

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



СИЗОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПУТЕМ ИМПУЛЬСНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ**

Специальность 05.02.07 – Технологии и оборудование механической и
физико-технической обработки

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Ульяновск – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ.....	8
1.1. Современные тенденции совершенствования износостойких покрытий режущего инструмента.....	9
1.2. Применение дополнительного энергетического воздействия на износостойкое покрытие для повышения эффективности режущего инструмента....	28
1.3. Цель и задачи исследований.....	40
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	43
2.1. Оборудование, применяемое для нанесения износостойких покрытий и лазерной обработки.....	43
2.2. Инструментальные и обрабатываемые материалы, используемые при проведении исследований.....	46
2.3. Методика исследования химического состава, параметров структуры и физико-механических свойств износостойких покрытий.....	47
2.4. Методика исследования работоспособности режущего инструмента.....	48
2.5. Обработка результатов экспериментальных исследований.....	50
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОМПОЗИЦИЮ «МНОГОСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА».....	52
3.1. Математическая модель воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа».....	53
3.2. Численное моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа».....	65
3.3. Выводы.....	82

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ.....	84
4.1. Выбор состава слоев многослойных покрытий и технологических параметров осаждения покрытий.....	84
4.2. Исследование влияния импульсной лазерной обработки на параметры структуры и механические свойства покрытий.....	96
4.3. Разработка конструкции многослойных покрытий.....	99
4.3.1. Архитектура многослойных покрытий.....	99
4.3.2. Исследование влияния импульсной лазерной обработки на параметры структуры и механические свойства многослойных покрытий.....	100
4.3.3. Исследование интенсивности износа твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями, подвергнутых импульсной лазерной обработке...	101
4.4. Выводы.....	102
5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	104
5.1. Исследование контактных характеристик процесса резания и теплового состояния твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями после импульсной лазерной обработки.....	104
5.2. Исследование работоспособности твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями после импульсной лазерной обработки.....	111
5.3. Опытно-промышленные испытания.....	114
5.4. Техничко-экономическое обоснование применения импульсной лазерной обработки для повышения работоспособности твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями.....	116
5.5. Выводы.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Развитие отрасли машиностроения на сегодняшний день и использование современных технологий металлообработки, высокопрочных материалов ужесточает условия работы режущего инструмента (РИ) и предъявляет к нему очень жесткие требования: инструмент должен быть износостойким и прочным в условиях высоких давлений и температур. Конструкция режущих инструментов должна быть технологичной и экономичной.

Повышение качества производимых изделий и эффективность лезвийной обработки в большей степени зависит от периода стойкости режущего инструмента. Поэтому, вопрос о повышении работоспособности режущего инструмента является актуальной и важнейшей проблемой современного машиностроения. Эффективность режущего инструмента определяется физико-механическими характеристиками инструментального материала и условиями обработки.

Одним из эффективных способов упрочнения режущего инструмента является нанесение износостойких покрытий (ИП). Способ конденсации вещества с ионной бомбардировкой (КИБ) широко применяется в производстве для осаждения различных по составу и конструкции покрытий на режущий инструмент. Покрытие заметно улучшает свойства повышая его сопротивляемость микро- и макроразрушению; способствует снижению контактных нагрузок, уменьшению мощности тепловых потоков, тем самым, снижая термомеханическую напряженность режущего клина инструмента. В ряде случаев, эффективность использования инструмента с покрытием снижается в результате термопластических деформаций режущего клина инструмента и низкой прочности адгезии к основе.

Дальнейшее развитие теоретико-экспериментальных исследований, которые направлены на увеличение эффективности износостойких покрытий, изучение механизмов изменения их параметров структуры и физико-механических свойств, в том числе при дополнительном энергетическом воздействии является актуальной научной проблемой, позволяющей определить основные направления совер-

шенствования износостойких покрытий и способствовать увеличению работоспособности режущего режущего инструмента с покрытием.

Работа выполнена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) в ходе выполнения государственного задания № 2014/232 от 13.03.2014 г. Министерства образования и науки РФ «Разработка функциональных многослойно-композиционных износостойких покрытий на основе установления закономерностей формирования их механических свойств для повышения работоспособности режущего инструмента», грантов РФФИ «Разработка высокопрочных многослойных композиционных износостойких покрытий с функциональными наноструктурными слоями на основе многоэлементных нитридов с заданными механическими свойствами (проект № 15-08-03256), «Разработка и исследование износостойких наноструктурных покрытий на основе нитрида ниобия для повышения эффективности операций механической обработки (проект № 16-48-730246), «Исследование закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств модифицированных нитридов ниобия и разработка на их основе многослойных композиционных износостойких покрытий (проект № 18-48-730011).

На защиту выносятся основные положения:

1. Результаты теоретико-экспериментальных исследований влияния импульсной лазерной обработки на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа», в частности, математическая и численная модель теплового состояния композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа», режимы импульсной лазерной обработки.

2. Результаты теоретико-экспериментальных исследований влияния импульсной лазерной обработки на тепловое и напряженное состояние режущего инструмента.

3. Результаты исследований воздействия импульсной лазерной обработки на параметры структуры, механические свойства однослойных и многослойных покрытий (МП), а также изнашивание режущего инструмента с покрытиями.

4. Новые конструкции многослойных покрытий, предназначенные для твердосплавных режущих инструментов.

5. Результаты экспериментальных исследований работоспособности режущего инструмента с многослойными покрытиями, прошедшими воздействие импульсной лазерной обработки при продольном точении заготовок из различных металлов, а также результаты опытно-промышленных испытаний.

Работа проводилась с применением основных положений теории резания металлов, новейших методов рентгеноструктурного анализа, математических методов моделирования и статистической обработки результатов исследований. Теоретическая основа работы подтверждена не только лабораторными исследованиями, но и производственными испытаниями.

Практическую ценность работы представляют:

- новые конструкции многослойных покрытий, новизна которых подтверждена патентами на изобретения;
- технологические параметры нанесения многослойных покрытий;
- режимы импульсной лазерной обработки, обеспечивающие максимальную работоспособность твердосплавного инструмента.

Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях АО «УКБП» (г. Ульяновск) и ООО «УАЗ» (г. Ульяновск), показали высокую работоспособность режущего инструмента многослойными покрытиями после воздействия импульсной лазерной обработки. Основные результаты исследований доложены на 12 республиканских и международных научно-технических конференциях. По теме диссертационной работы было опубликовано 28 статей, в том числе 7 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, 4 статьи в научных изданиях из международной базы цитирования Skopus, получено 5 патентов на изобретения.

1. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Работа режущего инструмента сопряжена с воздействием ряда разрушающих факторов, обусловленных влиянием высоких контактных нагрузок и температур, активизации физико-химических процессов. Это приводит к активизации износа за счет абразивного и адгезионного действия обрабатываемого материала, интенсификации диффузионных и окислительных процессов, разупрочнению поверхностных объемов инструментального материала [1 – 7]. Работоспособность режущего инструмента может происходить за счёт улучшения свойств инструментальных материалов, что приводит к наиболее эффективному сопротивлению контактных площадок режущего инструмента воздействию термомеханических нагрузок и различным видам изнашивания [3, 5].

В настоящее время опубликовано большое количество работ, связанных с повышением работоспособности режущего инструмента. Среди них следует выделить работы ведущих российских и зарубежных исследователей: Н.Н. Зорева, Г.И. Грановского, Т.И. Лоладзе, А.Н. Резникова, С.С. Силина, В.А. Синопальникова, А.С. Верещаки, С.Н. Григорьева, Ю.Г. Кабалдина, М.В. Касьяна, Л.Н. Феника, М.Ф. Полетики, В.К. Старкова, А.Х. Маджида, В.П. Табакова, Н.В. Талантова и др. Результаты данных исследований позволили раскрыть некоторые механизмы изнашивания режущего инструмента, изготовленного из различных инструментальных материалов, в том числе и с покрытиями, что сыграло немаловажную роль в решении некоторых задач, связанных с теорией резания материалов.

Направления повышения эксплуатационных свойств режущего инструмента можно разделить на несколько групп [1, 2, 35]:

- разработка и применение новых инструментальных материалов для режущего инструмента;
- совершенствование конструкции режущего инструмента;
- определение оптимальных эксплуатационных режимов для режущего инструмента и применение СОТС;

- улучшение физико-механических свойств материала рабочих поверхностей инструмента [12, 13, 19, 20];

- применение износостойких покрытий [8 – 11, 15 – 18, 21, 26].

Наиболее эффективными направлениями совершенствования режущего инструмента являются методы улучшения свойств поверхностных слоёв инструментального материала и нанесения покрытий, при которых рабочие поверхности режущего клина инструмента обладают наибольшими возможностями сопротивляться термомеханическим нагрузкам и процессам изнашивания.

В условиях вышесказанного, а также наличия большого числа методов поверхностного упрочнения инструмента, требуется их сравнение по различным критериям с определением рациональной области их применения и выявление преимуществ и недостатков каждого из них и оценка возможности их сочетания.

1.1. Современные тенденции совершенствования износостойких покрытий режущего инструмента

Основы методологии разработки износостойких покрытий, которые по химическому составу, свойствам и архитектуре в максимальной степени удовлетворяют условиям функционирования режущего инструмента различного назначения изложены в работах российских и зарубежных исследователей [8, 9, 11, 14 – 18].

Анализ роли износостойкого покрытия на контактных площадках режущего инструмента позволяет рассматривать его как «промежуточную технологическую среду», выполняющую двойственную роль [17]. Покрытие, с одной стороны, повышает свойства режущего инструмента – твёрдость, физико-химическую пассивность, теплостойкость, износостойкость, с другой стороны, оказывает влияние на контактные процессы и параметры резания (рис. 1.1).

В работах А.С. Верещаки на основе анализа систематизированных требований к покрытию впервые было обосновано применение многослойной архитектуры покрытий (рис. 1.2) с определением функционального назначения каждого из

слоёв покрытия, изучено влияние покрытий на основные параметры процессов непрерывного и прерывистого резания различных конструкционных сталей, а также труднообрабатываемых материалов [8, 9, 16 – 18].



Рис. 1.1. Обобщенное представление о роли износостойкого покрытия режущего инструмента [17]: ОМ – обрабатываемый материал, П – покрытие, ИМ – инструментальный материал

В.П. Табаков детально изучил вопросы, связанные с проявлениями различных механизмов изнашивания твердосплавного инструмента с покрытиями, осаждёнными по технологии КИБ (MeVVA) [11, 18, 22, 26]. Выявлены механизмы разрушения покрытий на контактных площадках инструмента из твёрдых сплавов при резании конструкционных сталей и труднообрабатываемых материалов, изучены причины трещинообразования и причинно-следственные связи разрушения покрытий и трещинообразования.

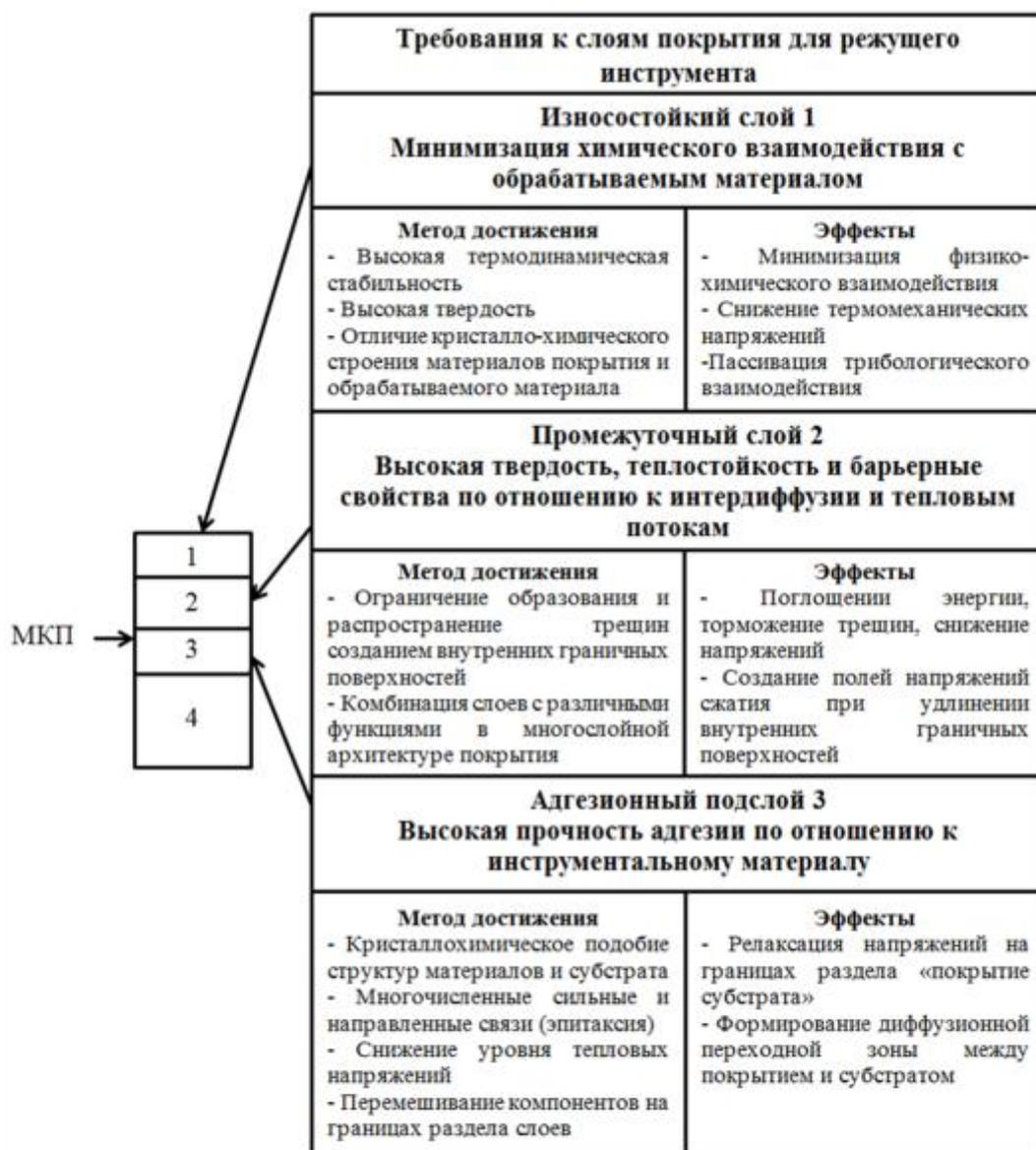


Рис. 1.2. Требования, предъявляемые к архитектуре многослойных покрытий режущего инструмента [17]: 1 – износостойкий слой; 2 – промежуточный (барьерный) слой; 3 – адгезионный подслой; 4 – инструментальная основа

В работах Ю.Г. Кабалдина использование покрытий рассматривается с позиций структурно-энергетического подхода к процессу изнашивания твердосплавного режущего инструмента [23 – 25]. Процессы работы, изнашивания и разрушения режущего инструмента рассматривается с позиций самоорганизации микроструктуры покрытий и инструментального материала под действием внешних силовых и температурных факторов.

С.Н. Григорьев исследовал комплексные вопросы применения комбинированной обработки для повышения режущих свойств лезвийного инструмента [28 – 30]. В частности, предложена комбинированная модификация рабочих поверхностей режущего инструмента путем предварительного упрочнения быстрорежущей стали с последующим нанесением покрытий.

А.А. Рыжкин рассматривал процесс формирования покрытий и оптимизации их составов с точки зрения изучения термодинамики трения и изнашивания, синергетических процессов при трении применительно к резанию материалов, оптимизации резания на базе комплексного изучения флуктуационных процессов при трении [31 – 34]. Предложены экспериментальные термодинамические критерии оптимизации процесса резания, раскрыт механизм влияния на диффузионный износ инструмента износостойких покрытий и разработаны оптимальные технологии комбинированной обработки режущего инструмента.

Применение износостойких покрытий заметно повышает эффективность режущего инструмента [9, 11, 14, 17, 18, 29]. Основные направления совершенствования режущего инструмента с износостойкими покрытиями представлены на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Направления совершенствования режущего инструмента с износостойкими покрытиями [62]

В настоящее время существует большое количество разнообразных методов конденсации износостойких покрытий. Широко применяют в производстве методы химического (CVD) и физического (PVD) осаждения покрытий. В способе CVD положены гетерогенные химические реакции в окружающей режущий инструмент парогазовой среде, из-за протекания которых на поверхностях образуются покрытия. Способами CVD наносят покрытия на основе нитридов, карбидов и карбонитридов тугоплавких элементов [9, 35, 104].

Наиболее широкие возможности в реализации упрочнения режущего инструмента имеют методы физического осаждения покрытий из паровой фазы (PVD). Их большое многообразие позволяет использовать широкие технологические возможности при формировании одно- и многослойных покрытий различного химического состава [9, 10, 13, 14, 17, 35]. На рис.1.4 приведена современная классификация методов PVD.

В группе методов физического осаждения наибольшее распространение получил метод конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ, MeVVA) [18, 26, 65]. Метод обладает широкими возможностями управления процессом нанесения покрытия за счет изменения технологических параметров нанесения.

В работах [36 – 38, 40, 130] для устранения капельной фазы и столбчатой структуры износостойких покрытий, получаемых методом КИБ, а также повышения адгезионной прочности предлагается использовать дополнительное устройство фильтрации пароионного потока и источник высокоэнергетических ионов. Такая технология нанесения покрытий позволяет за счет ассистирующего импульсного воздействия высокоэнергетическими ионами при конденсации покрытия уменьшить размер зёрен и их ориентацию и, следовательно, управлять плотностью, микротвёрдостью, химическим составом и остаточными напряжениями.

В работе [39] для устранения микрокапель металла в покрытии предлагается использование специального криволинейного плазмоведа и катушки магнитного поля. В работе [40] исследовано влияние процесса сепарации плазменного потока

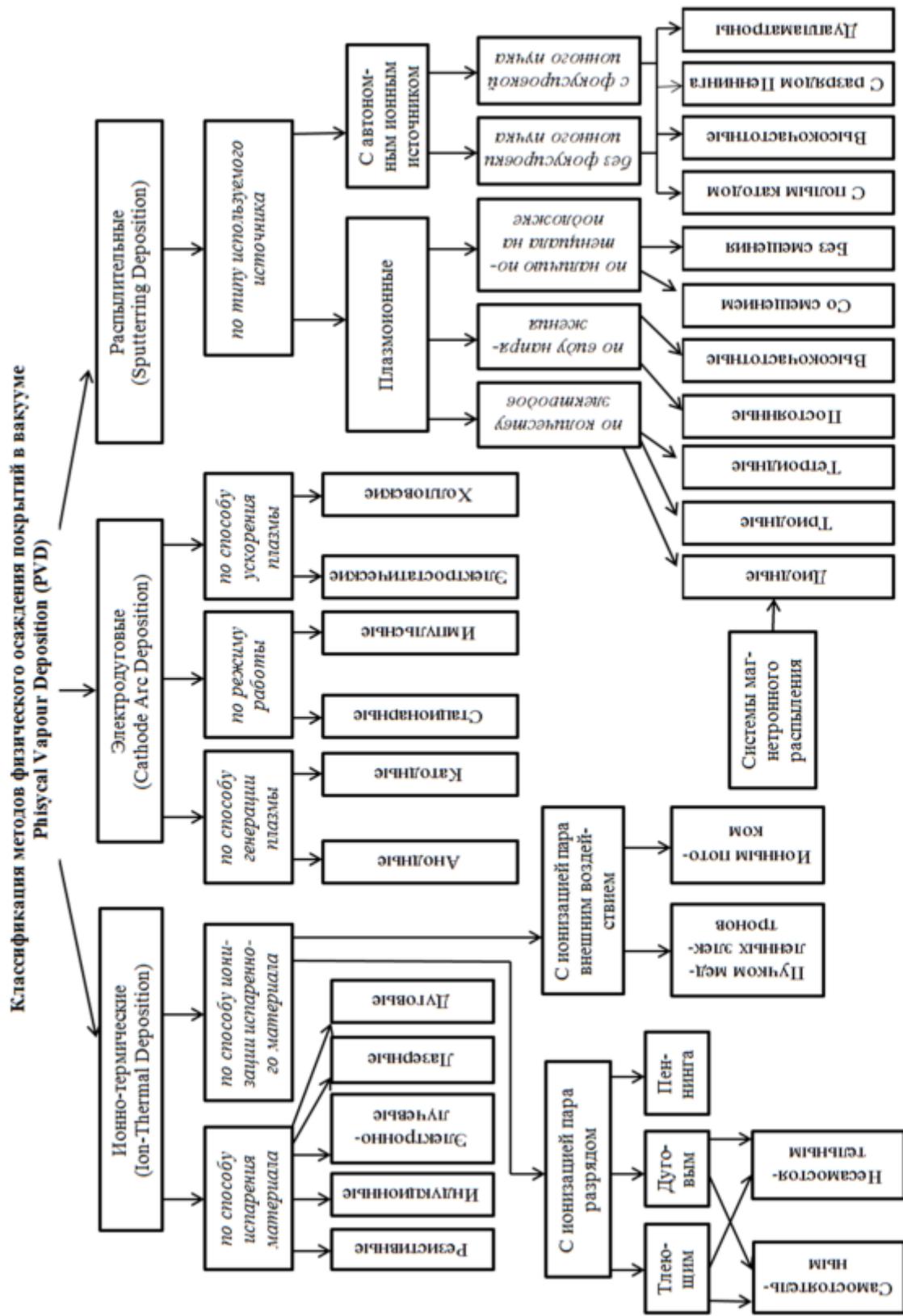


Рис. 1.4. Классификация методов PVD, используемых для нанесения износостойких

покрытий на режущий инструмент [18]

осаждаемого вещества на структурные параметры, физико-механические свойства и износостойкость покрытия TiN . Отмечено, что при снижении количества капельной фазы в покрытии происходит улучшение микроструктуры, что ведёт к росту износостойкости 1,5 – 2 раза.

Управление и оптимизация технологических параметров в процессе подготовки поверхностей инструмента и последующего осаждения покрытий можно рассматривать как одно из направлений для повышения работоспособности режущего инструмента [11, 41, 42, 43].

Изменением такого параметра как давление реакционного газа в камере установки можно оказывать влияние на стабильность дуги, условия осаждения покрытия и производительность этого процесса. От величины давления атмосферы напрямую зависит химический состав осаждаемого покрытия: его рост ведёт к увеличению количественного содержания металлоидов (азота, углерода), что влияет на изменение свойств осаждаемых покрытий [40, 53, 54, 59]. Так, например, повышение давления азота при осаждении покрытия $TiSiN$ (рис. 1.5) влияет на рост микротвёрдости H_μ и остаточных напряжений сжатия $\sigma_{ост}$ при понижении адгезионной прочности (росте коэффициента отслоения K_o).

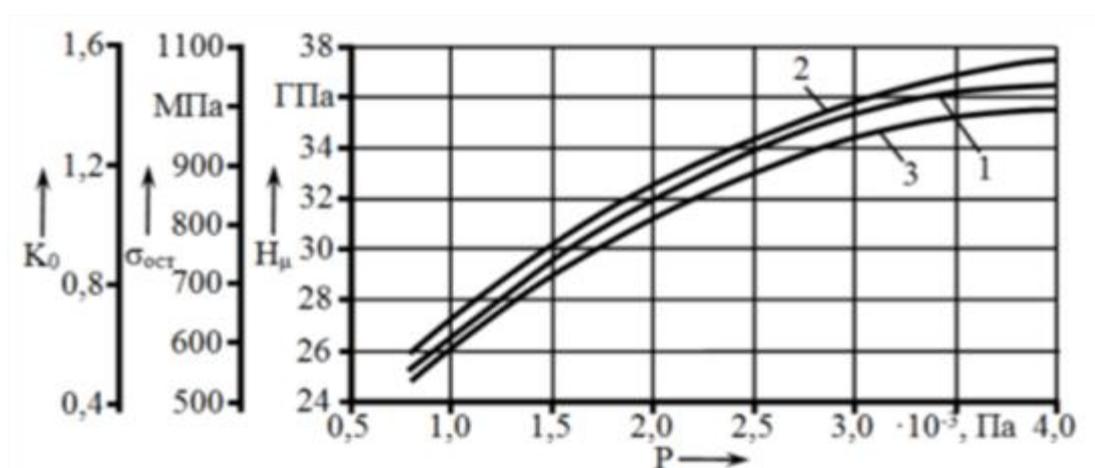


Рис. 1.5. Зависимость механических характеристик покрытия $TiSiN$ от давления реакционного газа (азота) P [41]: 1 – микротвёрдость H_μ ; 2 – сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{ост}$; 3 – коэффициент отслоения покрытия K_o ; основа – твёрдый сплав МК8

Другим технологическим параметром, непосредственно влияющим на свойства покрытия, является температура конденсации (рис. 1.6) [11, 42, 43]. У авторов [11, 42 – 44] было рассмотрено, что изменение в меньшую или большую стороны величины температуры конденсации приводит к значительному изменению структурных параметров и физико-механических свойств износостойких покрытий. Рост температуры конденсации повышает величину адгезионной прочности, а ее снижение приводит к росту микротвёрдости. Конденсация материала покрытий при оптимальной температуре позволяет увеличить период стойкости режущего инструмента дополнительно на 80-120%.

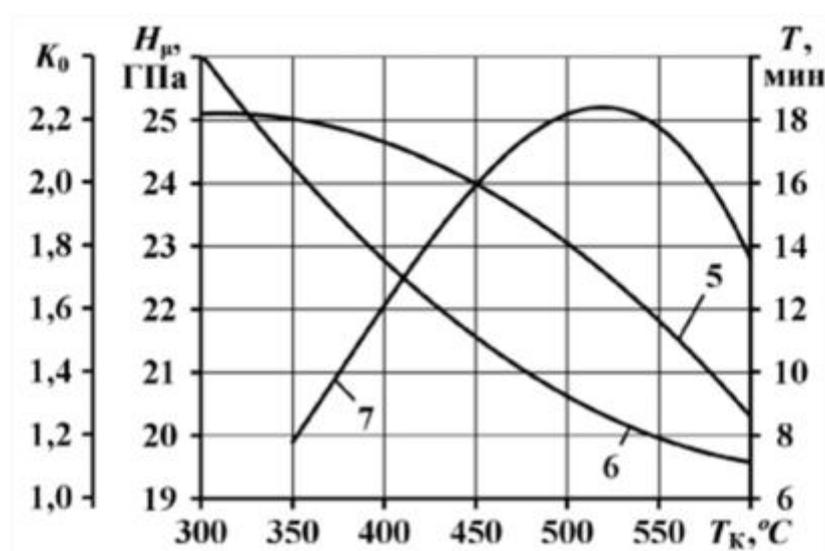


Рис. 1.6. Влияние температуры конденсации T_k на микротвёрдость H_μ (5), коэффициент отслоения K_0 (6) и период стойкости T (7) пластин из сплава ВК6 с покрытием TiN [44]

На основании выявленной закономерности в работе [42] разработан способ осаждения покрытий с использованием комбинированного температурного режима. В этом способе нижний слой покрытия наносится при температуре 450 – 650 °С, что позволяет получить высокую прочность адгезии с подложкой. Верхний слой покрытия конденсировался при температуре 250 – 300 °С, что позволяет получить высокие микротвёрдость и, соответственно, износостойкость покрытия. В результате использования такой технологии по сравнению с конденсацией покрытий такого же

химического состава по традиционному способу наблюдается рост периода стойкости инструмента на 50-100%.

У авторов работ [8, 47, 48] показано влияние ионной очистки на работоспособность режущего инструмента. Этот процесс приводит к увеличению прочности на изгиб инструмента с покрытиями на 10 – 15 %. Катоды, имеющие в составе титан и хром, позволяют вести эту операцию более качественно. Во время ионной бомбардировки твердосплавного инструмента возможно появление хрупких интерметаллидных соединений на основе кобальта [50]. Образование таких соединений способствует снижению износостойкости режущего инструмента. Применение катодов из железа и никеля препятствует образованию таких интерметаллидов, так как эти элементы находятся в одной группе таблицы периодической системы химических элементов с кобальтом.

Основными материалами износостойких покрытий, наносимых методами физического осаждения являются нитриды, карбиды и карбонитриды тугоплавких элементов. Большое количество работ посвящено исследованию вопроса повышения работоспособности режущего инструмента с одноэлементными покрытиями NbN , MoN , TiN , ZrN [8 – 11, 21, 44, 73].

Создание рабочего газа при смешивании азота и ацетилена позволяют получать карбонитридные покрытия, имеющие более высокую микротвердость [10, 42, 47, 52, 53]. Для карбонитридов характерны экстремальные зависимости величин прочности при изгибе и микротвёрдости [53]. Для карбонитрида титана максимальные значения микротвёрдости составляют 38-39 ГПа при составе $TiC_{0,57}N_{0,39}$ [52, 54].

Дополнительное повышение работоспособности режущего инструмента возможно при изменении состава рабочего газа путем смешивания азота с ацетиленом при осаждении многоэлементных покрытий. Так исследования [42, 47, 76] показали, что для режущего инструмента осаждение покрытий составов $TiCN$ и $TiZrCN$ по сравнению с покрытиями TiN и $TiZrN$ соответственно приводит к росту величины периода стойкости в 1,4 – 2,2 раза. Наибольший рост зафиксирован при содержании ацетилена в газовой атмосфере в диапазоне (25 – 40) %.

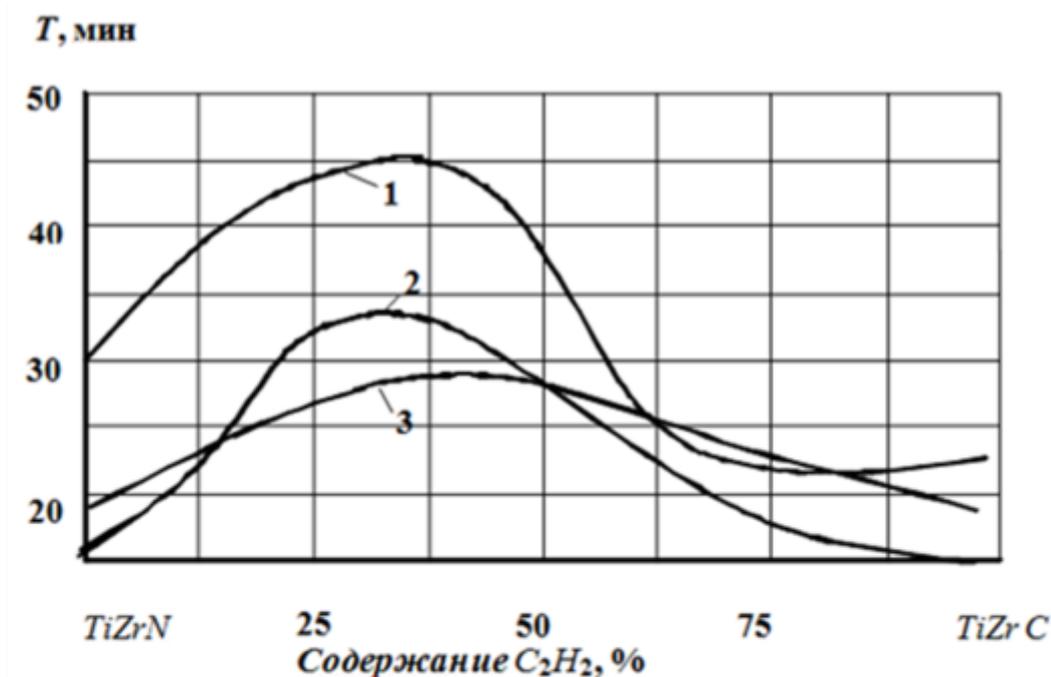


Рис. 1.7. Влияние содержания ацетилена в покрытии $TiZrCN$ на период стойкости режущего инструмента из сплава ВК6 при обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 (1), сталей 12Х18Н10Т (2) и 30ХГСА (3) [47]: 1 – $V = 60$ м/мин, 2 – $V = 140$ м/мин, 3 – $V = 180$ м/мин; $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,15$ мм

Значительно большие возможности повышения работоспособности режущего инструмента возникают при осаждении многоэлементных покрытий. Такой подход позволяет значительно повысить физико-механические свойства покрытий, различное сочетание которых позволяет из широкой гаммы составов покрытий подбирать оптимальный для различных видов лезвийной обработки. Наиболее часто легирующими элементами являются тугоплавкие металлы, железо, алюминий и кремний. В работах [9, 56] показано, что покрытие на основе нитрида ниобия и циркония в сравнении с простыми нитридами ниобия имеет большую термодинамическую устойчивость и обладает высокой прочностью сцепления с основой, что приводит к росту периода стойкости инструмента в 2 – 5 раз.

В работе [58] рассмотрено влияние на работоспособность режущего инструмента двухэлементных ($TiZrN$, $ZrNbN$, $TiNbN$) и одноэлементных (NbN , ZrN ,

TiN) покрытий. Применение двухэлементных покрытий приводит к росту периода стойкости инструмента в 1,5 – 1,8 раза.

Более высокими свойствами по сравнению с другими покрытиями, нанесенными способом КИБ, обладают покрытия на основе *TiN* [8, 11, 21, 42, 44, 46, 57]. При их легировании применяют алюминий, цирконий, молибден, хром, железо и кремний. Наличие легирующих элементов приводит к улучшению физико-механических свойств материала самих покрытий и к изменению взаимодействия покрытия с инструментальной основой и обрабатываемыми материалами.

В работах [9, 11, 22, 42, 62, 63] исследован процесс легирования покрытий из нитрида титана тугоплавкими металлами: цирконием, молибденом, хромом, железом и алюминием. Для покрытий сложного состава наблюдается повышение величины ширины рентгеновской линии, что приводит к увеличению искажений в их кристаллической решётке. Это напрямую отражается на механических свойствах покрытий сложного состава. Так введение в состав нитрида титана хрома увеличивает микротвёрдость на 20% (рис. 1.8). Двухэлементные покрытия в сравнении покрытиями *MoN*, *TiN* и *ZrN* имеют микротвёрдость выше в 1,5 – 1,9 раза.

Химический состав износостойких покрытий определяет характеристики адгезионного взаимодействия. В работах [9, 11, 62, 63], показывается, что с увеличением содержания в износостойких покрытиях на основе нитрида титана тугоплавких элементов (циркония, молибдена, хрома), а также кремния повышается коэффициент отслоения K_o , что свидетельствует о снижении прочности связи с инструментальным материалом. В то же время введение в состав нитридных покрытий железа или алюминия влечёт к увеличению адгезионной прочности [65].

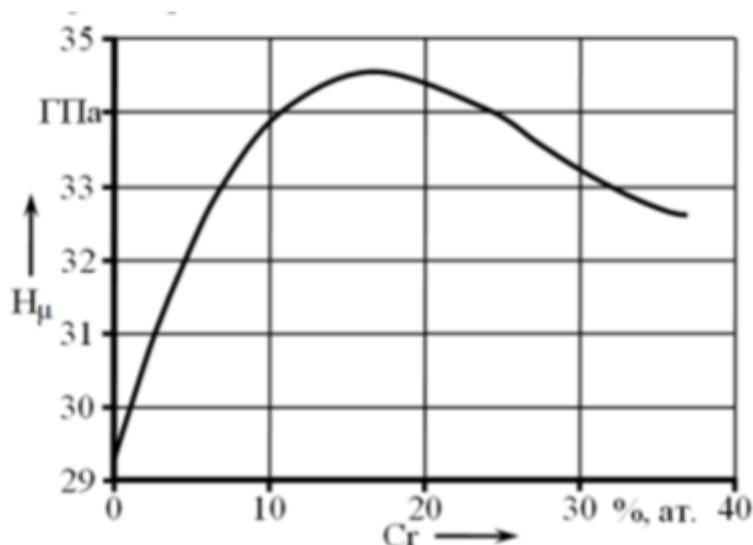


Рис. 1.8. Зависимость микротвёрдости H_{μ} покрытия $TiCrN$ от содержания хрома [63]

Химический состав влияет на напряженное состояние в покрытии в покрытии [62, 63, 66]. Наличие в составе покрытий на основе нитрида титана железа обуславливает снижение остаточных сжимающих напряжений. В то же время легирование покрытий Si , Al , Zr , Mo , Cr ведёт к росту сжимающих напряжений. Последнее влияет на сопротивление покрытий возникновению и росту трещин и, как следствие, повышению работоспособности.

Для легированных износостойких покрытий имеет место оптимальный химический состав, который определяет наибольшее повышение характеристик работоспособности режущего инструмента. Исследования, проведенные авторами [9, 11, 60], показали, что при обработке заготовок из стали 30ХГСА для твердосплавного режущего инструмента с покрытиями $TiMoN$ и $TiZrN$ максимальное повышение периода стойкости наблюдается при различных содержаниях легирующих элементов (рис. 1.9).

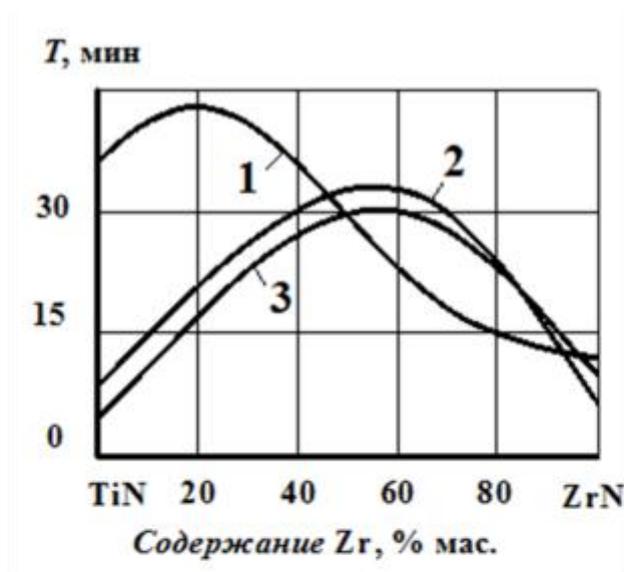


Рис. 1.9. Влияние состава покрытия $TiZrN$ на период стойкости T режущего инструмента из сплава ВК6 при токарной обработке заготовок из сплава ВТ22 (1) и сталей 30ХГСА (2), 12Х18Н10Т (3) [11]:

1 – $V = 40$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 2 – $V = 200$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 3 – $V = 160$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм

Одновременное применение нескольких легирующих элементов для упрочнения износостойких покрытий рассмотрено в работах [64 – 72, 74, 75, 78]. Совместное влияние нескольких легирующих элементов в большей степени изменяет структурные параметры и физико-механические свойства износостойких покрытий, что в свою очередь приводит к дополнительному повышению работоспособности режущего инструмента.

Так в работах [64, 65] показано, что влияние легирующих элементов на параметры микроструктуры и механические свойства износостойких покрытий, легированных одним или двумя элементами аналогично, однако в качественных показателях это влияние для покрытий $TiZrN$, $TiAlN$, $TiSiN$ меньше по сравнению с покрытием TiN .

В работе [77] рассматривалось влияние покрытий $TiSiN$, $TiAlSiN$ и $TiAlZrCN$ на повышение работоспособности режущего инструмента из твердых сплавов марок ВК6 и ТТ7К12. Применение инструмента с покрытиями сложного состава при

лезвийной обработки коррозионно-стойкой стали ЭК26 (05X12H2K3M2AФ), титанового сплава ОТ4 и жаропрочного сплава ХН77ТЮР приводит к снижению сил резания на 10-15 % и температуры в зоне резания на 20-30°С. При этом наблюдается снижение шероховатости обрабатываемой поверхности.

Фирмой *Pramet Sumperk* были разработаны режущие пластины с покрытием состава $TiAlSiN$, осаждаемым методом ФОП. Такой состав покрытий повышает период стойкости режущего инструмента в 2,6 – 3,5 раза в сравнении с покрытием из нитрида титана [81].

Нанесение износостойких покрытий сложного состава на установках с несколькими катодами возможно с использованием различных технологических компоновочных схем. При этом катоды для нанесения покрытий могут изготавливаться как из чистых металлов, так и из сплавов. Сочетание в конструкции элементов разных металлов предоставляет возможность изготавливать составные катоды. В работах [11, 42, 64] рассмотрено влияние компоновочной схемы на механизмы структурного упрочнения покрытий. Показано, что использование нескольких катодов из разных металлов способствует реализовать два механизма упрочнения материала покрытий. Одним из них является твёрдорастворное упрочнение с помощью изменения состава материала покрытия при его легировании. Другим механизмом упрочнения является создание микроструктурных барьеров слоистой структуры покрытия. Реализация упрочнения по первому пути возможна при осаждении покрытий из составных катодов или катодов из сплавов элементов. В меньшей степени реализация за счет твёрдорастворного упрочнения возможна в области совмещения пучков металлов, испаряемых из двух соседних катодов (зона 2, рис. 1.10). Образование микроструктурных барьеров связано с наличием микрослоистости в износостойком покрытии. Такой эффект возможен при применении схемы с отдельными катодами (рис. 1.10, а). На рис. 1.10, б представлен состав и последовательность получаемых микрослоев покрытия за один оборот стола.

В работах [11, 42, 64, 65, 79, 80] исследовано влияние различных технологических схем на свойства износостойких покрытий режущего инструмента.

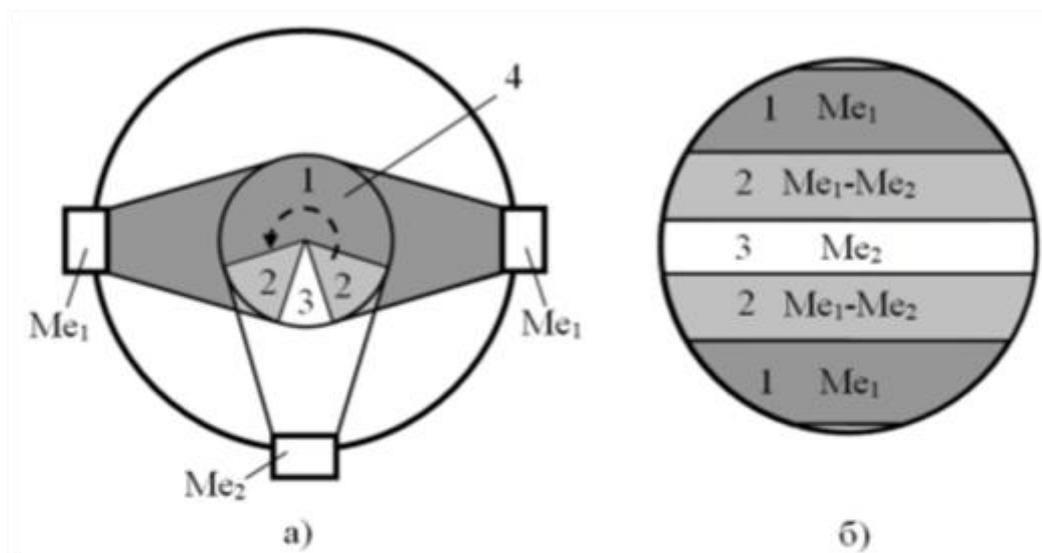


Рис. 1.10. Влияние схемы расположения катодов из двух металлов (а) на состав микрослоёв и структуру покрытия за один оборот стола с инструментом 4 (б) в установках «Булат» [11]

Так в работах [11, 79, 80] исследовано влияние конструкции катодов на структурные параметры и механические свойства покрытия $TiZrN$. В первом случае покрытие наносили с применением трёх отдельных катодов – двух из титана и одного из циркония. Во втором случае использовали три составных катода из титана и циркония. При использовании схемы с отдельными катодами конденсируется двухфазное покрытие $TiZrN$, в состав которого входят мультислои отдельных фаз TiN и ZrN и переходных мультислоев переменного состава сложного нитрида $TiZrN$. В процессе нанесения покрытия их составных катодов конденсируется только однофазное покрытие $TiZrN$. Для покрытия $TiZrN$ при схеме осаждения с отдельными катодами, характерны большая деформация кристаллической решётки, более высокие значения микротвердости и адгезионной прочности, что обеспечивает высокую работоспособность режущего инструмента. Значение интенсивности изнашивания твердосплавного режущего инструмента с покрытиями, нанесёнными из отдельных катодов, снижается в 1,3 – 1,4 раза по сравнению с применением покрытий, осаждённых по схеме с составными катодами.

Реализация компоновочных технологических схем с сочетанием нескольких составных или интерметаллидных катодов разного химического состава позволя-

ет наносить покрытия, одновременно легированные несколькими элементами, при действии обоих механизмов – твёрдорастворного и микроструктурного упрочнений [65, 80]. Конденсированные по данной технологии покрытия имеют наиболее высокие физико-механические свойства. Так, в работах [64, 65] предлагается использовать трёхэлементные покрытия на основе нитрида титана, которые существенно повышают период стойкости режущего инструмента (рис. 1.11).

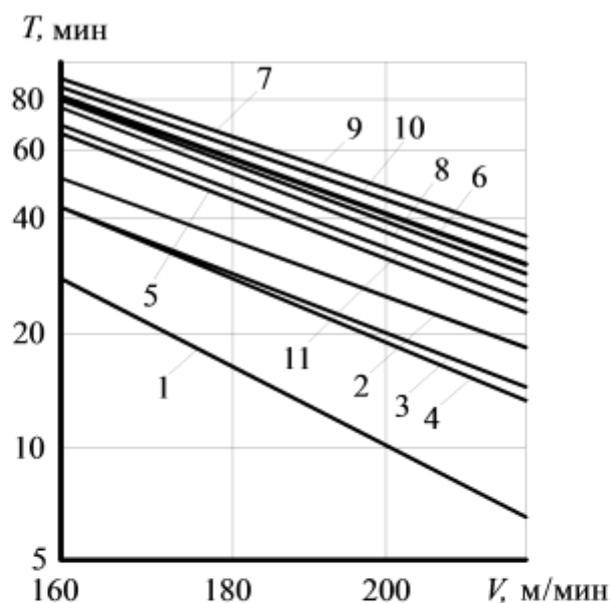


Рис. 1.11. Влияние скорости резания V на период стойкости T режущего инструмента из твёрдого сплава МК8 с трёхэлементными покрытиями при токарной обработке заготовок из стали 30ХГСА: 1 – TiN ; 2 – $TiSiN$; 3 – $TiZrN$; 4 – $TiAlN$; 5 – $TiSiCrN$; 6 – $TiSiZrN$; 7 – $TiSiAlN$; 8 – $TiZrSiN$; 9 – $TiZrAlN$; 10 – $TiAlSiN$; 11 – $TiAlZrN$ ($S = 0,3$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

Современным направлением совершенствования износостойких покрытий является конденсация многослойно-композиционных покрытий. Данные покрытия обладают комплексом различных свойств слоёв покрытия, что значительно повышает период стойкости режущего инструмента [9, 11, 14, 16 – 18, 22].

Принципы формирования многослойных покрытий были разработаны проф. А.С. Верещакой. Было определено, что архитектура покрытий должна сочетать верхний слой высокой твёрдости и износостойкости, который имеет физико-химическую пассивность по отношению к обрабатываемому материалу и термо-

динамическую устойчивость. Нижний слой многослойного покрытия в целях обеспечения функции максимальной адгезионной прочности должен обладать максимальной кристаллохимической совместимостью с инструментальным материалом. В архитектуре такого покрытия могут иметь место и промежуточные слои, свойства которых могут быть переменны. Их назначение – обеспечение выполнения барьерных функций различного назначения при обеспечении адгезионной связи между верхним и нижним слоями [8, 9, 16 – 18].

В работах [23 – 25] при нанесении многослойных покрытий рекомендуется выбирать материалами верхнего слоя только те, которые обладают наиболее высокой энергоемкостью, что обуславливает их высокую износостойкость. В качестве материала нижнего слоя, как переходного от инструментальной основы к верхнему слою рекомендуется использование тугоплавких металлов (Mo, Cr, Zr), обладающих высокой адгезионной прочностью, пластичных, что увеличивает трещиностойкость за счет снижения напряженного состояния в слоях покрытия. Предложенные покрытия имеют высокие демпфирующие свойства при высокой стабильности [9, 25].

В работе [82] для повышения прочности адгезии покрытия с инструментальной основой из быстрорежущей стали предлагается осаждать нижний слой в составе которого имеются элементы как покрытия, так и инструментального материала. Это способствует высокому химическому сродству, снижению градиента напряжений и повышению периода стойкости режущего инструмента в 3 – 5,5 раз на операциях механической обработки.

В работах [83, 88] рассматривается применение токарных резцов с двух- и трёхслойными покрытиями $TiN-TiZrN$, $TiN-TiCN$, $TiN-TiCN-TiZrN$. Выявлено, что оптимальная толщина покрытий составляет 8 мкм, а соотношение толщин верхнего и нижнего слоев зависит от режимов резания. При низких скоростях резания высокую работоспособность режущего инструмента обеспечивают многослойные покрытия с относительной толщиной верхнего слоя 35 – 60 %. При повышении скорости резания толщина верхнего слоя увеличивается до 50 – 80 %. В качестве материала верхнего слоя при этом рекомендуется использовать $TiCN$. Наличие

дополнительных слоёв даёт возможность повышения времени работы покрытия до усталостного разрушения.

В работе [84] для повышения эффективности торцовых фрез рекомендуется применять многослойные покрытия $TiN-TiCN-TiN$ и $TiZrCN-TiZrN$. Слои из карбонитрида в этих покрытиях формируют высокий уровень сжимающих напряжений, что снижает трещинообразование при прерывистом резании. При обработке заготовок из сталей 5ХНМ, 18Х18Н10Т и сплава ВТ22 значения периода стойкости инструмента из твёрдого сплава с предлагаемыми покрытиями увеличивается в 1,5 – 3,0 раза по сравнению с покрытием TiN [85, 86].

В работах [86, 87] для операции торцового фрезерования обосновывается применение трёхслойной конструкции покрытий режущего инструмента, используемого при торцовом фрезеровании. В конструкцию покрытия добавлен промежуточный слой из нитрида титана и циркония, обладающий повышенной трещиностойкостью. Использование покрытий такой конструкции ($TiCN-TiZrN-TiN$ и $TiN-TiZrN-TiN$) по сравнению с покрытием TiN позволяет повысить периода стойкости фрез из твёрдого сплава в 1,6 – 4,7 раза.

В работах [89, 90] для операций непрерывного резания предлагаются двух- и трёхслойные конструкции покрытий с верхними слоями, обладающими повышенной трещиностойкостью $TiAlN-TiAlCrN$, $TiZrN-TiZrAlN$, $TiZrAlN-TiZrSiN$. При этом материал нижнего слоя покрытия должен иметь высокую адгезионную прочность. Трещиностойкость разработанных многослойных покрытий увеличивается в 1,9 – 3,3 раза по сравнению с однослойными многоэлементными покрытиями. Применение покрытий данной архитектуры приводит к повышению периода стойкости режущего инструмента в 2,5 – 3,5 раза.

Авторы работ [91 – 93] для операций резьбонарезания и отрезания заготовок предлагают использовать следующие многослойные покрытия $TiCrN-TiCrAlN$, $TiAlN-TiAlSiN$, $TiCrN-TiCrZrN$, $TiAlN-TiAlCrN$, $TiAl-TiAlN-TiAlSiN$, $TiAl-TiAlN-TiAlCrN$. Использование таких покрытий в сравнении с покрытием TiN позволяет увеличить период стойкости режущего инструмента в 1,7-4,6 раза.

Конденсация многослойных композиционных покрытий позволяет использовать особые материалы для покрытий. В качестве таких, например, можно использовать хрупкие материалы, материалы, имеющие низкую адгезионную прочность с подложкой, но обладающие большой термодинамической устойчивостью и высокими твёрдостью и химической инертностью при высоких температурах (например, Al_2O_3 , HfB_2 , NbB_2 , TaB_2 , Si_3N_4) [9, 17].

В последнее время особый интерес представляют наноструктурированные покрытия [17, 27, 37, 94, 95]. В этом случае создание многослойно-композиционной архитектуры покрытий со слоями различного функционального назначения с нанометрической структурой и слоями наноразмерной толщины, обладающих различным композиционным составом, чередующимися между собой, позволяет значительно повысить свойства покрытий и, в первую очередь, твёрдость и трещиностойкость [35, 95]. Поэтому ведущие фирмы-производители режущего инструмента в настоящее время упрочняют композиционно-многослойными покрытиями различного состава и архитектуры до 95 % твердосплавного инструмента и до 60% инструмента, изготавливаемого из быстрорежущей стали.

Анализ рассмотренных выше работ показывает, что работоспособность режущего инструмента существенно возрастает при нанесении на его рабочие поверхности износостойких покрытий. Однако в ряде случаев работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями не отвечает современным требованиям машиностроительного комплекса. К тому же технологический потенциал одно- и многоэлементных, одно- и многослойных покрытий, разработанных на основе TiN и его вариаций, фактически исчерпан. Следовательно, научно-техническая задача поиска новых технологий и средств для дальнейшего повышения работоспособности режущего инструмента с покрытиями становится актуальной. Поэтому дополнительная упрочняющая обработка режущего инструмента с износостойкими покрытиями, направленная на модификацию физико-механических свойств самого покрытия и повышения прочности адгезии износостойкого покрытия с инструментальной основой может стать решением.

1.2. Применение дополнительного энергетического воздействия на износостойкое покрытие для повышения эффективности режущего инструмента

Применение дополнительного энергетического воздействия является эффективным способом повышения работоспособности режущего инструмента с покрытием. Основной целью дополнительного энергетического воздействия на инструмент из быстрорежущей стали является увеличение сопротивляемости инструментального материала термопластическим деформациям, повышение прочности адгезии, изменение характеристик субстрата покрытия. При упрочнении твердосплавного инструмента основной эффект достигается в росте прочности сцепления покрытия и основы, а также повышении механических свойств материала покрытия [97 – 101]. Комбинированием метода нанесения износостойкого покрытия с дополнительным энергетическим воздействием можно значительно улучшить технологические показатели процесса лезвийного формообразования обрабатываемой поверхности, увеличить его производительность при уменьшении износа режущего инструмента [102, 130].

Причиной недостаточной надёжности износостойких покрытий и возможности их исключения путем использования комплексной упрочняющей обработки являются большое число неблагоприятных факторов (рис. 1.12). Анализ причин возникновения и возможностей их устранения позволяет предположить, что использованием комплексной упрочняющей обработки возможно минимизировать влияние некоторых из них (на рис. 1.12. выделенных жирной линией).

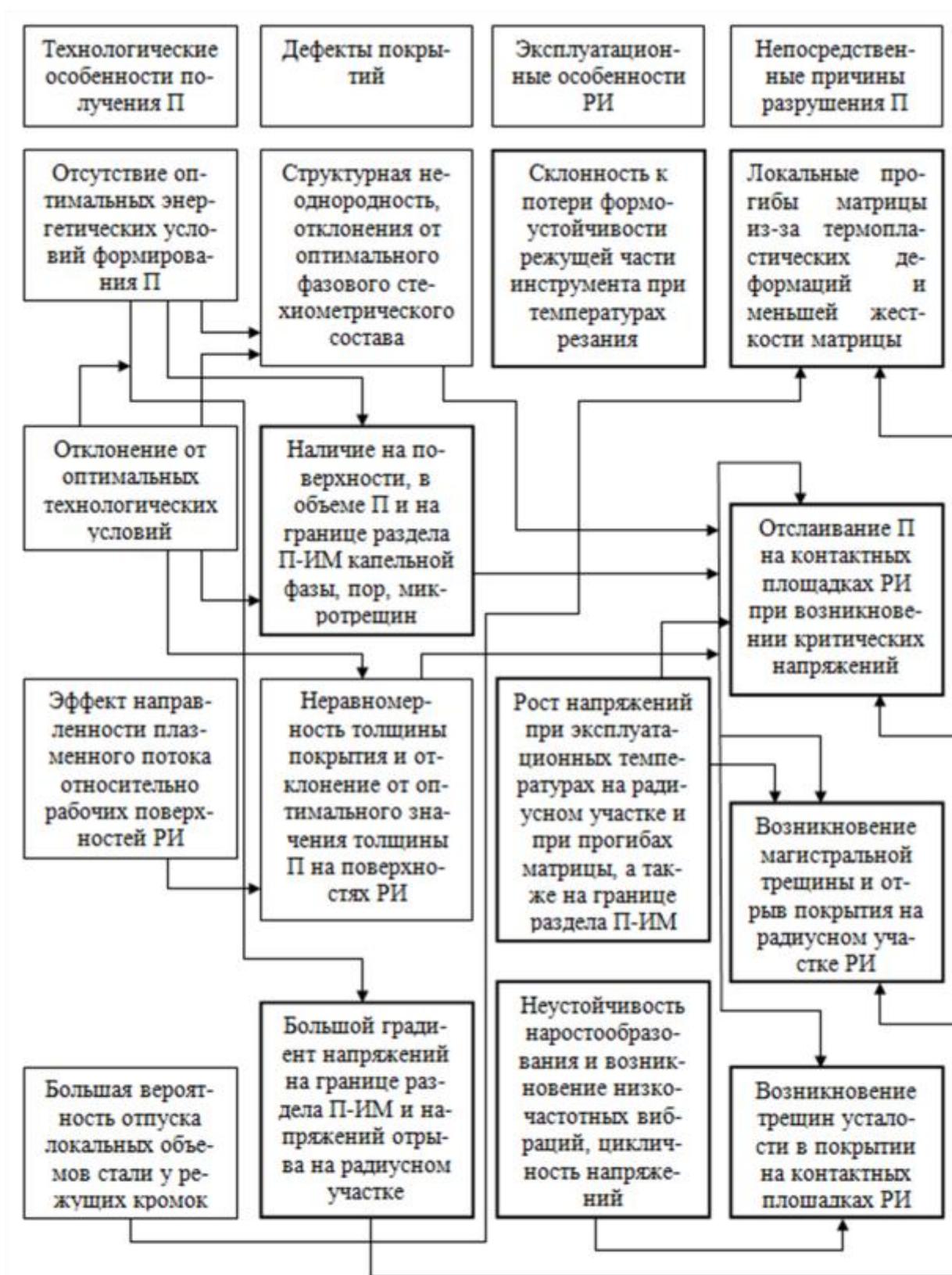


Рис. 1.12. Структурная схема влияния обобщенных причин на снижение работоспособности режущего инструмента с износостойким покрытием [103]: П - покрытие, ИМ - инструментальный материал, РИ - режущий инструмент

Повысить устойчивость формы режущего клина инструмента можно способом увеличения его поверхностной твёрдости, что достигается воздействием на инструментальную основу дополнительной энергетической обработкой. Как следствие, это приводит к уменьшению локальных прогибов инструментальной основы из-за возникающих в процессе резания под действием внешних нагрузок и высоких температур термопластических деформаций. Кроме этого воздействие на композицию «износостойкое покрытие-инструментальная основа» можно снизить значения напряжений на границе её раздела за счёт изменения типа связи материалов инструмента и покрытия, что позволяет продолжить долговременному сохранению покрытия на контактных площадках режущего клина. Нестабильность процесса резания влечёт к трещинообразованию покрытия. В этом случае дополнительное энергетическое воздействие на композицию «износостойкое покрытие-инструментальная основа», снижающая коэффициент трения верхнего слоя покрытия с обрабатываемым материалом, делает устойчивым процесс резания в результате уменьшения силы резания и трения на контактных площадках режущего инструмента. Дополнительная обработка покрытия способствует увеличению концентрации и более равномерному распределению в нем вакансий и дислокаций, что приводит к залечиванию дефектов и упрочнению материала покрытия вследствие образования новой структуры с повышенными механическими и физико-химическими характеристиками. Таким образом, можно отметить, что дополнительное энергетическое воздействие влечёт за собой снижение влияния всех непосредственных причин разрушения износостойкого покрытия в процессе его эксплуатации.

Дополнительное энергетическое воздействие возможно разделить на два вида:

- предварительная упрочняющая обработка и дальнейшее осаждение покрытия;
- осаждение покрытия и дальнейшая упрочняющая обработка.

В наибольшей степени изученной является первый вид способов увеличения работоспособности металлорежущего инструмента с покрытием, с помощью выполнения предварительной упрочняющей обработки инструментального субстрата перед осаждением износостойкого покрытия (термообработка, ионная

бомбардировка, ионная имплантация, ионное азотирование, поверхностная пластическая и термопластическая обработки) [29, 97, 98, 102, 104 – 106, 131]. Такой вид предварительной обработки позволяет дополнительно повысить период стойкости быстрорежущего инструмента в 1,5 – 2 раза, что связано с залечиванием дефектов поверхности инструментальной основы, образованием в поверхностных слоях энергетически стабильных структур с высокой плотностью дислокаций и вакансий, равномерно распределенных в объеме и повышении адгезионной прочности износостойкого покрытия [9, 104].

Среди методов первого вида массовое использование для предварительного упрочнения контактных площадок режущего инструмента получили методы ионного азотирования и цементации в плазме тлеющего разряда [28, 29]. Отличительная черта этих методов состоит в непосредственной возможности технологического совмещения двух процессов в одной установке – ионного азотирования (цементации) с последующим нанесением износостойкого покрытия.

В результате исследования работоспособности режущего инструмента из стали Р6М5, подвергнутого предварительному ионному азотированию и последующему нанесению покрытий составов TiN и $TiAlN$, обнаружено значительное преимущество такого инструмента в сравнении с инструментом с покрытием без предварительной обработки на операциях продольного точения и симметричного торцового фрезерования [29, 107]. Снижение интенсивности изнашивания такого режущего инструмента связано как с повышением химической пассивности и снижением адгезионного взаимодействия покрытия с обрабатываемым материалом, так и с формированием азотированного слоя, отличающийся высокой твердостью в совокупности с высокими теплоустойчивостью и сопротивлением микропластическим деформациям, что способствует торможению процессов разупрочнения.

Формирование диффузионного термостабильного слоя (азотирование в плазме тлеющего разряда), металлического подслоя и композиционного покрытия [97] позволяет повысить теплостойкость азотированного слоя и, следовательно, сопротивляемость инструментального материала вязкому разрушению. Практическая неизменность линейных размеров режущего инструмента при ионном азоти-

ровании позволяет такую обработку использовать в качестве предварительной технологической операции для длинномерного инструмента. В работах [28, 109] показано, что при лезвийной обработке жаропрочных никелевых сплавов период стойкости протяжек из быстрорежущей порошковой стали P12M3K5Ф2-МП при использовании предварительного ионного азотирования повышается в 2 раза.

Результаты исследования механизма упрочнения инструментального материала при использовании дополнительного энергетического воздействия с использованием азотирования в плазме тлеющего разряда, данные стойкостных испытаний такого инструмента представлены в указанных выше работах. Следует отметить, что существенный объём исследований в этом направлении выполнен на инструменте из быстрорежущей стали, меньший интерес уделяется исследованиям инструмента из твёрдого сплава.

Повысить адгезионную активность к осаждаемым нитридным покрытиям позволяет предварительная ионная имплантация рабочих поверхностей режущего инструмента перед осаждением покрытия [110 – 112]. В работе [113] отмечается, что нанесение по такой технологии покрытий *TiN* увеличивает его твердость в 1,5 раза, что позволяет повысить период стойкости быстрорежущего инструмента в 1,5-2 раза. В целом в данном направлении известно значительно меньшее число работ. Остаются малоисследованными вопросы взаимосвязи параметров структуры и свойств инструментальной основы и работоспособности режущего инструмента. В то же время использование современного оборудования, позволяющего совместить процессы ионной имплантации и нанесения ионно-плазменных покрытий, позволяют значительно повысить производительность такой комбинированной обработки [114].

В работах [115, 116] отмечается, что применение упрочняющей обработки, содержащей предварительную лазерную обработку инструментального материала из стали P6M5 и дальнейшее осаждение покрытия *TiN*, способствует получению качественно новых условий резания, характеризующиеся низкой адгезией рабочих площадок инструмента и обрабатываемого материала, а также трансформацией температурно-деформационного состояния режущего клина инструмента.

Тем не менее исследованный один тип покрытия фиксированной толщины при применении режима обработки, который характерен для лазерного упрочнения как самостоятельного процесса, без исследования особенности комплексной обработки не дает полного представления о механизмах изменения структуры и свойств системы «покрытие – инструментальный материал», о влиянии комплексной обработки на контактные процессы при резании таким инструментом.

Наименее изученной является второй вид методов комплексной упрочняющей обработки, включающая осаждение износостойких покрытий и последующую дополнительную обработку инструмента с покрытием (механическую, термическую, термопластическую, химико-термическую, воздействие энергетическим потоком). Данная обработка способствует изменению структуры материала покрытия, повышению прочности сцепления с основой и устранению дефектов в кристаллической решётке [9, 104, 106, 118, 122].

В работах [9, 119, 120, 122, 123] рассмотрено применение химико-термической обработки (ионной имплантации, ионного азотирования и цементации) режущего инструмента с износостойким покрытием. Ионная имплантация ионов металлов (алюминия, свинца) и неметаллов (углерода, азота, инертных газов) приводит к улучшению структуры материала покрытия и изменению механических свойств. Таким образом, эта операция приводит к повышению периода стойкости инструмента в 1,5 – 2 раза в сравнении с инструментом не прошедшим дополнительную упрочняющую обработку.

В работах, упомянутых выше, не рассмотрены механизмы влияния изменения свойств на контактные процессы при резании, на кинетику процесса изнашивания, отсутствует сравнение свойств режущего инструмента с износостойким покрытием до и после дополнительной обработки.

Существует метод комплексной обработки, которая заключается в осаждении покрытия и дальнейшем отжиге режущего инструмента на воздухе или в вакууме при температуре 450 – 600 °С в течение 1 – 3 часов. Данная обработка влечёт к релаксации напряжений на границе раздела «износостойкое покрытие – инструментальная основа», трансформации структуры с воздействием на дефекты

поверхности и характер связи покрытия и инструментальной основы [9]. В то же время в работе упрощённо рассмотрены результаты исследования механизма изменения свойств покрытия после обработки и в достаточной степени показаны результаты исследования работоспособности данного инструмента.

Авторы работы [124] рекомендуют способ увеличения эксплуатационных характеристик инструментальных основ благодаря проведению дополнительной деформационной обработки покрытия, наносимого методом ионно-плазменного, газотермического или лазерного напыления. Данной обработкой можно существенно уменьшить трение на поверхности инструментального материала и увеличить твёрдость композиции «износостойкое покрытие-инструментальная основа». Деформирование покрытия приводит к увеличению структурных дефектов в кристаллической решетке и микроискажений в структуре покрытия. Метод используется для упрочнения поверхностей штампов и других изделий, которые работают на контактное трение. Повысить свойства покрытий можно электронно-лучевой обработкой. Однако исследований в данном направлении крайне мало.

Исследования изменений износостойкости покрытий из нитрида титана, осаждённого методом КИБ при алмазном выглаживании отражены в работе [125]. Показано, что такая комплексная обработка покрытия TiN создаёт конкретные изменения в тонком поверхностном слое покрытия, допуская формирование напряжённого состояния поверхностного слоя, близкого к состоянию предельного поверхностного упрочнения, характеризуемого большим и средним размером блоков и большим уровнем напряжений. Формирование аналогичной структуры покрытия позволяет последующему увеличению износостойкости композиции «износостойкое покрытие-инструментальная основа». Данные о работоспособности режущего инструмента в работе отсутствуют, поэтому сохраняется проблема о взаимосвязи структурных параметров поверхностного слоя и износе рабочих площадок режущего инструмента.

Изучение процесса осаждения покрытий методом КИБ на рабочие поверхности инструмента из быстрорежущей стали показали, что уменьшение уровня энергии ионной бомбардировки и энергетического уровня формирования покры-

тий приводит к появлению дефектов в нём [126]. Минимальная величина температур ионной бомбардировки и осаждения покрытия вакуумно-плазменным способом на основу из быстрорежущей стали, в сравнении с уровнем температур при осаждении покрытия на основу из твёрдого сплава ограничена относительно небольшой температурой отпуска быстрорежущих сталей. По этой причине предлагается [9] метод конденсации покрытий на инструмент из быстрорежущей стали, который содержит в себе сочетание процессов осаждения покрытий и термообработки. Способ содержит ионную бомбардировку при температуре выше температуры отпуска стали (900 – 1250 °С), нанесение покрытия и дальнейшую закалку инструмента с покрытием. В научной литературе рассмотрена информация только об повышении периода стойкости режущего инструмента.

Уровень развития лазерной техники в современное время признаёт лазерную обработку как перспективный способ воздействия на поверхностные слои инструментального субстрата. Возможность использования лазерного излучения для упрочнения материала износостойкого покрытия раскрыта в работе [9]. По результатам работы поверхностная структура покрытия TiN после лазерной обработки плотностью мощности 40 кВт/см² имеет более сглаженный характер, уменьшается количество дефектов поверхности, образуется псевдоаморфная структура. Плотность мощности одиночного лазерного импульса оказывает большое влияние на период стойкости инструмента, причём эта зависимость экстремальна и имеет максимум в диапазоне 30 – 45 кВт/см². Так, обработка инструмента с покрытием несколькими импульсами (3 – 5 импульсов) с плавным увеличением плотности мощности в диапазоне 5 – 35 кВт/см² позволяет сократить разброс периода стойкости на 30-50% и увеличить её среднюю величину на 10-20% в сравнении с инструментом, обработанным одиночным импульсом.

В результате анализ литературы, можно сделать выводы о целесообразности использования лазерной обработки в качестве метода упрочнения материала износостойкого покрытия. Например, двойственность влияния лазерного излучения на покрытия различных составов была показана в работе [127]. Таким образом, лазерное излучение оказывает положительное влияние на термодинамически ста-

бильные покрытия (например, $TiCrN$). С другой стороны, лазерная обработка покрытия TiN , наоборот, приводит к разрушению связи между атомами титана и азота с выделением молекул последнего и соответственно более слабой трансформацией микроструктуры.

Импульсная лазерная обработка (ИЛО) поверхности твердосплавного режущего инструмента с покрытием приводит к изменению его структурных параметров (рис. 1.13) [128, 129]. Период кристаллической решётки покрытия снижается, что свидетельствует о получении более плотной кристаллической структуры.

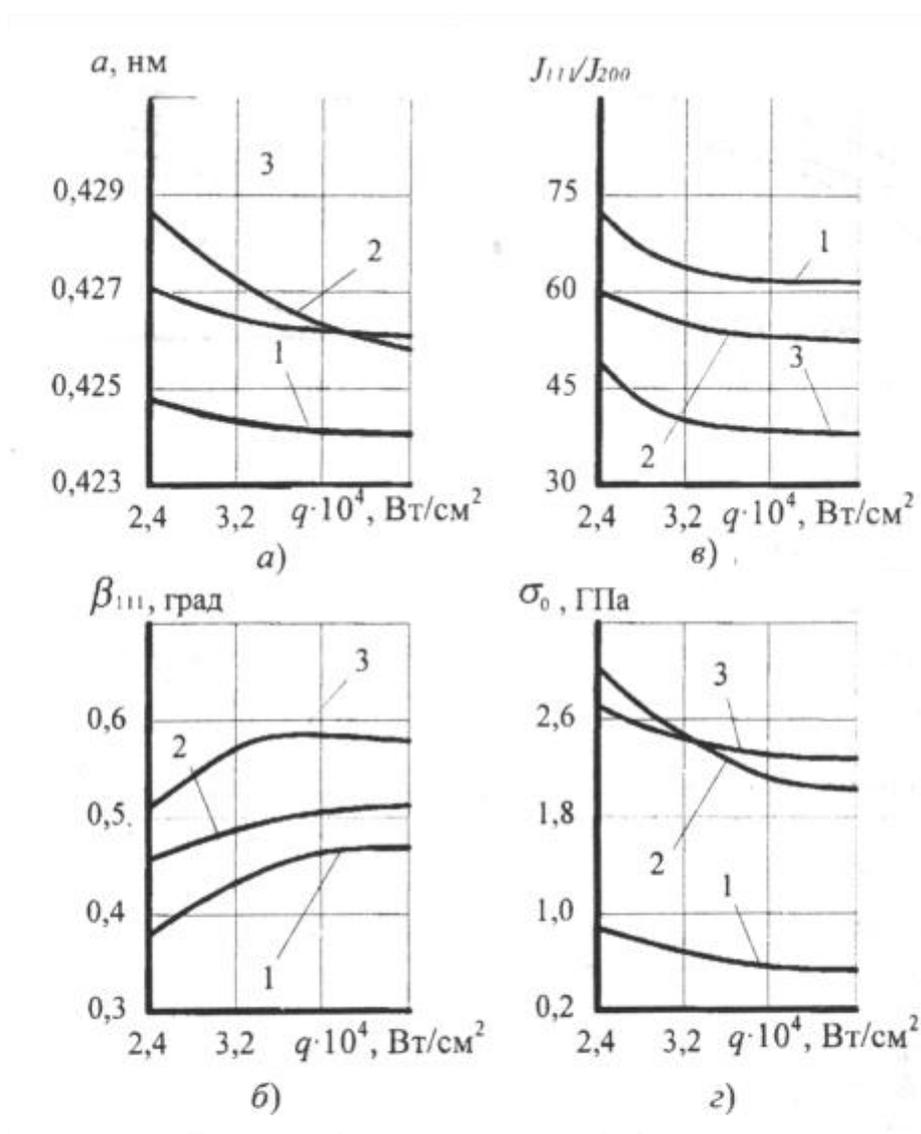


Рис. 1.13. Влияние плотности мощности лазерного излучения на параметры структуры покрытий [129]: 1 – TiN , 2 – $(Ti,Zr)N$, 3 – $(Ti,Zr)CN$; твёрдый сплав – МК8

Увеличение плотности мощности ИЛО приводит к искажению кристаллической решётки и разориентации микрообъёмов материала покрытий, что свидетельствует об увеличении полуширины рентгеновской линии и снижении интенсивности рентгеновской линии (111), снижает величину остаточных сжимающих напряжений. Последнее связано с релаксацией напряженного состояния на границе раздела «покрытие-инструментальная основа» в результате лазерного нагрева [128].

Применение ИЛО для двухэлементных покрытий приводит к большему снижению остаточных сжимающих напряжений по сравнению с одноэлементными покрытиями. При воздействии ИЛО изменение параметров микроструктуры покрытий на твердосплавной основе менее существенно по сравнению с быстрорежущей основой, так как в структуре твёрдого сплава не происходит заметных изменений. ИЛО быстрорежущего инструмента с покрытием ведёт к изменению кристаллической структуры на границе раздела «покрытие-инструментальная основа».

Изменение микроструктуры материала покрытий после использования ИЛО приводит к увеличению механических свойств. Микротвёрдость таких покрытий, например, повышается на 10-16% в зависимости от их состава (рис. 1.14).

С увеличением плотности мощности ИЛО до определённых значений адгезионная прочность покрытия увеличивается, о чём свидетельствует коэффициента отслоения (рис. 1.15). Такое действие ИЛО связано с релаксацией напряжений на границе раздела «покрытие-инструментальная основа». Увеличение коэффициента отслоения при плотности мощности ИЛО выше оптимального значения связано либо с оплавлением инструмента из быстрорежущей стали и снижением его твёрдости, либо с интенсивным образованием трещин в твёрдом сплаве [128].

Использование оптимальных значений плотности мощности ИЛО приводит к снижению интенсивности износа режущего инструмента, что связано с повышением микротвёрдости и увеличением прочности адгезии покрытия.

Плотность мощности лазерного излучения, при которых отмечается минимум интенсивности износа режущего инструмента с покрытиями после ИЛО

уменьшается 1,5-1,9 раза в зависимости от состава покрытия и обрабатываемого материала.

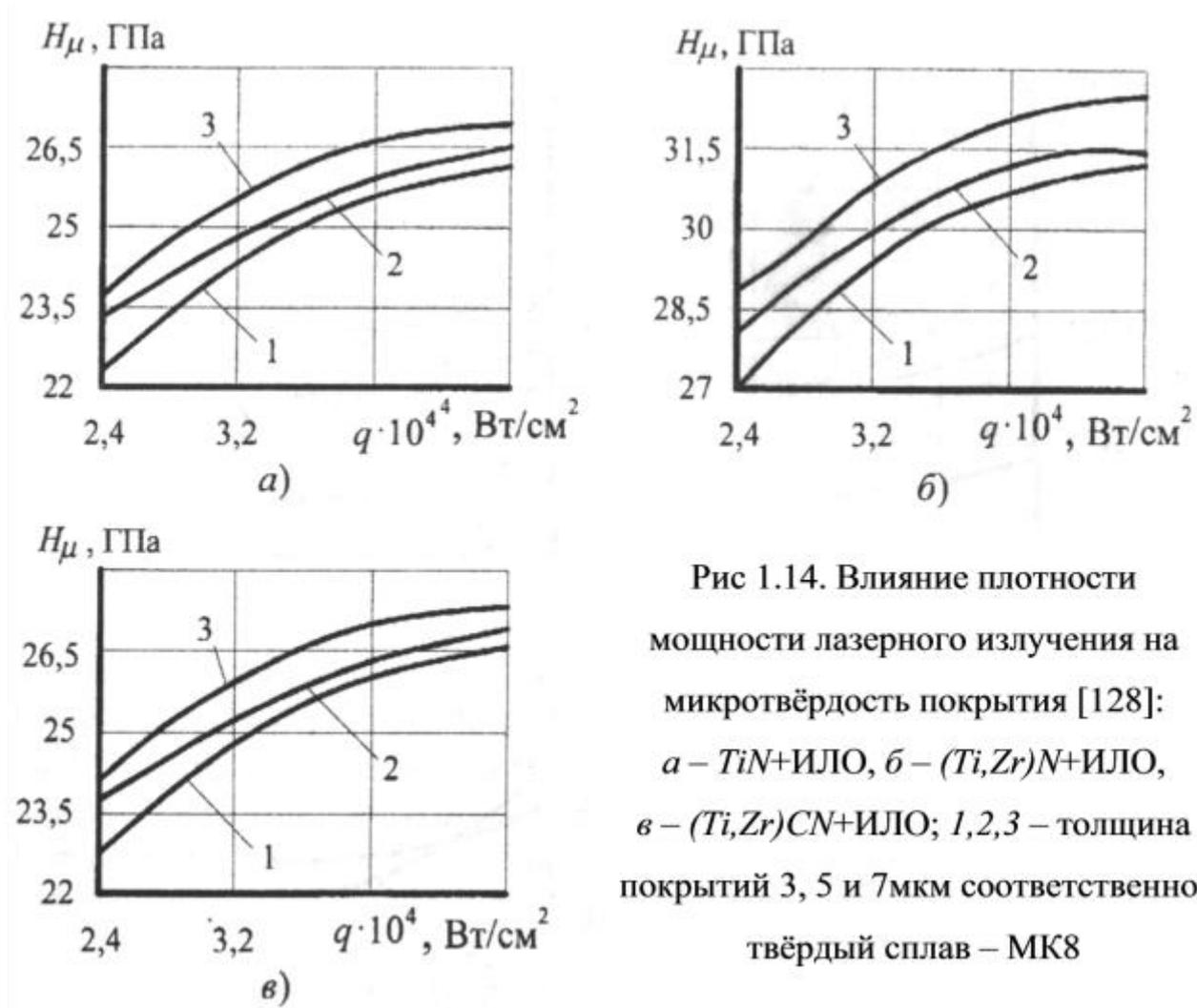
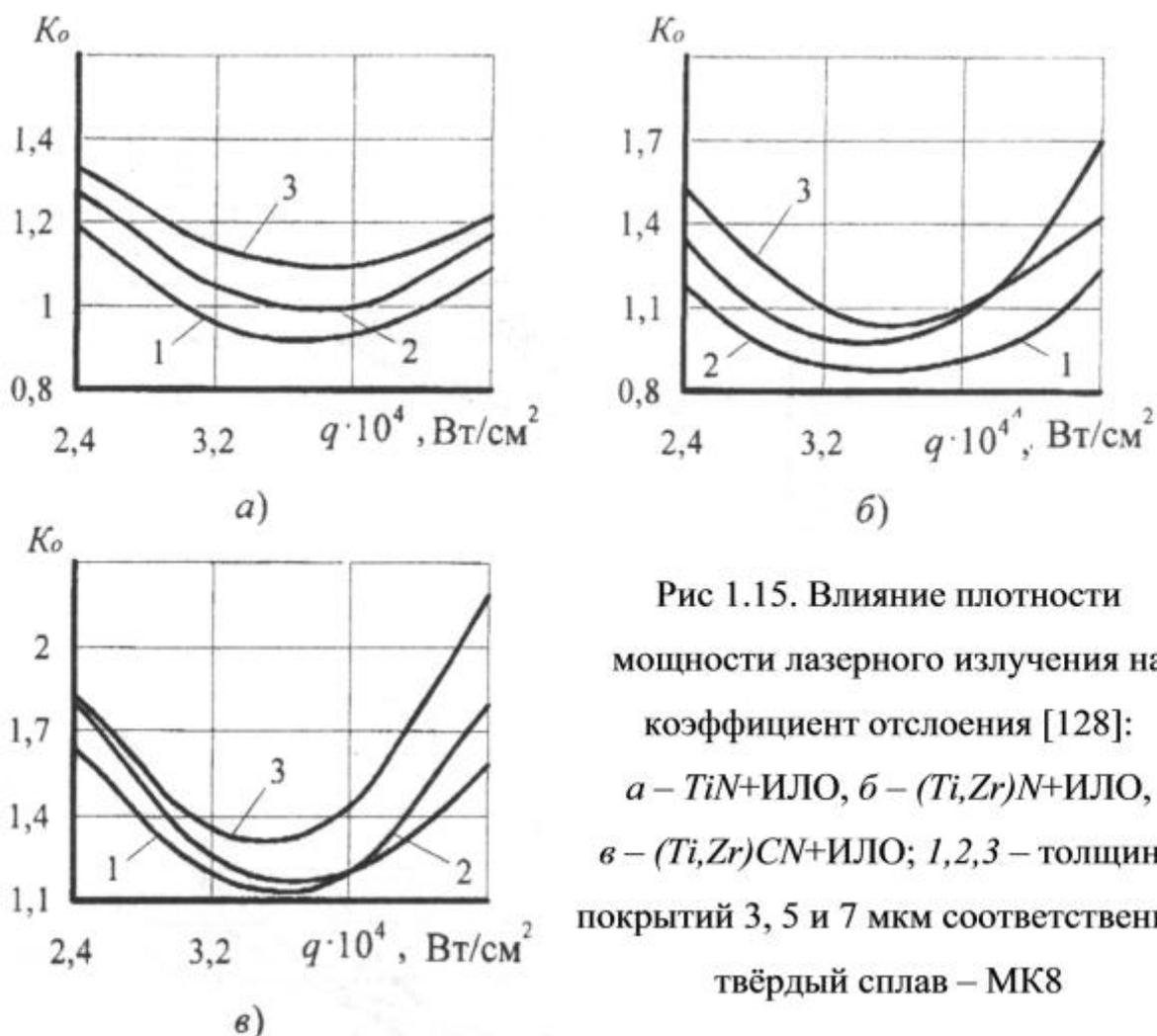


Рис 1.14. Влияние плотности мощности лазерного излучения на микротвёрдость покрытия [128]:
 а – TiN+ИЛО, б – (Ti,Zr)N+ИЛО,
 в – (Ti,Zr)CN+ИЛО; 1,2,3 – толщина покрытий 3, 5 и 7мкм соответственно;
 твёрдый сплав – МК8

ИЛО оказывает значительное воздействие на контактные характеристика процесса резания, а уровень её влияния устанавливается составом покрытия, обрабатываемым и инструментальным материалами и технологическими режимами обработки.

Важной задачей при использовании ИЛО в качестве дополнительной лазерной обработки является определение технологических режимов. Анализ работ [128, 129, 131, 132] показывает, что для разных составов и конструкций покрытий их выбор проводится на основе проведения экспериментальных исследований.



В настоящее время имеются работы, в которых предприняты попытки аналитического определения режимов лазерной обработки применительно к системе «покрытие-подложка» [129, 133 – 138]. Кроме того, в математических моделях чаще всего рассматриваются однослойные покрытия, моделирование сводится лишь к определению температурных полей в покрытии и основе без рассмотрения влияния лазерной обработки на изменение свойств покрытия, основы и их адгезионной прочности. Рассмотрение задачи о температурных полях в покрытии проводится без совместного рассмотрения задачи об изменениях напряженного состояния, что является важной характеристикой для оценки работоспособности как самого покрытия, так и режущего инструмента с покрытием в целом. Отсутствуют данные об изучении влияния комбинированной обработки на контактные процессы при работе режущего инструмента с покрытием.

Анализ работ, направленных на исследование влияния дополнительного энергетического воздействия с использованием импульсной лазерной обработки на работоспособность твердосплавного режущего инструмента, позволяет отметить следующие недостатки и нерешенные вопросы:

- отсутствует информация об оптимизации параметров лазерной обработки, конструкции и структуры многослойных покрытий сложного состава;
- крайне ограничена номенклатура исследуемых типов покрытий;
- отсутствуют математические модели, позволяющие провести оценку и анализ воздействия лазерной обработки на параметры структуры и механические свойства многослойных покрытий и определить ее оптимальные технологические параметры;
- не исследованы закономерности изменений контактных процессов и изнашивания режущего инструмента с многослойными покрытиями после лазерной обработки;
- не выявлены области эффективного применения инструмента после импульсной лазерной обработки.

1.3. Цель и задачи исследований

Анализ научной литературы показывает высокую эффективность режущих инструментов с износостойкими покрытиями, осажденными методом КИБ.

Однако в ряде случаев работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями не отвечает современным требованиям машиностроительного комплекса. К тому же технологический потенциал одно- и многоэлементных, одно- и многослойных покрытий, разработанных на основе нитрида титана и его модификаций, практически исчерпан. В связи с этим становится все более актуальной научно-техническая проблема поиска новых технологий и средств повышения работоспособности режущего инструмента с износостойкими покрытиями.

Одним из радикальных путей решения указанной проблемы является дополнительная упрочняющая обработка режущего инструмента с износостойкими покрытиями, направленная на модификацию физико-механических свойств самого покрытия и повышения прочности адгезионных связей износостойкого покрытия и инструментальной основы. Из всех видов упрочняющей обработки следует выделить импульсную лазерную обработку, являющуюся универсальным средством повышения работоспособности режущего инструмента любых типоразмеров с покрытиями различных составов и конструкций. Широкое применение лазерных систем и их существенные технологические возможности делают доступными ИЛО для упрочнения различного режущего инструмента с износостойкими покрытиями, в том числе со сложной формой режущей кромки.

Для более широкого использования импульсной лазерной обработки в качестве упрочняющей обработки необходимо решить ряд научных и практических задач. В настоящее время импульсная лазерная обработка применяется для упрочнения однослойных износостойких покрытий. Данных по использованию импульсной лазерной обработки для многослойных покрытий, которые более эффективны по сравнению с однослойными покрытиями и которые находят все большее применение на производстве, в литературе отсутствуют. Механизм трансформации свойств износостойких покрытий, в том числе и многослойных, после импульсной лазерной обработки до конца не изучен. Информация по закономерностям взаимосвязи параметров импульсной лазерной обработки с механическими свойствами покрытий и процессом изнашивания режущего инструмента отсутствует. Технологические режимы импульсной лазерной обработки в основной массе работ определяется экспериментальным путем, что требует больших затрат средств и времени. Математические модели, позволяющие определить технологические режимы импульсной лазерной обработки, разработаны для режущего инструмента с однослойными износостойкими покрытиями, а для режущего инструмента с многослойными покрытиями они отсутствуют. Кроме того, существующие математические модели для определения технологических параметров учитывают только температурное воздействие импульсной лазерной обработки

на режущий инструмент с износостойкими покрытиями, что вполне подходит для быстрорежущего инструмента. Для твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями необходима оценка напряжений, возникающих при воздействии на него импульсной лазерной обработки и вызывающих возникновение трещин как в твердосплавной основе так и в износостойком покрытии. Важным моментом при определении технологических режимов ИЛО являются теплофизические свойства инструментального материала, которые в известных работах не рассматривались.

Целью работы является повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия.

Для осуществления данной цели поставлены следующие задачи:

- разработать математическую модель теплового состояния композиции «МП-ИО» при воздействии на неё ИЛО;
- выполнить численное моделирование воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО», на основе которого определить технологические параметры ИЛО;
- разработать конструкции МП и технологии их нанесения;
- исследовать тепловое и напряженное состояние композиции «МП-ИО» с целью установления закономерностей воздействия ИЛО на структурные параметры и механические свойства МП;
- исследовать контактные, тепловые процессы и изнашивание РИ с МП после ИЛО с целью выявления их взаимосвязи с механическими свойствами и структурными параметрами МП;
- экспериментально подтвердить высокую работоспособность твердосплавного РИ с разработанными МП после ИЛО;
- дать оценку эффективности твердосплавного РИ с разработанными МП в условиях действующего производства.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Оборудование, применяемое для нанесения износостойких покрытий и лазерной обработки

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

Твердосплавные пластины устанавливались в приспособление, которое вращалось с частотой 8 об/мин, что гарантировало равномерный прогрев пластин.

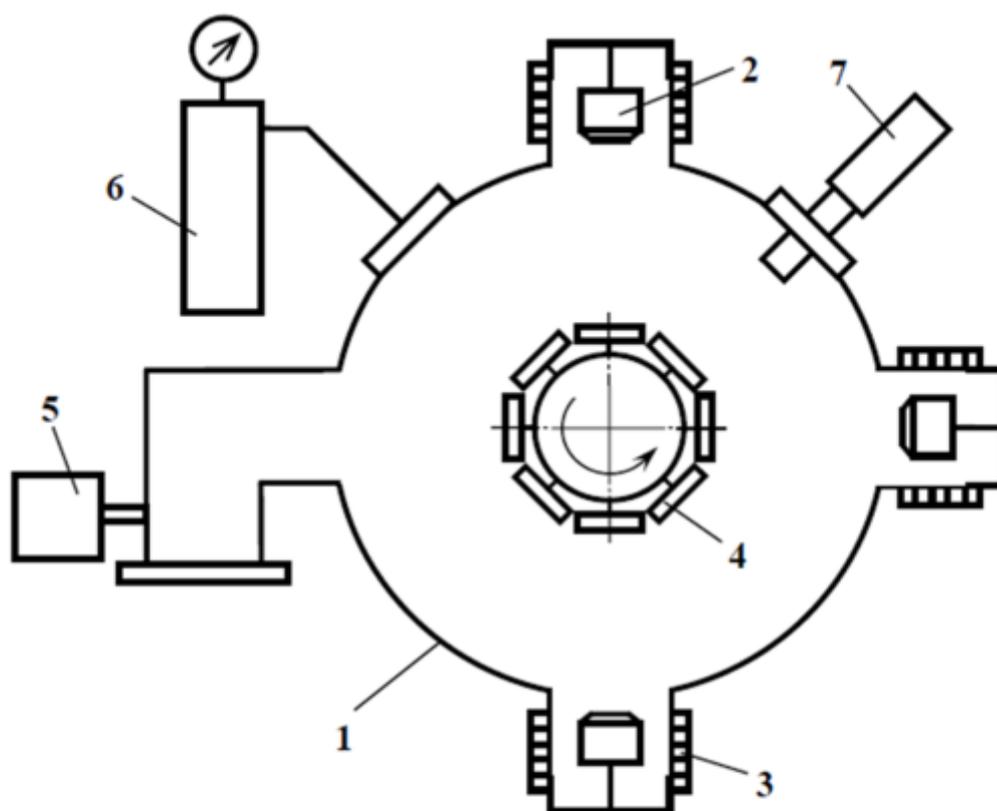


Рис. 2.1. Компоновочная схема установки «Булат – 6» [9]:

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

Подготовка поверхностей пластин включала следующие этапы:

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

Ионную очистку проводили при следующих режимах: ток дуги $I_d = 110$ А, ток фокусирующей катушки $I_\phi = 0,4 - 0,6$ А, остаточное давление $p_o = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, напряжение $U_{он} = 1000$ В, время ионной очистки $\tau_o = 6 - 10$ минут при температуре 550-650 °С. Процесс осаждения износостойкого покрытия протекал при давлении $p_o = 3,9 \cdot 10^{-1}$ Па, температура пластин поддерживалась в пределах 560–580 °С. После осаждения покрытия выполняли выдержку режущего инструмента в вакууме. Камера установки разгерметизировалась при достижении температуры 150–200 °С на режущем инструменте, после чего происходило извлечение инструмента [42].

Экспериментально температуру пластин из твёрдого сплава определяли оптическим микропирометром ВИПМ-015М [42].

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

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

Импульсная лазерная обработка твердосплавных пластин с ИП и без ИП осуществлялась на лазерной технологической установке импульсного действия

«Квант-15». Пластины устанавливались на стол установки, который перемещался со скоростью 0,3–0,42 м/мин [128, 129].

Плотность мощности импульсного лазерного излучения определяется из выражения [141]:

$$q = \frac{E}{S_{\Pi} \cdot \tau_{\Pi}} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot d_{\Pi}^2 \cdot \tau_{\Pi}}, \quad (2.1)$$

где E – энергия импульса, Дж; S_{Π} – площадь пятна фокусирования, м²; τ_{Π} – длительность импульса, с; d_{Π} – диаметр пятна фокусирования, м.

Плотности мощности определяли на основе математического и численного моделирования процесса воздействия ИЛО на инструментальную основу и композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа», а также на основе эксперимента. Плотности мощности составляли: для инструментальной основы МК8 – диапазон 4900-5100 Вт/см², для основы НТi10 – диапазон 12900-13100 Вт/см². Длительность импульса составляла $\tau_{\Pi} = 4$ мс.

Диаметр пятна фокусирования для всех экспериментов составлял 1 мм.

Для проведения ИЛО использовали $K_{\Pi} = 0,5$, с точки зрения наибольшей эффективности и качества упрочненного слоя [142].

Измерение энергии лазерного излучения производилось при помощи измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения «ИМО-2Н». Погрешность измерений «ИМО-2Н» составляет 6%.

Перед ИЛО на переднюю поверхность пластины равномерно наносилось поглощающее покрытие (например, сажа, чёрная тушь) с целью увеличения коэффициента поглощения лазерной энергии. После окончания ИЛО остатки поглощающего покрытия удаляли с помощью этилового спирта.

2.2. Инструментальные и обрабатываемые материалы, используемые при проведении исследований

В исследованиях применяли четырёхгранные неперетачиваемые твердосплавные пластины из сплавов МК8, МС146 производства ЗАО «Твердосплавная компания» (Россия) и сплава НТi10 фирмы «Mitsubishi Carbide» (Япония).

Для определения остаточных напряжений в покрытиях использовали образцы из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73). Твёрдость образцов составляла 63...65 НRC. Химический состав и физико-механические свойства твёрдых сплавов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Химический состав и физико-механические свойства твёрдых сплавов

Твёрдый сплав	Состав в %, весовой				Предел прочности на изгиб $\sigma_{и}$, МПа	Плотность ρ , кг/м ³	Твёрдость НРА
	WC	TiC	TaC	Co			
МК8	85	8	-	7	1519	13100	90,5
НТi10	94	-	-	6	1519	15000	92,0
МС146	81	4	3	12	1666	13000	87,0

Для проведения стойкостных испытаний использовали заготовки из хромомарганцовоникелевой стали 38ХГН (ГОСТ 4543-2016) и хромоникелевой стали аустенитного класса 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014).

Механические свойства обрабатываемых сталей представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Механические свойства обрабатываемых сталей

Марка стали	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Твёрдость НВ
38ХГН	780	685	229
12Х18Н10Т	510	196	179

2.3. Методика исследования химического состава, параметров структуры и физико-механических свойств износостойких покрытий

Химический состав износостойких покрытий определяли на электронно-зондовом микроанализаторе MAP-4 с учётом ZAF-поправок [143].

Структурные параметры износостойких покрытий определяли на автоматическом дифрактометре ДРОН-3М согласно методике работы [42].

Для исследования структуры покрытий были выбраны параметры: период кристаллической решётки a , нм; показатель текстурированности – отношение интенсивностей рентгеновских линий J_{111} / J_{200} ; полуширина рентгеновской линии β_{111} , град; остаточные напряжения первого рода σ_o , МПа; относительная микродеформация кристаллической решетки $\Delta a / a$; размеры блоков областей когерентного рассеивания (ОКР) D , нм, которые рассчитывали по методике [144].

Определение остаточных напряжений проводили способом $\sin^2\psi$ в фильтрованном $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучении [145].

Измерение микротвёрдости покрытий проводили пирамидой Кнуппа при нагрузке 0,98 Н на микротвердомере *Mitutoyo NH-125*. До проведения измерений выполняли подполировку поверхности пластин с покрытием алмазной пастой. Измерение отпечатков, которые имели хрупкое разрушение и искажения не выполняли.

Определение модуля Юнга покрытий проводили согласно методике, предложенной в работе [146]. Измерение отпечатков индентора Кнуппа проводили при нагрузке 0,98 Н на микротвердомере *Mitutoyo NH-125*.

Значение модуля Юнга рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{H_{\mu} \cdot \alpha}{\frac{b_1}{d_1} - \frac{b}{d}}, \quad (2.2)$$

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

Для оценки трещиностойкости композиции «износостойкое покрытие-инструментальная основа» проводили измерение длины радиальных трещин у отпечатков для определения критического коэффициента интенсивности напряжений. Критический коэффициент интенсивности напряжений определяли согласно методике, предложенной в работах [52, 148] методом внедрения в образец индентора Виккерса при нагрузке 600 Н на твердомере ТК-2М.

Критический коэффициент интенсивности напряжений определяется из выражения:

$$K_{1c} = \frac{0,075 \cdot P}{C^{3/2}}, \quad (2.3)$$

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

Прочность адгезии покрытия с инструментальной основой оценивали методом непрерывного внедрения в образец индентора Роквелла при нагрузке 1000 Н на твердомере ТК-2М. Адгезионную прочность определяли по коэффициенту отслоения [42]:

$$K_o = \frac{S_1}{S_2}, \quad (2.4)$$

где S_1 – площадь отслоения покрытия вокруг отпечатка индентора, мм²;
 S_2 – площадь отпечатка индентора, мм².

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

2.4. Методика исследования работоспособности режущего инструмента

Оценку работоспособности режущего инструмента с покрытиями проводили на токарно-винторезном станке мод. 16K20, который был оснащён бесступен-

чатый приводом главного движения. При продольном точении использовали державку со следующими техническими характеристиками: $\alpha=5^\circ$, $\gamma=-5^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=45^\circ$, $\lambda=5^\circ$, $r=1,0$ мм. Испытания проводились без применения СОТС.

Скорость резания определяли цифровым тахометром CV-120. Элементы режима резания назначали из справочной литературы [149].

Заготовки для исследований готовили, предварительно снимая припуск 5 мм. Размеры заготовок: диаметр 150–200 мм, длина 450–550 мм.

Для определения составляющих сил резания использовали измерительный комплекс согласно работе [92].

Контактные характеристики процесса резания определяли согласно методике, изложенной в [150 – 152]. Определяли полную длину контакта стружки с передней поверхностью C_γ , коэффициент укорочения стружки K_L , угол сдвига β , нормальную N_γ и касательную F_γ силы, коэффициент трения μ , средние нормальные q_N и касательные q_F удельные нагрузки, максимальные нормальные σ_N и касательные τ_F напряжения, действующие поверхности режущего инструмента.

Коэффициент укорочения стружки определяли весовым методом из выражения:

$$K_L = \frac{m}{L_C \cdot S \cdot t \cdot \rho} \cdot 10^3, \quad (2.5)$$

где m – масса стружки, мг; L_C – длина элемента стружки, мм; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Полную длину контакта стружки с передней поверхностью C_γ определяли по методике работы [42] и измеряли на микроскопе БМИ-1Ц.

Исследование теплового и напряженного состояния режущего инструмента проводили с помощью программы ANSYS согласно методике, изложенной в [64].

Интенсивность износа по задней поверхности определяли из выражения:

$$J = \frac{h_3}{T \cdot V} \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

где h_3 – размер износа по задней поверхности, мм; T – период стойкости инструмента, мин; V – скорость резания, м/мин.

В стойкостных испытаниях режущего инструмента из твёрдого сплава размер износа по задней поверхности доводился до значения 0,4 мм. Измерение величины износа проводили на микроскопе БМИ-1Ц.

2.5. Обработка результатов экспериментальных исследований

Статистическая обработка полученных результатов заключалась в установлении необходимого количества опытов по доверительной вероятности, оценке точности измерений, существенности различия сравниваемых величин [153-155].

При исследовании механических свойств покрытий сравнение данных проводили по средним значениям, вычисленным как средняя арифметическая величина по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.7)$$

где n – общее число наблюдений.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2.8)$$

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения рассчитывали по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (2.9)$$

Для обработки результатов исследований на ПК применялись программы Mathcad 15.0 Professional и Microsoft Excel 2010.

При исследовании влияния элементов режима резания на период стойкости режущего инструмента с покрытием использовали метод планирования полного факторного эксперимента (планирование 2^2) [153]. Матрица планирования, включающая 4 опыта, показана в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Планирование полного факторного эксперимента 2^2

№	Матрица планирования			
	X_0	Планирование		
		X_1	X_2	X_1X_2
1	1	-1	-1	1
2	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1
4	1	1	1	1

В результате исследований работоспособности режущего инструмента с покрытиями разрабатывали математические модели периода стойкости режущего инструмента:

$$T = \frac{C_T}{V^x \cdot S^y}, \text{ при } t = \text{const}, \quad (2.11)$$

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

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОМПОЗИЦИЮ «МНОГОСЛОЙНОЕ ПО- КРЫТИЕ-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА»

Взаимодействие лазерного излучения с поглощающими материалами в широком диапазоне плотностей мощности хорошо описывается тепловой моделью, согласно которой весь процесс в целом может быть условно разбит на следующие этапы: поглощение энергии и передача энергии решетки твёрдого тела; нагревание материала без разрушения; разрушение материала (абляция); охлаждение после окончания взаимодействия.

Технологические режимы обработки лазерным излучением можно определить на основании анализа распределения температур в объеме инструментальной композиции при лазерной обработке. Однако локальность и быстротечность распространения тепла при лазерной обработке осложняет математическое описание процесса, особенно применительно к сложным многослойным покрытиям. В аналогичных работах, в частности [134-138], математические модели получаются достаточно громоздкими, что затрудняет получение решения в формализованном виде. В настоящей главе разработана математическая модель воздействия лазерного излучения на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа», получены функциональные зависимости, которые позволяют выполнить простую численную обработку входных данных. Структуру зоны термического влияния, а также рекомендуемые режимы импульсной лазерной обработки можно определить в результате анализа математической модели воздействия лазерной обработки на поверхность композиции, в том числе результатов численного моделирования в ANSYS, представляя лазерную обработку как тепловое воздействие.

3.1. Математическая модель воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа»

Представим лазерную обработку как тепловое воздействие на многослойную композицию. Рассмотрим процесс распространения тепла в результате обработки n -слойной инструментальной композиции поверхностным источником тепла [156].

Определим температуру пластины, если в начальный момент времени $t=0$ мгновенно выделилось Q единиц тепла (рис. 3.1).

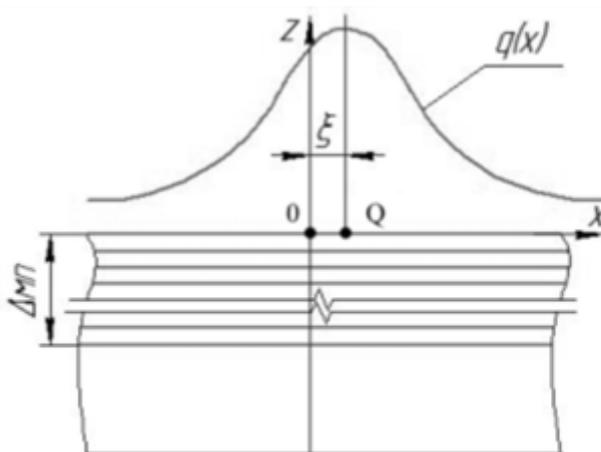


Рис. 3.1. Схема воздействия теплового источника [156]

Предположим, что количество тепла Q , мгновенно выделившееся в точке с координатой ξ в момент времени $t=0$, мгновенно и равномерно распределяется по небольшому интервалу $(\xi - \delta, \xi + \delta)$.

Тогда начальная температура на поверхности пластины равна [156]:

$$T(x, 0) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < \xi - \delta; \\ \frac{Q}{2\delta c\rho}; & \xi - \delta < x < \xi + \delta; \\ 0; & \xi + \delta < x < \infty, \end{cases} \quad (3.1)$$

где c – теплоемкость тела, ρ - плотность тела, δ - элементарная малая величина приращения координаты x .

Решаем уравнение теплопроводности для тела, на поверхности которого выделилось количество тепла Q :

$$T_t = \alpha T_{xx} \quad -\infty < x < \infty; 0 < t < \infty; \quad (3.2)$$

$$T(x, 0) = f(x) \quad -\infty < x < \infty, \quad (3.3)$$

где α - коэффициент теплопроводности тела.

Умножим обе части уравнения (3.2) на выражение $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ik\xi}$ (где ξ - переменная, соответствующая координате точки, в которой выделилось количество тепла Q , k - число) и проинтегрируем его по ξ от $-\infty$ до $+\infty$, при условии, что функция T и ее производные быстро стремятся к нулю при $\xi \rightarrow \pm\infty$ (условие сходимости). Используя интегрирование по частям, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial T}{\partial t} e^{-ik\xi} d\xi &= \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T e^{-ik\xi} d\xi = \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} e^{-ik\xi} d\xi = \\ \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\partial T}{\partial \xi} e^{-ik\xi} \Big|_{\xi=-\infty}^{\xi=+\infty} + \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi}} ik T e^{-ik\xi} \Big|_{\xi=-\infty}^{\xi=+\infty} - \alpha k^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T e^{-ik\xi} d\xi &= \\ &= -\alpha k^2 \bar{T}(k, t), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где α - коэффициент температуропроводности.

Упрощая равенство (3.4), получим:

$$\frac{d\bar{T}}{dt} + \alpha k^2 \bar{T} = 0. \quad (3.5)$$

Из приведенного ниже равенства:

$$\bar{T}(k, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\xi, t) e^{-ik\xi} d\xi, \quad (3.6)$$

при $t=0$ получим:

$$\bar{T}(k, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\xi, 0) e^{-ik\xi} d\xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) e^{-ik\xi} d\xi = \bar{f}(k). \quad (3.7)$$

Решение уравнения (3.5) при начальном условии (3.7) имеет вид:

$$\bar{T}(k, t) = \bar{f}(k) e^{-\alpha k^2 t}. \quad (3.8)$$

Применяя обратное преобразование Фурье, получаем выражение для функции температуры:

$$\begin{aligned}\bar{T}(x, t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{T}(k, t) e^{-ikx} dk = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha k^2 t} e^{ik(x-\xi)} dk = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha k^2 t} \cos(k(x-\xi)) dk = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha k^2 t} \cos(k(x-\xi)) dk = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha t}} d\xi. \quad (3.9)\end{aligned}$$

Выражение (3.9) учитывает, что:

$$\int_0^{+\infty} e^{-\alpha k^2} \cos \beta k dk = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{\beta^2}{4\alpha}}, \quad (3.10)$$

где β - число.

В полученном решении (3.9) считая $\delta \rightarrow 0$ и приняв в первом приближении начальное распределение температур в окрестности точки с координатой ξ равномерным, получаем следующее значение функции мгновенного источника:

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha t}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha t}}, \quad (3.11)$$

где $G(x, \xi, t)$ – функция мгновенного источника, α - коэффициент теплопроводности, который определяется выражением:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

В случае конвективного теплообмена с окружающей средой (температура окружающей среды равна нулю) функция G принимает вид:

$$G(x, \xi, t) = \frac{e^{-ht}}{2\sqrt{\pi\alpha t}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha t}}, \quad (3.12)$$

где h - коэффициент теплообмена.

Учитывая это, выражение (3.9) для распределения температур с учетом вновь введенной функции мгновенного точечного источника $G(x, \xi, t)$ примет вид:

$$T(x, t) = \int_0^l G(x, \xi, t) f(\xi) d\xi. \quad (3.13)$$

Совершая предельный переход, бесконечно приближаясь к точке ξ , получаем:

$$T(x, t) = G(x, \xi, t) \frac{Q}{c\rho}. \quad (3.14)$$

Решая уравнения (3.11) и (3.14), можно получить решение задачи теплопроводности в виде распределения температур в результате энергетического воздействия мгновенного источника $G(x, \xi, t)$.

Учитывая малую толщину слоев многослойного покрытия по сравнению с их протяженностью и размером мгновенного источника, а также крайне малое термическое сопротивление между слоями (за счёт их адгезионной связи), при определении значений приведенных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости инструментальной основы и многослойного покрытия будем считать, что плоскости слоев покрытия являются изотермическими поверхностями (рис. 3.2).

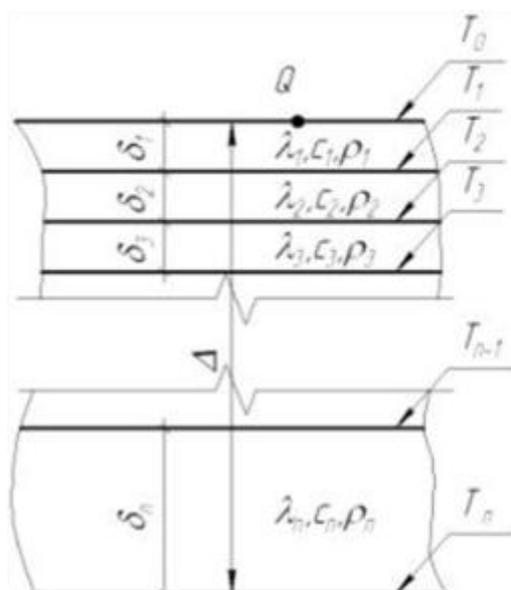


Рис. 3.2. Схема для определения приведенного коэффициента теплопроводности и теплоемкости [156]

В этом случае одинаковое количество тепла Q , отнесенное к единице площади пластины и к единице времени, будет проходить через каждый слой многослойного покрытия. Эта величина определяется уравнением:

$$Q = -\lambda_1 \frac{T_0 - T_1}{\delta_1} = -\lambda_2 \frac{T_1 - T_2}{\delta_2} = \dots = -\lambda_n \frac{T_{n-1} - T_n}{\delta_n}, \quad (3.15)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности слоя с номером i , δ_i – толщина слоя с номером i .

Из уравнения (3.15) следует:

$$\begin{aligned} T_0 - T_1 &= -Q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \\ T_1 - T_2 &= -Q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \\ &\dots \\ T_{n-1} - T_n &= -Q \frac{\delta_n}{\lambda_n}. \end{aligned}$$

После суммирования получаем:

$$T_0 - T_n = -Q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right). \quad (3.16)$$

При одинаковой разности температур рассматриваемое многослойное покрытие эквивалентно сплошному модельному телу, через которое проходит то же количество теплоты Q , равное:

$$Q = -\lambda_s \frac{T_0 - T_n}{\Delta}. \quad (3.17)$$

Сравнивая уравнения (3.16) и (3.17), получаем выражение для определения приведенного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_s = \frac{\Delta}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n}. \quad (3.18)$$

Для определения приведенного коэффициента теплоемкости необходимо учитывать, что теплоемкость характеризует способность материала накапливать тепловую энергию.

Когда в объёме многослойного покрытия выделяется определённое количество тепла Q , температура покрытия увеличивается на ΔT . Тогда удельная теплоемкость c_1 (количество тепла, которое необходимо передать 1 кг этого материала для повышения его температуру на 1°C) первого слоя покрытия будет составлять:

$$c_1 = \frac{Q_1}{m_1 \Delta T} = \frac{Q_1}{S \delta_1 \rho_1 \Delta T}, \quad (3.19)$$

где δ_1 и ρ_1 – толщина и плотность первого слоя покрытия соответственно, S – площадь поверхности тела, Q_1 – количество теплоты, выделившееся в первом слое.

Тогда коэффициент теплоемкости для i -го слоя определим из выражения:

$$c_i = \frac{Q_i}{S \delta_i \rho_i \Delta T}. \quad (3.20)$$

Для некоторого модельного тела, температура которого при выделении количества тепла Q в его объёме также увеличивается на ΔT , можно записать:

$$c_{\text{пр}} = \frac{Q}{S \cdot \Delta \cdot \rho_{\text{пр}} \Delta T}. \quad (3.21)$$

С учетом закона сохранения энергии:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (3.22)$$

или

$$c_{\text{пр}} S \cdot \Delta \cdot \rho_{\text{пр}} \Delta T = \sum_{i=1}^n c_i S \delta_i \rho_i \Delta T. \quad (3.23)$$

После сокращения получаем

$$c_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \delta_i \rho_i}{\Delta \cdot \rho_{\text{пр}}}, \quad (3.24)$$

где $\rho_{\text{пр}}$ – плотность модельного (заменяющего) тела.

Выполним анализ влияния теплофизических характеристик слоёв инструментальной композиции, толщины слоёв и плотности мощности лазерного излучения на распределение температур по сечению инструментального материала.

Необходимые для расчета теплофизические свойства для твёрдых сплавов и износостойких покрытий были взяты [52, 157]. Из-за отсутствия информации для покрытий сложного состава, данные о теплофизических свойствах были получены на основании твёрдорастворного упрочнения путем изменения состава материала покрытия при его легировании [11, 42, 158 - 160]. Теплофизические свойства твёрдых сплавов и износостойких покрытий показаны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Теплофизические свойства твёрдых сплавов
и износостойких покрытий

Свойства	НТi10	МК8	TiN	NbN	TiZrN	TiZrCrN
Теплопроводность при 20°C, Вт/м·°C	62,8	20,9	19,25	3,77	19,44	18,59
Коэффициент термического линейного расширения $\times 10^6$, град ⁻¹	4,9	5,5	7,1	10,1	7,33	7,35

На рис. 3.3-3.6 представлены результаты моделирования воздействия импульсного лазерного излучения на инструментальную композицию с покрытиями, нанесенными на основу из сплавов МК8 и НТi10.

Температура на поверхности пластины режущего инструмента зависит от многих теплофизических свойств основы и покрытия, основными из которых являются теплоемкость, теплопроводность, коэффициент термического линейного расширения и температуропроводность. Проведем анализ влияния перечисленных факторов на примере инструментальных композиций, которые на основе априорной информации показали высокую работоспособность.

Влияние покрытий, нанесённых на твёрдый сплав МК8, на температуру в результате воздействия ИЛО представлено на рис. 3.3. Как видно, нанесение покрытия незначительно увеличивает температуру по сравнению с твёрдым сплавом МК8 без покрытия.



Рис. 3.3. Температура на поверхности пластины МК8 при плотности мощности 6000 Вт/см^2 :
1-б/п, 2-TiN, 3-TiZrN, 4-TiZrCrN, 5-NbN

Так, ИЛО твёрдого сплава МК8 без покрытия плотностью мощности 6000 Вт/см^2 ведёт к нагреву поверхностного слоя пластины до 1305 °C . Осаждение покрытий *TiN*, *TiZrN*, *TiZrCrN* приводит к повышению температуры на поверхности инструментальной композиции вследствие ухудшения теплоотвода в основу твёрдого сплава из-за более высокого коэффициента теплопроводности покрытий. Однако это повышение незначительно, что связано с малой толщиной покрытий. Покрытие *NbN*, нанесённое на твёрдый сплав МК8 при обработке лазерным излучением существенно ухудшает отвод теплоты из зоны воздействия лазерного луча, что приводит к повышению температуры до 1360 °C .

В случае использования твёрдого сплава НТi10 наблюдается аналогичное изменение температуры. Наличие покрытия на поверхности твёрдого сплава НТi10 также повышает температуру на поверхности, однако это увеличение более существенное по сравнению с изменением картины теплового баланса в случае с твёрдым сплавом МК8. Так, обработка твёрдого сплава НТi10 лазерным излучением плотностью мощности 12000 Вт/см^2 приводит к возникновению температуры на поверхности, равной 895 °C , а при обработке лазерным излучением той же

плотности мощности композиций с покрытиями TiN , $TiZrN$ и $TiZrCrN$ температура на поверхности увеличивается почти на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, что составляет $2,2\%$. Наличие покрытия NbN , как и в случае обработки лазерным излучением сплава МК8, приводит к еще большему повышению (на 14%) температуры на поверхности композиции, что объясняется более низким, по сравнению с другими покрытиями, коэффициентом теплопроводности.

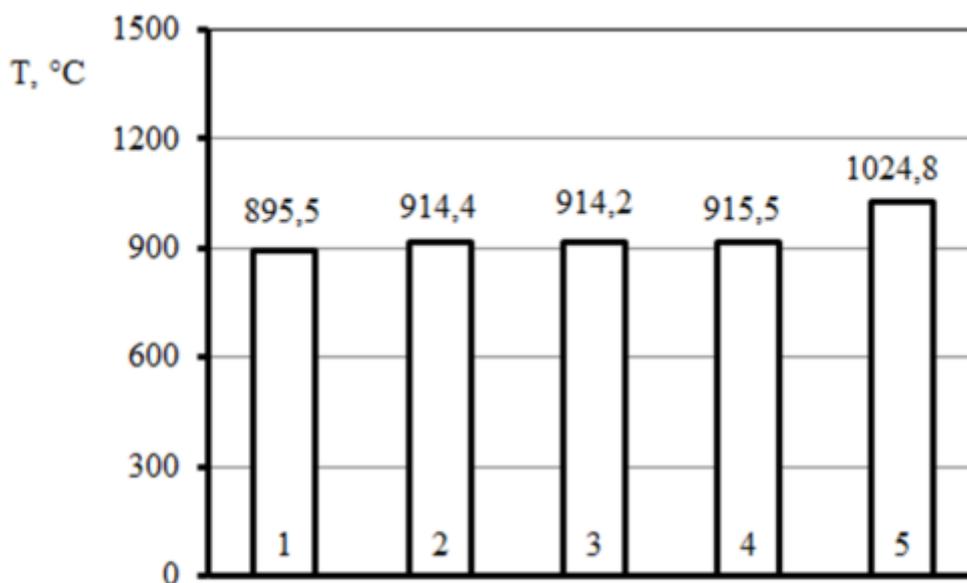


Рис. 3.4. Температура на поверхности пластины HTi10 при плотности мощности 12000 Вт/см^2 :
1-б/п, 2- TiN , 3- $TiZrN$, 4- $TiZrCrN$, 5- NbN

Рассмотрим поведение тепловых полей при изменении структуры и состава покрытий.

На рис. 3.5 приведены данные по температурам на поверхности пластины МК8 с многослойными покрытиями $TiN-TiZrN$, $TiN-TiZrN-TiN$, $TiN-TiC-TiN$ и $TiN-TiZrN-TiZrCrN$ при ИЛО с плотностью мощности 6000 Вт/см^2 . Теплоёмкость и температуропроводность покрытий TiN , $TiZrN$ и $TiZrCrN$ примерно одинаковы $5,9 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ и $5,98 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$, что приводит к примерно одинаковому отводу теплоты в тело обрабатываемой пластины. Соответственно, температуры на поверхности пластины с упомянутыми покрытиями существенно не отличаются друг от друга.



Рис. 3.5. Температура на поверхности пластины МК8 при плотности мощности 6000 Вт/см^2 :

1- TiN-TiZrN , 2- TiN-TiZrN-TiN , 3- TiN-TiC-TiN , 4- TiN-TiZrN-TiZrCrN

Благодаря наличию в покрытии TiN-TiC-TiN слоя TiC , обладающего более высоким коэффициентом температуропроводности в сравнении с другими покрытиями, температура на поверхности композиции повышается, так как интенсивность отвода тепла из зоны обработки снижается.

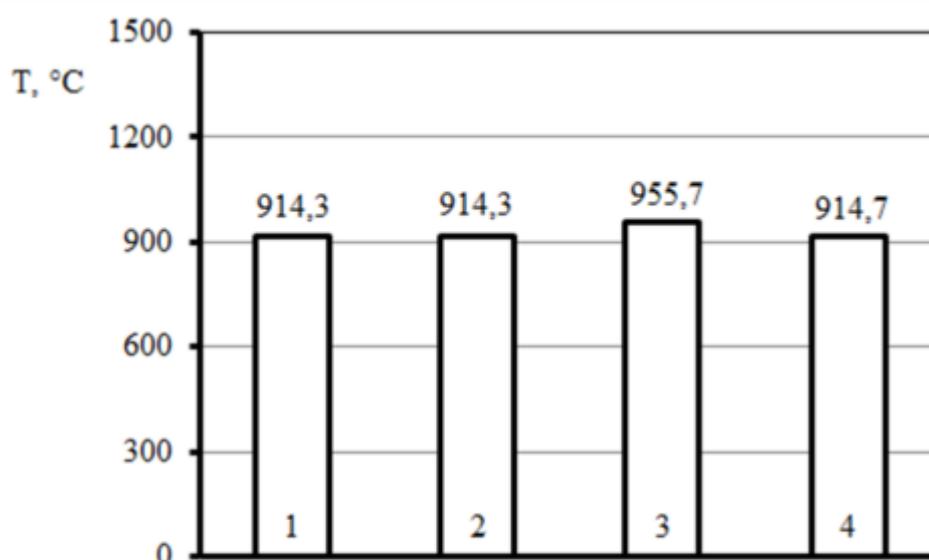


Рис. 3.6. Температура на поверхности пластины НТi10 при плотности мощности 12000 Вт/см^2 :

1- TiN-TiZrN , 2- TiN-TiZrN-TiN , 3- TiN-TiC-TiN , 4- TiN-TiZrN-TiZrCrN

Подобное изменение температур наблюдается и при использовании покрытий аналогичного состава и конструкций, нанесенных на основу НТi10. Температуры на поверхности композиции с покрытиями $TiN-TiZrN-TiN$, $TiN-TiZrN$, $TiN-TiZrN-TiZrCrN$ практически равны из-за фактически одинаковых коэффициентов температуропроводности и теплопроводности покрытий. Температуры на поверхности основы НТi10 с покрытием $TiN-TiC-TiN$ на 5% выше, чем на поверхности композиций с выше упомянутыми покрытиями.

Данная математическая модель, способна установить энергетические параметры ИЛО, которые обеспечат необходимые требования к зоне упрочнения. В случае ИЛО твердосплавного инструмента необходимо установить ограничение по температуре, при котором происходит разрушение связующей фазы материала.

Изменение температуры в основе МК8 и на его границе с однослойными покрытиями показано на рис. 3.7. Как видно, для основы МК8 с покрытием TiN плотность мощности лазерного излучения должна быть не более и $5,5 \text{ кВт/см}^2$, с покрытием $TiZrN$ – $5,2 \text{ кВт/см}^2$, с покрытием $TiZrCrN$ – $5,6 \text{ кВт/см}^2$.

На рис. 3.8 представлены графики изменения температуры в основе МК8 и на её границе с МП. Установлено, что влияние плотности мощности лазерного излучения для инструмента из сплава МК8 с покрытием $TiZrN-TiN$ должна составлять $5,21 \text{ кВт/см}^2$, с покрытием $TiCN-TiN$ – $5,42 \text{ кВт/см}^2$, с покрытием $TiN-TiZrN$ – $5,35 \text{ кВт/см}^2$.

Установлено, что плотность мощности лазерного излучения для обработки для РИ с МП в зависимости от структуры, состава и толщины покрытия, материал основы изменяется в пределах 25% около значения, находящегося на уровне плотности мощности для покрытия TiN такой же толщины.

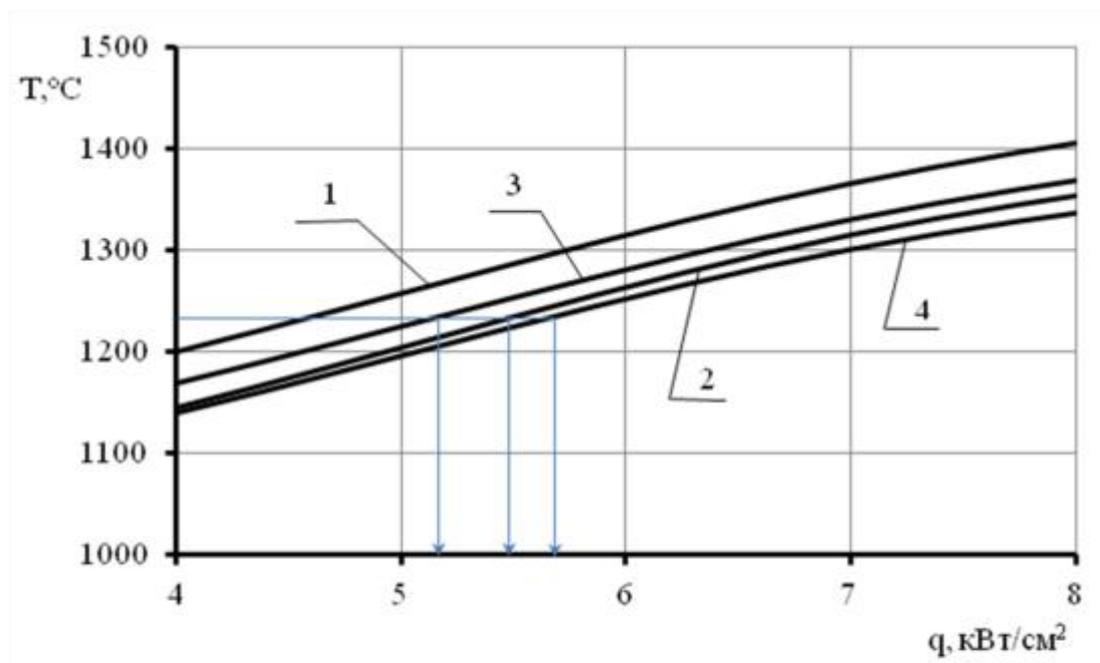


Рис. 3.7. Влияние плотности мощности лазерного излучения на температуру в твердосплавной основе МК8 и на её границе с однослойным покрытием:

1 – основа (на глубине 6 мкм); 2 – TiN ; 3 – $TiZrN$; 4 – $TiZrCrN$;

толщина покрытий 6 мкм, $\tau_{И}=4$ мс

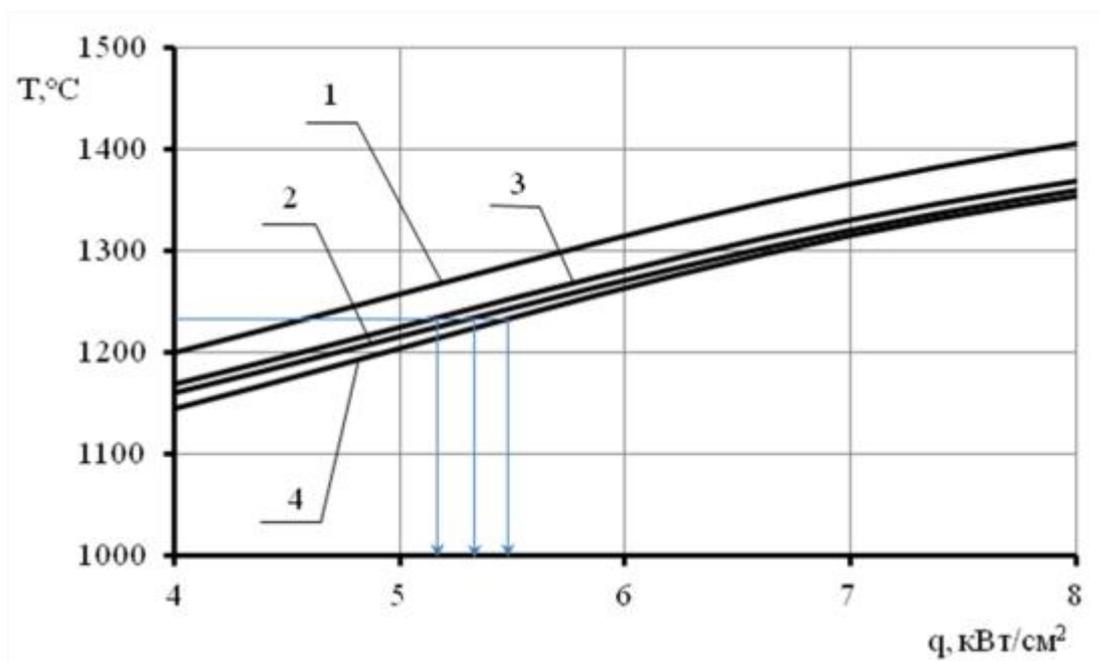


Рис. 3.8. Влияние плотности мощности лазерного излучения на температуру в твердосплавной основе МК8 и на её границе с многослойным покрытием:

1 – основа (на глубине 6 мкм); 2 – $TiN-TiZrN$;

3 – $TiZrN-TiN$; 4 – $TiCN-TiN$; толщина покрытий 6 мкм, $\tau_{И}=4$ мс.

Разработанная математическая модель позволяет теоретически оценить параметры импульсной лазерной обработки, обеспечивающие необходимые свойства режущих инструментов из твёрдого сплава с износостойкими покрытиями. Установлено, что изменение теплофизических свойств слоёв значительно сказывается на распределении температур в композиции. Однако с ростом количества слоёв и их толщин, влияние теплофизических свойств каждого слоя на распределение температур в композиции становится незначительным. Направленно подбирая теплофизические характеристики материала слоёв покрытия, можно управлять формированием изотерм в объеме всей композиции.

В тоже время, полученные данные показывают, что критические плотности мощности для покрытий различного состава и конструкций на основе нитрида титана отличаются незначительно из-за малого отличия их коэффициентов теплопроводности. Кроме того, при определении критической плотности мощности важным представляется вопрос о возникающих при ИЛО напряжениях на границе покрытия с инструментальной основой. Величина данных напряжений может оказать существенное влияние на величину критической плотности мощности, определенную с учетом только анализа теплового состояния композиции «покрытие-инструментальная основа». Аналитическое решение определения напряжений представляет собой достаточно сложную задачу. С другой стороны решение данной проблемы возможно путем численного моделирования процесса воздействия ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа».

3.2. Численное моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа»

Исследование температурных полей при воздействии ИЛО проводилось в программе Ansys Mechanical APDL [175]. Тип решателя – Transient Thermal. Моделировался нагрев режущего инструмента лазерным излучением круговой формы диаметром 1 мм в виде импульса длительностью 4 мс с шагом счета 0,01

мс. Поскольку луч лазера имеет в сечении форму круга, то целесообразно рассматривать осесимметричную задачу с целью значительного сокращения вычислительных затрат. В ходе моделирования решались уравнения теплопроводности и напряженного состояния с учетом изменения геометрических размеров вследствие теплового расширения.

Геометрические размеры расчётной области задавались исходя из условий моделируемого физического процесса:

- толщина инструментальной основы – $2000 \times h_1$;
- толщины слоев покрытия соответственно h_1, h_2, h_3 ;
- ширина моделируемой области – $10 \times r$.

Толщина слоёв покрытия составляла 2 мкм. Толщина покрытия – 6 мкм. Диаметр пятна лазерного излучения – 1 мм.

Разработанная программа для Mechanical APDL позволяет менять только свойства материалов приведённых покрытий без каких-либо дополнительных изменений.

Данная постановка задачи позволяет проводить моделирование с имитацией бесконечных размеров инструментальной основы (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Схема воздействия лазерного излучения на пластину

Задача решалась в один шаг – приложенная нагрузка постоянная на протяжении всей длительности воздействия лазерного излучения. Само воздействие реализовано посредством приложения плотности теплового потока HeatFlux к нагреваемой зоне. В задаче не учитывается конвективный теплообмен с окружающей средой и теплообмен излучением.

По нижней поверхности заготовка зафиксирована (для стабилизации решения задачи изменения геометрических размеров), а также на боковой и нижней поверхности задана нормальная температура (для стабилизации задачи теплопроводности), равная 20 °С. Начальная температура также принята 20 °С.

Между покрытиями принимается идеальная адгезия, т.е. идеальное соединение, и отсутствует какое-либо температурное сопротивление между покрытиями.

Для проведения расчетов была построена параметрическая модель режущего инструмента. Модель была разбита на регулярную сетку со сгущением к зоне воздействия лазерного излучения. Данный способ разбиения необходим для достижения высокой точности моделирования быстропротекающего процесса.

Взят тип элемента PLANE223, который позволяет решать сопряженную задачу теплопроводности и напряженного состояния. Не вдаваясь в подробности решения дифференциальных уравнений, отмечу, что в данном конечном элементе реализованы общеизвестные зависимости в дифференциальном виде. Поскольку геометрическая модель достаточно простая, то разбиение расчетной области выполнено прямоугольными элементами.

При численном моделировании использовали однослойные TiN , NbN , $TiZrN$, $TiZrCrN$ и многослойные покрытия $TiN-TiZrN$, $TiN-TiZrN-TiZrCrN$, $TiN-TiZrN-TiN$. Теплофизические свойства основ из твердых сплавов и износостойких покрытий представлены в §3.1.

При выборе энергии лазерного излучения (критической плотности мощности $q_{кр}$) для обработки композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» необходимо установить критерии, превышение которых приведёт к образованию в ней трещин и последующему разрушению покрытия. Такими критериями могут служить температура, при которой происходит разрушение материала.

ла связующей фазы и напряжения, вызывающие образование трещин на поверхности твердосплавной основы или на её границе с износостойким покрытием (данные критерии обозначим соответственно K_T и K_H). Для твёрдых сплавов на кобальтовой связке температура разрушения материала связующей фазы составляет 1200°C [163]. Образование трещин возможно в случае, если напряжения, вызванные ИЛО, превысят допусаемые растягивающие напряжения твердосплавной основы. Согласно работе [52], минимальные значения растягивающих напряжений одно- и двухкарбидных твёрдых сплавов составляют соответственно 1800 МПа и 1600 МПа.

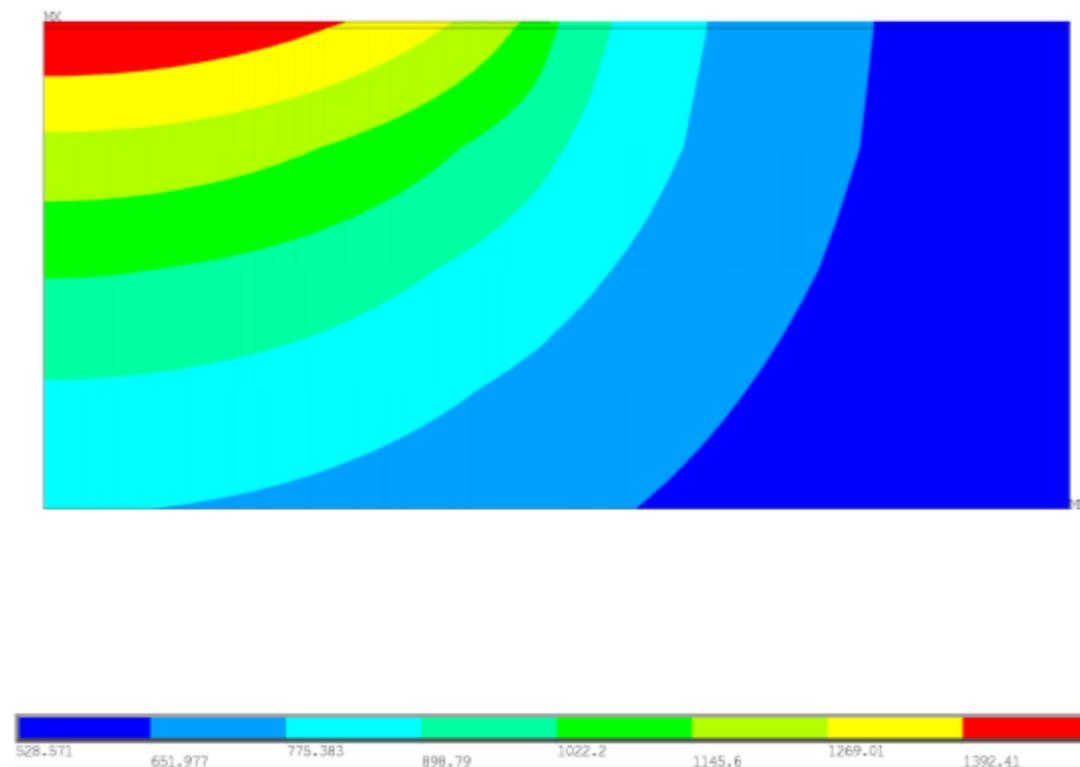
В соответствие с вышесказанным, моделировали влияние плотности мощности ИЛО на температуру и напряжения, возникающие на поверхности твердосплавной основы без покрытия, а в случае композиции «покрытие-инструментальная основа» на границе износостойкого покрытия с твердосплавной основой.

Результаты моделирования температур и напряжений для различных композиций представлены на рис. 3.10, 3.11 и в табл. 3.2. Примеры температурных полей для основы и композиции «покрытие TiN -инструментальная основа HTi10» показаны на рис. 3.10.

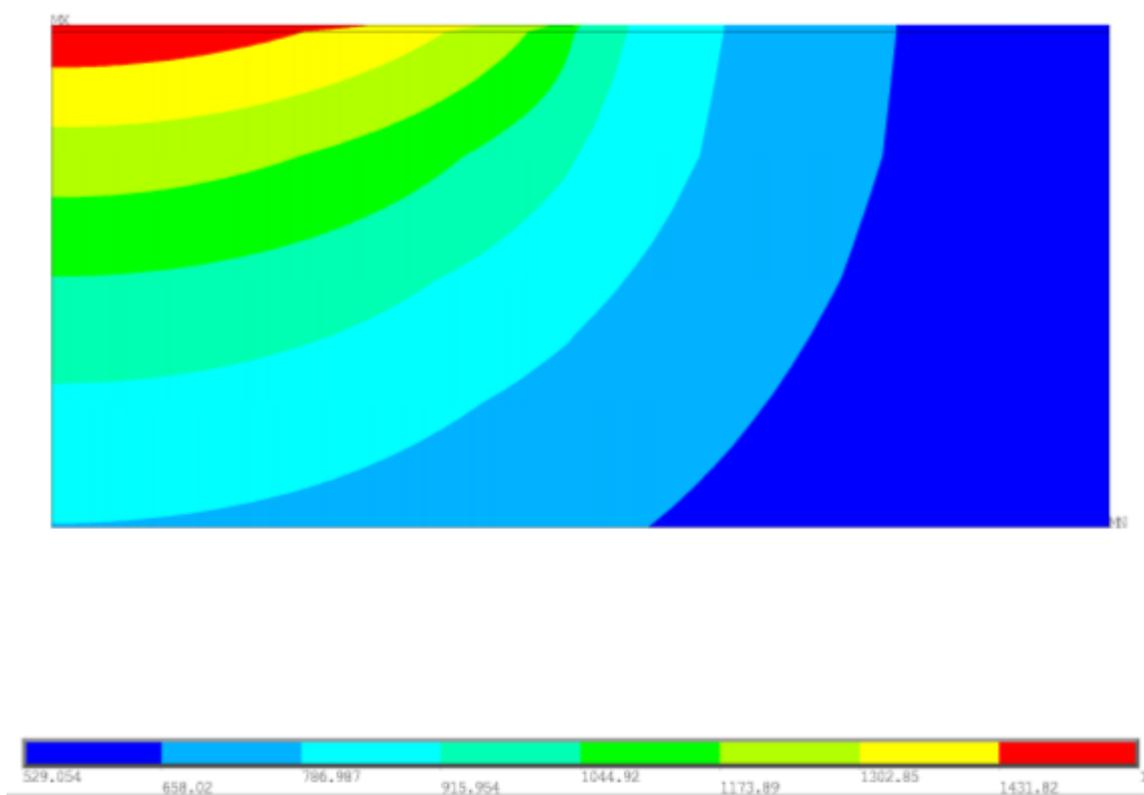
Исследованиями установлено, что температура на поверхности пластин без покрытия и на границе покрытия с твердосплавной основой зависит от теплопроводности твердосплавной основы и износостойких покрытий, а в случае с многослойными покрытиями – от теплопроводности верхнего слоя.

Кроме того, прослеживается влияние износостойкого покрытия, теплофизические характеристики которого отличны от характеристик основы: уровень температур на поверхности инструментальной композиции « TiN - HTi10» при лазерной обработке приблизительно на 50 °C выше, чем при лазерной обработке основы без покрытия (рис. 3.10), что согласуется с данными аналитического расчета.

Примеры полей напряжений для основы и композиции «покрытие TiN -инструментальная основа HTi10» показаны на рис. 3.11.

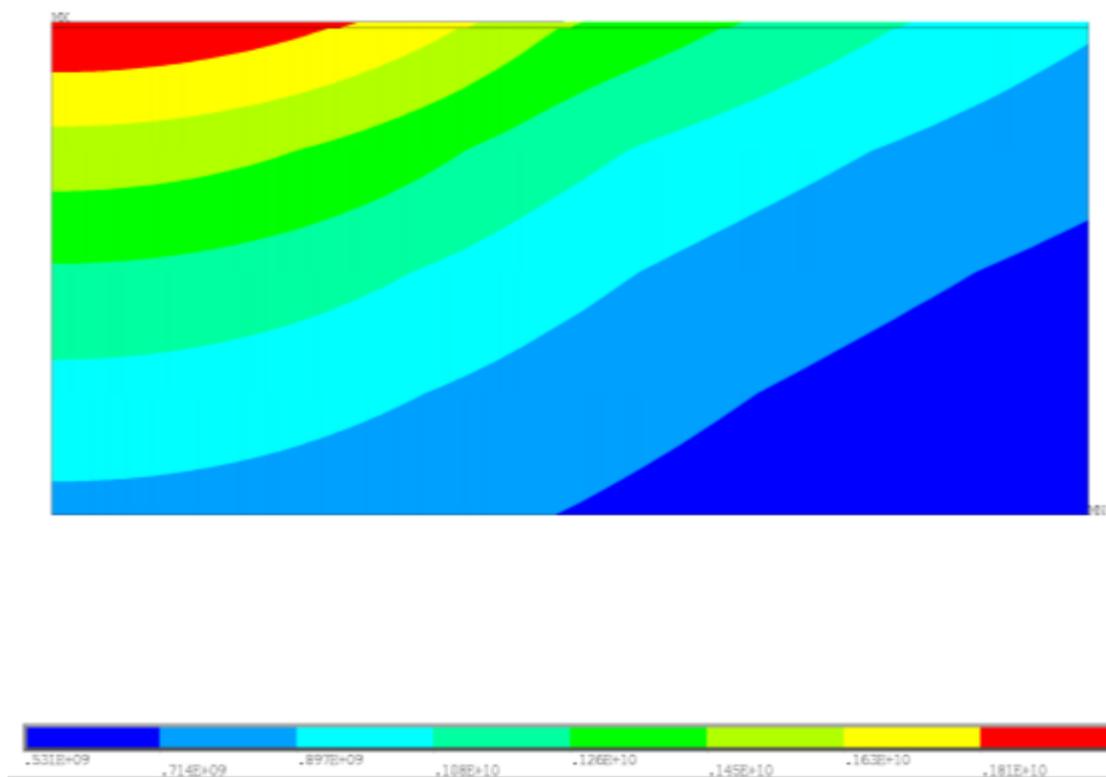


а

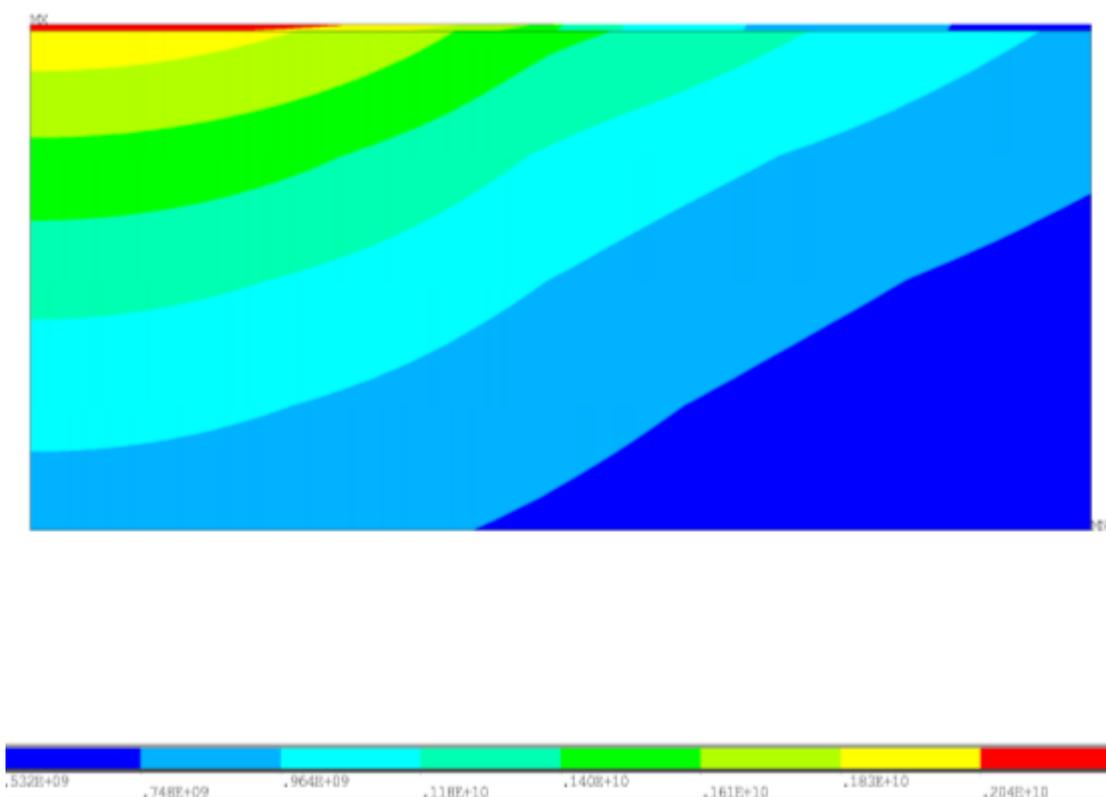


б

Рис. 3.10. Распределение температур в твёрдом сплаве NTi10 без покрытия, и инструментальной композиции «TiN-NTi10» при обработке лазерным лучом плотностью мощности 16000 Вт/см^2 (толщина покрытия $h=6 \text{ мкм}$)



а



б

Рис. 3.11. Распределение напряжений в твёрдом сплаве NTi10 без покрытия, и инструментальной композиции «TiN-NTi10» при обработке лазерным лучом плотностью мощности 16000 Вт/см^2 (толщина покрытия $h=6 \text{ мкм}$)

Из представленных рисунков видно, что максимальные напряжения концентрируются в области пятна воздействия лазерного луча на переднюю поверхность и составляют 1,99 ГПа для основы без покрытия и 2,26 ГПа для инструментальной композиции «TiN - NTi10». Увеличение напряжений объясняется увеличением градиента температур в объеме композиции и составляет 10-14%.

Результаты моделирования температур и напряжений для различных композиций представлены в табл. 3.2.

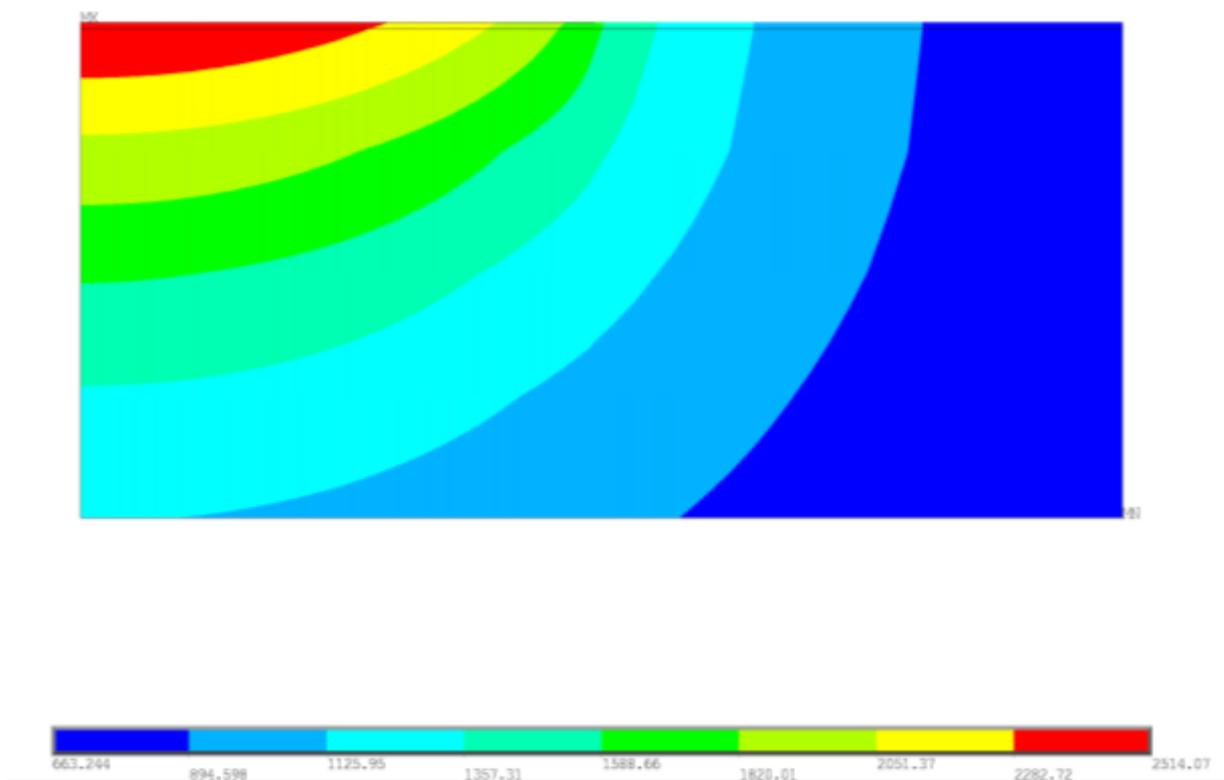
Таблица 3.2

Влияние состава и конструкции износостойких покрытий на температуру ($T_{п}$) и напряжения (σ) на границе покрытия с твердосплавной основой при ИЛО

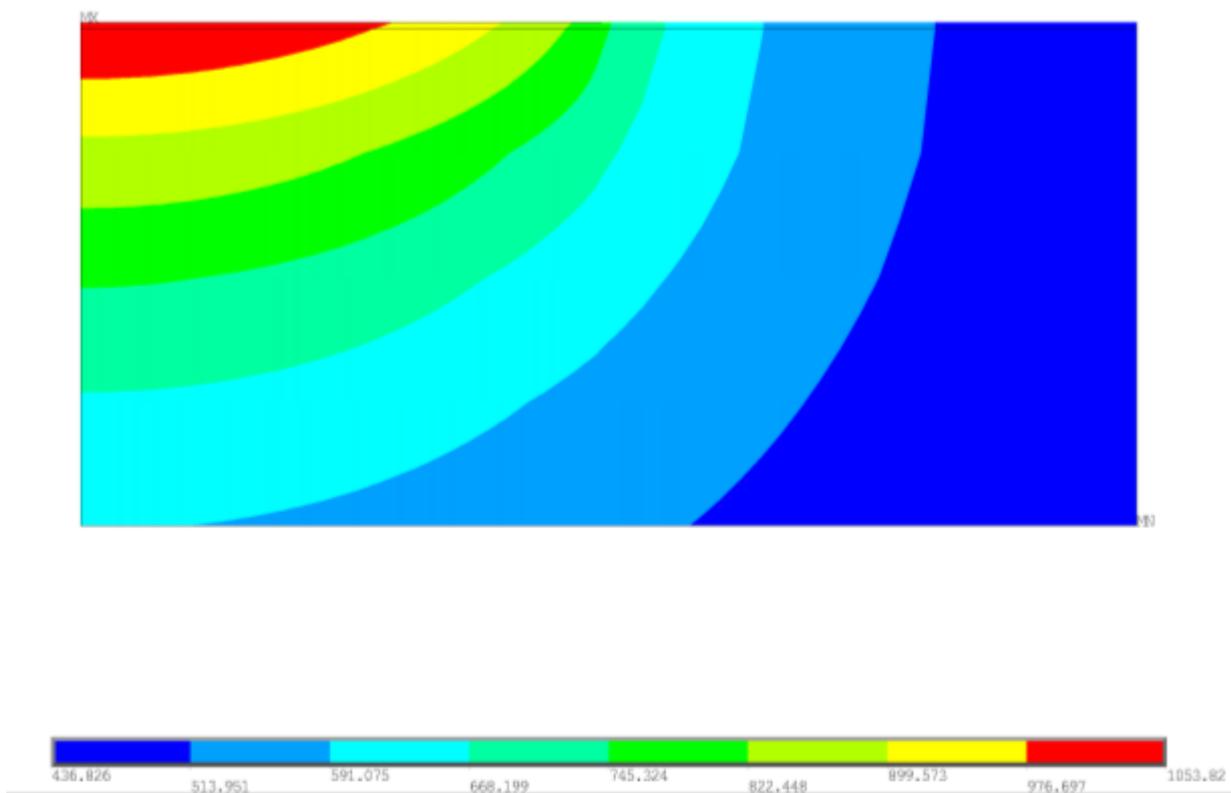
Инструментальная основа	Плотность мощности q , Вт/см ²	Температура ($T_{п}$, °C) в числителе и напряжения (σ , МПа) в знаменателе					
		TiN	TiZrN	TiZrCrN	NbN	TiN-TiZrN	TiN-TiZrN-TiZrCrN
МК8	6000	$\frac{1324}{2186}$	$\frac{1324}{2504}$	$\frac{1332}{2559}$	-	$\frac{1324}{2504}$	$\frac{1332}{2559}$
NTi10	12000	$\frac{922}{1553}$	$\frac{922}{1835}$	$\frac{919}{1879}$	$\frac{1115}{1737}$	$\frac{922}{1835}$	$\frac{919}{1879}$

Наибольшее влияние на температуру при ИЛО оказывает теплопроводность твердосплавной основы. Значительное различие теплопроводности твёрдых сплавов МК8 и NTi10 ведёт к значимой разности значений температуры в результате ИЛО. На рис. 3.12 показаны температурные поля в твердосплавных основах МК8 и NTi10 при плотности мощности равной 10000 Вт/см². Более высокая теплопроводность сплава NTi10 по сравнению со сплавом МК8 способствует большему теплоотводу тепла и изотермы температуры существенно смещены вглубь основы NTi10, чем для МК8. Аналогичные зависимости наблюдаются и при других режимах обработки: при одной и той же плотности мощности ИЛО температура на поверхности пластин МК8 значительно выше по сравнению с пластинами NTi10.

Для композиций «покрытие-инструментальная основа» температура на поверхности покрытий и на границе покрытия с твердосплавной основой выше по сравнению аналогичным показателем для твёрдого сплава без покрытия. Это



а



б

Рис. 3.12. Распределение температур в твёрдом сплаве МК8 (а) и НТi10 (б) без покрытия при обработке лазерным лучом плотностью мощности 10000Вт/см^2

связно с более низкими значениями теплопроводности покрытий по сравнению с твердыми сплавами. Теплопроводность различных покрытий на основе нитрида титана отличается незначительно (табл 3.1), по этой причине температура для композиций «покрытие-инструментальная основа» с различными покрытиями практически находится на одном и том же уровне (табл 3.2).

В то же время, повышение разницы в значениях теплопроводности покрытия и твердосплавной основой, различие температур становится значительным. Так, например, при воздействии ИЛО на композицию «покрытие-инструментальная основа» с покрытием NbN , теплопроводность которого ниже нитрида TiN в 5,1 раза, температура выше на 16 %.

Сравнение температур на поверхности композиций с однослойными и многослойными покрытиями показывает, что независимо от твердосплавной основы температура для них практически не отличаются, а в случае совпадения составов однослойного покрытия и верхнего слоя многослойного покрытия они одинаковы. Полученные данные хорошо согласуются с результатами расчета температуры по математической модели и подтверждают предположение, что температура на поверхности определяется теплопроводностью покрытий.

На основании полученных результатов по исследованию температуры при моделировании воздействия ИЛО на композицию «покрытие-инструментальная основа» была определена критическая плотность мощности $q_{кр}$ по критерию K_T (рис. 3.13 и табл. 3.3) – для твердого сплава МК8 она составила $5,37 \text{ кВт/см}^2$, для сплава НТi10 – $15,6 \text{ кВт/см}^2$. Нанесение покрытий на пластины МК8 и НТi10 практически не изменяет критическую плотность мощности для композиции «покрытие-инструментальная основа». Например, разница в значениях величины $q_{кр}$ для основы МК8 с покрытием и без покрытия не превышает 3,7 %, а для различных покрытий она составила 2,7 % . Для основы НТi10 разница в значениях критической плотности мощности при использовании различных покрытий еще меньше. Полученные результаты объясняются различием значений теплопроводности покрытий на основе нитрида титана и теплопроводности твердосплавной основы.

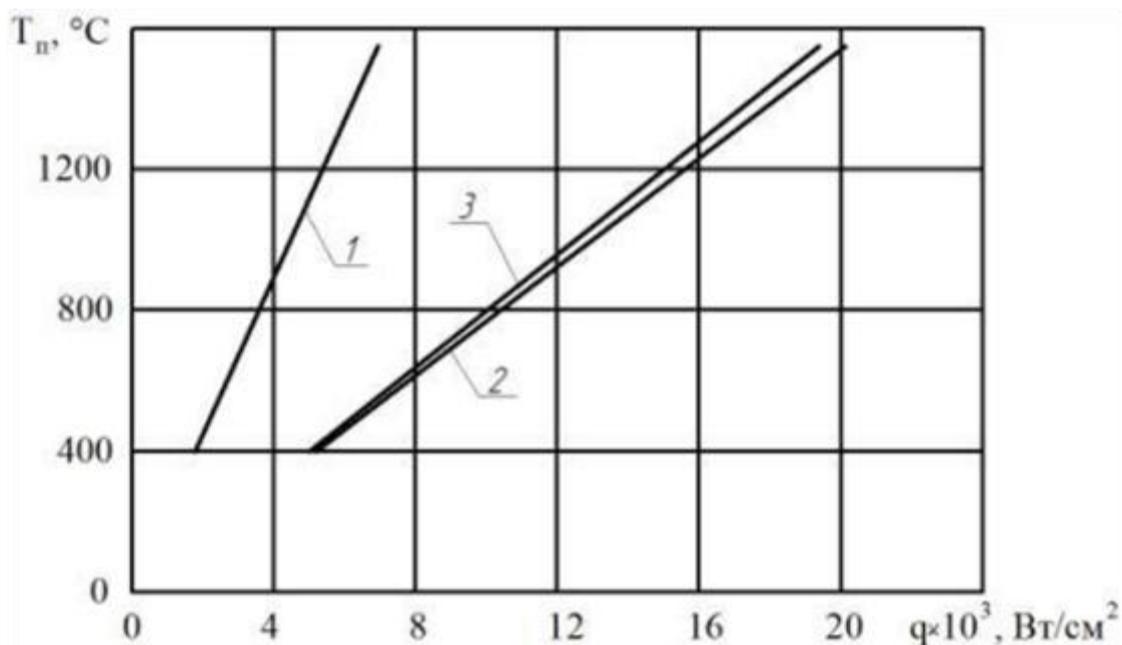


Рис. 3.13. Влияние плотности мощности (q) на температуру (T_n) [175]:

1 – МК8, 2 – НТi10, 3 – НТi10+TiN-TiZrN

Теплопроводность твёрдого сплава МК8 выше теплопроводности покрытий на 7-8 %, а твёрдого сплава НТi10 – выше в 3,2 раза. Подтверждением сказанного свидетельствуют данные по критической плотности мощности для композиции с покрытием нитрида ниобия NbN . Более существенная разница в значениях теплопроводности нитрида NbN и твёрдого сплава НТi10 является причиной большего снижения критической плотности мощности по сравнению с другими покрытиями.

Результаты исследований влияния плотности мощности ИЛО на напряжения на поверхности твердосплавной основы и на границе покрытий с твердосплавной основой представлены на рис. 3.14 и в табл. 3.3.

Как видно из представленных данных, влияние плотности мощности ИЛО на напряжения по сравнению с температурой более значимо. Напряжения, вызванные воздействием ИЛО на твердосплавную основу, зависят от их теплофизических свойств. Меньшая теплопроводность твёрдого сплава МК8 по сравнению с НТi10 ведёт к более интенсивному росту напряжений при увеличении плотности мощности ИЛО (рис. 3.15). Влияние теплопроводности на положение изобар полей напряжений хорошо видно на рис. 3.15. Меньшая теплопроводность сплава

МК8 способствует смещению изобар напряжений в сторону зоны воздействия ИЛО и приводит к более высоким значениям напряжений на поверхности основы.

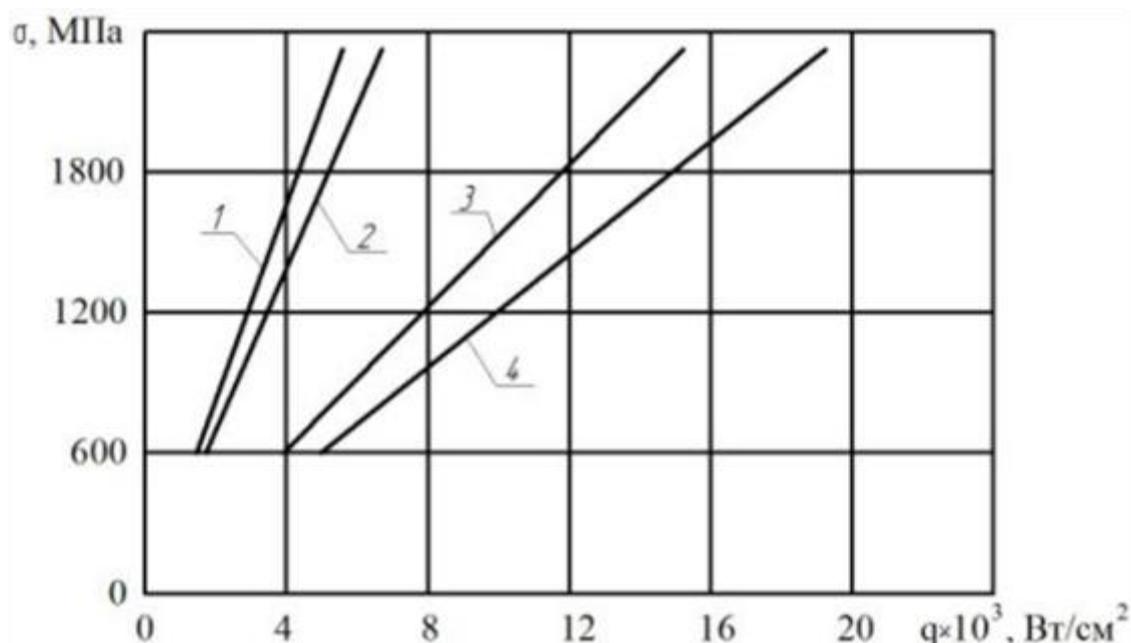
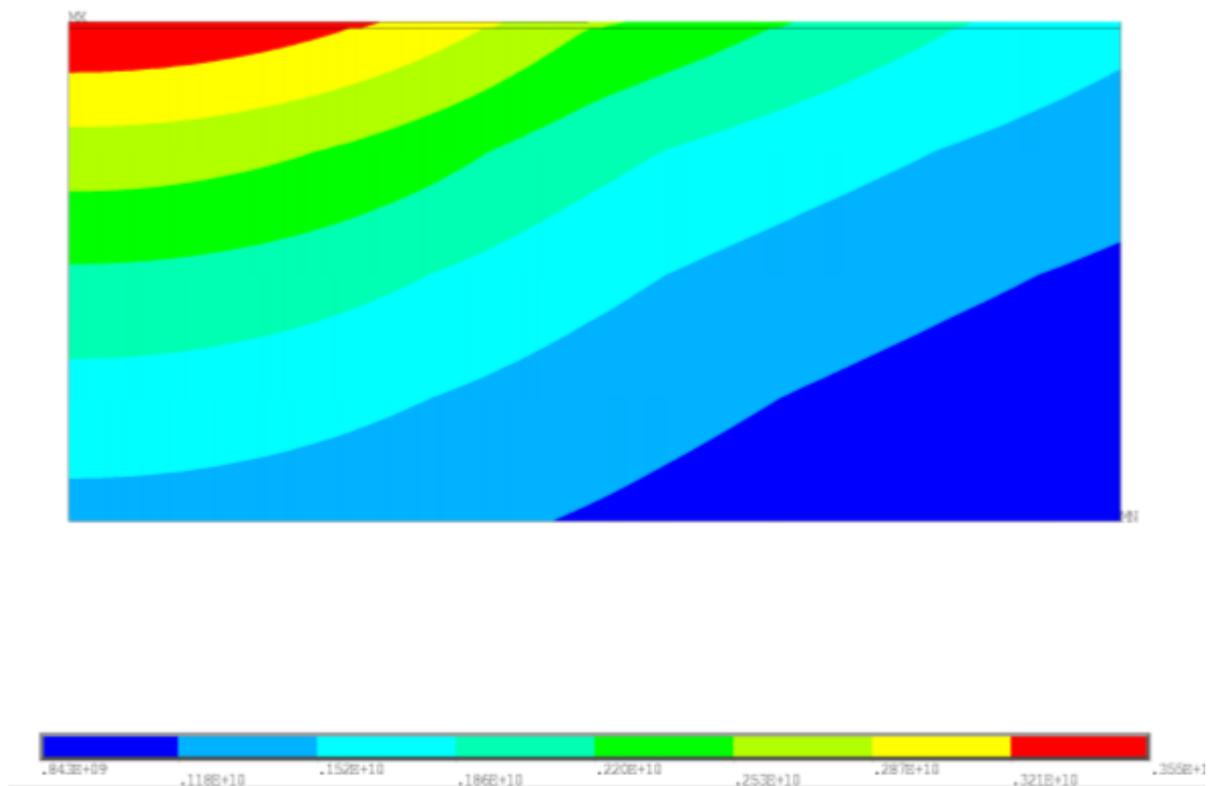


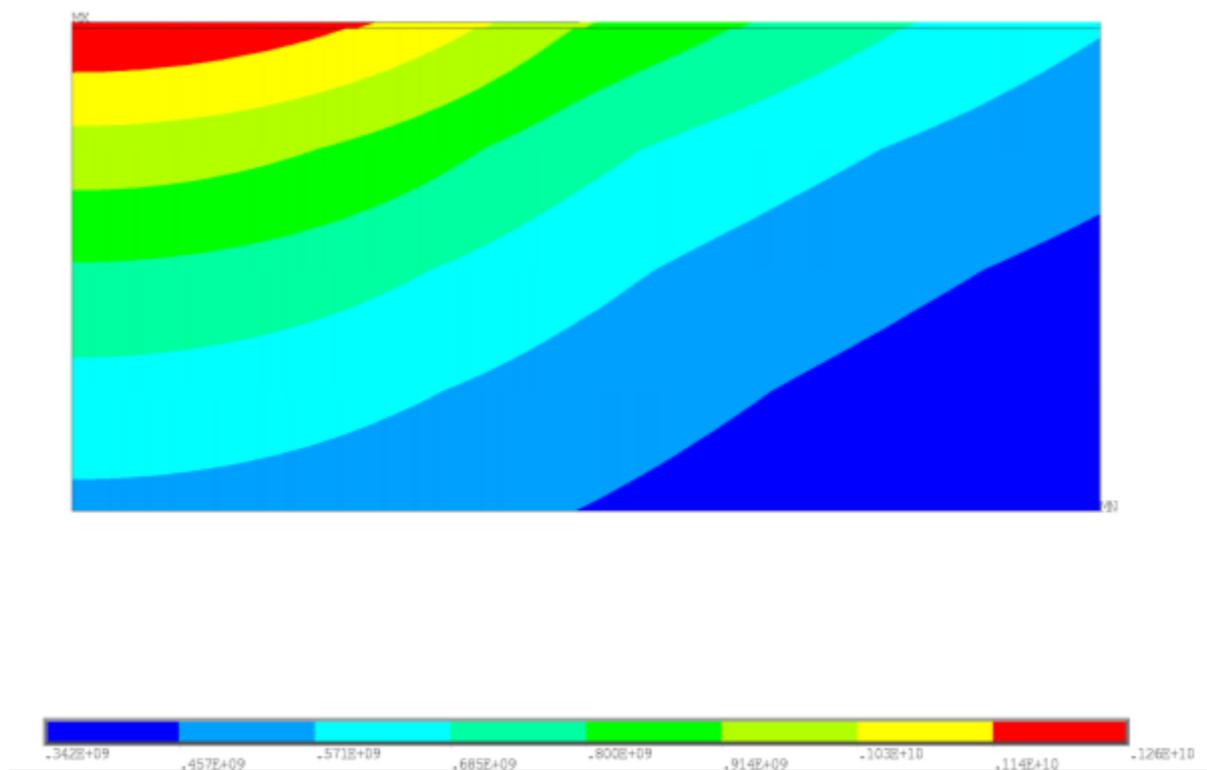
Рис. 3.14. Влияние плотности мощности (q) на напряжения (σ) [175]:

1 – МК8+TiN-TiZrN, 2 – МК8, 3 – НTi10+TiN-TiZrN, 4 – НTi10

Для композиций с покрытиями напряжения, возникающие в результате воздействия ИЛО, выше по сравнению с твёрдым сплавом без покрытия, а их величина определяется разницей коэффициентов термического линейного расширения материалов покрытия и твердосплавной основы. Для каждой твердосплавной основы увеличение разницы в коэффициентах термического линейного расширения ведёт к росту напряжений. При этом, в случае использования в качестве основы твёрдого сплава МК8, коэффициент термического линейного расширения которого больше, чем у сплава НTi10, повышение напряжений составило 4,7-22,5 %, а при использовании сплава НTi10 – 7-29,5 %. Как и в случае с температурой, напряжения имеют одинаковое значение в композициях с однослойным и многослойным покрытием, так как его верхний слой имеет одинаковый состав с однослойным. Полученные результаты исследований показывают, что напряжения, возникающие в композиции с многослойным покрытием определяются слоем покрытия, имеющего более высокое значение коэффициента термического линейного расширения.



а



б

Рис. 3.15. Распределение напряжений в твёрдом сплаве МК8 (а) и НТi10 (б) при обработке лазерным лучом плотностью мощности $10000\text{Вт}/\text{см}^2$

Как видно из табл 3.2, напряжения для композиций с покрытиями $TiZrN$ и $TiN-TiZrN$ имеют одинаковую величину, так же как и с покрытиями $TiZrCrN$ и $TiN-TiZrN-TiZrCrN$. В тоже время, напряжения для композиций с покрытиями TiN и $TiN-TiZrN-TiN$ различны (например, в случае твердосплавной основы НТi10 при плотности мощности 12000 Вт/см^2 напряжения равны соответственно 1553 МПа и 1878 МПа), что связано с наличием в данном многослойном покрытии слоя $TiZrN$, коэффициент термического линейного расширения выше чем у TiN .

Таблица 3.3

Значения критической плотности мощности для различных композиций

Твердосплавная основа	Критическая плотность мощности $q_{кр}$, кВт/см ² : в числителе и знаменателе соответственно по критериям K_T и K_H						
	Без покрытия	TiN	$TiZrN$	$TiZrCrN$	NbN	$TiN-TiZrN$	$TiN-TiZrN-TiZrCrN$
МК8	<u>5,54</u>	<u>5,48</u>	<u>5,42</u>	<u>5,33</u>	-	<u>5,53</u>	<u>5,33</u>
	4,59	4,38	3,8	3,75		3,8	3,75
НТi10	<u>15,6</u>	<u>15,01</u>	<u>15,01</u>	<u>15,06</u>	<u>12,91</u>	<u>15,01</u>	<u>15,06</u>
	14,9	13,9	11,8	11,49	12,44	11,8	11,49

Значения критической плотности мощности ИЛО ($q_{кр}$), определённые по критерию K_H , для различных композиций представлены в табл. 3.3. Сравнение значений величины $q_{кр}$, полученных по критериям K_T и K_H , свидетельствует о большем влиянии на значение критической плотности мощности напряжений, возникающих при воздействии ИЛО на композицию «покрытие-инструментальная основа». Как отмечалось выше, величина критической плотности мощности ИЛО, определённая по критерию K_T , зависит от теплопроводности твердосплавной основы и практически остаётся постоянной при использовании различных составов покрытий на основе нитрида титана. Критическая плотность мощности ИЛО, определённая по критерию K_H , снижается при переходе от твердосплавной основы без покрытия к композициям «ИП-ТО» с одноэлементным и многоэлементным покрытием, что связано с ростом разницы в значениях коэффициентов термического линейного расширения твердосплавной основы и по-

крытий. При этом для твердосплавных основ без покрытия разница в значениях критической плотности мощности, определенной по критериям K_T и K_H , не превышает 15 % и 5,6 % соответственно для сплавов МК8 и НТi10, при этом напряжения, соответствующие данным значениям $q_{кр}$, не превышают допустимый интервал значений растягивающих напряжений для данных сплавов. Для композиций с покрытиями разница в значениях критической плотности мощности ИЛО, определённой по критериям K_T и K_H , растёт при повышении значений коэффициента термического линейного расширения покрытий и достигает 29 % и 24 % соответственно для твердосплавных основ МК8 и НТi10. Более высокое значение величины $q_{кр}$ для композиции с покрытием NbN по сравнению с композициями с покрытиями на основе TiN объясняется низкой теплопроводностью и высоким коэффициентом термического линейного расширения покрытия NbN . Несмотря на более высокую температуру на поверхности NbN по сравнению с TiN при воздействии ИЛО (соответственно 1115 °С и 959 °С), более низкая теплопроводность NbN является причиной того, что температура на границе NbN и TiN с твердосплавной основой практически имеет одинаковую величину (925 °С и 922 °С, табл. 3.2). Соответственно и напряжения, возникающие на границе покрытия с твердосплавной основой также практически одинаковы (табл. 3.2). Однако большая разница в значениях коэффициентов термического линейного расширения твердосплавной основы и покрытия, характерная для покрытия NbN , является причиной повышения критической плотности мощности для композиции с покрытием NbN .

Анализ полученных результатов исследований показывает, что в качестве критерия выбора критической плотности мощности ИЛО следует принимать критерий K_H , как более объективно характеризующий влияние ИЛО на композицию «покрытие-инструментальная основа».

Для подтверждения результатов моделирования экспериментально исследовали влияние плотности мощности ИЛО на микротвёрдость и остаточные напряжения твёрдых сплавов МК8 и НТi10 без покрытия и композиции с покрытием TiN . Результаты данных исследований представлены на рис. 3.16-3.18.

Экспериментальные значения критической плотности мощности ИЛО определяли по моменту начала снижения микротвёрдости твердосплавной основы и покрытия и образования в них трещин.

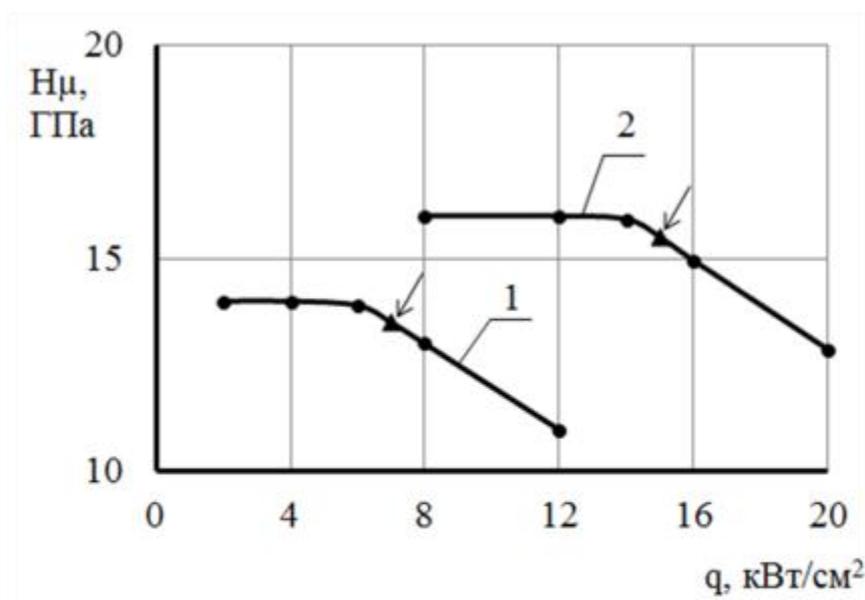


Рис. 3.16. Влияние плотности мощности импульсной лазерной обработки на микротвёрдость H_{μ} твёрдых сплавов [175]: 1- МК8, 2-НТi10

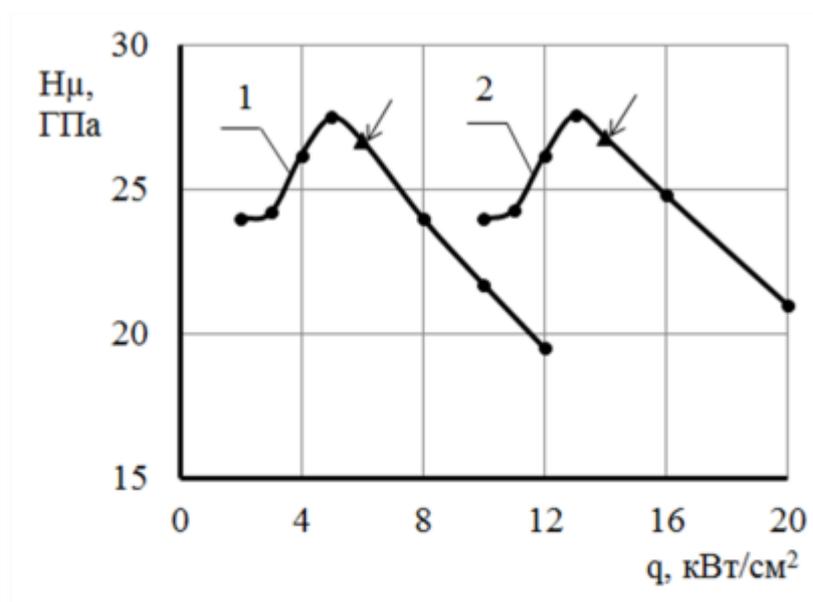


Рис. 3.17. Влияние плотности мощности импульсной лазерной обработки на микротвёрдость H_{μ} твёрдых сплавов покрытием [175]:

1 – МК8+TiN, 2 – НТi10+TiN

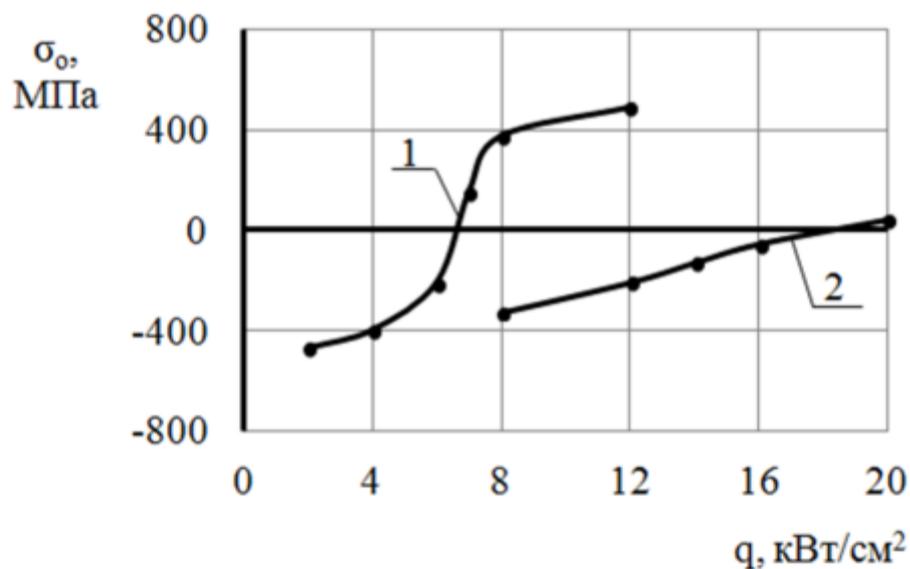


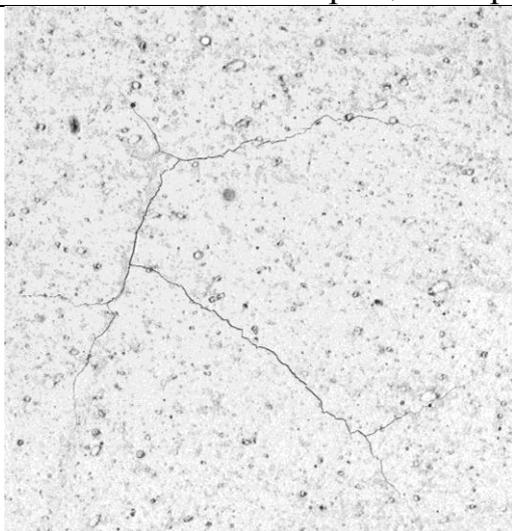
Рис. 3.18. Влияние плотности мощности импульсной лазерной обработки на остаточные напряжения σ_0 [175]: 1- МК8, 2- НТi10

Установлено, что снижение микротвёрдости пластин МК8 и НТi10 происходит при превышении плотности мощности соответственно свыше 5,3 кВт/см² и 14,2 кВт/см². При этом наблюдается резкое снижение сжимающих остаточных напряжений в твердосплавной основе и трансформация их в растягивающие напряжения (рис. 3.18). Для твердосплавных основ с покрытием TiN снижение микротвёрдости начиналось при меньших значениях плотности мощности по сравнению с твёрдым сплавом без покрытия и составило соответственно 4,9 кВт/см² и 12,9 кВт/см² [175].

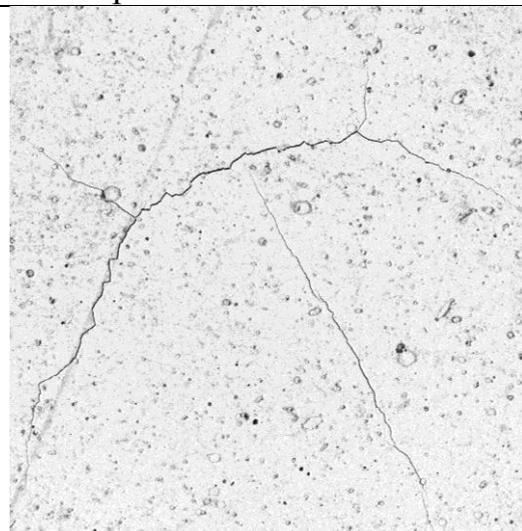
Превышение указанных значений плотности мощности ИЛО приводило к образованию трещин (таблица 3.4) на поверхности твёрдого сплава и покрытия TiN. Плотности мощности ИЛО, при которых начиналось образование трещин, отмечены на рис. 3.16, 3.17 стрелками. Сравнение значений критической плотности мощности, полученных экспериментальным путем и по результатам моделирования, показало их различие в пределах 5,7-15,2 %, в зависимости от материала твердосплавной основы. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность результатов моделирования и полученных значений критической плотности мощности ИЛО.

Трещинообразование в покрытии при лазерном воздействии

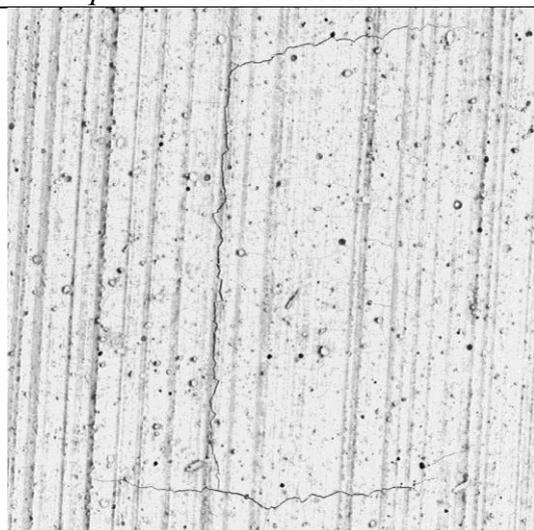
Технологические режимы лазерной обработки и фото интенсивного трещинообразования в покрытии



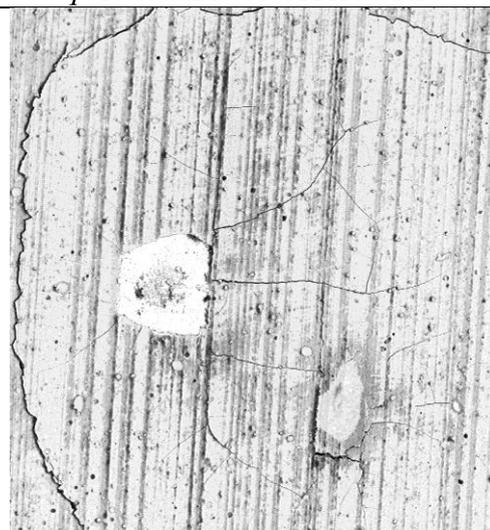
$q=14000 \text{ Вт/см}^2$ HTi10+TiN



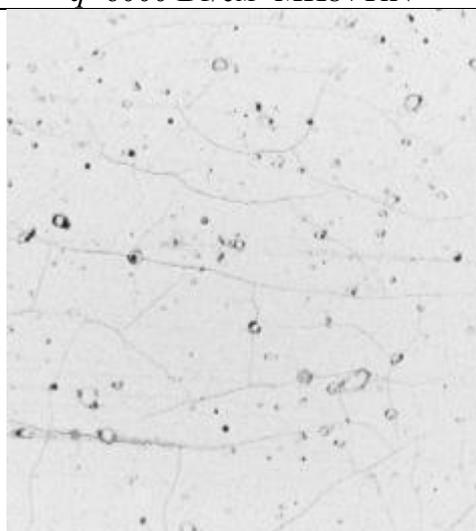
$q=18000 \text{ Вт/см}^2$ HTi10+TiN



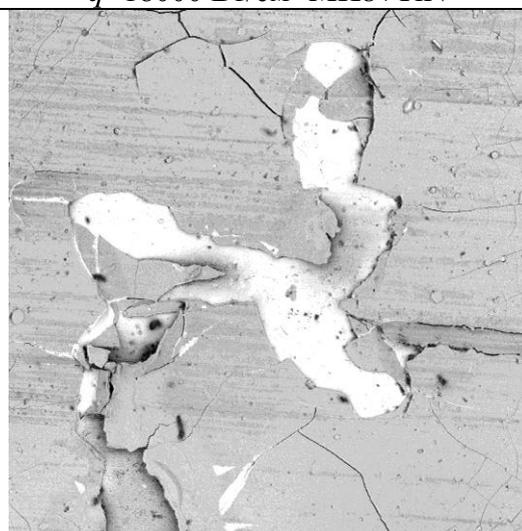
$q=6000 \text{ Вт/см}^2$ MK8+TiN



$q=18000 \text{ Вт/см}^2$ MK8+TiN



$q=4700 \text{ Вт/см}^2$ P6M5+TiN



$q=18000 \text{ Вт/см}^2$ P6M5+TiN

3.3. Выводы

1. Разработана математическая модель воздействия ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа», позволяющая оценить ее тепловое состояние и выявить взаимосвязь характеристик ИЛО с параметрами структуры и механическими свойствами поверхностного слоя композиции.

2. На основе анализа разработанной математической модели было отмечено, что изменение теплофизических свойств слоёв МП значительно оказывает влияние на распределении температур в композиции. С повышением количества слоёв влияние теплофизических свойств каждого слоя на распределение температур в композиции становится незначительным. Направленно выбирая теплофизические свойства материалов слоёв, можно управлять формированием температурного поля в объеме всей композиции.

3. Показано, что температура на поверхности композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» зависит от теплофизических констант инструментальной основы и покрытия, основными из которых являются теплоемкость, теплопроводность, коэффициент термического линейного расширения, температуропроводность.

4. Проведено численное моделирование процесса воздействия ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа» с использованием программного комплекса Ansys Mechanical APDL. Используя сопряженную задачу теплопроводности и напряженного состояния, установлены закономерности связи теплового и напряженного состояния композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» с параметрами ИЛО, теплофизическими характеристиками твердосплавной основы и покрытий, составом и конструкцией покрытий. Результаты исследований, полученные численным моделированием, хорошо согласуются с данными, полученными по разработанной математической модели.

5. Установлено, что температура на поверхности инструментальной основы и на её границе с покрытием в большей степени зависит от теплопроводности инструментальной основы и в меньшей степени от теплопроводности покрытий.

Напряжения, возникающие в результате ИЛО, на поверхности инструментальной основы определяются ее теплопроводностью, а для композиций с покрытиями дополнительно разницей значений коэффициентов термического линейного расширения инструментальной основы и покрытия и возрастают по мере её увеличения. Критическая плотность мощности ИЛО для композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» зависит от теплофизических свойств основы и покрытий и уменьшается по мере увеличения разности их коэффициентов термического линейного расширения.

6. Адекватность математической модели и результаты численного моделирования процесса воздействия ИЛО на композицию «покрытие-инструментальная основа» подтверждены экспериментальными исследованиями.

7. На основе результатов, полученных аналитическим решением и численным моделированием, определены значения критической плотности мощности ИЛО, обеспечивающие необходимые механические свойства поверхностного слоя твердосплавной основы и композиций с однослойными и многослойными покрытиями. Показано, что в качестве критерия выбора критической плотности мощности ИЛО следует принимать критерий K_H , учитывающий величину напряжений, возникающих на границе покрытия с инструментальной основой, как более объективно характеризующего влияние ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа».

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

В данной главе приведены результаты исследований по влиянию импульсной лазерной обработки на структурные параметры, механические свойства однослойных покрытий, на основе которых разработаны конструкции многослойных покрытий. Показано влияние импульсной лазерной обработки на механические свойства и интенсивность износа разработанных многослойных покрытий.

4.1. Выбор состава слоев многослойных покрытий и технологических параметров осаждения покрытий

Учитывая, что МП будут применяться при токарной обработке, составы слоёв подбирали исходя из принципа формирования МП для условий непрерывной обработки. В результате образования трещин при точении наблюдается разрушение покрытия РИ [22, 164 – 166], причинами которых являются эквивалентные напряжения, действующие на контактных площадках режущего клина инструмента в процессе резания. Величина этих напряжений зависит от состава покрытий. Их значение возрастает при переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным. При обработке материала в покрытиях образуются остаточные сжимающие напряжения, которые уменьшают образование трещин [22]. Значения этих напряжений будут выше, если выше собственные остаточные сжимающие напряжения покрытия и его механические свойства. При обработке заготовок РИ с ИП нормальные сжимающие напряжения будут возрастать при переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным.

На основании вышеизложенного, при непрерывном точении покрытие должно создать хорошие условия контактного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов на передней поверхности инструмента, которые

бы содействовали уменьшению эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента [22, 165]. Выполнение этого требования увеличивает время работы РИ до начала образования трещин в покрытиях. Для предотвращения образования трещин и снижения их интенсивности, уровень собственных сжимающих остаточных напряжений должен способствовать формированию в них в высоких нормальных сжимающих напряжений в процессе обработки. Выполнение этого требования будет способствовать увеличению времени работы РИ до образования трещин и повышению надежности покрытия.

Кроме того, покрытие должно иметь высокую адгезионную прочность, которая выше для одноэлементных нитридных покрытий по сравнению с многоэлементными покрытиями [167, 168].

Таким образом, в качестве нижнего слоя МП предпочтительно использовать покрытие TiN . В случае использования в качестве слоёв МП многоэлементных покрытий прочность адгезии должно обеспечивать двухэлементное покрытие, например, $TiZrN$. В качестве верхнего слоя – следует выбирать многоэлементные покрытия, которые имеют более высокие механические свойства. Учитывая это, в качестве верхних слоев МП были выбраны покрытия $TiZrAlN$, $TiZrCrN$, $TiNbAlN$ и $TiZrNbAlN$.

Компоновочные схемы для нанесения данных покрытий представлены на рис. 4.1, а технологические параметры их нанесения – в табл. 4.1.

Покрытие $TiZrAlN$ осаждали с применением катодов из Ti и Zr (катоды 1 и 2) и катода из сплава $TiAl$ (катод 3), при осаждении покрытия $TiZrCrN$ вместо катода из $TiAl$ использовали составной катод $Ti-Cr$. При осаждении покрытия $TiNbAlN$ применяли два катода из Ti (катоды 1 и 2) и катод из сплава $TiNbAl$ (катод 3), при осаждении покрытия $TiZrNbAlN$ вместо одного катода из Ti использовали катод из Zr (катод 2).

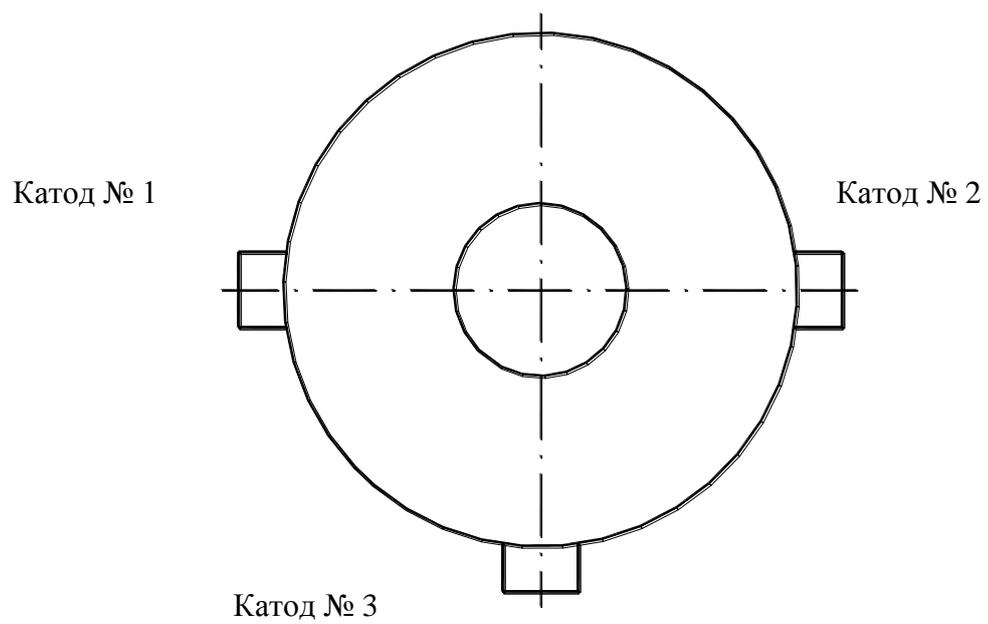


Рис. 4.1. Компоновочная схема для нанесения покрытий

Таблица 4.1

Технологические параметры нанесения однослойных покрытий на основе нитрида титана
Технологические параметры процесса конденсации

№	Покрытие	Катод №1			Катод №2			Катод №3			Опорное напряжение $U_{оп}, В$	Время конденсации $\tau_k, мин$
		материал	$I_{д}, А$	$I_{ф}, А$	материал	$I_{д}, А$	$I_{ф}, А$	материал	$I_{д}, А$	$I_{ф}, А$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	TiZrAlN	Ti	105	0,4	Zr	110	0,4	TiAl	105	0,4	160	39
2	TiZrCrN	Ti	105	0,4	Zr	110	0,4	TiCr	105	0,4	160	40
3	TiNbAlN	Ti	105	0,4	Ti	110	0,4	TiNbAl	105	0,4	160	40

Технологические параметры нанесения трёхэлементных покрытий $TiZrAlN$, $TiZrCrN$ были взяты из работы [64], а покрытия $TiNbAlN$ – по аналогии с данными покрытиями.

Химический состав покрытий $TiZrAlN$, $TiNbAlN$ и $TiZrCrN$ представлен в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Химический состав покрытий

Покрытие	Содержание элементов в покрытии, % ат.			
	<i>Ti</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>
$TiZrAlN$	57,4	39,8	-	2,8
$TiNbAlN$	82,9	-	15,5	1,6
$TiZrCrN$	48,8	40,6	-	10,6*

Примечание: * - содержание хрома

Для определения технологических параметров нанесения четырёхэлементного покрытия $TiZrNbAlN$ исследовали воздействие тока дуги I_d и опорного напряжения $U_{оп}$ на катоде $TiNbAl$ при постоянном $I_d=90$ А на катодах из Ti и Zr на химический состав покрытий, параметры структуры, механические свойства и интенсивность износа пластин MC146 [169, 170]. Диапазоны регулирования тока дуги и опорного напряжения на катоде $TiNbAl$ представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Химический состав покрытий $TiZrNbAlN$

Образец №	Параметры осаждения	Содержание элементов в покрытии, ат. %			
		<i>Ti</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>
1	$I_{d\ min}=80A; U_{оп\ min}=170B$	49,7	39,12	10,37	0,81
2	$I_{d\ min}=80A; U_{оп\ max}=240B$	48,27	39,94	11,22	0,57
3	$I_{d\ max}=110A; U_{оп\ min}=170B$	50,96	38,05	10,2	0,79
4	$I_{d\ max}=110A; U_{оп\ max}=240B$	50,08	38,57	10,84	0,51

В табл. 4.3 показано, что изменение I_d и $U_{оп}$ на катоде $TiNbAl$ несущественно проявляется на химическом составе покрытий. Увеличение I_d приводит к незначительному повышению Ti и снижению Zr в покрытии и фактически не меняет содержание Nb и Al . Варьирование $U_{оп}$ фактически не изменяет химический состав покрытия [169].

В табл. 4.4 и 4.5 показаны структурные параметры и механические свойства покрытия $TiZrNbAlN$. Отмечено, что варьирование I_d и $U_{оп}$ фактически не оказывает влияния на период решётки и полуширину рентгеновской линии покрытий. С повышением I_d отмечается увеличение в покрытии текстуры (111) и уменьшение остаточных сжимающих напряжений [169].

Таблица 4.4

Структурные параметры покрытий $TiZrNbAlN$

Образец №	a , нм	β_{111} , град	J_{111}/J_{200}	σ_o , МПа
1	0,43679	1,1	39,3	-1434
2	0,43560	1,2	45	-904
3	0,43560	1,2	71	-696
4	0,43560	1,1	56	-506

Для образцов №1 и №2 (табл.4.4), осаждённых при $I_d=80$ А, свойственны большие значения (в 1,29-2,84 раза) остаточных сжимающих напряжений, в сопоставлении с образцами №3 и №4, что может быть связано с более высокой температурой осаждения покрытия на образцы №3 и №4.

Таблица 4.5

Механические свойства и интенсивность износа покрытий $TiZrNbAlN$

Образец №	H_μ , ГПа	E , ГПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	H_μ / E	H_μ^3 / E^2	$J \cdot 10^{-4}$, мм/м
1	38,8	468	16,24	0,083	0,27	0,93
2	40,3	453	15,94	0,089	0,32	1,66
3	40,2	423	15,56	0,095	0,36	1,0
4	42,8	484	14,84	0,088	0,33	1,13

В исследуемом интервале значений, I_d и $U_{оп}$ не оказывают воздействия на механические свойства покрытия (табл. 4.5). Покрытия, осажденные по четырём вариантам имеют приблизительно одинаковые значения микротвёрдости, модуля Юнга и коэффициента интенсивности напряжений. Соответственно стойкость покрытия к упругой деформации разрушения (индекс пластичности) H_μ / E и сопротивление пластическому деформированию H_μ^3 / E^2 по четырём вариантам

имеют примерно одинаковые величины. В результате испытаний на износостойкость пластин из твёрдого сплава с покрытиями было обнаружено, что наименьшую интенсивность износа имеют покрытия, полученные по вариантам №1 и №3. При оценке данных результатов были определены технологические режимы осаждения покрытия $TiZrNbAlN$, которые составили – $I_d = 90A$ и $U_{оп} = 170B$ [169].

Значительное воздействие на механические свойства покрытий оказывает компоновочная схема установки и конструкция катодов [171]. Воздействие компоновочной схемы установки рассматривали на примере покрытия $TiZrN$ [171], который может быть использован в качестве нижнего или промежуточного слоёв МП. Исследовали структурные параметры и механические свойства ИП, осаждённых на пластины HTi10 по четырем вариантам. В первом варианте, использовали два катода из Ti , расположенных противоположно друг другу и катод из Zr , который размещали между ними; во втором – использовали те же катоды, но противоположно друг другу располагали катоды из Ti и Zr , а второй катод из Ti помещали между ними; в третьем варианте были использованы катоды из Ti и Zr , которые располагали напротив друг другу; в четвёртом варианте катоды из Ti и Zr располагали под углом 90° друг к другу [171].

Размещение катодов в камере, а также их количество приводит к изменению химического состава покрытий (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Влияние компоновочной схемы на химический состав покрытий $TiZrN$

Вариант	Содержание элементов в покрытии, % ат.	
	Ti	Zr
1, 2	65,6	34,4
3, 4	57,2	42,8

Для первой и второй компоновочной схемы характерно большее содержание Ti в покрытиях и меньшее Zr . Покрытия $TiZrN$, независимо от компоновочной схемы, являются двухфазными. На дифрактограммах покрытий (рис. 4.2) отмечаются дифракционные пики TiN и ZrN с текстурой (111). В покрытиях, осаждённых по компоновочным схемам 3 и 4, между пиками нитридов TiN и ZrN наблюдается

дополнительный дифракционный пик, который идентифицируется как твёрдый раствор $TiZrN$ с текстурой (111). Появление данного дифракционного пика может быть связано с увеличением содержания в покрытии Zr . Присутствие двух фаз доказывает о слоистости структуры покрытия. Как представлено в работе [171], перемещение инструмента в камере установки относительно катодов из Ti и Zr приводит к формированию мультислойной структуры слоя покрытия, осаждённого за один оборот стола установки. Отмечается чередование мультислоёв отдельных фаз покрытия TiN и ZrN , разделённых друг от друга, в зависимости от компоновочной схемы установки, мультислоями переменного состава $Ti_xZr_{1-x}N$ или чёткой границей.

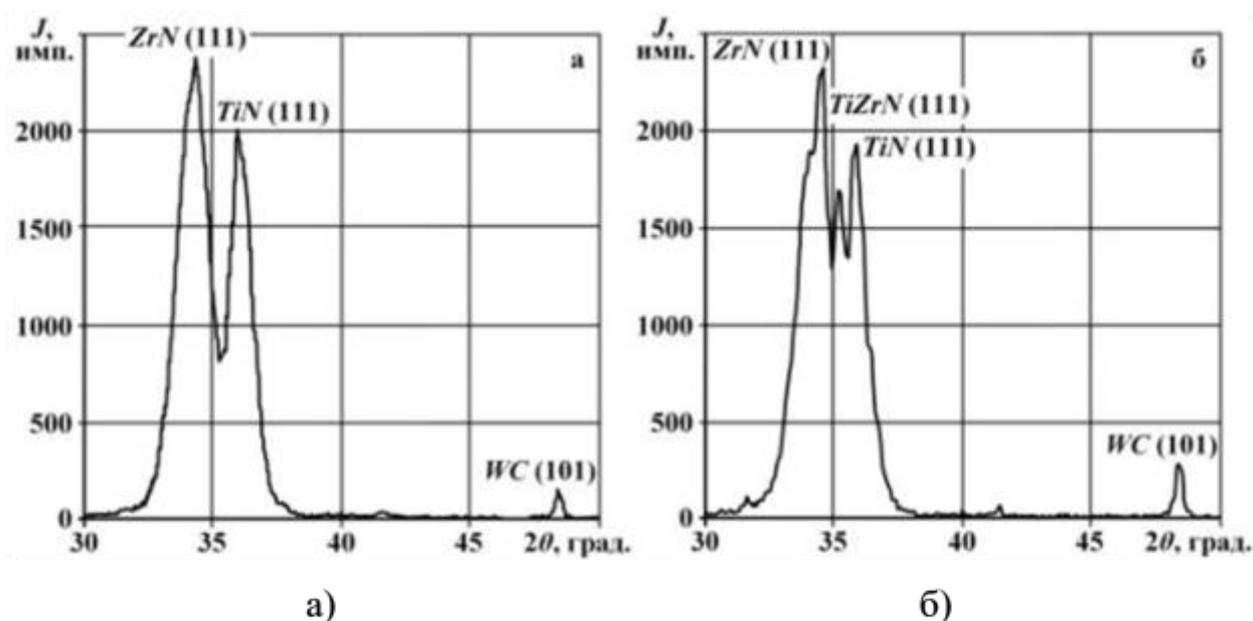


Рис. 4.2. Фрагменты дифрактограмм покрытий $TiZrN$ при расположении катодов по схемам 1 (а) и 3 (б) [171]

В качестве примера на рис. 4.3 представлен поперечный излом покрытия $TiZrN$, на котором наблюдаются чередующие мультислои отдельных фаз покрытия TiN и ZrN толщиной 12-13 нм.

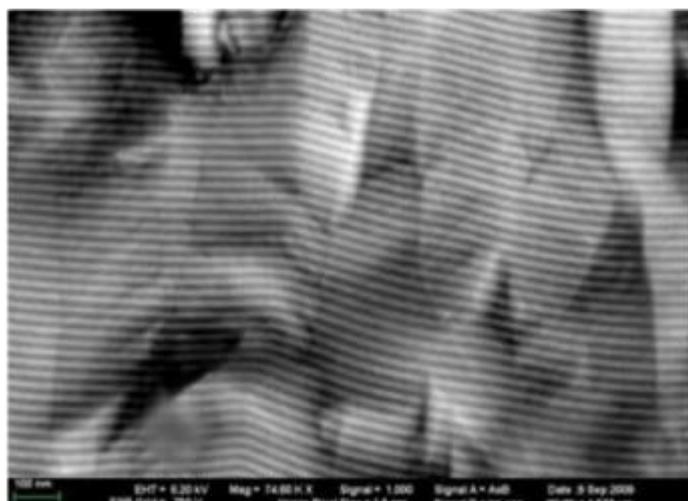


Рис. 4.3. Фотография поперечного излома покрытия $TiZrN$ в отражённых электронах: светлые слои – ZrN , темные – TiN [171]

Различная мультислойная структура слоёв покрытия отражается на его параметрах структуры и механических свойствах. Для покрытий, полученных по компоновочным схемам 1 и 2, характерны меньшие значения периода решетки, размеров блоков ОКР и более высокая величина полуширины рентгеновской линии, относительной микродеформации кристаллической решётки и микротвёрдости (табл. 4.7). Коэффициент отслоения покрытий зависит от взаимного расположения катодов из Ti и Zr . Независимо от количества катодов, большая величина прочности адгезии (меньший коэффициент отслоения) обеспечивается при расположении катодов из Ti и Zr противоположно друг другу – соответственно компоновочные схемы 2 и 3. Величина остаточных напряжений, модуль упругости и коэффициент интенсивности напряжений практически не зависят от компоновочной схемы установки.

Таблица 4.7

Влияние компоновочной схемы на параметры структуры и механические свойства покрытий $TiZrN$

Вариант компоновочной схемы	a , нм	β_{III} , град	σ_o , МПа	D , нм	$\Delta a/a$ 10^{-3}	H_M , ГПа	K_o	E , ГПа	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
1	0,4309	1,07	-900	8,82	14,0	37,4	0,80	357	12,23
2	0,4321	0,97	-964	9,76	12,7	36,1	0,16	379	13,16
3	0,4356	0,9	-999	10,55	11,7	35,2	0,11	380	12,00
4	0,4356	0,9	-961	16,91	11,7	34,8	0,71	369	12,94

Более высокие микротвёрдость и прочность адгезии покрытий, полученных по компоновочным схемам 1 и 2, объясняются различием количества мультислоёв и их толщин в структуре слоя покрытия, осаждённого за один оборот стола установки, и, следовательно, в структуре покрытия в целом по сравнению с покрытиями, осаждёнными по компоновочным схемам 3 и 4. Полученные результаты исследований хорошо согласуются с данными работы [65].

Таким образом, при использовании покрытия $TiZrN$ в качестве слоёв МП, с точки зрения сочетания хорошей прочности адгезии и микротвёрдости, следует его наносить, используя компоновочную схему 3, когда катоды из Ti и Zr располагали противоположно друг другу.

Как известно [11], конструкция катодов оказывает существенное влияние на механические свойства покрытий. С этой целью исследовали влияние конструкции катодов: отдельных, полностью изготовленных из материала катода, и составных, имеющих вставку из легирующего элемента – на параметры структуры и механические свойства покрытий, выбранных в качестве функциональных слоёв МП – $TiZrN$, $TiZrAlN$ и $TiZrNbAlN$ [79, 172]. Покрытия осаждали по двум вариантам. В первом варианте, при осаждении покрытия $TiZrN$ применяли два отдельных катода из Ti и Zr , при осаждении покрытия $TiZrAlN$ дополнительно использовали катод из сплава $TiAl$, при осаждении покрытия $TiZrNbAlN$ – катод из сплава $TiNbAl$. Во втором варианте при осаждении всех покрытий применяли составные катоды из Ti со вставками из Zr . Химический состав катодов представлен в табл. 4.8, а покрытий – в табл. 4.9 (в числителе приведены данные для покрытий, полученных из отдельных катодов, в знаменателе из составных).

Таблица 4.8

Химический состав катодов

Катод	Содержание элементов в покрытии, % ат.		
	Ti	Nb	Al
Сплав $Ti-Al$	50,05	–	49,95
Сплав $Ti-Nb-Al$	46,83	36,55	16,62

Таблица 4.9

Химический состав покрытий

Покрытие	Содержание элементов в покрытии, % ат.			
	<i>Ti</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>
<i>TiZrN</i>	<u>57,2</u> 84,7	<u>42,8</u> 15,3	-	-
<i>TiZrAlN</i>	<u>57,5</u> 76,8	<u>39,7</u> 12,5	-	<u>2,8</u> 10,7
<i>TiZrNbAlN</i>	<u>48,6</u> 68,8	<u>40,6</u> 11,7	<u>10,4</u> 17,8	<u>0,4</u> 1,7

Исследованиями установлено, что конструкция катодов отражается на химическом составе покрытий. Для покрытий, полученных из составных катодов, характерно повышение содержания *Ti*, *Nb* и *Al* и снижение содержания *Zr*.

Покрытия *TiZrAlN* и *TiZrNbAlN* [79, 171, 172,174], полученные из отдельных катодов, как и покрытие *TiZrN* являются двухфазными. На дифрактограммах покрытий отмечаются дифракционные пики *TiN* и *ZrN* и пик твёрдого раствора *TiZrN*, расположенного между ними, что имело место для покрытия *TiZrN* (рис. 4.4, а). Покрытия *TiZrN*, *TiZrAlN* и *TiZrNbAlN*, которые были получены с применением составных катодов, являются однофазными. На фрагментах дифрактограмм данных покрытий отмечается только дифракционный пик *TiN* (111) (рис. 4.4, б). Анализ поперечных изломов покрытий показал, что покрытия, осаждённые из составных катодов, являются однородными. На снимках поперечных изломов данных покрытий представлены лишь размытые изображения слоёв без каких-либо отображений мультислоёв фаз покрытий, которые были при осаждении покрытий из отдельных катодов (рис. 4.3).

Параметры структуры и механические свойства покрытий, осаждённых из отдельных и составных катодов, в сопоставлении с покрытием *TiN*, представлены в табл. 4.10. Как видно из полученных данных, периоды кристаллической решетки покрытий отличаются незначительно и немного выше он для покрытий, осаждённых из отдельных катодов. Степень остаточных сжимающих напряжений в покрытиях, полученных с применением отдельных катодов, выше на 6–37 % в зависимости от состава покрытий. Покрытия, осаждённые из отдельных катодов,

обладают более высокими (на 32 – 40 %) значениями полуширины рентгеновской линии, относительной микродеформации решётки, меньший размер блоков ОКР и в конечном счёте более высокую микротвёрдость (на 16,1 – 17,3 %). В то же время с повышением количества компонентов в покрытии расхождение в значениях параметров структуры и микротвёрдости уменьшается для покрытий, полученных с использованием отдельных и составных катодов.

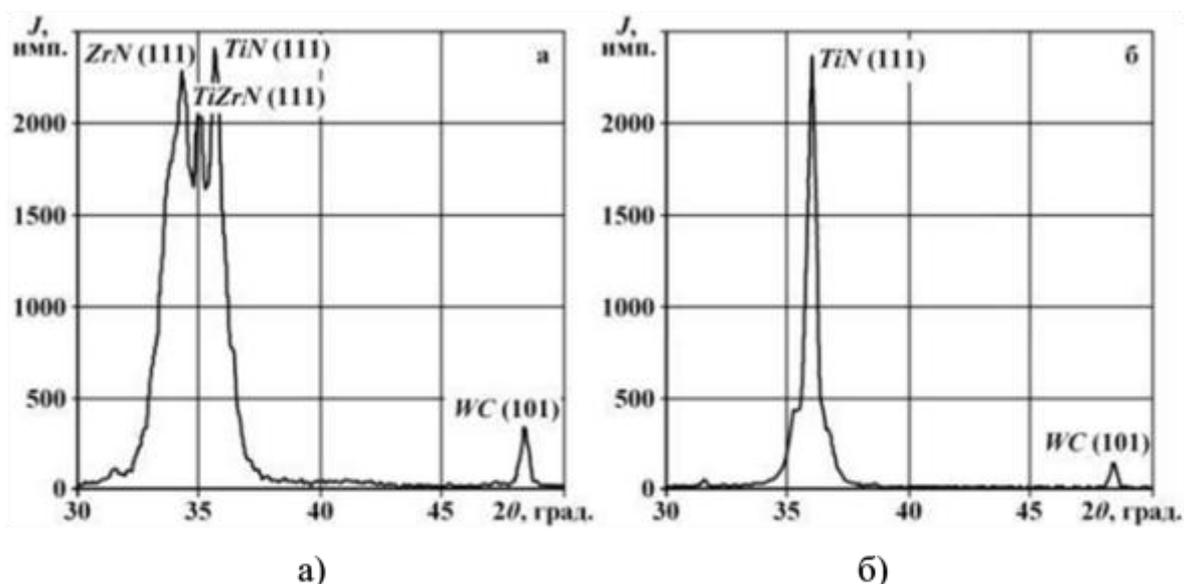


Рис.4.4. Фрагменты дифрактограмм покрытий $TiZrNbAlN$ при применении отдельных (а) и составных (б) катодов [171,174]

Покрытия, осаждённые с применением отдельных катодов, обладают более высоким модулем Юнга, индексом пластичности H_{μ} / E и сопротивлением пластическому деформированию H_{μ}^3 / E^2 . Результаты исследований хорошо согласуются с данными работ [11, 22] и характеризуются действием различных механизмов упрочнения при нанесении покрытий.

Результаты проделанных экспериментов позволяют сделать вывод, что подбор покрытий для режущего инструмента нужно проводить с учётом влияния компоновочной схемы установки и используемых катодов на параметры структуры и механические свойства износостойких покрытий.

Таблица 4.10

Влияние конструкции катодов на параметры структуры и механические свойства покрытий

Покрытие	a , нм	β_{111} , град	σ_o , МПа	D , нм	$\Delta a/a$ 10^{-3}	H_μ , ГПа	E , ГПа	H_μ / E	H_μ^3 / E^2
<i>TiN</i>	0,4335	0,4	- 755	26,02	4,8	24,5	307	0,079	0,15
<i>TiZrN</i>	<u>0,4356</u>	<u>0,82</u>	<u>-1352</u>	<u>11,63</u>	<u>10,6</u>	<u>36,4</u>	<u>388</u>	<u>0,094</u>	<u>0,32</u>
	0,4344	0,51	-1103	19,49	6,3	30,1	385	0,078	0,18
<i>TiZrAlN</i>	<u>0,4344</u>	<u>1,06</u>	<u>-1487</u>	<u>8,9</u>	<u>13,8</u>	<u>41,5</u>	<u>433</u>	<u>0,096</u>	<u>0,381</u>
	0,4309	0,65	-1241	14,89	8,3	34,6	418	0,083	0,237
<i>TiZrNbAlN</i>	<u>0,4356</u>	<u>0,98</u>	<u>-2324</u>	<u>9,66</u>	<u>12,8</u>	<u>42,8</u>	<u>486</u>	<u>0,088</u>	<u>0,332</u>
	0,4333	0,66	-2191	14,6	8,4	35,9	478	0,075	0,202

В числителе представлены результаты для покрытий, полученных из отдельных катодов, в знаменателе – из составных, осаждённые на твёрдый сплав HTi10

Таким образом, проведённые исследования показали, что с точки зрения механических свойств в качестве слоёв МП желательно использовать многоэлементные покрытия, полученные с использованием отдельных катодов. В этом случае необходимо учитывать технологические возможности установок для осаждения покрытий, которые позволяют реализовать возможность использования отдельных катодов.

4.2. Исследование влияния импульсной лазерной обработки на параметры структуры и механические свойства покрытий

Исследовали параметры структуры и механические свойства покрытий согласно методике, изложенной в п. 2.3. Износостойкие покрытия наносили на твердосплавные пластины HTi10 и МК8.

ИЛО проводили при плотности мощности 5100 Вт/см^2 для покрытий, нанесённых на пластины МК8 и при 13000 Вт/см^2 на HTi10. Результаты исследований представлены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Структурные параметры однослойных покрытий

ИО	Покрытие	a , нм	β_{111} , град	J_{111}/J_{200}	σ_o , МПа	D , нм
МК8	<i>TiZrAlN</i>	<u>0,4332</u>	<u>1,13</u>	<u>31</u>	<u>-1293±135</u>	<u>8,34</u>
		0,4344	1,36	27,4	-1060±90	6,9
	<i>TiNbAlN</i>	<u>0,4309</u>	<u>0,53</u>	<u>27,3</u>	<u>-857±158</u>	<u>18,66</u>
		0,4309	0,7	23,8	-623±84	13,75
	<i>TiZrNbAlN</i>	<u>0,4379</u>	<u>0,75</u>	<u>14,2</u>	<u>-554±73</u>	<u>12,78</u>
		0,4379	0,86	10,5	-287±59	11,63
Примечание: в числителе данные для покрытий, полученных без ИЛО, в знаменателе – после ИЛО						

ИЛО приводит к повышению полуширины рентгеновской линии на 14,7 – 32,1 % в зависимости от химического состава покрытия [173]. При этом, наибольшее повышение данного параметра имело место для покрытия *TiNbAlN*. Использование ИЛО приводит к снижению остаточных напряжений сжатия на 18 % для *TiZrAlN*, на 27,3 % для *TiNbAlN* и на 48,2 % для *TiZrNbAlN*. Изменение показателя текстуры, вызванное исключительно уменьшением интенсивности линии J_{111} , объясняется разориентацией кристаллических плоскостей материала покрытия под воздействием ИЛО. Также уменьшает значения текстуры от 11,6 % до 26,1% в зависимости от химического состава покрытий. Подобные изменения также отмечаются на твердосплавной основе НТi10. Уменьшение напряжений объясняется их релаксацией на границе раздела «износостойкое покрытие-инструментальная основа» в результате лазерного нагрева – охлаждения. Следует отметить, что изменение указанных параметров незначительно в сопоставлении с основой из быстрорежущей стали [128, 129]. Это связано с тем, что при ИЛО твердосплавной пластины материал основы не претерпевает существенных изменений, а изменение параметров структуры влияет только на трансформацию кристаллической структуры материала покрытия. При ИЛО основы из быстрорежущей стали происходит трансформация структуры покрытия, так и поверхностного слоя материала основы.

Данные по влиянию ИЛО на механические свойства однослойных покрытий отображены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Механические свойства однослойных покрытий

Покрытие	H_{μ} , ГПа	E , ГПа	H_{μ} / E	H_{μ}^3 / E^2	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	K_o
<i>TiN</i>	<u>24,2</u> 27,3	<u>315</u> 358	<u>0,077</u> 0,076	<u>0,143</u> 0,159	<u>7,6</u> 7,77	<u>0</u> 0
<i>TiZrN</i>	<u>36,4</u> 40,1	<u>385</u> 429	<u>0,094</u> 0,093	<u>0,320</u> 0,350	<u>8,73</u> 8,97	<u>0,11</u> 0,05
<i>TiNbAlN</i>	<u>38,9</u> 42,8	<u>402</u> 442	<u>0,097</u> 0,097	<u>0,364</u> 0,401	<u>11,73</u> 12,04	<u>0,13</u> 0,07
<i>TiZrNbAlN</i>	<u>42,8</u> 47,7	<u>440</u> 487	<u>0,097</u> 0,098	<u>0,404</u> 0,458	<u>10,41</u> 10,73	<u>0,89</u> 0,47
<i>TiZrAlN</i>	<u>41,5</u> 46,5	<u>424</u> 473	<u>0,098</u> 0,098	<u>0,397</u> 0,449	<u>12,32</u> 12,68	<u>0,61</u> 0,25

Примечание: в числителе и знаменателе данные для покрытий, соответственно без и с ИЛО; инструментальная основа МК8

Как видно, ИЛО вызывает рост микротвёрдости на 10 – 12,8 %, модуль Юнга на 10 – 13,7 %, что связано с увеличением полуширины рентгеновской линии β_{III} , и свидетельствует о деформации кристаллической решётки материала покрытия. Кроме того отмечается уменьшение величины коэффициента отслоения K_o на 46,2 – 59 %, что объясняется релаксацией напряжений на границе раздела «покрытие-инструментальная основа». Стойкость покрытий к упругой деформации разрушения H_{μ} / E после ИЛО не изменяется, а сопротивление пластическому деформированию H_{μ}^3 / E^2 возрастает у покрытий, прошедших ИЛО. Критический коэффициент интенсивности напряжений практически не изменяется. Установлено, что ИЛО сплава NTi10 при плотности мощности 13000 Вт/см² имеет место аналогичное изменение механических свойств покрытий.

4.3. Разработка конструкции многослойных покрытий

4.3.1. Архитектура многослойных покрытий

С учетом полученных результатов по параметрам структуры, механическим свойствам и принципу формирования МП, предназначенных для работы в условиях непрерывного резания [65], были разработаны двухслойные покрытия с нижними (адгезионными) слоями TiN и $TiZrN$ и верхними (износостойкими) слоями $TiNbAlN$, $TiZrAlN$, $TiZrCrN$ соответственно покрытия $TiN-TiNbAlN$, $TiZrN-TiZrCrN$, $TiZrN-TiZrAlN$, а также трехслойные покрытия с нижним слоем TiN , промежуточным слоем $TiZrN$ и верхними слоями $TiZrAlN$, $TiNbAlN$ и $TiZrNbAlN$, соответственно, покрытия $TiN-TiZrN-TiZrAlN$, $TiN-TiZrN-TiNbAlN$, $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ [176-180]. Адгезионный слой TiN во всех покрытиях обеспечивал наибольшую прочность адгезии многослойного покрытия. Слои $TiZrN$ наносили с использованием отдельных катодов из Ti и Zr для обеспечения мультислойности данного слоя, что согласно данным работ [11, 79, 80] повышает трещиностойкость МП. В соответствии с полученными рекомендациями катоды из Ti и Zr располагали в камере установки напротив друг другу. Износостойкие слои $TiZrAlN$, $TiZrNbAlN$, $TiZrCrN$ и $TiNbAlN$ осаждали с применением отдельных катодов из Ti и Zr и составных катодов из Ti со вставкой из Cr и литых катодов из сплавов $TiAl$ и $TiNbAl$. С учётом данных работ [64, 88] общая толщина МП составляла 6 мкм; толщина адгезионного и износостойкого слоёв в двухслойном покрытии составила, соответственно, 2 мкм и 4 мкм, а в трёхслойных покрытиях толщины нижнего, промежуточного и верхнего слоя составили по 2 мкм. Новизна разработанных МП подтверждена патентами на изобретения (приложения 6-10).

4.3.2. Исследование влияния импульсной лазерной обработки на параметры структуры и механические свойства многослойных покрытий

Исследовали влияние ИЛО на параметры структуры и механические свойства двухслойных покрытий $TiN-TiNbAlN$, $TiZrN-TiZrAlN$ и трёхслойных $TiN-TiZrN-TiZrAlN$, $TiN-TiZrN-TiNbAlN$ и $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$. Результаты данных исследований представлены в табл. 4.13 и 4.14.

Таблица 4.13

Параметры структуры и микротвёрдость двухслойных покрытий

Покрытие	ИО	H_{μ} , ГПа	Структурные параметры		
			a , нм	β_{111} , град	$\frac{J_{111}}{J_{200}}$
$TiZrN-TiZrAlN$	МК8	<u>34,8</u>	<u>0,4275</u>	<u>0,63</u>	<u>14,5</u>
		38,9	0,4273	0,76	13,5
	НТi10	<u>38,1</u>	<u>0,4327</u>	<u>0,69</u>	<u>40,1</u>
		39,9	0,4325	0,78	32,5
$TiN-TiNbAlN$	МК8	<u>39,2</u>	<u>0,4317</u>	<u>0,55</u>	<u>35,2</u>
		42,7	0,4315	0,67	34,9
	НТi10	<u>39,9</u>	<u>0,4317</u>	<u>0,55</u>	<u>35,2</u>
		42,7	0,4315	0,67	34,9

Примечание: в числителе данные для покрытий, полученных без ИЛО, в знаменателе – после ИЛО

Исследованиями установлено, что ИЛО многослойных покрытий вызывает аналогичные изменения параметров структуры и механических свойств, которые имели место для однослойных покрытий. Так, при ИЛО двухслойных покрытий (табл. 4.13) наблюдается повышение полуширины рентгеновской линии β_{111} на 7-14%, снижается параметр текстуры на 5-15 %, период решетки при этом практически не изменяются. Изменение структурных параметров ведет к повышению микротвёрдости двухслойных покрытий на 7-12 % в зависимости от конструкции покрытия.

Таблица 4.14

Механические свойства трёхслойных покрытий

Покрытие	H_{μ} , ГПа	E , ГПа	H_{μ} / E	H_{μ}^3 / E^2	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	K_o
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	<u>39,8</u>	<u>427</u>	<u>0,093</u>	<u>0,346</u>	<u>14,41</u>	<u>0,32</u>
	43,6	467	0,093	0,380	14,65	0,19
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	<u>35,7</u>	<u>343</u>	<u>0,104</u>	<u>0,387</u>	<u>13,05</u>	<u>0,37</u>
	39,2	391	0,1	0,394	13,23	0,13
<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i>	<u>37,5</u>	<u>411</u>	<u>0,091</u>	<u>0,312</u>	<u>13,45</u>	<u>0,42</u>
	41,2	445	0,093	0,353	13,84	0,12

Примечание: в числителе данные для покрытий, полученных, соответственно без и с ИЛО; инструментальная основа МК8

Аналогичные данные получены и для трехслойных покрытий (табл. 4.14). Как видно из представленных данных, ИЛО изменяет механические свойства многослойных покрытий - повышается прочность адгезии, микротвёрдость и модуль упругости. Критический коэффициент интенсивности напряжений практически не изменяется. Наибольшее влияние ИЛО оказывает на прочность адгезии, о чем свидетельствует снижение коэффициента отслоения в 1,7-3,5 раза в зависимости от конструкции многослойного покрытия. Повышение микротвёрдости и модуля упругости составило 9-10 %.

4.3.3. Исследование интенсивности износа твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями, подвергнутых импульсной лазерной обработке

Исследование интенсивности износа проводилось при продольном точении заготовок из стали 38ХГН. Режимы резания: $V = 180$ м/мин, $t = 0,5$ мм, $S = 0,15$ мм/об и $S = 0,3$ мм/об. Многослойные покрытия *TiN-TiZrN-TiZrAlN*, *TiN-TiZrN-TiNbAlN*, *TiN-TiZrN-TiZrNbAlN* осаждали на пластины из сплава МК8. Результаты исследований представлены в табл. 4.15.

**Интенсивность износа твердосплавных пластин МК8
с многослойными покрытиями**

Покрытие	Интенсивность износа $J, \cdot 10^{-4}, \text{ мм/м}$	
	$V = 180 \text{ м/мин},$ $S = 0,15 \text{ мм/об}, t = 0,5 \text{ мм}$	$V = 180 \text{ м/мин},$ $S = 0,3 \text{ мм/об}, t = 0,5 \text{ мм}$
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	$\frac{1,06}{0,87}$	$\frac{1,17}{0,97}$
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	$\frac{1,05}{0,81}$	$\frac{1,14}{0,94}$
<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i>	$\frac{1,13}{0,92}$	$\frac{1,33}{1,12}$
Примечание: в числителе данные для покрытий, полученных без ИЛО, в знаменателе – после ИЛО		

Исследованиями установлено, что применение ИЛО приводит к снижению интенсивности износа на 16-23 % в зависимости от конструкции покрытий и режима обработки.

4.4. Выводы

1. Выбраны и обоснованы составы слоёв МП с учетом компоновочной схемы установки для нанесения покрытий и конструкции катодов.

2. Показано влияние конструкции катодов и компоновочной схемы установки на изменение параметров структуры и механических свойств выбранных покрытий.

3. Установлено влияние ИЛО на структурные параметры покрытий. Показано, что в результате ИЛО повышается полуширина рентгеновской линии на 14,7-32,1 %, уменьшается показатель текстуры на 11,6-26,1 %, остаточные напряжения на 31,1-38,7 %, период кристаллической решётки практически не изменяется.

4. Выявлено, что ИЛО изменяет механические свойства покрытий. Показано, что проведение ИЛО вызывает рост микротвёрдости покрытий на 18-48,2 %,

повышение модуля Юнга на 10-13,7 %, снижение величины коэффициента отслоения на 46,2-59 %, критический коэффициент интенсивности напряжений практически не изменяется.

5. Разработаны конструкции МП, предназначенных для токарной обработки. Установлено, что ИЛО вызывает аналогичное изменение параметров структуры и механических свойств МП.

6. Применение ИЛО позволяет уменьшить интенсивность износа РИ с МП на 16-23 % в зависимости от условий резания и конструкции покрытий.

7. Новизна разработанных МП подтверждена патентами на изобретения – «Способы получения многослойных покрытий для режущего инструмента», включающих в себя нанесение многослойных покрытий и последующую ИЛО.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

В данной главе показаны результаты исследований влияния ИЛО на контактные характеристики процесса резания, тепловое и напряженное состояние режущего инструмента. Представлены результаты исследования работоспособности режущего инструмента с многослойными покрытиями после ИЛО, опытно-промышленные испытания и технико-экономическое обоснование использования многослойных покрытий после ИЛО.

5.1. Исследование контактных характеристик процесса резания и теплового состояния твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями после импульсной лазерной обработки

Исследование контактных характеристик процесса резания проводили при точении заготовок из стали 38ХГН по методике, изложенной в работах [150-152].

В исследованиях применяли пластины МК8 с покрытиями TiN , $TiN-TiZrN-TiZrAlN$, $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ до и после ИЛО.

Влияние ИЛО на контактные характеристики процесса резания представлены в табл. 5.1, 5.2, 5.3 и на рис. 5.1, 5.2. Из результатов видно, что использование ИЛО оказывает влияние на контактные характеристики процесса резания, при этом уровень воздействия определяется, составом покрытия, материалом инструментальной основы, режимами резания.

ИЛО приводит к изменению контактных характеристик процесса резания. Так для твердосплавного инструмента с покрытием TiN уменьшение длины контакта составило – 12%, коэффициент укорочения стружки – 9%, повышение угла сдвига – 7%. Составляющие силы резания P_z , P_y и P_x уменьшились на 3%, 5% и 8% соответственно (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Влияние ИЛО на контактные характеристики процесса резания при точении стали 38ХГН

№	Покрытие	C _γ , мм	K _L	β, град	μ	N, Н	F, Н	q _N , МПа	q _F , МПа	P _z , Н	P _y , Н	P _x , Н
1	TiN	0,65	1,92	26,4	0,506	508	257	737	373	497	278	145
2	TiN+ИЛО	0,58	1,76	28,3	0,490	492	241	799	392	482	264	134
3	TiN-TiZrN-TiZrAlN	0,71	1,98	25,7	0,450	517	233	687	309	508	272	101
4	TiN-TiZrN-TiZrAlN+ИЛО	0,63	1,8	27,8	0,486	500	218	748	327	492	258	93
5	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN	0,69	2,09	24,6	0,477	528	252	721	344	517	289	112
6	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN+ИЛО	0,61	1,85	27,2	0,475	506	239	781	369	496	277	101
V=170 м/мин, s=0,15 мм/об, t=0,5 мм												
7	TiN	0,47	1,76	28,3	0,484	198	96	597	289	198	102	68
8	TiN+ИЛО	0,33	1,55	31,3	0,450	182	82	780	351	183	87	61
9	TiN-TiZrN-TiZrAlN	0,55	1,88	26,9	0,567	207	118	533	302	205	119	81
10	TiN-TiZrN-TiZrAlN+ИЛО	0,38	1,70	29,1	0,554	184	102	684	379	183	100	77
11	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN	0,51	1,90	26,6	0,561	212	119	589	331	210	115	90
12	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN+ИЛО	0,39	1,78	28,1	0,541	195	106	708	383	194	102	82

Показано, что при точении стали 38ХГН на режиме $V=170$ м/мин, $s=0,15$ мм/об, $t=0,5$ мм происходит аналогичное изменение контактных характеристик (табл. 5.1).

Изменение контактных характеристик при резании инструментом с МП после ИЛО способствует перераспределению нормальных и касательных напряжений в режущем клине инструмента (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Влияние ИЛО на напряженное состояние режущего инструмента
при точении заготовок из стали 38ХГН

№	Покрытие	σ_N , МПа	τ_F , МПа
$V=130$ м/мин, $s=0,3$ мм/об, $t=0,75$ мм			
1	<i>TiN</i>	2557	579
2	<i>TiN</i> +ИЛО	2843	612
3	<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	2263	474
4	<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i> +ИЛО	2529	504
5	<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i>	2455	532
6	<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i> +ИЛО	2728	573
$V=170$ м/мин, $s=0,15$ мм/об, $t=0,5$ мм			
7	<i>TiN</i>	1764	431
8	<i>TiN</i> +ИЛО	2537	537
9	<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	1549	450
10	<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i> +ИЛО	2212	579
11	<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i>	1754	495
12	<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i> +ИЛО	2276	584

Напряженное состояние режущего клина инструмента оценивали по нормальным и касательным напряжениям, действующим на переднюю поверхность и напряжениям σ_x , действующим вдоль передней поверхности режущего клина инструмента.

Исследования показали, что ИЛО приводит к небольшому увеличению нормальных напряжений. Результаты расчета напряжений, действующих в режущем клине, показали, что изобары напряжений σ_x , в результате снижения полной длины контакта стружки с передней поверхностью в случае использования ИЛО, смещаются в сторону задней поверхности инструмента, а глубина их залегания

уменьшается (рис. 5.1). При резании с высокими скоростями резания, более низкими подачами и глубинами резания наблюдаются аналогичные закономерности изменения напряженного состояния в режущем клине твердосплавного инструмента.

Как видно из табл. 5.3 и рис. 5.2, применение ИЛО снижает мощность теплового потока на передней поверхности Q_n на 3,8-5,4 % и увеличивает на задней поверхности Q_z на 4,5-8,3 %. Уменьшение длины контакта стружки с передней поверхностью C_γ после ИЛО незначительно повышает интенсивность тепловых потоков по передней q_n и задней q_z поверхностям на 9,2-12,7 % и на 6,4-9,1 % в сопоставлении с инструментом без ИЛО. Изменение мощности тепловых потоков на передней Q_n и задней Q_z поверхностях и их интенсивностей q_n и q_z приводит к изменению контактных температур. Использование ИЛО приводит к снижению контактных температур на передней T_{ncp} и задней T_{zcp} поверхностях инструмента на 5,6-7,1 % и на 9,8-14,2 % соответственно по сравнению с инструментом без импульсной лазерной обработки.

Проведение ИЛО режущего инструмента с покрытиями влияет на температурные поля в его режущем клине. Как видно из рис. 5.2, снижение полной длины контакта стружки с передней поверхностью после ИЛО режущего инструмента с покрытием TiN , ведет к сдвигу изотерм температурного поля в направлении к задней поверхности, а уменьшение теплового потока по передней поверхности ведет к их сдвигу в направлении к передней поверхности.

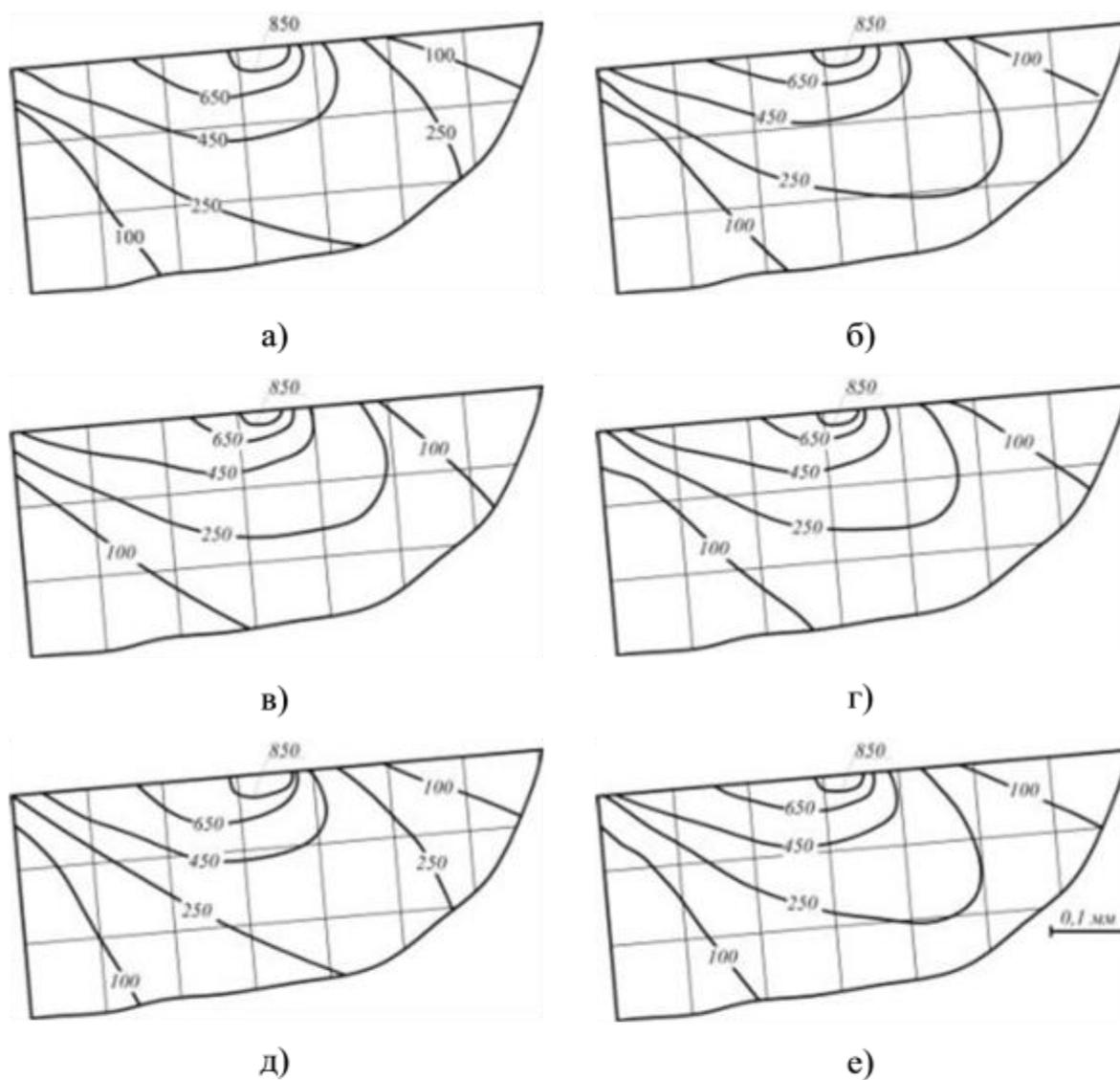


Рис. 5.1. Распределение напряжений σ_x (МПа) в режущем клине инструмента из твердого сплава МК8 [181]:

а – TiN ; б – TiN +ИЛО; в – $TiN-TiZrN-TiZrAlN$; г – $TiN-TiZrN-TiZrAlN$ +ИЛО;
 д – $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$; е – $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ +ИЛО;

$V=130$ м/мин, $s=0,3$ мм/об, $t=0,75$ мм

Таблица 5.3
Влияние ИЛО на показатели теплового состояния режущего инструмента при точении стали 38ХГН

№	Покрытие	Q _н , Вт	Q _з , Вт	q _н , МВт/м ²	q _з , МВт/м ²	T _{нсп} , °С	T _{зсп} , °С
1	TiN	18,3	-2,7	26,6	-50,6	984	431
2	TiN+ИЛО	17,8	-2,8	29	-53,6	923	392
3	TiN-TiZr-N-TiZr-AlN	17,3	-2,2	23	-41,6	913	455
4	TiN-TiZr-N-TiZr-AlN+ИЛО	16,6	-2,3	24,8	-43,9	864	410
5	TiN-TiZr-N-TiZr-NbAlN	18,3	-2,4	25	-45,3	971	473
6	TiN-TiZr-N-TiZr-NbAlN+ИЛО	17,6	-2,6	27,3	-49,4	917	416
V=170 м/мин, s=0,15 мм/об, t=0,5 мм							
7	TiN	10,7	-1,9	32,2	-53,5	821	414
8	TiN+ИЛО	10,2	-2,3	43,3	-64,4	769	366
9	TiN-TiZr-N-TiZr-AlN	12,2	-2,2	31,2	-60,8	885	426
10	TiN-TiZr-N-TiZr-AlN+ИЛО	11,2	-2,4	41,5	-68,2	836	373
11	TiN-TiZr-N-TiZr-NbAlN	12,5	-2,3	34,5	-64,6	925	436
12	TiN-TiZr-N-TiZr-NbAlN+ИЛО	11,6	-2,4	41,9	-68,8	864	397

Увеличение полной длины контакта стружки с передней поверхностью, характерное для МП $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ в сравнении с покрытием TiN , наряду с увеличением мощности источника тепла, приводит к сдвигу изотерм температурных полей в режущем клине инструмента в направлении от задней поверхности и режущих кромок инструмента и вглубь инструментального материала.

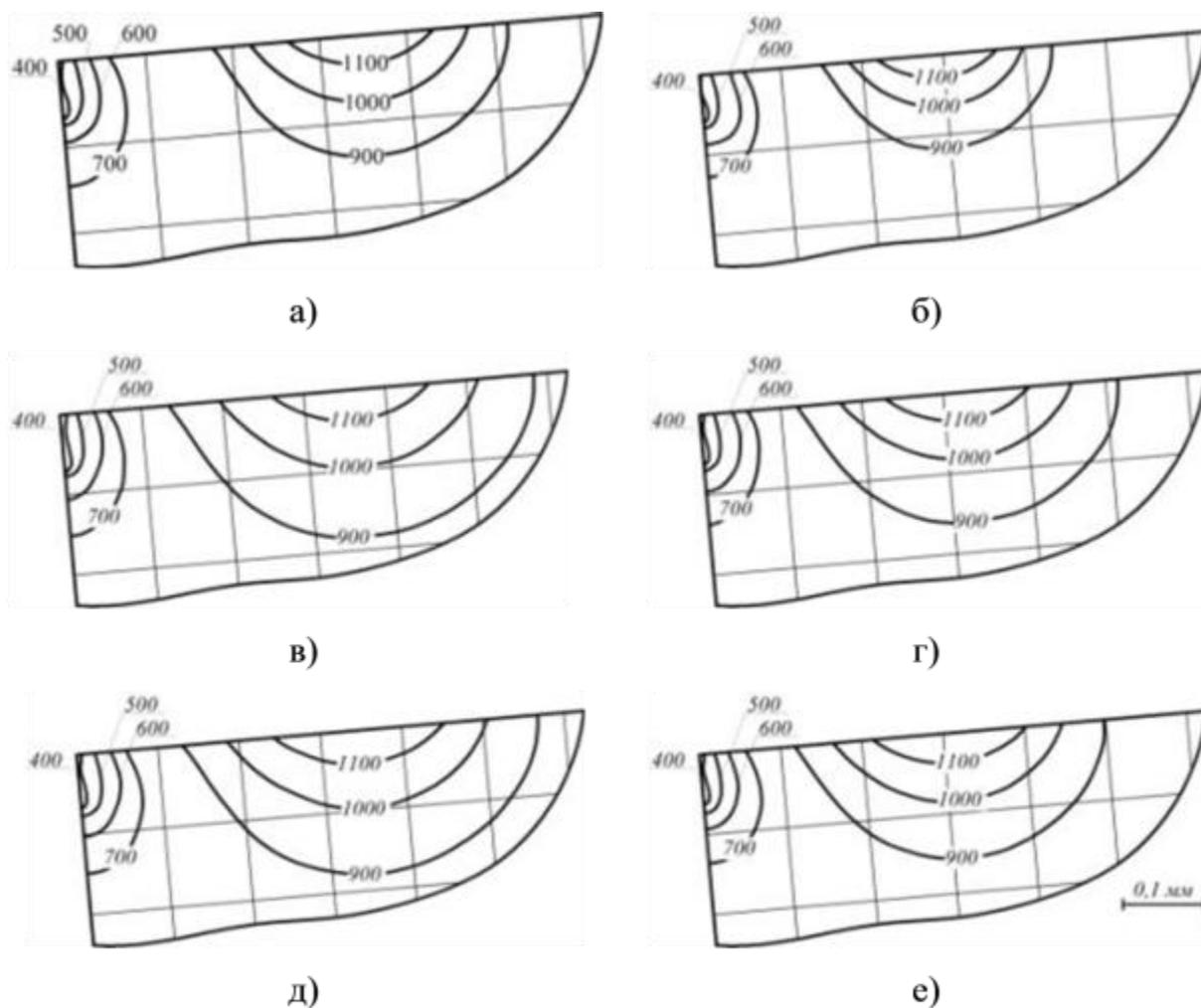


Рис. 5.2. Распределение температур ($^{\circ}C$) в режущем клине инструмента из твердого сплава МК8 [181]:

а – TiN ; б – TiN +ИЛО; в – $TiN-TiZrN-TiZrAlN$; г – $TiN-TiZrN-TiZrAlN$ +ИЛО;
 д – $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$; е – $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ +ИЛО;

$V=130$ м/мин, $s=0,3$ мм/об, $t=0,75$ мм

5.2. Исследование работоспособности твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями после импульсной лазерной обработки

Исследование работоспособности твердосплавных пластин МК8 с МП после ИЛО проводили при продольном точении заготовок из стали 38ХГН и 12Х18Н10Т. Использовали следующие многослойные покрытия: $TiN-TiZrN-TiZrAlN$, $TiN-TiZrN-TiNbAlN$, $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$.

По результатам исследований были построены графики периода стойкости режущего инструмента с МП после ИЛО от скорости резания рис. 5.3, а, и подачи рис. 5.3, б.

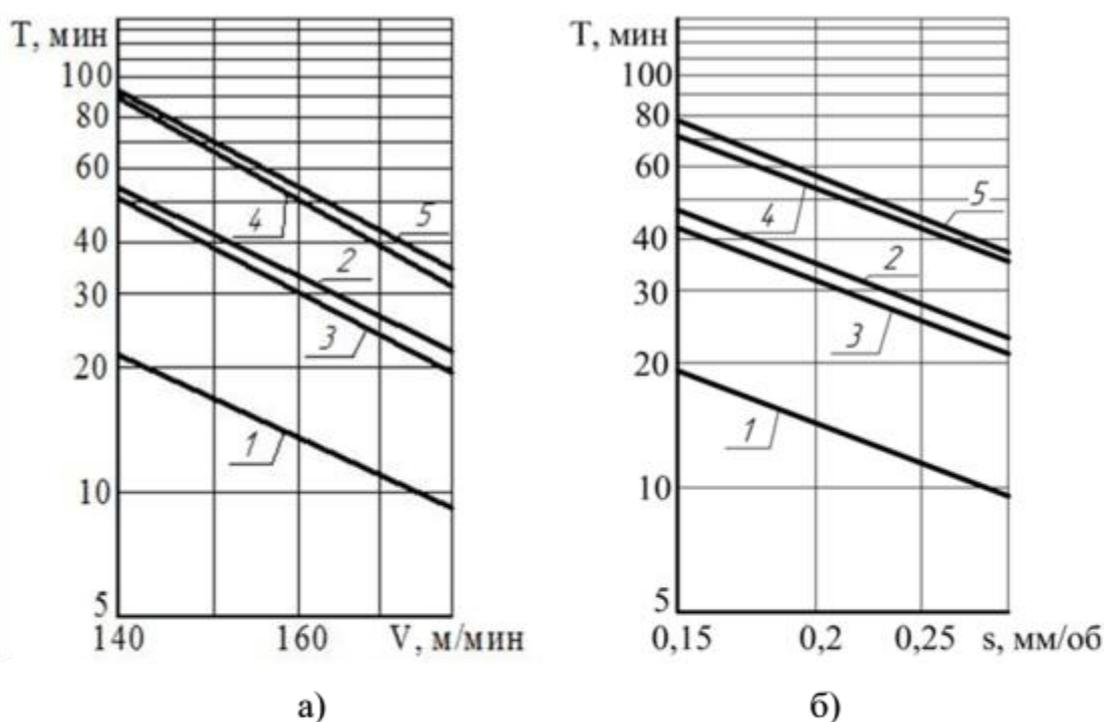


Рис 5.3. Влияние скорости резания (а) и подачи (б) на период стойкости пластин МК8 при точении заготовок из стали 38ХГН:
 $s=0,21$ мм/об, $t=0,5$ мм (а); $V=160$ м/мин, $t=0,5$ мм (б);
 1– TiN ; 2, 5– $TiN-TiZrN-TiNbAlN$; 3, 4– $TiN-TiZrN-TiZrAlN$;
 1,2,3 и 4,5-соответственно без и с ИЛО

Как следует из полученных данных, использование МП с ИЛО увеличивает период стойкости инструмента в 1,48-1,7 раза в зависимости от их конструкции, в сравнении с покрытием TiN в 2,7-4,2 раза. Наибольшим периодом стойкости обладает МП $TiN-TiZrN-TiNbAlN$.

При продольном точении заготовок из стали 38ХГН (рис. 5.4) применение МП $TiZrN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$ +ИЛО повышает период стойкости в сравнении с МП без ИЛО в 1,5 раза. Применение МП $TiN-TiZrN-TiZrCrN$ +ИЛО и $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ +ИЛО повышает период стойкости режущего инструмента в 1,37 и 1,53 раза соответственно по сравнению с МП без ИЛО. Наблюдаемое увеличение периода стойкости РИ связано с уменьшением теплонапряженности режущего клина в процессе резания и повышением его формоустойчивости при использовании ИЛО, а также с повышением механических свойств материала покрытия в результате воздействия ИЛО.

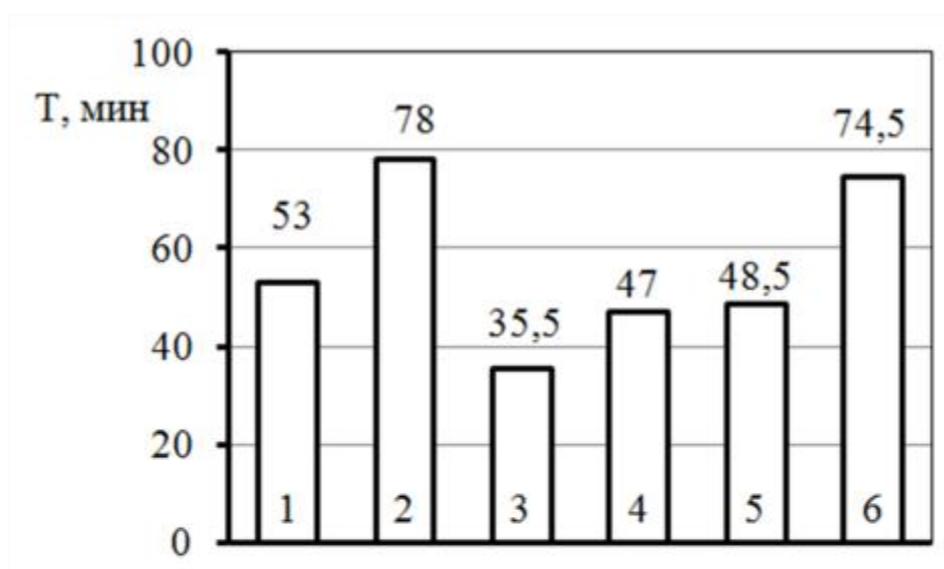


Рис.5.4. Влияние конструкции многослойных покрытий на период стойкости пластин МК8 при точении заготовок из стали 38ХГН:

$$V=180 \text{ м/мин, } s=0,15 \text{ мм/об, } t=0,5 \text{ мм}$$

1,2– $TiZrN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$; 3,4– $TiN-TiZrN-TiZrCrN$;

5,6– $TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$; 1,3,5 и 2,4,6-соответственно без и с ИЛО

При продольном точении заготовок из стали 12X18H10T (рис. 5.5) эффективность МП ниже. Так, МП $TiZrN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$ +ИЛО повышает период стойкости в 1,28 раза, по сравнению с МП $TiZrN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$ без ИЛО. Применение МП $TiN-TiZrN-TiNbAlN$ +ИЛО и $TiN-TiZrN-TiZrAlN$ +ИЛО увеличивает период стойкости РИ в 1,39 раза в сопоставлении с МП без ИЛО.

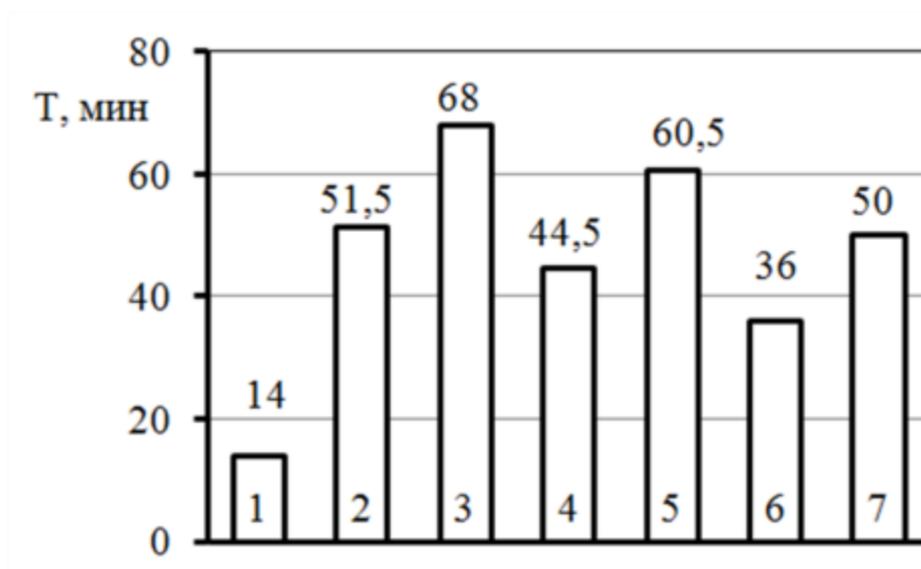


Рис. 5.5. Влияние конструкции многослойных покрытий на период стойкости пластин МК8 при точении заготовок из стали 12X18H10T:

$$V=140 \text{ м/мин}, s=0,3 \text{ мм/об}, t=0,5 \text{ мм}$$

1 – TiN ; 2,3– $TiZrN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$; 4,5– $TiN-TiZrN-TiNbAlN$;
6,7– $TiN-TiZrN-TiZrAlN$; 1,2,4,6 и 3,5,7-соответственно без и с ИЛО

Установлено, что максимальная эффективность МП с учётом увеличения стойкости твердосплавного режущего инструмента имеет место при резании стали 38ХГН, что связано с менее теплонапряженным состоянием режущего клина при резании стали этой группы обрабатываемости в сравнении со сталью 12X18H10T.

В табл. 5.4 приведены математические модели периода стойкости РИ из твёрдого сплава МК8 с покрытиями без и с ИЛО при продольном точении заготовок из стали 38ХГН.

Математические модели периода стойкости режущего
инструмента из твёрдого сплава МК8

Упрочняющая обработка	Математическая модель
<i>TiN</i>	$T = \frac{173,46 \cdot 10^6}{V^{3,53} \cdot S^{1,02}}$
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	$T = \frac{599,86 \cdot 10^6}{V^{3,6} \cdot S^{1,02}}$
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i> +ИЛО	$T = \frac{4450,06 \cdot 10^6}{V^{3,91} \cdot S^{1,06}}$
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	$T = \frac{2141,35 \cdot 10^6}{V^{3,87} \cdot S^{1,02}}$
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i> +ИЛО	$T = \frac{18507,09 \cdot 10^6}{V^{4,19} \cdot S^{1,01}}$

Анализ полученных математических моделей позволяет отметить, что использование РИ с МП после ИЛО при продольном точении заготовок из стали 38ХГН целесообразно применять на высоких скоростях резания в сопоставлении с РИ без ИЛО.

5.3. Опытные-промышленные испытания

В опытно-промышленных испытаниях использовали пластины из твёрдого сплава МК8 с МП *TiN-TiZrN-TiZrNbAlN*, *TiN-TiZrN-TiZrAlN*, *TiN-TiZrN-TiNbAlN* после ИЛО. Испытания проводили в производственных условиях АО «УКБП» и ООО «УАЗ».

Для сравнения результатов определялся коэффициент повышения стойкости инструмента с разработанными МП после ИЛО по отношению к режущему инструменту с МП без ИЛО и по отношению к базовому покрытию TiN. Результаты испытаний представлены в прил. 1, 2, 3. и табл. 5.5, 5.6, 5.7.

В результате проведенных испытаний установлено, что МП после ИЛО повышают период стойкости при продольном точении заготовок из сталей

30ХГСА, 20Х13, 5ХНМ. Как видно из приведенных данных (табл. 5.5), применение МП $TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$ +ИЛО позволило увеличить период стойкости в сопоставлении с покрытием TiN в 3,79 раза и в 1,53 раза в сопоставлении с МП $TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$ без ИЛО.

Таблица 5.5

Результаты опытно-промышленных испытаний на АО «УКБП»
при резании заготовок из стали 30ХГСА

№	Покрытие	Режимы резания	Коэффициент повышения стойкости по отношению к TiN	Коэффициент повышения стойкости по отношению к МП без ИЛО
1	TiN	n=1120 об/мин, V=140 м/мин, s=0,15 мм/об, t=0,5 мм	1	-
2	$TiN-TiZrN-TiNbAlN$		2,47	1
3	$TiN-TiZrN-TiNbAlN$ +ИЛО		3,79	1,53
4	$TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ +ИЛО		3,68	-
5	$TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN$ +ИЛО		3,92	-

Таблица 5.6

Результаты опытно-промышленных испытаний на АО «УКБП»
при резании заготовок из стали 20Х13

№	Покрытие	Режимы резания	Коэффициент повышения стойкости по отношению к TiN	Коэффициент повышения стойкости по отношению к МП без ИЛО
1	TiN	n=560 об/мин, V=100 м/мин, s=0,3 мм/об, t=0,5 мм	1	-
2	$TiN-TiZrN-TiNbAlN$		1,96	1
3	$TiN-TiZrN-TiNbAlN$ +ИЛО		2,72	1,39
4	$TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$ +ИЛО		2,82	-

Таблица 5.7

Результаты опытно-промышленных испытаний на ООО «УАЗ»
при резании заготовок из стали 5ХНМ

№	Покрытие	Режимы резания	Коэффициент повышения стойкости по отношению к <i>TiN</i>	Коэффициент повышения стойкости по отношению к МП без ИЛО
1	<i>TiN</i>	n=250 об/мин, V=130 м/мин, s=0,2 мм/об, t=0,5 мм	1	-
2	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>		2,47	1
3	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i> +ИЛО		3,65	1,48
4	<i>TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN</i> +ИЛО		2,74	1
5	<i>TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN</i> +ИЛО		4,27	1,56

Как видим, опытно-промышленные испытания показали высокую эффективность применения ИЛО инструмента с МП. Технологические рекомендации по осаждению МП с последующей ИЛО переданы АО «УКБП» для использования в производственных условиях (приложение 4). Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 (приложение 5).

5.4. Техничко-экономическое обоснование применения импульсной лазерной обработки для повышения работоспособности твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями

Включение ИЛО в технологический процесс изготовления режущего инструмента неизбежно повлечёт к его подорожанию. Поэтому выбор состава покрытия и ИЛО следует проводить с учётом затрат, связанных с подготовкой режущего инструмента к ИЛО и осаждению покрытия, стоимости эксплуатации оборудования, заработной платы рабочих и инженерно-технических работников, затрат на

амортизацию и ремонт оборудования и помещений. Для определения себестоимости осаждения покрытия воспользовались методикой [182].

Величина текущих затрат определяется:

$$S_{\delta/ч} = \frac{S}{\Phi}, \quad (5.1)$$

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

Суммарные текущие затраты, связанные с нанесением покрытий определяется:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6, \quad (5.2)$$

где S_1 – стоимость основных осаждаемых материалов, руб.; S_2 – стоимость вспомогательных материалов, инструмента и технологической оснастки, руб; S_3 – транспортные и заготовительные расходы, руб; S_4 – заработная плата рабочих и служащих, руб; S_5 – стоимость электроэнергии, руб; S_6 – затраты на текущий ремонт и амортизацию оборудования и помещений, руб.

Результаты расчета дополнительных затрат, связанных с осаждением покрытия на твердосплавные пластины представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Результаты расчета затрат, связанных с осаждением покрытий

Покрытие	Статьи затрат, тыс. руб						
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	$S_{\delta/ч}$
<i>TiN</i>	16,2	10,3	75,8	174,6	134,8	176,3	0,268
<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i>	24,5						0,272
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	23,3						0,271
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	22,3						0,271

В табл. 5.8 показана стоимость одного часа работы установки при осаждении МП *TiN-TiZrN-TiZrNbAlN*, *TiN-TiZrN-TiNbAlN* и *TiN-TiZrN-TiZrAlN*

фактически не отличается от покрытия TiN , расхождение составляет не более 2,1 %.

Дополнительные затраты, связанные с осаждением покрытий рассчитываются:

$$S_{II} = \frac{S_{\sigma/\text{ч}} \cdot \tau_{\text{ц}}}{N_{II}}, \quad (5.3)$$

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

Результаты расчета дополнительных затрат S_{II} , связанные с осаждением покрытия на одну пластину из твёрдого сплава МК8 показаны в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Результаты расчета дополнительных затрат, связанные с осаждением покрытия на одну пластину из твёрдого сплава МК8

Покрытие	TiN	$TiN-TiZrN-TiZrNbAlN$	$TiN-TiZrN-TiNbAlN$	$TiN-TiZrN-TiZrAlN$
S_{II} , руб	222	245	244	244

Согласно результатам расчета величина дополнительных затрат при осаждении МП изменяется на 9,9 – 10,3 % в сопоставлении с затратами на покрытие из TiN . Поскольку общая толщина МП больше, то требуется больше времени для осаждения покрытия.

Рассчитаем дополнительные затраты, связанные с ИЛО режущего инструмента:

$$S_{II}' = \frac{S'_{\sigma/\text{ч}} \cdot \tau'_{\text{ц}}}{N'_{II}}, \quad (5.4)$$

где $S'_{\sigma/\text{ч}}$ – текущие затраты, отнесенные к одному часу работы, руб/час; $\tau'_{\text{ц}}$ – время ИЛО одного инструмента, час; N'_{II} – количество обрабатываемого инструмента, штук.

Суммарные текущие затраты, приходящиеся за год эксплуатации лазерной установки:

$$S' = S'_1 + S'_2 + S'_3 + S'_4 + S'_5 \quad (5.5)$$

где S'_1 – стоимость вспомогательных материалов, инструмента и технологической оснастки, руб.; S'_2 – транспортные и заготовительные расходы, руб.; S'_3 – заработная плата рабочих и служащих, руб.; S'_4 – стоимость электроэнергии, руб.; S'_5 – затраты на текущий ремонт, амортизацию оборудования и помещений, руб.

Результаты расчета дополнительных затрат, связанные с ИЛО твердосплавных пластин, представлены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Результаты расчета дополнительных затрат, связанные с ИЛО
твердосплавных пластин

Статьи затрат, тыс. руб.						
S'_1	S'_2	S'_3	S'_4	S'_5	$S'_{б/ч}$	S'_{II}
2,2	7,5	108,4	27,6	44,8	0,087	0,022

Стоимость ИЛО зависит от размера обрабатываемой поверхности (размера площади контакта инструмента).

Учитывая, что стоимость инструмента после ИЛО будет равна сумме затрат, связанных с нанесением покрытия на инструмент, и затрат, связанных с ИЛО, данные расчета сведены в табл. 5.11.

Для расчета себестоимости обработки одной детали режущим инструментом с покрытием воспользуемся методикой работы [104].

Основные затраты, связанные с изготовлением одной детали:

$$q = q_c + q_u + q_n + q_z, \quad (5.6)$$

где q_c , q_u , q_n , q_z – соответственно затраты на станок, инструмент, приспособление и заработную плату рабочих.

Таблица 5.11

Результаты расчета стоимости РИ после ИЛО

Покрытие	Стоимость пластины, руб	Затраты на нанесение покрытия, S_{II} , руб	Затраты на импульсную лазерную обработку S'_{II} , руб	Стоимость инструмента S''_{II} , руб
<i>TiN</i>	200	222	-	422
<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i>	200	245	-	445
<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN+ИЛО</i>	200	245	22	467
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	200	244	-	444
<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN+ИЛО</i>	200	244	22	466
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN</i>	200	244	-	444
<i>TiN-TiZrN-TiZrAlN+ИЛО</i>	200	244	22	466

Величину затрат определим:

- затраты на станок:

$$q_c = \frac{Q}{M \cdot \Pi}, \quad (5.7)$$

- затраты на режущий инструмент:

$$q_u = \frac{Q'}{N}, \quad (5.8)$$

- затраты на приспособление:

$$q_n = \frac{Q_1}{\Pi}, \quad (5.9)$$

- затраты на зарплату:

$$q_z = \frac{E}{\Pi}, \quad (5.10)$$

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

Преобразуя формулу (5.6) с учётом выражений (5.7) – (5.10), получаем:

$$q = \left(\frac{Q}{M} + Q_1 + E \right) \cdot \frac{1}{P} + \frac{Q'}{N}, \quad (5.11)$$

Таким образом, экономический эффект при использовании инструмента с МП определялся как разность себестоимости обработки инструмента с покрытием TiN и себестоимости обработки инструмента с МП прошедшим ИЛО. Результаты расчета экономического эффекта приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Экономическая эффективность использования твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями

Обрабатываемый материал	Покрывтие	Годовой экономический эффект (на 1 станок), руб
30ХГСА	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	53610
	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i> +ИЛО	66300
	<i>TiN-TiZrN-TiZrNbAlN</i> +ИЛО	65580
20Х13	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	44120
	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i> +ИЛО	56960
5ХНМ	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i>	53610
	<i>TiN-TiZrN-TiNbAlN</i> +ИЛО	65380

Как видно из табл. 5.12, использование МП после ИЛО позволяет получить экономический эффект при механической обработке заготовок из конструкционных легированных сталей. Так, для операции точения заготовок из стали 30ХГСА ожидаемый годовой экономический эффект составил 66300 руб. в сравнении с инструментом без ИЛО. Использование инструмента с МП *TiN-TiZrN-TiNbAlN*+ИЛО при резании заготовки из стали 30ХГСА способствует повышению экономической эффективности в 1,2 раза по сравнению с МП *TiN-TiZrN-TiNbAlN* без ИЛО.

5.5. Выводы

1. Развита представления о влиянии ИЛО на контактные характеристики и тепловое состояние инструмента с покрытиями. Показано, что проведение ИЛО изменяет контактные характеристики твердосплавных пластин с МП – уменьшает полную длину контакта стружки с передней поверхностью, коэффициент укорочения стружки, составляющие силы резания.

2. Установлено влияние ИЛО на тепловое состояние инструмента из твердого сплава. Показано, что применение ИЛО приводит к уменьшению температур на передней и на задней поверхностях режущего клина.

3. Установлено, что применение ИЛО позволяет повысить период стойкости твердосплавных пластин МК8 с МП в 1,48-1,7 раза в зависимости от их конструкции, а по сравнению с покрытием TiN - в 2,7-4,2 раза. Наибольший период стойкости имеют пластины МК8 с МП $TiN-TiZrN-TiNbAlN$. Наибольшее повышение периода стойкости режущего инструмента имеет место при обработке заготовок из стали 38ХГН, несколько меньшее - из стали 12Х18Н10Т.

4. Эффективность ИЛО твердосплавных пластин МК8 с МП подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях АО «УКБП» и ООО «УАЗ». Установлено повышение периода стойкости инструмента в 1,39 - 1,56 раза по сравнению с РИ без ИЛО и в 2,47 - 4,27 раза по сравнению с РИ с покрытием TiN в зависимости от материала заготовок и режима обработки. Технологические рекомендации по осаждению МП с последующей ИЛО переданы АО «УКБП» для использования в производственных условиях. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

5. Техничко-экономические расчеты показали, что использование РИ с МП после ИЛО способствует снижению себестоимости механической обработки за счёт снижения расходов на РИ. Годовой экономический эффект от использования инструмента с МП после ИЛО на одной операции точения в производстве может составить до 66300 рублей на один станок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали высокую эффективность ИЛО для повышения работоспособности инструмента из твёрдого сплава. Установлены закономерности влияния ИЛО на структурные параметры, физико-механические, адгезионные свойства покрытия, тепловое и напряженное состояния режущего клина инструмента и самого покрытия и, следовательно, управлять интенсивностью износа и работоспособностью инструмента.

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

1. Разработана математическая модель воздействия ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа», позволяющая оценить её тепловое состояние и выявить взаимосвязь характеристик ИЛО с параметрами структуры и механическими свойствами поверхностного слоя композиции.

2. На основе анализа разработанной математической модели было отмечено, что изменение теплофизических свойств слоёв МП значительно оказывает влияние на распределении температур в композиции. С повышением количества слоёв влияние теплофизических свойств каждого слоя на распределение температур в композиции становится незначительным. Направленно выбирая теплофизические свойства материалов слоёв, можно управлять формированием температурного поля в объеме всей композиции.

3. Показано, что температура на поверхности композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» зависит от теплофизических констант инструментальной основы и покрытия, основными из которых являются теплоемкость, теплопроводность, коэффициент термического линейного расширения, температуропроводность.

4. Проведено численное моделирование процесса воздействия ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа» с использованием программного комплекса Ansys Mechanical APDL. Используя сопряженную задачу теплопроводности и напряженного состояния, установлены закономерности

связи теплового и напряженного состояния композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» с параметрами ИЛО, теплофизическими характеристиками твердосплавной основы и покрытий, составом и конструкцией покрытий. Результаты исследований, полученные численным моделированием, хорошо согласуются с данными, полученными по разработанной математической модели.

5. Установлено, что температура на поверхности инструментальной основы и на ее границе с покрытием в большей степени зависит от теплопроводности инструментальной основы и в меньшей степени от теплопроводности покрытий. Напряжения, возникающие в результате ИЛО, на поверхности инструментальной основы определяются её теплопроводностью, а для композиций с покрытиями дополнительно разницей значений коэффициентов термического линейного расширения инструментальной основы и покрытия и возрастают по мере её увеличения. Критическая плотность мощности ИЛО для композиции «многослойное покрытие-инструментальная основа» зависит от теплофизических свойств инструментальной основы и покрытий и снижается по мере увеличения разности их коэффициентов термического линейного расширения.

6. Адекватность математической модели и результаты численного моделирования процесса воздействия ИЛО на композицию «покрытие-инструментальная основа» подтверждены экспериментальными исследованиями.

7. На основе результатов, полученных аналитическим решением и численным моделированием, определены значения критической плотности мощности ИЛО, обеспечивающие необходимые механические свойства поверхностного слоя твердосплавной основы и композиций с однослойными и многослойными покрытиями. Показано, что в качестве критерия выбора критической плотности мощности ИЛО следует принять критерий K_H , учитывающий величину напряжений, возникающих на границе покрытия с инструментальной основой, как более объективно характеризующего влияние ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа».

8. Выбраны и обоснованы составы слоёв МП с учётом компоновочной схемы установки для нанесения покрытий и конструкции катодов. Показано влияние

конструкции катодов и компоновочной схемы установки на изменение параметров структуры и механических свойств выбранных покрытий. Разработаны конструкции многослойных покрытий, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

9. Установлено влияние ИЛО на структурные параметры покрытий. Показано, что в результате ИЛО повышается полуширина рентгеновской линии на 14,7-32,1 %, снижается параметр текстуры на 11,6-26,1 %, снижаются остаточные напряжения на 18-48,2 %, период кристаллической решётки практически не изменяется. Выявлено, что ИЛО изменяет механические свойства покрытий. Показано, что проведение ИЛО вызывает рост микротвёрдости покрытий на 10-12,8 %, повышение модуля Юнга на 10-13,7 %, снижение величины коэффициента отслоения на 46,2-59 %, критический коэффициент интенсивности напряжений практически не изменяется.

10. Показано, что применение ИЛО снижает интенсивность износа твердосплавных пластин с многослойными покрытиями на 16-23 % в зависимости от условий резания и конструкции покрытий.

12. Установлено влияние ИЛО на параметры контактных процессов и напряженное состояние режущего клина инструмента. Выявлено уменьшение длины контакта стружки с передней поверхностью, коэффициент укорочения стружки, коэффициент трения и сил, действующих на режущий клин, а также увеличение нормальных и касательных напряжений в режущем клине при резании инструментом, прошедшим ИЛО.

13. Установлено влияние ИЛО на тепловое состояние инструмента из твёрдого сплава. Показано, что использование ИЛО приводит к уменьшению температур на 5,6-14,2% на передней и на задней поверхностях режущего клина.

14. Установлено, что применение ИЛО позволяет повысить период стойкости твердосплавных пластин МК8 с МП в 1,48-1,7 раза в зависимости от их конструкции, а по сравнению с покрытием TiN - в 2,7-4,2 раза. Наибольший период стойкости имеют пластины МК8 с МП $TiN-TiZrN-TiNbAlN$. Наибольшее повыше-

ние периода стойкости режущего инструмента имеет место при обработке заготовок из стали 38ХГН, несколько меньшее - из стали 12Х18Н10Т.

15. Эффективность ИЛО твердосплавных пластин МК8 с МП подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях АО «УКБП» и ООО «УАЗ». Установлено повышение периода стойкости инструмента в 1,39 - 1,56 раза по сравнению с РИ без ИЛО и в 2,47 - 4,27 раза по сравнению с РИ с покрытием TiN в зависимости от материала заготовок и режима обработки. Технологические рекомендации по осаждению МП с последующей ИЛО переданы АО «УКБП» для использования в производственных условиях. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

16. Техничко-экономические расчеты показали, что использование РИ с МП после ИЛО способствует снижению себестоимости механической обработки за счёт снижения расходов на РИ. Годовой экономический эффект от использования инструмента с МП после ИЛО на одной операции точения в производстве может составить до 66300 рублей на один станок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.
2. Развитие науки о резании металлов. Зорев Н. Н., Грановский Г. И., Ларин М. Н. и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
3. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
4. Армарего И. Дж., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
5. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
6. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
7. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
8. Верещака А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями/ А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
9. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
10. Хокинг М, Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
11. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 123 с.
12. Пинахин, И.А. Повышение эксплуатационного ресурса твердосплавных режущих инструментов методом объемного импульсного лазерного упрочнения/ И.А. Пинахин, В.В. Иванов, В.Г. Копченков, В.А. Черниговский// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №10. – С. 11 – 15.

13. Волосова, М.А. О выборе оптимального метода модификации поверхности режущего инструмента исходя из его служебного назначения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №12. – С. 12 – 16.
14. Волосова, М.А. Систематизация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента и алгоритм их выбора/ М.А. Волосова, А.А. Туманов// Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. №3. – С. 78 – 83.
15. Гончаров, В.С. Упрочнение лезвийного инструмента с созданием эффекта самозатачивания / В.С. Гончаров, П.А. Мельников, А.Н. Попов, Е.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – т. 15. – №4. – С. 233-235.
16. Верещака, А.С. Резание материалов: учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высш. шк., 2009. – 535 с.
17. Верещака, А.С. Функциональные покрытия для режущего инструмента А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 28 – 37.
18. Табаков, В.П. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента: учебное пособие / В. П. Табаков, С. Н. Григорьев, А. С. Верещака. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 196 с.
19. Шиняев, А. Я. Механизмы упрочнения и разработка безвольфрамовых твердых сплавов нового типа. // Вестник машиностроения. –1998. – №1. – С.16 – 19.
20. Салманов, Н. С. Упрочнение твердосплавного инструмента / Н. С. Салманов // СТИН. – 1997. – №6. – С. 24 – 28.
21. Гадалов, В.Н.. Повышение износостойкости режущего инструмента способом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Д.Н. Романенко, В.В. Стаинов, С.В. Шестафина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №1. – С. 21 – 25.
22. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
23. Кабалдин, Ю. Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных материалов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.

24. Кабалдин, Ю. Г. Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом функционала электронной плотности / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Серый // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 32-36.
25. Кабалдин, Ю.Г. Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания и диагностике твердосплавного режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, В.О. Зотов // Вестник машиностроения. – 2016. - №5. – С. 79 – 85.
26. Табаков, В. П. Технологические методы нанесения износостойких покрытий режущего инструмента: учебное пособие / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 90 с.
27. Кабалдин, Ю.Г. Наноструктурирование контактных поверхностей твердосплавного инструмента при резании / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин, С.В. Серый, Д.А. Шатагин // Вестник машиностроения. – 2014. - №7. – С. 74 – 79.
28. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
29. Григорьев, С.Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова. – Москва : МГТУ Станкин, 2007. – 324 с.
30. Григорьев, С.Н. Энергоэффективность методов нанесения покрытий на инструмент: монография. – Москва: МГТУ Станкин, 2012. – 191 с.
31. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибологический аспект): монография - ДГТУ. – Ростов н/Д, 2004. – 323 с.
32. Рыжкин, А. А. Поверхностное лазерное упрочнение режущего инструмента: моногр. / А. А. Рыжкин, Г. И. Бровер, В. Н. Пустовойт. - ДГТУ. - Ростов н/Д, 1999. - 126 с.
33. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект). - Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2004. - 322 с.

34. Рыжкин, А. А. Трибохимический аспект влияния износостойких покрытий на износ при резании / А.А. Рыжкин, В.В. Зотов, Д.П. Глоба, Ф.А. Висторопская // Вестник ДГТУ. – 2010. - №6 (49). – С. 844 – 856.
35. Маслов, А.Р. Перспективные высокие технологии //Справочник. Инженерный журнал: приложение №1. – 2008. - №1. – С. 2 – 24.
36. Верещака, А.С. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №9. – С. 9 – 18.
37. Волосова, М.А. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровий для применения в инструментальном производстве / М.А. Волосова, С.Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 37 – 42.
38. Соболев, О.В. Повышение функциональных свойств вакуумно-дуговых TiN-покрытий / О.В. Соболев, А.А. Андреев, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, В.А. Столбовой, В.Е. Фильчиков, Н.В. Киданова, Г.В. Антоненкова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №12. – С. 24 – 30.
39. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
40. Вершина, А. К. Влияние технологических параметров процесса осаждения из сепарированного плазменного потока TiN – покрытий на их защитные свойства / А. К. Вершина, С. Д. Изотова, А. А. Пителько // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 3. – С. 65 – 68.
41. Чихранов, А. В. Исследование влияния технологических параметров нанесения покрытий на основе нитрида титана и кремния на его свойства // Тезисы докладов XXXVIII научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях» (26 января – 1 февраля 2004 года). Часть 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 44.
42. Табаков, В. П. Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износо-

стойкого покрытия: дисс. ... докт. тех. наук: 05.03.01 / Табаков Владимир Петрович. – Ульяновск, 1992 – 641 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

51. Андреев, А.А. Особенности получения высокотвердых наноструктурных покрытий из нитрида молибдена вакуумно-дуговым методом / А.А. Андреев, С.Н. Григорьев, О.В. Соболев, В.Ф. Горбань, М.А. Волосова, В.А. Столбовой, И.В. Сердюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №1. – С. 14 – 20.

52. Андриевский, Р. А. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: Справочник / Р. А. Андриевский, И. И. Спивак. – Челябинск.: Metallurgy, 1989. – 368 с.
53. Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин. – М.: Metallurgy, 1987. – 792 с.
54. Кунченко, В.В. Карбонитриды титана, полученные вакуумно-дуговым осаждением / В.В. Кунченко, А.А. Андреев // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. – №2. – С. 116 – 120.
55. Табаков, В. П. Применение покрытий на основе карбонитридов титана для повышения стойкости режущего инструмента / В. П. Табаков // СТИН. – 1991. – №11. – С.18 – 19.
56. Изучение физики процессов резания материалов для решения практических задач производства: отчет о НИР / рук. И. П. Третьяков. – Москва, 1986. – 71 с.
57. Табаков, В. П. Повышение работоспособности режущего инструмента путем направленного изменения состава износостойкого покрытия / В. П. Табаков, В. И. Езерский, Ю. В. Полянсков // Вестник машиностроения. –1989. – №12. – С. 43 – 46.
58. Разработка и внедрение технологии изготовления режущего инструмента с композиционными покрытиями, получаемыми методом КИБ: отчет о НИР. Инв. № 02.84.0076872. – 1985. – 27 с.
59. Моисеев, В. Ф. Влияние азота на структуру и свойства упрочняющих поверхностных покрытий на основе титана / В. Ф. Моисеев, Г. С. Фукс-Рабинович, Г. К. Досбаева // Физика и химия обработки материалов –1991. – №2. – С. 118 – 121.
60. Верещака, А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями: учебное пособие / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 144 с.
61. Верещака, А. С. Основные аспекты применения и совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака // СТИН. – 2000. – №9. – С. 33 – 40.

62. Табаков, В. П. Исследование структуры и механических свойств многокомпонентных износостойких покрытий / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // Современные тенденции развития автомобилестроения в России: сб. трудов всероссийской научно-тех. конф. с междун. участием: в 5 т. Т. 4. – Тольятти: ТГУ, 2004. – С. 76 – 80.
63. Табаков, В. П. Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий, полученных из составных катодов / В. П. Табаков, А. В. Чихранов, С. С. Порохин // Материалы и технологии XXI века: Сборник статей II Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2004. – С. 21 – 24.
64. Чихранов, А. В. Повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки и применения многоэлементных износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Чихранов Алексей Валерьевич. – Ульяновск, 2006. – 314 с.
65. Табаков, В. П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. В. Чихранов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.
66. Табаков, В. П. Износостойкие покрытия на основе нитрида титана, легированного железом и алюминием, для режущих пластин / В. П. Табаков // СТИН. – 1991. – №11. – С. 18 – 19.
67. Чихранов, А. В. Исследование контактных характеристик режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе нитридов тройных систем // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении (МКТМ-2005): материалы III междун. научно-тех. конф. – Тюмень: изд-во ООО Компании «Феликс», 2006. – С. 23 – 24.
68. Табаков, В. П. Разработка износостойких покрытий режущего инструмента на основе нитрида титана и кремния / В.П. Табаков, А.В.Чихранов, И.Н. Гатауллов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №10. – С. 28 – 33.

69. Енек, М. Влияние покрытий на базе многокомпонентных нитридов металлов на стружкообразование при точении улучшенных сталей / М. Енек, Е.Э Фельдштейн // Вестник машиностроения. –2012. – №9. – С. 71 – 75.
70. Табаков, В.П. Применение инструмента с износостойкими покрытиями на операциях резьбонарезания и отрезки заготовок / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов // Вестник машиностроения. –2016. – №4. – С. 59 – 64.
71. Табаков, В.П. Взаимосвязь состава износостойких покрытий с параметрами структуры, механическими свойствами и функциональными параметрами процесса резания / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // Вестник машиностроения. –2017. – №11. – С. 76 – 80.
72. Азаренков, Н. А. Вакуумно-плазменные покрытия на основе многоэлементных нитридов / Н. А. Азаренков, О. В. Соболев, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Д. А. Колесников, П. В. Турбин, И. Н. Торяник // Металлофизические новейшие технологии. – 2013. – т. 35. - №8. – С. 1061 – 1084.
73. Касьянов, С.В. Экспресс-оценка качества износостойких покрытий для режущих инструментов в заводских условиях / С.В. Касьянов, А.Г. Кондрашов, Д.Т. Сафаров // Вестник машиностроения. –2017. – №8. – С. 81 – 84.
74. Табаков, В.П. Повышение работоспособности режущего инструмента путем применения многоэлементных покрытий на основе нитридов титана, алюминия и кремния / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. - №3. – С. 10 – 14.
75. Волков, Д.И. Применение модифицированных многофункциональных покрытий металлорежущего инструмента при токарной обработке высокопрочного чугуна / Д.И. Волков, С.Л. Проскуряков, С.С. Дружков // Вестник машиностроения. – 2016. – №9. – С. 79 – 83.
76. Ширманов, Н.А. Влияние слоистости в карбонитридных покрытиях на их свойства и износостойкость режущего инструмента // Вестник УлГТУ. – 2000. - №4. – С. 97 – 100.
77. Фоменко, Р.Н. Методика назначения технологических условий обработки ответственных деталей с учетом износостойких покрытий режущего инструмента

при точении // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. - №2-5 (292). – С. 65 – 71.

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

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

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

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

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

83. Болотников, Г. В. Современные покрытия для твердосплавного режущего инструмента / Г. В. Болотников // СТИН. – 1994. – №4. – С. 33–37.

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

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

86. Табаков, В. П. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин . – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 151 с.
87. Циркин, А. В. Разработка конструкций многослойных покрытий для повышения работоспособности торцовых фрез: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Циркин Алексей Валерьевич. – Ульяновск, 2004. – 183 с.
88. Ермолаев, А. А. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента при непрерывном точении на основе разработки многослойных покрытий: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Ермолаев Андрей Анатольевич. – Ульяновск, 2004. – 172 с.
89. Тулисов, А.Н. Разработка многослойных покрытий режущего инструмента на основе методики расчета их трещиностойкости: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Тулисов Александр Николаевич. – Ульяновск, 2010. – 232 с.
90. Табаков, В.П. Методика расчета трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков, М.Ю. Смирнов, А.Н. Тулисов, А.В. Чихранов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. - №3. – С. 43 – 48.
91. Порохин С.С. Повышение работоспособности токарных резцов, работающих в условиях стесненного резания, путем совершенствования износостойких покрытий: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Порохин Сергей Сергеевич. – Ульяновск, 2010. – 215 с.
92. Сагитов, Д.И. Повышение работоспособности токарных резьбовых резцов путем разработки и применения многослойных износостойких покрытий: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Сагитов Дамир Ильдарович. – Ульяновск, 2012. – 196 с.
93. Табаков В. П., Сагитов Д. И. Применение износостойких покрытий при резбонарезании // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2012. – №1, том 2 (19). – С. 15-19.
94. Верещака, А.А. Функциональные покрытия с нанокристаллической структурой для режущего инструмента / А.А. Верещака, А.А.Козлов, М.В. Шеремет // Физика, химия и механика трибосистем. – 2010. – №9. – С. 88-96.
95. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallisation and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coating // Thin Solid Films. 2003. V. 440. P. 174-179.

96. Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials / G.S. Fox-Rabinovich, A.I. Kovalev, M.H. Aguirre, B.D. Beake, K. Yamamoto, S.C. Veldhuis, J.L. Endrino, D.L. Wainstein, A.Y. Rashkovskiy // *Surface & Coatings Technology*. 2009. 204. P. 489-496.
97. Белянкин, В.А. Структура и твердость поверхностных слоев стали после обработки лучом лазера / В.А. Белянкин, А.Н. Жуков, А.Н. Кокора и др. // *Физика и химия обработки материалов*. –1967. – №2. – С. 115-116.
98. *Металловедение и термическая обработка стали*. Справ. 3-е изд-е пере-раб. и доп. в 3-х томах под ред. Бернштейна Н.Л., Рахштадта А.Г., — М.: *Металлургия*, 1983. — 216 с.
99. D. Neves, A.E. Diniz, M.S.F. Lima. Microstructural analyses and wear behavior of the cemented carbide tools after laser surface treatment and PVD coating, *Appl. Surf.Sci.* 282 (2013) 680–688.
100. D. Neves, A.E. Diniz, M.S.F. Lima. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills, *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (2006) 139-145.
101. J.M. Arroyo, A.E. Diniz, M.S.F. Lima. Wear performance of laser precoating treated cemented carbide milling tools // *Wear-v.268-2010*, p. 1329–1336.
102. Сафонов, А.Н. Лазерные методы термической обработки в машиностроении / А.Н. Сафонов, А.Г. Григорьянц. – М.: *Машиностроение*, 1986. – 47 с.
103. Григорьев, С.Н. Повышение надежности режущего инструмента путем комплексной ионно-плазменной поверхностной обработки: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Григорьев Сергей Николаевич. – М., 1995. – 499 с.
104. Верещака А.С. Повышение работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий: дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / Верещака Анатолий Степанович. – М., 1986. – 601 с.
105. Разработка комплексного поверхностного упрочнения и использование комбинированного покрытия на протяжном инструменте/А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, А.К. Кириллов и др.// *Современное электротермическое оборудование*

для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов: Тез. докл. 2-го Всесоюзн. Научно-технич. Симпозиума – М.: Информэлектро, 1990 – С. 33-34.

106. Верещака А.С., Григорьев С.Н. Разработка методов комплексной поверхностной обработки// Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов: Тез. докл. Всесоюзн. Научно-технич. Симпозиума – М.: Информэлектро, 1988 – С. 22-23.

107. Федоров, С.В. Комбинированная поверхностная ионно-плазменная обработка инструмента из быстрорежущей стали : дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.01 / Федоров Сергей Вольдемарович. – М, 2004. – 108 с.

108. Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Вафинн Р.К. Азотирование быстрорежущей стали Р6М5 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №5. – С. 39-42.

109. Филатов, П.Н. Повышение стойкости и производительности протяжек из порошковой быстрорежущей стали при обработке жаропрочных материалов за счет применения комплексного ионно-плазменного упрочнения: дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Филатов Павел Николаевич. – М, 2009. – 249 с.

110. Методы повышения стойкости инструмента/ Лобанов А.С., Грищенко П.А., Суслаков В.В.// Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Тез. докл. респ. науч.-практ. конф. моск. акад. автомоб. и тракт. машиностр. – М., 1993. – С. 61-62.

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

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

113. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые сверхтвердые TiN покрытия и их использование для упрочнения инструментов / А.А. Андреев, В.А. Столбовой, И.В. Сер-

дук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. - №5. – С. 65-69.

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

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

116. Tribological behavior of TiN and (Ti,Al)N deposited on substrates plasma nitride at low pressure/ Scorie B., Kakas D.// Mater. And Manuf. Processes. – 1995.-10, 2. – С. 321 -326.

117. Коджаспиров Г.Е., Соколовский А.Г., Подпругин В.Н. Некоторые особенности лазерного упрочнения инструментальных сталей// Физика износостойкости поверхности металлов. – Ленинград.: ФТИ им А.Ф. Иоффе АН СССР, 1988. – С. 124-128.

118. Разработка комбинированной обработки режущего инструмента с целью повышения его работоспособности/ А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, А.Р. Сейткулов и др.// Пути повышения стойкости и надежности режущих и штамповых инструментов: Тез. докл. всесоюзн. научно-техн. конф. – Николаев, 1990. – С. 41-42.

119. Табаков В.П., Ширманов Н.А. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали с износостойким покрытием путем комбинированной упрочняющей обработки// Сб. научн. трудов «Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки резанием» - Ульяновск: Ульяновский политехн. ин-т, 1990. – С. 111-116.

120. Повышение работоспособности режущего инструмента с покрытием дополнительной упрочняющей обработкой/ Табаков В.П., Ширманов Н.А., Ипполитов В.А.// Проблемы автоматизации перенастраиваемых производств в машиностроении: Тез. докл. респ. научно-техн. конф. – Волгоград: Дом техники НТО, 1988. – С. 22-23.

121. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
122. Пат. 2413793 С2 Российская Федерация, МКИ³ С 23 С 26/00, 14/06. Способ ионно-плазменной обработки поверхности металлорежущего инструмента, изготовленного из порошковой быстрорежущей стали / Е. Г. Полканов, В.А. Темников, Ю.Н. Пелевин, П.Н. Филатов, Е.А. Зайцева, С.Н. Григорьев, И.В. Валуева, С.В. Алешин, В.Н. Климов. – № 2009122061/02; заявл. 10.06.2009; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. – 5 с.
123. Арзамасов, Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов: монография / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 400 с.
124. Получение изделий комбинированным методом пластического деформирования и нанесения покрытий/ Степаненко А.В., Алифанов А.В., Прокопов И.Н., Лысов В.Д.// Ресурсосберегающие и экологич. Чистые технологии: Тез. докл. 2 научно-техн. конф.-Гродно, 1996. – С. 128.
125. Исследование структурных изменений в покрытии нитрида титана при алмазном выглаживании/ Хворостухин А.Л., Белых Л.И., Куксенова А.И.// Физика и химия обработки материалов. – 1986. - №5 -6. – С. 111-114.
126. Воеводин А.А., Ерохин А.Л. Исследование внедрения ионов в растущие слои многослойных покрытий, получаемых ионно-плазменным осаждением в вакууме.//Физика и химия обработки материалов. – 1993. -№2. – С. 78-82.
127. Верещака А. С. Влияние структуры покрытий на работоспособность твердосплавных инструментов / А. С. Верещака, Ю. Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. – 1986. – №8. – С. 38–42.
128. Табаков В. П., Власов С. Н. Комбинированная упрочняющая обработка. – Димитровград: ДИТУД, 2003. – 124 с.
129. Власов С. Н. Повышение работоспособности режущего инструмента путем комбинированной упрочняющей обработки: дис. ... канд. тех. наук. – Ульяновск, 2000. – 275 с.

130. Верещака, А.А. Повышение режущих свойств твердосплавного инструмента путём рационального выбора состава, структуры и свойств наноразмерных износостойких комплексов: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.07 / Верещака Алексей Анатольевич. – Москва, 2010. – 254 с.
131. Тарбоков, В.А. Влияние предварительной обработки твердосплавных режущих пластин импульсным мощным ионным пучком на характер изнашивания и разрушения TiN покрытия/ В.А. Тарбоков, Г.Е. Ремнев // Труды 12-й Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов. – Томск, 2003. – С. 461-465.
132. Власова, В.Н. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями после комбинированной упрочняющей обработки / В.Н. Власова, С.Н. Власов // Сельский механизатор. – 2016. - №12. – С.38-40.
133. Власов, С.Н. Повышение работоспособности режущего инструмента с многослойным покрытием путем лазерной обработки // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. – Димитровград, 2013. - №1. – С.52-56.
134. Средин, В.Г. Математическая модель воздействия лазерного импульса на многослойную полупроводниковую фоточувствительную структуру / В.Г. Средин, М. В. Сахаров // Прикладная физика. – 2011. - №2. – С.5-11.
135. Петрова, Л.С. Математическое моделирование процессов нагрева кусочно-однородных тел с релаксации теплового потока // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVNI17.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
136. Петрова Л.С. Математическое моделирование процессов нагрева многослойных тел при обработке потоками энергии высокой интенсивности на основе системы нелинейных гиперболических уравнений теплопроводности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/02TVN417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
137. Папшев, В.А. Модификация электроплазменных биокерамических покрытий лазерным ИК-излучением с улучшением их физико-механических свойств:

дисс. ... канд. тех. наук: 05.09.10 / Папшев Вячеслав Андреевич. – Саратов, 2014. – 161 с.

138. Малая, Ю.А. Математическое моделирование лазерного нагрева тел с покрытиями на основе нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности / Ю.А. Малая, А.И. Губин // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных работ. Тематический выпуск «Энергетические и теплотехнологические процессы и оборудование». - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2012. - №7. - С. 174 - 181.

139. Мацевитый, В.М. Влияние лазерной обработки, карбонитрации и их сочетания с вакуумно-плазменным покрытием TiN на некоторые свойства стали Р6М5 / В.М. Мацевитый, И.Б. Казак, А.И. Спольник // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. - №2. – С. 137-141.

140. Костюк, Г.И. Влияние комбинированной лазерно-плазменно-ионной обработки на свойства поверхностного слоя / Г.И. Костюк, О.О. Бруйка, К.П. Мисяк // Компьютерные и информационные технологии при моделировании, в управлении и экономике: сборник научных трудов. – Харьков, 2009. – С.29-36.

141. Коваленко В.С. Лазерная технология: Учебник. – К.: Выща шк. Головное изво, 1989. – 280 с.: ил.

142. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов/ А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. Шк., 1987. – 191 с.: ил.

143. Ковалев А. И. Современные методы исследования поверхности металлов и сплавов / А. И. Ковалев, Г. В. Щербединский. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.

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

145. Уманский Я. С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов и др.. – М.: Металургия, 1982. – 632 с.

146. Riester L. Analysis of depth-sensing indentation tests with a Knoop indenter / L. Riester, T. J. Bell, A. C. Fischer-Cripps // *J. Mater. Res.*, vol 16, № 6. –2001. – P. 1660 – 1665.
147. Новиков Н. В. Методы микроиспытаний на трещиностойкость / Н. В. Новиков, С. Н. Дуб, С. И. Булычев // *Заводская лаборатория*. – 1988. – Т. 54. – №7. – С. 60 – 67.
148. Майстренко А. Л., Дуб С. Н. Прогнозирование износостойкости хрупких материалов по твердости и трещиностойкости // *Заводская лаборатория*. – № 2. – 1991. – С. 52 – 54.
149. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков. –М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
150. Зорев Н. Н. Развитие науки о резании металлов / Зорев Н. Н., Грановский Г. И., Ларин М. Н. и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
151. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.
152. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
153. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1968. – 241 с.
154. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
155. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
156. Власов С.Н., Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсного лазерного излучения на многослойное покрытие// *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. -№12. С. 15-19.
157. Тугоплавкие материалы в машиностроении: Справочник/Р.С. Амбарцумян и др. - Москва: Машиностроение, 1967. – 392 с.
158. Гуляев А.П. Металловедение – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.

159. Табаков, В. П. Влияние состава износостойкого покрытия на контактные и тепловые процессы и на изнашивание режущего инструмента/В. П. Табаков // СТИН. – 1997. – №10. – С. 20 – 24.
160. Табаков, В. П. Исследование износостойкости покрытий режущего инструмента, полученных с применением составных катодов / В. П. Табаков// СТИН. – 1996. – №3. – С. 14 – 17.
161. Обработка деталей лучом лазера/ Суминов В.М., Промыслов Е.В., Скворчевский А.К., Кузин Б.Г.–М.: Машиностроение, 1969.–196 с.
162. Коваленко В.С. Обработка материалов импульсным излучением лазера. – Киев.: Вища школа, 1977. – 140 с.
163. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
164. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. -№2. С.18-39
165. Tabakov V.P. The Influence of Machining Condition Forming Multilayer Coatings for Cutting Tools//Key Engineering Materials. – Vol.496 (2012). – pp.80-85, TransTechPublications, Switzerland.
166. Tabakov V.P., Vereschaka A.S. Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining condition//Key Engineering Materials. – Vol. 581 (2014). – pp. 55-61, TransTechPublications, Switzerland.
167. Табаков В.П. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с покрытиями: учебное пособие/ В.П. Табаков, Д.И. Сагитов – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 74 с.
168. Табаков В.П. Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями: учебное пособие/ В.П. Табаков, А.С. Верещака, С.Н. Григорьев. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 172 с.
169. Сизов С.В., Табаков В.П. Исследование структурных параметров и механических свойств покрытий TiZrNbAlN/ Высокие технологии в машиностроении:

материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции А.Ф. Денисенко. – Самара: СГТУ, 2016. – 129-131.

170. Табаков В.П., Сизов С.В. Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий на основе нитрида титана, циркония и ниобия// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 2. – С. 70-73.

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

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

173. Сизов С.В., Табаков В.П. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия//Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2. – 240-245.

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

175. Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «твердосплавная основа – износостойкое покрытие»//Вестник машиностроения. – 2019. – №6. – 80-84.

176. Пат. № 2596530 Российская Федерация, МПК⁷ С23С 14/06 С23С 14/24 С23С 14/58 В23В 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109053/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

177. Пат. № 2596531 Российская Федерация, МПК⁷ С23С 14/06 С23С 14/24 С23С 14/58 В23В 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего

инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109054/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

178. Пат. № 2598712 Российская Федерация, МПК⁷ С23С 14/06 С23С 14/24 С23С 14/58 В23В 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109052/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27. – 6 с.

179. Пат. № 2596525 Российская Федерация, МПК⁷ С23С 14/06 С23С 14/24 С23С 14/58 В23В 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109051/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

180. Пат. № 2596520 Российская Федерация, МПК⁷ С23С 14/06 С23С 14/24 В23В 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109006/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

181. S.Sizov, V. Tabakov, A. Chikhranov. Functional parameters of the cutting process of the cutting tool with multilayer coatings after pulsed laser treatment // International Conference on Current trends in technology and equipment (ICMTMTE 2018) - МАТЕС Web Conf. Volume 224, 2018. doi:10.1051/matecconf/201822401087.

182. Расчет среднеотраслевых затрат при нанесении износостойких покрытий на режущий инструмент, приведенных к одному часу работы установок типа «Булат-3Т». – М.: ВНИИ Инструмент, 1982. – 9 с.



АКТ № 1

производственных испытаний СМП из твердого сплава с износостойким многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки

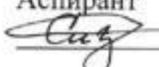
Проведены производственные испытания СМП из твердого сплава МК8 с износостойким многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки при резании заготовок из стали 30ХГСА ГОСТ 4543-71. Станок токарно-винторезный мод. TOS SUI-40, обработка без СОТС.

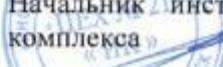
Таблица проведения испытаний

№	Твердый сплав	Покрытие	Режим резания	Коэффициент повышения стойкости	Коэффициент повышения стойкости
1	МК8	TiN	n=1120 об/мин, V=140 м/мин, s=0,15 мм/об, t=0,5 мм	1	-
2	МК8	TiN-TiZrN-TiNbAlN		2,47	1
3	МК8	TiN-TiZrN-TiNbAlN+ЛО		3,79	1,53
4	МК8	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN+ЛО		3,68	-
5	МК8	TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN+ЛО		3,92	-

Примечание: ЛО – лазерная обработка

Вывод: средний коэффициент повышения стойкости СМП с износостойким многослойным покрытием после ЛО по отношению к СМП с однослойным покрытием TiN равен 3,79. Коэффициент повышения стойкости СМП с износостойким многослойным покрытием после ЛО по отношению к многослойному покрытию без ЛО равен 1,53.

Испытания проводили:
 от УлГТУ:
 Аспирант
 Сизов С.В.

от АО «УКБП»:
 Начальник инструментального
 комплекса
 Коса А.Г.



УТВЕРЖДАЮ
 Главный технолог АО «УКБП»
 С.А. Михайлов
 « 10 » 09 2017 г.



АКТ № 2

производственных испытаний СМП из твердого сплава с износостойким многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки

Проведены производственные испытания СМП из твердого сплава МК8 с износостойким многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки при резании заготовок из стали 20Х13 ГОСТ 5949-75. Станок токарно-винторезный мод. TOS SUI-40, обработка без СОТС.

Таблица проведения испытаний

№	Твердый сплав	Покрытие	Режим резания	Коэффициент повышения стойкости	Коэффициент повышения стойкости
1	МК8	TiN	p=560 об/мин, V=100 м/мин, s=0,3 мм/об, t=0,5 мм	1	-
2	МК8	TiN-TiZrN-TiNbAlN		1,96	1
3	МК8	TiN-TiZrN-TiNbAlN+ЛО		2,72	1,39
4	МК8	TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN+ЛО		2,82	-

Примечание: ЛО – лазерная обработка

Вывод: средний коэффициент повышения стойкости СМП с износостойким многослойным покрытием после ЛО по отношению к СМП с однослойным покрытием TiN равен 2,77. Коэффициент повышения стойкости СМП с износостойким многослойным покрытием после ЛО по отношению к многослойному покрытию без ЛО равен 1,39.

Испытания проводили:
 от УлГТУ:
 Аспирант
 Сизов С.В.

от АО «УКБП»:
 Начальник инструментального
 комплекса
 Коса А.Г.

СОГЛАСОВАНО
Начальник ЦТО ПТО ПП
ООО «УАЗ»

В.А. Кутузов
« 13 » 2017 г.

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ООО «УАЗ»

А.А. Костригин
« 13 » 2017 г.

АКТ № 1

производственных испытаний СМП из твердого сплава с износостойким многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки

Проведены производственные испытания СМП из твердого сплава МК8 с износостойким многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки при резании заготовок из стали 5ХНМ ГОСТ 5950-2000. Станок токарно-винторезный мод. 16К20, обработка без СОТС.

Таблица проведения испытаний

№	Твердый сплав	Покрытие	Режим резания	Коэффициент повышения стойкости по отношению к TiN	Коэффициент повышения стойкости по отношению к МП без ЛО
1	МК8	TiN	n=250 об/мин, V=130 м/мин, s=0,2 мм/об, t=0,5 мм	1	-
2	МК8	TiN-TiZrN-TiNbAlN		2,47	1
3	МК8	TiN-TiZrN-TiNbAlN+ЛО		3,65	1,48
4	МК8	TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN		2,74	1
5	МК8	TiN-TiNbAlN-TiZrNbAlN+ЛО		4,27	1,56

Примечание: ЛО – лазерная обработка, МП – многослойное покрытие

Вывод: средний коэффициент повышения стойкости СМП с износостойким многослойным покрытием после ЛО по отношению к СМП с однослойным покрытием TiN равен 3,96. Средний коэффициент повышения стойкости СМП с износостойким многослойным покрытием после ЛО по отношению к многослойному покрытию без ЛО равен 1,52.

Испытания проводили:
от УлГТУ:
Аспирант

Сизов С.В.

от ЦТО ПТО ПП ООО «УАЗ»:
Начальник участка

Чекулаев Е.П.

УТВЕРЖДАЮ:
 Главный технолог АО «УКБП»
 С.А. Михайлов
 « 08 » _____ 2017 г.
 «УКБП»



АКТ

о передаче результатов диссертационной работы для
 использования в производстве

Технологические рекомендации импульсной лазерной обработки режущего инструмента, разработанные на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» УлГТУ по материалам диссертационной работы «Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия» аспиранта Сизова С.В., переданы АО «УКБП» для использования в производственных условиях.

От УлГТУ:
 Научный руководитель
 _____ В.П. Табаков
 Аспирант
 _____ С.В. Сизов



От АО «УКБП»:
 Начальник инструментального
 комплекса
 _____ А.Г. Коса





УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

Н.Г. Ярушкина

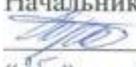
«26» февраля 2019 г.

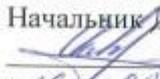
АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы, выполненной аспирантом Сизовым С.В. на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» (МРСИИ) Ульяновского государственного технического университета в 2012-2016 гг., на основании решения кафедры МРСИИ (протокол №2 от 21.02.2019 г.) внедрены в учебный процесс кафедры «МРСИИ» в читаемые курсы лекций по дисциплинам «Технологические методы нанесения износостойких покрытий режущего инструмента» и «Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями» для магистрантов, обучающихся по направлению 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Зав. кафедрой МРСИИ

 В.П. Табаков
 «25» 02 2019 г.
 Учебное управление
 Начальник УП

 И.В. Горбачев
 «25» 02 2019 г.

Согласовано:
 Департамент научных исследований
 и инноваций
 Начальник ДНИИ

 С.В. Скворцов
 «26» 02 2019 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2596520

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

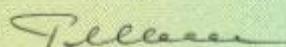
Заявка № 2015109006

Приоритет изобретения 13 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 августа 2016 г.

Срок действия патента истекает 13 марта 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иванов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2596525

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015109051

Приоритет изобретения 13 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 августа 2016 г.

Срок действия патента истекает 13 марта 2035 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2596530

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

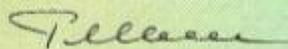
Заявка № 2015109053

Приоритет изобретения **13 марта 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **10 августа 2016 г.**

Срок действия патента истекает **13 марта 2035 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Изrael**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2596531

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015109054

Приоритет изобретения 13 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 августа 2016 г.

Срок действия патента истекает 13 марта 2035 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Изиев Г.П. Изиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2598712

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015109052

Приоритет изобретения 13 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 07 сентября 2016 г.

Срок действия патента истекает 13 марта 2035 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Иалиев

