$K_{1C} = \frac{0,075 \cdot P}{C^{3/2}}, \quad (2.2)$$

где  $P$  – нагрузка, приложенная к индентору, Н;  $C$  – средняя длина радиальных трещин, измеренная из центра отпечатка, мм.

Прочность адгезии покрытия с инструментальной основой оценивали методом непрерывного внедрения в образец индентора Роквелла при нагрузке 1000 Н на твердомере ТК-2М. Адгезионную прочность определяли по коэффициенту отслоения [51]:

$$K_0 = \frac{S_1}{S_2}, \quad (2.3)$$

где  $S_1$  – площадь отслоения покрытия вокруг отпечатка индентора, мм<sup>2</sup>;  
 $S_2$  – площадь отпечатка индентора, мм<sup>2</sup>.

Характер разрушения покрытия оценивали на оптическом микроскопе 30G750 фирмы «Karl Zeiss». Для определения площадей  $S_1$  и  $S_2$  по изображениям отпечатков использовали программу Adobe Photoshop СС.

Испытания режущего инструмента проводили сверлении заготовок на вертикально-сверлильном станке 2Н135. Измерение скорости резания осуществлялось тахометром часового типа ТЧ – 10Р (с непосредственным определением скорости резания в м/мин).

Режимы резания:  $V = 9,8 - 25$  м/мин и  $S_o = 0,09 - 0,136$  мм/об.

Сверла испытывались без применения СОЖ.

Измерение осевой силы резания  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$ , проводили с помощью динамометра УДМ-600 и многоканального цифрового осциллографа, подключенного через аналогово-цифровой преобразователь [65]. Тарировка комплекса оборудования проводилась перед началом каждой серии экспериментов и после ее завершения с помощью динамометра Токаря.

При обработке сталей за лимитирующий принимается износ по задней поверхности  $h_3$ . Износ по задней поверхности  $h_3$  происходит неравномерно: больше на периферии сверла и меньше в центре. Это объясняется тем, что на периферии сверла скорость резания наибольшая,

что вызывает наибольшие тепловыделение и скорость относительного скольжения точек сверла относительно поверхности резания [64].

Предельным значение износа по задней поверхности  $h_3$  принималось величина, равная 0,1-0,15 мм. Измерение величины фаски износа  $h_3$  осуществляли на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с точностью 1 мкм.

Оценку работоспособности сверл при определении рациональной конструкции многослойного покрытия проводили путем расчета интенсивности износа  $J$  на участке установившегося износа, которая определялась по формуле:

$$J = \frac{h_3}{tV} \cdot 10^{-3}, \quad (2.9)$$

где  $h_3$  – величина фаски износа по задней поверхности, мм;  $t$  – время работы режущего инструмента до момента фиксирования величины  $h_3$ , мин;  $V$  – скорость резания, м/мин.

Работоспособность спиральных сверл при стойкостных испытаниях оценивали по периоду стойкости при достижении износа по задней поверхности 0,2 мм.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований заключалась в определении необходимого числа опытов по доверительной вероятности, оценке точности измерений, существенности различия сравниваемых величин [60]. В процессе обработки результатов экспериментов использовали пакеты прикладных программ по обработке численных величин Mathcad 7.0 Professional и Microsoft Excel, позволяющие производить обработку данных, вычисление необходимых статистических характеристик, проверку по требуемым критериям и др.

Определение числа параллельных опытов выполняли по [60]. Проверку однородности дисперсий воспроизводимости параллельных

опытов проводили по G-критерию Кохрена, оценку значимости коэффициентов регрессионной зависимости проводили по критерию Стьюдента, гипотезу об адекватности полученных полиномиальных моделей со всеми значимыми коэффициентами регрессии проверяли с помощью критерия Фишера согласно [61, 62]. На основании полученных уравнений регрессии определяли оптимальное (минимальное или максимальное) значение выхода и соответствующие ему значения факторов.

При исследовании влияния элементов режима резания на период стойкости режущего инструмента с покрытием использовали метод планирования полного факторного эксперимента (планирование  $2^2$ ) [60]. Матрица планирования, включающая 4 опыта, представлена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Планирование полного факторного эксперимента  $2^2$

№	Матрица планирования			
	X <sub>0</sub>	Планирование		
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>
1	1	-1	-1	1
2	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1
4	1	1	1	1

В результате исследований эффективности режущего инструмента с различными составами покрытий получали математические модели периода стойкости режущего инструмента  $T$  вида:

$$T = \frac{C_T}{V^x \cdot S^y}, \text{ при } t = \text{const}, \quad (2.10)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина, мм;  $C_T$  – коэффициент;  $x, y$  – показатели степеней.

## 2.2. Технология нанесения однослойных износостойких покрытий

Нанесение однослойных износостойких покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN проводили на установке «Булат-6Т» с использованием цельнометаллических литых катодов из сплава титана и алюминия и составных катодов по компоновочным схемам, представленным на рис. 2.2.

Технологическая компоновочная схема установки для нанесения покрытия TiN представлена на рис. 2.2, а; покрытия TiAlN – рис. 2.2, б; покрытия TiAlCrN – рис. 2.2, в.

При нанесении покрытия TiN (рис. 2.2, а) использовали три катода из сплава ВТ1-0. Покрытие TiAlN (рис. 2.2, б) наносили с использованием двух литых катодов из сплава титана и алюминия (№1 и №3) из катода из титана. При нанесении покрытия TiAlCrN (рис. 2.2, в) использовали два литых катода из сплава титана и алюминия (№1 и №3) и составной катод (№2) из титана Ti со вставкой из хрома Cr.

При получении покрытия TiAlCrN за один оборот стола установки образуется нанослойная структура, с чередующимися нанослоями TiAlN и TiCrN и расположенным между ними нанослоями TiCrAlN. Образование нанослойной структуры происходит за счет прохождения твердосплавных пластин мимо катодов испарителей. Как показано в работах [66, 68, 143, 170, 172, 179, 181] наличие нанослойной структуры способствует повышению механических свойств износостойких покрытий.

При получении покрытий TiN и TiAlN мультислоистость отсутствует, имеет место однородная микроструктура.

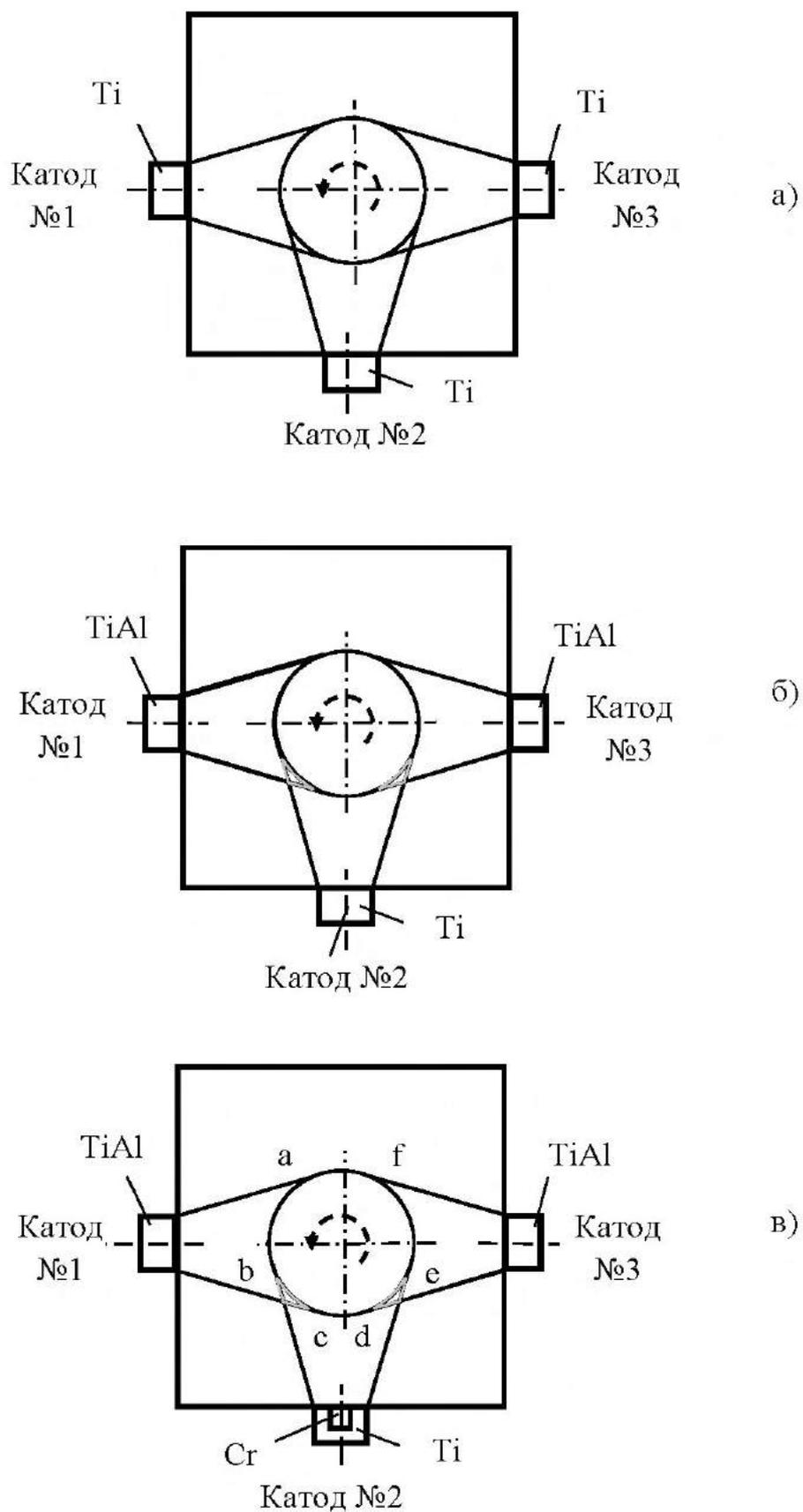


Рис. 2.2. Технологические компоновочные схемы установок для нанесения покрытий: а – TiN; б – TiAlN; в – TiAlCrN

Технологический процесс нанесения покрытий [66, 67] включал в себя три этапа: ионную очистку (бомбардировку) поверхности, нанесение покрытия и охлаждение покрытия в камере установки до комнатной температуры.

Технологические параметры нанесения износостойких покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN представлены в табл. 2.4.

Первый этап технологического процесса – герметизация и откачка камеры до давления  $6,65 \cdot 10^{-3}$  Па и включение поворотного устройства, далее подача на него отрицательного напряжения 1 кВ и при включенных двух противоположно расположенных катодах-испарителях № 1 и № 3 (рис. 2.2) и токе дуги  $I_d$ , равном 110 А, для проведения ионной очистки и нагрев сверл до температуры (560 – 580) °С. Опорное напряжение  $U_{оп}$  при этом равно 160 В, ток фокусирующих катушек  $I_{ф} = 0,4$  А.

Таблица 2.4

Технологические режимы нанесения износостойких покрытий  
на основе нитрида титана

Покрытие	Толщина, мкм	Технологические параметры процесса конденсации										
		Катод №1 (Ti, TiAl)			Катод №2 (Ti, TiCr)			Катод №3 (Ti, TiAl)			Опорное напряжение	Время конденсации
		Мат.	$I_d$ , А	$I_{ф}$ ,А	Мат.	$I_d$ ,А	$I_{ф}$ ,А	Мат.	$I_d$ ,А	$I_{ф}$ ,А	$U_{оп}$ , В	$T_k$ , мин
TiN	6	Ti	110	0,4	Ti	110	0,4	Ti	110	0,4	160	53
TiAlN	6	Ti	110	0,4	Ti	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	58
TiAlCrN	6	Ti	110	0,4	Ti	110	0,4	TiAl + Cr	110	0,4	160	65

Примечание: Ионная очистка:  $I_d = 110$  А,  $I_{ф} = 0,35$  А,  $\tau = 10$  мин

После ионной очистки продолжительностью (10 – 15) мин отрицательное напряжение снижается до (160 – 170) В, ток фокусирующих катушек  $I_{\text{ф}}$  до 0,3 А и при включенных катодах-испарителях № 1, № 2 и № 3 в камеру подаётся реакционный газ – азот при давлении 0,53 Па и осаждается покрытие требуемой толщины.

Необходимую толщину слоев покрытий обеспечивали изменением времени конденсации посредством учета скорости осаждения конкретных элементов покрытия. Расстояние от катодов до поверхностей, на которые проводили напыление, составляло 220 мм.

После нанесения покрытия отключали все катоды-испарители, подачу реакционного газа, напряжение и вращение поворотного устройства. Через 15 – 20 мин камеру открывали и извлекали сверла из установки.

Химический состав покрытий представлен в табл. 2.5

Таблица 2.5

Химический состав многоэлементных покрытий

Покрытие	Содержание элементов в покрытии, % ат.		
	Ti	Al	Cr
TiN	100	–	–
TiAlN	77	23	–
TiAlCrN	78	16	6

### 2.3. Исследование параметров структуры и механических свойств однослойных износостойких покрытий

При разработке износостойких покрытий для режущих инструментов важным этапом является исследование их структурных параметров и физико-механических свойств, позволяющее прогнозировать эффективность разрабатываемых износостойких покрытий.

Исследовали параметры структуры и механические свойства однослойные одноэлементных износостойких покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN.

Результаты исследований структурных параметров представлены табл. 2.6.

Как видно из табл. 2.6. период кристаллической решетки  $a$  имеет тенденцию к уменьшению при дополнительном легировании покрытия TiN элементами Al и Cr. Наблюдаемая тенденция связана с тем, что атомарные радиусы легирующих элементов Al и Cr в многоэлементных покрытиях TiAlN и TiAlCrN меньше чем у TiN. Так, атомарный радиус элемента Al составляет 1,43 Å, элемента Cr – 1,25 Å, а элемента Ti – 1,45 Å.

Изменение периода кристаллической решетки  $a$  при легировании покрытий одним или несколькими элементами свидетельствует о росте степени искажения кристаллической решетки, что проявляется в повышении значения полуширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$ . Так для покрытия TiAlN увеличение величины полуширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$  составило 23% по сравнению с покрытием TiN, а для покрытия TiAlCrN – 29%.

При переходе от одноэлементных покрытий TiN к трехэлементным покрытиям TiAlCrN уменьшается размер блоков областей когерентного рассеивания (ОКР) и микродеформация кристаллической решетки, что

свидетельствует о более высоких механических свойствах многоэлементных покрытий.

Таблица 2.6

Структурные параметры и механические свойства однослойных покрытий

№	Параметр	Покрытие		
		TiN	TiAlN	TiAlCrN
1.	Период кристаллической решетки $a$ , нм	0,4235	0,4224	0,4214
2.	Полуширина рентгеновской линии $\beta_{111}$ , град	0,5	0,65	0,71
3.	Остаточные напряжения $\sigma_0$ , МПа	- 775	- 902	- 1472
4.	Микродеформация кристаллической решетки $\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	6,11	8,25	9,04
5.	Размер блоков областей когерентного рассеивания (ОКР) $D$ , нм	19,0	17,0	14,0
6.	Коэффициент отслоения $K_0$	1,1	0,907	1,25
7.	Микротвердость $H_\mu$ , ГПа	27,8	30,5	35,4
8.	Коэффициент интенсивности напряжений $K_{IC}$	3,39	4,07	4,18
9.	Модуль упругости $E$ , ГПа	307	387	403
10.	Параметр $H_\mu / E$	0,090	0,079	0,087
11.	Параметр $H_\mu^3 / E^2$ , ГПа	0,228	0,189	0,273

Как видно из табл. 2.6, сжимающие остаточные напряжения  $\sigma_0$  в материале покрытия возрастают при переходе от одноэлементного покрытия TiN к многоэлементным покрытиям TiAlN и TiAlCrN в 1,16 и 1,9 раза, соответственно. Большие значения величины остаточных напряжений в материале многоэлементных покрытий способствуют повышению времени работы инструмента до образования в покрытиях трещин, что должно положительно отражаться на работоспособности инструмента [24].

Рост величин  $\beta_{111}$  и  $\sigma_0$  свидетельствует об упрочнении материала покрытия, и отражается на микротвердости покрытий  $H_{\mu}$ . Микротвердость многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN по сравнению с микротвердостью одноэлементного покрытия TiN выше на 10 % и 20 % соответственно. Наибольшую микротвердость имеет многоэлементное покрытие TiAlCrN.

На рис. 2.3 представлены дифрактограммы покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN.

Покрытия TiAlN и TiAlCrN являются однофазными. На дифрактограммах покрытий наблюдается дифракционный пик нитрида титана TiN, соответствующий кристаллической плоскости (111) кубической структуры. Как видно из рис. 2.3, дифракционные пики фазы TiN расположены практически на одинаковых углах ( $2\theta$ ) скольжения. Для покрытий TiAlN и TiAlCrN наблюдается небольшое смещение углов  $2\theta$  в сторону меньших значений.

В табл. 2.7 - 2.8 представлены фазовый анализ покрытий TiAlN и TiAlCrN.

Исследование коэффициента отслоения  $K_0$ , показали, что наибольшую прочность адгезии с инструментальной основой имеет покрытие TiAlN с  $K_0$  равным 0,907. Одноэлементное покрытие TiN и многоэлементное TiAlCrN имеют большую величину коэффициентов

отслоения  $K_0$  по сравнению с покрытием TiAlN на 17% и 27% соответственно.

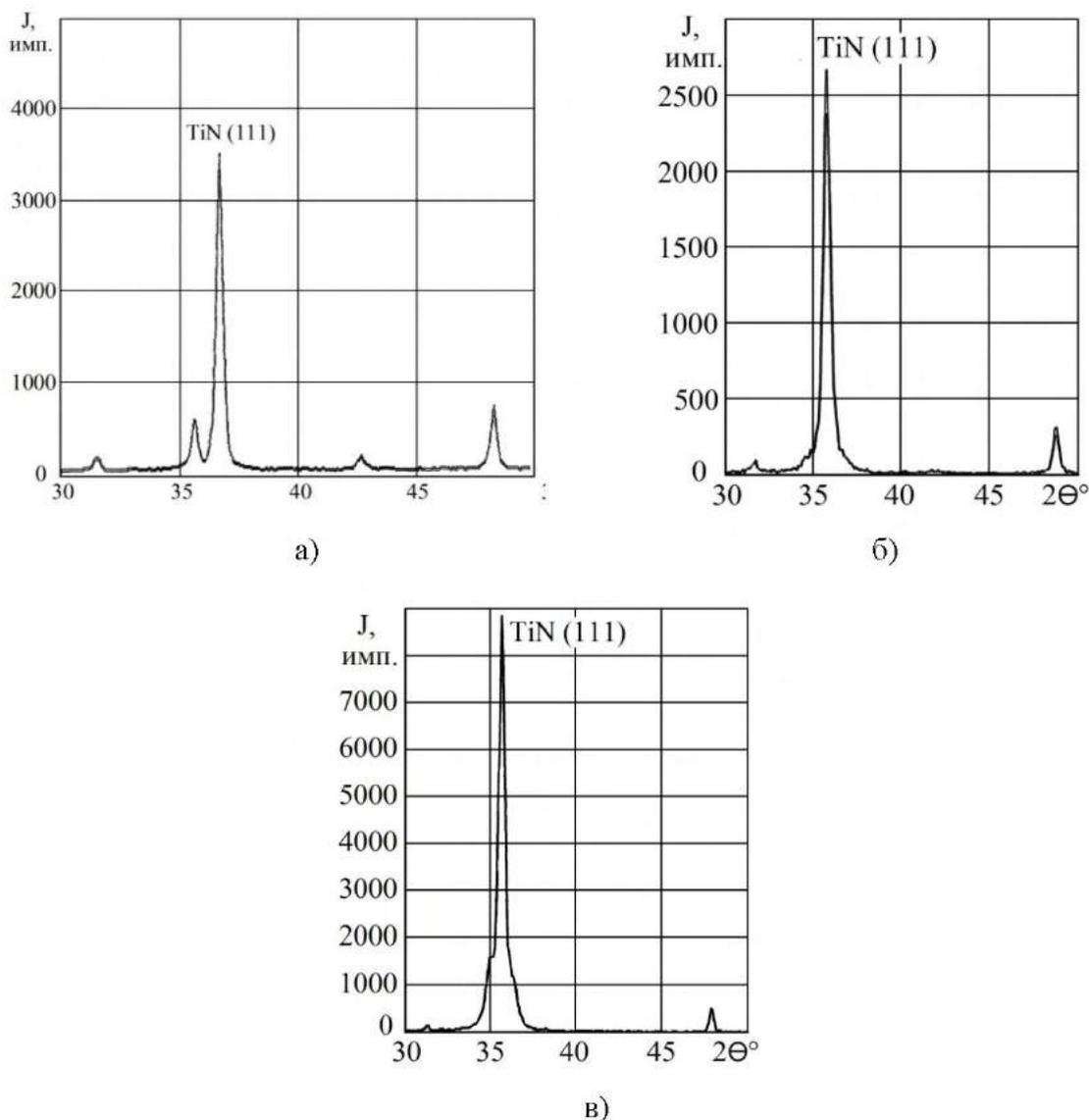


Рис. 2.3. Фрагменты дифрактограмм покрытий TiN (а), TiAlN (б) и TiAlCrN (в)

Легирование покрытий TiN одним или несколькими легирующими элементами существенно изменяет его коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1C}$  и модуль упругости  $E$ . Так увеличение критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1C}$  при переходе от одноэлементного покрытия TiN к многоэлементным покрытиям TiAlN и TiAlCrN составило, соответственно, 20% и 23%, что свидетельствует об

увеличении сопротивляемости материала многоэлементных покрытий хрупкому разрушению. Модуль упругости  $E$  покрытий TiAlN и TiAlCrN выше по сравнению с TiN на 26 % и 31 %, соответственно. Более высокие значения модуля Юнга многоэлементных покрытий свидетельствуют о повышении энергии связей между атомами и, следовательно, росте прочности материала покрытий.

Таблица 2.7

Фазовый анализ покрытия TiAlN

Угол дифракции $2\theta$ , град	Межплоскост. расстояние $d_{\text{экспер.}}, \text{ \AA}$	Относительная интенсивность	hkl	Межплоскостное расстояние $d_{\text{таблич.}}, \text{ \AA}$	Фазы покрытия	Фазы основы
31,6	2,861	0,25	001	2,820		WC
35,8	2,508	0,73	100	2,500		WC
36,7	2,4487	1,00	111	2,4474	TiN	
43,0	2,1034	0,25	200	2,1195	TiN	
48,4	1,881	1,00	101	1,870		WC
61,8	1,5012	0,19	220	1,4987	TiN	
64,1	1,453	0,26	110	1,450		WC
65,9	1,417	0,09	002	1,418		WC
73,2	1,293	0,24	111	1,290		WC
75,6	1,258	0,15	200	1,255		WC
77,2	1,236	0,27	102	1,231		WC
78,3	1,2210	0,18	222	1,2237	TiN	

Таблица 2.8

Фазовый анализ покрытия TiAlCrN

Угол дифракции $2\theta$ , град	Межплоскост. расстояние $d_{\text{экспер.}}, \text{ \AA}$	Относительная интенсивность	hkl	Межплоскостное расстояние $d_{\text{таблич.}}, \text{ \AA}$	Фазы покрытия	Фазы основы
31,6	2,861	0,27	001	2,820		WC
35,7	2,515	0,89	100	2,500		WC
36,7	2,4455	1,00	111	2,4474	TiN	
43,4	2,0849	0,08	200	2,1195	TiN	
48,4	1,881	1,00	101	1,870		WC
64,0	1,455	0,27	110	1,450		WC

Как видно из табл. 2.6, параметр  $H_{\mu}/E$ , характеризующий способность сопротивления абразивному изнашиванию и параметр  $H_{\mu}^3/E^2$ , свидетельствующий об увеличении сопротивляемости пластическому сопротивлению, для многоэлементных покрытий практически мало отличаются по сравнению с аналогичными параметрами покрытия TiN. Можно отметить небольшое повышение параметра  $H_{\mu}^3/E^2$  для трехэлементных покрытий TiAlCrN.

На основании проведенных исследований установлено, что при легировании материала покрытия TiN дополнительными элементами Al и Cr происходит изменение периода кристаллической решетки  $a$ , и последующий рост полуширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$  и сжимающих остаточных напряжений, что свидетельствует об упрочнении материала покрытия, подтверждением этого является рост микротвердости покрытий TiAlN и TiAlCrN. Наибольшую прочность адгезии имеет покрытие TiAlN, что подтверждается наименьшим значением коэффициента отслоения  $K_0$ . Наибольшую микротвердость, модуль Юнга и коэффициент интенсивности напряжений имеет трехэлементное покрытие TiAlCrN.

#### **2.4. Исследование процесса резания спиральными сверлами с однослойными износостойкими покрытиями**

Исследование функциональных параметров процесса резания при сверлении является одной из неотъемлемых частей общего исследования износостойких покрытий, в том числе с целью последующей оценки теплового состояния режущего инструмента и в последующем выборе оптимального состава многослойного покрытия и его архитектур. К функциональным параметрам процесса резания при сверлении можно отнести осевую силу  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$ .

Использовали сверла с покрытиями TiN, TiAlN, TiAlCrN и без покрытия. Обработывали заготовки из нормализованной стали 30ХГСА.

Сверление проводили на скоростях резания  $V = 10$  м/мин и  $V = 25$  м/мин и подачах на оборот  $S_0 = 0,1$  мм/об и  $S_0 = 0,09$  мм/об, соответственно.

Исследования проводилось при сверлении заготовок специальной конструкции (рис. 2.4), установленных в универсальный динамометр УДМ-600.

Конструкция заготовок позволяла определить крутящий момент и осевую силу, возникающих при сверлении, действующих на разных кромках сверла. Процесс резания при этом разбивали на три этапа: на первом этапе в работе участвовали только главные режущие кромки сверла, на втором – главные режущие и вспомогательные режущие кромки, на третьем – все режущие кромки, включая поперечную кромку.

Таким образом, конструкция заготовки позволила оценить влияние покрытий на осевую силу  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$ , действующих на разных кромках сверла.

Результаты измерения величин осевой силы резания  $P_0$  и крутящего момента  $M_{кр}$  показаны на рис. 2.5. и в табл. 2.9.

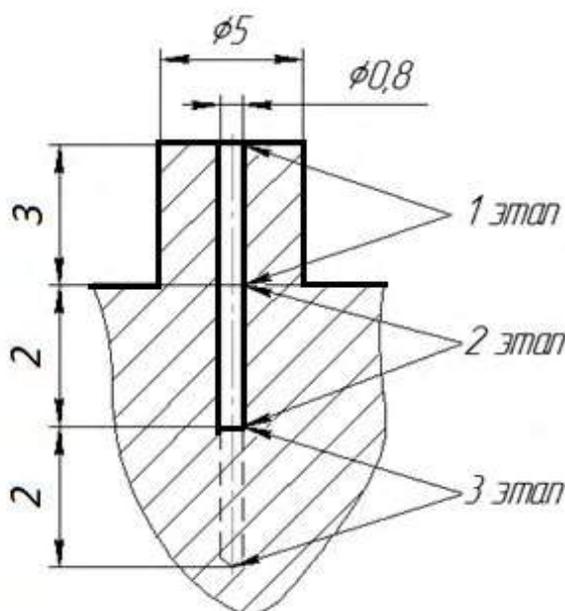
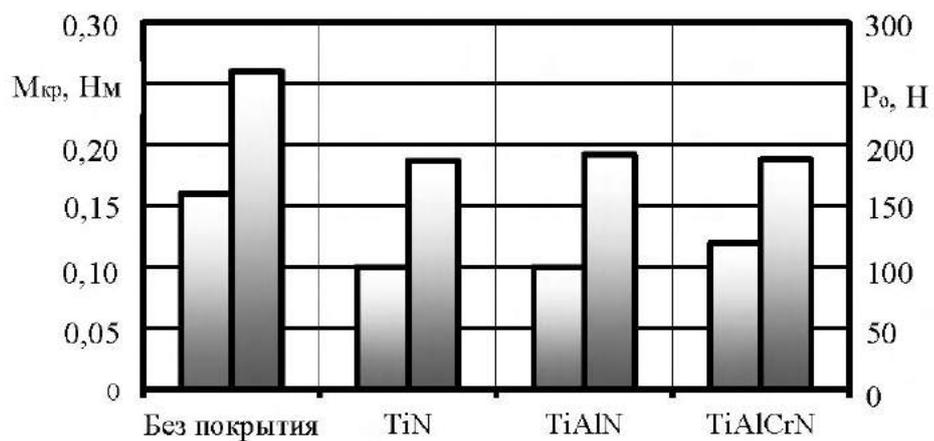
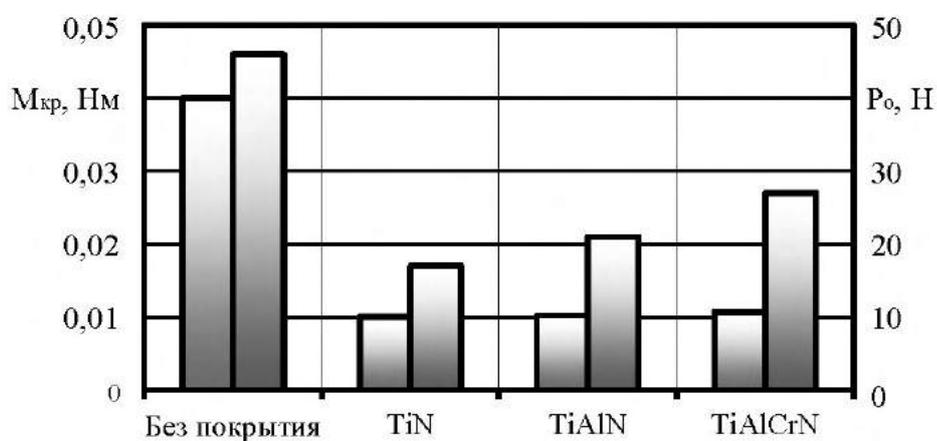


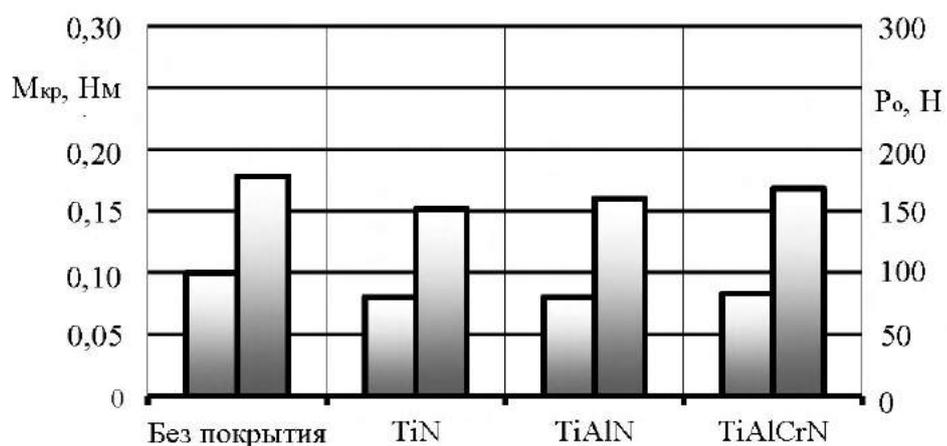
Рис. 2.4. Конструкция заготовок для сверления



а)



б)



в)

Рис. 2.5. Влияние износостойких покрытий на крутящий момент  $M_{кр}$  и осевую силу резания  $P_o$ , действующих на главной режущей кромке (а), вспомогательной режущей кромке (б) и поперечной кромке (в):  
 $V = 25$  м/мин и  $S_o = 0,09$  мм/об

## Влияние покрытий на осевую силу и крутящий момент

Покрытие	M <sub>кр</sub> , Нм / P <sub>о</sub> , Н на кромках сверла			суммарные M <sub>кр</sub> , Нм / P <sub>о</sub> , Н
	главные режущие	вспомогательные режущие	поперечная кромка	
Без покрытия	0,22 / 392	0,06 / 107	0,13 / 214	0,41 / 713
TiN	0,18 / 320	0,02 / 35	0,11 / 190	0,31 / 545
TiAlN	0,18 / 328	0,02 / 36	0,11 / 200	0,31 / 564
TiAlCrN	0,18 / 332	0,03 / 36	0,12 / 210	0,33 / 578

Примечание: V = 10 м/мин, S<sub>о</sub> = 0,1 мм/об

Анализ результатов исследований позволяет отметить следующее. Наибольшее снижение осевой силы P<sub>о</sub> и крутящего момента M<sub>кр</sub> происходит на вспомогательной режущей кромке. По сравнению со сверлом без покрытия осевая P<sub>о</sub> сила уменьшилась в 2,9-3,1 раза, а крутящий момент M<sub>кр</sub> – в 2-3 раза в зависимости от состава покрытия, [81-84].

На главной режущей кромке и поперечной кромках снижение указанных параметров существенно ниже. Так, на главной режущей кромке оно составило 18,2 % для осевой силы P<sub>о</sub> и 15,3-18,4 % для крутящего момента M<sub>кр</sub>, на поперечной кромке – соответственно от 7,6 % до 15,4 % и от 2 % до 11,2 % в зависимости от состава покрытия и режима резания.

Наибольшее снижение осевой силы P<sub>о</sub> и крутящего момента M<sub>кр</sub> на вспомогательной режущей кромке по сравнению с главной режущей и поперечной кромкой связано со снижением сил трения при нанесении покрытий. Как известно, составляющие осевой силы P<sub>о</sub> и крутящего момента M<sub>кр</sub>, действующие на вспомогательных режущих кромках,

определяются силами трения. Нанесение покрытий ведет к их снижению и влияние сил трения на уменьшение осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  на вспомогательных режущих кромках проявляется в большей степени по сравнению с другими кромками. Исследования показывают, что для сверл с покрытиями и без покрытия соотношение составляющих осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$ , действующих на разных кромках сверла, остается без изменения.

Установлено, что соотношение величин крутящего момента  $M_{кр}$  и осевой силы  $P_o$ , действующих на разных кромках сверла для сверл с покрытиями и без покрытия, практически остается без изменения. При этом, наибольшая доля крутящего момента  $M_{кр}$  и осевой силы  $P_o$  приходится на главные режущие кромки. Например, для сверл без покрытия доля осевой силы  $P_o$  составила 54 %, а крутящего момента  $M_{кр}$  – 55 %. Для сверл с покрытиями доля осевой силы  $P_o$  составила от 55% до 58 %, а крутящего момента  $M_{кр}$  – от 57% до 59 % в зависимости от состава покрытия. Доля крутящего момента  $M_{кр}$  и осевой силы  $P_o$ , приходящаяся на поперечную кромку, меньше, чем на главных режущих кромках. Так для сверл без покрытия доля крутящего момента  $M_{кр}$  составила 30 %, осевой силы  $P_o$  – 32 %, для сверл с покрытиями – соответственно 36 % и 35 %. Наименьшая доля крутящего момента  $M_{кр}$  и осевой силы  $P_o$  приходится на вспомогательные режущие кромки.

Доли осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  приходящиеся на поперечную кромку меньше, чем на главные режущие кромки. Для сверл без покрытия доля осевой силы  $P_o$  составляет 32 %, крутящего момента  $M_{кр}$  – 30 %, для сверл с покрытиями TiN, TiAlN и TiAlCrN доля осевой силы  $P_o$  составляет и крутящего момента  $M_{кр}$  составляет (35-36) %.

Наименьшая доля осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  приходится на вспомогательные режущие кромки. Для сверл без покрытия доля осевой силы  $P_o$  составляет 14 %, крутящего момента  $M_{кр}$  – 15 %, для

сверл с покрытиями TiN, TiAlN и TiAlCrN доля осевой силы  $P_o$  составляет от 6 до 9 %, крутящего момента  $M_{кр}$  – 6,5 %.

Таким образом, можно отметить, что значительное снижение осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  на вспомогательных режущих кромках ведет к существенному уменьшению их доли на данных кромках и небольшому повышению на главной режущей кромке и поперечной кромке.

Исследованиями выявлена тенденция небольшого роста осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  при переходе от одноэлементного покрытия TiN к многоэлементным TiAlN и TiAlCrN, которая составляет 6 % для осевой силы  $P_o$  и 3,5-6 % для крутящего момента  $M_{кр}$ . Данный факт может быть объяснен более высокими значениями коэффициента трения многоэлементных TiAlN и TiAlCrN по сравнению с покрытием TiN [18, 66], что приводит к росту степени пластической деформации материала и составляющих силы резания и отражается на осевой силе  $P_o$  и крутящем моменте  $M_{кр}$ .

Таким образом, проведенные исследования показали, что нанесение покрытий изменяет контактные характеристики процесса сверления заготовок. Меньшее влияние на контактные характеристики покрытия оказывают на поперечной режущей кромке сверла, большее на вспомогательных режущих кромках, что связано со «стесненными» условиями процесса резания.

## 2.5. Выводы

По результатам исследований проведенный в данной главе можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны компоновочные схемы нанесения однослойных износостойких покрытий и технологические параметры их нанесения.

Определен химический состав многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN.

2. Исследованы параметры структуры износостойких покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN. Установлено, что период кристаллической решетки  $a$  имеет тенденцию к уменьшению при дополнительном легировании покрытия TiN элементами Al и Cr. Значение полуширины рентгеновской линии  $\beta_{111}$  для многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN выше по сравнению с покрытием TiN, составило 23% и 29%, соответственно. При переходе к многоэлементным покрытиям наблюдается рост остаточных напряжений  $\sigma_0$  до  $-902$  МПа для покрытия TiAlN и  $-1472$  МПа для TiAlCrN.

3. Исследованы механические свойства износостойких покрытий TiN, TiAlN и TiAlCrN. Установлено, что многоэлементные покрытия, по сравнению с покрытием TiN, обладают более высокими механическими свойствами. Микротвердость  $H_u$  многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN выше на 10 % и 20 %, модуль Юнга  $E$  выше на 20 % и 31 %, коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1C}$  – 20%. Минимальным коэффициентом отслоения  $K_o$ , равным 0,9 обладает покрытие TiAlN.

4. Исследованиями функциональных параметров процессов резания при сверлении установлено, что нанесение покрытий существенно изменяет контактные характеристики процесса сверления заготовок. При применении износостойких покрытий происходит уменьшение величин осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$ . Так, по сравнению со сверлом без покрытия осевая  $P_o$  сила уменьшилась в 2,9-3,1 раза, а крутящий момент  $M_{кр}$  – в 2-3 раза в зависимости от состава покрытия. Также установлено, что нанесение износостойких покрытий приводит к уменьшению составляющей доли крутящего момента  $M_{кр}$  и осевой силы  $P_o$  на вспомогательных режущих кромках и поперечной кромке сверла.

## **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ**

В данной главе предложен принцип формирования и выбора состава функциональных слоев многослойного покрытия спиральных сверл, разработана методика и проведено численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спиральных сверл с однослойными износостойкими покрытиями. Предложены архитектуры многослойных покрытий, представлены технология их нанесения, результаты исследований параметров структуры, механических свойств многослойных покрытий и интенсивности изнашивания спиральных сверл с разработанными многослойными покрытиями, на основе которых определена конструкция многослойного покрытия – общая толщина и соотношение толщин функциональных слоев.

### **3.1. Принцип формирования и выбор состава функциональных слоев многослойного покрытия спиральных сверл**

Принимая во внимание идентичность протекания контактных процессов при сверлении и продольном тчении, для формирования многослойных покрытий был взят принцип их построения для условий непрерывного резания, которые характерны для резания спиральными сверлами. Подтверждением этому являются данные полученные в главе 2. Согласно данному принципу [66, 68], многослойное покрытие для обеспечения высокой сопротивляемости процессам трещинообразования должно иметь три функциональных слоя. Верхний слой, непосредственно контактирующий со стружкой, обеспечивает максимальное повышение формоустойчивости режущего клина, путем создания на передней

поверхности благоприятных условий контактного взаимодействия с материалом стружки. Нижележащий слой обеспечивает сопротивляемость многослойного покрытия процессам трещинообразования. Для этого данный слой должен иметь высокие механические свойства и высокие собственные остаточные сжимающие напряжения, обеспечивающие формирование в нем в процессе резания высоких нормальных сжимающих напряжений, сдерживающих процессы трещинообразования в покрытиях. Нижний слой, непосредственно прилегающий к инструментальной основе, обеспечивает высокую прочность адгезии с инструментальной основой.

Данные работы [68] показывают, что в качестве верхних и нижележащих слоев многослойных покрытий, предназначенных для условий непрерывного резания, следует использовать многоэлементные покрытия. В качестве нижнего – одноэлементные или двухэлементные покрытия.

Трехэлементные покрытия, как показано в [68], в наибольшей степени снижают эквивалентные напряжения на передней поверхности по сравнению с одно- и двухэлементными покрытиями и, следовательно, способствуют повышению формоустойчивости режущего клина инструмента. Кроме того, данные покрытия имеют высокие механические свойства и собственные сжимающие остаточные напряжения, которые способствуют формированию в них в процессе резания наибольших нормальных сжимающих напряжений, сдерживающих процессы трещинообразования. Следовательно, верхний слой многослойного покрытия, предназначенного для непрерывного резания, одновременно может обеспечить выполнение двух функций – обеспечить повышение формоустойчивости режущего клина инструмента и эффективно сдерживать процессы трещинообразования и интенсивность их протекания. Отсюда следует, что конструкция многослойного покрытия, предназначенного для условий непрерывного резания, может иметь

минимум два слоя – верхний слой, обеспечивающий выполнение первых двух функций и нижний слой, обеспечивающий прочность адгезии покрытия с инструментальной основой [66, 68]. Такая конструкция многослойного покрытия обеспечивает ему достаточную трещиностойкость. Необходимость введения в конструкцию многослойного покрытия промежуточного слоя может быть продиктована другими причинами, например, обеспечение еще более высокой трещиностойкости или использования его в качестве барьерного слоя, сдерживающего протекание каких-либо процессов.

Принимая во внимание выше сказанное, было принято решение использовать для спиральных сверл двухслойную конструкцию покрытия. Учитывая результаты исследований параметров структуры и механических свойств покрытий, проведенных во 2 главе, в качестве верхнего слоя можно использовать трехэлементные покрытия TiAlCrN или TiAlZrN (данное покрытие по своим параметрам структуры и механическим свойствам мало отличается от покрытия TiAlCrN [17, 66, 68]), а в качестве нижнего слоя – покрытие TiAlN, имеющее наименьший коэффициент отслоения, что свидетельствует о наибольшей адгезии данного покрытия с твердосплавной основой.

Исследования процесса сверления, проведенные в главе 2, показали, что переход от одноэлементных покрытий TiN к двух- и трехэлементным покрытиям TiAlN и TiAlCrN сопровождается изменением функциональных параметров процесса резания, которые имеют место и при непрерывной токарной обработке [17, 66-68]. Это позволяет говорить, что многоэлементные покрытия при сверлении обеспечивают более благоприятные условия контактного взаимодействия на передней поверхности, как это имеет место при токарной обработке, что положительно скажется на формоустойчивости режущего клина.

Таким образом, в качестве функциональных слоев многослойных покрытий для спиральных сверл можно рекомендовать трехэлементные покрытия TiAlCrN и TiAlZrN и двухэлементное покрытие TiAlN.

### **3.2. Численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спиральных сверл с однослойными износостойкими покрытиями**

Тепловое состояние режущего инструмента характеризуется контактными температурами и температурным полем в его режущем клине. Для определения данных характеристик теплового процесса была взята за основу экспериментально-аналитическая методика определения тепловых явлений при сверлении, предложенная проф. А.Н. Резниковым [9, 44, 45]. Аналогичные методики успешно применялись в работах [70 – 72] и позволяли достаточно точно определять тепловое состояние режущего инструмента в процессе резания, в том числе и для оценки теплового состояния режущего инструмента с покрытием [17, 50, 65].

Согласно данной методике, сверло представляет одну из распространенных разновидностей многолезвийных инструментов. Особенностью процесса сверления является неодинаковое тепловыделение в различных точках каждой из режущих кромок инструмента (рис. 3.1). Интенсивность тепловыделения на этих участках может быть рассчитана по формуле:

$$q(d) = \frac{dQ(x)}{dx} = c_3 d \cdot \delta(d). \quad (3.1)$$

где  $\frac{dQ(x)}{dx}$  – тепловыделение на любом участке кромки  $dx$ , кал;  $c_3d$  – безразмерный коэффициент [44, 45];  $\delta(d)$  – угол резания на участке кромки, град.

Для стандартных сверл при отсутствии подточки передней поверхности  $\delta(d) \approx \arctg D/d \cdot \sin\varphi/\operatorname{tg}\beta$  [44, 45].

Учитывая это, интенсивность тепловыделения  $q$ , кал/(см·сек) может быть определена:

$$q(d) = c_3d \cdot \arctg D/d \cdot \sin\varphi/\operatorname{tg}\beta. \quad (3.2)$$

где  $D$  – номинальный диаметр сверла, мм;  $d$  – переменный диаметр сверла на любом участке кромки, мм;  $\beta$  – угол спирали на периферии инструмента, град.

Вместе с этим в работе [73] показано, что с достаточной для практики точностью выражение (3.2) можно аппроксимировать зависимостью:

$$q(\psi) = q_0(1 - e^{-m\psi}), \quad (3.3)$$

где  $\psi = d/D$  – безразмерный параметр,  $m$  – поправочный коэффициент, а  $q_0$ , кал/(см·сек) – интенсивность тепловыделения, может быть определена как:

$$q_0 = 3,74 \cdot 10^{-3} (nM_{кр}/D). \quad (3.4)$$

где  $n$  – частота вращения сверла, об/мин;  $M_{кр}$  – крутящий момент при сверлении, Нм;  $D$  – номинальный диаметр сверла, мм;

Погрешность аппроксимации (3.3) зависит от поправочного коэффициента  $m$ . При  $m = 2$  погрешность аппроксимации составляет около 14%, при  $m = 3$  – около 5%.

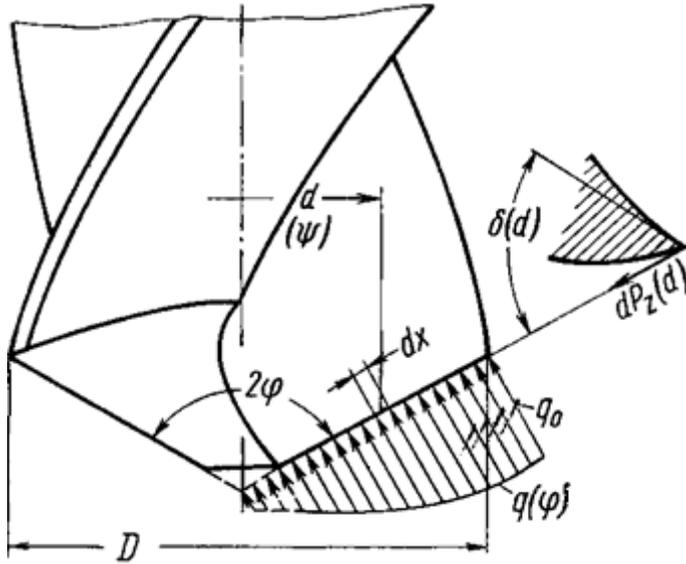


Рис. 3.1. Схема для описания закона распределения суммарной интенсивности теплообразующих потоков

Таблица 3.1

Результаты расчета интенсивности тепловыделения  $q_0$

Покрытие	Интенсивность тепловыделения $q$ на кромках сверла, Вт/м·10 <sup>-3</sup>		
	главные режущие, $q_0$ , Вт/м·10 <sup>-3</sup>	вспомогательные режущие $q_{0вк}$ , Вт/м·10 <sup>-3</sup>	поперечная кромка $q_{0пк}$ , Вт/м·10 <sup>-3</sup>
Без покрытия	191,5	2,0	5,0
TiN	119,7	0,5	4,0
TiAlN	119,7	0,6	4,0
TiAlCrN	143,6	0,9	4,2

Примечание:  $V = 10$  м/мин,  $S_0 = 0,1$  мм/об

Основываясь на вышеуказанной методике и имея полученные данные по величинам крутящего момента  $M_{кр}$  представленным в п.2.4

настоящей работы, был проведен расчет интенсивности тепловыделения  $q_0$ , Вт/м·10<sup>-3</sup> для главных, вспомогательных режущих кромок –  $q_{0BK}$  и поперечной кромки –  $q_{0ПК}$ , сверла без покрытия и с покрытиями TiN, TiAlN, TiAlCrN (табл. 3.1). Используя зависимость (3.3) установлен характер распределения интенсивности тепловыделения  $q(\psi)$  вдоль главных режущих кромок сверла  $l$  от центра сверла к его периферии (рис. 3.2).

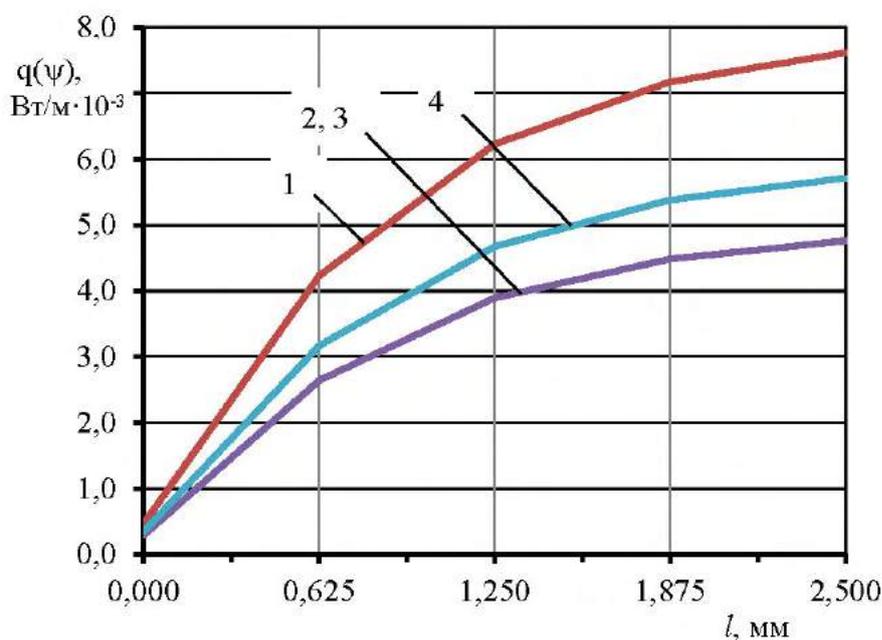


Рис. 3.2. Распределение интенсивности тепловыделения  $q(\psi)$  вдоль главных режущих кромок сверла  $l$  от центра сверла к его периферии:

1 – без покрытия; 2, 3 – TiN и TiAlN; 4 – TiAlCrN

Анализируя полученные результаты расчета интенсивности тепловыделения  $q_0$  на различных кромках сверла можно сделать вывод, что наибольшая интенсивность тепловыделения наблюдается на главных режущих кромках. Нанесение покрытий TiN и TiAlN снижает интенсивности тепловыделения на главных режущих кромках на 37%, покрытия TiAlCrN – на 25%. Применение износостойких покрытий так же перераспределяет интенсивности тепловыделения между режущими

кромками сверла, значительно уменьшая интенсивность тепловыделения на вспомогательных режущих кромках. Так при использовании покрытия TiN величина  $q_0$  уменьшается в 4 раза, а при использовании покрытий TiAlN и TiAlCrN в 3,3 и 2,2 раза соответственно. Уменьшение интенсивности тепловыделения на поперечной режущей кромке менее выражено.

Распределение интенсивности тепловыделения вдоль главных режущих кромок сверла  $l$  показывает рост величины  $q(\psi)$  от центра сверла к его периферии. Вместе с этим применение износостойких покрытий этот рост сдерживает. Наибольшее снижение оказывают покрытия TiN и TiAlN.

Температурные поля в режущих клиньях сверл рассчитывали при установившемся процессе резания, тепловое состояние режущего клина при этом можно считать стационарным [44, 45].

Для построения температурных полей в пакете прикладных программ *ANSYS* была создана трехмерная модель спирального сверла, на контактные площадки которого накладывались интенсивности тепловыделения. Схема наложения интенсивностей тепловых потоков на контактные площадки сверла показана на рис. 3.3. Как видно из представленной схемы тепловые потоки накладывались на три контактные площадки сверла, характеризующих тепловые источники при сверлении.

На контактные площадки главных режущих кромок (поз. 1, рис. 3.3) прикладывали интенсивности тепловыделения  $q(\psi)$  вдоль главных режущих кромок сверла  $l$  от центра сверла к его периферии согласно полученному распределению (рис. 3.2). Ширина площадки приложения интенсивности  $q(\psi)$  характеризуется величиной длины контакта стружки с передней поверхностью  $S_\gamma$ . Из-за малого значения диаметра сверла величина  $S_\gamma$  незначительно изменяется по длине режущей кромки сверла  $l$ . В связи с этим, с целью упрощения моделирования, величина  $S_\gamma$  была

принята равномерной по все длине. Полная длина контакта стружки с передней поверхностью определялась экспериментально.

На контактные площадки вспомогательных режущих кромок и поперечной кромки (поз. 2 и 3, рис. 3.3) прикладывали интенсивность тепловыделения  $q_{0\text{вк}}$  и  $q_{0\text{пк}}$  (табл. 3.1), которые рассчитывали по вышеуказанной методике, используя экспериментальные данные, полученные в главе 2.

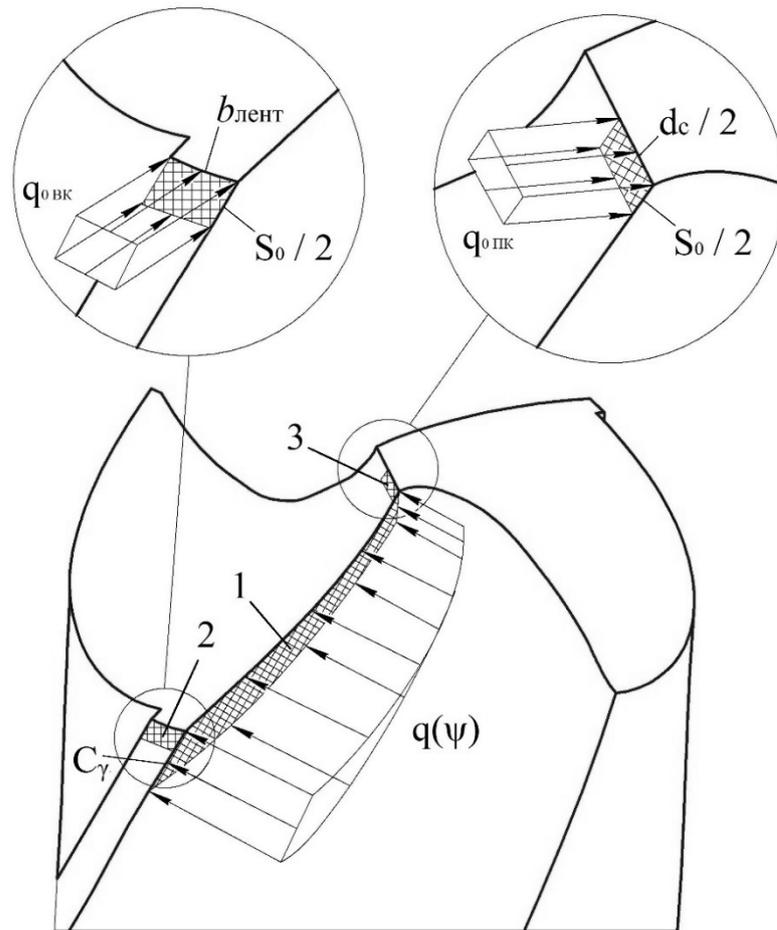


Рис. 3.3. Схема наложения интенсивностей тепловых потоков на контактные площадки сверла

Одновременно с этим были приняты границы площадок 2 и 3 приложения интенсивностей тепловыделения. Площадка 2 ограничена следующими параметрами:  $b_{\text{лент}}$  – шириной ленточки сверла и величиной равной половине подачи на один оборот сверла –  $S_0/2$ . Площадка 3

ограничена половиной длины поперечной кромки, определенной исходя из конструктивно-геометрических параметров сверла и равной половине диаметра сердцевины сверла  $d_c / 2$ , и так же, величиной равной половине осевой подачи на один оборот сверла –  $S_o / 2$ .

Согласно рекомендациям вышеуказанных работ [44, 45] для упрощения расчета, при сохранении достаточной для практики точности, распределение интенсивности теплового потока на задней поверхности не учитывалось.

Результаты расчета распределения температурных полей на контактных площадках и в режущем клине сверла без покрытия и с различными покрытиями представлены на рис. 3.4 – 3.7 [79].

Представленные на рис. 3.4 результаты численного моделирования с высокой степенью достоверности отражает физический процесс операции сверления и влияния покрытий на тепловое состояние контактных площадок спирального сверла. Наблюдается рост тепловыделения от центра сверла к его периферии, связанный с увеличением скорости резания и уменьшение тепловыделения по мере отдаления от режущих кромок (от 3% до 5 % в зависимости от состава покрытия). Максимальные температуры на контактных площадках сверл с покрытиями и без покрытия имеют место на главных режущих кромках вблизи ленточки. Нанесение износостойких покрытий снижает данную температуру. Наибольшее снижение температуры наблюдается при нанесении покрытий TiN и составляет в среднем 36 %. Применение покрытий TiAlN и TiAlCrN так же ведет к снижению максимальной температуры на главных режущих кромках вблизи ленточек по сравнению со сверлом без покрытия на 34 % и 24 % соответственно. Аналогичное уменьшение температур установлено на поперечной кромке и вспомогательных режущих кромках.

Установлено, что нанесение покрытия TiN смещает изотермы температурных полей в режущем клине спирального сверла в сторону

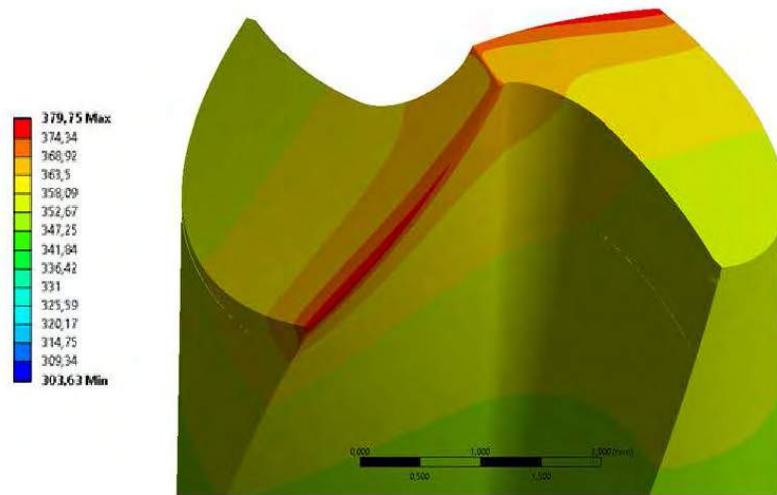
главной режущей кромки и ленточки по сравнению со сверлом без покрытия (Рис. 3.5 – 3.7). Наблюдаемое смещение связано с уменьшением длины контакта  $S_{\gamma}$  при нанесении покрытия. Так, в секущей плоскости на середине главной режущей кромки это смещение составило в среднем 40%. Нанесение многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN из-за увеличения величины  $S_{\gamma}$  по сравнению с покрытием TiN ведет к смещению изотерм температур в режущем клине в сторону от режущей кромки и ленточки соответственно на 11 % и 31 %.

Аналогичное смещение изотерм температуры происходит и в секущих плоскостях главной режущей кромки на расстоянии 0,1 мм от поперечной кромки сверла и вспомогательных режущих кромок. При этом наблюдаемое смещение изотерм температуры в режущем клине сверла в сторону от режущей кромки возрастает в направлении от вершины сверла к вспомогательным режущим кромкам.

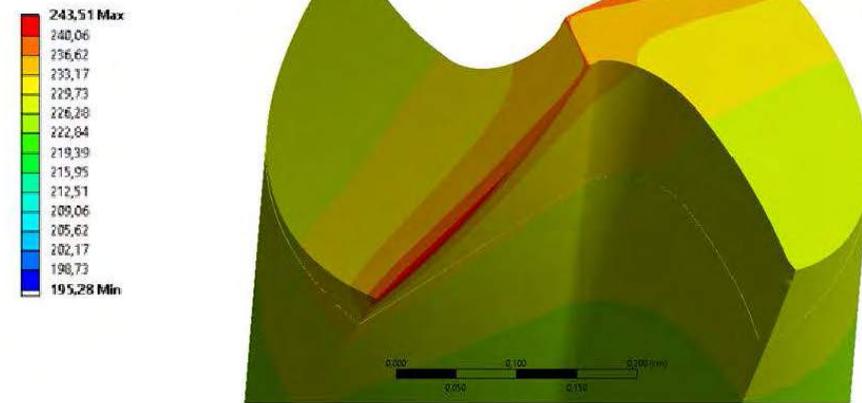
На рис. 3.5 – 3.7 представлено распределение температурных полей в режущем клине сверл без покрытия и с покрытиями TiN, TiAlN и TiAlCrN в трёх различных главных секущих плоскостях: по середине главной режущей кромки, на расстоянии 0,1 мм от поперечной кромки и 0,1 мм от вспомогательной режущей кромки.

Как видно из представленных данных состав износостойких покрытий влияет на распределение температур в режущем клине спиральных сверл. Большая длина контакта стружки с передней поверхностью  $S_{\gamma}$ , характерная для многоэлементных покрытий, способствует большему смещению изотерм температуры в сторону от режущей кромки и ленточки по сравнению с покрытием TiN.

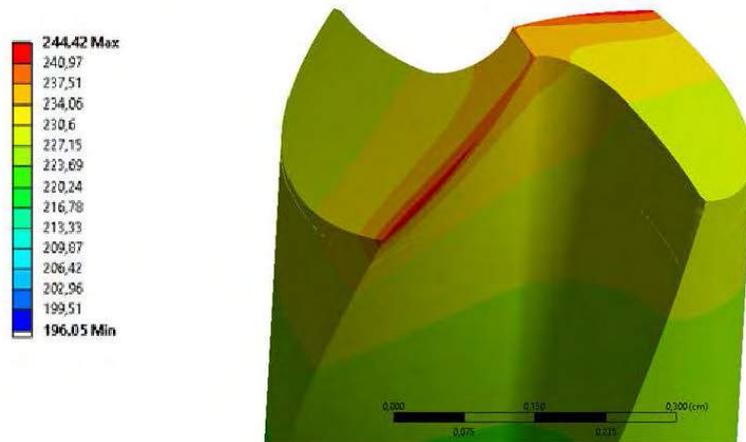
Исследованиями установлено, что изотермы температур многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN смещаются в сторону от главных режущих кромок по сравнению с покрытием TiN в среднем на 11 % и 31 %, соответственно, во всех трех секущих плоскостях.



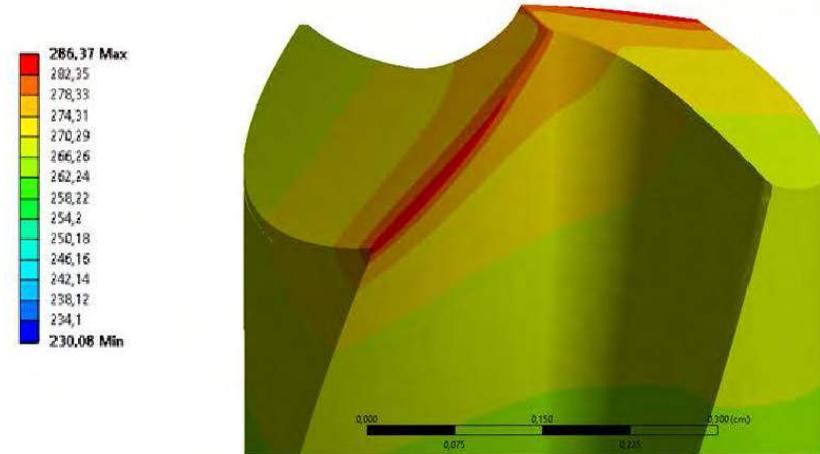
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.4. Распределение температурных полей на контактных площадках сверла, °С:  
а – без покрытия; б – TiN; в – TiAlN; г – TiAlCrN

Например, в сечении режущего клина по середине режущей кромки сверла с покрытием TiN (рис. 3.6) изотерма, соответствующая температуре 230 °С, расположена к режущей кромке ближе по сравнению с изотермами многоэлементных покрытий. Изотермы температуры 230 °С для многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN смещены в сторону от режущей кромки на большее расстояние по сравнению с покрытием TiN, соответственно, на 10% и 17%. Аналогичное смещение изотерм происходит и в секущих плоскостях режущей кромки на расстоянии 0,1 мм от поперечной кромки и на расстоянии 0,1 мм от вспомогательной режущей кромки сверла.

Наибольшее смещение изотерм оказывает нанесение покрытия TiAlCrN, что положительно сказывается на тепловом состоянии режущего клина и работоспособности сверла.

Анализируя полученные распределения температурных полей в режущем клине сверла, можно увидеть, что нанесение покрытий вызывает уменьшение абсолютных значений температуры во всех трёх сечениях. Наибольшие значения температуры имеет сверло без покрытия, наименьшие с покрытием TiN. Так, нанесение покрытия TiN снижает температуру в режущем клине в секущей плоскости режущей кромки на расстоянии 0,1 мм от поперечной кромки на 16 %, в секущих плоскостях по середине режущей кромки сверла и на расстоянии 0,1 мм от вспомогательной режущей кромки сверла на 37 %. Покрытия TiAlN и TiAlCrN по сравнению с покрытием TiN снижают температуру в режущем клине в указанных секущих плоскостях, соответственно, на 8-13 %, 10-16 % и 13-19 %.

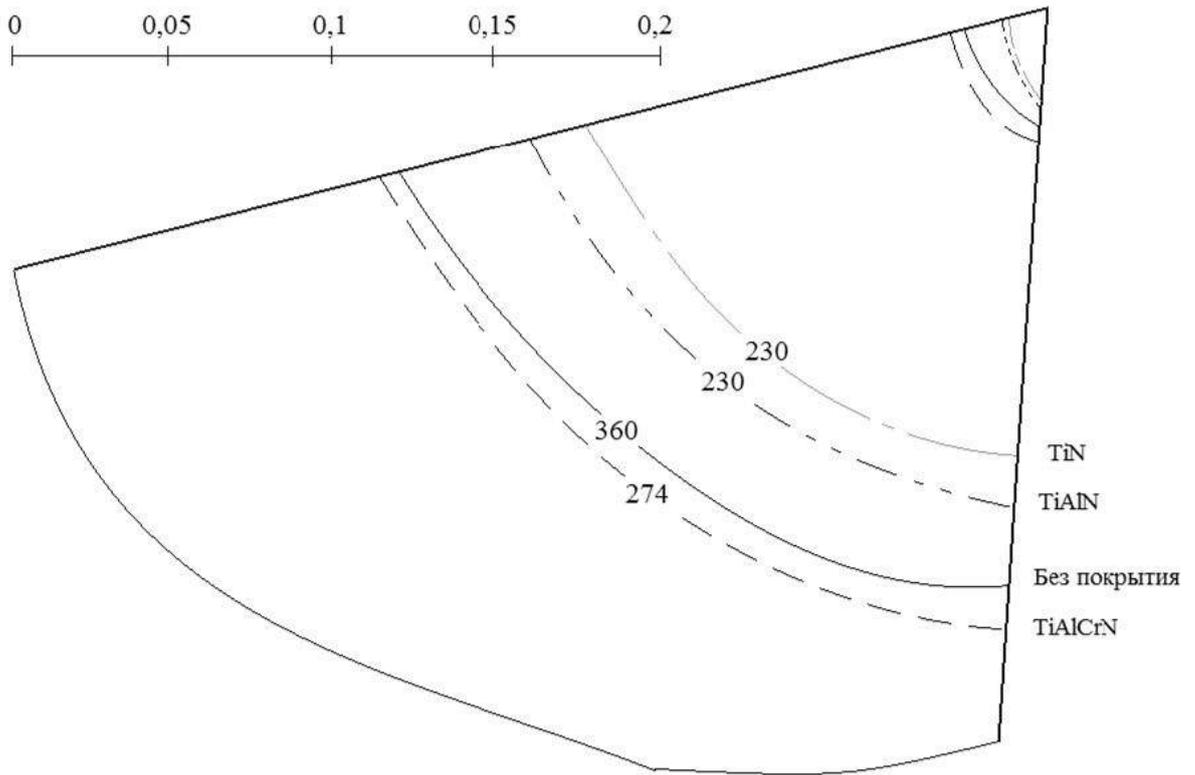


Рис. 3.5. Распределение температурных полей в режущем клине в секущей плоскости режущей кромки на расстоянии 0,1 мм от поперечной кромки, °С

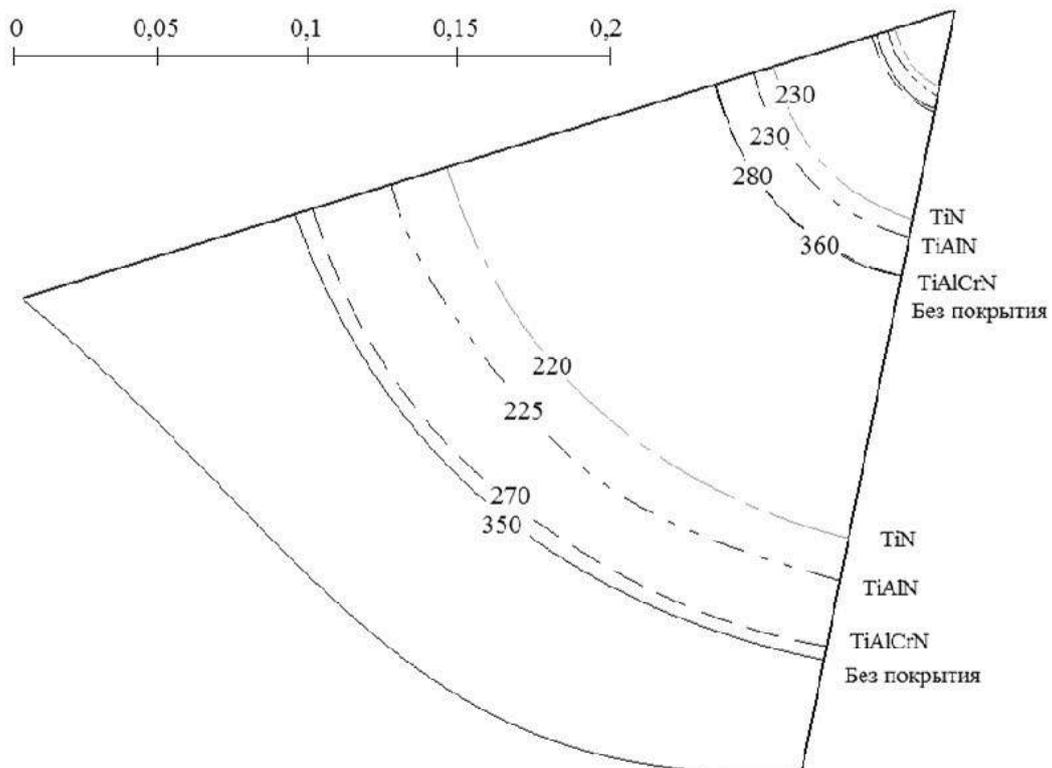


Рис. 3.6. Распределение температурных полей в режущем клине в секущей плоскости на середине главной режущей кромки сверла, °С

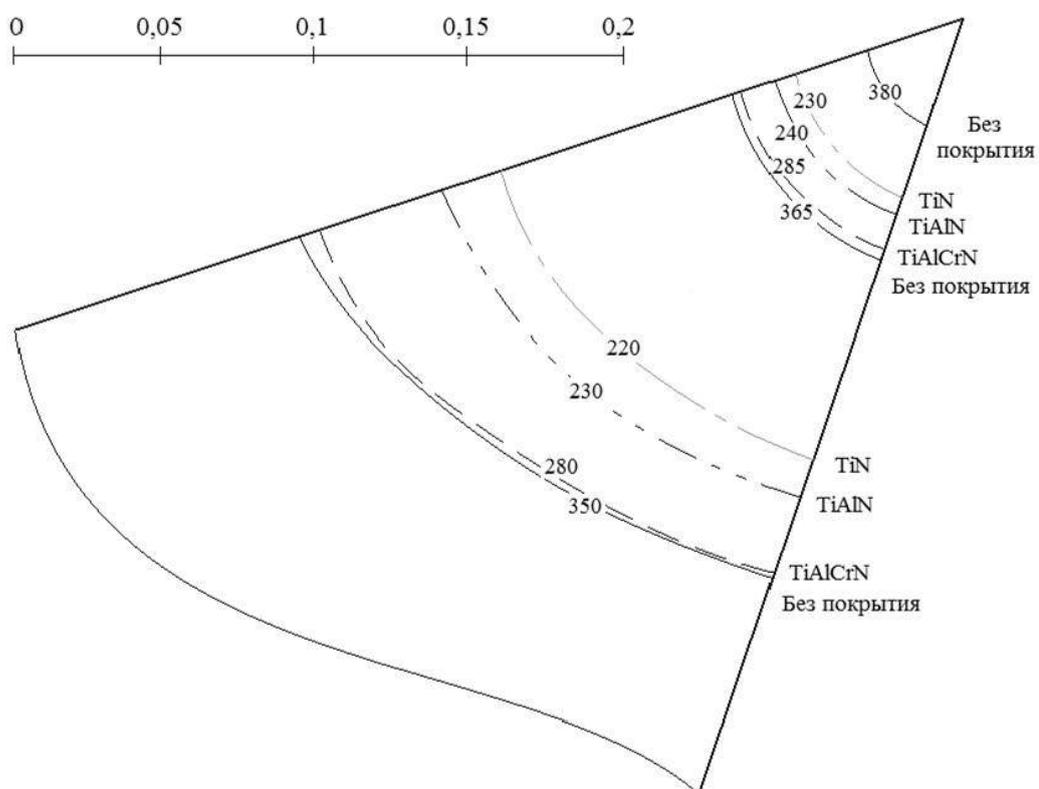


Рис. 3.7. Распределение температурных полей в режущем клине в секущей плоскости режущей кромки на расстоянии 0,1 мм от вспомогательной режущей кромки сверла, °С

Распределение температуры вдоль главной режущей кромки сверла показано на рис. 3.8. Как видно, максимальная температура на главной режущей кромки для всех секущих плоскостей характерна для сверла без покрытия, наименьшая – для сверла с покрытием TiN. Покрытие TiN снижает температуру на режущей кромке в 1,6 – 1,7 раза по сравнению со сверлом без покрытия. Для сверл с многоэлементными покрытиями TiAlN и TiAlCrN характерно повышение температуры вдоль режущей кромки по сравнению с покрытием TiN на 4 % и 20 % соответственно. Аналогичное снижение температуры происходит на вспомогательной режущей кромке и поперечной кромке.

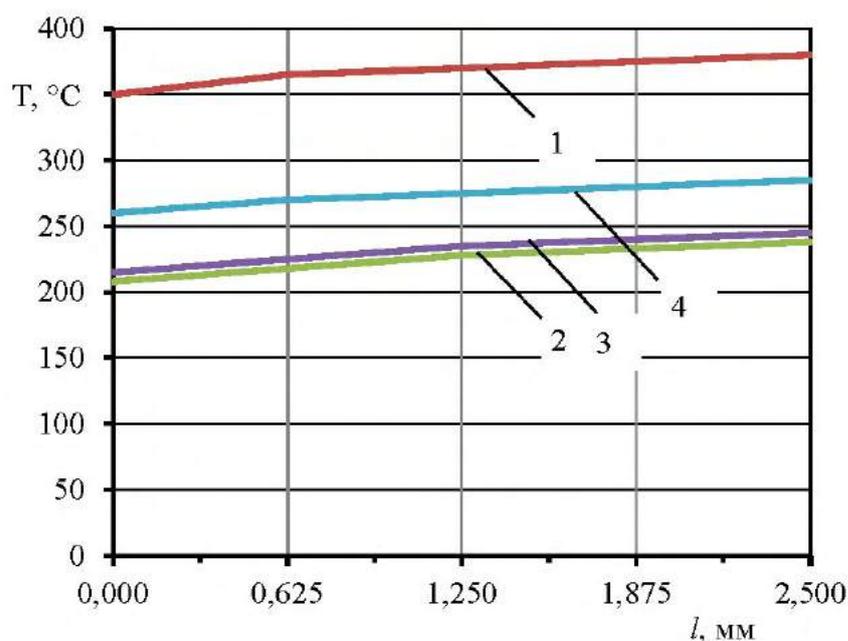


Рис. 3.8. Распределение температуры вдоль главной режущей кромки сверла, °C: 1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – TiAlN; 4 – TiAlCrN

Полученные данные по тепловому состоянию сверл показывают, что наилучшее тепловое состояние режущего клина инструмента, обеспечивает покрытие TiAlCrN, которое, несмотря на некоторое повышение контактной температуры на передней поверхности по сравнению с покрытиями TiN и TiAlN, смещает изотермы температур от главных режущих кромок вглубь сверла. Это ведет к снижению теплонапряженности у вершины режущего клина сверла и на ленточках (вспомогательных режущих кромках) и должно благоприятно отразиться на его работоспособности.

### 3.3. Архитектура и технология нанесения многослойных покрытий

Результаты исследований механических свойств однослойных износостойких покрытий, которые могут быть использованы в качестве функциональных слоев многослойного покрытия, и процесса резания

спиральными сверлами с данными покрытиями, проведенные во 2 главе, и численного моделирования теплового состояния рабочих элементов спиральных сверл показали, что в качестве верхних слоев двухслойных покрытий для спиральных сверл можно использовать трехэлементные покрытия TiAlCrN и TiAlZrN (данное покрытие по структурным параметрам и механическим свойствам соответствует покрытию TiAlCrN [17, 66, 68]). Данные покрытия имеют высокие механические свойства, а использование их при сверлении обеспечит благоприятные условия контактного взаимодействия на передней поверхности спиральных сверл и лучшее тепловое состояние их элементов, что полностью соответствует принятому принципу формирования многослойного покрытия.

В качестве нижнего слоя можно использовать двухэлементное покрытие TiAlN, которое, как показали исследования 2 главы, обеспечит двухслойному покрытию наибольшую прочность адгезии с инструментальной основой.

На основании вышеизложенного были предложены следующие архитектуры двухслойных покрытий для спиральных сверл TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN.

Данные покрытия наносили на установке «Булат-6Т», оснащенной системой магнитной фокусировки плазменного потока. Нанесение многослойных покрытий производили с использованием литых катодов из сплава титана и алюминия, и составных катодов из титана со вставкой из хрома или циркония. Технологическая компоновочная схема установки представлена на рис. 3.9.

При нанесении многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN использовали два литых катодов из сплава титана и алюминия (катоды №1 и №3) и составной катод №2 из титанового сплава BT1-0 со вставкой из хрома диаметром 20 мм. Нижний слой покрытия наносили катодами №1 и №3, а верхний всеми тремя катодами.

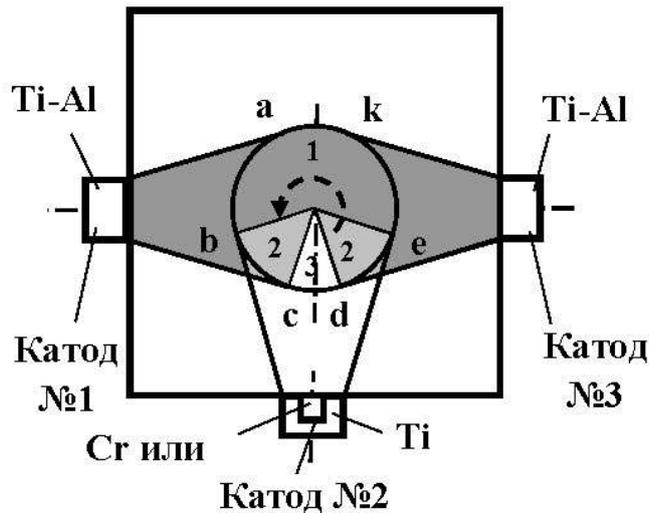


Рис. 3.9. Технологическая компоновочная схема установки для нанесения многослойного покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN

При нанесении многослойного покрытия TiAlN-TiAlZrN нижний слой наносили так же двумя литыми катодами из сплава титана и алюминия, а при нанесении верхнего слоя дополнительно к ним включали составной катод из титана со вставкой из циркония диаметром 20 мм.

Химический состав слоёв получаемых двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN представлен в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Химический состав получаемых многослойных покрытий

№	Покрытие	Слой покрытия	Химический состав (масс.)
1	TiAlN-TiAlCrN	TiAlCrN	6 % Cr+ 16 % Al + 78 % Ti
		TiAlN	23 % Al + 77 % Ti
2	TiAlN-TiAlZrN	TiAlZrN	18 % Al + 12 % Zr + 70 % Ti
		TiAlN	23 % Al + 77 % Ti

Технологические параметры нанесения двухслойных износостойких покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN при определении их рациональных конструкций представлены в табл. 3.3.

### **3.4. Исследование параметров структуры и механических свойств многослойных покрытий**

Исследования структурных параметров и механических свойств проводили на примере двухслойного покрытия TiAlN-TiAlCrN. Покрытия наносили на четырёхгранные неперетачиваемые твердосплавные пластины из сплава ВК6 производства ЗАО «Твердосплавная компания» (Россия).

В качестве исследуемых структурных параметров были выбраны период кристаллической решетки  $a$ , полуширина рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , размеры блоков областей когерентного рассеивания (ОКР)  $D$ , относительную микродеформацию кристаллической решетки  $\Delta a/a$ .

В качестве механических свойств – микротвердость  $H_{\mu}$ , модуль Юнга  $E$ , коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , характеризующий трещиностойкость, сопротивляемость покрытий абразивному  $H_{\mu}/E$  и пластическому  $H_{\mu}^3/E^2$  деформированию и коэффициент отслоения  $K_o$ , характеризующий прочность адгезии покрытия.

Согласно рекомендациям работ [66-68] толщина нижнего функционального слоя двухслойного покрытия по отношению к общей толщине покрытия составляет 40 %. Учитывая это, для определения рационального соотношения толщин функциональных слоев покрытия TiAlN-TiAlCrN исследовали две конструкции данного покрытия с общей толщиной 5 мкм и 6 мкм. Для каждой из конструкций толщина нижнего слоя по отношению к общей толщине покрытия ( $\Delta$ ) изменялась в пределах от 33 % до 66 %.

Таблица 3.3

Технологические режимы нанесения двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN

Покрытие	Слой	Толщина, мкм		Технологические параметры процесса конденсации										
				Катод №1			Катод №2			Катод №3			Опорное напря- жение	Время конденса- ции
		МП	слоя	Матер.	I <sub>д</sub> ,А	I <sub>ф</sub> ,А	Матер.	I <sub>д</sub> ,А	I <sub>ф</sub> ,А	Матер.	I <sub>д</sub> ,А	I <sub>ф</sub> ,А	U <sub>оп</sub> , В	T <sub>к</sub> , мин
TiAlN- TiAlCrN	TiAlN	6	2	TiAl	110	0,4	-	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	18
	TiAlCrN		4	TiAl	110	0,4	Ti-Cr	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	35
	TiAlN	6	4	TiAl	110	0,4	-	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	35
	TiAlCrN		2	TiAl	110	0,4	Ti-Cr	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	18
	TiAlN	6	3	TiAl	110	0,4	-	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	27
	TiAlCrN		3	TiAl	110	0,4	Ti-Cr	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	27
TiAlN- TiAlZrN	TiAlN	6	2	TiAl	110	0,4	-	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	18
	TiAlZrN		4	TiAl	110	0,4	Ti-Zr	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	35
	TiAlN	6	4	TiAl	110	0,4	-	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	35
	TiAlZrN		2	TiAl	110	0,4	Ti-Zr	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	18
	TiAlN	6	3	TiAl	110	0,4	-	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	27
	TiAlZrN		3	TiAl	110	0,4	Ti-Zr	110	0,4	TiAl	110	0,4	160	27

Примечание: Ионная очистка: I<sub>д</sub> = 110 А, I<sub>ф</sub> = 0,35 А, T = 10 мин

Результаты исследований влияния конструкции двухслойных покрытий на их фазовый состав и структурные параметры представлены на рис. 3.10 и в табл. 3.4-3.5.

На рис. 3.10 представлена дифрактограмма двухслойного покрытия TiAlN-TiAlCrN.

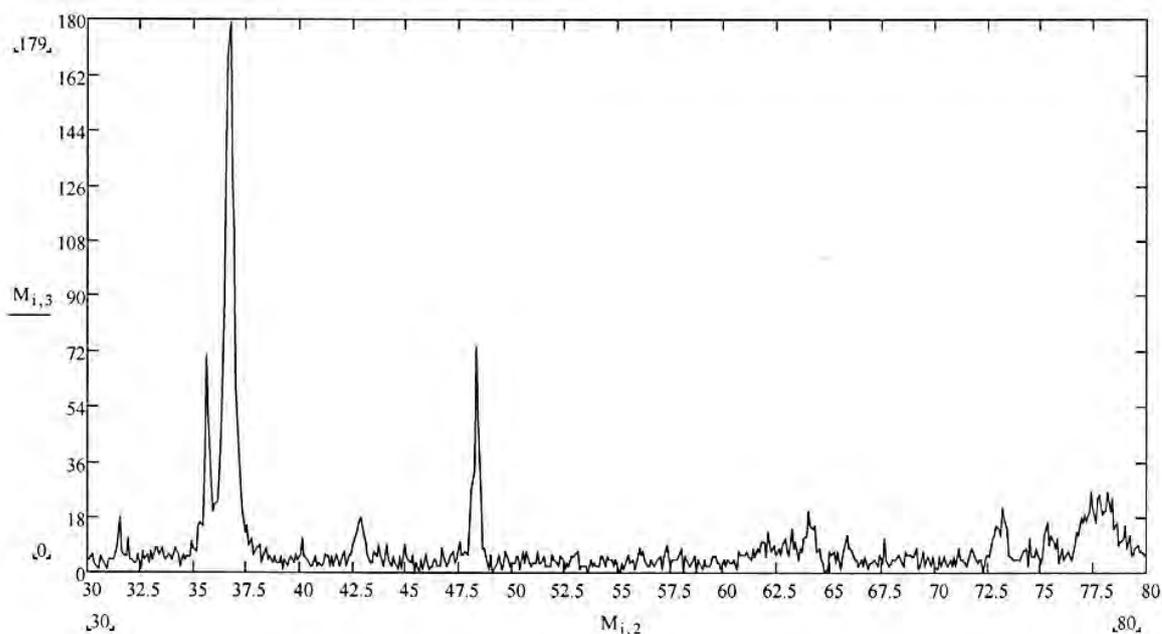


Рис. 3.10. Дифрактограмма покрытия TiAlN-TiAlCrN

Как видно, двухслойные покрытия TiAlN-TiAlCrN, как и однослойные покрытия TiAlN и TiAlCrN (см. табл. 2.7 – 2.8) являются однофазными. На дифрактограмме двухслойного покрытия TiAlN-TiAlCrN также присутствует одна фаза нитрида титана TiN с преимущественной текстурой (111). Дифракционный пик нитрида титана TiN максимальной интенсивности, соответствующий кубической кристаллической решетки, расположен на угле  $2\theta=36,7^\circ$ , как это имело место для однослойных покрытий.

Анализ фазового состава покрытий (табл. 3.4-3.5) показывает, что в покрытиях присутствуют фазы нитрида титана TiN и карбида вольфрама WC, расположенные на примерно одинаковых углах скольжения и

незначительно отличающиеся интенсивностью. Следует отметить, что фазовый состав двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN с различным соотношением толщин функциональных слоев практически не отличается друг от друга.

Таблица 3.4

Фазовый анализ покрытия TiAlN (4,0)-TiAlCrN (2,0)

Угол дифракции 2θ, град	Межплоскост. расстояние d <sub>экспер.</sub> , Å	Относительная интенсивность	hkl	Межплоскостное расстояние d <sub>таблич.</sub> , Å	Фазы покрытия	Фазы основы
31,7	2,823	0,27	001	2,820		WC
35,7	2,515	0,85	100	2,500		WC
36,8	2,4423	1,00	111	2,4474	TiN	
43,1	2,0988	0,15	200	2,1195	TiN	
48,4	1,881	1,00	101	1,870		WC
64,2	1,451	0,42	110	1,450		WC

Таблица 3.5

Фазовый анализ покрытия TiAlN (2,0)-TiAlCrN (4,0)

Угол дифракции 2θ, град	Межплоскост. расстояние d <sub>экспер.</sub> , Å	Относительная интенсивность	hkl	Межплоскостное расстояние d <sub>таблич.</sub> , Å	Фазы покрытия	Фазы основы
31,6	2,861	0,29	001	2,820		WC
35,8	2,508	0,76	100	2,500		WC
36,7	2,4455	1,00	111	2,4474	TiN	
43,2	2,0941	0,14	200	2,1195	TiN	
48,4	1,881	1,00	101	1,870		WC
64,1	1,453	0,44	110	1,450		WC

Структурные параметры двухслойных покрытий в сравнении с однослойными представлены в табл. 3.7.

Анализ данных табл. 3.7 показывает, что параметры структуры многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN практически не отличаются от

однослойных покрытий TiAlN и TiAlCrN. При этом соотношение толщин слоев практически не отражается на параметрах структуры.

Результаты исследования механических свойств покрытий представлены в табл. 3.8 - 3.10 и на рис. 3.10-3.15.

Таблица 3.6

Фазовый анализ покрытия TiAlN (3,0)-TiAlCrN (3,0)

Угол дифракции $2\theta$ , град	Межплоскост. расстояние $d_{\text{экспер.}}, \text{Å}$	Относительная интенсивность	HKL	Межплоскостное расстояние $d_{\text{таблич.}}, \text{Å}$	Фазы покрытия	Фазы основы
31,5	2,840	0,25	001	2,820		WC
35,6	2,522	0,96	100	2,500		WC
36,7	2,449	1,00	111	2,440	TiN	
42,9	2,108	0,10	200	2,116	TiN	
48,3	1,884	1,00	101	1,870		WC
62,1	1,495	0,07	220	1,495	TiN	
64,0	1,455	0,27	110	1,450		WC
65,8	1,419	0,16	002	1,418		WC
73,2	1,293	0,29	111	1,290		WC
75,3	1,262	0,22	200	1,255		WC
77,1	1,237	0,26	102	1,231		WC
78,2	1,222	0,15	222	1,221	TiN	

Таблица 3.7

Структурные параметры покрытий

№ п/п	Покрытие	$a$ , нм	$\beta_{111}$ , град	$D$ , нм	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$
1	TiAlN	0,4224	0,65	17,0	8,25
2	TiAlCrN	0,4214	0,71	14,0	9,04
3	TiAlN (2,0)- TiAlCrN (4,0)	0,4212	0,68	14,0	8,67
4	TiAlN (3,0)- TiAlCrN (3,0)	0,4212	0,66	15,0	8,36
5	TiAlN (4,0)- TiAlCrN (2,0)	0,4213	0,64	15,0	8,09

Измерение микротвердости проводили по методу Кнуппа на микротвердомере Mitutoyo HM-122 (Япония) с временем нагружения 4 сек., выдержки 10 сек., разгружения 4 сек. На первом этапе исследования был рассмотрен вопрос о выборе величины силы нагружения для покрытий с разной толщиной слоев. Исходя из известных рекомендаций (ГОСТ 9450-76) глубина внедрения индентора должна составлять не более 10% от общей толщины покрытия для исключения влияния основы. Так как двухслойные покрытия имеют функциональные слои с толщиной 1,5-3 мкм, то возникает вопрос о влиянии на величину микротвердости толщины данных слоев и их соотношения. С этой целью были проведены измерения микротвердости при разных нагрузках, результаты которых представлены в табл. 3.8.

Исследования показали, что при нагрузке 100 г глубина внедрения индентора составила  $(0,5 \div 0,7)$  мкм, при нагрузке 500 г -  $(1,5 \div 1,6)$  мкм, а при 1000г -  $(2,4 \div 2,5)$  мкм. Таким образом, в зависимости от нагрузки индентор либо внедряется только в верхний слой покрытия, либо проникает и в нижележащий слой с отличными от верхнего слоя свойствами. Измерения показали, что соотношение величин микротвердости покрытий с разной толщиной слоев не меняется при изменении нагрузки. При величине нагрузки свыше 500 происходит значительное влияние основы, проявляющееся в уменьшении микротвердости в 1,3-1,7 раза по сравнению с микротвердостью, измеренной при нагрузке 100 г. Для уточнения величины нагрузки, при которой не проявляется влияние основы, было произведено сравнение результатов измерения при нагрузках 100 г и 200 г. Измерения показали, что разность значений микротвердости, измеренной при нагрузке 100 г. и 200 г., находится в пределах погрешности измерения и можно считать, что влияние основы отсутствует. Поэтому для всех дальнейших измерений была использована нагрузка величиной 100г.

Таблица 3.8

Зависимость микротвердости многослойного покрытия от силы нагружения индентора

№ п/п	$\Delta$ , %	Микротвердость по Кнушу $H_{\mu}$ , ГПа при нагрузке		
		100 г	500 г	1000 г
1	33	37,1±2,7	32,5±1,5	27,2±1,0
2	50	38,1±1,3	33,6±1,9	26,5±0,1
3	66	37,8±2,0	33,8±1,2	25,9±0,9

Как видно из табл. 3.8, изменение соотношения толщин слоев двухслойного покрытия практически не влияет на величину микротвердости. Разница в значениях микротвердости для разных вариантов покрытий не превышает 2,5 %. Исследованиями установлено, что микротвердость двухслойного покрытия TiAlN-TiAlCrN выше по сравнению с покрытием TiN в 1,4 раза, TiAlN в 1,23 раза, а по сравнению с однослойным трехэлементным покрытием TiAlCrN практически не отличается (см. табл. 2.6).

Результаты влияния соотношения толщин слоев двухслойного покрытия на модуль упругости  $E$ , коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1C}$ , сопротивляемость абразивному изнашиванию  $H_M / E$  и пластическому деформированию  $H_M^3/E^2$ , а также на коэффициент отслоения  $K_o$  представлены в табл. 3.9.

Установлено, что соотношение толщин слоев двухслойного покрытия практически не оказывает влияния на его механические свойства. В тоже время, наблюдается тенденция некоторого повышения модуля упругости и коэффициента интенсивности напряжений с ростом толщины верхнего функционального слоя двухслойного покрытия. При этом с уменьшением толщины нижнего слоя двухслойного покрытия

несколько снижается коэффициент отслоения, что свидетельствует о повышении прочности адгезии.

Таблица 3.9

Влияние соотношения толщин слоев двухслойного покрытия на механические свойства

$\Delta$ , %	E, ГПа	$H_{\mu}/E$	$H_{\mu}^3/E^2$ , ГПа	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$K_o$
33	423,7±29,1	0,087	0,284	4,57	0,23
50	419,9±21,5	0,090	0,314	4,48	0,24
66	417,9±23,8	0,090	0,309	4,47	0,31

Анализ результатов исследований показывает, что наибольшее влияние на микротвердость, модуль упругости и коэффициент интенсивности напряжений оказывает материал верхнего слоя и его толщина. Как видно из табл. 3.9 и рис. 3.11, модуль упругости двухслойных покрытий больше по сравнению с однослойными покрытиями – на 9,5 % по сравнению с TiAlN, и на 5 % по сравнению с TiAlCrN. Полученные данные можно объяснить влиянием границы слоев и большим искажением кристаллической решетки.

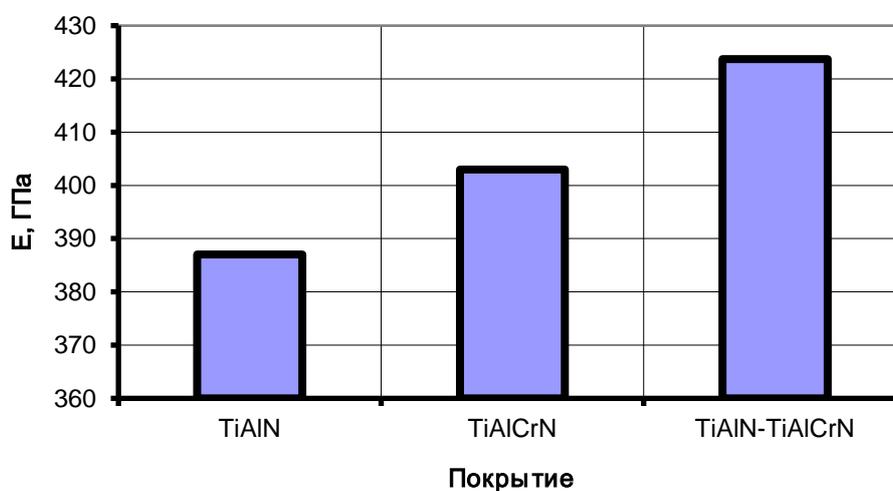


Рис. 3.11. Модуль упругости одно- и многослойных покрытий

Результаты исследований показывают, что наибольшее влияние на модуль упругости оказывает материал верхнего слоя и его толщина.

Двухслойные покрытия имеют более высокий коэффициент интенсивности напряжений, что свидетельствует о их более высокой трещиностойкости. Сравнение данных табл. 2.6 и рис. 3.12 показывает, что коэффициент  $K_{1C}$  двухслойных покрытий по сравнению с однослойным покрытием TiAlN выше на 12,3 %, по сравнению с TiAlCrN – на 9,3 %. Изменение расположения слоев в многослойном покрытии ведет к изменению коэффициента  $K_{1C}$ . В частности, коэффициент  $K_{1C}$  покрытия TiAlN-TiAlCrN (верхний слой толщиной 3 мкм) на 6,5 % выше, чем у покрытия TiAlCrN-TiAlN (верхний слой толщиной также 3 мкм).

Исследования показали, что двухслойные покрытия по сравнению с однослойными имеют более высокую прочность адгезии, о чем свидетельствуют меньшие значения коэффициента отслоения. Например, коэффициент отслоения двухслойного покрытия при толщине нижнего слоя 2 мкм равен  $K_0 = 0,23$ , в то время как для однослойных покрытий TiAlN он равен  $K_0 = 0,907$ , а для TiAlCrN – 1,25 (рис. 3.13, табл. 2.6).

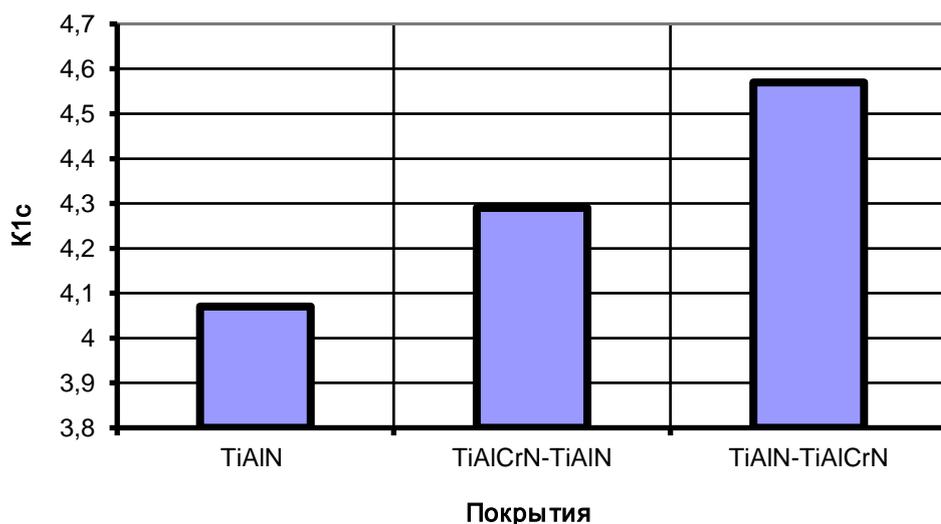


Рис. 3.12. Коэффициент  $K_{1C}$  многослойных покрытий в сравнении с однослойным TiAlN

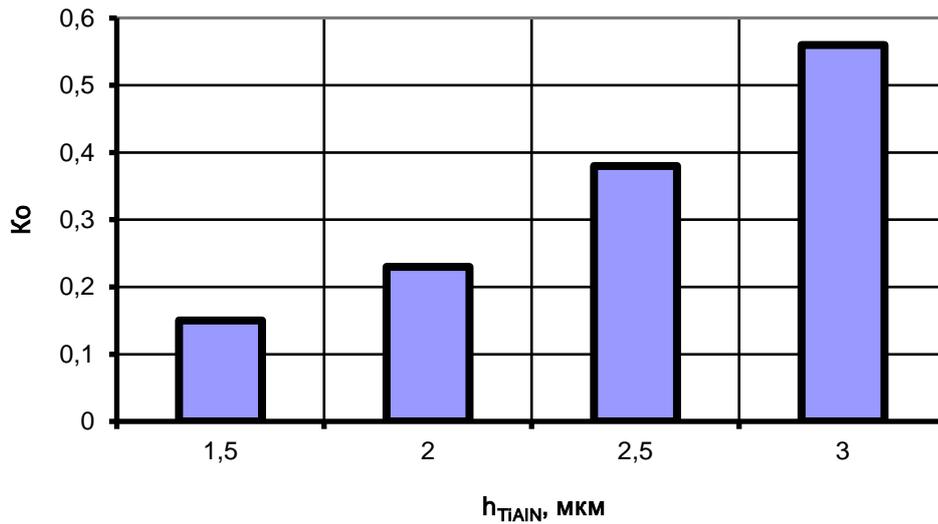


Рис. 3.13. Влияние толщины нижнего слоя на прочность адгезии покрытия TiAlN-TiAlCrN (толщина двухслойного покрытия 5 мкм)

Как видно из рис. 3.14, для многослойных покрытий TiAlN- TiAlCrN характерна меньшая площадь отслоения вокруг индентора при определении коэффициент отслоения, по сравнению с однослойным покрытием TiAlN.

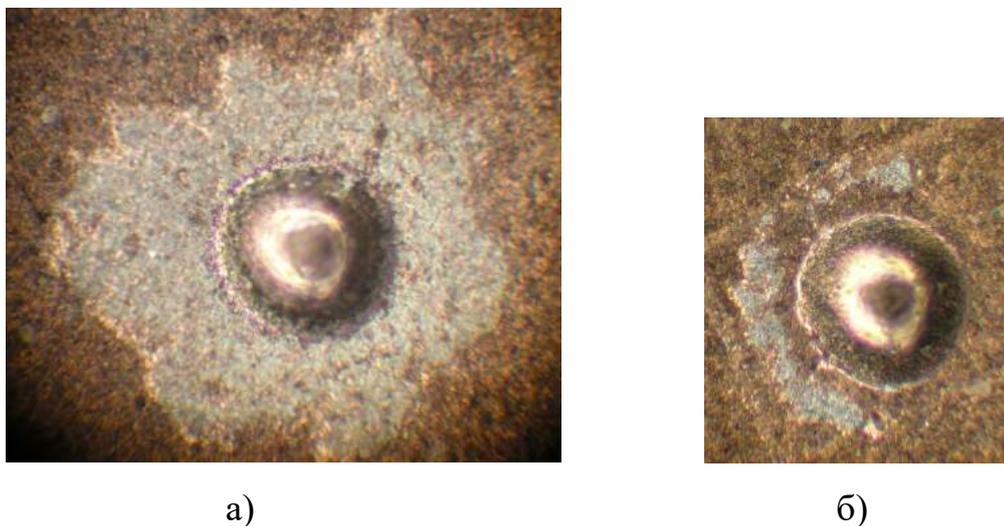


Рис. 3.14. Фотографии отпечатков индентора на образцах с покрытиями: а - TiAlN, б - TiAlN-TiAlCrN

Прочность адгезии определяется составом нижнего слоя многослойного покрытия. Это подтверждают данные рис. 3.15. При

использовании в конструкции многослойного покрытия нижнего слоя TiAlCrN, обладающего большими остаточными напряжениями, чем верхний, прочность адгезии снижается почти в два раза по сравнению с покрытием TiAlN- TiAlCrN.

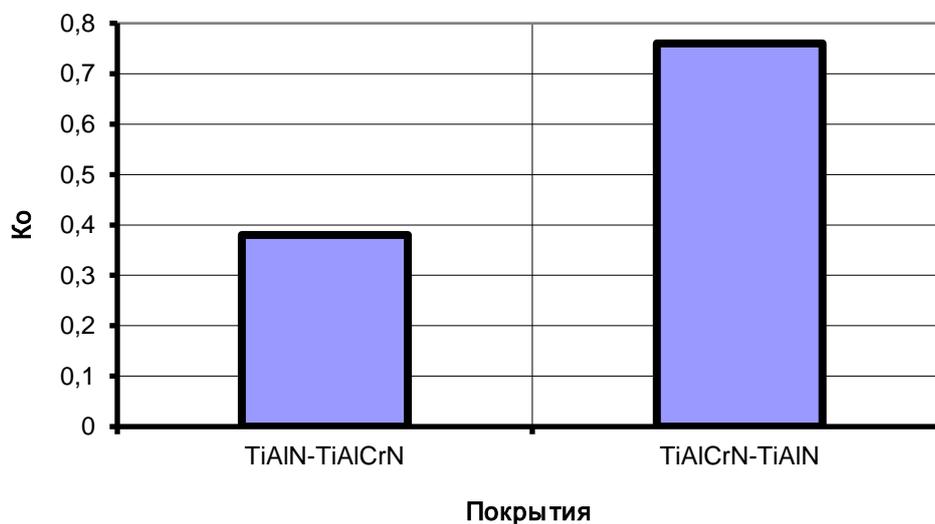


Рис. 3.15. Влияние конструкции многослойного покрытия на прочность адгезии с инструментальной основой

Исследования влияния общей толщины двухслойного покрытия на механические свойства показали, что данный параметр практически не сказывается на их величине.

### **3.5. Исследование интенсивности изнашивания спиральных сверл с многослойными покрытиями**

Оценку влияния соотношения толщин двухслойного покрытия на интенсивность изнашивания проводили при сверлении заготовок из нормализованной стали 30ХГСА.

В табл. 3.10 приведены результаты влияние толщины верхнего функционального слоя TiAlCrN на интенсивность изнашивания твердосплавных сверл с покрытием TiAlN-TiAlCrN.

Таблица 3.10

Влияние толщины верхнего функционального слоя TiAlCrN на интенсивность изнашивания  $J$ , мм/м твердосплавных сверл с покрытием TiAlN-TiAlCrN

Толщина слоя TiAlN, мкм	Общая толщина покрытия TiAlN-TiAlCrN, мкм	
	5	6
1,0	2,3	2,75
1,5	2,22	2,35
2,0	2,23	2,1
2,5	2,5	2,0
3	3,2	2,2

Как видно из табл. 3.10, минимальная интенсивность износа твердосплавных сверл имеет место при толщине нижнего слоя TiAlN 1,5...2,0 мкм при общей толщине двухслойного покрытия, равной 5 мкм, и 2,0...2,5 мкм при общей толщине двухслойного покрытия 6 мкм. Полученные данные объясняются тем, что при данных толщинах нижнего слоя имеет место благоприятное соотношение прочности адгезии (минимальный коэффициент отслоения) двухслойного покрытия и микротвердости верхнего функционального слоя.

Таким образом, наибольшую работоспособность твердосплавных сверл должны обеспечивать двухслойные покрытия TiAlN-TiAlCrN при

толщине верхнего функционального слоя  $TiAlCrN$ , составляющей 60...70 % от общей толщины покрытия.

### 3.6. Выводы

1. На основе проведенных исследований сформулирован принцип формирования и выбран состав функциональных слоев многослойного покрытия спиральных сверл. Предложены две архитектуры многослойных покрытий для повышения работоспособности спиральных сверл. Разработаны компоновочные схемы установки и разработаны технологические параметры нанесения двухслойных покрытий.

2. Разработана методика расчета тепловых полей в режущем клине спирального сверла, достаточно точно отражающая физический процесс операции сверления и закономерности распределения деформационно-силовой нагрузки на контактных площадках.

3. Показано, что тепловое состояние режущего клина спирального сверла определяется изменением контактных характеристик процесса сверления при нанесении покрытий. Выявлены закономерности влияния покрытий различного состава на тепловое состояние спирального сверла. Установлено, что наилучшее тепловое состояние обеспечивают многоэлементные покрытия по сравнению с одноэлементными.

4. Установлено, что нанесение покрытий способствует снижению температуры в режущем клине сверла, а применение покрытия  $TiAlCrN$  в наибольшей степени смещает изотермы температуры в направлении от главной режущей кромки, тем самым разгружая режущий клин и уголки спирального сверла. Лучшее тепловое состояние режущего клина спиральных сверл, обеспечивает трехэлементное покрытие  $TiAlCrN$ .

5. Определен фазовый состав двухслойных покрытий. Установлено, что двухслойные покрытия являются однофазными с фазой нитрида

титана с кубической кристаллической решеткой. Фазовый состав двухслойных покрытий не отличается от фазового состава однослойных покрытий. В покрытиях присутствуют фазы нитрида титана TiN и карбида титана WC.

6. Установлено, что двухслойные покрытия по сравнению с однослойными покрытиями TiAlN и TiAlCrN имеют более высокую микротвердость (в 1,23-1,4 раза), модуль упругости (на 5-9,5 %), коэффициент интенсивности напряжений (на 12,3 %) и прочность адгезии (коэффициент  $K_0$  меньше в 3,9-4,3 раза).

7. Показано, что соотношение толщин функциональных слоев оказывает влияние на прочность адгезии и практически не влияет, как и общая толщина, на механические свойства двухслойных покрытий.

8. Установлено, что минимальная интенсивность изнашивания твердосплавных сверл обеспечивается при толщине верхнего функционального слоя составляющей 60-70 % от общей толщины двухслойного покрытия.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

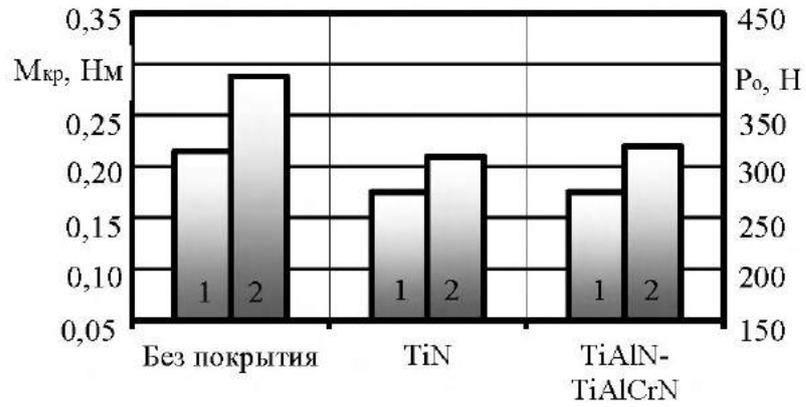
В данной главе представлены результаты исследований влияния режима резания на функциональные параметры процесса сверления, период стойкости спиральных сверл с многослойными покрытиями, опытно-промышленных испытаний, а также определена экономическая эффективность применения спиральных сверл с разработанными многослойными покрытиями.

### **4.1. Исследование процесса сверления спиральными сверлами с многослойными покрытиями**

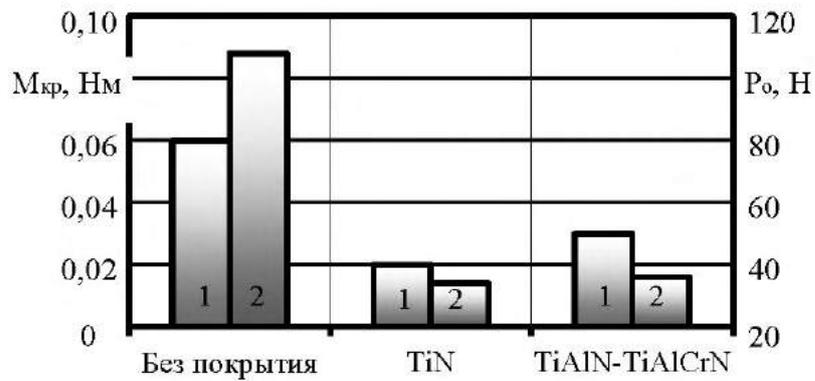
Исследование функциональных параметров процесса сверления проводили при сверлении заготовок из нормализованной стали 30ХГСА. Определяли осевую силу  $P_o$  и крутящий момент  $M_{кр}$ .

Использовали твердосплавные сверла из однокарбидного твердого сплава производства фирмы «DORMER» (Германия) диаметром  $D = 5$  мм, диаметром сердцевины  $D_c = 0,8$  мм, стандартной геометрии с двухслойными покрытиями TiAlN-TiAlCrN. Сверление проводили на скоростях резания  $V = 15$  м/мин и  $V = 25$  м/мин и подачах на оборот  $S_o = 0,1$  мм/об и  $S_o = 0,09$  мм/об, соответственно.

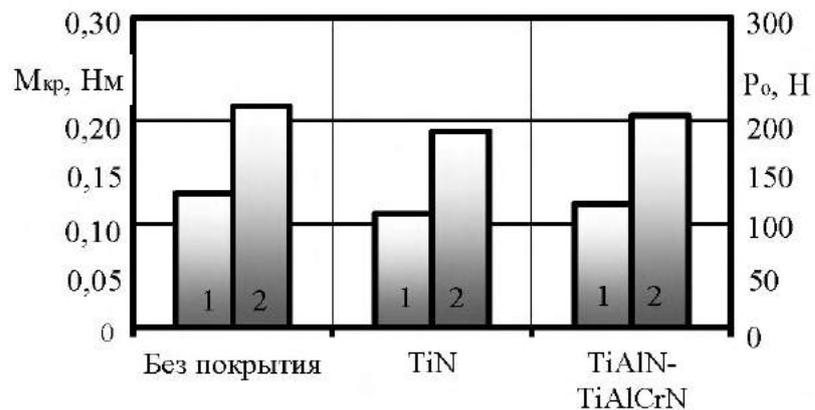
Результаты исследований функциональных параметров процесса резания при сверлении сверлами с многослойным покрытием TiAlN-TiAlCrN представлены на рис. 4.1 и в табл. 4.1.



а)



б)



в)

Рис. 4.1. Влияние износостойких покрытий на крутящий момент  $M_{кр}$  и осевую силу резания  $P_o$ , действующих на главной режущей кромке (а), вспомогательной режущей кромке (б) и поперечной кромке (в):  
1 –  $M_{кр}$ , Нм; 2 –  $P_o$ , Н;  $V = 15$  м/мин,  $S_o = 0,1$  мм/об

Таблица 4.1

## Влияние покрытий на осевую силу и крутящий момент

Покрытие	M <sub>кр</sub> , Нм / P <sub>о</sub> , Н на кромках сверла			суммарные M <sub>кр</sub> , Нм / P <sub>о</sub> , Н
	главные режущие	вспомогатель- ные режущие	поперечная кромка	
Без покрытия	0,16 / 260	0,04 / 46	0,1 / 178	0,3 / 484
TiN	0,1 / 187	0,01 / 17	0,08 / 152	0,19 / 356
TiAlN- TiAlCrN	0,15 / 190	0,018 / 25	0,089 / 170	0,257 / 385

Примечание: V = 25 м/мин, S<sub>о</sub> = 0,09 мм/об

Как видно из представленных данных нанесение двухслойного покрытия TiAlN- TiAlCrN вызывает снижение осевой силы P<sub>о</sub> и крутящего момента M<sub>кр</sub> по сравнению со сверлом без покрытия. На вспомогательной режущей кромке снижение осевой силы P<sub>о</sub> составило в среднем в 1,8-3,1 раза, а крутящего момента M<sub>кр</sub> – в 2-2,7 раза в зависимости от режима резания.

На главной режущей кромке и поперечной кромках указанное снижение данных параметров существенно ниже. Так, на главной режущей кромке оно составило в среднем 16-27 % для осевой силы P<sub>о</sub> и 18-25 % для крутящего момента M<sub>кр</sub>, на поперечной кромке – соответственно 4-7,3 % и 7,7-10 % в зависимости от режима резания.

При аналогичном сравнении многослойного покрытия TiAlN- TiAlCrN с однослойным покрытием TiN наблюдается незначительное повышение осевой силы P<sub>о</sub> и крутящего момента M<sub>кр</sub>, в среднем на 3-7 %.

Вместе с этим, можно отметить, что значительное снижение осевой P<sub>о</sub> силы и крутящего момента M<sub>кр</sub> на вспомогательных режущих кромках ведет к существенному уменьшению их доли на данных кромках и

небольшому повышению на главной режущей кромке и поперечной кромке.

Анализ полученных результатов показывает, что выявленные закономерности по влиянию двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN на функциональные параметры сверления, аналогичны тем, что имели место для однослойных покрытий TiAlCrN.

Таким образом, проведенные исследования показали, что нанесение многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN изменяет контактные характеристики процесса сверления заготовок. Меньшее влияние на контактные характеристики покрытие оказывает на поперечной режущей кромке сверла, большее на вспомогательных и главных режущих кромках, что связано со «стесненными» условиями процесса резания.

#### **4.2. Исследование работоспособности спиральных сверл с многослойными покрытиями**

Для оценки эффективности разработанных многослойных покрытий провели стойкостные испытания сверл при сверлении заготовок из нормализованной стали 30ХГСА.

Сравнивали эффективность твердосплавных сверл без покрытия, с однослойным покрытием износостойкими TiN и разработанными многослойными покрытиями TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN.

По результатам исследований были построены графики зависимостей периода стойкости режущего инструмента с многослойными покрытиями от скорости резания рис. 4.2,а, и подачи рис. 4.2,б. и получены математические модели периода стойкости спиральных сверл (табл. 4.2), [78, 80].

Как видно из полученных данных, при сверлении заготовок со скоростью резания от 10 до 25 м/мин и подаче станка от 0,1 до 0,15 мм/об

применение двухслойного покрытия TiAlN-TiAlCrN повышает период стойкости сверл в 2,5-3,1 раза по отношению к сверлам без покрытия и в 1,57-1,87 раза – по отношению к сверлам с покрытием TiN в зависимости от конструкции многослойного покрытия и режима обработки.

Влияние покрытий TiN, TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN на период стойкости  $T$  сверл показано на рис 4.3.

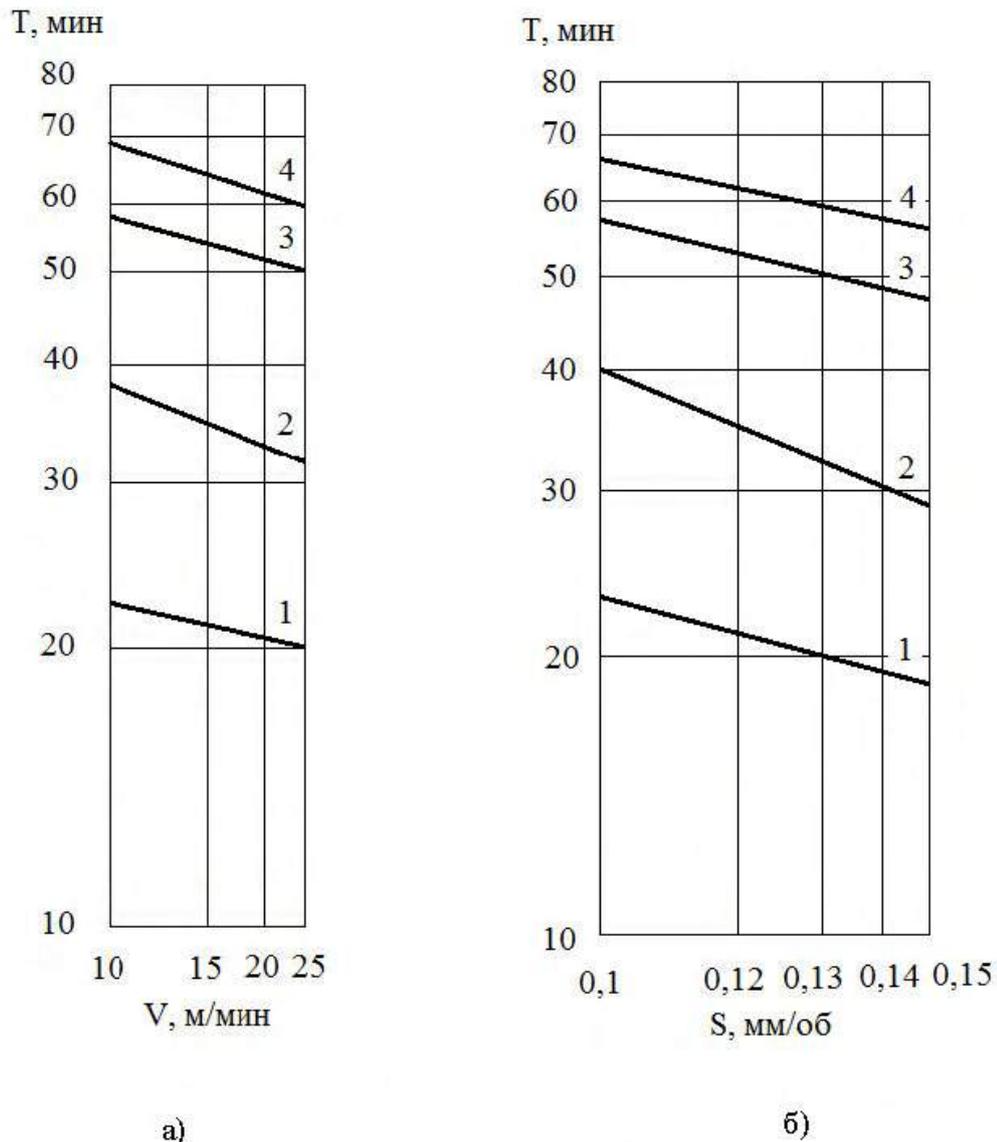
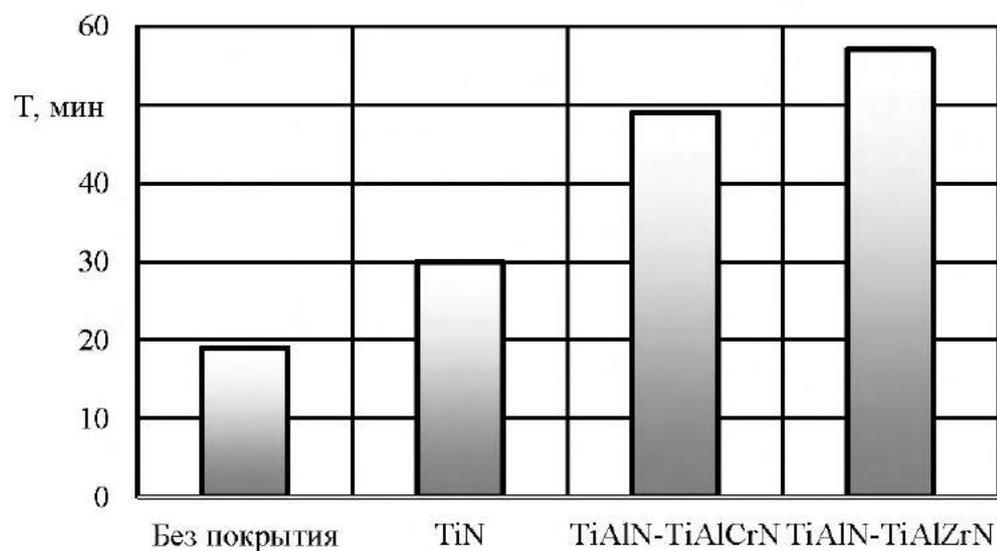


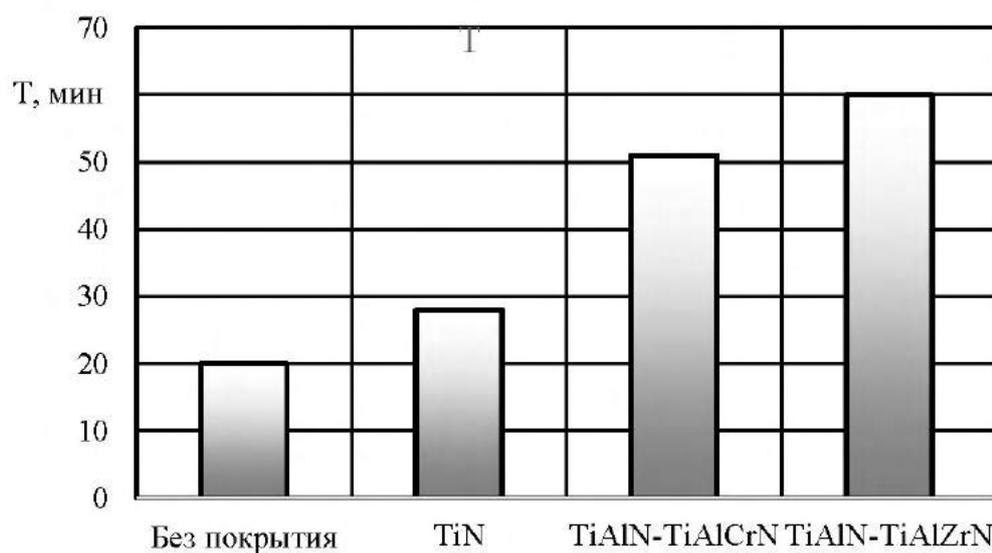
Рис. 4.2. Влияние скорости ( $V$ ) резания (а) и подачи ( $S$ ) на оборот (б) на период стойкости ( $T$ ) сверл:

1 – без покрытия, 2 – TiN, 3 – TiAlN-TiAlCrN, 4 – TiAlN-TiAlZrN;

а –  $S = 0,12$  мм/об, б –  $V = 20$  м/мин



а)



б)

Рис. 4.3. Влияние покрытий TiN, TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN на период стойкости T сверл:

а –  $V=15$  м/мин и  $S=0,15$  мм/об, б –  $V=25$  м/мин и  $S=0,12$  мм/об

При этом, с увеличением скорости резания и подачи на оборот эффективность спиральных сверл с покрытиями TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN увеличивается, что проявляется в повышении коэффициента повышения периода стойкости.

Таблица 4.2

## Математические модели периода стойкости спиральных сверл

Покрытие	Обрабатываемый материал
	30ХГСА
Без покрытия	$T = 10,028 \cdot V^{-0,127} \cdot S^{-0,522}$
TiAlN-TiAlCrN	$T = 26,54 \cdot V^{-0,115} \cdot S^{-0,488}$
TiAlN-TiAlZrN	$T = 31,02 \cdot V^{-0,110} \cdot S^{-0,481}$

### 4.3. Опытные-промышленные испытания спиральных сверл с многослойными покрытиями

Опытные-промышленные испытания спиральных сверл без покрытия, с однослойным покрытием TiAlCrN и многослойным покрытием TiAlN-TiAlCrN проводили в производственных условиях АО «Ульяновский механический завод» (г. Ульяновск). Осуществлялось сверление отверстий диаметром 5 мм и глубиной 13 мм в заготовках из нормализованной стали 30ХГС ГОСТ 103-2006 твердостью 30...32 по шкале HRC. Акт производственных испытаний сверл приведён в приложении №1.

Сравнивали количество полученных отверстий до наступления предельного износа сверл и определяли коэффициент повышения стойкости. Результаты испытаний представлены в табл. 4.3.

Как видно из приведенных данных (табл. 4.3) применение однослойного покрытия TiAlCrN повысило количество полученных отверстий до 95, применение многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN до 118 по сравнению со сверлами без покрытия, коэффициент повышения стойкости составил 1,9 и 2,36 соответственно.

## Результаты опытно-промышленных испытаний

№	Покрытие	Режимы резания	Количество отверстий	Коэффициент повышения стойкости
1	Без покрытия	n=3184 об/мин, V=50 м/мин, s=0,445 мм/об t=13 мм	50	1
2	TiAlCrN		95	1,9
3	TiAlN-TiAlCrN		118	2,36

Примечание: обработка проводилась без СОТС.  
Оборудование: вертикальный обрабатывающий центр DMC 1035 V ecoline.

Результаты опытно-промышленных испытаний подтвердили высокую эффективность спиральных сверл с многослойными покрытиями (Приложение 1).

#### 4.4. Экономическая эффективность применения спиральных сверл с многослойными покрытиями

Нанесение многослойных покрытий на основе TiCrN, TiCrAlN и TiCrZrN по сравнению с покрытием TiN требует затрат, связанных с приобретением технологической оснастки, оборудования и материалов, используемых в технологическом процессе получения покрытий [74 – 77]. Поэтому при выборе режущего инструмента с покрытиями необходимо учитывать величину затрат, связанных с нанесением данного типа покрытия. Для их расчета использовали методику [77]. В основу данной методики заложены все текущие затраты, связанные с подготовкой инструмента к нанесению покрытия, технологическим процессом осаждения покрытия и с эксплуатацией и обслуживанием установок типа

«Булат» (в нашем случае «Булат-6Т»). Величину текущих затрат можно определить по формуле:

$$S_{\delta/\text{ч}} = \frac{S}{\Phi}, \quad (4.1)$$

где  $S_{\delta/\text{ч}}$  – текущие затраты, отнесенные к одному часу работы, руб/час;  $S$  – суммарные текущие затраты, приходящиеся на год работы установки, руб;  $\Phi$  – годовой фонд времени работы установки, час.

Калькуляция суммарных затрат, связанных с нанесением покрытий, будет представляться в виде:

$$S = S_o + S_b + S_{\text{тр}} + S_{\text{зп}} + S_э + S_p, \quad (4.2)$$

где  $S_o$  – стоимость основных осаждаемых материалов, руб.;  $S_b$  – стоимость вспомогательных материалов, инструмента и технологической оснастки, руб;  $S_{\text{тр}}$  – транспортно-заготовительные расходы, руб;  $S_{\text{зп}}$  – заработная плата рабочих и служащих, руб;  $S_э$  – стоимость электроэнергии, руб;  $S_p$  – затраты на текущий ремонт и амортизацию оборудования и помещений, руб.

Результаты расчета дополнительных затрат, связанных с нанесением покрытия, приведены в табл. 4.4 применительно к установке «Булат-6Т».

Как видно из табл. 4.4, стоимость одного часа работы установки при нанесении многослойных покрытий  $\text{TiAlN-TiAlCrN}$  и  $\text{TiAlN-TiAlZrN}$  практически не отличается от покрытия  $\text{TiN}$ , разница составляет не больше 2,1 %.

Таблица 4.4

Результаты расчета затрат, связанных с нанесением покрытий

Покрытие	Статьи затрат, тыс. руб						
	S <sub>о</sub>	S <sub>в</sub>	S <sub>тр</sub>	S <sub>зн</sub>	S <sub>э</sub>	S <sub>р,</sub>	S <sub>б/ч</sub>
TiN	16,2	10,3	75,8	174,6	134,8	176,3	0,268
TiAlN- TiAlCrN	24,5						0,272
TiAlN- TiAlZrN	23,3						0,271

Дополнительные затраты, связанные с нанесением покрытий на конкретный инструмент, определяются по формуле:

$$S_{\Pi} = \frac{S_{б/ч} \cdot \tau_{ц}}{N_{И}}, \quad (4.3)$$

где  $\tau_{ц}$  – время одного цикла нанесения покрытия, час;  $N_{И}$  – количество инструментов в камере установки, штук.

Результаты расчета  $S_{\Pi}$  при нанесении покрытия на пластины H13A фирмы «Sandvik Coromant» представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Результаты расчета  $S_{\Pi}$

Покрытие	TiN	TiAlN-TiAlCrN	TiAlN-TiAlZrN
S <sub>п, руб</sub>	222	240	250

Как показывают данные расчета величины дополнительных затрат их величина при нанесении многослойных покрытий изменяется на 8 –

12 % по сравнению с затратами на покрытие из TiN. Такое увеличение связано с тем, что общая толщина многослойного покрытия больше, что требует большего времени нанесения покрытия.

При расчете себестоимости обработки одной детали с использованием режущего инструмента с покрытием воспользуемся методикой [75].

Основные расходы, связанные с изготовлением одной детали, определяются соотношением

$$q = q_c + q_{и} + q_{п} + q_{з}, \quad (4.4)$$

где  $q_c$ ,  $q_{и}$ ,  $q_{п}$ ,  $q_{з}$  – соответственно расходы на станок, инструмент, приспособление и заработную плату рабочих.

Величины расходов можно определить по формулам:

$$q_c = \frac{Q}{M \cdot \Pi}, \quad q_{и} = \frac{Q'}{N}, \quad q_{п} = \frac{Q_1}{\Pi}, \quad q_{з} = \frac{E}{\Pi}, \quad (4.5)$$

где  $Q$  – стоимость станка, руб.;  $M$  – срок окупаемости станка, год;  $Q'$  – стоимость инструмента, отнесенная к одному циклу, руб.;  $N$  – количество деталей, обработанных за один цикл;  $E$  – заработная плата, руб./час;  $Q_1$  – стоимость приспособления, руб.;  $\Pi$  – производительность станка, дет./час.

Преобразовав формулу (4.4) с учетом выражений (4.5), получим

$$q = \left( \frac{Q}{M} + Q_1 + E \right) \cdot \frac{1}{\Pi} + \frac{Q'}{N}, \quad (4.6)$$

Экономический эффект от применения инструмента с разработанным многослойными покрытиями определялся как разность

себестоимости обработки инструмента без покрытия и себестоимости обработки инструмента с покрытием. Результаты расчета экономического эффекта приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Экономическая эффективность применения твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями в условиях реального производства

Годовой экономический эффект (на 1 станок), руб.		
TiN	TiAlN-TiAlCrN	TiAlN-TiAlZrN
16 234	31 684	34 355

Анализ полученных данных показал экономическое преимущество использования режущих инструментов с многослойными покрытиями по сравнению с инструментом с двухслойными покрытиями и с покрытием TiN при обработке конструкционных сталей. Таким образом, видно, что максимального экономического эффекта от использования многослойных покрытий можно добиться в условиях крупносерийного, массового производств путем увеличения производительности операций механической обработки.

#### 4.5. Выводы

1. Определено влияние многослойных покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN на функциональные параметры процесса резания при сверлении. Установлено, что многослойные покрытия изменяют контактные характеристики, а именно оказывают снижение осевой силы,  $P_o$ , и крутящего момента  $M_{кр}$  на вспомогательных режущих кромках по

сравнению со сверлом без покрытия в зависимости от режима резания в 1,8-3,1 и 2-2,7 раза, также снижают указанные величины на главных режущих кромках на 16-27 % и 18-25 %, и поперечной кромке на 4-7,3 % и 7,7-10 % соответственно.

2. Установлено, что применение разработанных многослойных покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN повышает период стойкости сверл в 2,5 раза по отношению к сверлам без покрытия и в 1,7-1,8 раза – по отношению к сверлам с покрытием TiN в зависимости от режима обработки.

3. Опытными-промышленными испытаниями, проведенными в производственных условиях завода АО «Ульяновский механический завод» (г Ульяновск), подтверждена высокая эффективность разработанных многослойных покрытий. Отмечено повышение коэффициента стойкости спиральных сверл с многослойными покрытиями в 2,36 раза по сравнению со сверлами без покрытия и в 1,9 раза по сравнению со сверлами с покрытием TiN.

4. Техничко-экономическими расчетами показано, что применение спиральных сверл с разработанными МП позволяет снизить себестоимость операции сверления за счет уменьшения расходов на инструмент. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения данных покрытий на одной операции сверления составил 34 355 рублей на один станок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс исследований позволил определить механизм влияния состава износостойких покрытий на контактные процессы и тепловое состояние режущего клина спиральных сверл. На основе полученных результатов разработаны новые архитектуры многослойных покрытий. Установлены взаимосвязи состава и конструкции износостойких покрытий с их структурными параметрами, механическими свойствами и интенсивностью износа инструмента. Проведенные исследования показали высокую эффективность разработанных многослойных покрытий.

В результате выполненной работы получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Установлены закономерности влияния износостойких покрытий на осевую силу  $P_o$  и крутящий момент  $M_{кр}$ , действующих на главных, вспомогательных режущих кромках и поперечной кромке спирального сверла. Показано, что наибольшее снижение осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  происходит на вспомогательных режущих кромках.

2. Выявлены доли осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$ , приходящиеся на рабочие элементы спиральных сверл без покрытия и с различными износостойкими покрытиями, тенденция небольшого роста осевой силы  $P_o$  и крутящего момента  $M_{кр}$  при переходе от одноэлементных износостойких покрытий к многоэлементным.

3. Разработана методика расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла покрытиями, учитывающая долю силовых нагрузок, приходящихся на различные кромки сверла, на основе которой проведено численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спирального сверла в среде ANSYS. Установлено, что применение износостойких покрытий значительно снижает температуру на контактных площадках спирального сверла, а применение многоэлементных

износостойких покрытий приводит к смещению изотерм температуры в сторону от главных режущих кромок, тем самым улучшая тепловое состояние режущего клина.

4. Предложен принцип формирования многослойных покрытий спиральных сверл и обоснованы составы его функциональных слоев. Выявлены закономерности влияния конструкции многослойных покрытий на их структурные параметры, механические свойства и интенсивность изнашивания спиральных сверл. Установлено, что двухслойные покрытия по сравнению с однослойными покрытиями TiAlN и TiAlCrN имеют более высокую микротвердость на 23...30 %, модуль упругости (на 5...9,5 %), коэффициент интенсивности напряжений (на 12,3 %) и прочность адгезии (коэффициент  $K_0$  меньше в 3,9-4,3 раза). Показано, что соотношение толщин функциональных слоев оказывает влияние на прочность адгезии и практически не влияет, как и общая толщина, на механические свойства двухслойных покрытий. Установлено, что минимальная интенсивность изнашивания твердосплавных сверл обеспечивается при толщине верхнего функционального слоя составляющей 60-70 % от общей толщины двухслойного покрытия.

5. Установлено, что применение двухслойных покрытий повышает период стойкости сверл в 2,5 раза по отношению к сверлам без покрытия и в 1,7-1,8 раза – по отношению к сверлам с покрытием TiN в зависимости от режима обработки. Эффективность разработанных многослойных покрытий подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях АО «Ульяновский механический завод». Коэффициент повышения периода стойкости спиральных сверл с многослойными покрытиями составил 1,25 по сравнению со сверлами с однослойным износостойким покрытием TiAlCrN и 2,36 по сравнению со сверлами без покрытия.

6. Технико-экономическими расчетами показано, что применение спиральных сверл с разработанными многослойными покрытиями

позволяет снизить себестоимость операции сверления за счет уменьшения расходов на инструмент. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения данных покрытий на одной операции сверления составил 34 355 рублей на один станок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд. исп. и доп. – Мн.: Новое издание, 2006.- 512 с.
2. Зелинский В.В., Карпов А.В. Причинно-следственный аспект изнашивания режущих инструментов // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. Том 13. № 3, Пермь, 2011, с. 46-50.
3. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
4. Минаев, А.М. Обработка металлов резанием : учебно-методическое пособие / А.М. Минаев. – 2-е изд., стер. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.
5. Грановский Г. И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. Вузов / Грановский Г. И., Грановский В. Г. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
6. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
7. Армарего И. Дж. Обработка металлов резанием / Армарего И. Дж., Браун Р. Х. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
8. Родин П. Р. Основы проектирования режущих инструментов: Учебник для вузов по спец. "Технология машиностроения", "Металлорежущие станки и инструменты" / Родин П.Р. – М.: Машиностроение, 1990. – 766 с.
9. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов / Резников А. Н., Резников Л. А. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
10. Остафьев В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
11. Юликов М. И. Проектирование и производство режущего инструмента / М. И. Юликов, Б. И. Горбунов, Н. В. Колесов. М.: Машиностроение, 1987. — 296 с.
12. Рагрин Н.А. Критерий оптимального износа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 21/2010. – С.43-45.

13. Петухов Ю.Е., Водовозов А.А. Анализ влияния скорости резания точек режущей кромки на стойкость спирального сверла и пути ее увеличения // Известия МГТУ «МАМИ». – Москва, №1(15)/2013, т. 2. – С.31-35.
14. Самотугин, С.С., Мазур, В. А., Гагарин, В. А., Терехов П. А. Повышение стойкости спиральных сверл поверхностной плазменной обработкой// Захистметалургійних машин від поломок: зб. наукових праць / ПДТУ. - Мариуполь, 2009. - Вып. 11. - С. 237-240.
15. Долгих А.М. Повышение стойкости сверл из быстрорежущей стали низкотемпературной нитроцементацией// Вестник Полоцкого государственного университета / ПГУ. - Новополоцк, 2012. - №11. - С. 91-94.
16. Рагрин Н.А. Пути повышения наработки до функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл на основе анализа кривых износа их режущих элементов // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 26/2012. – С.28-33.
17. Табаков В. П., Чихранов А. В. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.
18. Верещака А. С. Повышение работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий: дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 1986. – 601 с.
19. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
20. Лепихов, Г.К. Повышение стойкости инструмента и техоснастки электроискровым легированием / Г. К. Лепихов, М. М. Пернери //Технология и организация производства. – 1978. – №3. – С. 58–62
21. Болотников, Г. В. Современные покрытия для твердосплавного режущего инструмента / Г. В. Болотников // СТИН. – 1994. – №4. –С. 33–37.
22. Романов, А. А. Упрочнение режущего инструмента из быстрорежущих сталей методом конденсации с ионной бомбардировкой / А. А.Романов, А. А. Андреев, А. С. Логинов // ПТБ. – 1973. – №8. – С. 26–28.
23. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. – Ульяновск :УлГТУ, 2015. – 179 с.

24. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
25. Семенов, А. П. Износостойкие покрытия, наносимые вакуумными ионно-плазменными методами / А. П. Семенов, А. И. Григоров // Сборник НИИТавтопрома «Технология машиностроения». – 1978. – №7.– С. 15–20.
26. Минкевич, А. Н. Использование твердосплавного инструмента / А. Н. Минкевич, В. В. Захаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1979. – №6. – С. 36–40.
27. Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 380 с.
28. Тополянский П.А., Ермаков С.А., Соснин Н.А., Тополянский А.П. Сравнительный анализ свойств износостойких покрытий для повышения стойкости сверл // Металлообработка. – Москва, № 4 (76)/2013. – С.28-54.
29. Маджид А.Х., Михайлов А.Н., Феник Л.Н. Повышение стойкости спиральных сверл из быстрорежущих сталей на базе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2010. Т. 2. – 266 с.
30. Кунченко, В.В. Наноструктурные сверхтвёрдые  $nc\text{-TiN/a-Si}_3\text{N}_4$  покрытия, полученные методом вакуумно-дугового осаждения / В.В. Кунченко, Ю.В. Кунченко, Г.Н. Картмазов, И.М. Неклюдов, А.А. Мигаль, А.А. Романов, Н.Т. Гладких, А.П. Крышталь, Ю.Г. Казаринов // Вопросы атомной науки и техники. — 2006. — № 4. — С. 185-190.
31. Агеева, Е.В. Получение износостойких покрытий с использованием электродов из твердосплавных электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, А.С. Осьминина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4– С. 21–23.
32. Пантелеенко, Ф.И. Нанесение карбидных покрытий на режущий инструмент с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и электроискрового легирования / Ф. И. Пантелеенко, М. А. Столин, Л. В. Маркова, В. В. Саранцев, П. М. Бажин, Е. Л. Азаренко // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2012. - №2. - С. 24-28.

33. Каталог металлорежущих инструментов фирмы «ISKAR». – Израиль, 2015. – 275 с.
34. Каталог металлорежущих инструментов фирмы SandvikCoromant “CoroKey”: Руководство по выбору инструмента, 2-е издание. – М., 2013. – 173 с.
35. Каталог металлорежущих инструментов фирмы «MitsubishimaterialsCorporation». – Japan, 2013. – 151 с.
36. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. –М.:Машиностроение, 2011. –368 с.
37. Давлетбаева Р. Р. Покрытие для режущего инструмента // Молодой ученый. — 2017. — №2. — С. 98-101.
38. Грачев С.И. Повышение адгезионной связи износостойких покрытий с твердосплавным инструментом за счет оптимизации процесса подготовки поверхностей: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. –М.:МГТУ «Станкин», 2003. –156 с.
39. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5twistdrills. D. Kottfer a, M. Ferdinandy, L. Kaczmarek, I. Manková, J. Beno. June 2013.
40. Elevated temperature repetitive micro-scratch testing of AlCrN, TiAlN and AlTiN PVD coatings. B.D.Beake, J.L.Endrino, C.Kimpton, G.S.Fox-Rabinovich, S.C.Veldhuis. July 2017
41. Da-Yung Wang, Ming-Chieh Chiu. // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 156. N. 1/3. P. 201.
42. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition / A. Anders. New York, John Wiley & Sons, 2000.
43. Vempaire D., Pelletier J., Lacoste A., Vechu S. et al. // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 2005. V. 47. N. 5A. P. 153.
44. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
45. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. М.:Машиностроение, 1969.- 288 с
46. Бетанели, А. И. Прочность и надежность режущего инструмента / А. И. Бетанели. М. :СабчотаСакартвело, 1973. - 302 с.
47. Остафьев, В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев. М. : Машиностроение, 1979. - 168 с.
48. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н.Лоладзе. М. : Машиностроение, 1982. 320 с.

49. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложномнапряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. Киев: Науковадумка, 1976. 415 с.
50. Табаков, В. П. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 151 с.
51. Табаков В.П. Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: Дисс..... докт. техн. наук. – Ульяновск, 1992 – 641 с.
52. Ковалев А. И. Современные методы исследования поверхности металлов и сплавов / А. И. Ковалев, Г. В. Щербединский. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.
53. Уманский Я. С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов и др.. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
54. Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б. Методы измерения твердости. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
55. Воеводин А. А. Определение микротвердости тонких покрытий с учетом их толщины и твердости подложки / А. А. Воеводин, С. Е. Спасский, А. А. Ерохин // Заводская лаборатория. – 1991. – № 10. – С. 45 – 46.
56. Новиков Н. В. Методы микроиспытаний на трещиностойкость / Н. В. Новиков, С. Н. Дуб, С. И. Булычев // Заводская лаборатория. – 1988. – Т. 54. – №7. – С. 60 – 67.
57. Riester L. Analysis of depth-sensing indentation tests with a Knoop indenter / L. Riester, T. J. Bell, A. C. Fischer-Cripps // J. Mater. Res., vol 16, № 6. –2001. – P. 1660 – 1665.
58. Майстренко А. Л., Дуб С. Н. Прогнозирование износостойкости хрупких материалов по твердости и трещиностойкости // Заводская лаборатория. – № 2. –1991. – С. 52 – 54.
59. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков. –М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
60. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1968. – 241 с.
61. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

62. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
63. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико – экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
64. Фещенко В.Н. Слесарное дело. Механическая обработка деталей на станках. Книга 2: учеб. пос./ В.Н. Фещенко. – М. Инфа-Инженерия, 2013. – 464 с.: ил.
65. Сагитов Д.И. Повышение работоспособности токарных резбобовых резцов путем разработки и применения многослойных износостойких покрытий: дис. канд. техн. наук. Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 196 с.
66. Табаков, В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
67. Табаков, В. П. Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 200 с.
68. Табаков В.П., Григорьев С.Н., Верещака А.С. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 196 с.
69. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 382 с.
70. Остафьев В. А., Нощенко А. Н., Термопрочность режущего инструмента // Вестник машиностроения. – 1990. – №10. – С. 61 – 63.
71. Ольхов В. Е. Моделирование температурных полей режущего инструмента при высокоскоростном резании // Известия вузов. – Машиностроение. – 1990. – №3. – С. 140–142.
72. Шило А. Е. Анализ теплового режима рабочей поверхности однослойного инструмента из СТМ методом конечных элементов // Сверхтвердые материалы. – 1989. – №5. – С. 38 – 41.
73. Юдковский П.А. Исследование тепловых явлений, износа и стойкости инструмента при сверлении: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: Куйбышев, 1965. – 18 с.
74. Еленева Ю. А. Экономика машиностроительного производства: учебник. – М.: Академия, 2006. – 255 с.
75. Трусова Л. И. Экономика машиностроительного производства. Задачи и ситуации: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 78 с.

76. Григорьев С. Н., Кутергина Т. В. Оценка эффективности технологий нанесения покрытий на режущий инструмент // Вестник машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 68 – 72.
77. Расчет среднеотраслевых затрат при нанесении износостойких покрытий на режущий инструмент, приведенных к одному часу работы установок типа «Булат-3Т». – М.: ВНИИ Инструмент, 1982. – 9 с.
78. Табаков В.П., Сагитов Д.И., Аль-Кадхими М.Ф.Д. Повышение эффективности спиральных сверл путем применения многослойных покрытий//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – № 5. – С. 225-228.
79. Табаков В.П., Сагитов Д.И., Аль-Кадхими М.Ф.Д. Исследование влияния износостойких покрытий на тепловое состояние спиральных сверл// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – № 10. –С. 440-443.
80. Al-Kadhimi M.F.D., Sagitov D.I., Chikhranov A.V., Dolzhenko Y.A. Application of Multilayer Coatings based on Complex Titanium Nitrides to improve the efficiency of Twist Drills // Russian engineering research. – 2021. - Т.37. - №12. – 1048-1051.
81. Сизов С.В., Аль Кадхими М.Д. Исследование работоспособности режущего инструмента с многослойными покрытиями // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 51-й НТК. / С.В. Сизов, М.Д. Аль Кадхими. В 3 ч. Ч.1. - Ульяновск: УлГТУ, 2017. - С.121-124
82. Аль Кадхими М.Д. Применение износостойких покрытий на операциях сверления // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 51-й НТК. / М.Д. Аль Кадхими. В 3 ч. Ч.1. - Ульяновск: УлГТУ, 2017. - С.118-121.
83. Аль-Кадхими М.Ф.Д. Функциональные параметры процесса резания при сверлении // Высшая школа. – 2020.- №11. – С.36-37.
84. Аль-Кадхими М.Ф.Д. Методика выбора оптимального износостойкого покрытия для сверления // Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2020. – № 1(7). – С. 29-30.
85. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.
86. Развитие науки о резании металлов. Зорев Н. Н., Грановский Г. И., Ларин М. Н. и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
87. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

88. Верещака А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями/ А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.

89. Хокинг М, Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с.

90. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 123 с.

91. Волосова, М.А. О выборе оптимального метода модификации поверхности режущего инструмента исходя из его служебного назначения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №12. – С. 12 – 16.

92. Волосова, М.А. Систематизация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента и алгоритм их выбора/ М.А. Волосова, А.А. Туманов// Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. №3. – С. 78 – 83.

93. Гончаров, В.С. Упрочнение лезвийного инструмента с созданием эффекта самозатачивания / В.С. Гончаров, П.А. Мельников, А.Н. Попов, Е.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – т. 15. – №4. – С. 233-235.

94. Верещака, А.С. Резание материалов: учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высш. шк., 2009. – 535 с.

95. Верещака, А.С. Функциональные покрытия для режущего инструмента А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 28 – 37.

96. Шиняев, А. Я. Механизмы упрочнения и разработка безвольфрамовых твердых сплавов нового типа. // Вестник машиностроения. –1998. – №1. – С.16 – 19.

97. Салманов, Н. С. Упрочнение твердосплавного инструмента / Н. С. Салманов // СТИН. – 1997. – №6. – С. 24 – 28.

98. Гадалов, В.Н.. Повышение износостойкости режущего инструмента способом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Д.Н. Романенко, В.В. Стаинов, С.В. Шеставина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №1. – С. 21 – 25.

99. Кабалдин, Ю. Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных материалов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.

100. Кабалдин, Ю. Г. Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом

функционала электронной плотности / Ю. Г. Кабалдин, С. В.Серый // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 32-36.

101. Кабалдин, Ю.Г. Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания и диагностике твердосплавного режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, В.О. Зотов // Вестник машиностроения. – 2016. - №5. – С. 79 – 85.

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

103. Кабалдин, Ю.Г. Наноструктурирование контактных поверхностей твердосплавного инструмента при резании / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин, С.В. Серый, Д.А. Шатагин // Вестник машиностроения. – 2014. - №7. – С. 74 – 79.

104. Григорьев, С.Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова. – Москва : МГТУ Станкин, 2007. – 324 с.

105. Григорьев, С.Н. Энергоэффективность методов нанесения покрытий на инструмент: монография. – Москва: МГТУ Станкин, 2012. – 191 с.

106. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибологический аспект): монография - ДГТУ. – Ростов н/Д, 2004. – 323 с.

107. Рыжкин, А. А. Трибохимический аспект влияния износостойких покрытий на износ при резании / А.А. Рыжкин, В.В. Зотов, Д.П. Глоба, Ф.А. Висторопская // Вестник ДГТУ. – 2010. - №6 (49). – С. 844 – 856.

108. Маслов, А.Р. Перспективные высокие технологии //Справочник. Инженерный журнал: приложение №1. – 2008. - №1. – С. 2 – 24.

109. Верещака, А.С. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №9. – С. 9 – 18.

110. Волосова, М.А. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровий для применения в инструментальном производстве / М.А. Волосова, С.Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 37 – 42.

111. Соболев, О.В. Повышение функциональных свойства куумно-дуговыхTiN-покрытий / О.В. Соболев, А.А. Андреев, С.Н. Григорьев, М.А.

Волосова, В.А. Столбовой, В.Е. Фильчиков, Н.В. Киданова, Г.В. Антоненкова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №12. – С. 24 – 30.

112. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.

113. Вершина, А. К. Влияние технологических параметров процесса осаждения из сепарированного плазменного потока TiN – покрытий на их защитные свойства / А. К. Вершина, С. Д. Изотова, А. А. Пителько // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 3. – С. 65 – 68.

114. Гаврикова, И. С. Влияние температуры на формирование ионно-плазменных покрытий / И. С. Гаврикова, А. И. Додонов, В. В. Мокрый, В. С. Николаев // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 1. – С. 140 – 141.

115. Табаков, В.П. Влияние условий осаждения покрытия на его механические свойства и работоспособность режущего инструмента / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // Вестник машиностроения. – 2016. - №5. – С. 74 – 78.

116. Шулаев, В.М. Сверхтвердые наноструктурные покрытия в ННЦ ХФТИ / В.М. Шулаев, А.А. Андреев // ФИП. – 2008. т. 6, № 1-2 – С. 4 – 19.

117. Tribological behavior of TiN and (Ti,Al)N deposited on substrates plasma nitride at low pressure/ Scorie B., Kakas D.// Mater. And Manuf. Processes. – 1995.-10, 12. – С. 321 -326.

118. Ширманов, Н. А. Повышение работоспособности режущего инструмента путем изменения состава покрытия на основе карбонитрида титана: дис...канд. тех. наук: 05.03.01 / Ширманов Николай Анатольевич. – Ульяновск, 1994. – 253 с.

119. Лобанов, А. В. Влияние ионной бомбардировки на эксплуатационные свойства инструмента с износостойким покрытием / А. В. Лобанов, В. В. Закураев // Техника машиностроения. – 2001. – №5. – С. 43 – 46.

120. Гончаров, В. С. Формирование качественных ионно-плазменных металлокерамических покрытий / В. С. Гончаров, А. Н. Гурьянов, Н. Р. Темнова // Техника машиностроения. – 2001. – №3. – С. 89 – 91.

121. Кабалдин, Ю. Г. Повышение работоспособности режущей части инструмента из быстрорежущей стали / Ю. Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. – 1996. – №6. – С. 27 – 32.

122. Андреев, А.А. Особенности получения высокотвердых наноструктурных покрытий из нитрида молибдена вакуумно-дуговым

методом / А.А. Андреев, С.Н. Григорьев, О.В. Соболев, В.Ф. Горбань, М.А. Волосова, В.А. Столбовой, И.В. Сердюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №1. – С. 14 – 20.

123. Андриевский, Р. А. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: Справочник / Р. А. Андриевский, И. И. Спивак. – Челябинск.: Металлургия, 1989. – 368 с.

124. Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

125. Табаков, В. П. Повышение работоспособности режущего инструмента путем направленного изменения состава износостойкого покрытия / В. П. Табаков, В. И. Езерский, Ю. В. Полянский // Вестник машиностроения. – 1989. – №12. – С. 43 – 46.

126. Разработка и внедрение технологии изготовления режущего инструмента с композиционными покрытиями, получаемыми методом КИБ: отчет о НИР. Инв. № 02.84.0076872. – 1985. – 27 с.

127. Моисеев, В. Ф. Влияние азота на структуру и свойства упрочняющих поверхностных покрытий на основе титана / В. Ф. Моисеев, Г. С. Фукс-Рабинович, Г. К. Досбаева // Физика и химия обработки материалов – 1991. – №2. – С. 118 – 121.

128. Верещака, А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями: учебное пособие / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 144 с.

129. Верещака, А. С. Основные аспекты применения и совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака // СТИН. – 2000. – №9. – С. 33 – 40.

130. Табаков, В. П. Исследование структуры и механических свойств многокомпонентных износостойких покрытий / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // Современные тенденции развития автомобилестроения в России: сб. трудов всероссийской научно-тех. конф. с междуна. участием: в 5 т. Т. 4. – Тольятти: ТГУ, 2004. – С. 76 – 80.

131. Табаков, В. П. Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий, полученных из составных катодов / В. П. Табаков, А. В. Чихранов, С. С. Порохин // Материалы и технологии XXI века: Сборник статей II Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2004. – С. 21 – 24.

132. Чихранов, А. В. Повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки и применения многоэлементных

износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Чихранов Алексей Валерьевич .– Ульяновск, 2006. – 314 с.

133. Табаков, В. П. Износостойкие покрытия на основе нитрида титана, легированного железом и алюминием, для режущих пластин / В. П. Табаков // СТИН. – 1991. – №11. – С. 18 – 19.

134. Чихранов, А. В. Исследование контактных характеристик режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе нитридов тройных систем // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении (МКТМ-2005): материалы III междуна. научно-тех. конф. – Тюмень: изд-во ООО Компании «Феликс», 2006. – С. 23 – 24.

135. Табаков, В. П. Разработка износостойких покрытий режущего инструмента на основе нитрида титана и кремния / В.П. Табаков, А.В.Чихранов, И.Н. Гатауллов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №10. – С. 28 – 33.

136. Табаков, В.П. Применение инструмента с износостойкими покрытиями на операциях резьбонарезания и отрезки заготовок / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов // Вестник машиностроения. –2016. – №4. – С. 59 – 64.

137. Табаков, В.П. Взаимосвязь состава износостойких покрытий с параметрами структуры, механическими свойствами и функциональными параметрами процесса резания / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // Вестник машиностроения. –2017. – №11. – С. 76 – 80.

138. Азаренков, Н. А. Вакуумно-плазменные покрытия на основе многоэлементных нитридов / Н. А. Азаренков, О. В. Соболев, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Д. А. Колесников, П. В. Турбин, И. Н. Торяник // Металлофизические новейшие технологии. – 2013. – т. 35. - №8. – С. 1061 – 1084.

139. Табаков, В.П. Повышение работоспособности режущего инструмента путем применения многоэлементных покрытий на основе нитридов титана, алюминия и кремния / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. - №3. – С. 10 – 14.

140. Волков, Д.И. Применение модифицированных многофункциональных покрытий металлорежущего инструмента при токарной обработке высокопрочного чугуна / Д.И. Волков, С.Л. Проскуряков, С.С. Дружков // Вестник машиностроения. – 2016. – №9. – С. 79 – 83.

141. Фоменко, Р.Н. Методика назначения технологических условий обработки ответственных деталей с учетом износостойких покрытий режущего инструмента при точении // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. - №2-5 (292). – С. 65 – 71.

142. Мигранов, М.Ш. Износостойкость композиционных покрытий для режущего инструмента / М.Ш. Мигранов, А.М. Мигранов, С.М. Минигалеев, С.Р. Шехтман // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2017. - № 4 (43). – С.38-42.

143. Табаков, В.П. Влияние конструкции катодов и их расположения на параметры структуры и механические свойства многоэлементных нитридных покрытий / В.П. Табаков, Н.А. Ширманов, С.В. Сизов, А.В. Чихранов// *Вестник машиностроения*. – 2017. – №9. – С. 47 – 50.

144. Dearnaley, G. Ion Implantation. Part II: Ion Implantation in Nonelectronic Materials / G. Dearnaley // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, North-Holland, Amsterdam*. – 1987. – P. 506 – 511.

145. Рандин, А. В. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем нанесения износостойких покрытий с переходными адгезионными слоями: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Рандин Алексей Владимирович. – Ульяновск, 2003. – 187 с.

146. Смирнов, М. Ю. Повышение работоспособности торцовых фрез путем совершенствования конструкции износостойких покрытий: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Смирнов Максим Юрьевич. – Ульяновск, 2000. – 232 с.

147. Табаков, В. П. Повышение работоспособности торцевых фрез путем совершенствования структуры износостойких покрытий / В. П. Табаков, Н. А. Ширманов, М. Ю. Смирнов // *СТИН*. – 2002. – №2. – С. 6 – 10.

148. Циркин, А. В. Разработка конструкций многослойных покрытий для повышения работоспособности торцовых фрез: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Циркин Алексей Валерьевич. – Ульяновск, 2004. – 183 с.

149. Ермолаев, А. А. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента при непрерывном точении на основе разработки многослойных покрытий: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Ермолаев Андрей Анатольевич. – Ульяновск, 2004. – 172 с.

150. Тулисов, А.Н. Разработка многослойных покрытий режущего инструмента на основе методики расчета их трещиностойкости: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Тулисов Александр Николаевич. – Ульяновск, 2010. – 232 с.

151. Табаков, В.П. Методика расчета трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков, М.Ю. Смирнов, А.Н. Тулисов, А.В. Чихранов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. - №3. – С. 43 – 48.

152. Порохин С.С. Повышение работоспособности токарных резцов, работающих в условиях стесненного резания, путем совершенствования износостойких покрытий: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Порохин Сергей Сергеевич. – Ульяновск, 2010. – 215 с.

153. Табаков В. П., Сагитов Д. И. Применение износостойких покрытий при резьбонарезании // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2012. – №1, том 2 (19). – С. 15-19.

154. Верещака, А.А. Функциональные покрытия с нанокристаллической структурой для режущего инструмента / А.А. Верещака, А.А.Козлов, М.В. Шеремет // Физика, химия и механика трибосистем. – 2010. – №9. – С. 88-96.

155. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallisation and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coating // Thin Solid Films. 2003. V. 440. P. 174-179.

156. Сафаров, А.Ф. Высоконеэравновесные фазово-структурные состояния в металлических сплавах после ионной имплантации и в ионно-плазменных покрытиях нитрида титана дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Сафаров Альберт Фаритович. – Томск, 1998. – 204 с.

157. J. Pelletier, A. Anders. Plasma-based ion implantation and deposition: A review of physics, technology and applications // IEEE Transactions on Plasma Science. - 2005. - V. 33, No 6. - P. 1944-1959.

158. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые сверхтвердые TiN покрытия и их использование для упрочнения инструментов / А.А. Андреев, В.А. Столбовой, И.В. Сердюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. - №5. – С. 65-69.

159. В.М. Шулаев, А.А. Андреев, В.П. Руденко. Модернизация серийной установки «Булат-6» для синтеза вакуумно-дуговых покрытий методом плазменной ионной имплантации и осаждения, а также ионного без водородного азотирования // Сб. докл. Межд. конф. «Нанотехнологии», Харьков, ННЦ ХФТИ, 2008, т. 1, С. 5-14.

160. Казак И.Б. Поверхностное упрочнение материала режущего инструмента на основе регулирования контактного взаимодействия с обрабатываемым материалом: Дисс... канд. техн. наук, 1987. – 140 с.

161. Воеводин А.А., Ерохин А.Л. Исследование внедрения ионов в растущие слои многослойных покрытий, получаемых ионно-плазменным

осаждением в вакууме.//Физика и химия обработки материалов. – 1993. - №2. – С. 78-82.

162. Верещака А. С. Влияние структуры покрытий на работоспособность твердосплавных инструментов / А. С. Верещака, Ю. Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. – 1986. – №8. – С. 38–42.

163. Верещака, А.А. Повышение режущих свойств твердосплавного инструмента путём рационального выбора состава, структуры и свойств наноразмерных износостойких комплексов: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Верещака Алексей Анатольевич. – Москва, 2010. – 254 с.

164. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгеноструктурный и электроннооптический анализ металлов. – М.: Металлургиздат. – 1970.– 366 с.

165. Новиков Н. В. Методы микроиспытаний на трещиностойкость / Н. В. Новиков, С. Н. Дуб, С. И. Булычев // Заводская лаборатория. – 1988. – Т. 54. – №7. – С. 60 – 67.

166. Тугоплавкие материалы в машиностроении: Справочник/Р.С. Амбарцумян и др. - Москва: Машиностроение, 1967. – 392 с.

167. Гуляев А.П. Металловедение – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

168. Табаков, В. П. Влияние состава износостойкого покрытия на контактные и тепловые процессы и на изнашивание режущего инструмента/В. П. Табаков // СТИН. – 1997. – №10. – С. 20 – 24.

169. Табаков, В. П. Исследование износостойкости покрытий режущего инструмента, полученных с применением составных катодов / В. П. Табаков// СТИН. – 1996. – №3. – С. 14 – 17.

170. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. - №2. С.18-39

171. Tabakov V.P. The Influence of Machining Condition Forming Multilayer Coatings for Cutting Tools//Key Engineering Materials. – Vol.496 (2012). – pp.80-85, TransTechPublications, Switzerland.

172. Tabakov V.P., Vereschaka A.S. Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining condition//Key Engineering Materials. – Vol. 581 (2014). – pp. 55-61, TransTechPublications, Switzerland.

173. Табаков В.П. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с покрытиями: учебное пособие/ В.П. Табаков, Д.И. Сагитов – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 74 с.

174. Investigation of wear mechanisms for the rake face of a cutting tool with a multilayer composite nanostructured Cr-CrN-(Ti,Cr,Al,Si)N coating in high-speed steel turning . Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S., Sitnikov N., Milovich F., Andreev N., Bublikov Yu. *Wear*. 2019. Т. 438-439. С. 203069.

175. Табаков В.П. Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями: учебное пособие/ В.П. Табаков, А.С. Верещака, С.Н. Григорьев. – Ульяновск: УЛГТУ, 2012. – 172 с.

176. Tabakov V.P., Shirmanov N.A., Sizov S.V., Chikhranov A.V. Influence of cathode structure and configuration on complex nitride coatings//Russian engineering research. – 2017. - Т.37. - №12. – 1048-1051.

177. Табаков В.П., Сизов С.В. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем направленного выбора механических свойств функциональных слоев многослойного покрытия. *Вестник СТАНКИНА*. 2017, № 4 (43), С. 16-21.

178. V. Tabakov, A. Chikhranov, S.Sizov. Increasing of the carbide cutting tool life by developing multilayer coatings // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) - MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. doi: 10.1051/mateccconf/201712901038.

179. Influence of the nanostructure of Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N multilayer composite coating on tribological properties and cutting tool life. Vereschaka A., Grigoriev S., Tabakov V., Migranov M., Sitnikov N., Milovich F., Andreev N. *Tribology International*. 2020. Т. 150. С. 106388

180. Multilayer composition coatings for cutting tools: formation and performance properties. Tabakov V.P., Vereschaka A.S., Vereschaka A.A. *Mechanics and Industry*. 2017. Т. 18. № 7. С. 706.

181. Влияние наноструктуры функциональных слоев многослойного покрытия на изнашивание твердосплавного инструмента. Верещака А.А., Табаков В.П. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021. Т. 17. № 7 (199). С. 332-336.

182. Effect of adhesion and the wear-resistant layer thickness ratio on mechanical and performance properties of ZrN-(Zr,Al,Si)N coatings/ Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S., Aksenenko A., Sitnikov N., Oganyan G., Seleznev A., Shevchenko S. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Т. 357. С. 218-234.

183. Investigation of the properties of Ti-TiN-(Ti,Al,Nb,Zr)N composite coating and its efficiency in increasing wear resistance of metal cutting tools.

Sergey Grigoriev, Alexey Vereschaka, Filipp Milovich, Vladimir Tabakov, Nikolay Sitnikov, Nikolay Andreev, Jury Bublikov, Catherine Sotova. *Surface and Coatings Technology*. 421. (2021). 127432.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора



по технической и технологической

политике Главный инженер АО «УМЗ»

А.В. Хазов

2020 г.

### АКТ

производственных испытаний сверл из твердого сплава H13A с износостойким многослойным покрытием

Проведены производственные испытания сверл из твердого сплава H13A с износостойкими покрытиями при сверлении заготовок из стали 30XГС ГОСТ 103-2006, нормализованная, твердость HRC 30...32. Сверление отверстий без СОТС проводили на высокопроизводительном вертикальном обрабатывающем центре с ЧПУ DMC 1035 V esoline. Покрытия на твердосплавные сверла были нанесены на кафедре «Инновационные технологии в машиностроении» Ульяновского государственного технического университета в рамках диссертационной работы аспиранта кафедры Аль-Кадхими М.Ф.Д.

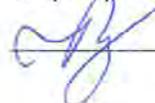
Таблица проведения испытаний

№	Покрытие	Режим резания	Количество отверстий
1	Без покрытия	n=3184 об/мин, s=445 мм/мин, t=13 мм, D <sub>сверла</sub> =5 мм	50 отв.
2	TiAlCrN		95 отв.
3	TiAlN-TiAlCrN		118 отв.

**Вывод:** коэффициент повышения стойкости сверл с износостойким многослойным покрытием составил по отношению к однослойному покрытию 1,25, по отношению к сверлу без покрытия 2,36.

Испытания проводил:

оператор ЧПУ 5 разряда АО «УМЗ»

 К.В. Коротков

Согласовано:

начальник ПМО АО «УМЗ»

 В.Н. Семин

