

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Монография

Авторы:

В.А. Лойко, В.С. Ивашко, С.А. Клименко, В.С. Антошок, М. Л. Хейфец

**Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве : монография
/ В.А. Лойко [и др.] – Минск : БГАТУ, 2007. – 192 с. : ил. ISBN 978-985-6770-84-8**

Приведены сведения о перспективных технологиях восстановления и упрочнения прецизионных деталей, используемых в сельскохозяйственном производстве. Описаны способы вакуумно-плазменных покрытий, а также технология обработки и свойства обработанных поверхностей упрочненным методом напыления инструментом.

Для инженерно-технических работников ремонтных предприятий и студентов соответствующих специальностей.

Табл. 29. Ил. 93. Библиогр. : 157 назв.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **И.А. Иванов** (Белорусский национальный технический университет)

доктор технических наук, профессор **В.М. Капцевич** (Белорусский государственный аграрный технический университет)

Содержание

Введение	5
1 Вакуумные ионно-плазменные технологии при восстановлении и упрочнении в ремонтном производстве	7
2 Проектирование технологий упрочнения и эксплуатации деталей	25
2.1 Алгоритм выбора технологических решений	26
2.2 Термодинамическая модель интенсивной обработки	28
2.3 Критерии физико-химических процессов	30
2.4 Ионная имплантация с ионным осаждением покрытия	31
2.5 Анализ процессов изнашивания поверхностей	32
2.6 Направленное формирование показателей качества	37
2.7 Управление процессами интенсивной обработки	47
3 Технологические основы вакуумно-плазменного нанесения покрытий	48
3.1 Формирование структуры и свойства поверхностных слоев при ионной очистке и осаждении покрытия	53
3.2 Температурно-энергетические условия формирования износостойких защитных слоев	65
3.3 Особенности формирования вакуумно-плазменных покрытий в условиях намагниченности электронов	70
3.4 Твердые смазочные материалы покрытий деталей сельскохозяйственной техники	73
3.5 Конструирование покрытий дискретного типа	81
4 Технологии и материалы для вакуумно-плазменного упрочнения режущего инструмента в ремонтном производстве	85
4.1 Основные требования к покрытиям на режущих инструментах, их составы и классификация	86
4.2 Опыт применения режущего инструмента с упрочняющими вакуумно-плазменными покрытиями в обработке резанием	96
4.3 Нанесение вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ)	102
4.4 Нанесение вакуумно-плазменных покрытий на порошки сверхтвердых материалов	104
5 Применение режущего инструмента с покрытиями в ремонтном производстве	108
5.1 Лезвийная обработка при изготовлении запасных частей, упрочнении и восстановлении деталей машин	108

5.2 Применение инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием	111
5.3 Совершенствование архитектуры покрытий для режущего инструмента	119
5.4 Абразивная обработка наплавленных деталей инструментом с металлизированными порошками алмаза	128
5.5 Качество поверхности деталей при обработке инструментом с покрытием	134
6 Вакуумно-плазменные технологии при ремонте и восстановлении деталей сельскохозяйственной техники	138
6.1 Особенности эксплуатации и износа прецизионных деталей сельскохозяйственной техники	138
6.2 Исследование материалов покрытий для вакуумно-плазменного нанесения покрытий на прецизионные детали сельскохозяйственной техники	146
6.3 Оптимизация технологических режимов нанесения вакуумно-плазменных покрытий	151
6.4 Влияние технологических параметров нанесения вакуумно-плазменного покрытия	154
6.5 Механическая обработка деталей, восстановленных нанесением вакуумно-плазменных покрытий	157
6.6 Технология восстановления прецизионных деталей сельскохозяйственной техники нанесением вакуумно-плазменных покрытий	159
6.7 Совершенствование оборудования и технологии нанесения покрытий на прецизионные детали сельскохозяйственной техники	161
6.8 Применение вакуумно-плазменных покрытий при ремонте деталей двигателей, оснастки и запорной арматуры	168
7 Перспективы создания и применения вакуумно-плазменной технологии для упрочнения и восстановления деталей машин и инструмента в ремонтном производстве	169
7.1 Совершенствование материалов ионно-плазменных покрытий	170
7.2 Методология синтеза функционально ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий	172
Заключение	176
Список литературы	177

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций развития современного ремонтно-производства является интенсификация, характеризующаяся повышением производительности металлообработки и восстанавливаемой сельскохозяйственной техники за счет применения прогрессивных технологий и использования новых конструкционных материалов и защитных покрытий, обладающих повышенными триботехническими, физико-химическими и механическими характеристиками.

Следует отметить, что условиям работы деталей и узлов механизмов сельскохозяйственной техники, а особенно режущего инструмента и технологической оснастки, используемым в ремонтном производстве, характерны сочетание высоких тепловых и механических нагрузок и воздействия химически активных сред, коррозионного и эрозийного воздействия при повышенных температурах с циклическим изменением механических и температурных нагрузок.

Исходя из условий работы, к материалам деталей и узлов механизмов сельскохозяйственной техники, режущего инструмента и технологической оснастки предъявляются противоречивые, а иногда даже взаимоисключающие требования, выполнение которых возможно только при условии создания и широкого применения новых высоколегированных сталей и сплавов одновременно с разработкой и внедрением новых технологий упрочнения поверхностей.

Эффективное использование машин и оборудования обеспечивается высоким уровнем их технического обслуживания и ремонта, наличием необходимого числа запасных частей. Сбалансированное обеспечение запасными частями ремонтных предприятий и сферы эксплуатации машин и оборудования, как показывают технико-экономические расчеты, целесообразно осуществлять с учетом периодического возобновления работоспособности деталей, восстановленных современными способами.

Восстановление деталей машин обеспечивает экономию высококачественного металла, топлива, энергетических и трудовых ресурсов, а также рациональное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды. Для восстановления работоспособности изношенных деталей требуется в 5-8 раз меньше технологических операций по сравнению с изготовлением новых деталей.

Значительные расходы обусловлены недооценкой значимости проблемы повышения долговечности и износостойкости машин и механизмов. Наиболее остро эти проблемы проявляют себя в авто-

мобильной и тракторной отраслях, являющихся серийными и массовыми производствами. К настоящему времени в республике освоено производство дизельных двигателей ко всем модификациям тракторов МТЗ и ряду автомобилей МАЗ. Одним из слабых мест в отечественном двигателестроении является отсутствие производства плунжерных пар топливных насосов, потребность которых достигает 400000 шт. в год. При этом республика вынуждена ежегодно затрачивать на закупку плунжерных пар в Литве и России значительные средства.

Высокое качество восстановления деталей может быть достигнуто совместными усилиями инженерно-технических работников и рабочих ремонтных мастерских. Важно, чтобы специалисты, занятые ремонтом машин и оборудования, знали не только назначение, конструкцию, износ и неисправности деталей, но и владели современными способами и приемами нанесения вакуумно-плазменных покрытий и упрочняющей обработки.

1 ВАКУУМНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ И УПРОЧНЕНИИ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Существует более сотни методов поверхностной упрочняющей обработки металлов и сплавов, с помощью которых удается в той или иной степени повышать работоспособность деталей машин и инструментов [1].

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных свойств изделий является их обработка в вакууме.

Вакуумные упрочняющие технологии по способу реализации [2] подразделяются:

- ионно-имплантационные (ионное легирование поверхности детали);
- ионно-плазменные (нанесение моно- и многослойных высокопрочных, более 2 ГПа, покрытий для упрочнения и защиты деталей от агрессивных воздействий, а также ионная химико-термическая обработка, например, ионное азотирование в тлеющем разряде);
- совмещение и комбинирование первых двух методов обработки для реализации ионного легирования и нанесения покрытия в едином вакуумном объеме за один технологический цикл;
- вакуумные ионно-имплантационные технологии.

При ионной имплантации эффект [3] упрочнения достигается как за счет роста плотности дефектов кристаллической структуры обрабатываемого материала, закрепления этих дефектов атомами легирующих элементов, так и за счет формирования дополнительного количества мелкодисперсных карбидных, нитридных и интерметаллических структур. Технология ионной имплантации поверхностного слоя обрабатываемого материала является наиболее перспективной при создании композиционных материалов с оптимальным набором поверхностных свойств.

Суть ионной имплантации заключается во внедрении ускоренных до энергии 1-10 мев ионов легирующего элемента в кристаллическую решетку основы. Имплантированные ионы, проходя через вещество мишени, теряют свою энергию, которая затрачивается на образование дефектов кристаллической структуры. При этом стимулируются процессы кристаллизации и перекристаллизации. Имплантация химически активных элементов приводит к образованию химических соединений. Основанная на методе ионной имплантации, ионная металлургия позволяет получать на поверхности изделия сплавы, которые сложно получить известными способами.

Отличительной чертой метода является отсутствие межфазной границы раздела. Практически методом ионной имплантации можно внедрять в структуру основы большинство элементов периодической системы. Внедрение ионов N^+ , C^+ , Ti^+ , Cr^+ в стали и сплавы повышает их эксплуатационные характеристики, при этом увеличиваются их усталостная прочность и коррозионная стойкость. Примеры модифицирования эксплуатационных свойств приведены в табл. 1.1, 1.2.

Таблица 1.1 – Свойства сплава ВТ8М после ионной имплантации режим обработки различных ионов (энергия ионов $E = 40$ кэВ, плотность токов $j = 10-40$ мкА/см²) [2]

Максимальная доза внедрения D, ионов/см ²	Изменение эксплуатационных свойств материала			
	Усталостная прочность	Эрозионная стойкость	Жаростойкость	Коррозионная стойкость
$1,1 \cdot 10^{16}$	–	–	+	+
$2,0 \cdot 10^{17}$	+	+	+	+
$1,7 \cdot 10^{17}$	+	+	+	0
$1,6 \cdot 10^{17}$	+	+	0	–
$2,8 \cdot 10^{16}$	0	0	+	+
$6,1 \cdot 10^{15}$	0	0	+	+
$5,7 \cdot 10^{15}$	–	–	+	+

Таблица 1.2 – Данные по износостойкости материалов при легировании ионами азота [4]

Область применения	Материал	Доза, ион/см ²	Результаты
Фильеры для медного прутка	WC-6 % Co	$5 \cdot 10^{17}$	Увеличение производительности в 5 раз
Фильеры для стальной проволоки		$3 \cdot 10^{17}$	Увеличение скорости изнашивания в 2 раза

Ножи для резки синтетического каучука		$8 \cdot 10^{17}$	Увеличение срока службы в 12 раз
		$2 \cdot 10^{17}$	Увеличение длительности эксплуатации
Резец	T5K10	$(3-8) \cdot 10^{17}$	Увеличение стойкости в 7,5 раза
Резец	P18	$(3-8) \cdot 10^{17}$	Увеличение стойкости в 2-3 раза
Метчики для нарезания резьбы в пластмассе	Быстрорежущая сталь	$8 \cdot 10^{17}$	Увеличение срока службы в 2 раза
Пробивные пуансоны	P6M5	$1 \cdot 10^{17}$	Увеличение износостойкости в 3 раза

Наиболее распространенный процесс ионной имплантации – напышение поверхности деталей и инструмента ионами N^+ . Плотность потока составляет $(2-8) \cdot 10^{17}$ ион/см² с энергией 45–500 кэВ [5, 6]. Ионная имплантация может осуществляться как с разогревом катода, так и без него. Глубина проникновения ионов составляет несколько сотен ангстрем. При этом выявлено значительное смещение атомов в кристаллических решетках, а также увеличение плотности дислокаций в поверхностных слоях.

Применение ионной имплантации азота в сочетании с последующим покрытием нитридом титана (TiN) в технологии изготовления лопаток ротора и статора компрессора из титановых сплавов и стали обеспечивает увеличение предела выносливости на 14 % [2].

Ионная имплантация приводит к повышению износостойкости и антифрикционных свойств поверхностей изделий. Применительно к твердым сплавам повышение микротвердости в результате имплантации ионов связано с закреплением дислокаций, что приводит к повышению износостойкости при внедрении С или N в поверхностный слой с кобальтовой связкой. Упрочнение происходит в результате блокировки дислокаций в С [7]. Имплантацией ионов N^+ упрочняют изделия из сталей и твердых сплавов. В частности, твердосплавные неперегретываемые пластины типа ВК и ТК [8, 9]. Для упрочнения применяют ионную имплантацию в реактивной среде. Электронолучевое испарение бора со следующей его иони-

зацией, ионным ускорением при введении в камеру N_2 позволяет получить покрытие из разных структурных модификаций нитрида бора [10, 11]. При ионной имплантации почти отсутствует эффект термодиффузии, потому что при непрерывном сканировании поверхности детали пучком ионов зона облучения не локализована и деталь практически не нагревается.

Стойкость твердосплавных резцов (сплав Т15К6), имплантированных ионами бора, в 1,8 раза выше по сравнению с исходными. Объясняется это тем, что в результате ионной имплантации (или легирования) снижается уровень внутренних микронапряжений карбидных фаз.

Вакуумные ионно-плазменные технологии. К преимуществам вакуумных ионно-плазменных технологий относят возможность нанесения высокотвердых (более 2 ГПа) плотных покрытий на поверхность различных материалов, в том числе и неметаллических, с высокой адгезией. Процесс позволяет создавать многокомпонентные покрытия с различными стехиометрическими композициями: нитридные, карбонитридные, оксикарбонитридные, интерметаллидные, на основе различных металлов. Кроме этого, вакуумная ионно-плазменная технология позволяет наносить многослойные покрытия (общей толщиной до 50 мкм) с уникальными свойствами. При этом повышаются коррозионная, эрозийная стойкость, износостойкость, усталостная прочность.

На рис. 1.1 приведена классификация методов ионного осаждения, предложенная В.М. Бересневым.

Ионно-термические методы позволяют получать покрытия с высокими служебными характеристиками, дают возможность в широких пределах управлять процессами осаждения пленок и их свойствами.

Основной недостаток ионно-термических методов состоит в сравнительно низком проценте ионизированных частиц в общем потоке испаряемого материала, что оказывает существенное влияние на адгезионные характеристики покрытия и условия протекания плазмохимической реакции с реактивным газом.

В основе осаждения покрытий из плазмы разряда с холодным катодом лежит процесс генерации металлической плазмы в вакууме низковольтным разрядом (дугой).

Ионно-плазменные технологии основываются на методах химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (ХОП) или CVD (Chemical Vapour Deposition) и физического осаждения покрытий (ФОП) или PVD (Physical Vapour Deposition). Формирование по-

крытый методами CVD осуществляется вследствие реакций между окружающими инструмент парогазовыми смесями, которые состоят из соединения металлоносителя и носителя второго компонента (водородом, аммиаком, окисью углерода и т.д.), служащего как газом-транспортером, так и восстановителем. В процесс формирования покрытия большой вклад вносят и структура поверхности инструментального материала, и гетеродиффузионные реакции между конденсатом и материалом инструмента. Свойства таких покрытий сильно зависят от параметров процесса газофазового осаждения. Наиболее существенную роль играет температура на границе раздела конденсата и инструментального материала. От температуры зависят структура покрытия, прочность его адгезии с твердым сплавом, причем последнее определяется также возможностью диффузионного взаимодействия пары "покрытие – твердый сплав". Взаимная диффузия повышает прочность сцепления покрытия и твердого сплава. Так как реакция осаждения покрытий происходит при высоких температурах (1000-1100°C), то этим методом покрытие может наноситься только на инструменты из твердого сплава и режущей керамики. Методы CVD широко применяются при нанесении покрытий на основе карбидов, нитридов, карбонитридов титана, а также оксида алюминия. Этим методом получают многослойные покрытия на основе TiC, TiN, TiCN, Al₂O₃, NbC, HfC, HfN.

Практическая реализация метода CVD нашла широкое применение в технологии газофазового титанирования, где на сменные многогранные пластины (СМП) из твердого сплава наносятся износостойкие покрытия (TiC, TiCN, TiC-TiCN-TiN и др.).

Существует ряд недостатков, которыми обладают методы CVD: взрывоопасность и токсичность водорода как газа-носителя; остаток большого количества непрореагировавших компонентов; сложность технологического оборудования; внутренние напряжения в слое покрытия. Кроме того, методами ХОП сложно нанести покрытие на инструмент, который имеет острые режущие кромки. Методы PVD основаны на физическом испарении или распылении вещества в вакуумное пространство камеры с последующей подачей реакционного газа (N₂, O₂, CN₄ и др.). В результате плазмохимической реакции ионизированного потока металлической плазмы и реакционного газа на поверхности инструмента конденсируется покрытие. Среди методов PVD наибольшее распространение получили: конденсация вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой – метод КИБ (конденсация с ионной бомбардиров-

кой, установка «Булат», рис. 1.2), разработанный в Харьковском физико-техническом институте [12, 13], реактивное электронно-лучевое осаждение покрытия из пароплазменной фазы в вакууме (метод РЭП); активированное реактивное напыление (метод ARE), магнетронное распыление (метод МИР) и ионное плакирование.

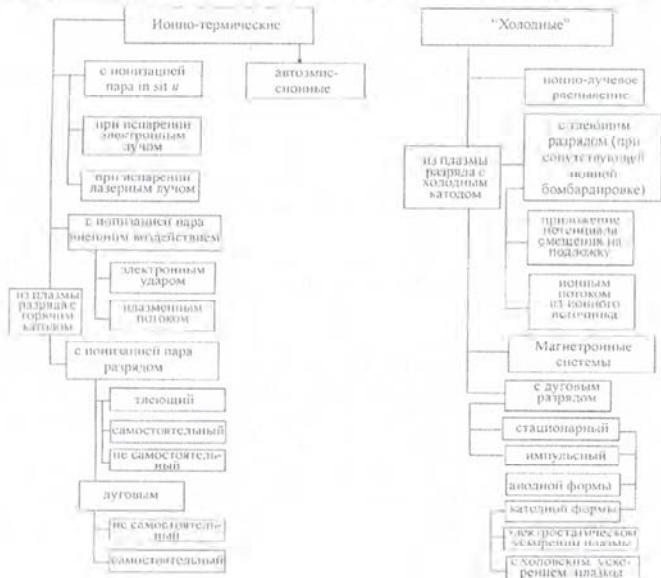


Рисунок 1.1 Классификация методов ионного осаждения

Наиболее характерная особенность покрытий, наносимых вакуумно-плазменным методом, – отсутствие переходной зоны между покрытием и инструментальным материалом. Это обстоятельство является весьма важным, так как создается возможность придать рабочим поверхностям инструмента комплекс дополнительных свойств практически без ухудшения его объемных свойств – прочности и вязкости разрушения. Возможность широкого варьирования температуры (200–1000 °С) в зонах осаждения позволяет использовать вакуумно-плазменные методы в качестве универсальных для нанесения покрытий на инструмент из быстрорежущей стали, твердых сплавов, керамики,

при этом достигать высокой адгезии покрытия с основой. Методы PVD универсальны также и с точки зрения возможности нанесения гаммы однослойных, многослойных и композиционных покрытий. Следует также отметить относительно высокую скорость формирования покрытий и безопасность методов PVD для окружающей среды. Метод КИБ основан на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода. Покрытие является продуктом плазмохимических реакций металлической плазмы и реакционного газа, молекулы которого в результате соударения с ионами металла частично ионизируются. Все процессы испарения, образования соединения, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. Катод изготавливают из тугоплавкого материала, подлежащего испарению. Покрытия методом КИБ наносят в две стадии: на первой очищают поверхность подложки, бомбардируя ее ионами испаряемого электрода, ускоренными до энергии 1...3 кэВ; на второй происходит собственно конденсация покрытий. Метод конденсации с ионной бомбардировкой рекомендуется для нанесения покрытий из переходных металлов IV–VI А групп Периодической системы (Ti, Cr, Zr, V, Mo) и их тугоплавких соединений на металлические детали сельскохозяйственной техники и режущий инструмент для обработки восстановленных поверхностей. Особенности метода является низкая температура процесса (200–500 °С), сохранение параметров микрорельефа поверхностей инструмента и малая толщина слоя покрытия (3–10 мкм), что позволяет исключить последующие механическую и термическую обработки.

Покрытия наносятся в вакууме с помощью стационарных электродуговых эрозионных испарителей (рис. 1.3) с расходуемым интегрально холодным катодом.

Метод конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) в вакууме реализуется следующим образом. В вакуумной камере, откаченной до высокого 10^{-3} – 10^{-4} Па вакуума, зажигается системой электродов вакуумная электрическая дуга катодной формы между охлаждаемыми вспомогательным анодом, а затем анодом (+) и расходуемым катодом (–), изготовленным из основного металла покрытия. Потоки плазмы истекают из катодных пятен – микрообластей, в которых концентрируется весь ток вакуумно-дугового разряда на катоде, разогретых до температуры 5000 °К, хаотически перемещающихся по твердой и интегрально холодной поверхности.

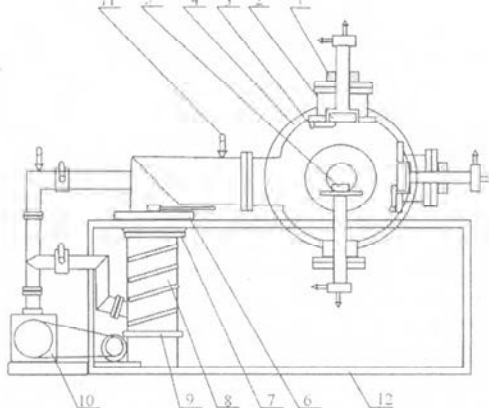


Рисунок 1.2 Схема установки «Буллат»: 1 – фокусирующая катушка; 2 – катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – вакуумная камера; 5 – подложка; 6 – азотная ловушка; 7 – водяная ловушка; 8 – высоковакуумный агрегат; 9 – нагреватель; 10 – форвакуумный насос; 11 – манометрическая лампа; 12 – система водяного охлаждения

Ионная компонента плазменного потока имеет заряд (степень ионизации) от $+1$ до $+4$, энергию $90 \dots 100$ эВ и перемещается со скоростью $1-10$ км/с прямолинейно в пределах телесного угла с вершиной в центре катода и ограниченного образующими, проходящими через наружный срез анода. Первоначально, на стадии ионной очистки, к обрабатываемому изделию прикладывается высокий отрицательный потенциал $1 \dots 1,5$ кВ, что приводит к ускорению ионов металла вблизи подложки в так называемом двойном слое до энергии $1 \dots 2,0$ кэВ и способствует интенсивной бомбардировке тяжелыми ионами металла с высокой энергией, распылению загрязнения и дефектов, травлению и активации поверхности детали, нагреву его до температуры конденсации $650-800$ °С.

При переходе к режиму осаждения покрытия в камеру подают реакционный газ, потенциал уменьшают до нескольких десятков или сотен вольт для обеспечения постоянной температуры процесса, подавления роста размеров кристаллитов и получения более плотной структуры за счет ионной бомбардировки. Твердое покрытие из химических соединений металла катода образуется в результате плаз-

мохимических реакций прямого синтеза на поверхности инструмента при взаимодействии ионов титана с адсорбированными компонентами реакционных сред, в качестве которых используют азот, аммиак и другие газы.

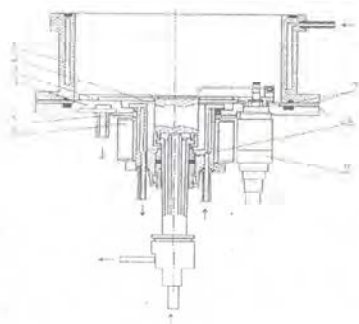


Рисунок 1.3 Электродуговой плазменный испаритель для нанесения покрытий в вакууме:

- 1 – анод;
- 2 – катод;
- 3 – вспомогательный анод;
- 4 – фланец;
- 5 – защитный экран;
- 6 – магнитная катушка;
- 7 – уплотнители;
- 8 – изоляторы;
- 9 – поджигающее устройство

Процесс включает предварительную обработку поверхности детали, режущего инструмента или оснастки потоком ионов нейтрального газа аргона, ускоренных в скрещенных магнитном и электрическом полях ионного источника и конденсацию с ионной бомбардировкой потоков плазмы переходного металла в строго контролируемом одновременно с обработкой потоком ионов реакционного газа. Перед нанесением покрытия детали и образцы тщательно обезжириваются и устанавливаются на подложке. Откачивающая система установки обеспечивает рабочий вакуум в камере 1 мПа. После откачки в нее с помощью вентиля тонкого натекания напускался аргон до давления 2,7 Па и проводилась очистка поверхности образцов в глеющем разряде, для чего между электродами и устанавливалась разность потенциалов 1,8 кВ. Далее камера снова откачивалась до давления 1,3 МПа, и в этом вакууме образцы подвергались предварительной ионной бомбардировке (этап очистки), для чего между электродами и создавалось высокое напряжение 1,2 кВ и возбуждалась дуга между электродом и поджигающим электродом. При этом ионизированные атомы титана и заряженные конгломераты частиц с высокой скоростью устремляются к электроду а, следовательно, и к поверхности образцов. В результате такой бомбардировки происходит разогрев, физическая и химическая очистка поверхности образцов и частичное распыление материала подложки.

Температура на поверхности образцов определяет качество очистки и, следовательно, адгезию покрытия. Эта температура зависит от приложенного напряжения, времени ионной бомбардировки, тока дуги, расстояния между катодом и подложкой и может достигать весьма высоких значений.

Покрытие наносится на окончательно обработанные поверхности детали, режущего инструмента или оснастки, не снижается класс чистоты их поверхностей, не требуется последующая механическая или термическая обработка. Состав композиционного покрытия выбирается в зависимости от условий эксплуатации, материала основы и характера предварительной термической и механической обработки оснастки или упрочняемого изделия.

Высокие механические характеристики плазменно-вакуумных покрытий, такие как микротвердость, износостойкость, прочность сцепления с материалом детали или инструмента, а также низкий коэффициент трения и слабая склонность к свариванию с обрабатываемой деталью, обусловленные их слабым родством с металлами заготовки, их высокая термическая стабильность защищают материал инструмента, а незначительная толщина обеспечивает высокую упругость при ударах и экстремальных нагрузках.

Развитием метода КИБ является метод КИНТ [14] – конденсация ионная низкотемпературная. По сравнению с КИБ, способ КИНТ имеет следующие преимущества:

- * возможность нанесения качественных покрытий на детали и изделия из материалов, не допускающих нагрева (термически обработанные конструкционные стали, легкоплавкие металлы, пластмассы и др.);
- * возможность наносить покрытия на детали с повышенными требованиями к размерной точности;
- * возможность одновременного нанесения покрытий на детали, различные по материалам и массе;
- * снижение оптимальной толщины покрытий до 0,5–1 мкм, вместо 5–10 мкм для КИБ при сохранении возможности нанесения стойких покрытий толщиной более 50 мкм;
- * увеличение абразивной износостойкости твердых покрытий до 250 раз;
- * достижение предельной возможной адгезии покрытий, соизмеримой с прочностью соединяемых материалов;
- * стабильность покрытий во времени;
- * снижение на порядок величины требований к величине вакуума при нанесении покрытий;

- * сокращение цикла осаждения;
- * упрощение конструкции установки для нанесения покрытий;
- * перспективы спроса на мировом рынке.

Многочисленные работы, проведенные различными исследователями, показали, что покрытия, создаваемые мировыми производителями, имеют близкие эксплуатационные характеристики, т.к. значения среднего размера зерна, величины внутренних напряжений, диаметры макрочастиц близки при условии близости параметров осаждения покрытий. Это обстоятельство стимулирует дальнейшее развитие этих методов, в частности, посредством применения дополнительных плазма-генерирующих устройств.

Одним из методов повышения эффективности ионно-плазменных технологий является использование при нанесении покрытий ВЧ-разрядов [12]. Применение ВЧ-разряда позволяет эффективно осуществлять чистку поверхности образцов перед покрытием. Совместная работа ВЧ-поля с дуговым источником плазмы позволяет уменьшить капельную составляющую в разряде, производить покрытия при меньшей температуре подложки, получать покрытия с хорошими адгезионными и другими эксплуатационными характеристиками. При этом открывается перспектива получения диэлектрических плёнок и нанесение покрытий на такие материалы, как алюминиевые сплавы, пластмассу, стекло, керамику и т.д.

Для реализации КИИТ - технологии и метода напыления с использованием ВЧ - разрядов могут использоваться модернизированные установки серии «Булат».

Для нанесения алмазного покрытия на режущий инструмент используется метод, известный как осаждение химических паров (CDA). Реализуется он с применением высокочастотной плазмы в среде, образованной смесью оксида углерода (CO) и водорода.

Алмазоподобные покрытия представляют собой тонкие аморфные пленки на основе углерода. Наличие алмазоподобной фракции определяет высокую микротвердость алмазоподобных покрытий. Такие покрытия являются перспективным способом обработки поверхности для увеличения поверхностной твердости и износостойкости деталей машиностроения, а также снижения коэффициента трения. Алмазоподобные покрытия могут применяться для улучшения износостойкости и эксплуатационных свойств подшипников качения и скольжения, элементов шестеренных передач, элементов компрессоров, топливной и газовой аппаратуры и т.д. Высокая твердость алмазоподобных покрытий в сочетании с оптической прозрачностью может быть использована для

упрочнения поверхностей стеклянных или пластиковых элементов. Алмазоподобные пленки являются перспективным покрытием, препятствующим появлению царапин. Они могут также успешно использоваться в целях химической пассивации поверхности, в частности – как антикоррозионные покрытия, для увеличения долговечности режущего инструмента и штампов холодной штамповки.

В качестве подложки могут быть использованы твердые сплавы, керметы, спеченный Al_2O_3 или Si_3N_4 . Режущие пластины с основой из Si_3N_4 или твердого сплава с алмазным покрытием могут работать со скоростью резания порядка 1200 м/мин. Их стойкость в 5–10 раз выше, чем у такого же инструмента без алмазного покрытия. Режущий инструмент с алмазным покрытием особенно эффективен при высокоскоростном резании легких сплавов, например, алюминий-кремниевых сплавов.

Вакуумные ионно-плазменные технологии позволяют проводить химико-термическую обработку поверхности (например, ионное азотирование) [2]. Этот процесс заключается в низкоэнергетическом насыщении обрабатываемой поверхности легируемым веществом. Одним из основных достоинств этого метода является глубокое проникновение внедряемого элемента при незначительном повышении температуры поверхностного слоя, что не вызывает коробление детали и не вызывает разупрочнения основного материала.

Ионное азотирование (азотирование в тлеющем разряде, плазменное азотирование) [15] – низкотемпературный (500–600 °С) химико-термический процесс в импульсной плазме тлеющего разряда в газовой азотосодержащей среде. Азотирование и карбонитрирование повышают поверхностную твердость, износ- и задиростойкость, усталостную прочность и антикоррозионные свойства упрочняемых изделий, изготовленных из сталей различных структурных классов (перлитного, мартенситного, аустенитного), чугуна, титановых и алюминиевых сплавов, металлокерамики и др. Путем изменения кинетических и газодинамических параметров процесса можно получать высококачественные покрытия регулируемого строения с оптимальным комплексом свойств с учётом условий эксплуатации изделий.

Технология позволяет:

- сократить по сравнению с газовым азотированием продолжительность обработки в 2 – 4 раза, расход электроэнергии в 1,5–3 раза, аммиака в 20 – 50 раз;
- снизить деформации настолько, чтобы исключить финишную шлифовку;

- обеспечить экологическую чистоту производства, увеличить ресурс работы упрочненной поверхности в 2–5 раз по сравнению с закалкой.

Ионное азотирование наиболее целесообразно применять при изготовлении точных, прецизионных, тяжело нагруженных, работающих в экстремальных условиях деталей, например:

- зубчатых колес всех видов, в том числе с внутренним зацеплением, с модулем от 0,5 до 10 мм;
- червяков, муфт, в том числе зубчатых, шпинделей и пинолей, ходовых винтов и гаек шариковых винтовых пар и пар «винт-гайка скольжения»;
- шнеков и цилиндров термопласт – автоматов;
- клапанов и шаровых пальцев, гильз цилиндров, распределительных и коленчатых валов;
- деталей гидравлики, в том числе штоков гидроцилиндров;
- деталей топливной и распределительной аппаратуры, в том числе плунжерных пар, втулок, кулачков, копиров и др.

Ионное азотирование применяют для упрочнения:

- окончательно изготовленного режущего инструмента из сталей P18, P6M5, P6M5K5 и др. (фрезы, сверла, метчики, протяжки, прошивки и др.);
- штампов и штамповой оснастки для вырубки, штамповки и холодного деформирования листовых материалов;
- пресс-форм из сталей X12M, X12Ф1, 4X5MФС, ХВГ, 40X и др. для литья алюминиевых сплавов, пластмасс, стеклопластиков, резины;
- технологической и инструментальной оснастки, в том числе для станков типа «обрабатывающий центр».

Штамповую оснастку и пресс-формы, упрочняемые с помощью ионного азотирования, изготавливают по технологическому маршруту, применяемому для азотируемых деталей машин. При необходимости предусматривают полировку азотированных рабочих поверхностей.

Стойкость режущего инструмента, штамповой оснастки, пресс-форм и инструментальной оснастки возрастает после ионного азотирования в 1,5–4 раза.

Совмещение вакуумных ионно-имплантационной и ионно-плазменной технологии реализуется в последовательном (либо совмещенном) воздействии на обрабатываемую поверхность в одном вакуумном объеме за один технологический цикл [2]. Например, проведение ионной имплантации перед нанесением покрытия обуславливает

упрочнение и активизацию поверхности, что значительно увеличивает адгезию покрытия к подложке. Кроме этого, при совмещенной обработке создается плавный переход физико-химического состояния покрытия в матрицу и исчезает граница раздела покрытие-поверхность, что обеспечивает адгезионную прочность и исключает возникновение ненормированных остаточных напряжений растяжения.

Для реализации вакуумных методов обработки используют технологическое оборудование периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. Установки периодического действия осуществляют один цикл нанесения пленок при заданном числе загружаемых изделий. Установки непрерывного действия используют при серийном и массовом производстве. Они бывают двух видов – многокамерные и многопозиционные однокамерные. Первые состоят из последовательно расположенных напылительных модулей, в каждом из которых осуществляется напыление пленок определенных материалов или их термическая обработка и контроль. Модули объединены между собой шлюзовыми камерами и транспортирующим конвейерным устройством. Многопозиционные однокамерные установки содержат несколько напылительных постов (расположенных в одной вакуумной камере), соединяемых транспортным устройством конвейерного или роторного типа.

Основные узлы и системы установок для вакуумного напыления представляют собой самостоятельные устройства, выполняющие заданные функции:

- создание вакуума;
- испарение или распыление материала пленок;
- транспортировку деталей;
- контроль режимов вакуумного напыления и свойств пленок;
- электропитание.

Обычно установка для вакуумного напыления включает следующие узлы:

- рабочую камеру, в которой осуществляется напыление пленок;
- источники испаряемых или распыляемых материалов с системами их энергоснабжения и устройствами управления;
- откачную и газораспределительную системы, обеспечивающие получение необходимого вакуума и организацию газовых потоков (состоят из насосов, натекаателей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, средств измерения вакуума и скоростей газовых потоков);
- систему электропитания и блокировки всех устройств и рабочих узлов установки;

- систему контроля и управления установкой вакуумного напыления, обеспечивающую заданные скорость напыления, толщину пленок, температуру поверхности деталей, температуру отжига, физические свойства пленок (содержит набор датчиков, связанных через управляющую микропроцессорную ЭВМ с исполнит. механизмами и устройствами вывода информации);

- транспортирующие устройства, обеспечивающие ввод и вывод деталей в рабочую камеру, точное размещение их на постах напыления и перевод из одной позиции напыления на другую при создании многослойной системы пленок;

- систему вспомогательных устройств и технологическую оснастку (состоят из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и пневмоприводов, устройств очистки газов).

Выбор параметра порядка H в каждом конкретном случае зависит от задач исследования (определения долговечности, сравнения износостойкости, оценки динамических свойств системы с учетом изнашивания ее элементов и др.). Не исключено, что для одной и той же детали, но для различных показателей, процесс утраты работоспособности может иметь или не иметь последствие при постоянной интенсивности изнашивания J трущихся поверхностей.

Это обусловлено видом связи (линейной или нелинейной) между определяющим параметром H , по которому производится оценка ресурса работоспособности исследуемого изделия, и накопленным износом U [2, 3].

Рассмотрим различные связи между внешними воздействиями и параметрами системы f_H , а также между характеристиками процесса утраты работоспособности g_H .

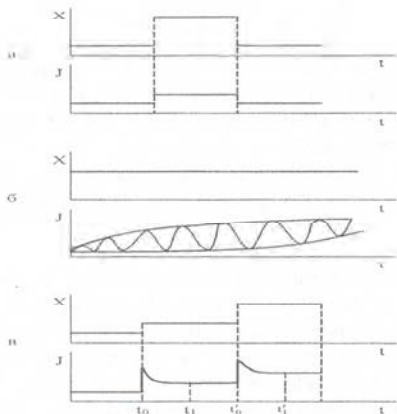


Рисунок 1.4 Зависимости интенсивности изнашивания J узлов трения от длительности работы t : а – интенсивность изнашивания зависит только от величины нагрузочного воздействия X в момент времени t ; б – зависит от времени работы t при постоянном X ; в – зависит от времени работы t при ступенчатом изменении X на отрезках времени $[t_0, t_1]$, $[t'_0, t'_1]$ и т.д.

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения без последействия (рис. 1.4, а). В случае, когда сопряженная параметру порядка H интенсивность изнашивания J зависит только от величины нагрузочного воздействия X :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X(t)); \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Если процесс изнашивания рассматривать как непрерывный стохастический процесс [31], то можно получить условие изнашивания без последействия. При постоянных условиях трения приращение износа $U(\Delta t) = U(t + \Delta t) - U(t)$ не зависит от времени (процесс с независимыми приращениями), следовательно, скорость изнашивания $\xi_H = dU/d\tau$ стационарна в период времени τ [2, 3]. Поэтому такой процесс изнашивания описывается режимом с запоминанием: $(\tau_H^p \ll \tau_H^y \text{ и } \tau_H^p \ll \tau_H^c)$.

Однако процессы утраты работоспособности деталей в периоды приработки и катастрофического разрушения поверхностных слоев не

интенсивность изнашивания J в эти периоды не является постоянной, а зависит от величин накопленного износа U трущихся поверхностей.

Модели процессов утраты работоспособности узлов трения с последствием первого рода (рис. 1.4, б). В случаях, когда интенсивность изнашивания J зависит как от величины нагрузочного воздействия X , так и от величины накопленного износа U , к рассматриваемому моменту времени t :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X(t), U(t), t); \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

а при учете обратной связи нагрузочного воздействия X^* с износом U :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X^*(t), U(t), t); \\ H(t) = g_H(X^*(t), U(t), t); \\ X^*(t) = q_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Изменения в период времени τ интенсивности изнашивания J трущихся сопряжений при постоянном нагрузочном воздействии на входе технической системы X могут быть вызваны двумя группами причин [2, 3]:

1) не учитывающими обратную связь нагрузки X с износом U , такими как различие физико-механических свойств материала по глубине поверхностного слоя изделия, обусловленное технологией изготовления; старение смазочных материалов, приводящее к ухудшению их трибологических свойств, к изменению теплового режима работы сопряжения, а в некоторых случаях и к смене видов изнашивания трущихся поверхностей; увеличение в процессе эксплуатации концентрации абразивных частиц, продуктов износа;

2) учитывающие изменения зависимости q_n нагрузочного воздействия X^* на детали узла трения в результате износа сопряжения U , которые связаны с увеличением зазоров в трущихся сопряжениях; с трансформацией макрогеометрии поверхностей трения при изнашивании и короблении деталей; с изменением контактной жесткости подвижных стыков и др.

Рассматриваемые процессы утраты работоспособности с последствием первого рода относятся к процессам с сильной корреляцией, у которых существует определенная связь между величинами

ми параметра порядка $H_i(\Delta t)$ и $H_{i-1}(\Delta t)$ даже при сравнительно больших $\tau = t_{i+1} - t_i$. Здесь $H_i(\Delta t) = H(t_i + \Delta t) - H(t_i)$; $H_{i-1}(\Delta t) = H(t_{i+1} + \Delta t) - H(t_{i+1})$, $t_i < t_{i+1}$.

Вследствие этого процессы утраты работоспособности, вызванные первой и второй группами причин, характеризуются автоколебательным ($\tau_{\text{н}}^{\text{в}} \gtrsim \tau_{\text{в}}^{\text{в}}$ или $\tau_{\text{н}}^{\text{в}} \gtrsim \tau_{\text{с}}^{\text{в}}$) и стохастическим ($\tau_{\text{н}}^{\text{в}} \gtrsim \tau_{\text{н}}^{\text{с}} \gtrsim \tau_{\text{с}}^{\text{в}}$) режимами с двумя и тремя степенями свободы технической системы. Модель процесса утраты работоспособности узлов трения с последствием второго рода (рис. 1.4, в). Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [2, 30]. В переходный период $[t_0, t_1]$ интенсивность изнашивания J отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия X_{i-1} и от значения, соответствующего новому уровню X_i :

$$J(t) = \begin{cases} f_H(X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-n}, t), & t_0 \leq t \leq t_1, \\ f_H(X_i, t), & t > t_1. \end{cases}$$

Возникновение переходных периодов объясняется несколькими причинами [2, 3]: эксплуатационной наследственностью материалов, деформируемых в процессе трения поверхностных слоев деталей; изменением эпюры удельных давлений в зоне контакта деталей при переходе с одного уровня нагрузочного воздействия на другой и связанной с этим «вторичной приработкой» трущихся поверхностей; постепенным восстановлением соответствия между величиной нагрузочного воздействия и распределением смазки и продуктов износа на трущихся поверхностях.

Исходя из представлений о природе явлений последствия второго рода можно заключить, что с позиции вероятностного анализа [31] процессы изнашивания в переходные периоды $[t_0, t_1]$ характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа $U_i(\Delta t)$ и $U_{i-1}(\Delta t)$ [2, 3]. В этой связи их следует рассматривать как релаксационные ($\tau_{\text{н}}^{\text{в}} \gg \tau_{\text{в}}^{\text{в}}$ и $\tau_{\text{н}}^{\text{в}} \gg \tau_{\text{с}}^{\text{в}}$) с характерным периодом $[t_0, t_1]$. Понижение размерности задачи описания передачи свойств изделий в технологических и эксплуатационных процессах производится путем выделения параметров порядка и определения режимов состояния системы. На каждом из режимов целесообразно рассмотреть взаимосвязи основных показателей качества изделия и условия их устойчивого формирования [32].

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества деталей машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий [16, 17].

Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом и эксплуатационном наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [18,19].

Корректному понижению размерности задачи описания трансформации свойств способствует замена множества объектов, взаимодействующих с изделием, одним объектом – технологической или эксплуатационной средой при тождественности результатов такой замены. Определение характеристик многосвязной среды позволяет при известных результатах ее взаимодействия с изделием находить рациональные значения его показателей качества и осуществлять направленное формирование технологической и эксплуатационной среды. Эти среды должны предусматривать благоприятное развитие полезных свойств и пресечение развития свойств, снижающих качество изделий путем использования технологических и эксплуатационных барьеров [20, 21].

Особенно актуально понижение размерности задачи описания трансформации свойств при создании новых интенсивных методов обработки, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [22].

В общем виде системная модель технологии [23, 24] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации.

Метод обработки целесообразно рассматривать в виде подсистем: материальной и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-химических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом процесса обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения определенной формы, размеров и свойств изделия.

В результате под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала [23, 24].

2.1 Алгоритм выбора технологических решений

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество технологических решений (ТР).

Такой подход [24, 25] позволяет любой метод обработки представить в виде кортежа, каждый элемент которого является элементом соответствующего множества ТР.

Полагая, что если два любых компонента метода обработки обладают хотя бы одним общим свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор ТР по эквивалентности и предпочтению [25]. По эквивалентности выбираются разноименные решения, которые по совокупности своих свойств должны соответствовать друг другу. По предпочтению выбираются решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств.

Такой подход позволяет формализовать условия выбора ТР по конкретному значению установленного критерия выбора и дает возможность выбирать решение по нескольким критериям, соответствующим различным свойствам ТР.

Анализ свойств отношений. Принятие ТР в системах автоматизированного проектирования традиционно основывается на анализе эквивалентности ($x \equiv y$) и предпочтения (нестрогого $x \leq y$ или строгого $x < y$) решений, заложенных в базу знаний [26]. Это предполагает использование свойств [27]:

1. рефлексивности ($x \equiv x$, $x \leq x$ – истинно; $x < x$ – ложно);
2. симметричности ($x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$ – истинно; $x \leq y$ и $y \leq x \Rightarrow x = y$ – антисимметрично; $x < y$ и $y < x \Rightarrow$ взаимоисключение – несимметрично);
3. транзитивности ($x \equiv y$ и $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$, $x \leq y$ и $y \leq z \Rightarrow x \leq z$, $x < y$ и $y < z \Rightarrow x < z$ – истинно).

В результате, используя свойство транзитивности, наиболее предпочтительное из предыдущих решение, сравнивается с новым

предложенным или выбранным из базы знаний по свойствам симметрии параметров качества.

Однако в общем случае разные неэквивалентные ТР наиболее предпочтительны для различных параметров качества из требуемого комплекса свойств. В этом случае необходимо использовать доминирующее ТР ($x \ll y$), характеризующееся свойствами [12]:

1. антирефлексивности ($x \ll x$ – ложно);
2. несимметричности ($x \ll y$ и $y \ll x \Rightarrow$ взаимоисключение);
3. нетранзитивности (из $x \ll y$ и $y \ll z$ не следует $x \ll z$).

Синергетический подход. При отсутствии симметричности и транзитивности для определения доминирования параметра целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды непрерывной случайной величины, под которой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [28]. Распределения случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами [29]:

- 1) равномерным $f(x) = 1 / (\mu_1 - \mu_0)$, при $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$;
- 2) экспоненциальным $f(x) = (1 / \mu) \exp(-x / \mu)$, при $\mu > 0, x > 0$;
- 3) нормальным $f(x) = (1 / (\sigma \sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$, при $\sigma > 0, -\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty$ где μ – математическое ожидание; μ_0 и μ_1 – ограничения; σ^2 – дисперсия случайных величин x .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, следовательно, о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k},$$

где λ_p^2 – критерий Пирсона; k – число степеней свободы, т.е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных (μ, σ и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ характеристик производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий, оборудования и средств оснащения позволяет ограничить номенклатуру рассматриваемых объектов и процессов. При выборе количества ограничений для объектов и процессов целесообразно рассмотреть взаимозависимость противоречивых требований по надежности и гибкости производственной системы. В результате соотношение надежности – устойчивости и гибкости – адаптивности может слу-

жить критерием, позволяющим принять ТР о рациональной структуре производственной системы.

Самоорганизующиеся системы. В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем. Каждая подсистема i имеет выходы: q_1 – детерминированный строго определенный и q_2 – флуктуирующий с рассеянными характеристиками.

Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков:

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)}.$$

Считая, что в условиях производства $q^{(i)}$ – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)}.$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем n , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню \sqrt{n} . Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик [15, 16].

Таким образом, при автоматизированном проектировании принятие ТР по совершенствованию производственных систем целесообразно проводить на основе синергетического анализа технологических и эксплуатационных процессов и объектов [16, 17].

2.2 Термодинамическая модель интенсивной обработки

Согласно синергетической концепции устойчивые моды подавляются доминирующие неустойчивые моды и могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров – степеней свободы. Остающиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих ТР.

Уравнения физико-химических процессов. В результате сокращения числа степеней свободы получаются уравнения, группирующиеся в несколько универсальных классов, вида:

$$\frac{\partial \vec{U}^*}{\partial \tau} = \vec{G}(\vec{U}^*, \nabla \vec{U}^*) + D \nabla^2 \vec{U}^* + \vec{F}(\tau),$$

где \vec{U}^* – контролируемый параметр; τ – текущее время; \vec{G} – нелинейная функция U^* и возможно градиента U^* ; D – коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или описывающий распространение волн, при мнимом значении; \vec{F} – флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием с внешней средой и диссипацией внутри системы.

Уравнения такого вида схожи с описывающими фазовые переходы первого и второго рода, которые, в свою очередь, определяются критериями переноса [31, 32].

Фазовые переходы. В соответствии с синергетической концепцией фазовые переходы происходят в результате самоорганизации [30], процесс которой описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (P), сопряженному (C) ему полю и управляющему (U) параметру [33].

Единственная степень свободы – параметр порядка – описывает только квазистатические фазовые переходы. В системах, значительно удаленных от состояния равновесия, каждая из указанных степеней свободы приобретает самостоятельное значение, а процесс самоорганизации складывается в результате конкуренции положительной обратной связи параметра порядка с управляющим параметром и отрицательной обратной связи с сопряженным полем. Поэтому, кроме релаксации к равновесному состоянию в течение времени τ^p , при участии двух степеней свободы могут реализовываться как режим запоминания, так и автоколебания, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние. В результате состояние технологической и эксплуатационной систем характеризуется несколькими режимами [20, 21, 33]:

1) релаксационным – при времени релаксации параметра порядка, намного превосходящим времена релаксации остальных степеней свободы ($\tau_p^p > \tau_U^p$ и $\tau_p^p \gg \tau_C^p$);

2) с запоминанием – при переходе из неупорядоченного состояния в «замороженный» беспорядок, реализуемым в случае, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ($\tau_p^p \ll \tau_U^p$ и $\tau_p^p \ll \tau_C^p$);

3) автоколебательным – при соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ($\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_{\psi}^p$ или $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_{\xi}^p$);

4) стохастическим – возможным при соизмеримости характерных времен всех трех степеней свободы ($\tau_{\psi}^p \gtrsim \tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_{\xi}^p$).

Таким образом, при моделировании технологического и эксплуатационного наследования возможно понижение размерности задачи описания передачи показателей качества до трех степеней свободы среды в процессах обработки и изнашивания изделия. Моделирование процессов передачи на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического и эксплуатационного процессов через использование обратных связей [3, 16].

2.3 Критерии физико-химических процессов

При обосновании выбора ТР и синтезе интенсивных методов обработки необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [18, 31, 34]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества интенсивной обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [35], то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [36].

Взаимосвязанные процессы движения и обмена материальными и информационными потоками в технологической системе описываются энтропией [22, 23]:

$$\varepsilon = -K \int_0^{\infty} p \ln p dp,$$

где K – постоянный коэффициент; p – плотность распределения вероятных состояний системы.

Уравнение баланса локальной плотности энтропии $\rho\varepsilon$ по времени τ :

$$\vec{\alpha}(\rho\varepsilon) / \partial\tau + \nabla(\rho\varepsilon\vec{v}) + \nabla\cdot\vec{F}_\varepsilon = \sigma,$$

в котором \vec{F}_ε – плотность потока энтропии; \vec{v} – скорость потока; $\sigma = d\varepsilon/d\tau$ – производство энтропии:

$$\sigma = \vec{F}_q \cdot [\nabla(1/T)] - \sum_{i=1}^k \vec{F}_{di} \cdot [\nabla(W_i/T) - (1/T)\vec{F}_{mi}] - (1/T)\dot{P}_R - \\ \nabla\vec{v} + (1/T) \sum_{i=1}^k W_i \sum_{r=1}^{R_0} \nu_{ir} \omega_r,$$

где \vec{F}_q – плотность теплового потока; T – абсолютная температура; k – число компонентов; \vec{F}_{di} – плотность диффузионного потока i -го компонента; W_i – химический потенциал i -го компонента; \vec{F}_{mi} – сила масс, действующая на i -тый компонент; \dot{P}_R – диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы; R_0 – число протекающих реакций; ν_{ir} – стехиометрический коэффициент i -го компонента r -той реакции; ω_r – скорость r -той реакции.

Производство энтропии в соответствии с фундаментальной теоремой Пригожина – Глендсдорфа, определяющей условия перехода к эволюции, стационарному и устойчивому состоянию, дает возможность рассматривать режимы изменений состояний технологической системы по критериям, описывающим фазовые переходы.

2.4 Ионная имплантация с ионным осаждением покрытия

Комбинированная ионно-вакуумная модификация, или ионная имплантация с ионным осаждением покрытия – технология формирования параметров качества в процессе как ионной обработки, так и последующей эксплуатации поверхности.

В результате высокоэнергетической обработки в модифицированном переходном поверхностном слое может быть получена достаточно высокая концентрация вводимых атомов [21, 27]. Однако поскольку бомбардирующие ионы претерпевают многочисленные упругие соударения с атомами кристаллической решетки, в имплантированном слое образуется большое количество радиационных дефектов, как правило, на 2-3 порядка превосходящее число имплантированных атомов. Эти два процесса оказывают существенное влияние на физико-механические и физико-химические свойства по-

верхности, приводя в некоторых случаях к структурным и фазовым превращениям. Сформированный указанным методом слой композиционного материала обеспечивает эксплуатацию, при которой система трения самоорганизуется в направлении низкой интенсивности участка нормального износа [27]. Начальные условия формирования и реорганизации модифицированных слоев определяются химическим, фазовым и структурным составом основы, видом и энергией ионов и атомов, участвующих в процессах имплантации и осаждения покрытия, а также энергией взаимодействия поверхностей при трении. Граничные условия зависят от конструкции модифицированных слоев и относительных движений поверхностей в процессе эксплуатации.

Результаты, полученные при исследовании ионной имплантации и ионного осаждения покрытий, позволяют сделать следующие выводы:

1. Изменение начальных и граничных условий как в процессах формирования, модификации, так и при эксплуатации поверхности можно осуществлять потоками энергии различной природы или одним источником с изменяющейся интенсивностью, а также используя энергию процессов приработки, износа и разрушения.

2. Последовательность воздействий для формирования граничных условий и размещения по глубине от поверхности технологических барьеров целесообразно составить в порядке, обратном работе поверхностных слоев: сперва вносить тот поток энергии, который действует при эксплуатации в последнюю очередь и имеет минимальные отклонения от начальных условий установившегося режима работы детали.

3. Наследуемые структуры рационально формировать как на операциях обработки, так и на стадиях эксплуатации, причем целесообразно связать эти процессы таким образом, чтобы созданные при обработке структуры восстанавливались или перестраивались в зависимости от условий эксплуатации поверхностных слоев детали.

2.5 Анализ процессов изнашивания поверхностей

1. При эксплуатации деталей участвуют два контртела и окружающая среда $K = 3$. Процессы носят термомеханический характер $H = 2$. В ходе приработки на поверхностях контртел образуются легированные кислородом аморфно-кристаллические сплавы и количество фаз возрастает до $P = 5$, что лишает систему степеней свободы $C^* = 0$ и делает это состояние неустойчивым (табл. 2.1, п. 1).

2. На стадии установившегося износа в процессе трения образуется единый для контртел легированный кислородом сплав, количество фаз сокращается до $\Phi = 4$ и появляется степень свободы $C = 1$, обеспечивающая поступательное взаимоперемещение сопрягаемых тел (табл. 2.1, п. II).

3. При разрушении поверхности образуется еще одна степень свободы $C = 2$ вследствие вращения выкальвываемых частиц, а число фаз $\Phi = 3$ становится равным числу компонентов (табл. 2.1, п. III).

Таблица 2.1. Числа компонентов K вещества, потоков Π энергии, фаз Φ и степеней свободы C на различных стадиях технологических операций и эксплуатации детали

Стадии Технологических операций	Зоны энергетического взаимодействия		
	I. Объемная	II. Множество локальных	III. Единственная сфокусированная
	$K+\Pi=\Phi+C$	$K+\Pi=\Phi+C$	$K+\Pi=\Phi+C$
а)	$1+3=3+1$	$2+2=2+2$	$2+2=3+1$
б)	$1+3=4+0$	$2+2=4+0$	$2+2=4+0$
в)	$1+3=2+2$	$2+2=3+1$	$2+2=2+2$
	$3+2=3+2$	$3+2=4+1$	$3+2=5+0$
Эксплуатации	$K+\Pi=\Phi+C$	$K+\Pi=\Phi+C$	$K+\Pi=\Phi+C$
	III". Разрушение	II". Трение	I". Приработка

Проведенные исследования формирующихся в открытых технологически - эксплуатационных системах с дополнительными степенями свободы диссипативных структур и фаз свидетельствуют о необходимости при проектировании комбинированных методов учитывать следующее:

1. В технологических системах наследуемость складывается от источников вещества и энергии через процессы формирования фаз поверхностного слоя: $\Phi = K + \Pi - C$.

2. Структурная устойчивость процессов комбинированной обработки определяет фазы формируемого поверхностного слоя и зависит от используемых источников вещества и энергии: $C + \Phi = K + \Pi$.

3. Дополнительные степени свободы технологической системы посредством источников вещества и энергии позволяют управлять структурной устойчивостью процессов формирования фаз поверхностного слоя: $C = K + \Pi - \Phi$.

4. На стадиях эксплуатации фазы поверхностного слоя накладывают ограничения на степени свободы системы и определяют последовательность воздействий на технологических операциях, а также возможность их совмещения и разъединения: $\Phi + C = K + P$.

При анализе процессов изнашивания деталей машины и их сопряжений целесообразно рассматривать вектор [17]:

$$\varphi(X, t) = [\xi_{u_1}(X, t), \dots, \xi_{u_n}(X, t), \dots, \xi_{u_m}(X, t)],$$

где $\xi_{u_i}(X, t)$ – скорость изнашивания i -той детали (сопряжения) в момент времени t при нагрузочном воздействии X на узел машины.

Тогда принимается, что процесс изнашивания обладает последствием, если модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят не только от модуля и направления вектора X в данный момент времени, но и от модуля и направления вектора X в моменты времени $t < t$, а также от величины износа U трущихся поверхностей за отрезок времени $[0, t]$ (здесь U – n -мерный вектор: $U = (u_1, \dots, u_n, \dots, u_m)$; у которого u_i – величина износа i -той детали) [17, 18]:

$$u_i(t) = \int_0^t \xi_{u_i}(\tau) d\tau.$$

Для процесса изнашивания без последствия характерно то, что модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят от модуля и направления вектора X только в данный момент.

В зависимости от времени τ_p , в течение которого сохраняются изменения процесса утраты работоспособности, связанные с предысторией эксплуатации изделия, различают два вида последствия: первого и второго рода [2, 30]. Последствие первого рода характеризуется тем, что изменения в процессе утраты работоспособности изделия, обусловленные предысторией нагрузочного воздействия X , сохраняются в течение всего срока службы изделия τ_n , т.е. $\tau_p \geq \tau_n$. Если $\tau_p < \tau_n$, то имеет место процесс с «затухающей памятью» – последствие второго рода.

Зависимости интенсивности изнашивания узлов трения машин от продолжительности работы t (рис. 2.1) отличаются друг от друга видом связей между управляющим параметром – нагрузочным воздействием X и сопряженным с ним изнашиванием интенсивностью J ,

Рассматриваемые процессы утраты работоспособности с последствием первого рода относятся к процессам с сильной корреляцией, у которых существует определенная связь между величинами параметра порядка $H_i(\Delta t)$ и $H_{i+1}(\Delta t)$ даже при сравнительно больших $\tau = t_{i+1} - t_i$. Здесь $H_i(\Delta t) = H(t_i + \Delta t) - H(t_i)$; $H_{i+1}(\Delta t) = H(t_{i+1} + \Delta t) - H(t_{i+1})$, $t_i < t_{i+1}$.

Вследствие этого процессы утраты работоспособности, вызванные первой и второй группами причин, характеризуются автоколебательным ($\tau_{\text{н}}^{\text{н}} \approx \tau_{\text{в}}^{\text{н}}$ или $\tau_{\text{н}}^{\text{н}} \approx \tau_{\text{в}}^{\text{н}}$) и стохастическим ($\tau_{\text{н}}^{\text{н}} \approx \tau_{\text{н}}^{\text{н}} \approx \tau_{\text{в}}^{\text{н}}$) режимами с двумя и тремя степенями свободы технической системы.

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения с последствием второго рода. Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [17]. В переходный период $[t_0, t_1]$ интенсивность изнашивания J отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия X_{i-1} , и от значения, соответствующего новому уровню X_i :

$$J(t) = \begin{cases} f_H(X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-n}, t), & t_0 \leq t \leq t_1; \\ f_H(X_i, t), & t > t_1. \end{cases}$$

Возникновение переходных периодов объясняется несколькими причинами [17, 18]: эксплуатационной наследственностью материалов, деформируемых в процессе трения поверхностных слоев деталей; изменением эюры удельных давлений в зоне контакта деталей при переходе с одного уровня нагрузочного воздействия на другой и связанной с этим «вторичной приработкой» трущихся поверхностей; постепенным восстановлением соответствия между величиной нагрузочного воздействия и распределением смазки и продуктов износа на трущихся поверхностях.

Исходя из представлений о природе явлений последствия второго рода можно заключить, что с позиции вероятностного анализа процессы изнашивания в переходные периоды $[t_0, t_1]$ характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа $U_i(\Delta t)$ и $U_{i+1}(\Delta t)$ [2, 3]. В этой связи их следует рассматривать как релаксационные ($\tau_{\text{н}}^{\text{н}} > \tau_{\text{в}}^{\text{н}}$ и $\tau_{\text{н}}^{\text{н}} \approx \tau_{\text{н}}^{\text{н}}$) с характерным периодом $[t_0, t_1]$. Таким образом, понижение размерности задачи описания передачи свойств изделий в технологических и эксплуатационных процессах производится путем выделения параметров порядка и оп-

ределения режимов состояния системы. После этого на каждом из режимов целесообразно рассмотреть взаимосвязи основных показателей качества изделия с определяющим параметром порядка и условия их устойчивого формирования.

Показатели качества поверхностей изделий. Показатели качества изделий машиностроения, являющиеся основными, делятся на две категории [16, 18]: к первой относятся те, которые характеризуются наследственными явлениями, связанными со свойствами материалов изделий; ко второй – связанные с геометрическими параметрами их поверхностей.

Показатели обеих категорий в многосвязных технологических и эксплуатационных средах взаимно влияют друг на друга. Геометрические параметры изделий, такие как их конфигурации и размеры, могут оказывать влияние на напряжения, распределяемые в материале основы и поверхностных слоях. И, наоборот, напряжения, формируемые в ходе технологических операций и стадий эксплуатации, могут с течением времени привести к изменениям геометрических параметров высокоточных деталей. Это свидетельствует о взаимной связи и обусловленности явлений, сопровождающих технологические и эксплуатационные процессы.

Наиболее полно наследование основных показателей качества раскрывается при рассмотрении последовательности процессов с синергетических позиций совместного действия технологических факторов при взаимном влиянии показателей [3, 16].

Начальные показатели качества деталей машины на различных масштабных уровнях (рис. 2.1) в процессе эксплуатации изменяются [2, 3]. Исключение составляют остаточные напряжения и структура основного материала, которые могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей. В большинстве случаев уже в период приработки существенно меняется шероховатость и структура поверхностного рельефа, волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании, а геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допускаемых значений, принятых при изготовлении, практически до конца службы узла трения, если оценка его работоспособности производится по параметрам точности.

системах, к односвязным, игнорируя взаимное влияние технологических факторов [3].

Рост требований к качеству изготовления элементов машин делает методы определения и прогнозирования качества, основанные на принципе суперпозиции, малопригодными, так как эффект взаимного влияния факторов соизмерим с результатами их прямого воздействия. Процесс изменения свойств изделий должен рассматриваться как совокупность взаимодействующих процессов, собственно изменения и сохранения свойств [3, 6].

Множественность свойств изделий, каждое из которых может характеризоваться соответствующим множеством показателей качества, является также проявлением многосвязности технологических факторов при формировании качества изделия. Свойства изделия формируются при его изготовлении взаимосвязанно. Однако в производственной практике машиностроения этот факт учитывается недостаточно. Изолированное рассмотрение процесса формирования локального множества выделенных показателей качества может привести к серьезным ошибкам при проектировании и реализации технологических процессов [33, 34].

Концептуальный подход. Технические трудности, связанные с описанием многосвязных взаимодействий, при формировании множества показателей качества предмета производства при изготовлении изделия, могут быть преодолены на основе применения современных информационных технологий и методологии принятия технологических решений [21].

Математический аппарат методологии базируется на следующих основных положениях:

- качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории и множество показателей качества детали является результатом предыстории;
- любое технологическое и связанное с ним воздействие на заготовку изменяет все показатели качества заготовки;
- любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества заготовки.

Значение характеристик технологических сред и закономерностей их изменения позволило сформировать основную задачу направленного формирования показателей качества изделия: при известных начальных и конечных свойствах предмета производства определить наиболее оптимальную с точки зрения трансформации свойств технологическую среду.

В результате предложен общий методический подход к обеспечению направленного формирования оптимальных свойств изделий (рис. 2.2).

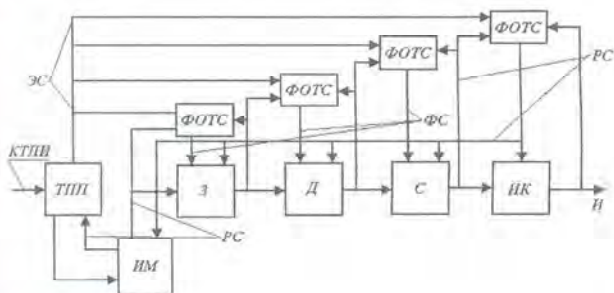


Рисунок 2.2 Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий: И – изделие; ЗС, РС, ФС – соответственно заданные, реальные, формируемые свойства изделия; ТПП – технологическая подготовка производства; ИМ – изготовление исходных материалов; З – изготовление заготовок; Д – изготовление деталей; С – сборка; ИК – испытание и контроль; КТПП – конструктивно-технологические параметры изделия; ФОТС – формирование оптимальных технологических сред

Важнейшей особенностью подхода является формирование для каждого технологического передела сквозного процесса изготовления изделия оптимальной технологической среды, обеспечивающей наиболее рациональное распределение значений показателей качества по переделам и придающей процессу формирования качества изделия необходимую направленность. Изменяя среду или ее характеристики, можно управлять формируемыми свойствами изделий.

Модель многосвязных взаимодействий. На основе сравнения характеристик сред базового технологического процесса и желаемых могут быть определены необходимые корректирующие воздействия по изменению состава, структуры и условий взаимодействия как элементов технологических сред, так и последних с предметом производства.

На базе концептуального подхода предложено определять следующие коэффициенты:

-коэффициент оперативного изменения i -го показателя качества при использовании j -того технологического метода – $(m_i)_j$;

-изменения i -го показателя качества изделия, связанного с условиями реализации j -того технологического метода – $(u_i)_j$;

-изменения i -того показателя качества при взаимодействии со средой уровня операции, реализующей j -тый технологический метод – $(S_i)_j$.

Оперативно формирующая составляющая $(K_i)_j^{\text{оп}}$ значения показателя K_i :

$$(K_i)_j^{\text{оп}} = (m_i)_j (K_i)_{j-1} + (u_i)_j (K_i)_{j-1},$$

где $(K_i)_j$ – множество значений показателей качества изделия после выполнения операции его изготовления с учетом закономерностей технологической наследственности; $(K_i)_{j-1}$ – множество значений показателей качества, характеризующих состояние изделия после выполнения предыдущей операции.

Если метод не реализован $(m_i)_j = 1$, $(u_i)_j = 0$, иначе $0 < (m_i)_j \leq 1$. Изменение знака и значения показателя качества происходит в результате совокупного изменения коэффициентов $(m_i)_j$ и $(u_i)_j$. Для каждого технологического метода найдены штатные условия реализации, определяющие значения $(m_i)_j$. Коэффициент $(m_i)_j$ учитывает штатные условия реализации метода (в частности, штатные экономические условия обработки), а $(u_i)_j$ – отличающиеся от штатных, а также иные условия, дополнительно характеризующие среду (базирование и закрепление заготовки, упругие характеристики элементов технологической системы и т.д.).

Аналитическое определение коэффициентов $(m_i)_j$, $(u_i)_j$, $(S_i)_j$ невозможно, поэтому они определяются статистической обработкой экспериментального материала.

Для конкретного метода слагаемое $(u_i)_j (K_i)_{j-1}$ выделяется в систематическую составляющую C :

$$[(K_i)^{\text{оп}}]_r = (m_i)_j [(K_i)^{\text{оп}}]_{j-1} + C,$$

где r – индекс реализации метода.

При определении значений $(m)_j$ используются методики максимального пересечения множества входных и выходных значений показателей качества, а также усреднения границ диапазонов (рис. 2.3).

При известных $(m)_j$ значения $(u)_j$ определяются в соответствии с

$$[(u)_j]_i = [(k)_j]_i^{max} / [(k)_j]_i^{min} - (m)_j,$$

При известных $(m)_j, (u)_j$

$$\therefore (s)_j = \frac{(k)_j^{max}}{(k)_j^{min}}$$

используются таблицы усредненных значений коэффициентов операционного изменения свойств $(m)_j$ для основных технологических методов обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, а также плоскостей.

Установлено, что оптимальная погрешность определения коэффициентов операционного изменения параметров обработки в среднем в 3 раза выше, чем для лезвийной, что свидетельствует о большей чувствительности соответствующих технологических сред к изменению условий реализации и состояния образующих их объектов.

Среднее значение относительной погрешности определения величины m_{ij} коэффициента операционного изменения точности размеров для группы методов точения и шлифования деталей из конструкционных углеродистых сталей составило 2,5 %, а шероховатости $m_{ho} - 11,0$ %. Зависимости характеристик технологических сред уровня операции от состояния образующих их объектов адекватно представляются с помощью линейных регрессионных моделей или кусочно-линейно аппроксимируются при относительной погрешности, не превышающей 10 %.

Установлено, что сохранение и взаимное влияние свойств особенно проявляются при плосковершинной алмазно-абразивной обработке, полировании и суперфинише, когда снимаемый припуск находится в пределах исходной высоты неровностей шероховатости. Многосвязность технологических сред, различие физических процессов, сопровождающих взаимодействие сред с предметом труда, является основной причиной отсутствия единого методического подхода к определению элементов матрицы $[k_{ij}]$.

Коэффициенты сохранения и взаимного влияния формируемых свойств k_{ij} определяются при реализации сквозного технологического процесса изготовления изделия при непрерывном исследовании состояния качества предмета производства.

Первичное значение k_{ij} для начальной фазы процесса:

$$k_{ij} \approx \frac{(K_i)_1 - S_{ij}(K_i)_0}{(K_i)_0},$$

где $(K_i)_{0,1}$ – значение показателя K_i до и после выполнения операции; $(K_i)_0$ – значение показателя K_i до начала выполнения операции; S_{ij} – коэффициент изменения показателя качества при взаимодействии предмета производства с технологической средой уровня операции.

В отличие от m_i , u_i , коэффициенты k_{ij} имеют физическую размерность.

Предложенный аппарат описания трансформации показателей качества с учетом их взаимодействия и взаимного влияния в многосвязных технологических средах адекватен реальным процессам формирования свойств изделий машиностроения и может быть использован для прогнозирования технологических решений. Применение предложенного подхода позволяет в 2...5 раз уменьшить относительную погрешность предварительного определения значения показателя качества по сравнению со значением, полученным на основе известных закономерностей технологии машиностроения [3, 35].

Расчетно-аналитический метод. Рассмотрение взаимного влияния технологических факторов при взаимодействии технологических сред с предметом производства позволяет внести соответствующие уточнения в расчетно-аналитический метод определения суммарной погрешности механической обработки. Возникающие при обработке заготовки погрешности взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга и суммарную погрешность обработки. Составляющие погрешности формируются как в результате взаимодействия заготовки с технологической средой уровня операции, так и с технологической средой уровня процесса.

В результате разработан математический аппарат определения значений составляющих и суммарной погрешности обработки. Для первых справедливо

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} 1 & a_{\Delta Y, \varepsilon} & a_{\Delta Y, \Delta H} & a_{\Delta Y, \Delta u} & a_{\Delta Y, \Delta T} \\ a_{\varepsilon, \Delta Y} & 1 & a_{\varepsilon, \Delta H} & a_{\varepsilon, \Delta u} & a_{\varepsilon, \Delta T} \\ a_{\Delta H, \Delta Y} & a_{\Delta H, \varepsilon} & 1 & a_{\Delta H, \Delta u} & a_{\Delta H, \Delta T} \\ a_{\Delta u, \Delta Y} & a_{\Delta u, \varepsilon} & a_{\Delta u, \Delta H} & 1 & a_{\Delta u, \Delta T} \\ a_{\Delta T, \Delta Y} & a_{\Delta T, \varepsilon} & a_{\Delta T, \Delta H} & a_{\Delta T, \Delta u} & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_{0j}$$

где $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)_j^T$ – вектор-столбец значений составляющих погрешностей (погрешность, вызываемая упругими деформациями; погрешность установки; погрешность настройки; погрешность, вызываемая размерным износом; погрешность, вызываемая тепловыми деформациями), определяемых с учетом взаимного влияния; a – коэффициенты трансформации погрешностей, учитывающие взаимное влияние погрешностей; $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)_j^T$ – вектор-столбец детерминированных значений, составляющих погрешностей, определенных на основе традиционного расчетно-аналитического метода.

Квадрат итогового значения суммарной погрешности Δ определяется в форме

$$\Delta^2 = [\lambda_i P_i]^T [P_i],$$

где λ_i – коэффициенты, определяющие форму кривой распределения составляющей погрешности P_i ; T – символ транспонирования.

Учет многосвязности технологических сред при определении суммарной погрешности обработки позволяет более чем в 2 раза повысить точность существующего метода расчета. Разработанный аппарат описания трансформации свойств изделий позволяет желаемым образом распределять уровни свойств изделия по этапам технологического процесса его изготовления. Для любой части сквозного технологического процесса изготовления изделия и для любого из свойств последнего на основании разработанной методики может быть определен и при необходимости оптимизирован желательный уровень значений соответствующих показателей качества. Так, например, по завершении заготовительного периода достигнутые значения квазистабильных K_c^3 и изменяющихся K_v^3 показателей качества определяются следующим образом:

$$\begin{cases} K_c^3 = S_c^3 \cdot K^M + k_c^{3,M} K^M; \\ K_v^3 = S_v^3 \cdot K^M + k_v^{3,M} K^M, \end{cases}$$

где S_c^3, S_v^3 – коэффициенты изменения свойств предмета производства в результате его взаимодействия с технологической средой уровня заготовительного периода; K^M – значения показателей качества исходного материала; $k_v^{(i)}, k_c^{(i)}$ – коэффициенты сохранения и взаимного влияния свойств исходного материала, проявляющиеся на заготовительном этапе сквозного процесса изготовления изделия.

Аналогичные соотношения могут быть определены для периодов изготовления деталей и сборки изделия. Эти соотношения можно рассматривать как макромодель формирования свойств изделия в сквозном технологическом процессе его изготовления. Практически для любого N этапа группы операций могут быть получены соотношения вида:

$$K_N = H_N \cdot K^M,$$

где K_N – значение сформированного после этапа N показателя качества; H_N – коэффициент трансформации свойств изделия по отношению к исходным (K^M).

Введением множества критериев оптимизации можно перейти к решению задач оптимизации значений показателей качества для каждого этапа (операций) технологического процесса. Так как не все показатели качества равнозначны с позиции технологического обеспечения их значений, целесообразно определять желаемые уровни не для всех, а лишь для трудно обеспечиваемых показателей качества, считая при этом «по умолчанию», что другие показатели будут обеспечены. Использование «паспорта» предмета производства, включающего, например, для детали данные о наиболее труднодостижимых значениях показателей качества и общем числе ее поверхностей, позволяет корректно понизить размерность решаемых технологических задач. Распределение уровней свойств в сочетании с определением количественных характеристик возможной трансформации свойств позволяет принципиально изменить существующие подходы к построению технологических процессов [18].

Для успешного выполнения заданного множества функций технологическая среда должна быть обеспечена необходимыми резервами. Резерв технологической среды образуют множества ее характеристик и значений последних, не используемые при выполнении средой заданных функций и условий их реализации. Оценка среды по каждому из ее параметров может проводиться на основании предложенных количественных характеристик. Среда любого уровня должна обязательно обладать резервом по параметрам (воз-

возможностям), величина которого должна оптимально соответствовать множеству выполняемых функций и диапазону возможных изменений условий их реализации. Выбор технологических сред и любого из технологических объектов, обладающих рациональными резервами, может эффективно осуществляться на базе предложенного аппарата оценки качества соответствующих технологических решений. Формирование резерва среды может выполняться по каждому из отдельно взятых ее параметров и должно учитывать как стохастический характер последних, так и их взаимодействие.

С учетом влияния всего цикла изготовления детали на ее эксплуатационные свойства разработан алгоритм, в соответствии с которым по требуемым эксплуатационным свойствам рекомендуются значения параметров состояния поверхностного слоя готовой детали и формируется технологический процесс ее изготовления, обеспечивающий указанные параметры, назначаются режимы резания, характеристики инструмента и оборудования, марка СОТС (смазочно-охлаждающая технологическая среда), обеспечивающие необходимые параметры состояния поверхностного слоя заготовки и полуфабриката на каждом этапе обработки (рис. 2.3).

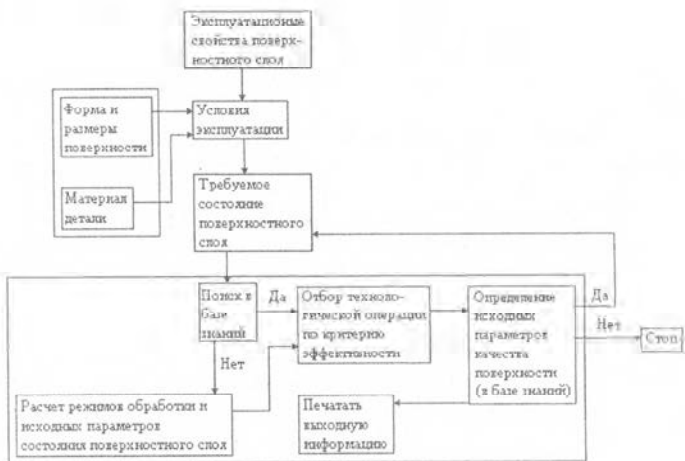


Рисунок 2.3 Технологический алгоритм

-исходя из эксплуатационных свойств и условий эксплуатации элементарных поверхностей детали устанавливаются требования к состоянию поверхности детали;

-на основании математических моделей или в базе данных по требуемому состоянию поверхностного слоя определяются режимы обработки, инструмент, оборудование, СОТС, необходимые для реализации окончательной обработки заданной детали;

-по параметрам состояния поверхностного слоя определяются режимы обработки, инструмент, оборудование, СОТС, необходимые для реализации предыдущей операции (перехода) обработки.

Проектирование технологических процессов изготовления изделий с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества малоэффективно вне его автоматизации на базе современной вычислительной техники. Проектирование единичных маршрутных технологических процессов (МТП) изготовления деталей желательно осуществлять в режиме автоматизированного синтеза при минимальном диалоге пользователя с системой. Стратегия разрешения проблемы автоматизированного синтеза МТП с учетом закономерностей изменения, сохранения и взаимного влияния формируемых показателей качества, предусматривает:

-выполнение синтеза МТП в автоматизированном режиме на основе общих технологических принципов и получение основных характеристик маршрута;

-прогнозирование изменения показателей качества с учетом закономерностей трансформации свойств на основе структуры сформированного МТП;

-выполнение необходимой корректировки МТП в случае, если желательный уровень значений показателей качества не достигнут.

Автоматизированная генерация технологических сред заданного уровня относительно выделенного объекта принципиально возможна на основе их функциональных моделей, созданных с применением CALS-технологий. Функциональные модели многосвязных технологических сред позволяют в зависимости от постановки решаемой задачи осуществлять редукцию ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных при сохранении корректности и адекватности [3].

Снижение чувствительности технологических и эксплуатационных сред к изменению условий реализации режимов производства и применения изделий позволяет с наименьшими затратами осуще-

ствлять направленное формирование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения.

2.7 Управление процессами интенсивной обработки

Управление основными технологическими и эксплуатационными факторами с использованием статистических методов контроля позволяет обеспечить показатели качества изделий в пределах рекомендуемых значений. В этой связи на предприятии прежде всего требуется определить процессы производства и обслуживания, результаты которых не могут быть проверены с помощью последующего мониторинга и измерений. К ним относятся процессы, недостатки которых становятся очевидными только после начала использования продукции или после предоставления услуги. Поэтому на предприятии необходимо определить перечень специальных процессов, установить методы их оценки, с точки зрения достижения планируемых результатов путем определения критериев, требований к оборудованию и персоналу, методики подтверждения качества и управления специальными процессами, используя специализированные методы измерения и контроля, формы и порядок регистрации параметров качества.

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Вакуумно-плазменное нанесение покрытий с учетом физических процессов можно условно разделить на следующие стадии: 1) испарение вакуумной дугой; 2) формирование паро-плазменных потоков и транспортировка их к поверхности детали; 3) осаждение с ионной бомбардировкой поверхности детали.

Испарение тугоплавких металлов вакуумной дугой. При возбуждении электродугового разряда между охлаждаемыми водой катодом и анодом в вакууме на поверхности катода возникает катодное пятно, являющееся основным, а при вакууме $\sim 10^{-3}$ Па единственным источником плазмы твердых веществ, обеспечивающим перенос тока в межэлектродном пространстве [38].

Перемещение катодных пятен носит хаотический характер вследствие [39] пространственного сдвига теплового потока по отношению к центру температуры и эмиссии (пятна), вызванного различными значениями катодного падения в передней и задней частях пятна по отношению к направлению движения вследствие наклона "опорной" поверхности катодного пятна в сторону, обратную направлению движения.

В катодной области выделяются следующие зоны. Зона, наиболее близкая к катоду, представляет собой тонкий слой пространственного заряда, где реализуется катодное падение, ускоряются эмитированные катодом в плазму электроны, ускоряются ионы, возвращающиеся из плазмы в виде суживающегося низковольтного пучка на катод. В зоне генерации за счет термической или ударной ионизации генерируются ионы. В зоне, наиболее удаленной от катода, происходит переход от сильно сжатого к расширяющемуся токопроводящему каналу.

Минимальный ток, проходящий через катодное пятно, при котором возможно горение дуги, связан с теплофизическими константами материала катода соотношением [40]:

$$I_K = 2,5 \cdot 10^4 \cdot T_K \cdot \sqrt{\lambda_T},$$

где T_K - температура кипения; λ_T - коэффициент теплопроводности.

Средний статистический ток (I_n), приходящийся на одно катодное пятно, связан с критический соотношением $I_n = 2 \cdot I_K$ [40].

длинным, медленно перемещаемся пятне, ток в 2-4 раза больше, чем в быстро перемещающемся.

В тангенциальном по отношению к поверхности катода магнитном поле катодное пятно начинает двигаться в направлении, противоположном действию силы Ампера [39]. С увеличением напряженности поля H скорость движения пятна увеличивается за счет спрямления траектории, при $H \sim 10^4 \text{ Э}$ направленная скорость практически равна хаотической, а при $H \sim 10^5 - 2 \cdot 10^5 \text{ Э}$ она скачкообразно увеличивается.

С увеличением давления газов в разрядном промежутке трансформируется структура и характер движения катодного пятна, расщепляясь на большое количество мелких пятен, линейно возрастает скорость хаотического движения, уменьшается скорость эрозии катода. В случае образования на поверхности катода в присутствии реакционной газовой среды устойчивых к воздействию дуги тугоплавких химических соединений эффект увеличения скорости хаотического перемещения пятен и снижения скорости эрозии проявляется сильнее и при меньших давлениях, чем в присутствии нейтральных газов. Снижение скорости с увеличением давления газов эрозии связывают [38,40] с уменьшением доли нейтральной фазы (в виде капель и атомов нейтрального пара).

Повышение интегральной температуры катода в диапазоне 390 - 770 °К приводит к резкому снижению как хаотической, так и направленной скорости пятен, "привязке" их к определенным участкам катода, линейному возрастанию скорости эрозии вследствие резкого увеличения доли нейтрального компонента (капель, твердых частиц), снижению устойчивости горения дуги из-за сокращения центров (пятен) при отрыве макрочастиц.

Формирования паро-плазменных потоков частиц и транспортировка частиц тугоплавких материалов к напыляемой поверхности. Продукты эрозии, удаляясь от поверхности катода, образуют струю или плазменный поток, содержащий при испарении металлов с низкой упругостью паров в вакууме до 50-100 % ионов, из которых 50% двухзарядные, имеются ионы с большим зарядом, в то время как при испарении металлов с высокой упругостью паров преобладают нейтральные атомы, однозарядные ионы, а степень ионизации составляет около 25% [38, 40, 41]. Скорость катодных струй возрастает с увеличением упругости пара материала катода. Скорость ионов имеет порядок 10^4 м/с , в то время как скорость нейтралов примерно $10-10^2 \text{ м/с}$.

Средняя энергия ускоренных в катодных пятнах ионов находится в пределах 10-100 эВ/ион, возрастая при переходе к более тугоплавким металлам катода. В плазме реализуются ударная ионизация, ионизация с перезарядкой, обдирка, резонансная и нерезонансная перезарядка, вероятность которых возрастает с ростом тока дуги из-за увеличения плотности генерируемых частиц.

Наиболее вероятными процессами при столкновении паро-плазменного потока с молекулами остаточного или реактивного газа (азот, кислород, углеводород или смесь газов), являются реакции нерезонансной перезарядки:



где X - атом газа, вызывающий ионизацию газовой среды, Me^{Z+} - ион металла.

Явления резонансной перезарядки ионов, особенно с увеличением тока дугового разряда и плотности генерируемых частиц, приводят к уменьшению средней энергии ионов [38, 42].

Продукты эрозии катода в виде плазменного потока распространяются изотропно в пределах полусферы над поверхностью расходуемого катода, а паро-плазменный поток после прохождения анода распространяется в вакууме изотропно в виде конуса с вершиной в центре катода и образующими, проходящими через внешний торец анода, обращенный к камере.

Как уже отмечалось выше, плазменный поток, генерированный вакуумной дугой катодной формы, имеет сложную структуру. В головной части движутся наиболее высокоэнергетические ионы с высоким зарядом (выше степень ионизации), за ними - ионы с меньшей энергией, меньшим зарядом, скорости которых убывают от головной части к хвосту потока, так же, как и их энергия и степень ионизации. В самом конце потока находятся нейтральные атомы и макро-частицы, капли и твердые частицы, движущиеся со скоростями $10-10^2$ м/с [40].

При наложении на плазменный поток внешнего аксиального расходящегося магнитного поля (B) характер распространения, плотность плазменного потока, состав и энергия ионов изменяются. Повышается степень ионизации плазмы за счет дополнительной ионизации парового компонента. Взаимодействие тока Холла плазмы с аксиальным компонентом внешнего магнитного поля приводит к фокусировке плазменного потока, а за счет взаимодействия с ради-

околоосевая плотность, наблюдается коллимирование потока и увеличение энергии ионов на $E \sim B^4 / T^2$. Капельный компонент плазменного потока в магнитном поле $\sim 20-60$ Гс заряжается электронами до относительно высокого отрицательного потенциала и локализуется в периферийных областях плазменного потока [43], вследствие чего наблюдается эффект самосепарации, т.е. автоматическое отделение макрочастиц от ионной и паровой компонент потока.

Осаждение слоя покрытия из ионизированного потока частиц. При приближении ионной компоненты плазменного потока к поверхности детали или образца на расстояние порядка размера атома (иона), зажигается несамостоятельный высоковольтный разряд, напряжение в котором концентрируется в примыкающем к поверхности конденсации двойном электрическом слое, что обеспечивает ускорение иона до энергии:

$$W_i = e \cdot Z \cdot U_n,$$

где Z - заряд (степень ионизации) иона; U_n - отрицательный потенциал смещения, приложенный к подложке.

Характер взаимодействия плазменного потока с поверхностью твердого тела и протекание физико-химических процессов определяются в первую очередь энергией ионов, а также соотношением атомных масс ионов осаждаемого плазменного потока и атомов детали или образца, на которые осаждается покрытие теплофизических констант, дозы ионов, угла падения потока, заряда (степень ионизации) ионов [44].

Из рис. 3.1 следует: в диапазоне энергий $8 \times 10^{-3} < E_i < 10^2$ эВ реализуется термическая активация конденсата, в диапазоне $10^{-1} < E_i < 10^{-3}$ эВ наблюдается десорбция с поверхности атомов примесей, в диапазоне $50 < E_i < 5 \times 10^5$ эВ осуществляется создание активных центров, структурных дефектов в поверхностных слоях, в диапазоне $5 \times 10^2 < E_i < 10^5$ эВ реализуется распыление поверхности детали или конденсата, а при энергиях $5 \times 10^3 < E_i < 10^6$ эВ ионы проникают глубоко в кристаллическую решетку основного металла, в результате чего происходит внедрение [44].

Энергетические границы процессов (рис. 3.1) условны, особенно в случае неоднородного по фазовому составу, степени ионизации и энергии ионов плазменного потока, когда наблюдается два

ли более протонными одновременно на твердого тела и конкурирующих между собой физико-химических процесса. При ионной очистке, которая по технологии КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой) предшествует нанесению покрытия, к поверхности конденсации прикладывают отрицательный потенциал смещения более 1000 В, преобладает распыление поверхности и содержащихся на ней физических адсорбированных примесей, создаются активные центры, дефекты, ионы внедряются в поверхность с образованием легированного слоя. Интенсивность ионного распыления зависит от соотношения масс бомбардирующих ионов и распыляемых атомов, энергии ионов, угла падения потока на подложку, структуры и ориентации кристаллической решетки, а также топографии поверхности подложки [45]. Скорость распыления обратно пропорциональна энергии поверхностной связи, атом подложки может покинуть ее лишь в случае получения им в направлении подложки импульса энергии, величина которого больше энергии связи с кристаллической решеткой.

С увеличением плотности ионного тока интенсивность распыления растет до насыщения в результате увеличения количества дефектов и инородных атомов в поверхности, которые ослабляют связи в кристаллической решетке.

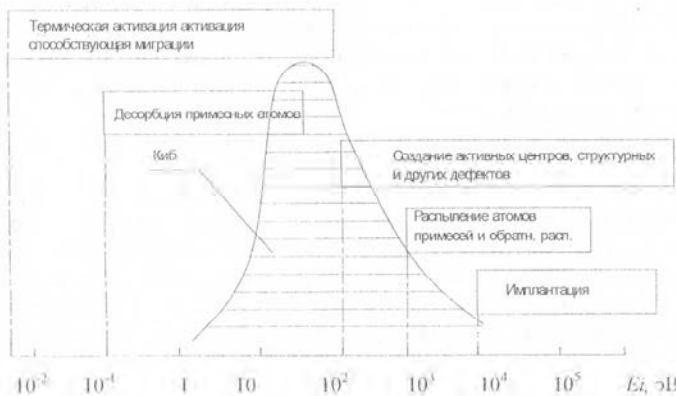


Рисунок 3.1 Физико-химические процессы при взаимодействии с ионами

Скорость распыления достигает максимального значения при углах падения ионов $60-70^\circ$. Основная часть ионов затрачивается на дефектообразование и создание активных центров, возбуждение упругих колебаний и переходит в тепло. Покрытие конденсируется при энергиях ионов $\sim 10-5 \times 10^2$ эВ с уменьшением потенциала смещения подложки до $\sim 10^3$ в условиях конкурирующего, но более слабого распыления конденсата ионами.

Параметры осаждения влияют на процесс образования пленки через коэффициент конденсации, плотность зародышей и подвижность адсорбируемых атомов. При большой подвижности адсорбируемых атомов и малой плотности зародышей происходит агломерация, пленка состоит из крупных зерен, которые содержат меньше дефектов, и становится сплошной при большей толщине.

Высокая плотность потока при осаждении, наличие электрических зарядов в молекулах пара и на подложке и структурных дефектов на поверхности подложки при конденсации в условиях ионной бомбардировки значительно повышают плотность зародышей. С другой стороны, срастание атомов и образование зародышей, рост пленки зависят от скорости поверхностной миграции адсорбированных атомов, которая возрастает с уменьшением энергии активации поверхностной диффузии, повышением температуры и кинетической энергии адсорбированных атомов, температуры и чистоты поверхности подложки. Ионная бомбардировка в процессе конденсации, с одной стороны, увеличивает плотность зародышей, благодаря чему уменьшаются размеры кристаллов и уменьшается толщина, при которой пленка становится сплошной, а с другой - увеличивает подвижность адсорбированных атомов, что способствует агломерации пленки [46].

3.1 Формирование структуры и свойства поверхностных слоев при ионной очистке и осаждении покрытия

При ионной очистке к изделию прикладывается отрицательный потенциал смещения $U_n = 700-2500$ В [47]. Энергия ионов, воздействующих на деталь, к которой приложен потенциал смещения U_n , при этом достигает $10-10^3$ эВ.

Результат взаимодействия ионов с поверхностью твердого тела определяется их энергией, поэтому при ионной очистке, в общем случае протекает одновременно ряд конкурирующих процессов: внедрение ионов, распыление материала подложки, конденсация парогазовой фазы [47, 48].

При бомбардировке поверхности ионами происходит разогрев подложки вследствие превращения кинетической энергии ионов при их торможении в потенциальную, выделении теплоты конденсации при кристаллизации расплавленных капельных частиц [49, 50]. С увеличением времени экспозиции ионной очистки интегральная температура подложки экспоненциально возрастает (рис. 3.2), достигая насыщения. Аналогичным образом увеличивается толщина насыщенного титаном слоя (рис. 3.3). В случае однозарядных ионов, которые составляют до 50 % ионной компоненты плазменного потока, сообщенная в двойном электрическом слое вблизи подложки под действием отрицательного потенциала, составит 800-2500 эВ. При таких значениях энергии возможно травление зерен подложки, выявление ее структурных особенностей, внедрение на некоторую глубину и создание насыщенного слоя [51].

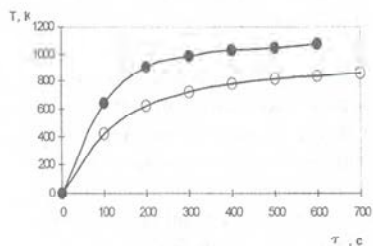


Рисунок 3.2 Зависимость интегральной температуры образца от времени ионной очистки: ● - ионами Mo, □ - ионами Ti

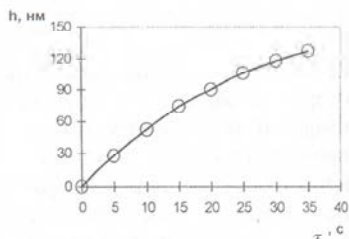


Рисунок 3.3 Зависимость толщины поверхностного слоя подложки, насыщенного титаном, от времени ионной очистки

На рис. 3.4-3.6 показана топография поверхности образцов после ионной очистки с различной экспозицией. Из рис. 3.4, 3.5 следует, что в первые моменты горения дуги наблюдается бомбардировка поверхности ионами, сопровождающаяся травлением, выявлением дефектов структуры подложки [51, 52].

С увеличением времени горения дуги поверхность катода прогревается достаточно равномерно, процессы «нагрев – теплоотвод» уравниваются и поддерживается постоянной интегральная температура мишени 100-300°C.



Рисунок 3.4 Топография поверхности образца после 3с ионной очистки, x800-1100 В, тип ионов – Ti



Рисунок 3.5 Топография поверхности образца после 10с ионной очистки, x800, -1100 В, тип ионов - Ti.



Рисунок 3.6 Топография поверхности подложки со следами бомбардировки частицами, x800

При этом генерирование твердых частиц прекращается и осуществляется бомбардировка поверхности только ионами и мелкокапельными частицами, которые, в зависимости от состояния частицы и температуры поверхности [51, 53], осаждаются на ней (рис. 3.7) либо упруго отражаются, оставляя на поверхности дефекты в виде лунок, кратеров (рис. 3.8).

Конденсированная на начальной стадии ионной очистки капля металла (рис. 3.7) имеет малую площадь контакта с подложкой. Краевой угол смачивания превышает 45° , что связано с низкой температурой подложки, высокой скоростью охлаждения и неэффективностью диффузионных процессов [53].

Осажденная капельная частица (рис. 3.7) при размере 0,05-10 мкм имеет мелкокристаллическую структуру (рис. 3.9), а зерна - неправильную угловатую форму, содержит большое количество дефектов, что связано с высокой скоростью охлаждения и кристаллизации, диффузией и взаимодействием с материалом основы (рис. 3.10) и частицами примесей, присутствующими на поверхности. При достижении интегральной температуры подложки (637-773 К) изменяется характер взаимодействия плазменного потока с поверхностью: наблюдается ярко светящийся ореол из вторичных ионов металлов и адсорбированных атомов, окружающих бомбардируемые поверхности подложки.



Рисунок 3.7 Капля катодного металла, на поверхности, SEM, $\times 2500$, ($\tau = 10$ с, $T < 373$ К)

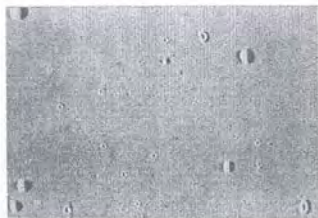


Рисунок 3.8 Фрагмент поверхности после ионной очистки, SEM, $1000\times$, $\tau \sim 60$ с



Рисунок 3.9 Микроструктура осажденной при ионной очистке частицы, TEM, $\times 60\ 000$

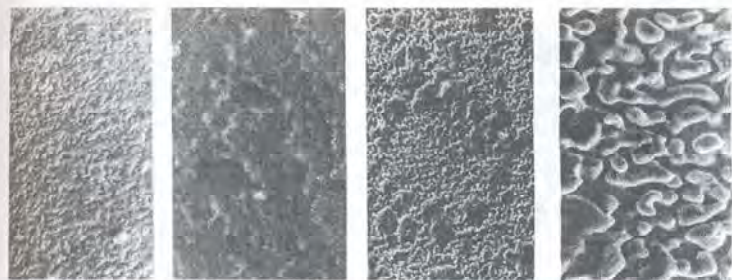


Рисунок 3.10 Структура поверхности, обработанной ионами Ti, $\times 1000$. Травление 5% HF

С увеличением времени ионной очистки и при росте температуры подложки свыше 573° К поверхность приобретает характерный микробугристый рельеф с многочисленными гребнями (рис. 3.11) с сильно размытыми очертаниями, расположенными хаотически либо ориентированными по отношению к осям плазменного потока. Благодаря интенсивному приходу энергии при бомбардировке ионами с энергией 1-3 кэВ, температура тончайшего поверхностного слоя под-

лизированных участках к температуре плавления, обнаружение значительной концентрации внедренных атомов титана в слое позволяет предполагать полиморфное превращение и образование новых фаз с β -структурой [54]. Формирование β -структуры связано с переходом к менее плотной упаковке, а следовательно, с увеличением объема.

Насыщение поверхностных областей и образование центров кристаллизации происходит вблизи дефектов поверхности, в том числе сформированных конденсированными частицами микрокапельной фазы. При увеличении времени ионной очистки возможно разрастание зоны насыщения вширь с образованием характерной структуры, напоминающей «лабиринтную» (рис. 3.11, г).



а) $\times 2000$

б) $\times 5000$

в) $\times 2000$

г) $\times 5000$

Рисунок 3.11 Топография поверхности подложки после ионной очистки. РЭМ, $\times 5000$: а, б - $\tau_{\text{оч}} = 150$ с, $T = 773^{\circ}\text{K}$; в, г - $\tau_{\text{оч}} = 300$ с, $T \geq 873^{\circ}\text{K}$



Рисунок 3.12 Формирование диффузионной зоны вокруг конденсированной в расплавленном состоянии капли. $\times 1250$,

($\tau_{\text{оч}} = 300$ с, $T_K > 873$ К)

1 - конденсированная капельная частица;

2 - зона диффузии;

3 - основа

Формирование такого рельефа на свободных от конденсированной капельной фазы участках можно связать также и с возникно-

лением в тонком поверхностном слое локальных очагов оплавления, последующим отталкиванием одноименно заряженных частиц. С дальнейшим увеличением времени ионной очистки ($\tau \geq 300$ с) и повышением температуры ($T_k > 873^{\circ}$ К) заметно изменяется топография поверхности подложки вследствие оплавления выступающих элементов конденсированных частиц с образованием обширных зон диффузии (рис. 3.12), в которых методами МРСА (рис. 3.13, 3.14, 3.15) регистрируется присутствие интерметаллидов Fe_2Ti , $FeTi$ и $FeTi_2$ [54,55].

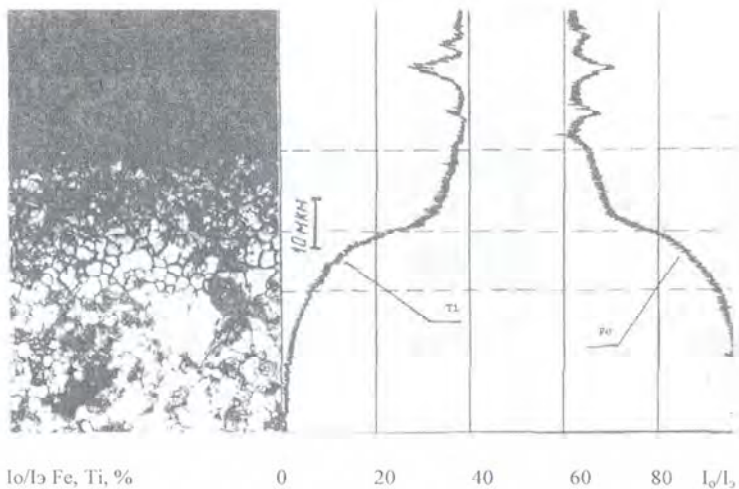


Рисунок 3.13 Микроструктура и концентрационные кривые распределения элементов на косом микрошлифе с углом 3° образца после ионной очистки. Слабое травление 5% HF

При слабом травлении на косом шлифе образца после ионной очистки выявляются аналогичные структурные зоны, однако диффузионная зона имеет характерное зернистое строение с четкими утолщенными границами (рис. 3.16, а). Размеры зерен уменьшаются с приближением к поверхности.



Рисунок 3.14 Топография поверхности покрытия, облученного из несепарированного потока, SEM, x2000



Рисунок 3.15 Распределение Ti (MPCА в характеристическом $Ti-k_{\alpha}$ - излучении (белые точки – металл Ti), x2000

Так, на косых микрошлифах образцов после ионной очистки отчетливо видны 3 зоны (рис. 3.16, б): темная подложка, светлая, в виде "языков", направленных к подложке, зона диффузии и темная, с многочисленными белыми хлопьевидными включениями зона насыщения [54, 55].

Рентгеновский микронзондовый анализ отмечает значительное повышение содержания титана на белых хлопьевидных включениях и "языках" по сравнению с темным фоном [54, 55]. При больших увеличениях (рис. 3.16, в) включения имеют звездообразную форму, произвольно ориентированы и очерчены достаточно четкими темными границами.



а) x500



б) x500



в) x1250

Рисунок 3.16 Структура насыщенного Ti при ионной очистке слоя после сильного травления 5% раствором HF; а, б) - на косом микрошлифе $\alpha = 30^\circ$; в) - на поверхности

В центре зтих фрагментов зачастую находится лунка либо частица титана, осажденная при бомбардировке подложки капельной фазой. Возможно, капельные частицы, конденсированные на поздней стадии ионной очистки на нагретую поверхность подложки, не кристаллизуются сразу, а растекаются по поверхности с образованием следов в виде брызг и при дальнейшем притоке энергии в виде потока ионов стимулируются диффузионные процессы, которые приводят к образованию твердых растворов и интерметаллидов [56]. Так как температура подложки в течение ионной очистки монотонно возрастает [45, 55], возможность образования твердых растворов или интерметаллидов на различных этапах процесса различна. С увеличением времени ионной очистки (рис. 3.17) интенсивность линий α -Fe уменьшается, возрастает интенсивность линий α -Ti, что может быть связано с большим насыщением поверхности ионами титана и конденсацией капельной фазы [54, 55, 56]. Как показали последующие исследования [51, 55, 56], механические свойства поверхности при первом этапе определяются температурой подложки, временем ионной очистки и связанной с ним толщиной слоя, насыщенного атомами титана. В зависимости от этих параметров [57] адгезионная прочность покрытия может изменяться от 20 до 320 МПа, а микротвердость от 1500 МПа до 9300 МПа, соответствующей микротвердости интерметаллидных фаз.

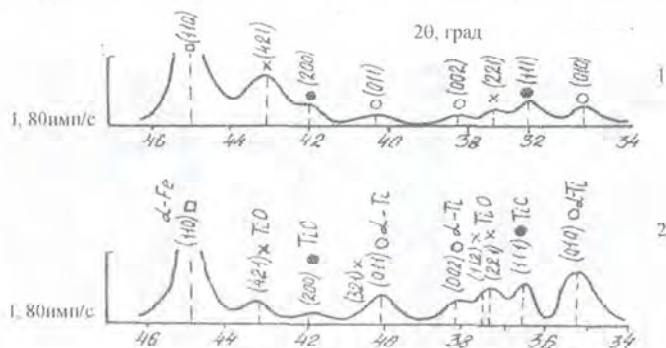


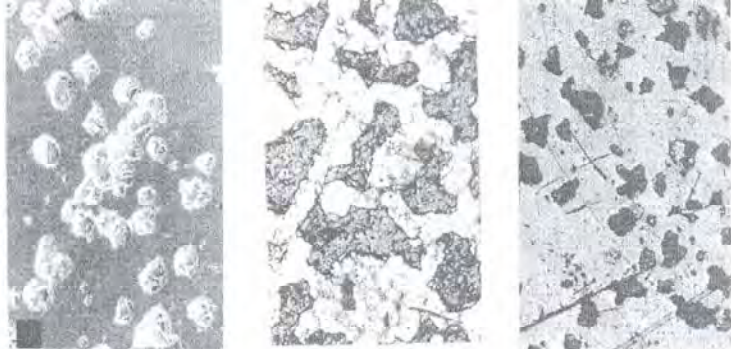
Рисунок 3.17 Дифрактограммы поверхности после ионной очистки:
1 – продолжительность очистки 60с; 2 – продолжительность очистки 120с

ного процесса. Наличие факторов, влияющих на формирующуюся структуру, усложняет возможность получения заданной зернистости, плотности, сплошности.

Активные центры поверхности в процессах плазменно-вакуумного осаждения покрытий играют значительную роль. Если реакция образования протекает вдали от равновесия, создаются условия для образования новых зародышей, с момента их зарождения роль активных центров уменьшается. Формирование и рост вакуумно-плазменных покрытий [58, 59] протекает по механизму кристаллизации, т.е. происходит зарождение единичных центров (рис. 3.18, а), постепенное слияние центров кристаллизации с образованием "сотовой" структуры (рис. 3.18, б), дальнейший рост и наложение покрытия на вторичных центрах кристаллизации с образованием сплошного, плотного слоя покрытия (рис. 3.18, в). Островковый период реакции осаждения характеризуется отсутствием видимого ее развития.

В этот период увеличивается нестабильность парогазовой смеси, возникают активные начальные центры (рис. 3.19, а) на поверхности в виде активированных комплексов агрегатов молекул, обладающих максимальной потенциальной энергией. Время перехода активных центров в частицы твердой фазы связано с наличием энергетического барьера, который необходимо преодолеть для создания новой фазовой поверхности в соответствии с уравнением Гиббса [60]. Рост и образование первичных адсорбированных комплексов (рис. 3.18, б) новой фазы (покрытия) сопровождается выделением энергии при создании элементов кристаллической решетки, что ведет к уменьшению свободной энергии системы. Скорость построения решетки новой фазы определяется природой образующегося соединения, условиями массопереноса, конвективной диффузией, концентрацией парогазовой смеси. В результате первичные адсорбированные комплексы способны к самопроизвольному росту и срастанию в агрегаты - это и будут частицы новой твердой фазы. Кинетика дальнейшего роста новой фазы определяется скоростью химического взаимодействия парогазовой смеси в системе в определенном температурном интервале. Наличие активных центров на твердой поверхности или частиц новой фазы приводит к самовозбуждению реакции образования покрытия.

Процесс можно активировать, создавая число потенциальных частиц путем косвенных воздействий - увеличением числа дефектов кристаллической решетки, химической обработкой поверхности, введением химически активных добавок в основу.



а б в
 Рисунок 3.18 Стадии формирования слоя покрытия, $\times 5000$
 а) – островковая; б) – сгустчатая; в) – силицидная

Число потенциальных частиц можно увеличить на столько, что скорость образования перестанет лимитировать скорость реакции вследствие большого числа активных частиц. Именно с этой точки зрения порошковые материалы используются в качестве подложек [61], представляют интерес, т.к. наличие пор улучшает адсорбционные процессы и синтез покрытия внутри пор, особенно, если размер их соизмерим с толщиной покрытия.

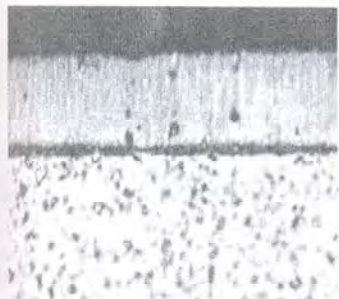
В процессе протекания реакции образования CrN поверхность подвергается воздействию паро-плазменного потока неравномерно. В случае использования в качестве основы железа осаждение происходит равномерно по всей поверхности образца, а случае применения основы сложного химического состава, благодаря концентрационной неоднородности легирующих элементов и их различной каталитической активности, активность покрываемой поверхности неодинакова [62].

Участие атомов легких элементов (N) в процессе образования CrN активирует и направляет процесс, т.е. приводит систему к энергетически более стабильному [63] состоянию. Формирующаяся структура на начальной стадии - мелкозернистая, плотная, кристаллографическая текстура отсутствует до толщины покрытия 2-4 мкм.

В дальнейшем, когда компоненты поверхностного слоя не участвуют в реакциях восстановления и образования покрытия, процесс

осаждения постепенно изменяется в сторону образования игольчатых и столбчатых структур (рис. 3.19, 3.20).

Дефекты структуры (дислокации, границы зерен) изменяют химический потенциал поверхности, поэтому в начальный момент зародышеобразование происходит избирательно. Образование зародыша вызывает искажение фазы, которое способствует образованию и росту новых центров зародышей. С течением времени скорость реакции возрастает за счет увеличения реакционной поверхности вследствие роста зародышей, которые реализуются в сплошное тонкое покрытие.



x1500

Рисунок 3.19 Текстурированный на стадии формирования слой покрытия



x1500

Рисунок 3.20 Формирование игольчатой структуры в слое покрытия

Появление участков новой фазы [64, 65] сопровождается изменением свободной энергии:

$$\Delta G_j = (\Delta G_j)_{\text{макр}} + (\Delta G_j)_{\text{микр}},$$

где ΔG_j макр – макроскопическая разность свободных энергий между начальным и конечным состояниями.

При этом начальное состояние – относительно большое количество продукта, конечное – соответствующее количество продукта. Разность свободных энергий можно рассчитать из зависимости:

$$\Delta G_{j, \text{макр}} = \Delta G_{(j, Na)},$$

где ΔG – изменение свободной энергии, отнесенное к одному молеку вещества; j – число молекул, находящихся в зародыше новой фазы; N_a – число Авогадро; $\Delta G_{\text{мкр}}$ – изменение свободной энергии при выделении новой фазы из исходной среды.

Эта энергия соответствует свободной энергии поверхности, которая равна произведению поверхностного натяжения $\sigma_{\text{пов}}$ на величину образовавшейся поверхности раздела Z . Формула позволяет рассчитать изменение свободной энергии при образовании зародыша, содержащего j – молекул:

$$\Delta G_{j, \text{мкр}} = \sum \sigma_{\text{пов}} \cdot Z$$

Приближенно скорость образования зародыша можно определить, как [63]:

$$J^* = W \cdot n_i^*,$$

где W – скорость добавления атомов или молекул к скоплениям критического размера; n_i^* – концентрация зародышей критического размера.

Из рассмотрения сканограмм стадий формирования плазменно-вакуумных покрытий $TiN-CrN$ на стали в зависимости от времени осаждения (рис. 3.21) следует, что вследствие высокой скорости кристаллизации, на активных центрах поверхности возникают и растут зерна покрытия, в то время как остальные (неактивные) участки практически не реагируют, а заметны лишь отдельные точки, где прошла реакция осаждения. Изолированные зародыши новой фазы постепенно растут, образуют законченные цепочки, а потом – сплошной слой CrN [62, 64].

Кроме того, при адсорбции активной молекулы на поверхности твердого тела диффузия по поверхности зависит от размера зерен.

На мелкозернистой поверхности адсорбция происходит преимущественно по границам зерен, независимо от их ориентировки. В случае крупнозернистой структуры играет роль ориентировка зерна. Зерна, выходящие на поверхность, обладают повышенной адсорбционной активностью. Из этого следует, что мелкозернистые плотные покрытия должны образовываться на более мелкозернистых твердых сплавах, что и подтверждается на практике.

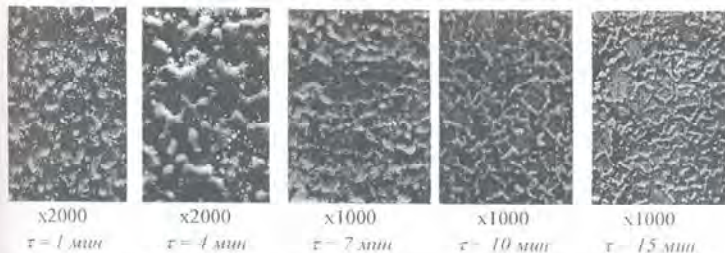


Рисунок 3.21 Формирование топографии поверхности покрытия $TiN-CrN$

Следовательно, при нанесении покрытий на материалах большую роль играет химическая и структурная неоднородность составляющих фаз.

Поверхность формирующихся кристаллов в момент возникновения очень чистая, на них много активных, не травленных центров кристаллизации, на которых происходит осаждение новых кристаллов TiN и CrN .

3.2 Температурно-энергетические условия формирования износостойких защитных слоев

Вакуумно-плазменные технологии позволяют получать покрытия на основе твердых карбидов и нитридов переходных металлов и их композиций с целью упрочнения деталей машин и металлорежущего инструмента.

Таблица 3.1 Физико-механические и теплофизические характеристики материалов износостойких покрытий [63, 65].

Исходный металл	Соединение	Решетка	H_{10} ГПа	Коэффициент трения по стали 45	$-\Delta H_{298}$, К Дж/моль	$\alpha 10^6$, $^{\circ}C^{-1}$	E_s , ГПа
Ti	TiC	Кубическая	31,7	0,23	232,3	8,3	460
	Ti ₂ N	Тетрагональная	—	0,17	—	—	—
	TiN	Кубическая	20,5	0,21	337,7	7,24	256

	TiC, N (стехиометр.)	Кубическая	26,1	0,22	285	7,8	358
Cr	Cr_7C_3	Гексагональная	18,82	0,25	205	9,4	380
	Cr_3C_2	Ромбическая	12,74	0,19	98,3	11,7	380
	CrN	Кубическая	10,93	0,22	118,4	2,3	330
	Cr_2N	ГПУ	15,41	0,20	105,8	9,41	310
Mo	Mo_2C	ГПУ	17,64	0,18	45,8	7,8	544
	MoC	Гексагональная	15	0,15	10,1	0,6	200
	Сталь 40 ХН (основа)			0,35			

H_μ – микротвердость, $-\Delta H_{298}$ – теплота образования, α – коэффициент термического расширения, E – модуль упругости.

Ионизация исходных компонентов обеспечивает высокую эффективность протекания химических реакций при достаточно низкой температуре поверхности конденсации, свойства покрытий определяются при этом в значительной степени параметрами ионного компонента плазмы.

Энергия конденсируемых ионов определяется начальной энергией ионов в генерируемом потоке и их дополнительным ускорением, при подключении подложки к источнику отрицательного смещения. Проанализируем условия синтеза нитридов и карбидов путем рассмотрения баланса энергии [66, 67] с учетом того, что в основном свойства соединений определяются содержанием в них неметалла.

В стационарном режиме удельный поток энергии содержит следующие слагаемые:

а) кинетическая энергия потока ионов:

$$W_s = \frac{j}{Z_c} (\varepsilon_0 + Z_c U) = \frac{j}{Z_c} \varepsilon_i,$$

где j – плотность ионного тока, Z – средний заряд ионов в плазменном потоке, ε_0 – средняя энергия ионов в плазменном потоке, U – потенциал подложки, ε_i – средняя энергия конденсируемых ионов.

$$W_m = \frac{j}{Z_e} (U_z - Ze\varphi),$$

где $U_z = \sum U_z n_z / \sum n_z$ - средний потенциал ионизации (U_z - потенциал Z -кратной ионизации, n_z - плотность ионов с зарядом eZ), φ - работа выхода электронов

в) энергия конденсации нейтрализованных атомов:

$$W = \frac{j}{Z_e} \cdot \frac{\Delta H_{Me}}{N},$$

где ΔH_{Me} - энергия сублимации одного грамм-атома металла, N - число Авогадро.

г) энергия экзотермической химической реакции образования соединений:

$$W_x = n_x \frac{\Delta H_{\Delta H_{Me}}}{N},$$

где n_x - скорость образования молекул соединения на единичной площади подложки, $\Delta H_{\Delta H_{Me}}$ - теплота образования одного моля соединения.

Потери подводимой энергии включают:

а) излучение подложки:

$$E_{\text{в}} = \varepsilon(T) \sigma T^4,$$

где $\varepsilon(T)$ - коэффициент излучения, σ - постоянная Стефана-Больцмана, T - абсолютная температура поверхности конденсации.

б) теплопроводность контакта между деталью и подложкодержателем:

$$E_r = L \cdot \frac{T \Delta T}{R_r},$$

где L - постоянная Видемана-Франца, ΔT - разность температур образца и подложкодержателя, R_r - переходное сопротивление контакта.

$$E_p = \frac{j}{Z_i} K(U) E_a \quad ,$$

г) нагрев реакционного газа:

$$E_{\kappa} = \alpha \frac{P}{\sqrt{MT_0}} (T - T_0) \quad ,$$

где P - давление легирующего газа, M - молекулярный вес газа, T_0 - температура газа.

Необходимым условием образования соединения является превышение потока энергии на подложку по отношению к ее расходу на величину энергии активации Q . Энергию активации можно представить в первом приближении в виде энергии ионизации исходных компонентов [67]:

$$Q = \frac{j}{Z_i} \frac{\Delta H_{Mj}}{N} + n_k \frac{\Delta H_s}{N} \quad ,$$

где n_k - скорость поступления недиссоциированных атомов молекул неметалла, ΔH_s - энергия диссоциации одного моля реактивного газа.

Следовательно, при конденсации в вакууме потока металлической плазмы для стационарного случая условие образования химического соединения будет описываться следующим выражением:

$$\frac{j}{Z_i} [v_0 + Z_i U + U_i - Z_i j - K(U) E_a] + n_k \frac{\Delta H_{Mj}}{N} + W \quad ;$$

$$e(T) \sigma T^4 - I_e \frac{T \Delta T}{R_e} - \alpha \frac{P}{\sqrt{MT_0}} (T - T_0) = n_k \frac{\Delta H_s}{N} \quad .$$

Таблица 3.2 Экспериментальные значения для расчета условий синтеза тугоплавких материалов системы $Ti+N_2$, $Cr+N_2$ и $Mo+N_2$

Условия конденсации	Наименование компоненты		
	$Ti + N_2$	$Cr + N_2$	$Mo + N_2$
φ	6	6	6
P_e , Па	$6,65 \times 10^{-1}$	$3,39 \times 10^{-1}$	1,064
T_e , °C	180	150	180
ΔT_e , °C	50	100	150
R_n , Ом	2×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-3}
ε_0 , эВ	60 (10)	80 (10)	140 (10)
Z	2,86 (10)	2,57	1,79 (10)

Положив экспериментальные данные таблицы 3.2 и сведения [68], целесообразно некоторые члены выражения опустить и представить его в виде:

$$n_i = \frac{N}{\Delta H_x} \left[\frac{j}{Z_i} (\varepsilon_0 + Z_i U) - \varepsilon(T) \alpha T^4 - L \frac{T \Delta T}{R} \right].$$

Из данного выражения следует, что содержание неметалла в конденсате является линейной функцией энергии ионов металла и растет до тех пор, пока поступающий на подложку поток молекул неметалла не будет связан в конденсате полностью. Следовательно, существует определенное значение ε (и соответственно U), при величинах которых происходит полное взаимодействие потока неметалла. Подставив экспериментальные данные (табл. 3.2) рассчитываем энергетические границы образования тугоплавкого покрытия для систем $Ti + N_2$, $Cr + N_2$ и $Mo + N_2$, которые равны соответственно 150, 159 и 187 эВ. Результаты этих вычислений хорошо согласуются с экспериментальными значениями, равными 150, 160 и 190 эВ.

На основании решения уравнения теплового баланса при конденсации в вакууме плазменных потоков можно получить зависимость содержания неметалла C_x в покрытии от параметров плазменного потока при постоянном давлении газа:

$$C_x \approx \frac{j}{Z_e} (\varepsilon_0 + Z_e \cdot U) - W(T) / Q,$$

где $W(T)$ — потери энергии за счет теплопроводности и излучения, Q — потенциальный барьер реакции, равный энергии атомизации (ионизации) исходных компонентов.

Представляет интерес анализ содержания неметалла в конденсате для двух случаев, когда он находится в молекулярном и атомарном (диссоциированном) состоянии.

В первом случае $Q = \Delta H_x$ (где ΔH_x — энергия диссоциации молекулы неметалла). Тогда значение C_x линейно растет с ростом энергии конденсирующихся ионов $\varepsilon = \varepsilon_0 + Z_e U$, до некоторого значения ε_c при котором весь поступающий на подложку поток неметалла (азота) не вступит в реакцию. При энергии $\varepsilon \geq \varepsilon_c$ содержание неметалла не зависит от энергии ионов и определяется только давлением газа. Таким образом, зависимость C_x от параметров процесса при энергии $\varepsilon \leq \varepsilon_c$ определяется выражением:

$$n_i \approx \frac{j}{Z_e} (\varepsilon_0 + Z_e U) - W(T) / \Delta H_x$$

где $C_x = k_1 P$ (при $\varepsilon \geq \varepsilon_i$), где k_1 – коэффициент, учитывающий конденсации молекулярного неметалла.

Значение энергии ионов металла ε_i связано с давлением газа:

$$\varepsilon_i \approx k_1 P \Delta H_x + W(T) / \frac{j}{Z_e}$$

В случае поступления на поверхность конденсации неметалла в атомарном состоянии, величина Q стремится к нулю, следовательно C_x не зависит от энергии ионов металла и определяется только плотностью потока неметалла в зону конденсации:

$$C_x = k_2 P,$$

где k_2 – параметр, учитывающий коэффициент конденсации атомарного неметалла.

Основываясь на результатах [66, 67, 68], и с учетом $k_1 \ll k_2$, характер экспериментальной зависимости $C_N(P)$ объясняется тем, что при $P \leq 6,65 \times 10^2$ Па в зону реакции поступает молекулярный азот, а при $P \geq 6,65 \times 10^2$ Па атомарный или частично диссоциированный азот.

3.3 Особенности формирования вакуумно-плазменных покрытий в условиях намагниченности электронов

Содержание металлоида (C_N) в покрытии, следовательно, и физико-механические свойства слоя, при прочих равных условиях зависят от напряженности магнитного поля в реакционном объеме (рис. 3.22). Изломы кривых в точках H_1 и H_2 показывают особенности синтеза соединения из плазменной фазы, связанные с взаимодействием компонентов плазмы вакуумной дуги с газовой мишенью. При $H < H_1$ это взаимодействие несущественно и содержание азота в покрытиях определяется количеством поступающего на подложку молекулярного азота. При этом количество связывающегося азота можно определить с помощью уравнения теплового баланса на поверхности конденсации, учитывая, что порог реакции синтеза нитридов [60, 63] равен по порядку величины энергии диссоциации ΔH_N :

$$W_c \sim \sum n_c P \left[1 + \frac{C_1}{m_e T_e} \left(\frac{H}{P} \right)^2 \right] < \sigma_c (\vartheta_c) \vartheta_c > .$$

Увеличение вероятности электронно-молекулярного взаимодействия с ростом магнитного поля H при плазмосепарации сопровождается увеличением степени возбуждения, диссоциации и ионизации азота, что приводит к резкому снижению порога реакции синтеза нитридов и росту содержания азота в покрытиях.

Увеличение магнитного поля свыше H_2 приводит к росту потока ионов, в то время как поток неметаллического компонента существенно не изменяется: с этим связано некоторое уменьшение C_N в области $H > H_2$.

Для разделения эффектов, связанных с намагниченностью электронов и с повышением плотности плазмы, исследовалась зависимость выхода реакции синтеза нитридов от плотности ионного тока j при $H=0$ и $P=2 \times 10^{-2}$ Па. Изменение тока дугового разряда от 80 до 150 А приводит к изменению плотности ионного тока, которая изменялась в диапазоне 10-20 мА/см²; при этом содержание азота в покрытиях в пределах 0,15-0,20 вес. %. Сопоставление этих данных с ранее изложенными позволяет сделать вывод о значительной роли электронно-молекулярного рассеяния в процессах активации реактивного газа в электронной намагниченной плазме, что объясняет зависимость содержания азота в покрытиях от напряженности магнитного поля $H < H_1$.

В диапазоне давлений $P < P_1$ процессы электронно-молекулярного взаимодействия незначительны и содержание азота в конденсате определяется ранее приведенной зависимостью.

При $P > P_1$ эти процессы становятся заметными, что приводит к активации азота, как и в случае зависимости $C_N(H)$, следствием которой и является увеличение выхода реакции синтеза нитридов. Характерной особенностью зависимостей $C_N(H)$ и $C_N(P)$ является лавинообразное увеличение выхода реакции при $H > H_1$ и $P > P_1$, что не может быть объяснено только взаимодействием электронного компонента с молекулами азота. По-видимому, влияние на состояние реактивного газа оказывает взаимодействие с ним электронного и ионного компонентов плазмы, что и приводит к повышению степени активации реактивного газа, быстро переходящему в насыщение, вследствие практически полной его диссоциации и ионизации. Зависимости микротвердости H_v плазменно-вакуумных покрытий от напряженности магнитного поля (рис. 3.22) свидетельствуют, что данный параметр чувствителен к фазовому составу и структуре материала. При

конденсации растёт содержание азота в покрытиях C_N и происходит изменение структуры, характеризующееся в некоторой мере уменьшением плотности покрытия ρ_k . Рост микротвердости при этом может быть обусловлен как увеличением значения C_N , так и ростом напряжений в покрытиях [66, 67].

Полученные зависимости содержания азота и микротвердости покрытий от напряженности магнитного (H, \mathcal{E}) поля в реакционном объеме позволяет конструировать многослойные композиционные покрытия путем циклического изменения параметра магнитного поля.

3.4 Твердые смазочные материалы покрытий деталей сельскохозяйственной техники

При выборе твердых смазывающих материалов учитывались следующие критерии: формирование пленки с малым сопротивлением сдвигу как фактор, обеспечивающий смазочное действие в контакте двух тел, когда сдвиг реализуется в пленке и сопротивление скольжению при этом намного ниже, чем в случае отсутствия пленки на контакте трущихся поверхностей и исключение непосредственного контакта твердая поверхность – твердая поверхность. При этом снижается вероятность разрыва когезионных связей в контактирующих телах и вероятность контактного изнашивания. Кроме низкого сопротивления сдвигу твердосмазочные материалы должны обладать хорошей адгезией с поверхностью детали. Проведенными исследованиями определены методы повышения прочности сцепления твердосмазочного слоя с поверхностью подложки. Для этой цели применили ультразвуковую очистку, ионную обработку поверхности потоком ионов нейтрального газа и нанесение подслоя толщиной 0,1–0,5 мкм из чистого металла с целью увеличения степени адгезии и заживления трещин, образовавшихся на поверхности после термической и механической обработки. Необходимость применения данных методов связана с тем, что твердосмазочные пленки не имеют такой подвижности на контакте, как обычные смазочные материалы, и поэтому их антизадирное действие определяется в основном адгезией с поверхностью подложки. Кроме перечисленных выше свойств, твердосмазочные материалы должны быть химически инертными, пластичными и обладать антикоррозионными защитными свойствами. В качестве материалов для твердосмазочных слоев покрытий предлагаются алюминий-олово, молибден и его композиции с сульфидами.

особенностью распыления сплава в вакууме из одного катода является фракционирование, обусловленное различием скоростей распыления компонентов, образующих сплав катода. Получение покрытия, соответствующего исходному составу испаряемого многокомпонентного композиционного катода, требует выполнения условия [61, 69]:

$$\frac{f_1 P_{01}}{\sqrt{\mu_1}} = \frac{f_2 P_{02}}{\sqrt{\mu_2}},$$

где f_1, f_2 - исходные концентрации компонентов; P_{01}, P_{02} - удельные давления паров компонентов; μ_i - относительная молекулярная масса компонента.

Сравнение величины $f P_{0i} / \sqrt{\mu}$ для разных материалов при одинаковых условиях распыления показывает, что без значительного фракционирования испаряются двухкомпонентные сплавы металлов только двух групп *Al, Cr, Sn, Cu, и Fe, Au, Ti, Ni*.

Для определения скорости распыления компонента в сплаве необходимо применять выражение:

$$q_i = \frac{dm_i}{dt} = 7,7 \cdot 10^4 \frac{f_i C_i p S}{\sqrt{\mu_i T}} = \alpha_i C_i = \alpha_i \frac{m_i}{m},$$

где C_i - молекулярная доля компонента в сплаве, m_i - число молей компонента катода, $m = m_1 + m_2$ - общее число молей сплава катода.

Из приведенного выше наблюдается прямая зависимость распределения состава распыляемого сплава от температуры. При нанесении покрытий из сплавов, когда необходимо сохранить исходный состав сплава в покрытии, необходимо стремиться к повышению температуры испарения на катоде, так как при этом различие в скоростях испарения компонентов уменьшается. При повышенной температуре испарения уменьшению фракционирования способствует переход режима движения паров от молекулярного к вязкостному. В этом случае перенос вещества от испарителя к подложке происходит путем диффузии в паре, и влияние различия в упругости паров компонентов частично компенсируется. Наиболее эффективно использование многокомпонентных катодов, полученных методами порошковой металлургии: статическим, горячим, гидродинамическим и взрывным прессованием. Нами исследовались и применялись для нанесения покрытий катодные композиции (*Cu-W; Al-Sn; Ti-Zr-Ni*), изготовленные методом гидродинамического прессования с последующим спеканием. (табл. 3.3). Данный метод

позволяет получать изделия с равномерным распределением плотности по объему заготовки, а также направленно регулировать распределение физико-механических свойств в прессовках. Ток горения дуги является одним из основных параметров устойчивости процесса распыления материала катода и получения качественных покрытий.

Таблица 3.3 Значения минимального тока устойчивого горения дуги в зависимости от материала катода

Материал катода	Способ изготовления катода	Минимальный ток устойчивого горения дуги, А
Титан	Литье	60
Титан	Гидродинамическое прессование	90
Никель	Литье	90
Никель	Гидродинамическое прессование	110
Хром	Литье	90
Хром	Гидродинамическое прессование	95
Вольфрам- медь	Гидродинамическое прессование	200
Молибден	Гидродинамическое прессование	80
Молибден	Литье	140-150
Титан-цирконий- никель	Гидродинамическое прессование	120

Из приведенных выше результатов минимальный ток устойчивого горения дуги зависит не только от состава, но и от технологии получения катодов. Так, в материале катода, изготовленного методом порошковой металлургии, в большинстве случаев имеется остаточная пористость, с увеличением которой повышается значение тока устойчивого горения дуги (рис. 3.23). Это связано с влиянием плотности прессованного материала на теплопроводность и другие свойства. Однако наличие небольшой пористости имеет свои положительные стороны. Так, у катодов с остаточной пористостью до 5% отмечено более интенсивное испарение материала катода, т.е. увеличивается скорость

нанесения покрытия. Это свойство следует быть использовано для получения многокомпонентных катодов с переменной пористостью с целью их равномерного распыления.

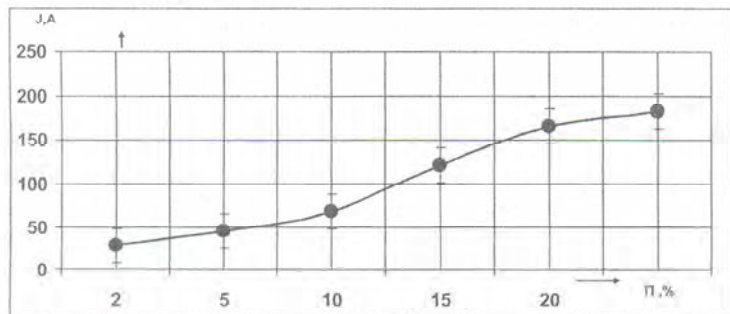


Рисунок 3.23 Зависимость тока дуги от остаточной пористости многокомпонентного катода (Al-Sn)

Расход материала (m) пропорционален току дуги (J) и наблюдается линейная зависимость эрозии катода от величины электрического заряда:

$$m = \mu \cdot J \cdot t,$$

где μ - коэффициент эрозии катода, который в зависимости от материала составляет 10^{-4} - 10^{-5} г/кул; t - время эрозии катода.

Прямая зависимость расхода материала катода от тока дуги горения и тока от свойств материала позволяет подобрать компоненты катода либо по их свойствам, либо по значению тока дуги, которые не должны сильно отличаться.

В процессе исследований методами металлографического рентгеноспектрального анализа и электронной микроскопии были изучены фазовый состав и структура многокомпонентного покрытия, состоящего из карбонитридов титана и хрома.

Покрyтия наносили на подложку из стали в атмосфере реакционного газа ацетилена при давлении $1,0$ - $4,0 \times 10^{-1}$ Па, при подаче напряжения смещения на подложку 200 В. Ток вакуумной дуги составил 110 А. Толщина покрытия составила 4-5 мкм.

содержание титана в покрытии выше, чем хрома (отношение их количества по массе составило 2:1). Это связано с большей скоростью распыления титана по сравнению с хромом и большей эрозионной способностью титана и его карбидизацией. Результаты исследований показали, что период кристаллической решетки TiC во всех образцах практически одинаков и несколько превышает табличные данные. Ширина интерференционных линий TiC увеличивается с увеличением дисперсности структуры и вблизи поверхности покрытия, что связано с микронапряжениями. Результаты рентгенофазового анализа показали наличие в покрытии наряду с TiC карбидов Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и интерметаллида Cr_2Ti . Измерение твердости HV (0,05) на образцах с многокомпонентными карбонитридными покрытиями показали, что твердость увеличивается с увеличением толщины покрытия до 10 мкм и достигает ≈ 4300 , что характерно для мелкодисперсных структур. При этом увеличение твердости с максимальной интенсивностью наблюдается при нанесении слоев в пределах 1-4 мкм (рис. 3.24).

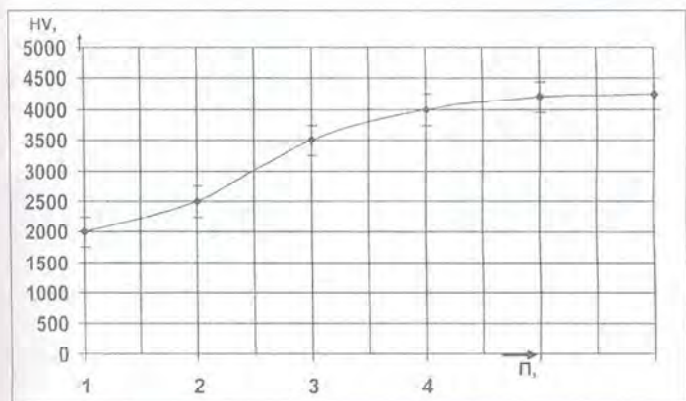


Рисунок 3.24 Зависимость твердости (HV, kg/mm_2) от толщины покрытия (P_i , мкм)

Для получения покрытий из многокомпонентных систем с равномерным распределением фазового состава и структуры необходимо учитывать токи дуги и скорость распыления каждого из элементов ка-

установлено, что твердость покрытия $HV(0,05) \approx 4300$, дальнейшее увеличение толщины до 10 мкм и достигает $HV(0,05) \approx 4300$, дальнейшее увеличение толщины приводит к снижению твердости.

Структура и состав вакуумно-плазменных твердых смазочных покрытий. Структура промежуточных слоев *Ti* и *Mo* (рис. 3.25, а) и топография поверхности после этой обработки (рис. 3.25, б) свидетельствуют, что достигается структурная однородность по сечению слоев и обеспечивается полный контакт с подложкой и копирование ее микро- и макрорельефа, а поверхность формируется в виде характерного ячеистого микрорельефа с размерами фрагментов 5-25 мкм и глубиной впадин 0,05-0,5 мкм, моделирующего зернистую структуру основного материала подложки. Исследованиями установлено, что при испарении вакуумной дугой катодной формы композиционной порошковой мишени (*MoS₂-Al*) скорость осаждения дисульфида молибдена в большей степени зависит от температуры подложки, чем скорость конденсации алюминия.



а



б

Рисунок 3.25 Формирование структуры на стадии нанесения адгезионного и барьерного промежуточных слоев, $\times 1500$, световая микроскопия:

а) структура функциональных слоев на косом шлифе под углом 5° 1-барьерный слой *Mo*, толщиной 0,05-0,5 мкм; 2-адгезионный слой *Ti*, толщиной 0,5-1,0 мкм; 3-основа образца; б) топография поверхности после нанесения функциональных слоев

Следовательно, представляется возможным направленно влиять на формирование состава композиционного твердого смазочного слоя.

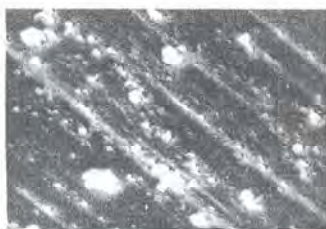
Так, при температурах ниже 150-200 $^\circ\text{C}$ скорость осаждения алюминия преобладает, а при температурах 350-450 $^\circ\text{C}$ доминирует

онных твердых смазочных слоев составляла 3-5 мкм. По данным рентгенофазового анализа установлено, что в покрытии присутствует три основные фазы – $Mo_{1,5}S_2$ (50-60%), Mo_2S_3 (7-10%), MoS_2 (11-16%).

Следовательно, представляется возможным направленно влиять на формирование состава композиционного твердого смазочного слоя. Так, при температурах ниже 150-200 °С скорость осаждения алюминия преобладает, в то время, как при температурах 350-450 °С доминирует конденсация дисульфида молибдена. Толщина наносимых композиционных твердых смазочных слоев составляла 3-5 мкм. По данным рентгенофазового анализа, установлено, что в покрытии присутствует три основные фазы – $Mo_{1,5}S_2$ (50-60%), Mo_2S_3 (7-10%), MoS_2 (11-16%).



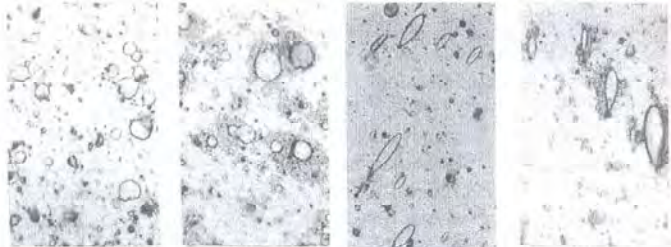
Рисунок 3.26 Диффрактограммы покрытия на основе дисульфида молибдена



а) $\times 500$. Световая микроскопия

б) SEM, $\times 5000$

Рисунок 3.27 Структура поверхности композиционного твердого смазочного покрытия на основе дисульфида молибдена



5 мин, угол падения пучка 90° 10 мин, угол падения пучка 90° 5 мин, угол падения пучка 45° 10 мин, угол падения пучка 45°
 Рисунок 3.28 Формирование рельефа твердого смазочного покрытия. $\times 1500$

Анализ фотографий поверхности покрытия, полученных на сканирующем электронном микроскопе, показывает, что покрытие полностью повторяет рельеф подложки. Полосчатая структура говорит о том, что на поверхности подложки присутствовали следы прокатки (рис. 3.27, а, б). Вдоль полос прокатки на поверхности покрытия хорошо видны белые округлые включения (рис. 3.27, б), размер которых колеблется от 0.5 до 2 мкм. Топография поверхности зависит от угла падения потока частиц на подложку, при косом падении образуются следы «размазывания» капель по поверхности (рис. 3.28).



а) $\times 1000$



б) $\times 10000$

Рисунок 3.29 Атомно-силовая микроскопия композиционного твердого смазочного покрытия на основе дисульфида молибдена. 10.2 мкм

белая фаза имеются небольшие трещины (рис. 3.29, а). При большом увеличении видно, что покрытие имеет слабо выраженную зернистую структуру. Это также подтверждается данными, полученными на атомно-силовом микроскопе (рис. 3.29, б). Размер зерен колеблется от 1 до 8 мкм.

3.5 Конструирование покрытий дискретного типа

В процессе эксплуатационного нагружения, при значительных исходных остаточных напряжениях, на контактных участках деталей и инструмента с покрытием, вследствие недостаточной контактной прочности может возникнуть нарушение сплошности покрытия – выкрашивание частиц материала поверхностного слоя [70]. Это связано со сложением нормальных остаточных напряжений, сформировавшихся в условиях формирования покрытия, с напряжениями сжатия от прилагаемой эксплуатационной нагрузки. В таких условиях решение проблемы повышения прочности и надежности изделий путем формирования на их рабочих поверхностях покрытий невозможно без наличия информации о величине и знаке остаточных напряжений в покрытии. Наличие информации о величине и знаке остаточных напряжений, возникающих в покрытии при его формировании, и о напряжениях, появляющихся в покрытии в процессе эксплуатации, позволяет принять решение о выборе решения для их снижения еще на стадии проектирования и изготовления.

Эффективным способом повышения эксплуатационных возможностей деталей и инструментов является нанесение дискретных вакуумных покрытий.

В связи с тем, что покрытие дискретного типа в отличие от сплошного покрытия не является континуальным, уровень остаточных напряжений в дискретных участках ниже уровня остаточных напряжений в сплошных покрытиях. Формирование таких покрытий может быть эффективным в случаях, когда необходимо снизить остаточные напряжения.

Для примера на рис. 3.30 приведены результаты исследований остаточных напряжений в покрытиях TiN на образцах из быстрорежущей стали Р6М5. Как видно, в сравнении со сплошными покрытиями в покрытиях дискретного типа наблюдается снижение величины остаточных напряжений.

Величина остаточных напряжений снижается с уменьшением размеров дискретного участка. Как для сплошных, так и для дискретных покрытий, остаточные напряжения снижаются с ростом толщины покрытия. Это связано с тем, что при удалении от поверхности раздела основы и покрытия (с ростом толщины) напряжения в покрытии снижаются, и средние напряжения в слое покрытия уменьшаются [71]. Снижение толщины покрытия приводит к росту градиента напряжений, что может повлечь отрыв покрытия от основы [72]. Хотя с увеличением толщины покрытия напряжения перераспределяются и частично уменьшаются, необходимость снижения остаточных напряжений для износостойких покрытий является актуальной. С увеличением толщины покрытий влияние размера дискретного участка на величину остаточных напряжений сжатия снижается – для больших толщин покрытий размеры дискретного участка могут быть увеличены. Для дискретных участков малых размеров наблюдается меньшее влияние толщины на величину остаточных напряжений (рис. 3.31).

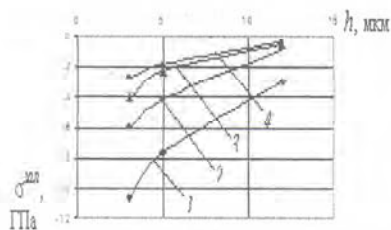


Рисунок 3.30 Зависимость остаточных напряжений сжатия $\sigma_{пл}$ от толщины покрытия h : 1 – для сплошного покрытия; 2–4 – для покрытий дискретного типа с размером участка 0,4 x 0,4 мм, 0,2x0,2 мм и 0,045x0,045 мм соответственно

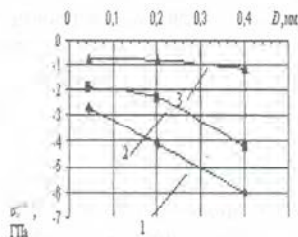


Рисунок 3.31 Зависимость остаточных напряжений сжатия $\sigma_{пл}$ от размера дискретного участка D для покрытий сплошного и дискретного типов для толщины h : 1 – $h = 3$ мкм; 2 – $h = 5$ мкм; 3 – $h = 12$ мкм.

Как видно из рис. 3.32, в поверхностном слое дискретного типа происходит не только уменьшение изгибного момента за счет уменьшения площади покрытия, в пределах которой действуют остаточные напряжения, но и релаксация остаточных напряжений.

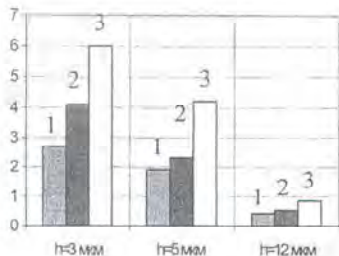


Рисунок 3.32 Абсолютные значения остаточных напряжений сжатия $\sigma_{\text{пл}}$ для покрытий плотностью $\psi = 45\%$ с размером дискретного участка:
 1 – 0,045×0,045 мм;
 2 – 0,2×0,2 мм;
 3 – 0,4×0,4 мм

Приведенные выше результаты исследований позволяют не только оценить величину остаточных напряжений сжатия в покрытиях, но и определить пути их снижения еще на стадии конструирования покрытия дискретного типа за счет выбора размеров участков и его плотности. Снижение остаточных напряжений в износостойком покрытии за счет использования конструкции покрытия дискретного типа и уменьшения размера дискретного участка дает возможность также увеличить его толщину в сравнении со сплошными покрытиями. При формировании покрытий дискретного типа используются методы напыления со специальными «масками» [73]. При этом на «маску» подается положительный потенциал величиной $U = 10-30$ В.



Рисунок 3.33 Схема технологического процесса нанесения покрытий дискретного типа

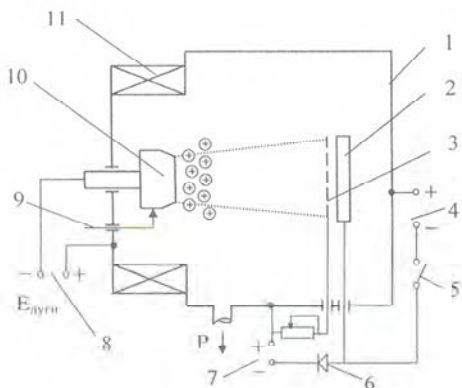


Рисунок 3.34 Схема модернизированной вакуумной установки для ионно-плазменного напыления в импульсном режиме [73]: 1 – вакуумная камера; 2 – деталь; 3 – “маска”; 4 – блок прерывания напряжения; 5 – ключ; 6 – диод; 7 – источник “маски”; 8 – источник испаряемого катода; 9 – зажигающий электрод; 10 – катод; 11 – направляющая катушка

Это позволяет управлять скоростью конденсации покрытия и приводит к тому, что ионы материала покрытия не задерживаются на поверхности “маски”. На рис. 3.33 представлена схема технологического процесса нанесения покрытий дискретного типа, а на рис. 3.34 – модернизированная установка для напыления.

4 ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Важнейшими составляющими ремонтного производства являются восстановление изношенных деталей и механическая обработка деталей, включающая изготовление запасных частей и обработку деталей после восстановления путем наплавки или нанесения покрытий. Запасные части изготавливаются из традиционных материалов — сталей, чугунов, цветных металлов. При восстановлении и упрочнении деталей возникает необходимость в обработке наплавленных и напыленных материалов, которые используются для формирования деталей требуемой конфигурации и точности.

Для большинства деталей, которые восстановлены наплавкой и напылением, требуется дальнейшая обработка для получения необходимой точности размеров и качества поверхности. Однако обработка наплавленных и напыленных материалов значительно отличается от обработки традиционных материалов. Материалы, используемые при восстановлении, имеют ряд специфических свойств, оказывающих влияние на их обрабатываемость:

- 1) значительные макроотклонения поверхности;
- 2) неоднородный химический состав по сечению;
- 3) повышенная пористость и трещиноватость;
- 4) различная твердость по поверхности и глубине;
- 5) присутствие в материале шлаков и твердых включений;
- 6) значительный оксидный слой на поверхности и на внутренних фрагментах структуры.

Поэтому механическая обработка наплавленных и напыленных материалов сопровождается значительными колебаниями величины сил резания и контактных нагрузок на поверхностях инструмента, нестабильностью процесса резания, более высокой температурой в зоне резания по сравнению с обработкой материалов того же химического состава в другом состоянии, и, следовательно, пониженной стойкостью инструмента. Таким образом, материалы покрытий, применяемые для восстановления деталей сельскохозяйственной техники, обеспечивают их функциональные свойства и требуемый ресурс в эксплуатации, но плохо обрабатываются резанием, что создает трудности получения требуемых размеров и качества поверхностного слоя изделий.

Для решения данной проблемы в современном производстве целесообразно применять инструмент, упроченный нанесением вакуумно-плазменных покрытий.

4.1 Основные требования к покрытиям на режущих инструментах, их составы и классификация

В зависимости от материала и условий эксплуатации режущего инструмента, необходимости в согласовании свойств материалов покрытия и инструмента, технологических особенностей методов нанесения к покрытиям, наносимым на режущий инструмент, предъявляется ряд требований, которые могут быть разделены на четыре категории [74]. Во-первых, это требования, учитывающие условия работы инструмента, то есть его служебное назначение. Покрытия должны обладать: высокой твердостью, превышающей твердость материала инструмента (и сохранять ее при температуре резания); стойкостью к адгезии с обрабатываемым материалом во всем диапазоне температур резания; устойчивостью к высокотемпературной коррозии; стабильностью механических свойств вплоть до температуры теплостойкости инструментального материала; инертностью к растворению в обрабатываемом материале при высоких температурах; сопротивляемостью к разрушению при значительных колебаниях температур и напряжений. Ко второй категории отнесены специфические требования к инструментальному материалу с покрытием, т.е. это требования совместимости свойств материалов покрытия и инструмента. В этом случае материалы покрытия и инструмента должны иметь: сродство кристаллохимического строения материалов покрытия и инструмента, определяющее высокую прочность их адгезии; оптимальное соотношение основных физико-механических и теплофизических характеристик (модули упругости, коэффициенты Пуассона, линейного расширения, тепло- и температуропроводности); малая склонность материалов основы и покрытия к твердофазным диффузионным реакциям во всем диапазоне температур и напряжений в условиях процесса резания, образованию хрупких вторичных соединений. В-третьих, это требования к технологическим особенностям метода нанесения покрытия: формирование покрытия при температурах, исключающих рекристаллизационные явления и фазовые переходы в материале инструмента; возможность воспроизводимости свойств покрытия выбранного состава при заданном соотношении технологических параметров.

К основным требованиям относятся: высокая плотность и связность покрытия, обеспечивающие защиту материала инструмента от взаимодействия с обрабатываемым материалом и газовой средой; стабильность свойств покрытия во времени; малые колебания толщины покрытия в пределах рабочих поверхностей, позволяющие сохранить высокую геометрическую точность инструмента, возможность получения покрытий предельно простым и экономичным способом.

Наиболее широко в качестве материалов для покрытий на режущих инструментах используют карбиды, нитриды, карбонитриды, бориды и силициды тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической системы элементов (IV – титан, цирконий, гафний; V – ванадий, ниобий, тантал; VI – хром, молибден, вольфрам). Это связано с особенностями их кристаллохимического строения. Например, наличие у этих металлов дефекта на внутренних *s*-, *p*- и *d*-орбиталях делает их весьма восприимчивыми к приобретению электрона из любого источника, которым могут служить междоузельные атомы углерода, азота и кислорода [75]. Большинство переходных металлов имеет широкие области гомогенности, что позволяет в зависимости от содержания кислорода, азота и углерода достаточно сильно изменять физико-механические свойства их карбидов, нитридов или оксидов. К тому же переходные металлы и некоторые их соединения, в первую очередь соединения с простой кубической структурой (*ZrC*, *HfC*, *ZrN*, *TiN*, *HfN*, *VC*, *NbC*, *TaC*), отличаются очень высокими температурами плавления.

В качестве покрытий на режущих инструментах широко применяется также оксид алюминия Al_2O_3 и алмазоподобные покрытия на основе углерода.

Выбор покрытия осуществляется в зависимости от типа обрабатываемого материала и области его применения. Любое покрытие должно обладать максимальной инертностью к обрабатываемому материалу. Поэтому необходимо учитывать тип химической связи материала покрытия. Считается, что чем заметнее проявляется металлический тип связи покрытия, тем сильнее оно схватывается с обрабатываемым материалом. Вот почему карбиды переходных металлов проявляют более высокую адгезионную активность по отношению к различным металлам и сплавам, чем нитриды [76]. На основании этого можно предположить, что покрытия из Al_2O_3 , обладающего ионным типом химической связи, будут проявлять высокую инертность к адгезии с обрабатываемым материалом. Косвенным подтверждением этому выводу могут служить результаты из-

мерения относительной стойкости инструментальных материалов на основе Al_2O_3 к химическому и диффузионному изнашиванию при работе в паре с некоторыми металлами и сплавами (молибденом, вольфрамом, титановым сплавом, сталями) в условиях резания [77].

Нитридные и карбидные покрытия находят широкое применение в различных отраслях промышленности, что связано с их предельными физико-механическими свойствами и устойчивостью во многих агрессивных средах. В табл. 4.1 приведены свойства соединений тугоплавких металлов, используемых в качестве покрытий [74, 78].

Таблица 4.1 – Свойства соединений тугоплавких металлов для покрытий

Соединение	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, °C	H_{μ} , ГПа	E , ГПа	α , град ⁻¹	λ , Вт/м·К
TiC	4930	≈ 3250	31,7	460	8,3	6,8
TiN	5440	2950	20,5	256	9,4	12,6
$\alpha-Al_2O_3$	3980	2050	–	–	8,0	30,2
NbN	8470	2300	14,61	493	10,1	3,8
ZrC	6900	3330-3530	29,5	355	7,01	11,6
HfC	12200	≈ 3890	28,3	359	6,9	6,3
ZrN	7350	2980	15	400	7,24	28,3
HfN	13,39	3310	16	–	6,9	19,1

Примечание: ρ – плотность, $T_{пл}$ – температура плавления, H_{μ} – микротвердость, E – модуль упругости, α – коэффициент термического расширения, λ – коэффициент теплопроводности

Соединения металлов IV–VI групп можно рассматривать и как наиболее устойчивую (в термодинамическом отношении) основу покрытий, способных противостоять твердо- и жидкофазным диффузионным реакциям, коррозии и окислению при высоких температурах. Физические свойства исследуемых покрытий указаны в табл. 4.2 [79] и табл. 4.3 [80]. Наибольшее распространение в качестве однослойных покрытий на различных инструментальных материалах получили нитрид титана [81] и оксид алюминия [82]. Их можно наносить на режущий инструмент из твердого сплава, быстрорежущей стали, керамики.

В настоящее время все большее применение находят композиционные и многослойные покрытия (МП), которые в максимальной степени способны удовлетворить сложному комплексу требований,

предъявляемых к покрытиям для режущего инструмента. Кроме того, они способны хорошо сопротивляться хрупкому разрушению в условиях развития трещин или при сильных пластических деформациях режущей части. В этом случае появляется возможность использования весьма хрупких и кристаллохимически несовместимых с инструментальным материалом систем, способных сохранять высокую твердость при высоких температурах и имеющих повышенную инертность по отношению к обрабатываемым материалам. К таким системам можно отнести некоторые оксиды (особенно Al_2O_3), бориды (HfB_2 , NbB_2 , TaB_2) и Si_3N_4 . Наиболее целесообразно их использование в качестве барьерных слоев, так как это позволяет эффективно сдерживать активные диффузионные процессы, служит своеобразной термоизоляцией, снижает склонность материала инструмента к коррозии и окислению при высоких температурах.

Таблица 4.2 – Физические свойства покрытий

Свойства	Материал покрытия		
	TiC	TiN	Al_2O_3
Плотность, кг/м ³	4930	5210	2015
Микротвердость, МПа	32000	21600	21000
Модуль упругости, ГПа	313,7	250,28	361,29
Коэффициент линейного расширения, град ⁻¹	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$
Вязкость разрушения, МПа·м ^{1/2}	2,2	3,4	—

Таблица 4.3 Свойства защитных покрытий

Состав покрытия	Микротвердость HV, МПа	Стойкость к окислению (макс. температура использования)	Коэффициент трения
TiN	1930-2200	600	0,50
TiC	2800-3000	400	—
TiCN	3000	400	0,40
TiAlN	3000-3500	540	0,40
Ti(Al,Cr)N	3500	920	0,40

$Ti(Al, Cr, Y)N$	2700	950	—
CrN	1650-2150	700	0,50
Al_2O_3	2100-3000	1200	—
ZrN	2800	600	0,60
MoS_2	1500	—	0,02
WC/C	1500	300	0,20

У многослойных покрытий нижний слой, прилегающий к инструментальному материалу, должен обеспечивать прочное сцепление с ним и обладать возможно меньшими остаточными напряжениями для снижения перепада напряжений на границе с основой, так как известно, что наличие резкого перепада напряжений способствует отслоению покрытия. Максимальная адгезия покрытия с подложкой достигается при равномерном распределении напряжений по всей поверхности контакта. Это условие выполняется при наличии в покрытии переходного слоя, состав которого постепенно изменяется от характерного для материала покрытия до свойственного материалу основы. Такое многослойное покрытие было запатентовано в США [82]. Наносят его методом *CVD* на режущие пластины из нитрида кремния. В качестве промежуточного слоя применяется плотный поликристаллический слой $\alpha-Si_3N_4$, на который осаждается вступающий с ним в химическую реакцию тонкий слой TiN . Работоспособность такого покрытия значительно выше, чем, например, покрытия из TiN .

Анализ данных физико-химических и теплофизических свойств материалов покрытий показывает, что наиболее близкими свойствами к твердым сплавам обладает карбонитрид титана $TiCN$, который имеет период кристаллической решетки, близкий к компонентам твердых сплавов, и схожие значения коэффициентов термического расширения. Также прочность сцепления с основой может быть повышена за счет осаждения нижнего слоя TiN по технологии "комбинированный температурный режим" при высокой температуре конденсации [83].

Промежуточные слои могут выполнять роль связующих слоев, слоев с тепловыми барьерами или слоев, препятствующих продвижению трещин при разрушении покрытий. Наружный слой, непосредственно контактирующий с обрабатываемым материалом, должен иметь низкую склонность к физико-химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом, хорошо сопротивляться окислению при высоких температурах и хрупкому разрушению в условиях усталости. Во

многих публикациях отмечается, что адгезионная активность покрытий на режущих инструментах является его основным функциональным свойством, причем, чем ниже она, тем эффективнее покрытие. Например, для быстрорежущего инструмента состав покрытия может постепенно переходить от нитрида циркония (ZrN), обеспечивающего наилучшее сцепление с инструментальной подложкой, к нитриду ниобия (NbN), дающего аномально низкое схватывание с железосодержащими обрабатываемыми материалами.

В работе [84] указывается на возможность оперативного прогнозирования эффективности применения покрытий на основе данных о смачиваемости тугоплавких соединений расплавленными металлами при разных температурах. Авторами на основе большого справочного материала проведен анализ смачиваемости наиболее важных в практическом отношении тугоплавких соединений, который позволил предложить простые критерии оценки потенциальной эффективности покрытия по параметру его адгезионной активности по отношению к обрабатываемому материалу. Предлагаемые критерии могут быть использованы при создании новых покрытий и инструментальных материалов, а также при решении вопросов рационального выбора известных покрытий для повышения работоспособности инструментов в конкретных условиях резания. Показано, что для широкого перечня тугоплавких соединений сильное адгезионное взаимодействие соединений с металлами начинается лишь при достижении конкретной, характерной для каждого соединения температуры. Физический смысл явления состоит в том, что для реализации сильного адгезионного взаимодействия контактирующих тел нужна определенная термическая активация, благодаря которой разрываются устойчивые электронные конфигурации соединения. В результате резко возрастает концентрация плохо связанных с кристаллической решеткой соединения электронов, способных взаимодействовать с электронной структурой расплавленного металла с образованием адгезионных связей. Отмечается, что наиболее химически устойчивыми являются Al_2O_3 , нитрид бора, нитрид алюминия, нитриды циркония и титана, т. е., главным образом, те соединения, которые имеют наибольшую эффективность либо в составе покрытий, либо в качестве основной фазы инструментального материала. Наибольшую эффективность эти соединения могут иметь при обработке труднообрабатываемых материалов, для которых характерны высокие температуры резания.

Значительный интерес в качестве покрытий представляют двойные и тройные системы карбидов, нитридов, а также карбонитридов переходных металлов: $TiC-ZrC$; $ZrC-TaC$; $TiC-TaC$; $TiN-ZrN$; $TaN-CrN$; $TiC-TiN$; $ZrC-ZrN$; $TiC-ZrN$; $TiC-TiCN$; $TiN-TiC-TiN$ и др. [74, 75]. Высокая термодинамическая устойчивость, твердость и прочность этих соединений обусловлены большим подобием структур и близкими размерами атомов, с чем связано и наличие значительных областей взаимной растворимости. Двойные и тройные соединения имеют широкую область растворимости и перспективны при разработке композиционных покрытий [74, 75]. В настоящее время широко применяются режущие инструменты со сложными покрытиями $TiCN$, $TiAlN$, $TiZrN$ и других, характеризующихся хорошим сочетанием высокой микротвердости, прочности сцепления с основой и коэффициентом трещиностойкости. Высокая трещиностойкость сложных покрытий объясняется упрочнением их при введении легирующих элементов (твердорастворное упрочнение), а также созданием слоистых структур с чередованием большого количества тонких слоев.

Для решения задачи повышения стойкости режущего инструмента исследователями предлагаются различные композиции покрытий, созданные с учетом условий прерывистого резания [84-86]. Причем некоторые из них, как, например, покрытие, предложенное в работе [84], реализуют принцип разделения функций между слоями. Данная конструкция многослойного покрытия предусматривает наличие верхнего слоя TiN , предназначенного для снижения контактных температур и амплитуды их колебания, и нижнего слоя $TiCN$, создающего высокие сжимающие напряжения, препятствующие образованию и росту трещин.

Для успешного торможения появившихся в процессе работы трещин многослойных покрытий необходимо включать в состав слои с высокой трещиностойкостью и сочетать слои переменной твердости. Как известно из физики разрушения, слоистые композиции, особенно с чередующимися слоями переменной твердости, наиболее эффективно тормозят трещины [86]. Кроме этого, очевидно, что существенно повысить эффективность инструмента с многослойными покрытиями возможно только при условии, что примененное покрытие будет длительное время сохраняться на контактных площадках.

Необходимыми условиями для этого являются высокая прочность сцепления с основой и внутри многослойных покрытий (прочность сцепления слоев между собой) и наименьший перепад напряжений в процессе резания на границе "покрытие - инструментальная ос-

нова". Очевидно, что последнее свойство вступает в противоречие с необходимостью обеспечения высоких сжимающих напряжений в покрытии. Обеспечение таких противоречивых свойств требует создания многослойных покрытий, у которых указанные функции распределены между слоями. Слой $TiZrN$ рекомендуется использовать в составе многослойных покрытий в качестве трещиностойкого барьера. С учетом проведенных исследований, а также с учетом анализа трещинообразования в слоистых композициях, показанного в работе [87], были предложены следующие возможные варианты многослойных покрытий для условий прерывистого резания: $TiCN-TiZrN-TiN$, $TiN-TiZrN-TiN$ (нижний слой TiN нанесен при высокой температуре конденсации для обеспечения высокой адгезии, верхний – при низкой температуре для повышения износостойкости), $TiN-TiZrN-TiN$, $TiZrN-TiN-TiZrN$. Анализ результатов исследований механических свойств многослойных покрытий показал, что все трехслойные покрытия обладают большей микротвердостью, трещиностойкостью и прочностью сцепления с основой по сравнению с двухслойным $TiCN-TiN$. Авторами работы [88] на основе изучения механизма разрушения покрытий в процессе резания, теплового и напряженного состояния режущего клина, механических свойств предложен принцип построения многослойных покрытий для твердосплавного режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. Согласно этому принципу многослойных покрытий должно быть как минимум два слоя: верхний слой должен обеспечить повышение запаса пластической прочности и, следовательно, формоустойчивости режущего клина и снижение интенсивности процесса трещинообразования за счет высокого уровня остаточных сжимающих напряжений, а нижний слой – высокую прочность сцепления с инструментальной основой. В соответствии с предложенным принципом разработаны двухслойные покрытия, имеющие верхний слой из $TiZrN$ и $TiCN$ и нижний слой из TiN , $TiN-TiZrN$ и $TiN-TiCN$. Для достижения наибольшей эффективности инструмента с покрытиями провели оптимизацию конструкции покрытий в целях определения рационального сочетания толщин слоев и общей толщины. Выявлено, что наибольшей эффективностью обладают покрытия общей толщиной до 8 мкм.

Покрытия сложного состава на основе нитридов увеличивают длину контакта стружки с режущим инструментом и повышают запас его пластической прочности по сравнению с покрытием TiN . На этой основе сформулирован принцип формирования многослойных покрытий, работающих в условиях непрерывного резания, и разработана

технология их нанесения. Такое покрытие по аналогии с многослойным покрытием, работающим в условиях прерывистого резания, также должно иметь минимум два слоя. Верхний слой покрытия должен обеспечить повышение запаса пластической прочности режущего инструмента (по сравнению с покрытием TiN) за счет благоприятного распределения контактных нагрузок. Это позволит увеличить время работы режущего инструмента до начала образования трещин и снизить интенсивность процессов трещинообразования за счет высокого уровня сжимающих остаточных напряжений. Нижний слой, непосредственно контактирующий с инструментальной основой, должен обеспечить необходимую прочность адгезионной связи покрытия с режущим инструментом. На основе этого принципа разработаны двухслойные покрытия с внешним слоем из нитридов сложного состава (Ti, Zr)N, (Ti, Al)N и $TiCN$ и нижним слоем из TiN , а также трехслойные – с промежуточным слоем $TiCN$ и нижним слоем TiN . Такое сочетание слоев обеспечивает постепенное снижение уровня остаточных напряжений и способствует повышению прочности связи между отдельными слоями покрытия. Применение разработанных многослойных покрытий повышает работоспособность твердосплавного режущего инструмента в 1,5 и 2,5 раза по сравнению с пластинами, имеющими покрытия $TiCN$ и TiN соответственно [89].

Для повышения периода стойкости режущего инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, верхний слой, непосредственно контактирующий со стружкой, должен отвечать за тепловое состояние режущего клина инструмента и обеспечить максимальное снижение контактных температур, минимальную амплитуду их колебаний за время рабочего и холостого ходов. Это позволит снизить интенсивность процесса трещинообразования в покрытии и режущем клине инструмента. Нижний слой, прилегающий к инструментальной основе, должен сдерживать процессы распространения трещин как на границе «покрытие – инструментальная основа», так и в самом покрытии и иметь высокий уровень сжимающих остаточных напряжений [89]. В таких покрытиях промежуточный слой должен иметь повышенную трещиностойкость, которая обеспечивается за счет его микрослойности.

Для этого используются покрытия сложного состава, полученные из отдельных катодов и имеющие слоистую структуру, состоящую из отдельных фаз покрытия и промежуточных слоев сложного состава. Кроме того, повышению трещиностойкости такого многослойного покрытия в целом будут способствовать появление дополни-

слынных границ между отдельными его слоями и высокий уровень сжимающих остаточных напряжений, характерный для покрытий на основе сложных нитридов. Оценка механических свойств однослойных покрытий с позиций теории разрушения хрупких материалов позволила предложить конструкции трехслойных покрытий, у которых в качестве промежуточного слоя используются сложные нитриды [89]. Следует отметить важную роль градиентных функциональных материалов (ГФМ) в повышении износостойкости режущего инструмента [90]. Такие материалы характеризуются плавным изменением свойств и состава по толщине, что позволяет сочетать резко различающиеся свойства на одной поверхности. К способам синтеза ГФМ, происходящим в газовой фазе, относится физическое осаждение из пара. С использованием данного метода пленки оксидов, нитридов или карбидов осаждаются на поверхность металла или керамики из среды, содержащей кислород, азот или углероды. Проводят физическое осаждение под давлением 10^{-3} Па, его разновидностями являются напыление, ионное плакирование и т.д. Градиентные функциональные материалы можно получать и химическим осаждением из пара. В таком случае технология их изготовления основана на термическом разложении газообразных галогенидов металла (или металлоидов) при температурах выше 1300 °С и осаждении продуктов реакций на подложку. Тенденция обработки с минимальным охлаждением или вовсе без него требует решения проблем стабилизации стойкости инструмента и достижения необходимого качества обработанной поверхности.

Одним из способов решения этих проблем фирма «Guhring» выбрала интеграцию смазки в инструмент. Методом PVD наносится слой покрытия, в состав которого входит сульфид молибдена, позволяющий получить минимальный коэффициент трения и исключительные возможности скольжения стружки по передней поверхности инструмента. Такой способ наиболее эффективен при обработке вязких материалов или в случаях затрудненной подачи смазки в зону резания, поскольку в значительной мере исключает опасность холодного приваривания стружки и образования нароста.

Градиентные покрытия, оптимизированные с учетом последовательности нанесения слоев, отличаются высокими износостойкостью, электрическими и диэлектрическими свойствами. ГФМ обладают высокой стойкостью к термическим ударам. Внешний слой ГФМ может представлять собой композицию $Al_xN_yO_z$, нанесенную на покрытие из AlN . Причем химический состав ее внешнего слоя изменяется от AlN до Al_2O_3 . Покрытие наносится на основу, состоя-

шую из нитридной керамики, методом химического осаждения. Оно обладает повышенной сопротивляемостью к окислительному износу и циклическому изменению термической нагрузки [91].

4.2 Опыт применения режущего инструмента с упрочняющими вакуумно-плазменными покрытиями в обработке резанием

Технологии нанесения покрытий на режущий инструмент начали интенсивно разрабатываться в начале 70-х гг. XX столетия. В 1975 г. за рубежом выпускалось 95 марок пластин с покрытиями TiC , 21 марка с покрытиями TiN , 8 марок – с $TiCN$, 2 марки – с Al_2O_3 и 2 – с поликристаллическими алмазными покрытиями. В начале 80-х гг. в мире выпускалось уже около 175 марок твердосплавных пластин с однослойными покрытиями, 34 марки – с трехслойными, причем из них 110 марок – с покрытиями на основе TiC [92]. В настоящее время 70 % всех инструментов в мире выпускается с защитными покрытиями.

Широкое использование инструмента с покрытиями обусловлено его высокой работоспособностью и возможностью интенсифицировать процесс резания при неизменном ресурсе стойкости инструмента [93]. Нанесение покрытий на режущий инструмент позволяет значительно повысить стойкость инструмента. В различных отечественных и зарубежных работах отмечается факт повышения периода стойкости от 1,5 до 10 раз и более. Однако на различных технологических операциях обработки резанием эффективность инструмента с покрытием неодинакова. В частности, при переходе от непрерывного к прерывистому резанию эффективность их применения снижается примерно в 2 раза. В случае применения инструмента с покрытием при прерывистом резании имеют место два процесса: трещинообразование в инструментальном материале (трещины 1-го типа образуются на границе со слоем и прорастают в основу и покрытие) и трещинообразование в покрытии (трещины 2-го типа образуются на поверхности покрытия и прорастают в инструментальную основу) [94, 95]. Таким образом, покрытие подвергается разрушающему воздействию трещин как со стороны поверхности, так и со стороны основы [95].

Результаты экспериментальных исследований показывают, что покрытия TiN , TiC обеспечивают многократное (от 2 до 5 раз) повышение стойкости инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов при обработке конструкционных углеродистых сталей нормальной и повышенной твердости и малоэффективны при резании

рудоборазовательных инструментах [92]. В последнем случае наиболее способные оказались покрытия на основе карбидов и нитридов молибдена, гафния, циркония, а также многокомпонентные и многослойные покрытия различных конструкций.

Покрытия TiN , TiC , Al_2O_3 на инструментах из быстрорежущих сталей и твердых сплавов снижают (до 20 %) силы резания, коэффициент укорочения стружки и уменьшают мощность тепловыделений. Снижение сил и температур резания на 20–40 %, позволяет повысить стойкость режущего инструмента в 2 и выше раз, или увеличить скорость резания от 20 до 60 % и значительно улучшить шероховатость обработки.

Исследователи подчеркивают комплексный характер влияния покрытий типа TiN на взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом, отмечают уменьшение коэффициента трения, снижение сил и температуры резания, улучшение прочностных свойств инструментальной основы, повышение твердости и теплоустойчивости рабочих поверхностей инструмента, снижение схватываемости рабочих поверхностей с обрабатываемым материалом, высокую прочность адгезии покрытия с инструментальной основой, обеспечение покрытием барьера для диффузионного растворения инструментальной основы в обрабатываемом материале, предохранение инструментальной основы от влияния высоких температур резания благодаря теплоизоляционному эффекту. Отмечается, что для твердосплавных инструментов на первый план выступает барьерный эффект покрытия, выражающийся в предотвращении взаимного диффузного растворения обрабатываемого и инструментального материалов. Эта точка зрения подтверждается ускорением изнашивания твердосплавного инструмента при повреждении покрытия [92]. Применение ионно-плазменных тугоплавких покрытий $TiC - TiN$ повышает стойкость инструмента из сплава ВК6 в 2,5 раза [96]. Тонкая (до 4 мкм) пленка TiN , наносимая на керамическую подложку (основа – Si_3N_4), повышает производительность инструмента более чем в два раза [97]. Объясняется это тем, что нитридтитановые покрытия обладают весьма плотной мелкодисперсной структурой с размером зерна порядка 80–200 нм.

В настоящее время ведущими зарубежными фирмами ("Sandvik Coromant" (Швеция), "Kennametal" (США, Германия), "Corloy Inc." (Южная Корея), SGS Tool Company (США), "Metallwerke Plansee AG" (Австрия), "Walter AG" (Германия), "Mitsubishi Carbide" (Япония), "Seco" (Швеция) и др.) выпускается широкий ассортимент режущих инструментов с покрытиями из двух или более слоев различного со-

става: карбидов (TiC), нитридов (TiN), карбонитридов ($TiCN$), алломинитридов ($TiAlN$) титана, оксида алюминия (Al_2O_3). Толщина слоя преимущественно составляет до 10 мкм.

Особый интерес представляет композиционное покрытие двойного нитрида $TiAlN$. Это покрытие обладает такой же кубической структурой, как и TiN , но имеет меньший период решетки, что отражается на его твердости (2720 против 1930 НВ соответственно). Адгезионная прочность, оцениваемая как предельная нагрузка при испытаниях скрайбированием, составляет 80,3 и 60,3 Н для $TiAlN$ и TiN . Покрытие $TiAlN$ стабильно при температуре 710–830 °С, в то время как покрытие TiN начинает окисляться при 550 °С. Объясняется это тем, что на поверхности ($TiAl$)N формируется защитный аморфный слой Al_2O_3 , предотвращающий дальнейшее окисление.

Следовательно, долговечность инструмента с покрытием из $TiAlN$ значительно превосходит долговечность инструмента с нитридотитановым слоем [98]. Например, стойкость сверл из быстрорежущей стали с покрытием из $TiAlN$ при сверлении отверстий в чугуне и сплаве $Al-Si$ соответственно в 12 и 3 раза выше, чем у сверл с нитридотитановым слоем [99]. Наносится такое покрытие, как правило, методами PVD на любые инструментальные материалы. Инструмент с покрытием из $TiAlN$ целесообразно применять для обработки медных, титановых, никелевых сплавов, нержавеющей стали и легких металлов [100]. Шведская фирма "Sandvik Coromant" выпускает твердосплавные режущие пластины с покрытием $TiAlN$ (сплав GC1105), $TiAlN-TiN$ (сплавы GC1025, GC2035), нанесенным методом PVD [101]. Толщина покрытия составляет 4 мкм. Эти покрытия обладают высокой износостойкостью и одновременно прочностью, а также обеспечивает хорошую сопротивляемость выкрашиванию. Такие пластины рекомендуются для лезвийной обработки жаропрочных сплавов и высоколегированных нержавеющей стали.

Материал GC415 имеет трехслойное покрытие: нижний слой TiC толщиной 4,5 мкм обеспечивает хорошую связь с основой и высокую износостойкость материала при низких и средних скоростях резания; промежуточный слой Al_2O_3 толщиной 3 мкм обеспечивает стойкость при высоких температурах и снижает опасность наростообразования при обработке серых чугунов; наружный слой TiN толщиной 1 мкм уменьшает трение между задней гранью резца и сходящей стружкой. При точении конструкционных сталей и серых чугунов стойкость этого материала на 50 % выше, чем у других режущих материалов [102]. Многослойное CVD покрытие $TiCN-Al_2O_3-TiN$

вадет стойкость к высоким температурам и хорошую износостойкость, снижает силы трения и склонность к образованию нароста. Сплав GC235 имеет покрытие CVD $TiC-TiCN-TiC$, предназначенное для повышения износостойкости и снижения коэффициента трения. Пластины из сплава GC4225 с покрытием $TiCN-Al_2O_3$ рекомендуются для обработки стальных заготовок твердостью до 300 НВ. Для фрезерования сталей и чугунов выпускаются пластины из твердого сплава марки GC120 с трехслойным покрытием $TiN-TiC-TiN$.

Покрyтия, наносимые на режyщие пластины для точения и фрезерования австрийской фирмы "Metallwerke Plansee AG", состоят, как правило, из TiC , TiN и $Ti(CN)$ в различных сочетаниях. В частности, многослойное покрытие толщиной 10 мкм может состоять из внутреннего слоя TiC , обеспечивающего прочную связь с подложкой, нескольких тонких промежуточных слоев $Ti(CN)$ переменного состава и наружного слоя $Ti(CN)$, стойкого к диффузионному износу. Стойкость таких пластин по сравнению с обычными твердосплавными выше на 100–500 %, а по сравнению с твердосплавными пластинами с однослойными покрытиями из TiC или TiN – на 25–200 %. Серия режущих пластин с трехслойными покрытиями ($TiC-Ti(CN)-TiN$) толщиной 5 мкм предназначается специально для сверхвысокоскоростного фрезерования чугунов и сталей.

Сравнительные испытания твердосплавных режущих пластин в производственных условиях показали, что на одинаковых режимах износ пластин различных производителей, покрытых нанокomпозитными покрытиями, по технологиям, разработанным ИТЦ "Нанотехнология" (г. Харьков), в 2,6–4 раза меньше, чем не покрытых. Покрытия имеют нанослойную структуру и состоят из слоев на основе алюминия, титана, хрома, циркония, молибдена и их соединений с азотом, углеродом, кислородом в разных сочетаниях толщиной – 5–10 нм (преимущественно $TiAlN$). Микротвердость таких покрытий составляет 25–45 ГПа (в зависимости от состава покрытия).

Многослойные покрытия, разработанные на кафедре "Металло-режущие станки и инструменты" Ульяновского ГТУ, позволяют повысить период стойкости твердосплавного инструмента при токарной обработке из стали 5ХНМ – в 7...8 раз, а из стали 12Х18Н10Т – в 3...4 раза; при торцовом фрезеровании заготовок из сталей 45 и 5ХНМ в 7...8 раз. Для инструмента, работающего в условиях непрерывного резания, были разработаны двухслойные покрытия $TiN-TiAlN$ и трехслойные $TiN-TiCN-TiZrN$. Разработаны двухслойные и

трехслойные покрытия на основе TiN , $TiZrN$, $TiMoN$ и $TiAlN$, применение которых по сравнению с однослойными покрытиями, нанесенными по традиционной технологии, позволяет повысить период стойкости режущего инструмента в 1,6–4,2 раза. Разработанные двухслойные покрытия из нитридов и карбонитридов титана позволили повысить период стойкости твердосплавных пластин при фрезеровании заготовок из сталей 5ХНМ и 12Х18Н10Т в 1,5–3 раза [103].

Для нанесения покрытий на твердый сплав ряд фирм использует в различных сочетаниях соединения титана и гафния (начиная с однослойных покрытий из $Ti(CN)$ или из твердого раствора $TiC-HfC$ и заканчивая сложными покрытиями). В сложных покрытиях прилегающий к твердому сплаву слой толщиной 0,5–10 мкм формируют из HfC , HfN или $Hf(CN)$, так как КТР этих соединений близок к КТР твердого сплава. Вторым слоем служат один или несколько твердых растворов типа $(HfTi)C$, $(HfTi)N$ или $(HfTi)CN$ толщиной 0,1–5 мкм. Наружный (рабочий) слой состоит только из соединений титана типа TiC , TiN или $Ti(CN)$ толщиной 0,5–10 мкм.

В качестве износостойких покрытий, позволяющих улучшить эксплуатационные свойства режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 и твердого сплава ВК8, в работе [104] использованы оксидно-карбидная керамика $(SiC-SiO_2)$ и композиционное, многослойное покрытие $(Ti+(Ti-Zr)N)-(Ti-Zr)N$.

Существенно большую эффективность по сравнению с однослойными покрытиями TiC и TiN имеют также покрытия на основе HfN и $(TiCr)N$. Производительность инструмента с покрытием HfN вместо TiN увеличивается в среднем на 30 % при точении нержавеющей стали, на 100 % – при непрерывном точении среднеуглеродистой стали и на 200 % – при обработке чугуна [105].

Существенно повысить стабильность кристаллохимических свойств материала можно путем применения покрытия на основе системы $(Ti, Cr)N$, которая обладает высокой сопротивляемостью к окислению и сохраняет свои характеристики при более высоких температурах, чем покрытия из TiN и CrN [106].

Особый интерес представляют покрытия из нитрида хрома. Фирма "Tecvac Ltd" (Великобритания) усовершенствовала процесс получения покрытия из нитрида хрома методом PVD. Инструмент с нитридохромовым покрытием, эффективность которого значительно выше по сравнению с нитридотитановым, рекомендуется использовать при обработке латуни [107]. Твердосплавный инструмент с покрытием $TiC-Al_2O_3$ рекомендуется для работы в условиях прерыви-

более высокими механическими свойствами, теплоустойчивостью и химической инертностью [108].

В настоящее время большое внимание уделяется разработке режущего инструмента с алмазными покрытиями, обладающего высокими механическими, химическими и термическими свойствами. В практике механообработки все чаще встречаются примеры применения твердосплавного или керамического инструмента с алмазными покрытиями, которые могут в 10-20 раз увеличивать срок службы инструмента (особенно сложной формы) при обработке графита, алюминиевых, алюминиево-кремниевых и магниевых сплавов, керамики, латуни.

Шведская фирма "Sandvik Coromant" выпускает режущие пластины марки CD1810, представляющие собой специальный твердый сплав с алмазным покрытием, нанесенным методом CVD. Очень высокая износостойкость алмазного покрытия толщиной 6-8 мкм обеспечивает ему все необходимые качества для чистовой обработки цветных металлов [101]. Фирма "Norton Diamond Film" (США) представила на рынок режущие инструменты из твердого сплава с алмазным покрытием "DF500 CVD-diamond" [109]. Исследования работоспособности инструментов с алмазными покрытиями показали, что по сопротивлению абразивному изнашиванию они близки инструментам из поликристаллического алмаза, а по прочности существенно выше. При получистовом точении ($S = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм) алюминиевого сплава стойкость резцов с покрытием (толщина 30 мкм) в 1,5 раза выше, чем инструментов из поликристаллического алмаза (размер зерна 25 мкм). Учитывая относительно грубую поверхность CVD-покрытия, инструменты не рекомендуются для финишной обработки.

Для обработки резанием деталей из цветных металлов на основе алюминия фирма "Sumitomo Electric" (Япония) разработала многогранные пластины из керамики Si_3N_4 с алмазным покрытием. Тонкие алмазные покрытия (до 50 мкм) находят широкое применение на инструментах сложной формы (сверлах, развертках и др.). Такие покрытия, в отличие от поликристаллов, не содержат связки, обладают твердостью, практически равной твердости природного алмаза, большей теплопроводностью в сравнении с медью.

По мнению специалистов германской фирмы "Cemcon", чем мельче кристаллы в алмазном покрытии, тем выше может стать его планируемая стойкость. При нанесении покрытия размером с зерно

в нанотермическом диапазоне можно рассчитывать практически на 100-кратное увеличение периода стойкости инструментов по сравнению с характерной для обычных сейчас размеров зерна в покрытиях в пределах 1-5 мкм. Такое «гладкое» покрытие позволяет выполнять без применения СОЖ обработку силуминовых сплавов, а также многих других труднообрабатываемых материалов.

4.3 Нанесение вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ)

Получили широкое распространение системы «быстрорежущая сталь-покрытие» и «твердый сплав-покрытие». Инструменты с режущими элементами из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) наиболее целесообразны при обработке закаленных сталей и сплавов, широкой гаммы чугунов, наплавленных и напыленных покрытий высокой твердости, литых высокомарганцовистых сталей [110]. Несмотря на то, что проблема повышения работоспособности инструментов, оснащенных такими режущими элементами, является актуальной, данных по системе «КНБ-покрытие» не достаточно. Механизм изнашивания режущих инструментов с ПСТМ на основе КНБ связан с химическим взаимодействием в зоне резания [111]. Поэтому функция вакуумно-плазменного покрытия на ПСТМ состоит в перераспределении контактных напряжений на рабочих поверхностях инструмента и снижении интенсивности химического взаимодействия КНБ с обрабатываемым материалом, окисление.

Таковыми качествами обладают многослойные PVD-покрытия систем $Ti-NbN-Al_2O_3$, $Nb-NbN-Al_2O_3$ с верхним слоем Al_2O_3 . Структура покрытия включает три участка: 1-й слой Ti и Nb обеспечивает снижение тепловых напряжений в покрытии при формировании композита; 2-й слой NbN минимизирует интенсивность химического взаимодействия инструментального материала на основе КНБ с обрабатываемым; 3-й слой Al_2O_3 обеспечивает барьер для взаимодействия КНБ с кислородом воздуха, минимизирует окисление и образование легкоплавкого борного ангидрида B_2O_3 .

Для получения покрытий используются установки типа «Булат», оснащенные тремя вакуумно-дуговыми источниками плазмы и ВЧ источником питания подложки для нанесения покрытий на основе оксидов [112]. Конструкция установки предусматривает размещение напы-

емых изделий на вращающемся держателе (рис. 4.1), помощью которого они последовательно перемещаются в зону действия вакуумно-дуговых источников. В зависимости от расстояния до источников плазмы и испаряемого материала на рабочих поверхностях изделия осаждаются различные слои покрытия.

В качестве испаряемых материалов (расходуемых катодов) используются титан ВТ-1-00, ниобий вакуумного перепада НО, алюминий марок АВ000, А999 и реакционные газы – азот и кислород. Очистка поверхности режущих элементов из ПСТМ на основе КНБ осуществляется в вакууме $P = 1 \cdot 10^{-3}$ Па бомбардировкой в одном случае ионами титана ускоренными потенциалом подложки до $U = -1,1$ кВ при токе дуги 90 А, в течение 3...5 минут при температуре $T = 400-450^\circ \text{C}$, или ионами ниобия при токе дуги 130 А ($U \sim 800$ В).

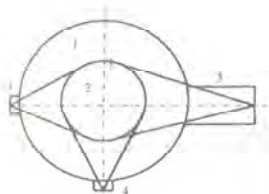


Рисунок 4.1 Схема установки для осаждения многослойных вакуумно-дуговых покрытий на ПСТМ:

1 – рабочая камера;

2 – вращающийся держатель;

3–5 – испарители титана, ниобия и алюминия соответственно

После ионной бомбардировки напыляемые изделия перемещались в зону действия плазменного потока, генерируемого ниобиевым источником и в рабочую камеру установки подавался азот (режим осаждения покрытия $NbN - P_{N_2} = 3 \cdot 10^{-3}$ Па; $I_A^{Nb} = 140$ А; $U_{см} \sim 200$ В; $t = 10$ минут). После нанесения слоя покрытия NbN толщиной 3–3,5 мкм азот откачивался и напыляемые изделия перемещались в зону действия алюминиевого источника, и в рабочую камеру установки через специальный вентиль напускался кислород. Процесс формирования покрытия Al_2O_3 проводился при начальном давлении кислорода $P_{O_2} = 6 \cdot 10^{-3}$ Па, которое постепенно (за 10 минут) увеличивалось до $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Режим осаждения покрытия $Al_2O_3 - I_A^{Al} \sim 70$ А; $U_{см} \sim 60$ В. Толщина покрытия – 1,5–2 мкм.

В результате на инструменте из КНБ формируются многослойные покрытия $Ti-NbN-Al_2O_3$ и $Nb-NbN-Al_2O_3$ (рис. 4.2, 4.3).

Al_2O_3	1,5-2 мкм	Al_2O_3
NbN	3-3,5 мкм	NbN
Nb	0,5 мкм	α -Ti
ПСТМ на основе КНБ		ПСТМ на основе КНБ



Рисунок 4.2 Конструкция многослойных покрытий на режущих элементах из ПСТМ на основе КНБ

Рисунок 4.3 Поперечное сечение покрытия $Ti-NbN-Al_2O_3$ на поверхности режущего элемента: 1 – основа; 2 – Ti; 3 – NbN; 4 – Al_2O_3

4.4 Нанесение вакуумно-плазменных покрытий на порошки сверхтвердых материалов

Металлизация алмаза [113] является современным методом увеличения прочности закрепления алмаза в связке и адаптации его к условиям изготовления и эксплуатации инструмента. Для инструмента на металлических связях в качестве покрытий на алмазных зернах наиболее перспективными являются покрытия из карбидообразующих переходных металлов – молибдена и титана и их соединений. В последнее время для целей металлизации интенсивно развиваются вакуумные методы осаждения покрытий, которые базируются на физических процессах испарения и конденсации [114].

Основной особенностью процесса нанесения покрытия на микрообъекты (зерна алмазного порошка) в сравнении с нанесением покрытий на макрообъекты является необходимость их постоянного перемешивания в потоке атомов и кластеров материала, который испаряется или распыляется. Это необходимо для нанесения равномерного слоя вокруг зерна. Направление потока частичек должно быть сверху вниз на напыляемый порошок.

Схема модернизированной для напыления на порошки установки “Булат” представлена на рис. 4.4. В вакуумной камере на ее верхнем фланце монтируется источник электродугового испарения материала. Внизу напротив катода по одной оси размещается устройство экспонирования зерен порошка. Коаксиальное размещение устройства позволяет напылять большее или же меньшее количество порошка, используя соответственно большую или меньшую площадь экспонирования.

Для перемешивания порошка используются барабаны с горизонтальной осью вращения. Такие устройства являются эффективными для порошков с высокой сыпучестью, которыми являются алмазные шлифпорошки. Для активации перемешивания зерен порошка устанавливаются два активатора скребкового типа. Передний активатор выпуклый и перемещает зерна порошка не только из нижнего слоя на верхний, но также со среднего диаметра площади тарелки устройства экспонирования на периферию и в центр, а второй – вогнутый, который при перемешивании зерен порошка смешивает их наоборот, из периферии и центра на среднюю линию. Таким образом, зерна порошка интенсивно перемешиваются. Для эффективного использования ионного потока, который синтезируется в процессе микродугового выпаривания, при установлении в устройстве экспонирования тарелки малого диаметра используют также электромагнитную катушку, что позволяет сжать ионный поток. Процесс нанесения покрытия проводится в вакууме, поэтому наиболее оптимальным является метод нагрева излучением, с помощью вольфрамовых нагревателей. Напряжение на нагревателе должна быть меньше напряжения зажигания и поддержания существующего разряда ($U < 20$ В). Температура на подвижном рычаге устанавливается за зоной перемешивания в области нанесения покрытия. Данные Оже-спектроскопии свидетельствуют, что при осаждении высокоэнергетические атомы и ионы карбидообразующего металла взаимодействуют с углеродом алмаза и образуют элементы химических соединений типа карбидов [115, 117]. Толщина карбидного переходного слоя и количество карбидных образований определяется подвижностью этих образований на поверхности, скоростью образования зародышей их структур на поверхности алмаза, ростом зародышей по поверхности алмаза и наращиванием их сверху. На поверхности алмаза в результате эффективного быстрого охлаждения фиксируются метастабильные структуры карбидов молибдена, которые при их последующем нагреве преобразуются в стабильные при данных температурах [115].

При осаждении высокоэнергетического ионно-атомного потока молибдена температура алмазного зерна, при которой реализуется закалывание данной кристаллической структуры карбида, тем ниже, чем более высокотемпературная структура карбидной фазы фиксируется в переходном карбидном слое. Формирование значительной толщины переходного слоя карбида молибдена связано с температурой плавления молибдена и карбида молибдена.

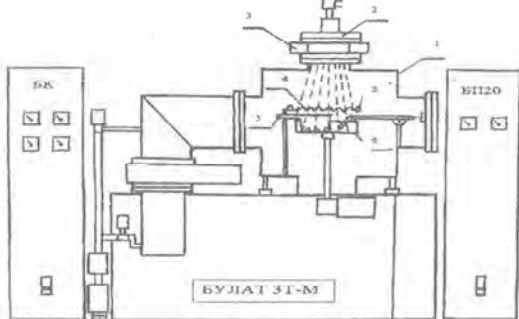


Рисунок 4.4 Установка вакуумно-дугового и магнетронного напыления на алмазные порошки: 1 – вакуумная камера; 2 – устройство микродугового испарения материала; 3 – фокусирующая катушка; 4 – вольфрамовые спирали нагревателя; 5 – активатор перемешивания зерен порошка; 6 – тарелка экспонирующего устройства; 7 – термопара (на рисунке не указана); 8 – волоохлаждаемые медные электрические подводы нагревателя; БК – блок управления установкой; БП 20 – блок питания магнетрона

В то же время, при осаждении высокоэнергетического нонно-атомного потока титана на поверхность алмазного порошка, при температуре порошка в диапазоне $300\text{--}600^\circ\text{C}$, в переходном слое не формируется значительного количества карбида титана. Поэтому, методом рентгенофазового анализа не удастся зафиксировать карбид титана, хотя метод Ожеспектроскопии [118] показывает, что на границе алмаз – титановое покрытие образуется карбид титана. По аналогии с молибденом, рентгено-аморфная структура карбида титана при температуре высшей $0,2T_{пл} = 738\text{ K} = 465^\circ\text{C}$ должна была бы перекристаллизоваться. Но при температурах осаждения 500 и 600°C метод рентгенофазового анализа карбидную фазу в переходном слое покрытия не фиксирует. Это указывает на совсем малое количество карбида титана, который образуется в переходном слое титанового покрытия. В отличие от молибдена и карбида молибдена, в которых температуры плавления фактически равные и, соответственно, близкая их поверхностная диффузия, для титана и карбида титана температуры плавления значительно отличаются. При конденсации титана температура $0,28T_{пл}$, выше которой влияние энергии конденсирующихся атомов на структуру покрытия не представ-

яется возможным 342 К (270 °С). Для карбида титана она составляет - 1034 К (761 °С), и если при образовании при конденсации высокоэнергетических атомов титана элементов карбида, поверхностная диффузия значительно ниже, то на поверхности алмаза растут в основном зародыши титана до встречи их границ. Указанных температур достаточно, для того чтобы проходил также процесс роста больших зародышей за счет меньших, а также процесс зарастивания образовавшихся между зародышами пор при столкновении их границ. В дальнейшем прямой доступ высокоэнергетическим атомам титана к атомам углерода на поверхности алмаза перекрывается. Объемная диффузия при таких температурах очень низкая и дальнейшее карбидообразование становится невозможным. Происходит наращивание зародышей сверху. При таких температурах осаждения преобладает столбчатая структура кристаллов титана [118]. В случае поступления углерода из реакционного газа рост карбидных зерен определяется не поверхностной диффузией элементов карбидов, а поверхностной диффузией атомов титана и углерода. Поэтому на рентгенограммах алмазных порошков, покрытых титаном при наличии газа метана, фиксируются линии фазы карбида титана.

Покрытие на алмазных частицах повышает их прочность и способствует лучшему удержанию алмазов в связке абразивного инструмента.

На рис. 4.5 – примеры нанесения упрочняющих покрытий на режущий инструмент.



а



б

Рисунок 4.5 Режущий инструмент ремонтного производства с упрочняющими вакуумно-плазменными покрытиями системы $Ti(C, N)-Cr(C, N)$; а)- фрезы для обработки поверхностей; б)- сложнопрофильный режущий комбинированный инструмент

5 ПРИМЕНЕНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЯМИ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

5.1 Лезвийная обработка при изготовлении запасных частей, упрочнении и восстановлении деталей машин

Опыт применения инструментов с покрытиями показывает, что они могут эффективно использоваться при обработке восстановленных деталей [119].

Работы, выполненные в Харьковском техническом университете сельского хозяйства, показывают, что твердосплавные резцы с покрытием TiN , позволяют обрабатывать детали, наплавленные проволокой Нп-30ХГСА под флюсом АН-348А (25...30 HRC) и в среде углекислого газа (22...27 HRC).

При черновом и чистовом точении наплавленных поверхностей происходит изнашивание режущей части резцов в наибольшей мере по главной задней поверхности. Более интенсивно изнашиваются резцы при точении наплавленных поверхностей «по корке». Причем интенсивность изнашивания режущей части резцов при точении наплавленных поверхностей зависит от наличия на обрабатываемой поверхности застывших брызг расплавленного металла, наплывов, окалины, пор, раковин, шлаковых включений: чем больше вышеуказанных дефектов, тем сильнее повреждаются резцы.

Следует отметить, что наиболее интенсивно изнашивается режущая часть резца в том месте, где разрушено покрытие, что свидетельствует об эффективности применения покрытия для повышения износостойкости резцов.

При точении наплавленных поверхностей «по корке» с макронеровностями более 1 мм вследствие значительного разрушения покрытия от ударов, обусловленных неравномерным по величине и твердости припуском, применение резцов с покрытием из нитрида титана неэффективно.

При повторных проходах (получистовом и чистовом точении наплавленных поверхностей) режущая часть резца с покрытием изнашивается в 1,5...1,6 раза меньше, чем резца без покрытия.

Основной причиной повышения стойкости резцов с покрытием из TiN является снижение температуры и усилия резания на 18...20 % (рис. 5.1), а также то, что материал покрытия образует диффузионный барьер (толщина покрытия 8...10 мкм), который препятствует проникновению в стружку компонентов основы твердого сплава с той скоро-

ство, с которым не происходит при резании резацми без покрытия. Кроме того, покрытие из TiN обладает более высокой температурой схватывания и низким коэффициентом трения с обрабатываемым материалом, в результате чего значительно уменьшается изнашивание режущей части резцов по передней поверхности.

Таким образом, применение резцов с покрытием из нитрида титана целесообразно при полустовом и чистовом точении наплавленных материалов, выполняемых при восстановлении изношенных деталей сельскохозяйственной техники.

Покрyтия из TiN обеспечивают повышение стойкости режущего инструмента в 1,5...1,6 раза, производительности труда на 20...25 %, и улучшение качества обработанной поверхности.

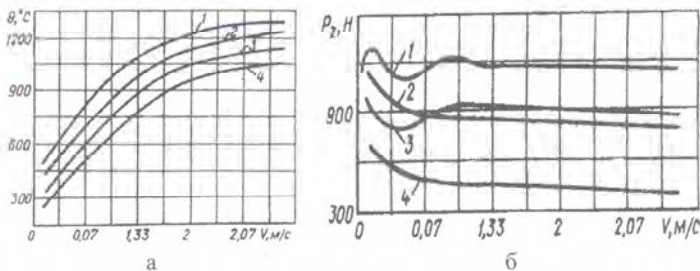


Рисунок 5.1 Влияние скорости резания V на температуру Q (а) и усилие резания P_z (б) при точении металла, наплавленного под флюсом АН-348А (кривые 1,3) и в среде углекислого газа (кривые 2, 4), резацми без покрытия (кривые 1, 3) и с покрытием из TiN (кривые 2, 4)

Для иллюстрации на рис. 5.2 показана гамма режущих инструментов с покрытием, а на рис. 5.3, 5.4 и в табл. 5.1, 5.2 представлены примеры эффективного использования такого инструмента.

Таблица 5. — Эффективность покрытий

Твердый сплав	Покрытие	Коэффициент повышения стойкости инструмента	
		Точение стали 45	Точение стали ХНГТЮР
ВК6	TiC — TiCN — TiN ГТ	9,4	2,7
	CrC ДТ	1,7	1,6
	TaC ДТ	3,4	1,4
	NbC ДТ	3,0	1,2
	TiC ДТ	3,9	1,8
	(Ti — Nb)C ДТ (Ti — Cr)C ДТ	2,6	1,6
		2,6	2,3
ТТ10К8Б	TiC — TiCN — TiN ГТ	9,2	3,0
	CrC ДТ	1,9	1,9
	TaC ДТ	2,3	2,1
	NbC ДТ	2,2	2,0

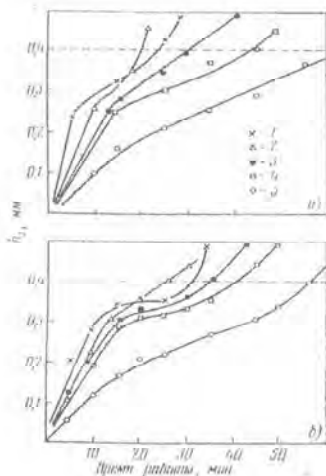


Рисунок 5.2 Зависимость износа от времени при сверлении ($v = 31,4$ м/мин; $S = 0,32$ мм/об) стали 45 (156 НВ) сверлами \varnothing 8 мм из быстрорежущей стали P6M5 ($2\varphi = 118^\circ$; $\psi = 55^\circ$; $\omega = 34^\circ$; $d_0/D_{\text{св}} = 0,2$): а — $l = 16$ мм; б — $l = 25$ мм; 1 — P6M5; 2 — P6M5 — шанипрокат; 3 — P6M5 — нитиное азотирование; 4 — P6M5 — TiN (5 мкм); 5 — P6M5 — TiCN (8 мкм).

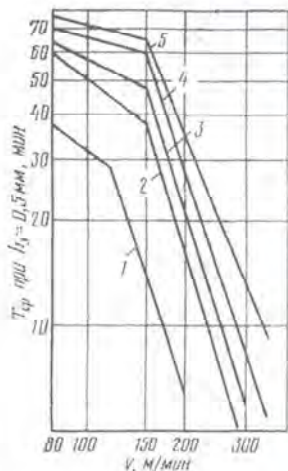


Рисунок 5.3 Влияние скорости резания на стойкость твердосплавных пластинок с различными покрытиями при симметричном фрезеровании стали 40X (220 НВ) с $B = 140$ мм; $t = 2$ мм; $S_z = 0,3$ мм/зуб: 1 — ТТ10К8Б; 2 — ТТ10К8Б — TiC; 3 — MC 2210; 4 — ТТ10К8Б — TiN; 5 — P6M5.

Исследованию влияния износостойких покрытий на работоспособность режущих инструментов посвящено достаточно много работ. В то же время, как показал анализ литературных источников, систематических исследований, связанных с разработкой технологий нанесения покрытий на режущий инструмент из кубического нитрида бора (КНБ), их составов и эффективности применения проведено явно недостаточно.

Патенты № 2000130160 (Япония), № 4126851 (Германия), № 2136449 (США) содержат информацию о режущем инструменте из поликристаллического нитрида бора с покрытиями. Такие покрытия наносятся из материалов, которые существенно не отличаются от ранее приведенных, в частности они могут содержать TiN , $TiAlN$, преимущественно оксид алюминия (Al_2O_3), либо оксиды: циркония и (или) итрия, и (или) магния, и (или) титана, и (или) алюминия. Для нанесения оксидных покрытий, в частности, используется метод импульсного плазмохимического осаждения паров. Рекомендуется наносить покрытия толщиной 0,3–10 мкм, а параметр шероховатости поверхности Ra покрытия не должен превышать 0,2 мкм. Известен метод термического активированного химического осаждения из газовой фазы ($Ta-CVD$) алмазных и алмазоподобных покрытий на нитрид бора кубической модификации [120]. В качестве газовой фазы используется смесь водорода и метана. Такие покрытия наносили при температуре подложки 1075°C, давлении $13 \cdot 10^3$ Па и времени осаждения 0,5–16 ч. Расход газа при этом составлял 12–60 л/ч. Установлено, что температура несущественно влияет на процесс роста покрытия. Повышение расхода рабочего газа приводит к увеличению скорости осаждения покрытия. В работе [121] приведены результаты исследований износа инструмента, шероховатости поверхности и сил резания при точении закаленной стали AISI 4340 (53 HRC) инструментом, оснащенным пластинами (режущими вставками) из поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN) и твердого сплава CNMA432 (K313 "Kennametal Inc.", WC-Co (6% Co)) с покрытием с $BN-TiN$, нанесенным с использованием гибридного подхода. В этом случае частицы CBN наносили методом металлизации распылением в электростатическом поле (electrostatic spray coating), а нитрид титана наносился методом CVI (chemical vapor infiltration - CVD).

Твердые сплавы с покрытиями

Изменение свойств	Марки твердых сплавов по ГОСТ 3002-74	Группы применения по ИСО	Обрабатываемый материал	Методы получения покрытий				Сплавы, марки	Сплав ВП 1255 завода "Победит"				
				ДТ	ГТ	КМБ	КМБ						
<p>↑ Прочность</p> <p>↓ Износостойкость</p>	<p>Р</p>	<p>Основная группа</p>	<p>Сталь, стальное литье, ковкий чугун со смазкой</p>	<p>ДТ</p>	<p>ГТ</p>	<p>КМБ</p>	<p>MC 1460 MC 2210</p>	<p>ВН1255</p>					
									Р01	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 1460
									Р10	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 2210
									Р20	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 1460
									Р25	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 2210
									Р30	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 1460
									Р40	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 2210
									Р50	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 1460
									М05	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 2210
									М10	TTOKB6-T1C	TTOKB6-T1N	TTOKB6-T1N	MC 1460
<p>↑ Прочность</p> <p>↓ Износостойкость</p>	<p>М</p>	<p>Основная группа</p>	<p>Сталь, стальное литье, марганцовистая сталь, легированная чугун, аустенитные стали, ковкий чугун, абразивная сталь</p>	<p>ДТ</p>	<p>ГТ</p>	<p>КМБ</p>	<p>MC 1460 MC 2210</p>	<p>ВН1255</p>					
									М20	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									М30	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210
									М40	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									К01	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210
									К05	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									К10	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210
									К20	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									К30	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210
									К40	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
<p>↑ Прочность</p> <p>↓ Износостойкость</p>	<p>К</p>	<p>Основная группа</p>	<p>Чугун, вальцованное с кокальным литьем, ковкий чугун с легкими сплавами, закаленная сталь, цветные металлы, пластмасса, древесина</p>	<p>ДТ</p>	<p>ГТ</p>	<p>КМБ</p>	<p>MC 1460 MC 2210</p>	<p>ВН1255</p>					
									К01	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									К05	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210
									К10	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									К20	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210
									К30	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 1460
									К40	ВК6-T1C	ВК6-T1N	ВК6-T1N	MC 2210

Рисунок 5.4. Области рационального использования различных марок твердых сплавов с покрытиями: ДТ – метод термомодифицированного насыщения; ГТ – насыщение карбид-титановых покрытий из парогазовой фазы

высокой силы резания и шероховатость поверхности немого выше, чем при использовании инструмента, оснащенного PCBN, а стойкость инструмента ($v = 125$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,25$ мм) при достижении величины $h_3 = 0,2$ мм составляет 18 и 32 минуты соответственно, обрабатываемым материалом применяются режущие пластины с покрытием $TiAlN$. Для минимизации изнашивания за счет окислительных процессов наносятся покрытия из Al_2O_3 , например, пластины KB9640 (фирма "Kennametal Hertel", США) с CVD-покрытием с верхним слоем из Al_2O_3 [122]. В последнее время практически все мировые производители выпускают режущие инструменты, оснащенные ПСТМ на основе КНБ с защитными покрытиями.

Для нанесения на режущие пластины КНБ многослойных защитных покрытий используется CVD – технология (рис. 5.5). Считается, что покрытие обеспечивает более высокую стойкость инструмента при термическом и химическом диффузионном износе, благодаря более медленному образованию кратера износа на передней поверхности инструмента, в сравнении с пластинами без защитного покрытия. Пластины рекомендуются для грубой и чистовой обработки перлитных серых чугунов.

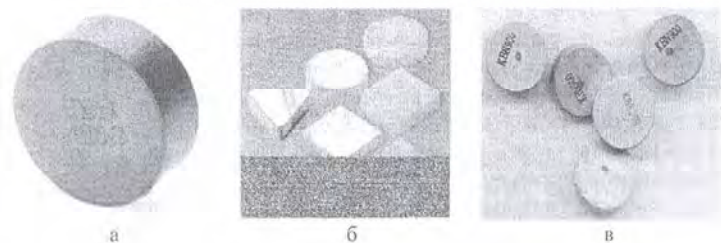


Рисунок 5.5 – Режущие пластины из ПСТМ на основе КНБ с защитными покрытиями: а – Secomax CBN400C (содержание фазы КНБ – 90 %; размер зерна 3–6 мкм; покрытие $(Ti, Si)N$); б – KB 9640 PCBN (высокое содержание КНБ; многослойное покрытие из оксида алюминия), в – KBN900: ПСТМ на основе КНБ с защитным PVD покрытием состава $TiAlN$

На рис. 5.6 приведены фотографии изношенных участков инструмента из ПСТМ без покрытия и с покрытием. Как видно из представленных фотографий, на контактных поверхностях инструмента без покрытий имеет место интенсивный массоперенос, связанный с нали-

панием обрабатываемого материала. Анализ фотографий, полученных в режиме фазового контраста, выявляет интенсивное формирование паллета на неконтактных поверхностях инструмента.



а



б

Рисунок 5.6 Вид изношенных участков инструмента при точении стали ХВГ (50–55 HRC): а – без покрытия; б – с покрытием Al_2O_3-NbN

На рабочих поверхностях инструментов с защитными покрытиями наблюдается износ как по задней, так и по передней поверхностям. Отчетливо видна лунка на передней поверхности инструментов. Для всех рассматриваемых инструментов с покрытиями практически отсутствует палливание обрабатываемого материала со стороны задней поверхности, что свидетельствует о снижении адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом. Для проверки работоспособности режущих инструментов с покрытиями проведена серия стойкостных экспериментов по обработке закаленных сталей, никелевых сплавов и чугунов. Результаты исследований приведены в табл. 5.2–5.8 и на рис. 5.8–5.10. В качестве инструмента использовали проходной прямой резец с механическим креплением неперетачиваемых сменных пластин RNMN 070300T; геометрические параметры режущей части: передний угол $\gamma = -10^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$; Обрабатываемый материал: сталь ХВГ (55 HRC) $\varnothing 110-80$ мм. Обрабатываемый материал: сталь ШХ15 (62 HRC), продольное непрерывное безударное точение цилиндрической заготовки $\varnothing 115-100$. Материал и форма пластины: неперетачиваемая режущая пластина из ПСТМ на основе кубического нитрида бора.

Инструмент	Режимы резания			J , мкм/мин
	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	
Без покрытия	165	0,09	0,25	35,00
	180			75,75
	208			87,87
С покрытием $Al_2O_3 + NbN$	165			28,73
	180			30,3
	208			64,00

Таблица 5.3 – Результаты обработки стали ШХ15

Инструмент	Режимы резания			J , мкм/мин
	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	
Без покрытия	88	0,05	0,25	10,345
	110			18,18
	140			31,8
	180			50,0
С покрытием $Al_2O_3 + NbN$	88			11,9
	110			15,87
	140			25
	180			40

Таблица 5.4 – Результаты обработки стали ШХ15

Инструмент	Величина h_3 (мм) при работе ($v = 110$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,25$ мм) в течение							
	2 мин	4 мин	6 мин	8 мин	10 мин	12 мин	14 мин	15,75 мин
Без покрытия	0,02 5	0,05	0,08	0,10	0,15	0,20	0,27	–
С покрытием $Al_2O_3 + NbN$	0,02 5	0,05	0,07	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25

Таблица 5.5 – Результаты обработки стали ШХ15

Инструмент	Величина h , (мм) при работе ($v = 88$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,25$ мм) в течение				
	5 мин	10 мин	15 мин	20 мин	29 мин
С покрытием Al_2O_3+NbN	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30

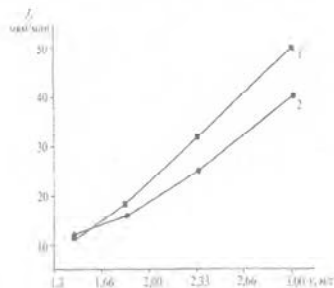
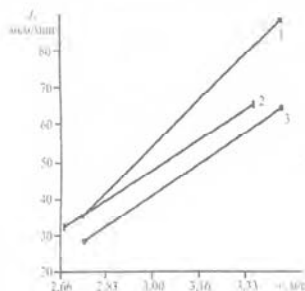


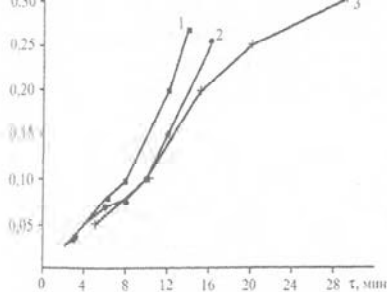
Рисунок 5.7 – Влияние скорости резания на скорость изнашивания инструментов, оснащенных ПСТМ без покрытия (1) и с покрытиями TiN (2) и Al_2O_3-NbN (3): сталь ХВГ (55 HRC); $t = 0,25$ мм; $S = 0,09$ мм/об

Рисунок 5.8 – Влияние скорости резания на скорость изнашивания инструментов, оснащенных ПСТМ без покрытия (1) и с покрытием Al_2O_3-NbN (2): сталь ШХ15 (62 HRC); $t = 0,25$ мм; $S = 0,05$ мм/об.

Для подтверждения результатов, полученных при проведении лабораторных стойкостных исследований, в условиях вальцетокарного участка сортопрокатного цеха Белорусского металлургического завода выполнены производственные испытания инструментов, ПСТМ на основе КНБ и КНБ с покрытием Al_2O_3-NbN . Испытывались гокарные резцы CRDPR25×5 с механическим креплением режущей пластины RNMN 070300T.

Таблица 5.6 – Режимы резания и результаты испытаний инструмента при точении твердых сплавов

ПСТМ	Режимы резания			Стойкость инструмента, мин
	v ,	S ,	t ,	
КНБ- Si_3N_4	0,25	0,24	0,9–1,1	120–130
КНБ- Si_3N_4 с покрытием Al_2O_3-NbN	0,28	0,27		150–165



факса износа по задней поверхности инструмента, оснащенного ПСТМ от времени точения стали ШХ15 (62 HRC):

1, 2 – $t = 0,25$ мм; $S = 0,05$ мм/об;
 $v = 1,83$ м/с;

3 – $t = 0,25$ мм; $S = 0,05$ мм/об;
 $v = 1,47$ м/с.

без покрытия (1)

с покрытием (2, 3)

Таблица 5.7 – Результаты обработки наплавленного никелевого сплава 08X18H9Г7Т

Инструмент	Режимы резания			J , мкм/мин
	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	
Без покрытия	237	0,1	0,25	18
С покрытием Al_2O_3 -NbN				13,62

Таблица 5.8 Результаты обработки масляного чугуна

Состав покрытия	Режимы резания			J , мкм/мин
	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	
Без покрытия	440	0,1	0,25	6,2
С покрытием Al_2O_3 -NbN				5,7

Анализ результатов (рис. 5.7 – 5.9) исследований процессов лезвийной обработки инструментами, оснащенными ПСТМ с покрытиями, позволяет рекомендовать следующее.

1. Защитное покрытие на режущем инструменте, оснащенном ПСТМ на основе КНБ, должно обладать высокими механическими свойствами для обеспечения возможности сопротивляться термобарическому нагружению инструмента в зоне резания. Кроме того, по-

крытие должно иметь возможность активно противодействовать вредным эффектам, имеющим место в зоне резания. В частности, обеспечивать противодействие химическому взаимодействию в зоне резания инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды. К таким покрытиям относится покрытие системы Al_2O_3-NbN .

2. Наиболее эффективно наносить защитные покрытия на многогранные неперетачиваемые режущие пластины.

3. Применение защитных покрытий на режущих инструментах, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, позволяет повысить их стойкость:

- при чистовой обработке закаленных сталей (55–62 HRC) на 25–30 %.

- при обработке наплавленного никелевого сплава 08X18H9Г7Т на 20%

- при обработке маслотногo чугуна на 10 %

- при обработке арматуры прокатных валков из твердых сплавов ВК15, ВК20, ВНК25, ВК30 на 25 %.

Эффективность применения покрытий увеличивается с ростом скорости резания. Применение покрытия Al_2O_3-NbN эффективнее, чем покрытия TiN , что соответствует разработанным представлениям о влиянии химического состава покрытия на интенсивность химического взаимодействия инструментального материала с обрабатываемым в зоне резания. Покрытие на режущих пластинах из ПСТМ на основе КНБ облегчает процесс оценки величины износа инструмента: 1 – ПСТМ на основе КНБ имеет черный цвет, в то время как покрытие, в большинстве случаев бывает желтого или стального цвета; 2 – более интенсивный массоперенос обрабатываемого материала на контактные поверхности инструмента без покрытия в сравнении с инструментом с покрытием позволяет выявлять размеры изношенных поверхностей без химического травливания или механического удаления с них лишнего обрабатываемого материала.

Наличие покрытия на рабочих поверхностях инструмента приводит к перераспределению напряжений, которые формируются в инструменте при его нагружении силами резания. При использовании покрытия Al_2O_3-NbN нормальные и касательные напряжения на передней поверхности инструмента снижаются до 25%. Напряженное состояние инструмента со стороны задней поверхности также характеризуется меньшими показателями. Снижение напряжений в режущем инструменте, особенно на этапе его приработки, способствует

повышению надежности инструмента в эксплуатации в условиях динамического нагружения.

Нанесение на рабочие поверхности инструментов защитных покрытий способствует увеличению их периода стойкости в связи со снижением интенсивности изнашивания за счет повышенного сопротивления поверхностного слоя инструмента окислительному воздействию окружающей среды, минимизации адгезионного и химического взаимодействий в зоне резания, между инструментальным и обрабатываемым материалами, меньшей величины износа инструмента, достигаемой на этапе приработки.

Инструменты с покрытиями обладают повышенной работоспособностью в условиях высоких температур, в частности, при работе с высокими скоростями резания, что связано с меньшей интенсивностью адгезионного и химического взаимодействий инструментального и обрабатываемого материалов между собой, а также ограничением влияния элементов окружающей среды. Для обработки закаленных деталей ориентировочные скорости резания при чистовой обработке – 2,5–3,5 м/с.

Учитывая особенности напряженного состояния инструмента с покрытием, можно предположить, что диапазон используемых подач и глубин резания также увеличивается.

5.3 Совершенствование архитектуры покрытий для режущего инструмента

Как отмечалось выше, износостойкие покрытия применяются для повышения стойкости режущего инструмента, который используется при изготовлении запасных частей из сталей и чугунов, упрочнении и восстановлении деталей с наплавленными и напыленными материалами при ремонте.

Для повышения сопротивления изнашиванию режущего инструмента инструментальный материал должен обладать не только механической прочностью, но и термостабильностью структуры. Высокая температура резания, возникающая в зоне контакта “инструмент-стружка”, зависит от площади контакта, которая, в свою очередь, во многом обусловлена топографией поверхности инструмента [123, 124]. Учитывая отмеченное, в этом отношении использование режущего инструмента с покрытиями дискретного типа выглядит наиболее перспективным – с одной стороны, наличие поверхности с дискретной топографией уменьшает площадь реального

увеличивает общую поверхность режущего элемента в пределах контакта с обрабатываемым материалом, что способствует большей диссипации тепла, выделяемого в зоне резания.

Как известно, при обработке материалов резанием реализуются разные виды изнашивания: абразивное, адгезионное, диффузионное и тому подобное. Наличие покрытия, особенно дискретного типа с высокими значениями адгезионной и когезионной прочности, позволяет, в некоторой степени влиять на механизм изнашивания, повышая стойкость инструмента.

На рис. 5.10, 5.11 показаны зависимости износа резцов из твердых сплавов T15K6 и T30K4 без покрытия и с различными покрытиями при точении стали 45 твердостью 230 НВ. Результаты исследований показали большую разницу в работоспособности инструментов.

Анализ приведенных данных показал, что инструменты из твердого сплава T30K4 без покрытия имеют стойкость в 3,5 раза меньше, чем резцы из того же материала с покрытием с $TiC+(Ti,Al)N$, а стойкость инструмента из твердого сплава T5K10 с покрытием в 6 раз выше в сравнении с инструментами из того же материала без покрытия.

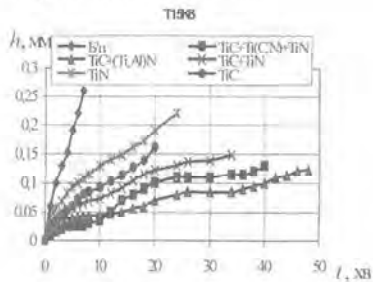


Рисунок 5.10 Зависимость величины износа h , инструмента T15K6 от времени работы t

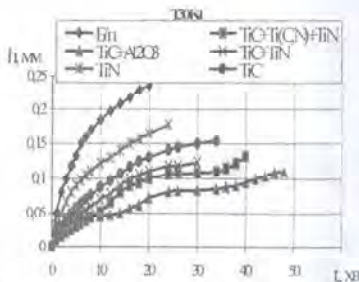


Рисунок 5.11 Зависимость величины износа h , инструмента T30K4 от времени работы t

Работоспособность инструментов с покрытиями можно проранжировать в последовательности: $TiC+(Ti,Al)N$, $TiC+Ti(C,N)+TiN$, $TiC+TiN$, TiC и TiN .

Для резцов с покрытиями TiN наиболее критическим является износ по главной задней поверхности в зоне вершины, в то время как для инструментов с покрытиями TiC — износ по флангу. Для

цов с покрытиями $TiC+TiN$ и $TiC+Ti(C,N)+TiN$, а также без покрытия критическим параметром является износ по вспомогательной задней поверхности, а для инструментов с покрытиями $TiC+(Ti,Al)N$ – по дополнительной задней поверхности и лунке.

Отмеченное объясняется тем, что покрытие изменяет механизм изнашивания режущего инструмента. Для твердосплавного инструмента с покрытиями более характерным является абразивное и адгезионное изнашивание, которое связано с удалением с рабочих поверхностей микрочастиц. Так, для покрытия $TiC+TiN$ и $TiC+Ti(C,N)+TiN$, а также инструментов без покрытия более характерно абразивное и адгезионное изнашивание, для покрытия TiN – абразивное, а для покрытия TiC и $TiC+(Ti,Al)N$ – адгезионное изнашивание. Трансформация основных характеристик процесса резания инструментом с износостойкими покрытиями связана как с прочностью самого покрытия, так и с тем влиянием, которое оно оказывает на изменение механизма изнашивания инструмента. Покрытие (TiC , TiN) на рабочих поверхностях инструмента приводит к значительному снижению (на 40–60%) длины контакта, коэффициента трения (на 20–30%) сил резания (на 20–30%) и увеличению угла сдвига [125, 126].

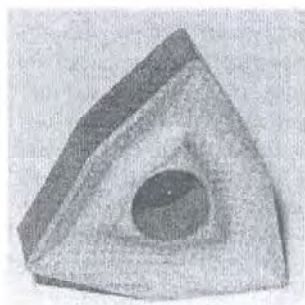
Приведенные результаты экспериментальных исследований показали, что для твердосплавных инструментов с двухслойными покрытиями $TiC+TiN$ и $TiC+(Ti,Al)N$ характерна узкая фаска износа по задней поверхности. Характер износа твердосплавных инструментов с покрытиями TiN близок к характеру износа резцов без покрытия, а инструменты с более твердым покрытием – TiC имеют сравнительно меньшую величину износа. Это можно объяснить недостаточной когезионной и адгезионной прочностью сплошного покрытия, в результате чего под воздействием значительных контактных нагрузок происходит разрушение покрытия – возникают микротрещины и покрытие отслаивается.

Неравномерный характер изношенных участков инструмента для менее сложных комбинаций покрытий (одно- и двухслойных) позволяет сделать вывод о целесообразности замены таких покрытий на покрытия, которые имеют повышенную адгезионную и когезионную прочность. Это позволит обеспечить стабильность физико-механических характеристик поверхностного слоя режущего инструмента, что возможно в результате использования покрытий особой конструкции – покрытий дискретного типа (рис. 5.12). Возможность изменения параметров покрытий дискретного типа позволяет рассматривать такое покрытие как уникальную среду, которая

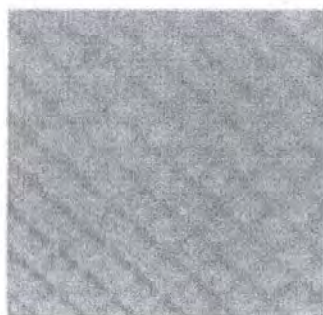
ного материала, но и управлять процессом резания за счет влияния на его основные характеристики.

Как видно из рис. 5.13, в результате значительных термодинамических нагрузок сплошные покрытия в процессе резки растрескиваются и отслаиваются от основы (рис. 5.13, *а*), в то время как в покрытиях дискретного типа практически отсутствующее отслоение от основы (рис. 5.13, *б*). Экспериментальные исследования процесса резания стали ШХ15 инструментом из твердого сплава Т15К6 без покрытия и с покрытиями $(Ti,Al)N$ сплошного и дискретного типов показали, что стойкость инструмента с покрытиями дискретного типа с плотностью $\psi = 57\%$ в 2,1 раза выше в сравнении с инструментом без покрытия, и в 1,4 раза в сравнении с инструментом со сплошными покрытиями (рис. 5.14).

Полученные результаты показывают, что в условиях контактного нагружения в системе «основа-покрытие», когда покрытие становится наиболее напряженным звеном, а уровень остаточных напряжений сжатия зависит от геометрических параметров покрытия, происходит перераспределение напряжений.



а



б

Рисунок 5.12 Вид твердосплавной пластины Т15К6 с покрытием TiN :
а – пластина Т15К6; *б* – фрагмент поверхности дискретного покрытия



а



б

Рисунок 5.13 Характер разрушения покрытия для пластины G15K6 с покрытием TiN сплошного (а) и дискретного (б) типов

В покрытиях дискретного типа остаточные напряжения сжатия имеют величину меньше, чем в сплошных покрытиях, то есть в процессе эксплуатации эффективные напряжения, которые включают эксплуатационные и остаточные, тоже меньше в покрытиях дискретного типа.

Важным конструктивным параметром покрытия дискретного типа является его плотность (ψ), которая зависит как от размера дискретных участков, так и от их размещения на поверхности инструмента. На рис. 5.15 приведена зависимость периода стойкости режущего инструмента с покрытием $(Ti,Al)N$ от его плотности.

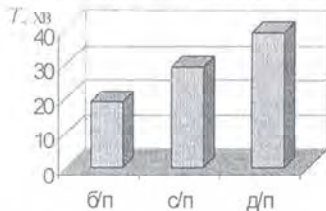


Рисунок 5.14 Сравнительная диаграмма стойкости инструмента при точении стали ШХ15 из твердого сплава G15K6 без покрытия и с покрытием $(Ti,Al)N$ сплошного и дискретного типов ($V = 1,2$ м/с; $s = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

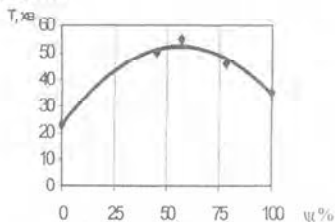


Рисунок 5.15 Зависимость периода стойкости режущего инструмента G15K6 с покрытием $(Ti,Al)N$ от плотности покрытия ψ ($V = 1,2$ м/с; $s = 0,1$ мм/об; $t = 0,3$ мм)

Существуют интервалы оптимальных значений плотности покрытия, которые отвечают условиям оптимального напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя покрытия и

в пределах 55–65 %.

На рис. 5.16 приведены зависимости стойкости режущего инструмента с покрытиями $(Ti,Al)N$ от скорости резания при точении стали ШХ15 твердосплавным инструментом Т15К6 с режимами резания $s = 0,1$ мм/об и $t = 0,5$ мм, а на рис. 5.17 – от подачи при $V = 1,2$ м/с и $t = 0,5$ мм.

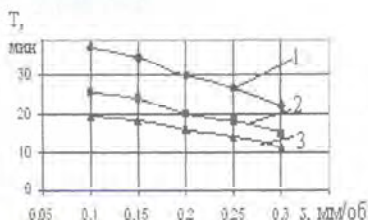
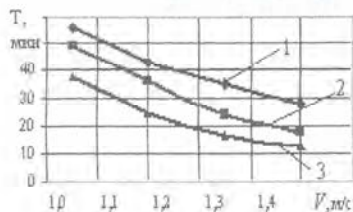


Рисунок 5.16 Зависимость стойкости режущего инструмента Т15К6 от скорости резания при точении стали ШХ15:

- 1 – с дискретным покрытием $(Ti,Al)N$;
- 2 – со сплошным покрытием $(Ti,Al)N$;
- 3 – без покрытия

Рисунок 5.17 Зависимость стойкости режущего инструмента Т15К6 от подачи при точении стали ШХ15:

- 1 – с дискретным покрытием $(Ti,Al)N$;
- 2 – со сплошным покрытием $(Ti,Al)N$;
- 3 – без покрытия

На рис. 5.18, 5.19 приведены зависимости стойкости режущего инструмента Т15К6 от плотности покрытия $(Ti,Al)N$ толщиной 6 мкм при обработке стали ШХ15 со скоростью резки $V = 0,5...2,0$ м/с и подачей $s = 0,05...0,35$ мм/об. Анализ данных рис. 5.17–5.20 показывает, что с увеличением скорости резания и снижением подачи значительно возрастает эффективность инструмента с покрытиями. При увеличении подачи разница между стойкостью инструмента без покрытия и со сплошным покрытием нивелируется, в то время как при интенсивных режимах резания проявляются преимущества покрытия дискретного типа. При этом существует интервал оптимальных значений плотности покрытия дискретного типа, который находится в диапазоне (55...65 %), и обеспечивает максимальные значения стойкости режущего инструмента.

При формировании покрытия дискретного типа уменьшаются остаточные напряжения сжатия. Это дает возможность повысить стойкость режущего инструмента путем нанесения покрытий дискретного типа.

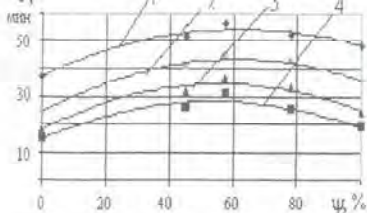


Рисунок 5.18 Зависимость стойкости инструмента T15K6 с покрытием $(Ti,Al)N$ от плотности покрытия при $s = 0,1$ мм/об: 1 — скоростях резки $V = 0,4$ м/с; 2 — $V = 0,8$ м/с; 3 — $V = 1,2$ м/с; 4 — $V = 1,6$ м/с.

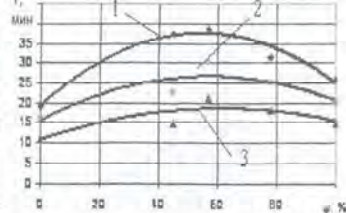


Рисунок 5.19 Зависимость стойкости режущего инструмента T15K6 с покрытием $(Ti,Al)N$ от плотности при $V = 1,3$ м/с, $t = 0,3$ мм: 1 — подача $s = 0,1$ мм/об; 2 — $s = 0,2$ мм/об; 3 — $s = 0,35$ мм/об.

Использование покрытия дискретного типа на режущем инструменте можно рассматривать как благоприятную среду, стимулирующую процессы структурной приспособляемости материала инструмента, способствующие изменению внутренних энергетических характеристик поверхностного слоя за счет изменения трибоконтактных процессов при резании [121, 127].

Процессы структурной приспособляемости для режущего инструмента с покрытиями дискретного типа сопровождаются более быстрым входом инструмента в зону стабильного изнашивания. Формирование на поверхности режущего инструмента покрытия дискретной структуры изменяет контактное взаимодействие при резании, стабилизирует процессы изнашивания и повышает эксплуатационную надежность и работоспособность режущего инструмента.

Для финишной обработки деталей из материалов высокой твердости перспективно использование режущего инструмента, оснащенного минералокерамикой. В то же время, для керамического инструмента большое значение имеет создание условий повышения их износостойкости, что возможно за счет использования функциональных покрытий. Для повышения износостойкости режущих инструментов, оснащенных керамикой на основе Si_3N_4 , проведенные исследования однослойных — TiN , $(Cr, Ti)N$, $(Al, Cr)N$ и двухслойных — $Cr+TiN$, $(Cr, Ti)N+TiN$ вакуумных ионно-плазменных покрытий. Фрагмент поверхности инструмента из силинита-P с дискретным покрытием $(Al, Cr)N$ показан на рис. 5.20.



Рисунок 5.20 Фрагмент поверхности инструмента из силинита-Р с дискретным покрытием (Al, Cr)N

Для оценки работоспособности режущих инструментов, оснащенных керамикой с покрытием, проведены исследования по точению стали ШХ15 (62–64 HRC) с режимами резания: скорость резания $V - 0,83...2,16$ м/с, подача $s - 0,1...0,25$ мм/об, глубина резания $t - 0,1...0,25$ мм. Установлено, что покрытие TiN сплошного типа обеспечивает повышение износостойкости инструмента в 1,7 раза, а дискретного – в 2,2 раза в сравнении с инструментом без покрытия.

Так, для пластины без покрытия величина износа по задней поверхности 0,2 мм достигается за 8 минут точения, в то время как для инструмента с покрытиями дискретной структуры – за 45 минут (рис. 5.21). На рис. 5.22 приведена зависимость стойкости режущего инструмента из силинита-Р при точении стали ШХ15 от плотности покрытия. Сравнительные испытания износостойкости керамических резцов с разными покрытиями ($V = 2,16$ м/с; $S = 0,15$ мм/об; $t = 0,25$ мм) показали, что наиболее высокие значения износа имеют инструменты с покрытием $(Cr, Ti)N + TiN$ (рис. 5.23).

Необходимо отметить, что многокомпонентное, многослойное покрытие дискретного типа $(Cr, Ti)N + TiN$ не имеет между слоями связующей переходной зоны, выравнивающей коэффициенты температурного расширения двух соседних слоев, вследствие чего «конструкция» является неустойчивой в условиях высоких контактных температур и нагрузок.

Следует отметить высокую работоспособность инструмента с покрытиями дискретного типа $(Al, Cr)N$ и $CrN + (Cr, Zr)N$. Несмотря на то, что величины износа дискретных и сплошных покрытий близки, с увеличением времени резания изнашивание инструмента со сплошным покрытием проходит интенсивнее.

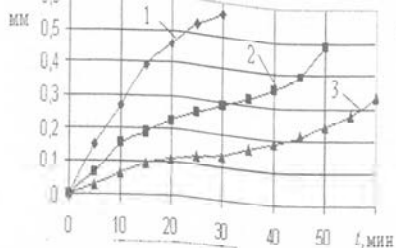


Рисунок 5.21 Зависимость величины износа инструмента из силитита-Р от времени работы при точении стали ШХ15: 1 – без покрытия; 2 – со сплошным покрытием TiN (8 мкм); 3 – с дискретным покрытием TiN (8 мкм)

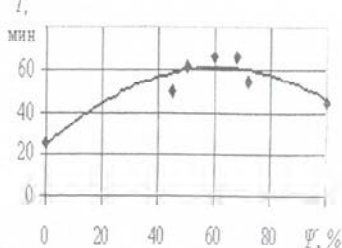


Рисунок 5.22 Зависимость стойкости режущего инструмента из силитита-Р при точении стали ШХ15 от плотности покрытия TiN ($V = 1,65$ м/с; $s = 0,04$ мм/об; $t = 0,25$ мм)

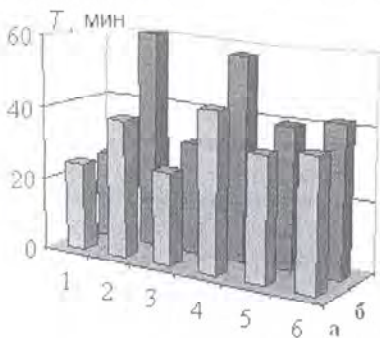


Рисунок 5.23 Сравнительные значения стойкости при резании стали ШХ15 инструментом с силитит-Р: (а) – сплошное покрытие; (б) – дискретного типа:

- (1) – без покрытия;
- (2) – с покрытием TiN
- (3) – с покрытием $Cr+TiN$;
- (4) – с покрытием $(Al,Cr)N$;
- (5) – с покрытием $(Cr,Ti)N$;
- (6) – с покрытием $CrN+(Cr,Zr)N$

Наиболее эффективные покрытия на керамическом инструменте при обработке стали высокой твердости – однослойное покрытие $(Al,Cr)N$ и покрытие TiN дискретного типа. Использование покрытия дискретного типа позволяет повысить скорость резания до 2,0 м/с.

Обработка ряда высокопрочных покрытий обычными абразивными инструментами малоэффективна и приводит к ухудшению их эксплуатационных свойств. В качестве абразивного материала для плоского и круглого наружного шлифования напыленных и наплавленных материалов, используемых для упрочнения и восстановления деталей техники, целесообразно использовать синтетические алмазы, поскольку в этом случае износ кругов из синтетических сверхтвердых материалов определяется в основном прочностью абразивных зерен, а не физико-химическими явлениями в зоне резания [128, 129].

Фирма «Бей Стейт Абразивз» (США) рекомендует применять инструмент из синтетических алмазов, который наиболее эффективен и обеспечивает наилучшие точность и качество обработки керамических (оксиды Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3) и твердосплавных композиционных порошковых материалов, содержащих карбиды WC , TiC , на основе Ni , Co , сплавов системы $Ni-Cr-B-S$, нанесенных наплавкой и газотермическим напылением.

Типичная характеристика применяемого инструмента: 4D150R 3BC, где 4D – применяемое фирмой обозначение синтетических алмазов с никелевым покрытием, которые обеспечивают наилучшие показатели обработки, особенно при вероятности контакта со стальной подложкой покрытия; 150 – зернистость (приблизительно соответствует зернистости 125/100; R – твердость связки; 3 – концентрация алмазов (75 %); BC – марка органической связки. Рекомендуемые режимы круглого наружного шлифования алмазным кругом формы 1A1 с охлаждением (не более): $v_k = 28...33$ м/с; $S_n = 0,013$ мм/ход; $S_{np} = 0,2...0,25$ м/мин. Отмечается, что при всех операциях алмазного шлифования газотермических покрытий необходимо использовать охлаждение. Применение простых СОТС (вода с ингибитором коррозии) также является одним из преимуществ алмазного шлифования.

В ИСМ АН Украины проведены сравнительные исследования по оценке эффективности шлифования различных наплавленных и напыленных композитов [129] (табл. 5.9, 5.10) инструментом из сверхтвердых материалов и электрокорунда. Применялись алмазные круги на органической связке и на металлической связке (алмазы с покрытием). Обработка проводилась на круглошлифовальном станке на следующих режимах: $v_k = 30$ м/с; $v_d = 20$ м/мин; $S_n = 0,01$ мм/дв. ход; $S_{np} = 0,5$ мм/об. Охлаждение – 0,3 %-ный водный раствор каль-

абразивных материалов удобно по коэффициенту шлифования G_Q , зная который, нетрудно определить и сравнить затраты на инструмент и срок службы шлифовальных кругов. Как видно из табл. 5.10, круги из синтетических алмазов обеспечивают большую производительность обработки при меньших энергетических затратах. Эффективность применения кругов, прежде всего кругов на металлической связке, возрастает с увеличением твердости обрабатываемого материала. В данном случае также проявляется изменение выходных показателей шлифования в зависимости от метода формирования упрочненного слоя на деталях при использовании одного и того же походного порошка (ПГ-СР4). В табл. 5.11 приведены показатели алмазно-электроэрозионного шлифования (АЭЭШ) наплавки ПП-Нп-35В9Х3СФ с прерывистым контактом и по сплошной поверхности для кругов на связках М2-01 и М1-10. Одинаковые условия работы кругов при шлифовании неравномерного припуска обеспечивались постоянством времени обработки (30 мин), контролируемым с помощью разработанного устройства. Использовались круги с металлизированными алмазами характеристикой АС6 160/125М. Для связки М2-01 $U_m = 45$ В, для М1-10 $U_m = 35$ В. Остальные параметры обработки те же, что и раньше. Эффективность использования кругов на связке М2-01 еще в большей степени проявляется при шлифовании неравномерного припуска.

Таблица 5.9 – Обрабатываемость покрытий шлифованием

Состав (%), марка и способ нанесения покрытия	Твердость покрытия НРС	Номер круга	$N_{\text{эф}}$, кВт	q , мг/г	Q , г/мин	Θ , мкм/г	$K = \Theta_1 / \Theta_2$	Ra , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
С – 1,0; Cr – 17,0; Si – 4,0; В – 2,5; Fe – 4,0; основа – Ni; ГПН	61–64	1	0,15	0,07	2,06	0,01	1	1,11
		2	0,25	0,35	2,50	0,05	5	0,90
		3	0,30		0,36	4,8	480	0,95
60 % ПГ-СР3 + 40 % Cr _x C _y ; ГПНО	50–53	1	0,20	0,15	2,10	0,022	1	1,47
		2	0,30	0,94	2,35	0,136	6,18	0,64
		3	0,40		0,24	5,100	231,8	0,60

немного меньшую шероховатость поверхности, чем обработка алмазными кругами на металлической связке.

Таблица 5.10 – Результаты исследования обрабатываемости наплавленных и напыленных материалов шлифованием

Материал	Круг	$N_{\text{ш}}$, кВт	q , мг/г	Q_m , г/мин	G_q
Мо	1	0,15	0,91	1,82	1,00
	2	0,15	2,51	2,45	2,77
	3	0,50	–	1,34	17,69
Сталь 80	1	0,15	0,18	1,93	1,00
	2	0,15	0,65	1,90	3,65
	3	0,60	–	0,62	102,31
15E Метко	1	0,15	0,07	2,06	1,00
	2	0,25	0,35	2,50	5,00
	3	0,30	–	0,36	480,00
60% ПГ- СР3+ 40% Cr ₂ O ₃	1	0,2	0,15	2,10	1,00
	2	0,3	0,94	2,35	6,18
	3	0,4	–	0,24	231,80
40X13	1	0,3	0,46	1,72	1,00
	2	0,3	2,29	1,71	4,93
	3	0,4	–	1,20	18,80
ПГ-СР2	1	0,3	0,26	2,80	1,00
	2	0,3	0,43	2,85	3,00
	3	0,4	–	1,32	41,50
ПГ-СР3	1	0,35	0,20	2,42	1,00
	2	0,35	0,49	2,45	3,94
	3	0,40	–	1,23	63,50
ПГ-СР4**	1	0,35	0,22	2,80	1,00
	2	0,35	0,48	2,76	8,10
	3	0,40	–	0,68	262,10
ПГ-СР4***	1	0,25	0,13	2,81	1,00
	2	0,30	0,58	2,78	6,20
	3	0,35	–	0,51	242,50
ПГ-СР5	1	0,40	0,23	2,60	1,00
	2	0,40	0,59	2,51	15,20
	3	0,45	–	0,38	466,20
ПП-Нп- 35В9Х3СФ	1	0,20	0,57	2,51	1,00
	3	0,30	–	0,87	86,59

C - 0,83; Si - 0,18; Mn - 0,4; Cr - 0,05; Ni - 0,08; основа - Fe; ГПН	42-44	1	0,15	0,18	1,93	0,026	1	1,40
		2	0,15	0,56	1,90	0,095	3,65	1,24
		3	0,60		0,65	2,660	102,31	1,10
Mo (M4-1), ГПН	42-44	1	0,15	0,91	2,82	0,130	1	1,44
		2	0,15	2,51	2,45	0,360	2,77	1,05
		3	0,50		1,34	2,300	17,68	1,02
C - 0,4; Cr - 13,0; Si - 0,5; Mn - 0,35; P - 0,02; основа - Fe (40X13Г); ГПН	35-36	1	0,30	0,46	1,72	0,067	1	0,99
		2	0,30	2,29	1,71	0,330	4,92	0,93
		3	0,40		1,20	1,260	18,80	0,88
C - 0,32; Si - 0,9; Mn - 0,8; Cr - 2,8; W - 9,5; V - 0,3; основа - Fe (ПН-30X2В8), ЕДФ	44-48	1	0,20	0,570	2,51	0,042	1	1,03
		3	0,30		0,87	3,630	86,59	1,05

Примечание. $N_{эф}$ - эффективная мощность шлифования; q - относительная потеря алмазов; Q - масса материала, отобранного за 1 мин; Θ - относительный линейный износ кругов, $\Theta = h_a/G_m$ (h_a - радиальный износ круга за одно испытание; G_m - масса материала покрытия, отобранного за единицу времени); K - отношение параметра Θ для рассмотренного круга до параметра Θ для алмазного круга на металлической связке; ГПН - газопламенное напыление; ГПНО - газопламенное напыление с оплавлением; ЕДФ - электродуговое наплавление под слоем флюса; 1 - 1A1 250×3×10×76 AC6 160/125M-M04-2-100; 2 - 1A1 250×3×10×76 AC4 100/80-B2-01-100; 3 - ПП 250×3×10×76 24A16HSM27K6.

Эффективная мощность шлифования кругами из электрокорунда в 1,3-4,0 раза больше, чем при обработке алмазными кругами, а скорость съема припуска - в 1,4-8,8 раз меньше. Однако обработка ряда покрытий кругами из электрокорунда обеспечивает

*1 – 1А1 250×10×76×3 АС6 160/125М М1-10 4; ** 2 – 1А1 250×10×76×3 АС4 100/80 В2-01 4; *** 3 – 1 250×10×76 24А 16-Н СМ2 7 К6; ** Плазменная наплавка; ***Плазменное напыление.

Таблица 5.11 – Показатели АЭЭШ кругами на связках М2-01, М1-10

Марка связки	Вид контакта	$Q_{\text{ф}}$, см ³ /мин	q_v , мг/см ³	$N_{\text{эф}}$, кВт
М1-10	Непрерывный	1,57	17,12	0,7
М2-01		1,56	20,81	
М1-10	Прерывистый	1,38	25,05	0,85
М2-01		1,09	34,67	

Очевидно, использование более мягкой связки и интенсивное микроразрушение абразивных зерен приводит к уменьшению зернистости кругов из электрокорунда и, соответственно, к уменьшению шероховатости обработанной поверхности. Эффективность использования алмазных кругов увеличивается с увеличением твердости покрытий.

В табл. 5.12 [130] приведены условия обработки наплавленных деталей металлургического оборудования кругами с металлизированными алмазами.

Исследования влияния марки алмазов на их удельные расход и себестоимость обработки показывают, что при шлифовании теплостойких наплавов необходимо использовать металлизированные никелем алмазы АС6, АС15. Эффективность более прочных, но и более дорогих алмазов АС15 увеличивается с ростом производительности обработки.

При шлифовании наплавочных материалов, особенно хромоникелевых, содержащих значительный процент мягкой матричной составляющей (до 34 % Ni), после некоторого времени работы круга возможно ее налипание на режущие зерна, вследствие чего необходима периодическая правка круга.

Таблица 5.12 – Рекомендуемые параметры шлифования* наплавленных деталей

Наплавленный материал	Характеристика алмазного круга	Режимы шлифования			Ra, мкм
		v_k , м/с	v_d , м/мин	S_n , мм/дв. ход	
300X25M3H3Г2 (ПЛ-АН101)	1А1 400×40 АС15 250/200М М1-10 4 1А1 400×40 АС6 125/100М М1-10 4	25–30	2,0–3,0	(0,6–0,7)Н	0,7–0,8
2,0–2,5			(0,4–0,6)Н		
550X44H34ГСР (ПЛ-АН111)			1,5–2,0	(0,6–0,7)Н	0,5–0,6
450X20Б7М7В2Ф (ПЛ-АН179)				(0,2–0,6)Н	
Релит-мельхиор	2,0–3,0	(0,5–0,7)Н	0,8–1,0		
			2,0–2,5	(0,4–0,6)Н	0,5–0,6

*Числитель – черновое, знаменатель – чистовое шлифование

Для износостойкой наплавки используют сплавы различных композиций, однако наиболее широкое применение нашли стали 35В9Х3СФ, 25Х5ФМС и др. Широкое распространение для упрочнения и восстановления деталей прокатного оборудования находят также самофлюсующиеся твердые сплавы (Ni-Cr-B-Si).

Параметры алмазно-электроэрозийного шлифования наплавки 35В9Х3СФ приведены в табл. 5.13 и наплавки 550Х44Н34ГСР – в табл. 5.14. При обработке наплавленных материалов твердостью ≥ 45 HRC целесообразно использовать алмазные круги с металлизированными алмазами марки АС6 зернистостью 160/125 при производительности 0,65 см³/мин (отнесенной к единице ширины круга) и АС15 при большей производительности.

Таблица 5.13 – Параметры шлифования наплавленной теплоустойчивой стали

Этап обработки	Характер и величина припуска	Параметры обработки			
		v_k , м/с	v_d , м/мин	S_{np} , мм/об	S_n , мм/дв. ход
Обдирочное шлифование	Прерывистый неравномерный припуск до 2–3 мм	20–30	25–30	(0,2–0,3)Н	60–80

Чистовое шлифование	Сплошной припуск:	40–50		(0,2–0,3)H	10–12
	0,3–1,0 мм 0,02–0,03 мм				(0,2–0,3)H 4–12

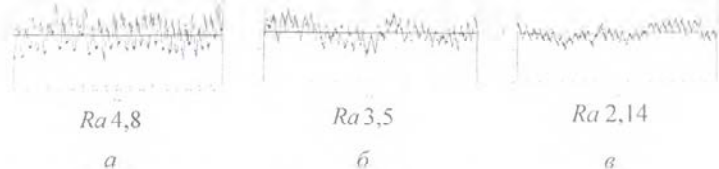
Таблица 5.14 – Результаты алмазного и электроалмазного шлифования наплавленного материала 550X44H34ГСП

Характеристики круга	$S_{\text{пов}}^*$ мм/ход	t_c , мм	m , м	$N_{\text{эф}}$ кВт	q_p мг/г
Алмазное шлифование					
АС6М 160/125-M04	3	0,05	50	3,0	1,24
			35		4,65
АС6М 160/125-M020	5	0,03	30		7,66
АС6М 125/100-MB1			15		2,57
АС6М 125/100-M016	3	0,05	50	1,8	6,20

5.5 Качество поверхности деталей при обработке инструментом с покрытием

Как было показано выше, покрытие на режущем инструменте, оказывая влияние на протекание процессов на контактных поверхностях, оказывают непосредственное влияние и на качество обработанной поверхности, в частности, на шероховатость обработанной поверхности деталей.

Сравнительный анализ профилограмм с поверхностями, обработанных инструментами с разными типами покрытия при одних и тех же условиях обработки, показал, что лучшее качество поверхности обеспечивают инструменты с покрытиями дискретного типа (рис. 5.24). Так, при точении инструментом без покрытия шероховатость обработанной поверхности составила Ra 4,8 (а), для инструмента со сплошным покрытием TiN толщиной 6 мкм – Ra 3,5 (б), а для инструмента с покрытием TiN дискретного типа толщиной 6 мкм – Ra 2,14 (а).



$Ra\ 4,8$

a

$Ra\ 3,5$

б

$Ra\ 2,14$

в

Рисунок 5.24 Профилотграммы обработанной поверхности при точении стали 40X твердосплавным инструментом T15K6 без покрытия (*a*) и с покрытиями TiN сплошными (*б*) и дискретного (*в*): типов $v = 2,0$ м/с; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,15$ мм

Зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания и плотности покрытия при обработке стали 40X твердосплавным инструментом T15K6 без покрытия и с покрытиями (Ti,Al)N разных типов и сравнительные диаграммы приведены на рис. 5.25–5.27.

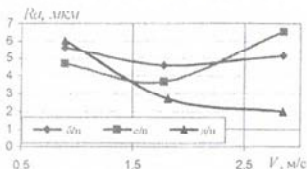


Рисунок 5.25 Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания при обработке стали ШХ15 твердосплавным инструментом T15K6 без покрытия (*б/п*) и с покрытиями (Ti,Al)N сплошного (*с/п*) и дискретного (*д/п*) типов ($s = 0,25$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

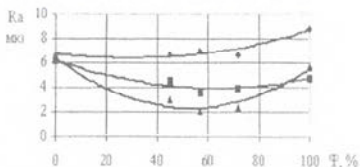


Рисунок 5.26 Зависимость шероховатости поверхности от плотности Ψ покрытия (Ti,Al)N при обработке стали 40X инструментом T15K6 ($s = 0,15$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

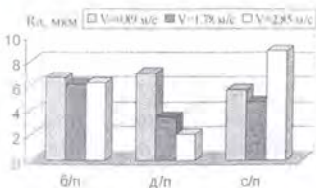


Рисунок 5.27 Сравнительные диаграммы шероховатости поверхности от скорости резания при обработке стали 40X инструментом T15K6 с покрытием (Ti,Al)N ($s = 0,3$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

Для оценки шероховатости поверхности при обработке стали 40X инструментом из твердого сплава T15K6 с покрытиями получено следующее регрессионное уравнение:

$$Ra = (2,23351 - 0,25009x_1 - 0,41903x_2 - 0,2549x_3 - 0,57639x_4)^2,$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – кодируемые значения типа покрытия, глубины резания, подачи и скорости резания соответственно, которые определяются как $x_i = \frac{P_i - 4}{0,15}$, $\frac{t - 0,25}{0,25}$, $\frac{s - 0,35}{0,25}$, $\frac{V - 123,6}{65,5}$

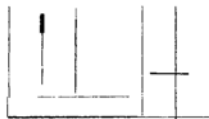


Рисунок 5.28 Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания (V) при обработке стали 40X инструментом с T15K6 без покрытия и с покрытием TiN сплошного и дискретного типов ($s = 0,2$ мм/об; $t = 0,25$ мм)

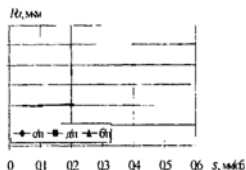


Рисунок 5.29 Зависимость шероховатости поверхности от подачи при токарной обработке стали 40X инструментом с T15K6 без покрытия и с покрытием TiN сплошного и дискретного типов ($V = 2$ м/с; $t = 0,25$ мм)

На рис. 5.28, 5.29 приведены зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания и подачи при токарной обработке стали 40X инструментом с T15K6 без покрытия и с покрытиями TiN сплошного и дискретного типов с глубиной резания $t = 0,25$ мм.

На рис. 5.30 приведенные зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания при токарной обработке стали 40X с подачей $s = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 0,25$ мм инструментом из твердого сплава T15K6 без покрытия и с покрытием сплошного и дискретного типов:

Анализ приведенных результатов показал, что применение инструмента с покрытием дискретного типа позволяет обеспечить на обработанной детали более низкую шероховатость поверхности. Это особенно проявляется при интенсивных режимах резки. Варьируя режимами резки, выбирая материал и конструктивные параметры

с требуемой величиной шероховатости.

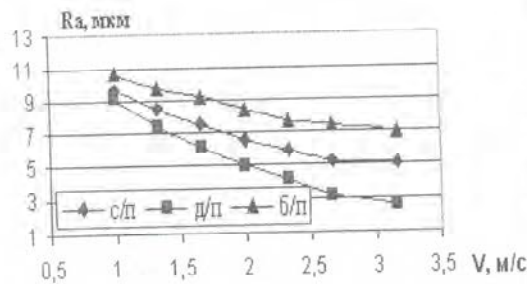


Рисунок 5.31 Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания при обработке стали 40X инструментом с Т15К6 без покрытия и с покрытием (Ti,Al)N сплошного и дискретного типов ($s = 0,2$ мм/об; $t = 0,25$ мм)

ПРИ РЕМОНТЕ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

В процессе работы трибомеханических систем, когда реализуются усталостный, абразивный, адгезионный, механико-химический или водородный механизмы изнашивания деталей, важную роль играют структура и физико-механический комплекс свойств тонкого приповерхностного слоя материалов, от которых зависит характер формирующихся при трении динамических структур, механизмы разрушения и кинетика изнашивания. Улучшение структуры и свойств поверхностного слоя деталей можно получить путем нанесения на поверхности защитно-упрочняющих покрытий. Выбор материала и метода нанесения покрытия зависит, в основном, от способности изделия противостоять воздействиям среды, в которой ему предстоит работать. Кроме того, улучшение качества рабочих поверхностей деталей позволяет обеспечить надежность узлов и механизмов машин и технологического оборудования.

6.1 Особенности эксплуатации и износа прецизионных деталей сельскохозяйственной техники

В процессе эксплуатации топливной и гидравлической аппаратуры наблюдается изменение геометрических и физико-механических свойств поверхностей прецизионных деталей, что приводит к ухудшению работы систем. Наиболее ответственными и менее долговечными деталями топливной аппаратуры являются прецизионные пары: насосный элемент, седло и клапан, игла и распылитель. Срок службы прецизионных деталей на автотракторных дизелях явно недостаточен и составляет в среднем по плунжерным парам 1200-1800, по клапанам 1400-2000, по распылителям 800-1600 мото-часов. При этом они должны обеспечить: 1) периодический впрыск топлива в камеру сгорания в количестве, соответствующем нагрузке двигателя; 2) своевременное начало и продолжительность впрыска, определяющие наилучшие эксплуатационные показатели двигателя; 3) качественное распыливание топлива в объем камеры сгорания; 4) оптимальный (по термодинамическим показателям рабочего процесса дизеля) закон подачи топлива. На топливную аппаратуру падает значительная доля отказов двигателя. Так, на двигателе ЯМЗ-238НБ на нее приходится 35% отказов, а в двигателях Д-50 — 50% и двигателе СМД-14 — 30%. По данным ГОСНИТИ, в двигателях Д-50 почти половина отказов приходит-

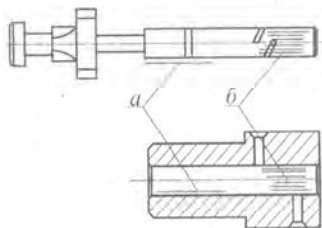
лировочных параметров в двигателях СМД-14 почти 50% отказов приходится на топливопроводы, 9-17% — на форсунки, 14-31% — на фильтры и до 17% — на нарушение регулировочных параметров. В распределительных насосах 28% основных дефектов приходится на износ и заедание плунжерных пар, 15% — на заедание и поломку поводка привода дозатора и только 10% на поломку зубьев промежуточной шестерни [131].

По данным Антипова В.В., у распределительных насосов после 2331-2833 ч работы плунжерные пары изнашиваются до предельного состояния. Послеремонтный ресурс топливной аппаратуры в нормальных условиях эксплуатации находится в пределах 30-50%новой. Это объясняется слабой оснащенностью ремонтных предприятий высокоточным оборудованием для механической обработки, стендами, контрольно-измерительными приборами, квалифицированными кадрами.

Износ прецизионных деталей складывается из износа направляющих поверхностей (редко превышающего 10 мкм) и местного износа в виде царапин, по глубине не превышающего 28 мкм. Одной из причин износа прецизионных деталей является наличие мельчайших твердых частиц в плохо отфильтрованном топливе. Основные места износа прецизионных деталей показаны на рисунках 6.1, 6.2 и 6.3.

Рисунок 6.1 Места износа плунжера и гильзы:

- a*) — по длине детали;
- б*) — местный износ



Износ штанги форсунки, пружины регулировочного винта, запорного конуса распылителя является следствием механической нагрузки. Суммарный износ этих деталей достигает 0,185 мм за 300 ч эксплуатации, что приводит к увеличению хода иглы распылителя, изнашиванию сопловых отверстий и образованию нагара.

Рисунок 6.2 Характер износа распылителя:

- 1 – торец хвостовика иглы;
- 2 – торец корпуса распылителя;
- 3 – направляющие иглы и корпуса распылителя;
- 4 – запорный конус иглы и корпуса распылителя;
- 5 – сопловые отверстия

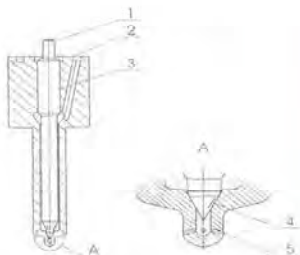
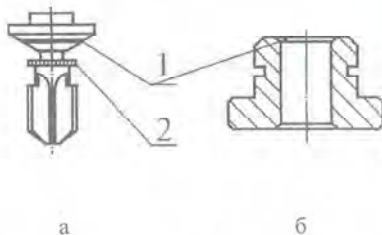


Рисунок 6.3 Износ нагнетательного клапана:

- а – клапан;
- б – седло клапана;
- 1 – износ по запорному конусу;
- 2 – износ по разгрузочному пояску



Местный износ поверхности в зоне перепускного окна гильзы по характеру и размещению отличен от износа впускного окна. Изношенный участок находится с левой стороны кромки окна, имеет вид фигурной полосы шириной 2...2,5 мм; к верхнему торцу он распространяется на 2...3 мм, к нижнему — на 4,5...5 мм. Величина износа на краю кромки равна 0,015...0,017 мм. С приближением к торцам гильзы он резко уменьшается. С правой стороны от окна износа почти нет. Такое расположение износа объясняется тем, что при наличии левой винтовой кромки плунжера сначала открывается левая сторона окна гильзы. Поэтому перетекание топлива в момент отсечки абразивно изнашивает эту сторону окна, тогда как правая закрыта. Кромка с левой нижней стороны окна сильно изнашивается, круглая форма ее нарушается, происходит процесс жидкостного размывания с абразивом.

При рабочем ходе плунжера, после перекрытия выпускного окна гильзы, наступает момент впрыскивания топлива в цилиндры двигателя. У изношенных плунжерных пар начало впрыскивания запаздывает. При сборке секции топливного насоса от монтажных усилий штуцера высокого давления рабочая внутренняя поверхность втулки плунжера искажается. При затяжке нажимного штуцера с

рекомпендуемым моментом 120 Н·м зазор в сечении окон уменьшается до 1,5 мкм, а на участке, расположенном на 10... 15 мм ниже окон, он увеличивается до 3 мкм.

На поверхности втулки рядом с впускным и отсечным окнами вследствие упругой деформации возникают относительно узкие острые выступающие кромки. В момент нагнетания топлива, когда впускное окно еще полостью не перекрыто, топливо с большой скоростью под высоким давлением устремляется в него, вызывая гидробразивный износ его кромки. При износе кромок возрастают утечки топлива в компрессорную часть. Увеличение момента затяжки штуцера высокого давления до 140...150 Н·м ускоряет износ плунжерных пар рядных топливных насосов на 20% по сравнению с деталями, смонтированными с величиной 100...120 Н·м.

У плунжерных пар с зазором 0,5...1 мкм уже при монтаже с моментом затяжки 60 Н·м происходит зависание плунжера около окон втулки. Однако в процессе нагнетания топлива заклинивания не происходит. У значительной части плунжерных пар, имеющих зазор 1...1,5 мкм, после затяжки штуцеров высокого давления с усилием 12...15 Н·м происходит защемление плунжера в компрессионной части втулки. Отмеченное явление происходит вследствие несовпадения геометрических осей втулки и плунжера из-за изгиба компрессионной части втулки под действием монтажных усилий.

Кроме того, износ плунжерных пар значительно снижает их производительность из-за утечек топлива, особенно на пусковых оборотах. Рост утечек топлива с уменьшением оборотов объясняется тем, что при медленном движении плунжера время на перетекание возрастает. Плунжерные пары в топливном насосе изнашиваются неодинаково, поэтому перетекание топлива на изношенных участках будет различным, отчего повышается неравномерность подачи топлива. При больших износах деталей плунжерных пар неравномерность может увеличиться в 3 раза на номинальных оборотах и в 5 раз на пусковых оборотах.

Износ плунжерных пар сопровождается значительным снижением давления подаваемого топлива. На пусковых оборотах новые пары должны развивать давление подачи топлива не ниже 50...60 МПа, а при износе оно снижается в 4...5 раз. Если плунжерная пара не развивает давления в 30 МПа и более, ее следует заменить. На показатели топливной аппаратуры влияет также износ винтовой кромки плунжера и сопряженного участка перепускного окна гильзы, при этом сокращается продолжительность подачи топлива.

толкателя кулачкового вала, нагнетательного клапана и других деталей. Измерения размеров и отклонений формы функциональных поверхностей пар производились на универсальном измерительном центре UMC-850 фирмы Opton (Германия) методом прямого ощупывания измерительной головкой по заданной программе. Первичный преобразователь (датчик) оснащён рубиновыми наконечниками с дискретностью отсчёта $\pm 0,0005$ мм. Измерительный центр находится в помещении с обеспечением нормальных условий выполнения измерений по ГОСТ 8.050—73. Параметры микрогеометрии исследовались системой Talysurf-6 в "критических сечениях" сопряжения, которые предварительно определялись на исходной паре. Дополнительно на отдельных втулках проводились измерения микротвёрдости по Виккерсу на микротвердомере Miniload-2 фирмы Zeitz (Германия). Нагрузка на индентор составляла 0,981 Н. За величину микротвёрдости принималось среднее арифметическое значение 10 измерений. При предварительных измерениях использовалась пара № 260, которая была принята за исходную. Далее была произведена выборка 9 пар из 300 штук, которые и подвергались комплексным измерениям. Измерения размеров, отклонений формы от округлости и цилиндричности плунжеров, осуществлялись в сечениях, перпендикулярных геометрической оси, расположенных на расстояниях 2, 22, 27 и 40 мм от рабочего торца, а втулок – соответственно 2, 20, 37 и 47 мм от нерабочего торца. Проверку гидроплотности плунжерных пар проводили с помощью прибора КИ-759 при температуре 18—20 °С. Рабочей жидкостью являлась смесь, состоящая по объёму из 2/3 моторного масла и 1/3 дизельного топлива. Измерения исходной пары № 260 показали, что наибольший износ имеет плунжер. Причём, его наибольшее значение расположено у рабочего торца, а сама функциональная поверхность плунжера представляет собой усечённый конус с вершиной в сторону рабочего торца. Поэтому за «критические сечения», т.е. сечения с наибольшим износом, были приняты сечения в сопряжении пары, которые в плунжерах расположены на расстоянии 2 мм от рабочего торца, а во втулках – соответственно 37—40 мм от нерабочего торца. Последующие измерения подтвердили правильность предварительных результатов оценки по наибольшему износу и определения «критических сечений».

В табл. 6.1 сведены средние значения результатов измерений новых и изношенных плунжерных пар, а в табл. 6.2. проанализированы результаты исследований.

Таблица 6. Сравнительные средние значения параметров новых и изношенных пар

Параметр	Состояние пары			
	новая		изношенная	
	штулка	плунжер	штулка	плунжер
1. Геометрические размеры				
1.1. Диаметр в сечении (штулка-плунжер), мм				
1.1.1. 2-40	9,0484	9,0437	9,0261	9,0195
1.1.2. 20-22	9,0474	9,0436	9,0265	9,0186
1.1.3. 37-2	9,0479	9,0430	9,0261	9,0125
1.2. Вариация диаметра, мкм	1,0	0,7	0,4	7,0
1.3. Зазор в паре, мкм				
1.3.1. наибольший средний	5,40		14,2	
1.3.2. наименьший средний	3,70		5,4	
2. Отклонение формы поверхности, мкм				
2.1. Отклонение от цилиндричности	2,25	2,30	2,52	6,48
2.2. Отклонение от округлости в сечении (штулка-плунжер):				
2.2.1. 2-40	0,6	1,3	1,6	1,6
2.2.2. 20-22	0,5	0,4	1,3	2,5
2.2.3. 37-2	0,4	2,5	1,0	3,6
3. Микрогеометрия поверхности				
3.1. Высотные параметры, мкм				
3.1.1. R_a	0,0323	0,0234	0,0526	0,0540
3.1.2. R_{max}	0,372	0,284	0,618	0,676
3.1.3. R_z	0,237	0,174	0,448	0,328
3.2. Шаговые параметры, мкм				
3.2.1. S	7,57	7,83	8,40	11,76
3.3. Переходные параметры				
3.3.1. t_p на глубине 0,10 мкм, %	38	42	27	20

3.3.2. Глубина профиля, при которой $t_p=30\%$, мкм	0,122	0,119	0,100	0,190
3.3.3. $\Delta_{\text{д}}$	1,00	0,84	1,92	1,02

Таблица 6.2 Окончательные результаты исследований отклонений формы

Параметр	Выводы и предложения
1. Функциональный диаметр сопряжения пары	<p>1.1. Диаметры втулки и плунжера у новых пар стабильны в пределах 1...2 мкм, а по выходным значениям – 0,7...1,0 мкм.</p> <p>1.2. Эти параметры у изношенных пар весьма непостоянны и изменяются у втулки в пределах 1...4 мкм (среднее 0,4 мкм), а у плунжера 4...13 мкм (среднее 7 мкм).</p> <p>1.3. Плунжеры наиболее изношены у рабочих торцов, где зазоры в паре достигают 20 мкм, а форма продольного сечения коническая с вершиной в сторону этого торца.</p>
	<p>1.4. Технология ремонта пар должна строиться на восстановлении геометрии втулки по диаметру, цилиндричности, круглости и требуемой шероховатости. Плунжеры должны шлифоваться в заданные размеры, подвергаться нанесению нарастающих слоёв, шлифоваться и доводиться до обеспечения требуемых параметров сопряжения с втулкой.</p>
2. Отклонение формы продольного сечения (цилиндричность), мкм	<p>2.1. Средние значения этого параметра у новых пар и втулки у изношенных практически одинаковы и находятся в пределах 2,25...2,52 мкм.</p> <p>2.2. Среднее значение параметра у изношенного плунжера в 2,7 раза хуже, чем у новых пар.</p>

3. Отклонение формы поперечного сечения (круглость), мкм	<p>3.1. Форма поперечных сечений у новых втулок практически идеальная – различие реальных поверхностей от прилегающих окружностей до 0,2 мкм.</p> <p>3.2. У новых плунжеров эти значения в 2—6 раз, а у изношенных в 2—9 раз хуже.</p> <p>3.3. Втулки изношенных пар по этому параметру в 2,5 раза хуже новых.</p>
4. Состояние сопряжения пары (зазоры и износ). мкм	<p>4.1. Величины зазора в новых парах стабильны и находятся в пределах 3,7—5,4 мкм, у изношенных эти значения в пределах 5,4—14,2 мкм, т.е. значения износа составляет 1,7—8,8 мкм.</p> <p>4.2. В целом зазоры в новых парах велики и не могут обеспечить качественную работу насосов. Эти значения должны быть в пределах 1,6—2,5 мкм.</p>

Исходя из проведенных исследований методом механической обработки можно восстанавливать следующие детали: – верхний торец гильзы; – торец корпуса распылителя; – иглы нагнетательного клапана; – нижний торец гнезда нагнетательного клапана; – конические поверхности распылителя и нагнетательного клапана (конические поверхности восстанавливают при незначительных износах 30—40 мкм).

Экономическая целесообразность восстановления деталей определяется, правильным выбором способа восстановления, уровнем технологического решения, долговечностью восстановления деталей и организационными факторами. Выбор способа восстановления определяется характером дефектов детали, послуживших причиной её выбраковки, также конструкцией, материалом и условиями работы.

Характерная особенность прецизионных деталей топливной аппаратуры заключается в потере работоспособности при малых величинах износа. В ремонтной практике применяются в основном три способа: селективная подборка без изменения размеров деталей; замена одной из прецизионных деталей новой; гальваническое хромирование.

0.2 Исследование материалов покрытий
 для вакуумно-плазменного нанесения покрытий
 на прецизионные детали сельскохозяйственной техники

В качестве материала подложки (образцов) использовали сталь 18Х2Н4ВА, термически обработанную согласно табл. 6.3

Таблица 6.3 Режимы термической обработки

Закалка	Отпуск		
	Температура, °С	Число отпусков	Твердость HRC
1270-1290	560	3	63-65

Структура стали после закалки содержит фазу «мартенсит+карбиды», достигающую в сумме около 75%, в том числе собственно карбидов 16...19% и остаточного аустенита до 25%. После отпуски суммарная фаза «мартенсит+карбиды» составляет почти 100%, в том числе карбиды 22...24%.

Поверхность образцов перед нанесением покрытий механически полировалась. Покрытия химических соединений типа карбид титана TiC , карбонитрид титана $TiN+TiC$, нитрид титана с нитридом хрома $TiN+CrN$ наносились на установке ННВ-6,6-И1 методом КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой). Перед нанесением покрытий поверхность образцов обезжиривалась и сушилась в бензине марки "Калоша" и этиловом спирте.

Обрабатываемые образцы загрузились в вакуумную камеру установки, которую откачивали до вакуума порядка 10^{-3} Па, и проводили чистку и подготовку поверхности образцов бомбардировкой ионами титана. Нанесение покрытий проводилось в атмосфере азота. Параметры технологического процесса нанесения покрытий сведены в табл. 6.4. Покрытия получали толщиной 5...6 мкм.

Таблица 6.4 Параметры технологического процесса нанесения покрытий методом КИБ

Покрытие	Материал катоды	Наличие газа в камере, Па	Ток дуги, А	Напряжение смещения, В
TiC	Ti	$\sim 10^{-3}$	90...100	180...200

TiN+TiC	Ti		
TiN+CrN	Ti и Cr		

В основе настоящей методики лежит метод оценки антифрикционных характеристик материалов, работающих в условиях трения скольжения. Испытания проводятся в стационарных условиях с целью оценки стабильности работы сопряжения при заданных значениях давлений и скоростей скольжения в зоне трения [132, 133]. Сущность метода заключается том, что один из элементов пары трения неподвижен, а другой движется возвратно-поступательно. Схема проведения испытаний представлена на рис. 6.4

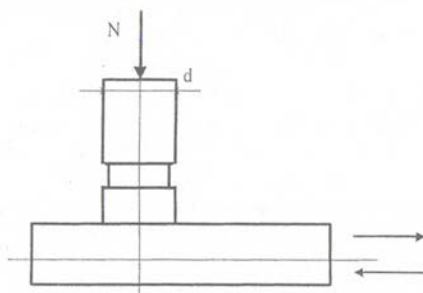


Рисунок 6.4 Вид контактной пары трения

Данная методика позволяет получать значения триботехнических характеристик антифрикционных материалов, в том числе в виде тонкослойных покрытий из металлических и неметаллических материалов и композитов. Для оценки триботехнических параметров материалов используется установка МПТ-1, предназначенная для испытаний в атмосферных условиях и имеющая возможность регулирования в широких пределах нагрузочных режимов и условий смазывания. Форма и размер образцов для триботехнических испытаний определяются конструктивными особенностями установки и характером реализуемого вида трения и движения. Шероховатость поверхности рабочей части по ГОСТ 2789—73 для одной серии антифрикционных испытаний должна быть не ниже 9-10 класса чистоты. При одном режиме испытаний от партии материала подвергаются испытанию не менее 5 образцов, одинаковых по форме и

размерам. Подготавливая образцы к испытаниям, измеряем линейные размеры индентора, пластины, чистоту и твердость трущихся поверхностей, толщину антифрикционного слоя. При наличии покрытия контролируется не только его толщина, но и зависимость толщины по длине рабочей части пластины. Результаты измерения и контроля регистрируют в журнале.

Устанавливают испытуемые образцы, при этом контролируется отсутствие перекосов, повреждений контактирующих поверхностей, изменение эффективных площадей контакта. При этом подвижный образец должен иметь возможность самоустановки в плоскости, перпендикулярной к плоскости возвратно-поступательного движения. Контролируют величину контурной поверхности прилегания. Ее величина должна составлять не менее 90% от номинальной расчетной поверхности контакта. Контроль визуальный по пятну контакта [133]. Затем включается электропривод и через винтовой механизм обеспечивает возвратно-поступательное движение блока и подвижных образцов. Осуществляют приработку образцов с соблюдением условий смазывания до достижения стабилизации сил трения и прилегания сопряженных поверхностей по площади не менее 95% от рабочей поверхности неподвижного образца. При пуске образцы сближаются до касания и только затем прикладывается нагрузка. С помощью нагрузочно-измерительного устройства посредством механической передачи нагружают образцы до рабочей нагрузки, контролируя ее по регистрирующему прибору установки. Фиксируются контролируемые параметры, включая частоту возвратно-поступательного движения, параметры окружающей среды, усилие трения. Затем расчетным путем получают основные характеристики процесса трения.

Продолжительность испытаний определяют либо заданным по заданию временем эксплуатации, либо моментом выхода из строя вследствие необратимого увеличения коэффициента трения и температуры в зоне контакта. По окончании испытаний образец извлекают из камеры трения, очищают от продуктов износа, промывая в соответствующих жидкостях, обдувают сжатым воздухом, снимают значение линейного или весового износа.

При определении среднего по рабочей поверхности линейного износа каждого образца измерение проводят как минимум по 4 точкам, симметрично расположенным относительно образца. При измерении линейного износа используемый прибор должен обеспечивать измерение расстояния от рабочей (изнашиваемой) поверхности до

ной базы с погрешностями не более 0,002 мм. Обработка результатов включает определение расчетным путем следующих значений параметров.

Удельная нагрузка по формуле:

$$P = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d^2}.$$

Коэффициент трения по формуле:

$$f = \frac{F}{N},$$

где F – сила трения; N – нагрузка.

Величина износа индентора по формуле:

$$W_u = W_{u1} - W_{u2},$$

где W_{u1} , W_{u2} – вес или высота индентора, соответственно, до и после испытаний.

Интенсивность изнашивания по формуле:

$$I_u = \frac{W_u}{L},$$

$$L = 2 \cdot b \cdot n \cdot t = 2 \cdot b \cdot N,$$

где L – путь трения, определяемый по формуле, n – частота циклов, b – ширина индентора, t – длительность испытаний, N – общее число циклов.

Для оценки возможности практического применения износостойких покрытий большое значение имеют их механические свойства. Оценка механических свойств этих покрытий надежно фиксируется путем изменения микротвердости. Причем метод измерения микротвердости дает усредненную информацию об изменениях в поверхностном слое толщиной несколько мкм.

В настоящей работе измерения микротвердости проводились на микротвердомере ПМТ-3. Индентором служила алмазная пирамида с углом при вершине между противоположными гранями, равным 136°. В зависимости от твердости материала подложки и покрытия исполь-

зовались нагрузки на индентор, соответственно, 0,2 и 0,3 Н. Число полученных сопоставимые результаты, время нагружения и время выдержки под нагрузкой (6-7 с) выдерживались постоянными. Среднее значение микротвердости определялось из не менее 20 измерений для данного режима образцов, по известному выражению:

$$H = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{c^2},$$

где P – нагрузка на индентор; c – диагональ отпечатка; α – угол при вершине пирамиды индентора.

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием математической статистики.

Режим испытаний на износостойкость был следующим: скорость относительного скольжения 1,5 м/с, давление 1,2 МПа, смазка дизельным топливом ДТ.

На рис. 6.5 представлены зависимости износа образцов от времени испытаний для пар трения [134].

Результаты триботехнических испытаний образцов с покрытиями приведены при нагрузке 1,2 МПа и времени испытаний 200 мин приведены в табл. 6.5.

Согласно табл. 6.5 максимальной износостойкостью характеризуются покрытия системы «нитрид титана + нитрид хрома» $TiN+CrN$ [152], обладающие низкими коэффициентами трения.

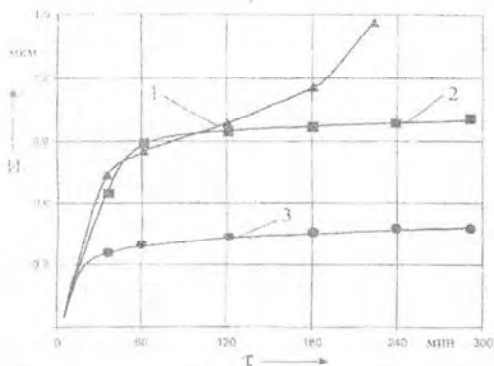


Рисунок 6.5 Зависимости износа образцов от времени испытаний: 1 – $TiN - TiN$; 2 – $TiN+TiC - TiN+TiC$; 3 – $TiN+CrN - TiN+CrN$

Таблица 6.3 Результаты испытаний

Наименование показателя	Образец покрытия		
	TiN	TiN+TiC	TiN+CrN
Путь трения, км	18		
Линейный износ, мкм	1,35	1,02	0,45
Линейная интенсивность изнашивания, мкм/км	0,075	0,057	0,025
Коэффициент трения:			
min	0,07	0,07	0,05
ср.	0,14	0,13	0,08
max	0,20	0,18	0,11

6.3 Оптимизация технологических режимов нанесения вакуумно-плазменных покрытий

Для вакуумно-плазменных покрытий критериями выбора метода подготовки является создание необходимой топографии поверхности с малой высотой микронеровностей (R_a не выше 1,25...0,63 мкм) и большими радиусами закругления вершин и впадин, удаление поверхностных пленок и инородных включений, а также тщательная очистка поверхности от всех видов загрязнений.

Для выбора оптимального способа предварительной подготовки поверхности подложки под нанесение вакуумно-плазменных электродуговых покрытий были проведены сравнительные испытания методов предварительной подготовки поверхности: механического, химического, электрохимического и электроимпульсного. Эксперименты проводились с использованием образцов из стали 12X18H10T, которые предварительно обрабатывались шлифованием до R_a 0,5 мкм. Требовалось получить шероховатость поверхности образцов перед нанесением покрытия не выше R_a 0,1 мкм.

При механическом методе подготовки образцы дополнительно шлифовались и полировались с использованием пасты ПХВ. Затем проводилось их обезжиривание посредством последовательной промывки в течение нескольких минут в двух растворах (первый раствор: синтанол ДС-10 - 3 %, ортофосфорная кислота - 5 %, вода - ос-

гальное; второй раствор: водный раствор синтетического моющего средства «Новость» (30 г/л) при температуре 70°C с наложением ультразвуковых колебаний (установка УЗУ-0,25). Далее образцы промывались в проточной холодной воде, протирались бязью, смоченной в спирте ректификате (ГОСТ 5962—67), и в течение 30 мин прогревались при температуре 150°C в печи типа СНОЛ для удаления остаточных газов с поверхности [135].

Химический метод подготовки заключался в следующем: образцы после предварительного шлифования очищались в трихлорэтане в течение 2 мин, промывались в проточной воде и протирались бязью, после чего обезжиривались в растворе состава: NaOH - 40 г/л; Na₂SiO₃ - 15 г/л; Na₂CO₃ - 25 г/л, при температуре 60-70°C в течение 2 мин. После обезжиривания образцы последовательно промывались в горячей и холодной проточной воде и помещались в ванну химического полирования с электролитом состава: H₂SO₄ - 105 г/л; HNO₃ - 60 г/л; HCl - 48 г/л; вода - остальное. Температура электролита составляла 65-75°C, а время обработки - 10 мин. Далее образцы последовательно промывались в холодной проточной и дистиллированной воде и сушились в сушильном шкафу при 150°C [136].

При электрохимическом методе подготовки предварительные стадии были аналогичны предыдущему методу. Полирование образцов осуществляли в электролите, содержащем (массовые доли, %): H₃PO₄ - 65; H₂SO₄ - 20; вода - остальное. Анодную обработку вели при температуре 70-80°C и плотности тока 50-60 А/дм². Время обработки составляло 7 мин [137]. Последующие операции промывки и сушки аналогичны предыдущему способу.

При электроимпульсном методе подготовка поверхности шлифованных образцов осуществлялась путем электрохимической анодной обработки при температуре электролита 60 °C и напряжении 300 В в электролите следующего состава (массовые доли, %): (NH₄)₂SO₄ - 5; вода - остальное [138]. Последующая промывка и сушка образцов производилась аналогично предыдущим методам (табл. 6.6).

Таблица 6.6 Способы подготовки поверхности и качественные характеристики вакуумно-плазменных покрытий

Способ подготовки поверхности	Общее время подготовки поверхности, мин	Количество переходов подготовки	Использование агрессивных и вредных веществ	Характеристики TiN покрытия		
				Адгезионная прочность $\sigma_{\text{ах}} \cdot 10^8$, Н/м ²	Пористость П, см ⁻²	Шероховатость Ra, мкм
Механический	60	6	есть	2,0	4,8	0,15
Химический	23	7	есть	3,2	3,3	0,13
Электрохимический	20	7	есть	3,8	2,7	0,12
Электроимпульсный	14	3	нет	4,1	2,3	0,12

Окончательной операцией подготовки поверхности во всех случаях являлась ионная бомбардировка поверхности образцов в вакуумной камере при ускоряющем напряжении 1000 В и токе дуги 90 А. Кроме очистки поверхности от остатков загрязнений и окислов целью ионной бомбардировки являлся разогрев образцов до температуры 350—400 °С. Затем на разогретые образцы осаждали покрытие *TiN* при ускоряющем напряжении на подложке 100 В, токе дуги 90 А и давлении реакционного газа (азота) 9×10^{-2} Па. После нанесения покрытия образцы охлаждали в вакуумной камере в течение 10 мин и контролировали качественные характеристики покрытия: адгезионную прочность, пористость и шероховатость. Кроме того, оценивалось общее время подготовки поверхности и ее стадийность, а также использование в процессе подготовки химически агрессивных и вредных веществ.

Анализ результатов показывает, что наилучшим по всем показателям является электроимпульсный метод подготовки поверхности, который и принимается для дальнейших исследований с целью выработки практических рекомендаций по его использованию.

Зависимость пористости от параметров осаждения покрытия $TiN+CrN$ представлена на рис. 6.6. Анализ результатов показывает, что с увеличением тока дуги пористость покрытия увеличивается, особенно при величине тока $I > 100$ А. Это связано с увеличением в плазменном потоке содержания капельной фазы, доля которой значительно возрастает именно в диапазоне 100...140 А [139, 140, 141]. Большое количество капель и макроблоков материала катода, конденсирующихся на подложке, приводит к повышенной дефектности покрытия и увеличению в нем сквозной пористости из-за эффектов затенения и неплотного срастания элементов структуры [143].

С увеличением напряжения на подложке пористость немонотонно уменьшается, что связано, очевидно, с формированием более плотной структуры покрытия и интенсификацией процесса распыления пиков микронеровностей из-за увеличения энергии ионов, прибывающих на подложку. Однако при напряжении порядка 100 В влияние этих факторов резко снижается и поэтому при дальнейшем повышении потенциала на подложке пористость покрытия на стальных подложках практически не уменьшается, а на алюминиевых подложках даже несколько увеличивается.

Зависимость пористости от давления реакционного газа носит экстремальный характер. С увеличением давления до 8×10^{-2} Па пористость покрытия уменьшается, что связано с уменьшением содержания капельной фазы в продуктах эрозии материала катода [139, 140, 141, 142].

Дальнейшее повышение давления азота приводит к тому, что нитрид титана частично образуется не на поверхности конденсации, а в газовой фазе [143] и осаждается на поверхность в виде неомогенного пористого слоя.

Кроме того, избыток реакционного газа приводит к появлению газовой пористости, связанной с замуровыванием азота в объеме формирующегося конденсата. В результате пористость конденсата $TiN+CrN$ начинает увеличиваться, а покрытие теряет свою работоспособность.

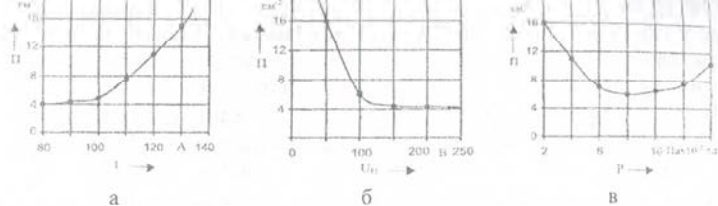


Рисунок 6.6 Зависимость пористости покрытия TiN+CrN от тока дуги при $P=8 \times 10^{-2}$ Па и $U_n=100$ В (а); напряжения на подложке при $P=8 \times 10^{-2}$ Па и $I=100$ А (б); давления реакционного газа при $I=100$ А и $U_n=100$ В (в)

Износостойкость любого материала зависит от способности его поверхностного слоя сопротивляться пластическому деформированию, приводящему к схватыванию и разрушению контактирующих поверхностей [144, 152]. Поэтому одним из основных требований к износостойким материалам является высокая твердость поверхности. Применительно к тонкопленочным вакуумно-плазменным покрытиям такой характеристикой является микротвердость покрытия. Как отмечается в работе [145, 152], поверхностная микротвердость вакуумных конденсатов, получаемых методом КИБ, определяется составом и структурным состоянием покрытия и зависит от режимов его осаждения. Отсюда вытекает необходимость исследовать влияние технологических параметров формирования покрытия на микротвердость. Толщина покрытий составляла 3...5 мкм.

Экспериментальные зависимости микротвердости покрытия TiN+CrN от технологических параметров процесса осаждения представлены на рис. 6.7.

Наибольшее влияние на микротвердость поверхности, упрочненной TiN+CrN, оказывает давление реакционного газа в рабочей камере установки.

Экстремальный характер этой зависимости объясняется широкой областью гомогенности нитрида титана (β -фаза TiN), а также изменением химического фазового состава покрытий в зависимости от давления азота, что подтверждается результатами исследований [146]. Повышение до максимума значений микротвердости конденсатов в области давлений $(2...6) \times 10^{-2}$ Па является следствием образования твердого раствора азота в кристаллической решетке осаждаемого металла (титана), фазового упрочнения за счет выпадения второй фазы (нитрид) и образования твердых растворов на основе решетки нитридов. Кроме того, в этом диа-

позоне наблюдается значительное уменьшение капальной фазы в продуктах эрозии материала катода, которая имеет микротвердость порядка 2000 МПа. Максимумом микротвердости обладают покрытия [147, 148], состоящие из нитридов достехиометрического состава. В соответствии с диаграммой состояния $Ti-N$ таким нитридом является ϵ -фаза (Ti_2N), имеющая тетрагональную кристаллическую решетку и узкую область гомогенности [147]. Однако покрытия, полученные при давлении $(5...6) \times 10^{-2}$ Па, наряду с высокой микротвердостью характеризуются малой пластичностью и поэтому склонны к хрупкому разрушению в процессе трения [145, 146]. Уменьшение значений микротвердости покрытия при дальнейшем повышении давления азота может быть следствием двух причин: образования более однородного по структурным характеристикам конденсата стехиометрического состава (TiN) и уменьшения искажений кристаллической решетки образующихся нитридов вследствие падения скорости конденсации [148, 152]. Уменьшение скорости конденсации в области давлений азота выше 6×10^{-2} Па обусловлено процессами взаимодействия частиц плазмы в объеме, а также уменьшением энергии ионов титана на газовой мишени [61, 139].

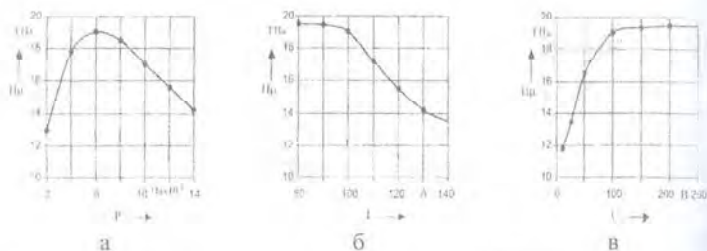


Рисунок 6.7 Зависимость микротвердости покрытия $TiN+CrN$ от давления реакционного газа при $I=100$ А и $U_0=100$ В (а); тока дуги при $P=8 \times 10^{-2}$ Па и $U_0=100$ В (б); напряжения на подложке при $P=8 \times 10^{-2}$ Па и $I=100$ А (в)

Существенное влияние на микротвердость покрытия оказывает также величина тока дугового разряда. В диапазоне 80...100 А микротвердость покрытия $TiN+CrN$ изменяется незначительно. Дальнейшее повышение тока дугового разряда приводит к существенному снижению микротвердости покрытия. Это обусловлено тем, что увеличение тока дуги, особенно в диапазоне 100...140 А, приводит к резкому увеличению количества и размеров капель титана (материал катода) в плазменном потоке [139, 140, 141]. Кроме того, при боль-

ших значениях тока (120...140 А) на поверхности конденсации нарастают капли, появляются макроблоки размерами в десятки микрометров, осажденные, по-видимому, в твердом состоянии. Так как капельная фаза, как указывалось выше, имеет значительно меньшую микротвердость в сравнении с нитридом титана-хрома, то микротвердость всего слоя покрытия $TiN+CrN$ в целом снижается.

С увеличением потенциала на подложке от 0 до 100 В микротвердость покрытия увеличивается. Это связано с тем, что при малых значениях потенциала на подложке энергии ионов титана и связанной с ней температуры подложки недостаточно для эффективного протекания плазмохимической реакции металлической плазмы с реактивным газом на поверхности конденсации. В результате при нормальном давлении азота конденсат практически полностью состоит из $\alpha-Ti$, а покрытие имеет серый или серо-желтый цвет. В то же время в рабочем диапазоне (100...200 В), используемом на практике, потенциал подложки на микротвердость покрытия практически не влияет, а покрытие имеет насыщенный желтый цвет. Таким образом, оптимальные параметры режима нанесения покрытия $TiN+CrN$ является:

тока дуги 80-100 А;

напряжения на подложке 100...120 В;

давления реакционного газа $P=8 \times 10^{-2}$ Па.

6.5 Механическая обработка деталей, восстановленных нанесением вакуумно-плазменных покрытий

Механическую обработку плунжеров проводили на круглошлифовальном станке 3А164 шлифовальным кругом ПП 800x80x305 24А ПС27К5535 м/с 1 кл А ГОСТ 2424—93 при частоте вращения плунжера 40-50 мин⁻¹ и окружной скорости шлифовального круга 20-25 м/с, продольная подача 1-2 мм/об, поперечная подача 0,001 мм/об. В табл. 6.7. приведена точность обработки плунжеров и игл после механической доводки.

Процесс пригонки иглы и корпуса распылителя начинается с подбора пары, при этом игла должна выступать из отверстия корпуса распылителя не более чем на 6 мм. Совместная доводка иглы и корпуса распылителя аналогична доводке плунжерной пары. Особенность доводки заключается в том, что корпус распылителя во избежание деформации не закрепляют.

Таблица 6.7 Точность обработки плунжеров и игл после механической обработки

Тип сборки	Обработка	Съем металла при обработке, мм	Погрешности геометрической формы, мм (не более)					Класс чистоты поверхности по ГОСТ 2789-59
			Непрямолинейность	Овальность	Конусность	Корсетность (бочкообразность)	Огранка	
Взаимная притирка	Предварительная	0,009-0,015	0,003	0,005	0,005	0,002	0,002	До 10
	Окончательная	0,002-0,005	0,002	0,002	0,003	0,001	0,001	До 12
Селективная сборка	Предварительная	0,006-0,01	0,0005-0,0008	0,0002-0,0008	0,0008-0,0003	Не допускается	До 0,0005	11-12
	Окончательная	0,002-0,005	0,0002-0,0007	0,0001-0,0007	0,0003-0,0002	То же	До 0,0002	12-13

Для обеспечения линейного размера между торцами иглы и корпусом распылителя ($0,4_{-0,01}^{+0,01} - 0,45_{-0,01}^{+0,01}$) шлифуют запорный конус иглы с установкой детали в призму по цилиндрической части с упором в торце либо шлифуют торец иглы, принимая за базу цилиндрическую часть с упором в запорный конус. Неконцентричность цилиндрических направляющих поверхностей, запорных конусов иглы и корпуса допускается в пределах 0,001-0,002 мм. Взаимнопритертые конусные поверхности должны удовлетворять требованиям герметичности при работе под высоким давлением. Зазор в притертых распылителях составляет 0,0008-0,003 мм, причем в различных сечениях изменяется от 0,0008 до 0,015 мм. Процессе пригонки седла и клапана начинается с

сортировки деталей на группы по размерам отверстий через 0,002 мм. Совместную обработку клапанной пары начинают с подбора клапана и седла. Зазор по разгрузочному пояску не должен превышать 0,008 мм. При затруднении с подбором разрешается совместная притирка по пояску пастой 3М. Запорные конусы клапана с запорным конусом седла притирают на доводочной бабке пастой 5М. Клапан, закрепленный в цанговом патроне, вращается со скоростью 24000 об/мин. После совместной притирки пару тщательно промывают в чистом бензине и в дизельном топливе и подвергают контролю. Клапан должен садиться на запорный конус седла под действием собственного веса из любого положения по высоте и по углу поворота. Местные торможения и заедания клапана не допускаются.

6.6 Технология восстановления прецизионных деталей сельскохозяйственной техники нанесением вакуумно-плазменных покрытий

Изношенные поверхности детали топливной аппаратуры можно эффективно восстановить путем нанесения упрочняющего покрытия методом вакуумного напыления способом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ).

Технология подготовки поверхности плунжера под напыление и нанесение покрытия следующая:

1) Обработать деталь на аноде при напряжении 300 В в электролите (сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — 5 %; вода — остальное) при температуре 60 °С в течение 10—15 мин.

2) Обезжирить последовательно в двух растворах в течение 5—7 мин:

а) синтанол ДС-10 — 3 %, ортофосфорная кислота — 5 %, вода — остальное;

б) водный раствор синтетического моющего средства «Новость» (30 г/л) при температуре 70 °С с наложением ультразвуковых колебаний (установка УЗУ-0,25).

Промыть детали в проточной холодной воде. Протереть бязью, смоченной в спирте ректификате (ГОСТ 5962—67). Прогреть в течение 30 мин при температуре 150 °С в печи типа СНОЛ для удаления остаточных газов с поверхности.

3) Установить детали в вакуумной камере на карусели установки вакуумного напыления ННВ-6,6-И1 с двумя катодами (титан и хром) (рис. 6.8).

4) Откачать воздух из вакуумной камеры до давления $(1...3) \times 10^{-3}$ Па. Осуществить ионную бомбардировку поверхности образцов в вакуумной камере при ускоряющем напряжении 1000 В и токе дуги 90 А.

5) Произвести очистку ионами инертных газов. Режимы очистки: рабочий газ - аргон; ускоряющее напряжение 1,5—4,0 кВ; ток подложки 100 мА; ток соленоида 1,5—3,0 А; давление в камере $(2,66...6,65) \times 10^{-2}$ Па, время обработки — 15—30 мин.

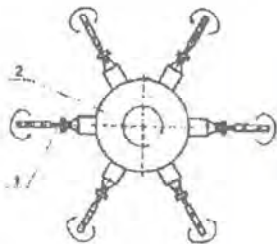
6) Произвести очистку ионами материала катода.

Режим: давление в рабочей камере $P = (1...3) \times 10^{-3}$ Па; ток дугового испарителя $I = 50—130$ А; напряжение на подложке $U = 600...1500$ В; время проведения операции — импульсно 40—90 с.

Рисунок 6.8 Схема вакуумного нанесения покрытия:

1 - плунжер;

2 - поворотный стол (карусель)



Выдержать деталь в течение 5—20 секунд для выравнивания температуры по сечению детали и снижения уровня термических внутренних напряжений.

7) Нанести подслой титана.

Режим нанесения покрытия: катод — титан; газ — азот; давление в рабочей камере $P = (1...3) \times 10^{-3}$ Па; ток дугового испарителя $I = 70...100$ А; напряжение на подложке $U_n = 50...150$ В; время проведения операции — непрерывно 2—3 мин.

8) Нанести переходной слой.

Режимы нанесения покрытия: катод — титан; газ — азот; давление в рабочей камере $P = (1...3) \times 10^{-2}$ Па; ток дугового испарителя $I = 70...100$ А; напряжение на подложке $U_n = 50...150$ В; время проведения операции — непрерывно 2—3 мин.

9) Нанести основной слой.

азот; давление в рабочей камере $P = (6...9) \times 10^{-2}$ Па; ток дугового испарителя $I = 70...100$ А; напряжение на подложке $U_n = 50...150$ В; время проведения операции — непрерывно 20—25 мин.

Охладить детали в вакуумной камере в течение 10 мин.

6.7 Совершенствование оборудования и технологии нанесения покрытий на прецизионные детали сельскохозяйственной техники

Проведенные ранее исследования показывают [61, 139, 148], что при нанесении тонкопленочных покрытий в вакууме путем конденсации из плазменного потока, генерируемого вакуумной дугой, на поверхности конденсации осаждаются также расплавленные макрочастицы (капли) металла расходуемого катода [148].

Показано, что присутствие включений металла на поверхности упроченной детали или инструмента существенно снижает триботехнические характеристики в процессе трения, а в ряде случаев является причиной разрушения защитного слоя покрытия вследствие контактного «схватывания» выступающих вершин конденсированных макрочастиц металла с поверхностью контр-тела [145, 149].

Для прецизионных деталей и инструмента недопустимо присутствие конденсированных металлических частиц, так как становится проблематичным управление толщиной слоя, параметрами шероховатости и размерами, определяющими точность и функционирование детали или инструмента.

Поэтому представляет интерес отделение (сепарация) микро-, макрочастиц и нейтральной компоненты паро-плазменного потока транспортировки плазменного потока металлической плазмы вдоль протяженной системы, в которой реализованы принципы плазмооптики [150]. Условия прохождения потока разреженной плазмы вдоль участка тороидального магнитного поля имеют вид [151]:

$$\frac{r}{u} \geq \frac{L}{v_0},$$

где $u = Mc \cdot v_0^2 / Z_c R H$ — скорость центробежного дрейфа ионов в неоднородном поле, M , Z_c , v_0 — масса, заряд и продольная скорость ионов соответственно, R — радиус кривизны магнитных силовых линий, L — длина участка тороидального поля, r — радиус плазмоведа.

мы с энергией ионов $E/Z=50\text{эВ}$ на участке длиной $L=R$ при $r=4$ см требуется магнитное поле напряженностью свыше 2 кЭ. Существенно улучшаются условия прохождения плазменного потока в случае подачи на плазмодод положительного потенциала [151, 153]. С ростом положительного потенциала плазмодода до 10-15 в ионный ток насыщения на выходе системы возрастает по сравнению с первоначальным более чем на порядок (рис. 6.9), а коэффициент пропускания системы достигает 50%. Периферийные силовые линии магнитного поля, пересекаясь со стенкой плазмодода, приобретают его потенциал, в то время как приосевые линии находятся под потенциалом катода источника, таким образом, система приобретает плазмооптические свойства. Направленное к оси электрическое поле обеспечивает эффективную изоляцию ионов от стенок плазмодода и транспортировку их вдоль криволинейной магнитной силовой трубки. Как видно из графика, увеличение прохождения плазмы с ростом потенциала наблюдается до определенного значения: при увеличении $U_{\text{н}}$ свыше 18 В ионный ток на выходе системы начинает уменьшаться. По-видимому, это связано с отражением части ионов при входе в плазмодод продольным электрическим полем и их торможением [151, 153]. Эффект наблюдается также, когда незаземленный плазмодод приобретает определенный положительный потенциал без подключения к специальному источнику. На (рис. 6.10) представлена зависимость величины и полярности плавающего потенциала плазмодода $U_{\text{пл}}$ от магнитного поля. При малых полях, когда электронный компонент замагничен слабее, стенки плазмодода заряжены отрицательно вследствие высокой подвижности электронов. По мере роста поля степень замагниченности электронов возрастает, и при некотором значении Hn ток на стенку становится преимущественно ионным, а потенциал плазмодода – положительным.

Дальнейший рост потенциала определяет улучшение условий прохождения плазмы вдоль системы (рис. 6.9) по сравнению с режимом заземленного плазмодода. Очевидно, положительный плавающий потенциал стенок поддерживается за счет бомбардировки их быстрыми ионами.

Разработана и изготовлена оригинальная система (рис. 6.11) сепарации (отделения) расплавленных, твердых и парообразных нейтральных частиц, основанная на принципах плазмооптики, т.е. отклонении в направлении поверхности конденсации (с поворотом на 90°) ионизированной компоненты плазменного потока (ионы металла с различным зарядом) в скрещенных магнитном и электрическом полях особой кон-

фигурации. Нейтральные частицы при этом движутся прямолинейно и осаждаются на стенках камеры—плазмоведа [151, 153].

Конструктивные особенности предлагаемой системы плазмосепарации, выполненной в виде $\frac{1}{4}$ тора (кругового кольца), на котором через $9-18^\circ$ установлены соленоиды (плазменные линзы), подключенные к автономным источникам питания. Устройство работает следующим образом. В электродуговом испарителе 1 (рис. 6.11.) зажигается вакуумная электрическая дуга катодной формы, развивающаяся в катодных микропятнах на твердой и интегрально холодной поверхности расходуемого электрода.

Рисунок 6.9 Зависимость выходного ионного тока (I_n) системы от потенциала плазмоведа ($+U_n$)

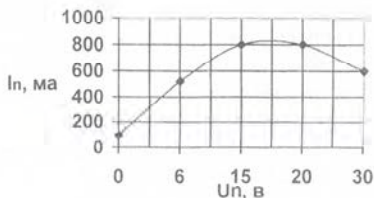


Рисунок 6.10 Зависимость выхода ионного тока системы плазмосепарации (1) и плавающего потенциала плазмоведа (2) от напряженности магнитного поля на оси плазмоведа (H_n)

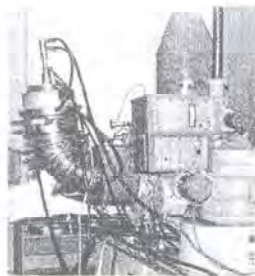
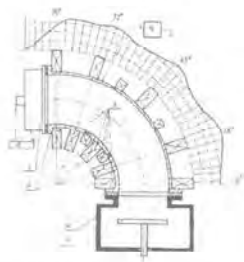
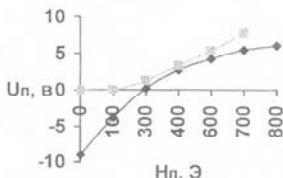


Рисунок 6.11 Вакуумная камера установки «Булат-6», оснащенная системой плазмосепарации и газовым ионным источником «Лида-2»:

1 – электродуговой испаритель; 2 – электромагнитная система; 3 – плазмовод; 4 – вакуумная камера; 5 – система вращения; 6 – источник постоянного тока

ионам металла сообщается дополнительная энергия и усилие, направленное к центру плазмоведа, заставляющее скользить вдоль оси системы к выходу в камеру 3 в направлении напыляемых деталей 4, на которых и осаждается покрытие.

Созданная конструкция системы плазмосепарации, содержащая элементы изобретения и «Know how», позволяет полностью исключить нейтральные микрочастицы от формирования слоя покрытия и снизить потери ионной компоненты металла покрытия до 20-30% против 60-70% у подобных систем [151, 154]. Кроме этого, ионизация плазменного потока позволила получить качественные покрытия при более низких температурах деталей 450-500⁰К, что обеспечивает сохранение дисперсности структуры покрытия и хорошую адгезию слоя покрытия к подложке за счет повышения энергии конденсируемых на них ионов плазмы. При соударении с твердой поверхностью ионов с достаточно высокой энергией в микрообъемах создаются условия, при которых обеспечивается образование устойчивых химических связей без объемного нагрева деталей. Именно это лежит в основе предлагаемого способа нанесения ионно-плазменных покрытий: совмещение сепарации плазмы с параллельной ионизацией плазменных потоков. Высокая степень ионизации ионно-плазменного потока предопределяет равномерное распределение азота в покрытиях, а следовательно, и однородность фазового состава, что подтверждается его исследованиями методом рентгено-структурного анализа. Исследования, выполненные с применением современных металлографических методов, позволили установить, что для покрытий $TiCN$ [152, 153] характерны мелкодисперсная структура с размером зерен порядка 2000Å⁰, существование промежуточного слоя с переходной структурой, а также микроволнистый рельеф с высотой неровностей порядка 100Å⁰ (рис. 6.12, а, б). Совмещение систем сепарации плазмы с дополнительной ионизацией газового потока при получении покрытий, в том числе на основе Ti и его тугоплавких соединений, обладает рядом функциональных и потребительских свойств, превосходящих аналогичные показатели конденсатов, получаемых из прямых (не сепарированных) плазменных потоков.

Проведенными ранее исследованиями [134, 152, 154] установлено, что серийно производимые отечественными предприятиями плунжерные пары топливных насосов имеют значительный разброс зазоров от 3,7 до 5,4 мкм, в то время как для качественной работы топливного насоса зазор между плунжером и втулкой должен составлять от 1,5 до 2,5 мкм. Зазоры в изношенных парах составляли от 5,5 до 15 мкм, что

потерей мощности и тяговых характеристик дизельных двигателей. Весьма существенное влияние на работу дизельного двигателя оказывает степень неравномерности подачи топлива в цилиндры секциями плунжерных пар топливного насоса высокого давления [131, 134].



а



б

Рисунок 6.12 Топография поверхности вакуумно-плазменного покрытия, нанесенного с использованием электродуговых испарителей: а – традиционным методом; б – из сепарированного потока. SEM, x5000

Данная проблема также существенно влияет на вопросы долговечности и равной прочности деталей дизельного двигателя. Возможности преселективной подборки монтируемых в топливный насос плунжерных пар по величине зазора и по величине порции топлива [131, 134], подаваемой в цилиндр, достаточно ограничены.

Поэтому актуальной задачей является прецизионное наращивание диаметра плунжеров износостойкими и желательными антифрикционными материалами, для обеспечения оптимальных значений зазоров и гидравлической плотности плунжерной пары топливного насоса. Наиболее перспективным методом решения этой задачи является использование PVD-процессов, в частности, вакуумно-плазменной технологии нанесения многослойных износостойких композиций, включающих твердый слой на основе фаз внедрения переходных металлов *IVa-VIa* групп Периодической системы элементов, которые отличаются: высокой твердостью, термической и химической устойчивостью, высокой адгезией и малым коэффициентом трения по углеродистой стали. Для реализации процесса ваку-

умно-плазменного нанесения покрытий на плунжеры топливных насосов решаются следующие задачи:

- Отделение (сепарация) дисперсных макрочастиц (твердых, каплеобразных, расплавленных) от формирующего покрытие потока ионов металла в специально разработанной криволинейной плазмо-оптической системе, благодаря которой поток ионов металла поворачивается на 90° и направляется на деталь, а нейтральные частицы движутся прямолинейно и осаждаются на охлаждаемой водой ловушке [151, 153].

- Снижение температуры поверхностных участков плунжеров в процессе нанесения покрытий, до величин, исключающих отпуск основного материала ($<180^\circ$) путем исключения из процесса очистки ионами металла и замены очисткой ускоренным потоком ионизированного нейтрального газа с последующим осаждением слоя покрытия в условиях ионного асистирувания реакционным газом (N_2 , C_2H_2 , CH_3 и др.).

- Обеспечение равной скорости осаждения покрытия по рабочей поверхности плунжера путем строго определенной ориентации детали по отношению к оси плазменного потока и придания вращательного (планетарного) движения.

Из анализа характеристик материалов следует: нитриды и карбиды хрома и молибдена благодаря кристаллическому строению этих фаз внедрения и высоким физико-механическим характеристикам наиболее перспективны для нанесения в качестве твердого износостойкого слоя на поверхность плунжеров топливных насосов. Для улучшения сцепления с основой целесообразно наносить на поверхность слой чистого металла (Cr или Mo), толщиной 0,2-0,5 мкм, а на промежуточный твердый слой нитрида (или карбида) хрома (молибдена) – слой твердой смазки MoS_2 толщиной 0,4-0,5 мкм. В результате конструкция покрытия для плунжерных пар представляет собой трехслойную композицию из: 1- адгезионного слоя металла Cr или Mo 0,2-0,5 мкм, 2-промежуточного твердого износостойкого слоя нитрида или карбида (толщина выбирается в зависимости от величины зазора в плунжерной паре, который компенсируется покрытием) и 3- наружного слоя 0,4-0,5 мкм MoS_2 .

Предлагается следующий технологический процесс нанесения покрытий для уменьшения зазоров в новых плунжерных парах до оптимальных значений и восстановления использованных плунжерных пар применительно к созданному опытно-экспериментальному оборудованию.

• Точный замер плунжеров и разовка на группы для нанесения покрытий в одном технологическом цикле (16 шт. на 1 загрузку).

- Подготовка поверхности (очистка, обезжиривание, мойка).
- Загрузка в вакуумную камеру и установка в приспособление-вращатель.
- Откачка камеры с плунжерами до вакуума 10^{-3} - 5×10^{-4} Па.
- Очистка ионами аргона с использованием источника «Аида-2».

При включенной системе планетарного вращения плунжеров, поверхности плунжеров, подлежащие нанесению покрытия, обрабатываются ускоренным в источнике «Аида-2» потоком ионов аргона с возрастающей по мере очистки энергией 150-300 эВ (ток накала 6-12А) при давлении аргона в камере $(5-8) \cdot 10^{-2}$ Па. Затем на плунжеры подают отрицательный потенциал смещения, ступенями увеличивая до максимального значения (1700В) в ходе процесса, не допуская возникновения микродуговых разрядов на поверхностях плунжеров.

1. Осаждение адгезионного слоя металла. Включают электродуговой испаритель и устанавливают ток горения дуги 130-150А для *Mo* или 60-80А для *Sr*. Потенциал на плунжерах -25-50 В для *Mo* и -80-150 В для *Sr*.

2. Осаждение износостойкого слоя нитрида (карбида) молибдена (хрома) из сепарированного потока плазмы. В камеру подают через источник «Аида-2» слегка ионизированный реактивный газ азот или метан до $(2-5) \cdot 10^{-3}$ Па. В результате реакций прямого плазмохимического синтеза, протекающего на поверхности между осаждающимися ионами металла и ионами газа образуется твердый износостойкий слой нитрида или карбида металла при значительно более низких температурах (150-180⁰С), чем по традиционной технологии (500-600⁰С), что исключает возможность отпуса основы плунжера на низкую твердость.

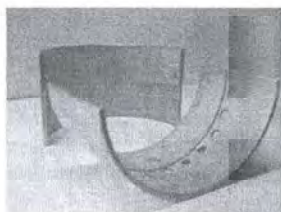
3. Нанесение твердого смазочного слоя *MoS₂*. В камеру подают через источник «Аида-2» ионизированный серосодержащий реактивный газ до $(2-8) \cdot 10^{-4}$ Па. В результате реакций прямого плазмохимического синтеза, протекающего на поверхности между осаждающимися ионами металла и ионами газа, образуется твердый смазочный слой дисульфида молибдена *MoS₂*.

6.8 Применение вакуумно-плазменных покрытий при ремонте деталей двигателей, оснастки и запорной арматуры

Вакуумно-плазменные покрытия нашли широкое применение для упрочнения и восстановления деталей широкой номенклатуры, в частности деталей цилиндропоршневой группы, вкладышей коленвалов, деталей запорной аппаратуры, элементов штамповой и литейной оснастки и т.д. На рис. 6.13. приведены некоторые примеры таких деталей с покрытиями.



а) поршни из алюминиевого сплава дизелей типа Д80 с антизадирным и износостойким покрытием. Толщина покрытия 3–5 мкм



б) вкладыши тепловоза ТС 116



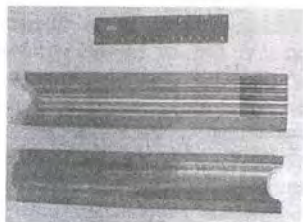
в) элементы запорной и регулирующей арматуры с коррозионно-стойким покрытием. Толщина покрытия 30–50 мкм



г) сферическая поверхность плунжера с покрытием



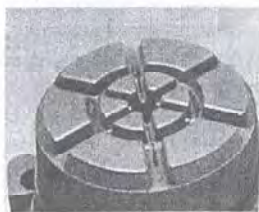
д) вырубные штампы с покрытием



е) формообразующий штамп с покрытием



ж) вырубной инструмент для вырубного штампа БЕРЕНС и ТРУМАТИК с покрытием



з) пресс-оснастка с покрытием для литья латуни

Рисунок 6.13 Виды деталей с упрочняющими вакуумно-плазменными покрытиями

Широкие технологические возможности вакуумно-плазменного напыления дают возможность упрочнять и восстанавливать поверхности деталей, передающих крутящий момент, например, детали шлицевых соединений.

7 ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Учитывая высокие требования, предъявляемые к современным ремонтным производствам, достаточно высокую стоимость оборудования и технологии нанесения покрытий, актуальной задачей остается как совершенствование самих материалов покрытий, так и разработка методов повышения качества покрытия после его формирования.

7.1 Совершенствование материалов ионно-плазменных покрытий

На работоспособность режущих инструментов с покрытиями, представляющими собой тугоплавкие соединения переходных металлов IV-VI групп Периодической системы элементов, первостепенное влияние оказывают физико-механические и химические свойства покрытий. Как показано в работе [155], важнейшим свойством износостойких покрытий, благодаря которому обеспечивается повышение работоспособности инструментов, является низкая адгезионная активность по отношению к обрабатываемым материалам. Эта способность покрытий связана со специфическим характером межатомных связей таких тугоплавких соединений как карбид и нитрид титана. Эти соединения характеризуются высоким статистическим весом атомных стабильных конфигураций (СВАСК) sp^3 и d^6 и низким статистическим весом конфигураций промежуточного спектра. Стабильные атомные связи соединения энергетически устойчивы при взаимодействии с материалом контртела (стружки), вероятность их разрушения ничтожна, и поэтому при высоких СВАСК, на поверхности покрытия мало свободных связей, которые могли бы принять участие в организации межатомного взаимодействия между контртелами.

Наиболее стабильные конфигурации sp^3 , и они обеспечивают при умеренных и низких температурах низкую адгезионную активность TiC , TiN , однако с повышением температуры стабильность конфигурации sp^3 начинает изменяться - адгезионная инертность растет. Этим и объясняется, что TiC , TiN при обработке труднообрабатываемых материалов (при высоких температурах) обладают адгезионной активностью. Однако с увеличением температуры повышается стабильность СВАСК d^5 -конфигураций, т.е. атомных связей «металл-металл». Конфигурационная модель вещества (КМВ) связывает высокотемпературную адгезионную активность тугоплавких соединений на основе d -конфигураций переходных металлов, главным образом с соотношением между количеством (sp^3 -конфигураций и конфигураций промежуточного d^5 -спектра (коллективизированы d -электроны). Чем выше степень коллективизации металлических атомов в соединении при образовании стабильной d -конфигурации, тем меньше стабильность такой конфигурации и тем хуже связаны металлические атомы с кристаллической решеткой соединения, и тем легче такую связь разрушить. При нарушении связи велика вероятность отрыва металлического атома от покрытия (изнашивание) и использование осво-

бодившихся электронов для организации связи с контртелом (схватывание, повышение силы трения). Однако при прочих равных условиях степень коллективизации металлических атомов, участвующих в образовании устойчивой конфигурации, зависит от среднего числа электронов на d -уровне металлического атома. В соединении TiN -металлические атомы титана имеют два электрона на атом, для организации d^5 -конфигурации необходима коллективизация d -электронов 5 атомов. В этом случае образуются две стабильные d^5 -конфигурации. Если металлический атом имеет в среднем 2,5 электрона на d -уровне, то необходима коллективизация всего двух атомов, при этом образуется одна d^5 -конфигурация. Ясно, что в последнем случае степень коллективизации меньше и высокотемпературная стабильность такого соединения будет выше.

Приведенные рассуждения являются теоретической основой для целенаправленной разработки износостойких покрытий, обладающих низкой адгезионной активностью при высоких температурах при обработке труднообрабатываемых материалов.

Идея заключается в создании многокомпонентных покрытий, основная фаза которых характеризовалась низкой степенью коллективизации атомов при образовании d -конфигурации sp^3 и d^5 .

Особенности свойств нитридов переходных металлов объясняются способностью атома азота принимать электроны металла с достройкой до стабильной sp^3 -конфигурации, или отдавать электрон с образованием стабильной конфигурации sp^3 . При этом, образуются соединения соответственно либо с четко выраженной ионной связью, либо – металлической, причем в обоих случаях имеет место определенная доля ковалентной связи. Химические и физические свойства нитридов и определяются гетеродинамичностью такой химической связи [156].

Согласно конфигурационной модели вещества (КМВ) для множества систем, физико-химический фактор свойств $s-d-f$ [156] элементов в конденсированных системах определяют локализованные электроны, энергия которых сильно зависит от заполнения их оболочек, благодаря чему они играют существенную роль в структурообразовании и формировании свойства материалов.

В сплавах переходных металлов IV–VI групп Периодической системы элементов, основными стабильными конфигурациями являются d -конфигурации. Проведенный анализ в работе [156], показал, что наибольший эффект в формировании сплавов вносят легирующие

монов основы по характеристикам внешнего строения.

Рассматривая влияние d -переходных металлов на прочностные свойства титана, циркония при повышенных температурах, согласно КМВ [156], можно отметить, что наибольший упрочняющий эффект дают легирующие элементы V и VII групп (Mo , W , Cz , Re), обладающих высокой степенью локализации валентных электронов и стабильные d^5 -конфигурации, а также способных в результате донорно-акцепторного обмена валентных электронов с атомами титана, циркония повышать степень локализации валентных электронов в d^6 -конфигурации у атомов последних (добавки V группы V , Nb , Ta).

Учитывая приведенное выше, можно управлять свойствами напыленных покрытий – повышать их твердость и снижать адгезионную активность по отношению к контактирующим материалам, за счет легирования Mo , W , Cz , Re и др. элементами.

7.2 Методология синтеза функционально ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий

С развитием научно-технического прогресса непрерывно повышаются требования к качеству функционирования различных машин и оборудования. Создаваемые технические системы постоянно совершенствуются, при этом расширяются их эксплуатационные характеристики, решаются вопросы экологии, эстетики и эргономики. Для реализации этого на всех этапах жизненного цикла технических систем необходимо обеспечивать их качественно новую совокупность свойств и меру полезности. Это может быть достигнуто посредством повышения качества отдельных подсистем, узлов, деталей и элементов машин.

С целью разработки методологии создания при упрочнении и восстановлении деталей покрытий, наиболее полно отвечающих эксплуатационному нагружению, авторы [157] ввели понятие «функциональноориентированное покрытие», под которым понимается специальное комплексное покрытие на поверхности изделий или отдельных их зон – одним или множеством различных покрытий, варьируемых по виду, типу, варианту, качеству и технологии нанесения, которые функционально соответствуют условиям их эксплуатации в каждой отдельной зоне изделия. При этом их вид, тип, вариант, качество и технологии нанесения целенаправленно определяются, а также топологически, функционально и количественно ориентируется при нанесении на каждые отдельные зоны изделия в

зависимости от заданных функциональных особенностей их эксплуатации.

Основная задача такого покрытия – максимально повысить общие эксплуатационные параметры изделия за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов и/или поверхностей изделия в зависимости от его зональных функциональных особенностей эксплуатации элементов. При этом изделия машиностроения максимально адаптируются по своим свойствам к особенностям их эксплуатации. Здесь на отдельные зоны поверхностей наносятся различные по своим свойствам покрытия.

Изделия машиностроения имеют большое число различных поверхностей и зон, которые реализуют в ряде случаев при эксплуатации неодинаковые функции. Поэтому они должны иметь различные физико-механические свойства, характеристики и особенности.

Методика синтеза функционально ориентированных вакуумоплазменных покрытий изделий машиностроения выполняется на основании общей методологии (рис. 7.1).

Все необходимые параметры для нанесения функционально ориентированных покрытий изделий машиностроения выбираются из четырех баз данных (рис. 7.1), в которых содержатся генерированные множества следующих данных:

- в базе данных № 1 – множества типов, видов и вариантов различных покрытий;
- в базе данных № 2 – множества функциональных свойства покрытий;
- в базе данных № 3 – множества различных способов и методов нанесения покрытий;
- в базе данных № 4 – множества вариантов типовых, комплексных и специальных технологий.

Можно отметить, что базы данных в предлагаемой методике синтеза покрытий изделий машиностроения могут формироваться на основе приведенной, на рис. 7.2 классификационной схемы.

Одним из перспективных направлений повышения качества изделий машиностроения является использование вакуумных ионноплазменных покрытий в виде специальных дискретных покрытий. Такое покрытие, образованное из нескольких различных зон по поверхности изделия, в каждой из которых наносится различный вид покрытия.

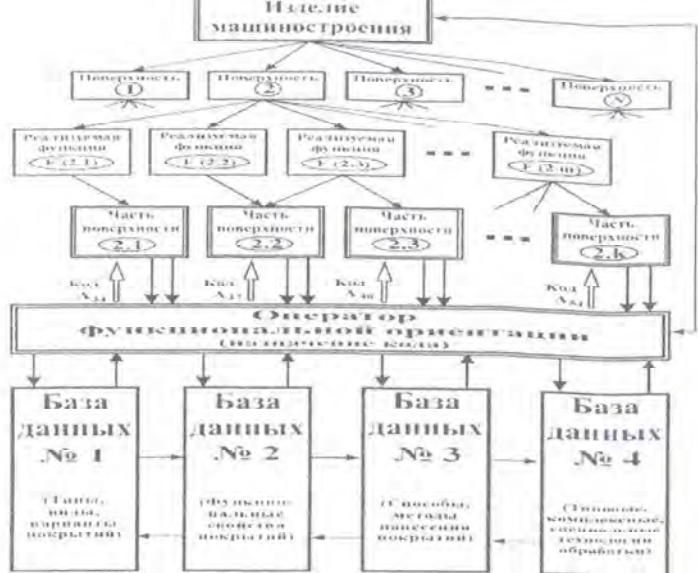


Рисунок 7.1 Принципиальная схема общей методологии синтеза функционально ориентированных покрытий

При этом каждая зона или совокупность зон покрытия предназначены для выполнения заданного функционального назначения части поверхности изделия [5].

В заключение можно отметить, что предложенный новый класс специальных покрытий, новые принципы нанесения функционально ориентированных покрытий и технологическое обеспечение позволяют обеспечить качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий машиностроения. А это даст возможность создавать машины и технологические системы с новыми возможностями, что существенно повышает их технико-экономические показатели при эксплуатации. При этом разработанная методология синтеза функционально ориентированных покрытий дает возможность производить создание новых видов, типов и вариантов этих покрытий и решать вопросы повышения эксплуатационных свойств изделий для различных условий работы машин и систем.

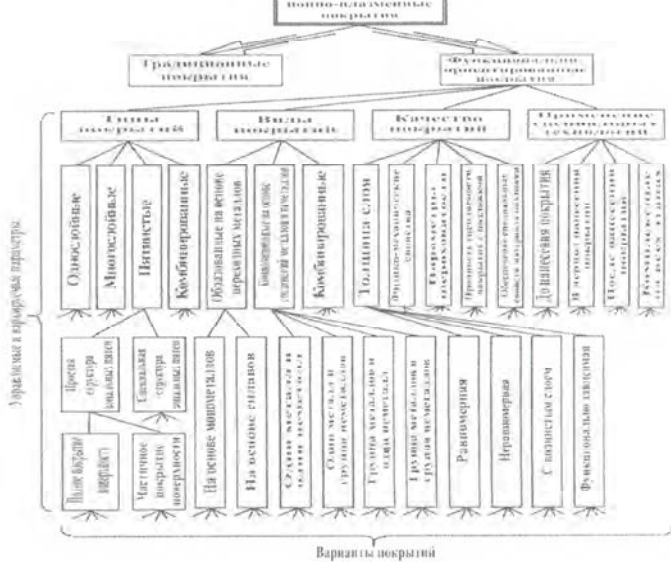


Рисунок 7.2 Классификация функционально ориентированных вакуумно-плазменных покрытий изделий машиностроения

В результате анализа процессов изнашивания поверхностей и утраты работоспособности узлов трения, изучения особенностей управления процессами комбинированной обработки показана целесообразность применения синергетического подхода к техническим системам.

На основе синергетического подхода сформирована математическая модель технологического и эксплуатационного наследования показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении технических систем.

На основании данного подхода отработаны технологические режимы нанесения вакуумно-плазменных покрытий на отдельные детали сельскохозяйственной техники при ее восстановлении и упрочнении, а также на режущий инструмент для обработки деталей в т.ч. с износостойкими покрытиями.

Список литературы

1. Ляшенко, Б.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине / Б.А. Ляшенко, С.А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1(1). – С. 94–104.
2. Лейман, К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов / К. Лейман. – Москва: Атомиздат, 1979. – 296 с.
3. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк и др. – Москва: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.
4. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В.Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – Москва: Машиностроение, 1991. – 208 с.
5. Износостойкие диффузионно-легированные композиционные покрытия / М.В. Лучка [и др.]; – Киев: Техника, 1993. – 143 с.
6. Dearnaley, G. Ионная имплантация стали и твердых сплавов / G. Dearnaley [и др.] // «IPAT 79, Proc. Int. Conf.: Ion Plat and Allied Techn., London, 1979», Edinburgh. – 1979 – P. 243–254.
7. Береснев, Б.М. Экологически безопасные вакуум-плазменные оборудование и технологии нанесения покрытий / Б.М. Береснев, Д.Л. Перлов, А.И. Федоренко. – Харьков: ХИСПИ, 2003. – 292 с.
8. Коняшин, И.Ю. Нанесение износостойких покрытий на безвольфрамовые твердые сплавы / И.Ю. Коняшин, А.И. Аникеев. // Свойства и применение спеченных твердых сплавов / Всес. НИИ и проект. институт тугоплав. мат. и тверд. сплавов (ВНИИТС). – Москва, 1991. – С. 98–102.
9. Каменева, А.Л. Структура и свойства покрытий, получаемых в условиях низкотемпературного плазменного синтеза на быстрорежущих сталях и твердых сплавах: автореф. ...дисс. канд. техн. наук : / А.Л. Каменева; Пермск. гос. технол. универ. – Пермь, 2002. – 20 с.
10. Свирид, М.М. Підвищення зносостійкості сталей в корозійно-активних середовищах борними покриттями: автореф. ...дис: канд. тех. наук: 05.06.04 / М.М. Свирид; Нац.. авіаційн. ун-т. – К., 2001. – 23 с.
11. Петров, С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С.В.Петров, А.Г. Саков. – Киев: ТОПАС, 2000. – 220 с.

12. Береснев, В.М. Экологически безопасные вакуумно-плазменные оборудование и технологии нанесения покрытий / В.М. Береснев, Д.Л. Перлов, А.И. Федоренко. – Харьков: ХИСП, 2002. – 300 с.

13. Структура высокотвердых покрытий на основе молибдена, полученных при конденсации плазмы вакуумно-дугового разряда / А.А. Андреев, Л.В. Булатова, А.С. Булатов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1981. – № 5. – С. 33-35.

14. Романов, А.А. Применение технологии КИИТ для упрочнения инструмента / А.А. Романов // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2002. – № 12. – С. 8–9.

15. Каплун, В.Г. Прогрессивные технологии и оборудование для диффузионного упрочнения поверхности элементов конструкций в плазме тлеющего разряда / В.Г. Каплун // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 25. – С. 157–161.

16. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.

17. Ящерицын, П.И. Работоспособность узлов трения машины / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288 с.

18. Васильев, А.С. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.] – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.

19. Хейфец, М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 156 с.

20. Управление свойствами технологической среды при электрофизической обработке / П.А. Витязь, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов, М.Л. Хейфец // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 7. – С. 18 – 23.

21. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 106 – 109.

22. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов / П.И. Ящерицын [и др.] // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – № 1. – С. 112 – 116.

23. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – Москва: Машиностроение, 1985. – 264 с.

24. Рыжов, Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.

25. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки / Б.А. Голоденко, В.П. Смоленцев // Вестник машиностроения. – 1994. – № 4. – С. 25 – 28.

26. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / А.Г. Ракович [и др.] Под общ. ред. А.Г. Раковича. – Минск: ИТК НАНБ, 1997. – 276 с.

27. Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики / Ю.М. Коршунов. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.

28. Эбелинг, В. Образование структур при необратимых процессах / В. Эбелинг. – Москва: Мир, 1979. – 279 с.

29. Сигорский, В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский. – Киев: Техника, 1977. – 768 с.

30. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – Москва: Мир, 1980. – 404 с.

31. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.

32. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов [и др.] – Мн.: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.

33. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы / А.И. Олемской, И.В. Коплык // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 10. – С. 1105 – 1144.

34. Технологическо-эксплуатационные барьеры в поверхностном слое при высокоинтенсивной обработке металлов / П.И. Ящерицын [и др.] // Доклады АН Беларуси. – 1997. – Т. 41. – № 5. – С. 110 – 113.

35. Артоболевский, И.И. Основы синтеза машин автоматического действия / И.И. Артоболевский, Д.Я. Ильинский. – Москва: Наука, 1983. – 280 с.

36. Совершенствование производственных систем на основе создания условий для самоорганизации технологических процессов и объектов / П.И. Ящерицын [и др.] // Доклады АН Беларуси. – 1996. – Т. 40. – № 1. – С. 118 – 121.

37. Дружинин, В.В. Проблемы системологии: проблемы теории сложных систем / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов – М.: Сов. радио, 1976. – 296 с.

38. Любимов, Г.А. Катодное пятно вакуумной дуги / Г.А. Лю-

бимов, В.И. Раховский // Успехи физических наук. - 1978. - Т. 125, № 4. - С. 665-705.

39. Лафферти, Дж. Вакуумные дуги / Дж. Лафферти; Пер. с англ. Под ред. В.И. Раховского. - Москва: Мир, 1992. - 428 с.

40. Лойко, В.А. Исследование условий формирования фазового состава плазменного потока при вакуумно-дуговым нанесении покрытий / В.А. Лойко, Ю.А. Кулеш, Д.А. Казакевич // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: материалы Второй Междунар. научн.-практ. конф., Севастополь, май 2002, -Севастополь, 2002.- С.18-19.

41. Дороднов, А.М. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств / А.М. Дороднов, В. А. Петросов // Журн. техн. физ. - 1981. - Т. 51, № 3, - С. 504-524.

42. Кесаев, И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. - Москва: Наука, 1988. - 297 с.

43. Лойко, В.А. Электродуговые процессы нанесения защитно-декоративных покрытий / В.А. Лойко, В.А. Коваль // Защитные покрытия при изготовлении деталей машин и их ремонте, - Минск, 1992 г. - С. 57-59.

44. Lugscheider, E. Surface coating by means of physical evaporation procedure / E. Lugscheider, H. Reimann // Sample Quart. 1999.-V. 21, № 1. - P. 12-21.

45. Белый, А.В. Влияние параметров плазменно-вакуумной технологии на топографию поверхности вакуумных покрытий / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, В. А. Лойко [и др.] // Плазменно-вакуумные покрытия: материалы междунар. научн. конф., Минск, апрель 1985 г./ издат. Института физики АН БССР. - Минск, 1985. - С.87-92

46. Hick, A.J. Advances in surface heat-treatment processes: A review of the important developments during the last decade / A.J. Hick // Met. and Mater. Techn. -1998. - V. 15, № 7. - P. 325-330.

47. Аксенов, И.И. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) / И.И. Аксенов [и др.] // Украинский физич. журн. - 1979. - Т.24, № 4. - С. 515-525.

48. Vitjaz, P.A. Formovani vakuovych povlakou, odolnych proti opotrebeni, se zlepšenými charakteistikami / P.A. Vitjaz, G.D. Karpenko, V.A. Loiko // Povrhove technogie. Vtzinarodni organizace novinaru. Servis pro organizaci arizeni: материалы междунар. научн. - практич.

Конференции, Karlovy Vary, февраль 1989 г. - Karlovy Vary, 1989. - С. 77-90.

49. Armini, A. Formation of new surface alloys by ion implantation technology / A. Armini // Ind. Heat. - 1986. - V. 53, № 1. - P.17-19.

50. Карпенко, Г.Д. Свойства износостойких покрытий, полученных в вакууме / Г.Д. Карпенко, В. А. Лойко // Усовершенствование технологических процессов, их автоматизация и развитие гибких автоматизированных производств: материалы междунар. научн. конфер., Каунас, сентябрь 1986 г., / Каунасский гос. универ. - Каунас, 1986 г. - С. 23-24.

51. Карпенко, Г.Д. Формирование слоя, насыщенного титаном при ионном травлении / Г.Д. Карпенко, В. А. Лойко, В.М. Драко // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом: материалы междунар. научн. конфер., Минск, ноябрь 1987 г. / Бел. гос. университет. - Минск, 1987 г. - С. 69-71.

52. Пронявичюс, Л. Модификация свойств твердых тел ионными пучками / Л. Пронявичюс, Ю. Дудонис. - Вильнюс: Мокелас, 1990. - 242 с.

53. Анищик, В.М. Поверхностное упрочнение быстрорежущей стали / В.М. Анищик [и др.] // Физика и технология упрочнения поверхности металлов: материалы междунар. научн. конфер., Ленинград, апрель 1984 г. / Лен. гос. университет. - Ленинград, 1984. - С. 121-122.

54. Лойко, В. А. Расчет образования Ti_xFe_y при вакуумно-плазменном напылении на стальную подложку / В. А. Лойко, А.М. Кузей // Вопросы прочности и пластичности металлов: материалы научн.-практич. конфер, Минск, октябрь 1981 г. / Физ.-техн. инст. АН БССР. - Минск: Наука и техника, 1981. - С.17.

55. Лойко, В. А. Исследование структуры и состава ионно-плазменных покрытий / В. А. Лойко [и др.] // Сб. Порошковая металлургия. - Минск: Высшэйшая школа, 1986. - С. 37-42.

56. Лойко В. А. О структуре, фазовом составе и некоторых физико-механических характеристиках упрочняющих карбонитридных покрытий / В. А. Лойко, В.Н. Максименко // Вакуумные покрытия: материалы междунар. научн. конф., Минск, март 1988 г./ издат. Инст. физ. АН БССР. - Минск, 1988. - С. 132-133 .

57. Лойко В.А. Исследование физико-механических свойств вакуумно-плазменных покрытий / В.А. Лойко, Ж.А. Мрочек // Вес. акад. навук БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. - 1982.- №4, - С. 47-52.

58. Достанко, А.П. Плазменная металлизация в вакууме / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко. - Минск: Наука и техника, 1983. - 379 с.

59. Лойко В.А. Особенности структуры и свойств вакуумно-плазменных покрытий, осажденных при низких температурах / В.А. Лойко, Б.Э. Хармач // Совершенствование процессов финишной обработки в машино- приборостроении, экология и защита окружающей среды: материалы науч. – практ. конф., Минск, ноябрь 1995г., Бел. гос. политех. академ. - Минск, 1995. - С. 23-24.

60. Карапетьянц, М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / М.Х. Карапетьянц, М.Л. Карапетьянц. - Москва: Химия, 1968. - 654 с.

61. Карпенко, Г. Д. Некоторые пути повышения эффективности вакуумно-плазменной технологии нанесения упрочняющих покрытий / Г. Д. Карпенко, В.А. Лойко, С.Е. Емельянов // Вес. акад. наук БССР. Сер. физ.- техн. наук. - 1988. - №1. - С. 89-98.

62. Лойко, В.А. Исследование структуры и свойств плазменно-вакуумных покрытий на основе карбонитридов Ti-Cr / В.А. Лойко, Б.Э. Хармач // Материалы, технологии, инструмент: материалы науч. – практич. конф. ассоциации «НОМАТЕХ», Минск, июнь 1996 г./ «ИНФОТРИБО». – Гомель, 1996. - С. 112-114.

63. Косолапова, Т.Я. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочное издание / Т.Я.Косолапова [и др.]; под общ. ред. Т.Я.Косолаповой. - Москва: Металлургия, 1986.- 928 с.

64. Лойко, В.А. Низкотемпературные плазменно-вакуумные процессы и материалы для упрочнения инструмента и оснастки / В.А. Лойко // Материалы, технологии, инструмент: материалы науч. – практич. конф. ассоциации «НОМАТЕХ», Минск, июнь 1996 г./ «ИНФОТРИБО». – Гомель, 1996. – С. 81-83.

65. Самсонов, Г.В. Тугоплавкие покрытия / Г.В. Самсонов, А.П. Эпик - Москва: Металлургия, 1973. - 397 с.

66. Карпенко, Г.Д. Оценка возможности получения и расчет выходов фаз соединений титана / Г.Д. Карпенко, В.А. Лойко, С.М. Касинский // Сб. Порошковая металлургия, - Минск: Высшэйшая школа, 1992. – С. 43-51.

67. Лойко, В.А. Численное моделирование температурного поля подложки при вакуумно-плазменном нанесении износостойких покрытий / В.А. Лойко, А.И. Михалькевич, А.А. Якубеня // Вакуумные покрытия: материалы междунар. научн. конф., Минск, март 1988 г./ издат. Инст. физ. АН БССР. - Минск, 1988. - С. 42-43.

сации плазменных потоков / И.И. Аксенов [и др.] // Физ. и хим. обраб. матер. – 1994. – т. 4. – С. 143-146.

69. Холлэнд, Д. Физика тонких пленок / Д. Холлэнд. – Москва: Мир, 1964. – 564 с.

70. Антонюк, В.С. Конструювання покриттів дискретної структури з умови контактної міцності / В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, В.Д. Вовк // Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: материалы 5-го Междунар науч.-технич. семинара, Свалява, май 2005 г. / АТМ України. – Киев, 2005. – С. 9–14.

71. Ляшенко, Б.А. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях дискретной структуры / Б.А. Ляшенко [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 72–75.

72. Аппен, А.А. Жаростойкие покрытия / А.А. Аппен. – Москва: Наука, 1965. – 354 с.

73. Спосіб нанесення зносостійких несучільних покриттів: пат. України № 68303 МПК С23 С14/32 / В.А. Рутковський, В.С. Антонюк, В.М. Волкогон, Б.А. Ляшенко, О.С. Осипов, І.А. Петрушка; заявл. 03.12.03. Опубл. 15.07.2004 // Афіц. бюл. – 2004. – № 7. – С. 33

74. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – Москва: Машиностроение, 1986. – 190 с.

75. Гольдшмидт, Х. Дж. Сплавы внедрения / Х. Дж. Гольдшмидт; пер. с англ. Том I. – Москва: Мир, 1971. – 338 с.

76. Салтыков, А.С. Износостойкость нитридных пленок / А.С. Салтыков // Металловед. и терм. обраб. металлов. – 1993. – т. 5. – С. 2-5.

77. Паладин, Н.М. Создание композиционных инструментальных материалов на основе исследования микромеханизмов разрушения твердых сплавов с покрытиями: автореф. дисс. ...канд. техн. наук. / Н.М. Паладин; ВНИИ ТС. – Москва: ВНИИТС. – 1990. – 12 с.

78. Тот, Л. Карбиды и нитриды переходных металлов / Л. Тот. – Москва: Мир, 1974. – 296 с.

79. Коровкин, А.В. Прогрессивная технология нанесения износостойких покрытий на инструмент и его эксплуатация. Обзорная информация. / А.В. Коровкин, Г.А. Усачев, С.С. Кравченко // – Тольятти, 1985. – 77 с.

80. Новиков, Н.В. Инструменты из сверхтвердых материалов: уч. пособие / Н.В. Новиков. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.

81. Boring, T. Ops. Coated carbide inserts naidle rough turning / Ops. Boring // Mach. Prod. Eng. – 1991. – 149, № 3797. – P. 79.

82. Sadahiro, T. Wear-resistant coatings of cemented carbides and high speed steels by chemical vapour deposition / T. Sadahiro, S. Vamayo, Shibuki, H. Ujiiie // Wear. – 1978. – V.48, №2. – P. 291-299.

83. Kabish, H.S. Coatings for carbide: TiC, TiN / H.S. Kabish // American machinist. – 1977. – № 4. – P. 328-335.

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

85. Мацевитый, В.М. Износостойкие покрытия для режущих инструментов / В.М. Мацевитый, И.Б. Казак, К.В. Вакуленко // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2006. – № 6. – С. 34-35.

86. Паладин, Н.М. Создание композиционных инструментальных материалов на основе исследования микромеханизмов разрушения твердых сплавов с покрытиями: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 10.03.1990 / Н.М. Паладин; ВНИИ ТС. – Москва, 1990. – 14 с.

87. Смирнов, М.Ю. Повышение работоспособности торцовых фрез путем совершенствования конструкции износостойких покрытий: дисс. ...канд. тех.наук.: 10.12.2000 / М.Ю. Смирнов. – Ульяновск: Ульяновск. гос. техн. универ, 2000. – 232 с.

88. Табаков, В.П. Принцип формирования покрытий многослойного типа для прерывистого резания / В.П. Табаков, М.Ю. Смирнов // Фундаментальные и прикладные вопросы технологии машиностроения. Технология материалов: матер. междунар. научн.-практ. конф. МНТК, Орел, август 2001 г. / Орловск. гос. универ. – Орел, 2001. – С. 221-223.

89. Финкель, В.М. Физические основы торможения разрушения / В.М. Финкель. – Москва: Металлургия, 1998. – 123 с.

90. Гуревич, Д.М. Изнашивание при точении твердосплавных пластинок с износостойкими покрытиями / Д.М.Гуревич // Вестн. машиностр. – 1979. – № 6. – С. 45-47.

91. Табаков, В.П. Принцип формирования многослойного покрытия для режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В.П. Табаков, А.А. Ермолаев // Вест. Ульяновск. гос. техн. ун-та. – 2004. – № 2. – С. 36-38.

92. Мацевитый, В.М. Покрытия для режущих инструментов / В.М. Мацевитый. – Харьков: Вища школа, 1987. – 128 с.

93. Okumiya, Mazahiro. Formation of TiC/Ti₂AlC composite layer and improvement on surface roughness / Mazahiro Okumiya, Yoshiti

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

95. Коняшин, И.Ю. Нанесение износостойких покрытий на безвольфрамовые твердые сплавы / И.Ю. Коняшин, А.И. Аникеев // Свойства и применение спеченных твердых сплавов / Всес. НИИ и проект, ин-т тугоплав. мат. и тверд. сплавов (ВНИИТС). – М, 1991. – С. 98-102.

96. Holleck, H. Two-phase TiC/TiB₂ hard coatings / H. Holleck, M. Lahres // Materials science and engineering A.- 1991.-V. 140, №1-2.-P. 609-615.

97. Калашников, Л.В. Получение, структура и свойства покрытий на основе системы Ti – W – C – N, осажденных методом СВЧ-газотранспортных реакций / Л.В. Калашников, Д.Ю. Ковалев, Е.П. Костогоров // Физ. и хим. обраб. материалов. – 1996, – № 4. – С. 50–55.

98. Seytoyama, M. Formation of Cubic-AlN in TiN/AlN Superlattice / M. Seytoyama [and anothers] // Surface and Coatings Technology. – 1996, Vol. 86-87. – P. 225-230.

99. Кузнецов, М. В. Защитные покрытия на основе (Ti, Al)N: модификация поверхностных слоев при температурном прогреве на воздухе / М. В. Кузнецов, Е. В. Шалаева, В. А. Губанов // Поверхность. – 1994. – № 2. – С. 95–102.

100. Lower manufacturing costs through (Ti, Al)N-coated tools // Powder Met. Int. – 1992. – 24, N6. – P. 380–381. Tonshoff, H.K. Performance of ceramic cutting tool materials independence on their specific properties / H.K. Tonshoff, B. Denkena // Int. J. Refract. Metals and Hard Mater. – 1990. – 9, N 4 – P. 216–222.

101. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания металлов / А.Д. Макаров. – Москва: Машиностроение. 1976. – 278 с.

102. Чубукин, А.С. Повышение эксплуатационных свойств инструмента из карбидтитановых безвольфрамовых твердых сплавов нанесением специальных покрытий; автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01./ А.С. Чубукин; – Киев, 2001. – 18 с.

103. Табаков, В. П. Металлорежущий инструмент: Работоспособность можно повысить / В. П. Табаков // Техномир. – № 2 (20). – 2004. – С. 20-23.

104. Каменева, А.Л. Улучшение эксплуатационных характеристик инструмента путем нанесения износостойких покрытий /

обработки металлов и сплавов в машиностроении: матер. междунар. науч. – практич. конф. Харьков, 2001. – Харьков: ИПЦ "Контраст", 2001. – С. 118-122.

105. Кулешова, И.В. Повышение эффективности стального инструмента нанесением износостойких покрытий / И.В. Кулешова // Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент. – Москва, 1979. – № 12. – С. 32-38.

106. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – Москва: Машиностроение, 1986. – 190 с.

107. Chromium nitride PVD coating // Metallurgia. – 1993. – 60, № 3. – P. 116.

108. Береснев В.М., Перлов Д.Л., Федоренко А.И. Экологически безопасные вакуумно-плазменные оборудование и технологии нанесения покрытий. – Харьков: ХИСП, 2002. – 300 с.

109. DF500 CVD-diamond coating for tungsten carbide cutting tools: Рекламный буклет. – Saint-Global Industrial Ceramics, Inc., 1998/8.

110. Табаков, В. П. Metallорежущий инструмент: Работоспособность можно повысить / В. П. Табаков // Техномир. – № 2 (20). – 2004. – С. 20-23.

111. Sadahiro, T. Wear-resistant coatings of cemented carbides and high speed steels by chemical vapour deposition / T. Sadahiro [and others] // Wear/ - 1978.- V.48, - №2.- P. 291-299.

112. Керамический материал с износостойким покрытием: пат. 4950558 США. / V. K. Sarin; GTE Lab. Inc. USA. ; опубл. 21.08.90 // Афіц. бюл. – 1990. – №2. – С. 187.

113. Новиков, Н.В. Инструменты из сверхтвердых материалов / Н.В. Новиков [и др.]; под. общ. ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.

114. Новиков, Н.В. Сверхтвердые материалы. Получение и применение / Н.В. Новиков [и др.]; под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.

115. Устройство для нанесения покрытий в вакууме: патент 2363 Украина. МКИ С 23/С14/00/ В.Т. Толок, О.М. Швец, В.М. Береснев [и др.]; заявлено 11.05.90; опубл. 15.07.94 // Афіц. бюл. – 1994. – № 51. – С. 8.

116. Чистяков, Е.М. Инструмент из металлизированных сверхтвёрдых материалов / Е.М. Чистяков [и др.]. – Киев: Наук. думка, – 1982. – 204 с.

117. Бондар, І. Дослідження взаємодії іонів, атомів та кластерів титану з вуглецем алмазу, а також вуглецем реакційного газу при нанесенні методом мікродугового іонноплазмового випаровування покриттів на алмазні порошки / І. Бондар // Надтверді матеріали: створення та застосування: Зб. наук. праць. Серія. Машинобудування; Серія. Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Київ: ІНМ НАН України, 2007. – С. 139–147.

118. Иващенко, Г.А., Тимофеев П.В. Применение резцов с покрытием из нитрида титана при точении наплавленных поверхностей / Иващенко Г.А., Тимофеев П.В. // Технол. и организ. производства. – 1982. – №2. – С. 24-25.

119. Haubner, R. Deposition of thermal CVD low-pressure diamond on cubic-BN / R. Haubner // Int. J. Mater. – 1990. – 9, № 2. – P. 70–76.

120. More, A.S. Tool wear and machining performance of cBN-TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel / A.S. More [and anothers] // Journal of Materials Processing Technology. – № 180. – 2006. – 253-262.

121. Внуков, Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков [и др.]; под общей редакцией Ю.Н.Внукова. – Киев: Тэхника, 1992. – 143 с.

122. Кабалдин, Ю.Г. Исследование температуры и адгезии при непрерывном и прерывистом резании / Ю.Г. Кабалдин // Станки и инструмент. – 1980. – №4. – С. 27–29.

123. Якубов, Ф.Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким. – Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное издательство, 2005. – 300 с.

124. Васин, С.А. Резание материалов: термомеханический подход взаимосвязей при резании / С.А. Васиц, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Баумана, 2001. – 448 с.

125. Верещака, А.С. Работоспособность инструмента с износостойким покрытием / А.С. Верещака. – Москва: Машиностроение, 1993. – 336 с.

126. Кабалдин, Ю.Г. Самоорганизация в процессах трения и смазки при резании / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. – 2003. – № 10. – С. 53-59.

Мишнаевский. – Киев : Наук, думка, 1982. – 192 с.

128. Рыжов, Э.В. Технологическое управление качеством деталей машин с покрытием / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – Киев: Наук, думка, 1994. – 181 с.

129. Рыбицкий, В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В.А. Рыбицкий. – Киев : Об-во «Знание» УССР, 1987. – 23 с.

130. Кривенко, П.М. Ремонт дизелей сельхозназначения / П.М. Кривенко. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 271 с.

131. Костецкий, Б.И. Структура и поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий // Проблемы прочности. – 1981. – № 3. – С.90-98

132. Цеся, Н.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме. Справочник / Н.А. Цеся, В.В. Козелкин, А.А. Гуров; под общ. ред. В.В. Козелкина. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.

133. Ивашко, В.С. Восстановление плунжерных пар топливного насоса высокого давления / В.С. Ивашко, В.А. Лойко, В.В. Саранцев // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 3-й Международной научно-технической конференции, Ялта, 27-29 мая 2003. – Ялта, 2003. – С. 97-99.

134. Лебедев, Ю.К. Подготовка поверхности режущего и прессово-штампового инструмента к обработке методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) / Ю.К. Лебедев // Передовой производственно-технический опыт. — Т.3. – 1985. – С. 38-39.

135. Липкин, Я.Н. Химическое полирование металлов / Я.Н. Липкин, Т.М. Бершадская. – Москва: Машиностроение, 1988. – 112 с.

136. Гришхес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Гришхес. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 232 с.

137. Раствор для полирования металлических изделий: а.с. 1665727 СССР, МКИ³ C25F 3/00 / С.И. Романчук, Ю.В., Синькевич, Е.Я. Головкина.; заявл. 24.10.88; опубл. 7.12.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – №45. – С.28.

138. Карпенко, Г.Д. Исследование структуры покрытий на основе нитрида титана / Г.Д. Карпенко, В.А. Лойко // Известия АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1986. – №1. – С. 31-34.

139. Способ нанесения карбонитридных покрытий: патент №2433 Респ. Беларусь от 01.06.1998 / В.А. Лойко [и др.]. – 1998. – 4 с.

140. Способ получения защитно-декоративных покрытий: патент №2431 Респ. Беларусь от 01.06.1998 / А.И. Гоев, Г.Д. Карпенко, В.А. Лойко [и др.]. -1998. - 4 с.

141. Палатник, Л.С. Поры в пленках / Л.С. Палатник, П.Г. Черемской, М.Я. Фукс. - Москва: Энергоиздат, 1982. - 216 с.

142. Барвинок, В.А. Закономерности формирования покрытий в вакууме / В.А. Барвинок [и др.] // Физ. и хим. обраб. материалов. - 1986. - № 5. - С. 92-97.

143. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. - Киев: Техника, 1970. - 395 с.

144. Моляр, А.Г. Влияние режима нанесения покрытия нитрида титана на процесс его изнашивания при фреттинг-коррозии / А.Г. Моляр, А.И. Васильев // Трение и износ. - 1992. - Т. 13 - № 2. - С. 350-355.

145. Щадричев, Е.В. Изучение износостойкости инструментальных материалов с ионно-плазменными покрытиями нитрида титана / Е.В. Щадричев // Трение и износ. - 1994. - Т. 15, - № 4. - С. 660-665.

146. Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения / Г.В. Самсонов, И.М. Винницкий. - Москва: Металлургия, 1976. - 560 с.

147. Лойко, В.А. Разработка плазменно-вакуумного процесса нанесения покрытий из карбонитридов титана для упрочнения режущего инструмента: автореф. дис. канд. техн. наук./ В.А. Лойко; Бел. Респ. НПО порошковой металлургии. - Минск, 1997. - 17с.

148. Лойко, В.А. Повышение износостойкости режущего инструмента класса «А» / Лойко В.А., Хармач Б.Э., Баркун А.А. // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: материалы науч. техн. конфер., Новополоцк, октябрь 2001 / Новополоцкий универ. - 2001, - С. 139.

149. Демиденко, И.И. Транспортировка плазменных потоков квадрупольным магнитным полем / И.И. Демиденко, Н.С. Ломино, В.Г. Падалка // Журн. Техн. физ. - 1970. - т. 40. - №11. - С.2326.

150. Аксенов, И.И. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме /Аксенов И.И [и др.] // Укр. физич. журнал. - 1979.-№4. - С.51-55.

151. Ивашко, В.С. Перспективные материалы и технологии упрочнения режущего инструмента и оснастки / В.С. Ивашко, В.А. Лойко // Защитные покрытия при изготовлении деталей машин и их ремонте: материалы научн.- техн. конфер., Минск, сент. 1993. Минск: Выш. школа. - 1993. - С.23.

152. Лойко, В.А. Формирование износостойких слоев при конденсации из сепарированной плазмы в условиях ионного ассистирования / В.А. Лойко, В.И. Овчинников, Б.Э. Хармач // Сб. Порошковая металлургия. - Минск: Высшэйшая школа, 1999. - С. 133-143.

153. Лойко, В.А. Применение плазменно-вакуумных технологий для повышения эксплуатационных свойств прецизионных пар топливной аппаратуры дизелей / В.А. Лойко, Б.Э. Хармач, В.И. Овчинников // Современные технологии в ремонтно-обслуживающем и машиностроительном производстве АПК: материалы научн.- техн. конф. Минск, 1999. - Минск: Выш. школа. - 1999. - С. 43-44.

154. Алехин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. - Москва: Наука, 1993. - 260 с.

155. Самсонов, Г.В. Конфигурационная модель вещества / Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. - Киев: Наукова думка, 1971. - 229 с.

156. Михайлов, А.Н. Основные принципы и особенности синтеза функционально ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2007. - №2. - С.157-163.

157. Спосіб нанесення нітридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу: патент України № 54100 А МПК 7 С23С 14/04. / В.О. Михайлов // Заявка № 2002053915 от 14.05.2002, БИ 3003. - 2003. - 6 с.

Лойко Владимир Алексеевич
Ивашко Виктор Сергеевич
Клименко Сергей Анатольевич
Антонюк Виктор Степанович
Хейфец Михаил Львович

ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

МОНОГРАФИЯ

Ответственный за выпуск *В.С. Ивашко*
Редактор *Г.В. Анисимова*
Компьютерная верстка *А.Е. Зайцев*
Верстка и дизайн обложки *А.Е. Зайцев*

Подписано в печать 29.12. 2007
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 9,95
Тираж 150 экз. Заказ № 616.

Издатель и полиграфическое исполнение
Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет»

ПН М. 022330/0121734 – 10.02.2006 ПН М. 022330/0121656 – 02.02.2006



ISBN 978-985-6770-84-8

9 789856 770848