

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждения образования
«Полоцкий государственный университет»

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

ПОСОБИЕ

для студентов машиностроительных специальностей

Новополоцк
ПГУ
2010

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.58я73
Ф50

Рекомендовано к изданию методической комиссией
машиностроительного факультета в качестве
пособия (протокол № 11 от 03.11.2010)

АВТОРЫ:

чл.-кор. НАНБ, д-р техн. наук, проф. А. В. БЕЛЫЙ;
д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. КУКАРЕКО;
д-р техн. наук, доц. Н. Н. ПОПОК;
инженер С. В. ДЕРБУШ

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

д-р техн. наук, проф. УО «Барановичский государственный технический
университет», зав. отделом ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» А. В. АЛИФАНОВ;
канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики
УО «Полоцкий государственный университет» В. Г. ЗАЛЕССКИЙ

**Физические и технологические основы ионно-лучевой
Ф50 обработки материалов** : пособие для студентов машиностроительных специальностей / А. В. Белый [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 84 с.

ISBN 978-985-531-145-5.

Приведена методика обучения и контроля знаний, представлены рабочая программа и лекционный материал по дисциплине, рассмотрены виды лучевой обработки материалов, ее физические и технологические основы, методика исследований и данные по структуре упрочненных материалов, их триботехническим свойствам и износостойкости, а также по практическому применению ионно-лучевой обработки. Даны учебно-методические материалы к лабораторным работам.

Предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и специалистов в области машиностроения и обработки материалов.

**УДК 621.7(075.8)
ББК 34.58я73**

ISBN 978-985-531-145-5

© УО «Полоцкий государственный университет», 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Введение в учебный план подготовки инженеров по специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дисциплины «Физические основы ионно-лучевой обработки материалов» продиктовано широким применением в машиностроении и постоянным развитием методов ионно-лучевой обработки. Эти методы позволяют интенсифицировать обработку труднообрабатываемых материалов и улучшать свойства поверхностных слоев деталей путем изменения их структуры и фазового состава или нанесения покрытий.

Предлагаемый учебно-методический комплекс поможет студентам-машиностроителям разобраться в существующих видах лучевой обработки материалов, углубить свои знания по физическим основам наиболее перспективной в использовании ионно-лучевой обработки и нанесения покрытий, изучить технологии и оборудование для высокоточной имплантации, ознакомиться с методикой исследования микротвердости и износостойкости упрочненных поверхностей, изучить структуры, фазовый состав и свойства полученных после ионно-лучевой обработки поверхностей и покрытий, получить навыки по практическому применению ионно-лучевой обработки в машиностроении.

Особенностью этого учебно-методического комплекса является то, что в него включены наряду с обзором известных материалов результаты научных исследований авторов, нашедшие широкое применение в промышленности.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение качества и надежности машин, усложнение их конструкций требует применения прогрессивных методов обработки поверхностей деталей. Одним из перспективных методов является лучевая обработка материалов.

В настоящее время многочисленные виды лучевой обработки применяются или для получения новых поверхностей путем снятия стружки (с уменьшением объема заготовки), или для изменения структуры, фазового состава и свойств поверхностного слоя высокоэнергетическим воздействием ионов металлов или газов (без изменения объема заготовки), или нанесением покрытий (с увеличением объема заготовки).

Несмотря на относительно малую производительность и высокую энергоемкость лучевой обработки, она оказывается незаменимой при обработке труднообрабатываемых материалов, при получении точных и качественных поверхностей деталей, при необходимости удешевления применяемых материалов за счет достижения требуемых физических свойств в тонком поверхностном слое или покрытии изделия.

Лучевые виды обработки находят наиболее широкое применение в машиностроении при обработке заготовок резанием, при упрочняющей обработке режущих и штамповых инструментов, работающих в экстремальных условиях.

Для реализации этих видов обработки используются современные лазерные установки, установки для электронной сварки, вакуумные установки с широким диапазоном регулируемых параметров и использованием различных материалов и технологий, в том числе и нанотехнологий.

МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ И НАВЫКОВ

На кафедре «Технология и оборудование машиностроительного производства» Полоцкого государственного университета в течение ряда лет реализуется методика обучения, которая нацелена на индивидуальную работу со студентами и комплексную (рейтинговую) оценку уровня полученных ими знаний.

Методика предусматривает выполнение студентами следующих требований:

1. Посещение лекций и ведение конспекта с предоставлением его преподавателю на экзамене. Такое требование приучает студентов к внимательности и собранности на лекции, позволяет фиксировать новые (дополнительные к имеющимся учебно-методическим материалам) сведения по дисциплине.

2. Самостоятельная подготовка студентов к лабораторным занятиям. Необходимо отметить, что содержание лабораторных работ соответствует разделам курса и студент имеет возможность постепенно усваивать необходимую теоретическую информацию. До начала лабораторной работы студенты представляют отчет в виде краткого изложения теории по рассматриваемому вопросу, опрашиваются и при положительных ответах допускаются к выполнению лабораторной работы. На самой лабораторной работе студенты осваивают необходимые приемы на станке, проводят с использованием приборов и аппаратуры измерения, заполняют протоколы и обрабатывают экспериментальные данные. В конце лабораторных занятий студенты защищают лабораторную работу. Те студенты, которые не отчитались по лабораторной работе до начала следующей, не допускаются к выполнению очередной работы.

3. Выполнение научных исследований, написание научного реферата по одной из предлагаемых тем, принятие участия в работе кафедрального кружка СНО, выполнение практической работы по изготовлению на станке образцов, устройств, стендов к лабораторным работам.

Выполнение этих требований позволяет произвести рейтинговую оценку готовности студента к экзамену, которая складывается из оценки:

- 1) посещения лекций;
- 2) ведения конспекта лекций;
- 3) теоретической готовности к лабораторным работам;
- 4) своевременности оформления отчетов по выполненным работам;
- 5) участия в научно-исследовательской работе кафедры.

Первые три оценки определяют уровень усвоения студентами теоретического курса (рейтинг R_m), четвертая оценка определяет полученные практические навыки (рейтинг R_{np}), и пятая оценка характеризует активность и стремление студента к более глубокому познанию дисциплины (рейтинг $R_{акт}$).

Таким образом, рейтинг по дисциплине определяется по формуле

$$R_{\text{д}} = R_m + R_{np} + R_{акт}.$$

Оценка по каждой составляющей рейтинга выставляется по 10-балльной шкале. Знания по дисциплине считаются сформировавшимися при рейтинге по дисциплине не менее 19,5 баллов.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Цель преподавания дисциплины

Постоянное повышение качества и надежности машин, усложнение их конструкции требует применения прогрессивных методов обработки поверхностей деталей. Одним из перспективных методов является лучевая обработка материалов.

Целью данной дисциплины является расширение и углубление знаний студентов по физическим и технологическим основам ионно-лучевой обработки и исследование свойств материалов после этой обработки.

Задачи изучения дисциплины

Перед студентами ставятся следующие основные задачи по изучению:

- видов лучевой обработки материалов;
- особенностей лучевой обработки резанием и лучевой упрочняющей обработки;
- физических основ ионной имплантации и нанесения покрытий;
- технологии ионно-лучевой обработки;
- установок и оборудования для проведения ионно-лучевой обработки;
- методик исследования микротвердости и износостойкости упрочненной поверхности;
- структуры, состава и свойств упрочненных поверхностей;
- триботехнических свойств упрочненных поверхностей;
- практического применения ионно-лучевого азотирования и нанесения покрытий.

Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых студентами необходимо для изучения данной дисциплины

Название дисциплины	Раздел (тема)
Физика	Электрофизика
Материаловедение	Структура, состав и свойства материалов
Технология конструкционных материалов	Термическая обработка. Методы и приборы для определения микротвердости и твердости материалов

Содержание дисциплины

Лекционный курс

Наименование разделов и тем лекций и их содержание	Количество часов
1. Введение. Основные тенденции развития машиностроения и роль лучевой обработки материалов	2
2. Виды лучевой обработки материалов. Классификация способов ионно-лучевой обработки. Краткая характеристика технологических возможностей ионно-лучевой имплантации (легирования) и нанесения покрытий	2
3. Физические основы ионно-лучевой обработки. Ядерное и электронное торможение. Принципы взаимодействия ионов с поверхностью. Формирование ионных потоков	4
4. Технология и оборудование для ионно-лучевой обработки. Установки для проведения ионно-лучевой обработки. Особенности оборудования для высокоточной ионной имплантации. Технологические процессы ионного азотирования и нанесения покрытий	4
5. Методика исследования микротвердости и износостойкости имплантированных поверхностей и покрытий	2
6. Структура и фазовый состав упрочненной поверхности. Триботехнические свойства ионно-модифицированных слоев. Износостойкость покрытий	2
7. Практическое применение ионно-лучевого азотирования и нанесения покрытий	2
Всего	18

Лабораторные занятия, их содержание и объем в часах

Наименование	Объем в часах
1. Виды обработки резанием	4
2. Технология и оборудование для ионно-лучевой обработки деталей машин и технологической оснастки	4
3. Нанесение износостойких покрытий на нержавеющие стали	4
4. Нанесение покрытий на инструментальные стали	4
Всего за учебный год	16

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

ТЕМА 1. ВИДЫ ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Лучевая обработка резанием

Лучевая обработка резанием основана на снятии части обрабатываемого материала воздействием фокусированных лучей, имеющих высокую плотность энергии, и характеризуется образованием стружки. В этом случае удаление материала осуществляется преобразованием лучевой энергии непосредственно в зоне резания в тепловую. К видам лучевой обработки относится резание электронным, ионным, световым и плазменным лучами. При этих видах обработки луч установки является идеально отточенным, безынерционным и неизнашиваемым «инструментом» [1 – 3].

Электронно-лучевая обработка – это обработка сфокусированным пучком электронов, который нагревает, плавит и (или) испаряет обрабатываемый материал. Электровакуумное устройство, в котором происходит получение, ускорение и фокусировка электронного пучка, называется электронно-оптическим прожектором или электронной пушкой.

Ионно-лучевая обработка – это обработка путем катодного распыления при газовом разряде. Электроны, эмитируемые катодом, ионизируют молекулы газа. Ионы ускоряются сильным электрическим полем и фокусируются в узком конусе, вершина которого совпадает с поверхностью обрабатываемой поверхности детали. Этот вид обработки чаще всего применяется для прошивания отверстий диаметром от 5 мкм и более в тонком листовом материале и для сверления отверстий в алмазах.

Светолучевая обработка – это обработка узким направленным пучком света, характеризующимся чрезвычайно высокой плотностью тепловой энергии. Для его получения используются мощные лампы, и прежде всего – лазер. Этот вид обработки называют лазерной обработкой. В зависимости от интенсивности и режимов, задаваемых обрабатывающей системой, можно осуществлять прошивание отверстий, резку материала, получать пазы, щели, упрочнять и легировать материалы (рис. 1.1).

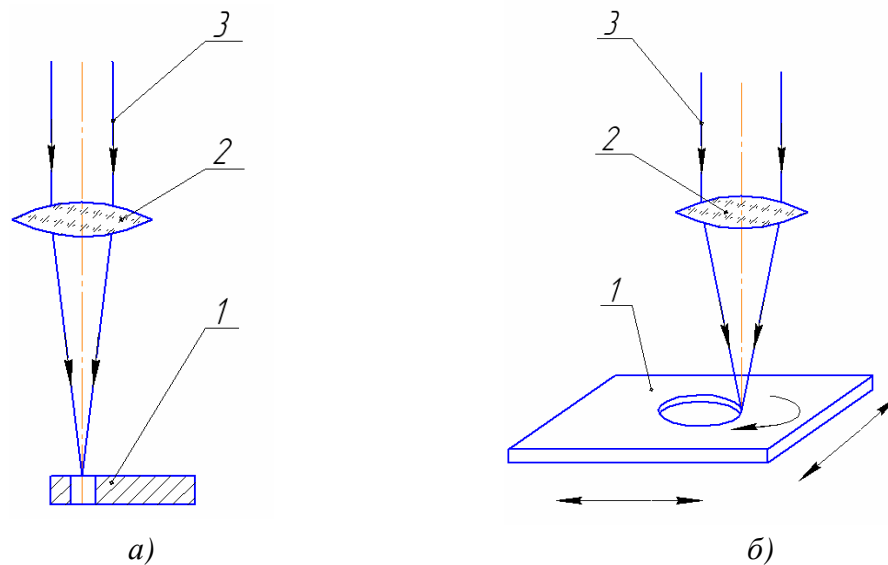


Рис. 1.1. Схемы лазерной обработки: *а* – прошивание отверстия;
б – вырезание материала

Лазерное прошивание отверстий позволяет получать отверстия диаметром не более 350 – 500 мкм, а для производственных целей получения отверстий больших диаметров актуальной становится разработка методов интенсификации лазерной обработки. Для этого используется комбинированный вид лазерной обработки подведением дополнительной энергии в зону воздействия луча лазера, т.е. предварительный нагрев заготовки перед дальнейшей обработкой лучом лазера. Исследования показали, что при нагреве заготовки до 300 – 600 °С диаметр отверстий увеличивался до 80 – 90 % номинала. Для дополнительного нагрева можно использовать электрический разряд. Для этого импульс лазерного излучения вводится в систему с двумя электродами, одним из которых является обрабатываемая заготовка. Лазерное прошивание отверстий может осуществляться в полиимпульсном режиме с калибровкой струей аргона. Это позволяет снизить, например, продолжительность получения восьми отверстий в детали с 2,53 мин (при сверлении) до 0,7 мин.

Механизм разрушения при воздействии на обрабатываемый материал лазерного импульса характеризуется интенсивными тепловыми процессами в зоне импульсного воздействия энергии, подводимой извне. Разрушение материала при этом виде обработки определяется процессом «световой эрозии». При этом обрабатываемость материала характеризуется его теплофизическими свойствами и прежде всего – теплотой плавления, кипения, испарения и сублимации.

Обработываемость материалов лазерным лучом S зависит также и от условий хрупкого разрушения (критерий Альбинского):

$$S = 42,68 \frac{T\lambda}{E\alpha} (1 - \nu), \quad (1.1)$$

где T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; E – модуль упругости; α – коэффициент линейного расширения; ν – коэффициент Пуассона.

Большое влияние на обработываемость заготовок лазерным лучом имеет коэффициент отражения поверхности, определяющий долю поглощенной световой энергии. Величина этого коэффициента определяется законом Бургера:

$$J(x) = J_0 e^{-\alpha x}, \quad (1.2)$$

где $J(x)$ – интенсивность света по глубине резания металла; J_0 – интенсивность падающего светового потока; α – коэффициент поглощения света в металле.

Энергия, необходимая для испарения 1 мм^3 обрабатываемого материала (Q), складывается из следующих составляющих: Q_1 – теплота, необходимая для нагревания металла до температур плавления и кипения; Q_2 – теплота плавления; Q_3 – теплота испарения.

За время протекания этих процессов происходит отвод тепла вследствие теплопроводности обрабатываемого материала и окружающей среды Q_4 и радиации Q_5 .

Этими составляющими определяется тепловой баланс данного вида обработки:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (1.3)$$

Плотность мощности излучения лазера определяет температурный режим нагрева обрабатываемого материала. При низкой плотности мощности происходит только нагрев, с увеличением этого показателя металл плавится, а при высокой плотности мощности излучения материал разрушается уже вследствие испарения. Механизм разрушения при лазерной обработке зависит от длительности воздействия светового луча на обрабатываемый материал. Регулируя этот процесс, можно получить различные процессы обработки.

Плазменная обработка – это обработка материала потоком низкотемпературной ($3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ °C) плазмы. При этом изменяются химический состав, структура, физическое состояние обрабатываемого материала, а также форма и (или) размеры обрабатываемой заготовки [3, 4].

Плазменная обработка электропроводных материалов осуществляется в области разряда при условии наличия электрического поля. При этом передача энергии осуществляется за счет теплопроводности, конвекции и излучения, а также посредством движущихся в электрическом поле заряженных частиц, что позволяет повысить эффективность процессов плавления и рафинирования металла. Высокая концентрация теплового потока в плазменной дуге позволяет широко использовать ее для резания металлов, строгания, полирования и поверхностного переплава. Расширяется применение нового комбинированного метода – плазменно-механической обработки.

Области реализации процессов лучевой обработки при различных мощностях электронного пучка предоставлены на рис. 1.2.

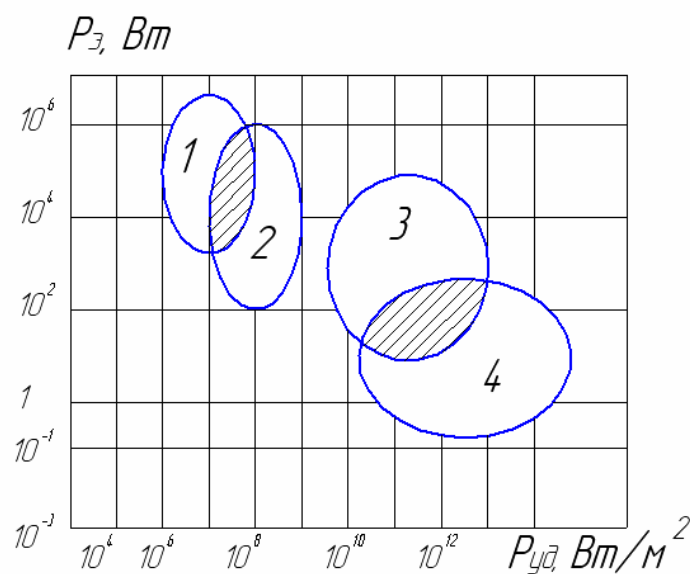


Рис. 1.2. Области реализации процессов лучевой обработки при различных мощностях $P_э$ электронного пучка: 1 – плавление при $U_y = 15 - 40$ кВт; 2 – испарение при $U_y = 10 - 40$ кВт; 3 – сварка при $U_y = 15 - 175$ кВт; 4 – резание при $U_y = 20 - 250$ кВт; U_y – ускоряющее напряжение; $P_{уд}$ – удельная мощность

1.2. Лучевая упрочняющая обработка

Использование лучевой упрочняющей обработки обеспечивает изменение физических свойств материала деталей, в частности, повышение твердости, прочности, износо- и коррозионной стойкости и т.п. Эти изменения производятся или во всем объеме детали, как, например, при термической обработке, или в его части (приповерхностный слой детали) при ионно-лучевой обработке, или воссозданием защитных покрытий из другого материала [5 – 9].

В настоящее время существует большое количество разнообразных видов упрочняющей обработки, которые можно подразделить по следующим группам признаков:

1. Вид рабочего вещества, которое формирует приповерхностный слой детали.
2. Способ генерации (воспроизведения) рабочего вещества.
3. Вид взаимодействия рабочего вещества с поверхностью детали.
4. Вид рабочей среды.

Вид рабочего вещества определяется его физическим состоянием (твердое, жидкое, газообразное, плазма) и формой. Генерация рабочего вещества осуществляется путем механического подвода и задания траектории движения, нагрева и плавления, задания конфигурации и интенсивности полей, ионизации паров и т.д. Взаимодействие рабочего вещества с поверхностью детали осуществляется путем деформации (удар, статическое нагружение), химических реакций, структурных изменений, диффузионного насыщения или имплантации, конденсации и других процессов. Рабочая среда может быть газообразной, включая воздух, или жидкой, а также комбинированной.

Существующие технологические процессы упрочнения деталей машин подразделяются по указанным четырем группам признаков на термические, термомеханические, химические, химико-термические, электрофизические, электрохимические, механические.

1.2.1. Ионно-лучевая упрочняющая обработка

Ионно-лучевая упрочняющая обработка наибольшее применение получила в технологиях приповерхностного изменения физических свойств материала деталей. В качестве рабочего вещества в этих технологиях обычно используют ионы тугоплавких металлов и химически активных га-

зов. Вещество генерируется в виде направленного ионного пучка и имплантируется (внедряется) в поверхность детали. Рабочей средой является вакуум. При имплантации на поверхности детали создаются твердые растворы, химические соединения, наноструктурированные или аморфные слои, обеспечивающие изменение свойств поверхностного слоя детали.

К основным направлениям применения и развития видов ионно-лучевой обработки относятся: низкоэнергетическая ионная имплантация, имплантация ионов средних энергий, высокоэнергетическая имплантация, сильноточная имплантация, имплантация атомами отдачи и ионно-лучевое перемешивание. Рассмотрим подробнее основные характеристики указанных видов.

Низкоэнергетическая имплантация. На практике к низкоэнергетическим относят импланторы, ускоряющие частицы до энергии 1 – 10 кэВ. В этом диапазоне энергий доминирующим оказываются ядерные столкновения иона с атомами твердого тела. Конкретно соотношение долей ядерных и электронных потерь определяется массами и зарядами имплантируемых ионов и атомов твердого тела, величиной боровского радиуса.

Имплантация ионов средней энергии. К ионам средней энергии относят частицы с энергией $10^2 - 10^3$ кэВ. Именно в этой области работали первые промышленные импланторы. Оборудование для этого диапазона энергий оказывается сравнительно простым и недорогим. Глубина проникновения легирующих частиц обычно не превышает десятых долей микрометра, а разогрев поверхности при обработке металлов на оборудовании этого класса не превышает 100 °С.

Высокоэнергетическая ионная имплантация. К высокоэнергетической относят обработку частицами, энергия которых превышает 1 МэВ. В последние годы появились ускорители, обеспечивающие имплантацию тяжелых ионов с энергией, исчисляемой гигаэлектронвольтами. Диапазон высоких энергий целесообразно разделять на два поддиапазона. Для первого (ионы с энергией несколько мегаэлектронвольт) характерно количественное изменение таких параметров, как пространственное распределение внедренных атомов, радиационных дефектов, соотношение дефектов различного типа. Для второго (ионы с энергией в десятки мегаэлектронвольт и выше) наблюдаются качественно новые эффекты взаимодействия ионов с атомами, радикальное изменение соотношения между долями электронного и ядерного торможения, образование таких макродефектов строения, как скрытые треки. При этом традиционные подходы к описанию экспериментальных результатов не всегда оказываются приемлемыми.

Основное преимущество метода – большая глубина проникновения бомбардирующих частиц, достигающая 10^2 мкм. Ограничивающими факторами высокоэнергетической обработки являются небольшая плотность ионного тока, снижающая производительность процесса при необходимости получения высокой концентрации легирующей примеси, и высокая стоимость оборудования. Несмотря на это технологические возможности высокоэнергетической имплантации, в частности, создание трехмерных структур в микроэлектронике, стимулируют развитие исследований в этом направлении.

Сильноточная ионная имплантация с плотностями ионного тока $1 - 10^3$ мА/см², в том числе импульсная, сопровождается существенным разогревом поверхности и обеспечивает сочетание баллистических и диффузионных процессов.

Имплантация атомами отдачи и ионное перемешивание. Особенность метода заключается в том, что основной эффект имплантации связан с перемещением так называемых атомов отдачи, получивших импульс при взаимодействии с частицами первичного ионного пучка. В качестве первичных чаще всего используют достаточно тяжелые ионы инертных газов. Основными преимуществами метода являются простота получения высокой концентрации легирующей примеси, например, атомов предварительно нанесенной на поверхность обрабатываемого изделия тонкой пленки, и большая толщина легированного слоя. Поскольку каждый ион высокой энергии обеспечивает перемешивание большого числа атомов мишени, заметное изменение физико-механических свойств может достигаться при дозах легирования, на 1 – 2 порядка меньших, чем при использовании прямой ионной имплантации. В зависимости от температурных условий облучения, соотношения масс и энергий бомбардирующих ионов и атомов, образующих твердое тело, перераспределение атомов при ионном перемешивании и имплантации атомами отдачи определяется различными механизмами. Для преодоления проблемы распыления поверхности при ионном перемешивании разработан метод динамического перемешивания. Суть метода заключается в одновременной доставке на поверхность обрабатываемой детали легирующих атомов и ионов, реализующих перемешивание с основой. Соотношение потоков подбирается так, чтобы скорость ионного распыления равнялась скорости доставки атомов на поверхность. Метод нашел широкое применение для синтеза новых, в том числе метастабильных соединений (с-BN, Ti₂N, карбиды Cr, Zr, Mo, PbTiO₃, алмазоподобные структуры и т.д.).

1.2.1.1. Нанесение покрытий

В настоящее время существует большое количество различных способов нанесения покрытий (рис. 1.3). Наиболее широко применяются механико-диффузионные, термические, электрохимические, плазменные и др.

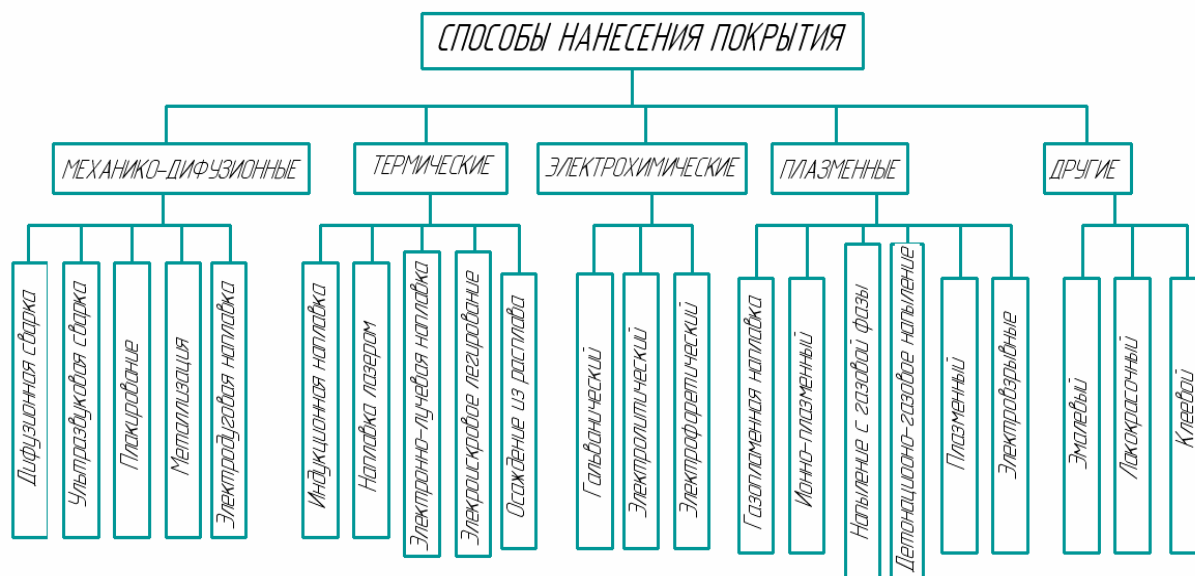


Рис. 1.3. Способы нанесения покрытия

В последнее время интенсивно развивается вакуумный электродуговой способ, основанный на использовании плазменных ускорителей и обеспечивающий формирование покрытия из высокоэнергетичных ионных потоков [10]. Использование ионов высоких энергий позволяет осуществлять неравновесные плазмохимические реакции прямого синтеза. При этом получают соединения с уникальными свойствами.

Заложенные в основу данного способа физические принципы обеспечивают ему ряд преимуществ:

- возможность получения покрытий из различных, в том числе тугоплавких материалов и сплавов;
- возможность управления плазменным потоком;
- сравнительно высокую адгезию;
- отсутствие необходимости повышения температуры изделия;
- гарантию высокой чистоты процесса;
- экологическую чистоту.

Для реализации описываемого способа нанесения покрытий необходимо осуществление следующих стадий процесса:

- генерация атомарного потока вещества и перевод его в ионизированное состояние;
- ускорение ионов по направлению к поверхности, на которую наносится покрытие;
- взаимодействие ионов с указанной поверхностью и формирование покрытия.

Стадия генерации обеспечивается эрозией материала электродов вакуумной электрической дугой. При этом имеет место эффект самогенерации, когда вакуумная дуга горит в парах эродируемого материала.

Процесс ускорения ионов может осуществляться в режимах электростатического и холловского ускорения, а также ускорения в собственном магнитном поле. На практике в установках вакуумного электродугового нанесения покрытий реализуется электростатический режим ускорения за счет «вытягивания» ионов из плазмы вакуумной дуги путем приложения отрицательного потенциала к подложке.

Процесс взаимодействия ионного потока с поверхностью может происходить в режимах конденсации, распыления и имплантации. На диаграмме (рис. 1.4) приводятся энергетические параметры этих режимов.

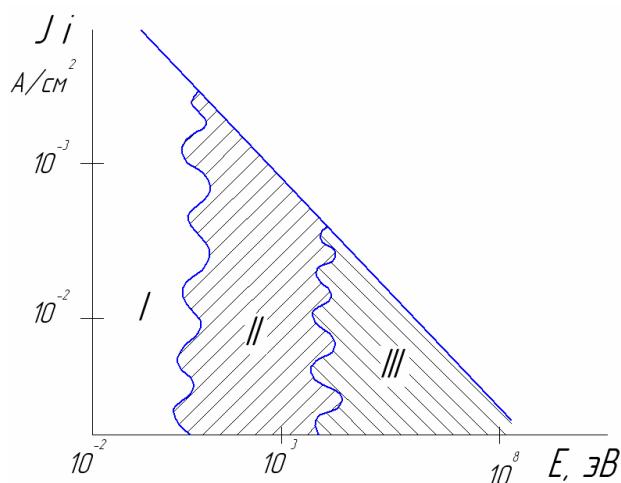


Рис. 1.4. Диаграмма, характеризующая режимы взаимодействия ионных потоков с поверхностью твердого тела

В области I (энергия ионов составляет несколько десятков электрон-вольт) конденсация преобладает над распылением, поэтому имеют место рост толщины покрытия и его высокая адгезия.

При повышении энергии до 1 – 4 кэВ (область II) начинает преобладать процесс распыления. Очистка поверхности изделия ионной бомбардировкой является одним из основных этапов ее подготовки перед нанесением покрытий.

Область III диаграммы (> 10 кэВ) соответствует процессам ионной имплантации. В основе их лежит явление снижения коэффициента распыления при повышении энергии ионов.

Процесс вакуумного электродугового нанесения покрытия охватывает области I и II представленной диаграммы.

Принципиальная схема установки вакуумного электродугового нанесения покрытий представлена на рис. 1.5.

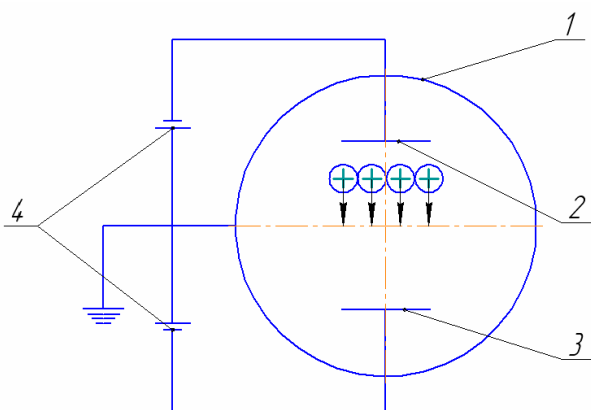


Рис. 1.5. Схема установки вакуумного электродугового нанесения покрытий:
1 – камера (анод); 2 – катод; 3 – подложка; 4 – источник питания

В вакуумной камере 1 при остаточном давлении $P < 1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-3}$ Па между анодом, которым служат металлические стенки вакуумной камеры 1, и катодом 2 зажигается вакуумная дуга, являющаяся источником ионов материала катода. Для того чтобы создать направленный поток ионов к подложке 3, к ней прикладывается отрицательный потенциал. Варьируя величину этого потенциала, можно значительно изменять энергию движущихся ионов.

Источником ионов служит стационарная вакуумная дуга, появляющаяся между катодом и анодом. В большинстве случаев возникновение и стационарное горение дуги происходит в парах материала катода. Плотность тока при этом чрезвычайно велика, что приводит к возникновению струй паров металла, обладающих большими скоростями.

В дуге этот пар ионизируется и превращается в плазму, ионы которой обладают средней энергией 10 – 30 эВ. Плотность плазмы вследствие пинч-эффекта довольно большая, и на поверхности катода происходит не только испарение, но и оплавление. Это приводит к эрозии катода и уносу его массы в виде микрокапель, размер которых составляет в среднем 3 – 10 мкм. Доля капельной фазы в общем уносе массы с катода не превышает обычно 5 – 30 %. После возникновения вакуумной дуги пространство вакуумной камеры заполняется плазмой. Большая часть ионов плазмы бомбардирует катод, что приводит к испарению с его поверхности нейтральных и возбужденных атомов, которые, в свою очередь, ионизируются в вакуумной дуге и снова возвращаются на катод в виде ионов. Осуществляется так называемый процесс самогенерации. Главным в этом процессе является то, что плазма вакуумной дуги, степень ионизации которой близка к 100 %, представляет собой эффективный источник ионов материала катода. Чтобы создать направленный поток ионов к подложке, к ней прикладывается отрицательный потенциал. При этом подразумевается, что подложка является электропроводящей. Однако зачастую покрытие необходимо наносить на диэлектрическую подложку или же наносимое покрытие не обладает электропроводимостью. В этом случае к подложке прикладывается высокочастотный потенциал. В результате высокоподвижные электроны создают отрицательный по отношению к плазме потенциал самосмещения на поверхности диэлектрика, «отбирающий» ионы из плазмы. Иногда на постоянный потенциал смещения подложки накладывают переменную составляющую. Выбор потенциала зависит в основном от материала подложки и наносимого покрытия.

1.2.1.2. Ионная имплантация

Ионно-лучевой упрочняющей обработкой (имплантацией или легированием) называется процесс внедрения в образец (подложку) ионизованных атомов с энергией, необходимой для проникновения в ее слои. Успешное применение ионно-лучевой обработки определяется главным образом возможностью предсказания и управления электрическими и механическими свойствами формируемых поверхностей при заданных условиях имплантации [6].

Процесс осуществляется в стационарных устройствах с вакуумом, достаточным для обеспечения необходимого свободного пробега ионов (рис. 1.6, а).

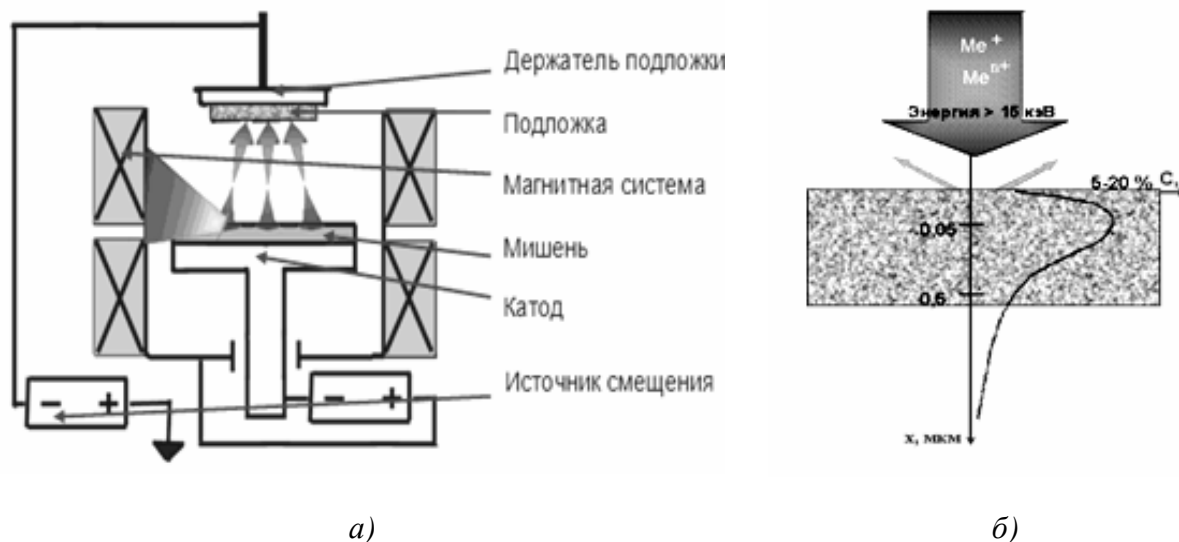


Рис. 1.6. Схема устройства ионно-лучевой обработки (а) и распределение концентрации легирующего элемента по глубине обрабатываемого материала (б)

Для охлаждения зоны реакции и предотвращения перегрева обрабатываемого материала используют жидкий азот или гелий. На практике нередко используются криогенные системы, позволяющие достичь глубокого вакуума и создать надежное охлаждение обрабатываемого материала.

В случае азотирования в аргон добавляется примесь азота в нужной концентрации или используется мишень из подходящего соединения азота. Далее включается источник энергии для поддержания высокочастотного разряда. Поток ионов аргона ударяет в мишень, вырывая (вытравливая) из нее атомы и ионы, содержащие азот. Отразившись от мишени, луч ударяет в подложку, имплантируя в ее поверхность содержащиеся в луче ионы и атомы легирующего элемента. В случае примеси газообразного азота режим подбирают так, чтобы нейтральные атомы или ионы аргона бомбардировали (травили) поверхность обрабатываемого материала, создавая условия для проникновения атомов и ионов азота вглубь материала с образованием нитридных решеток [5]. При этом распределение легирующего элемента по глубине обрабатываемого материала характеризуется зависимостью, представленной на рис. 1.6, б.

Прежде всего следует обратить внимание на то, что в данном случае суть ионно-лучевой обработки заключается не в образовании покрытия, а во внедрении легирующих элементов и их соединений на глубину порядка от одного до нескольких микронов, что формирует внутренний модифицированный слой, сродненный со структурой обработанного материала и связанный с его кристаллической решеткой, а в некоторых случаях этот процесс идет с образованием новой так называемой аморфной структуры, которая оказывает положительный эффект на стойкость изделия.

При ионной имплантации в зависимости от флюенса (интегральной плотности потока) ионов возможно образование в поверхностных слоях разбавленных пересыщенных (метастабильных) твердых растворов, выделение новых фаз, а также потери дальнего порядка в расположении атомов, образующих кристаллическую решетку твердого тела. Схема фазовых состояний металлических материалов, подвергнутых ионно-лучевой обработке, приведена на рис. 1.7.

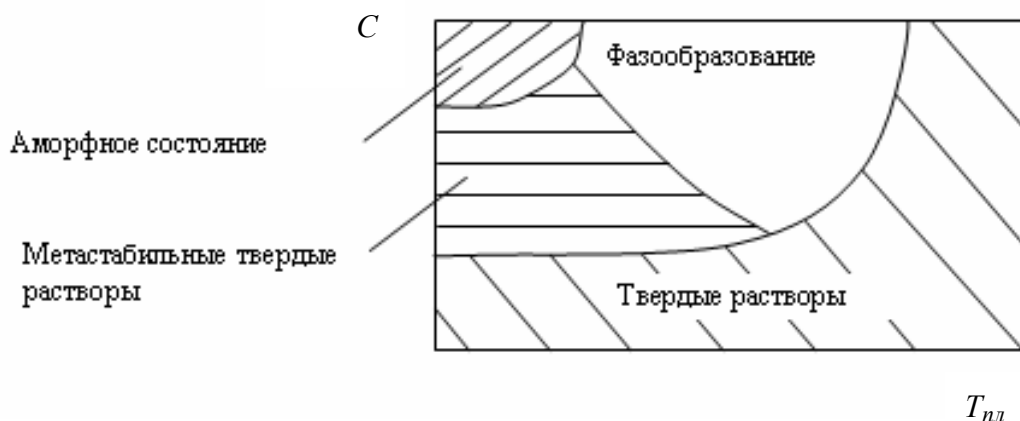


Рис. 1.7. Зависимость концентрации легирующей примеси C от температуры имплантации $T_{пл}$

Определение конкретных концентрационных и температурных параметров реализации той или иной структуры представляет достаточно сложную задачу, требующую учета параметров ионно-лучевой обработки (энергия, угол падения, зарядовое состояние имплантированных частиц, плотность ионного тока, температура процесса) и исходной микроструктуры обрабатываемого материала.

В последнее время ионно-лучевая обработка, как метод модификации поверхности, привлекает все больше внимание специалистов различного профиля.

Это обуславливается:

- изменением структуры материала на определенную глубину и формированием в поверхностном слое повышенной микротвердости и остаточных напряжений сжатия без изменения геометрических параметров поверхности;

- образованием в поверхностном слое путем обработки активными ионами (азот, углерод и др.) устойчивых химических соединений (нитриды, карбиды), которые существенно изменяют как физико-механические, так и химические свойства поверхности;

- введением в поверхность не только ионов различных атомов, но и химических соединений и созданием одновременно упрочняющей фазы из боридов, нитридов или карбидов.

Основные преимущества ионно-лучевой обработки по сравнению с другими методами легирования поверхности:

- возможность получения практически любой комбинации «матрица – легирующий компонент»;

- отсутствие проблемы адгезии, характерной для технологических процессов нанесения покрытий;

- неизменность размеров обрабатываемой поверхности детали;

- возможность проведения процесса при любых температурах, в том числе комнатных и отрицательных;

- внедрение строго дозированных количеств легирующих примесей;

- исключительная чистота процесса;

- возможность получения любых профилей залегания примеси по глубине;

- высокая воспроизводимость полученных структур;

- простота управления ионным пучком и возможность обработки определенных участков поверхности.

ТЕМА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Ионная имплантация

Физические основы ионной имплантации состоят в следующем [11]. При внедрении ионов в твердое тело происходят столкновения с частицами среды, приводящие к торможению и изменению направления движения ионов, смещению атомов мишени, образованию вторичных частиц и излучению квантов. К основным механизмам торможения ионов в твердом теле можно отнести следующие:

- неупругие взаимодействия со связанными электронами вещества (электронное торможение);
- упругие соударения с ядрами (ядерное торможение);
- неупругие соударения с ядрами;
- торможение за счет генерации фотонов.

Наиболее существенное влияние на свойства имплантированных материалов оказывает ядерное (доминирует при низких скоростях ионов) и электронное торможение.

Если предположить, что процессы независимы друг от друга, то выражение для потерь энергии ионом на единицу пути (величина тормозной способности) для аморфной мишени

$$\frac{dE}{dx} = N[S_n(E) + S_e(E)], \quad (2.1)$$

где $S_n(E)$ и $S_e(E)$ – сечения ядерного и электронного торможения; N – атомная плотность мишени.

При известных зависимостях $S_n(E)$ и $S_e(E)$ интегрирование выражения (2.1) приводит к виду:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}, \quad (2.2)$$

где R – пробег частицы с начальной энергией E .

В зависимости от энергии и массы ускоренных частиц, а также порядкового номера атомов вещества будет преобладать один из видов торможения. При низких энергиях имплантации ($< 0,01$ – энергия дана в сис-

теме центра масс в единицах $Z_1 Z_2 e^2 / a$, где Z_1 и Z_2 – порядковые номера элементов, a – длина экранирования) наиболее существенны процессы передачи импульса и энергии ионов атомам мишени, что ведет к образованию фононов и радиационных дефектов и, естественно, к доминированию ядерного торможения. При высоких энергиях внедрения преобладает передача энергии электронам атомов мишени, что приводит к возбуждению последних и ионизации, а также ко вторичным процессам.

2.1.1. Ядерное торможение

Потери ионом энергии dE , обусловленные ядерными взаимодействиями в слое толщиной dx , пропорциональны числу атомов в единице объема N и полной энергии, передаваемой всем частицам мишени в этом слое.

Тогда сечение ядерного торможения будет определяться по формуле

$$S_n(E) = -\frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dx} \right)_n = \int_0^\infty T_n(E, p) 2\pi p dp = \int_0^{T_m} T_n d\sigma(E, T_n), \quad (2.3)$$

где $d\sigma$ – дифференциальное поперечное сечение взаимодействия ($d\sigma = 2\pi p dp$); p – прицельное расстояние (рис. 2.1); T_n – энергия, передаваемая мишени налетающими ионами в ходе столкновений; T_m – максимальная энергия, передаваемая при столкновении;

$$T_m = 4 \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} E, \quad (2.4)$$

где M_1 и M_2 – массы атомов иона и мишени соответственно;

$$T_n(E, p) = E \frac{2M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} (1 - \cos \Phi), \quad (2.5)$$

где Φ – угол отклонения в системе центра масс.

Величина Φ может быть найдена следующим образом:

$$\Phi = \pi - 2 \int_{r_{\min}}^\infty \frac{p / r^2 dr}{\left[1 - V(r) / E_r - p^2 / r^2 \right]^{1/2}}. \quad (2.6)$$

В выражении (2.6) $r = r_1 + r_2$ – расстояние между частицами в системе центра масс; $V(r)$ – потенциал взаимодействия; $E_r = EM_2 / (M_1 + M_2)$ – энергия иона в системе центра масс. Решающее значение здесь приобретает расчет величины $V(r)$.

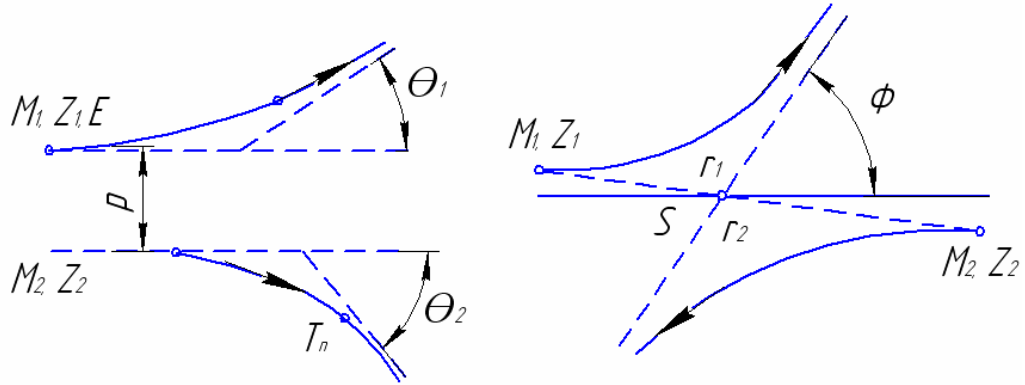


Рис. 2.1. Случай рассеяния двух частиц в лабораторной системе координат (а) и в системе центра масс (б)

В общем случае потенциал межатомного взаимодействия может быть записан формулой

$$V(r) = (Z_1 Z_2 e^2 / r) x(r / a), \quad (2.7)$$

где (r / a) – функция экранирования.

Линдхард, Шарф и Шиот (ЛШШ) рассчитали дифференциальное сечение для ядерного торможения, используя статистическую модель атома Томаса – Ферми и введя безразмерные величины, характеризующие пробег частицы, энергетические потери и рассеяние соответственно:

$$p = 4\pi a^2 N \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} R;$$

$$\varepsilon = \frac{a}{q^2} \frac{M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)} E; \quad (2.8)$$

$$t = \varepsilon \sin^2(\Phi / 2).$$

Они получили значение длины экранирования, равное

$$a \approx 0,885a_0 / (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}, \quad (2.9)$$

(где a_0 – радиус атома Бора), и описали зависимость величины дальних энергетических потерь при ядерном торможении энергии налетающего иона для большого числа комбинаций ион – мишень.

Необходимо отметить, что в рамках теории ЛШШ отдельно рассматриваются взаимодействие движущегося иона с электронами и взаимодействие между ядрами иона и атома мишени с учетом, что оба механизма потерь аддитивные, а среда однородная и изотропная.

В 80-х годах, когда расширились возможности численного компьютерного моделирования, были разработаны новые, более совершенные потенциалы взаимодействия – Wilson, Haggmark, Biersack (WHB) и Ziegler, Biersack, Littmark (ZBL), которые позволили рассчитать энергию взаимодействия двух атомов в приближениях первого и второго порядка.

Согласно модели ZBL

$$a \approx 0,885a_0 / (Z_1^{0,23} + Z_2^{0,23}). \quad (2.10)$$

Оценки пробегов ионов и энергетических потерь при торможении в случае потенциалов WHB и ZBL продемонстрировали лучшее согласие с экспериментальными данными, чем для потенциала Томаса – Ферми.

2.1.2. Электронное торможение

Процессы электронного торможения долгое время не являлись объектом специальных фундаментальных исследований, а изучались лишь побочно или же при решении узких технических задач. В связи с этим на сегодняшний день существует несколько подходов или эмпирических формул. В области высоких энергий и скоростей ионов обычно считают справедливой теорию Бете. Для низких энергий было доказано, что сечение электронного торможения пропорционально скорости ионов, т.е. корню квадратному из их энергии:

$$S_e(E) = -\frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dx} \right)_e = k'E^{1/2}; \quad (2.11)$$

$$k' = \xi_e \frac{0,0793 Z_1^{1/2} Z_2^{1/2} (A_1 + A_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} A_1^{3/2} A_2^{3/2}}, \quad (2.12)$$

где ξ_e – безразмерная постоянная того же порядка, что и $Z_1^{1/6}$.

Используя рассчитанные значения $S_e(E)$ и $S_n(E)$ и выражение (2.2), можно вычислить пробег иона. Первые теоретические расчеты для ионной имплантации были выполнены в рамках теории ЛШШ. С помощью этой теории можно, в частности, оценить разброс пробегов ΔR :

$$\frac{(\Delta R)^2}{R^2} = \frac{s-1}{s(2s-1)} \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (2.13)$$

где s – константа, равная 1 или 2 в зависимости от величины переданной при столкновении энергии; M_1 и M_2 – соответственно массы иона и атома мишени.

Практический интерес для экспериментального исследования представляют значение проекции пробега R на направление падающих ионов – средний проецированный пробег R_p , а также стандартное среднеквадратичное отклонение от этого пробега ΔR_p . Для их расчета необходимо решить интегральные и дифференциальные уравнения теории ЛШШ. В свою очередь, распределение пробегов имплантированных ионов связано с дозой облучения D следующим образом:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right]. \quad (2.14)$$

Это уравнение носит приближенный характер и не учитывает конечных размеров мишени, а также наличия обратно рассеянных ионов, число которых может быть оценено методом Монте-Карло. Если при расчете пробегов учитывать моменты более высоких порядков, то кривая распределения пробегов приобретает сложный вид. В имеющихся функциях распределения ионов, как правило, также не принимаются во внимание эффекты каналирования и диффузии, результатом чего могут быть существенные различия между расчетными и экспериментальными величинами R_p и ΔR_p .

В целом для строгого количественного описания профилей распределения имплантированной примеси обычно используют три основных подхода: математическое моделирование процессов прохождения ионов в веществе методом Монте-Карло; численное решение транспортного уравнения Больцмана; метод моментов распределений, исходной точкой которого также является уравнение Больцмана.

Имеющиеся справочные данные, таблицы и расчетные программы не охватывают все встречающиеся на практике комбинации ион – мишень. Предполагается, что полные потери энергии и квадратичный разброс потерь энергии в многокомпонентной мишени аддитивны, а решение транспортного уравнения может быть получено в квадратурах; формула сложения средних проецированных пробегов при этом приобретает следующий вид:

$$1/R_p = 1/R_{p1} + 1/R_{p2}, \quad (2.15)$$

где R_p – средний проецированный пробег ионов в веществе, состоящем из атомов двух элементов, атомная плотность которого $N = N_1 + N_2$; R_{p1} и R_{p2} – пробеги в простых веществах, состоящих из атомов первого и второго типа с атомными плотностями N_1 и N_2 соответственно.

Тогда для относительного среднеквадратичного разброса $\omega = \Delta R_p / R_p$ имплантированных ионов в объеме мишени получим:

$$\omega^2 = \frac{\omega_1^2 [R_{p1}(1 + \omega_1^2)]^{-1} + \omega_2^2 [R_{p2}(1 + \omega_2^2)]^{-1}}{[R_{p1}(1 + \omega_1^2)]^{-1} + \omega_2^2 [R_{p2}(1 + \omega_2^2)]^{-1}}, \quad (2.16)$$

где ω_1 и ω_2 – относительный разброс пробегов в мишенях, состоящих из атомов первого и второго типа соответственно (величины ω_1 и ω_2 от плотности мишени не зависят).

Необходимо отметить, что основным недостатком почти всех теоретических описаний процесса ионной имплантации является их справедливость лишь для аморфных мишеней.

Пробеги же в реальных веществах отличаются от расчетных вследствие возможного каналирования внедряемых частиц, явлений радиационно-стимулированной диффузии и т.п. В силу указанных выше причин существ-

вует необходимость проведения экспериментальных исследований с целью определения реальных профилей распределения внедренных ионов. Для этой цели чаще всего используются методы Резерфордского обратного рассеяния, ядерных реакций, вторичной ионной масс-спектропии и некоторые другие. Сравнение с экспериментальными данными позволяет моделировать вторичные процессы, протекающие во время и после ионной бомбардировки (включая диффузию внедренной примеси), а также получать важную информацию о деталях структуры ионно-имплантированного слоя.

Обработка поверхности твердого тела пучками заряженных частиц, начиная со сверхпрочных кристаллов природного алмаза и кончая эластичными природными или синтезированными высокомолекулярными соединениями, открывает широкие возможности по управлению их электрическими, оптическими, а также трибологическими свойствами. Характер и последствия ионно-лучевого воздействия на материал мишени зависят как от природы вещества, так и от типа излучения, мощности, интегрального потока, а также от температуры материала при его облучении. Движение заряженной частицы в твердом теле сопровождается потерей энергии в результате взаимодействия с атомами и электронами мишени.

Атомы, испытавшие столкновения с налетающей частицей, будут смещаться из своих положений в случае, когда энергия возбуждения превышает энергию связи атома в материале. При малой плотности атомных столкновений число смещенных атомов будет пропорционально количеству энергии, переданной атомам мишени в упругих столкновениях. В ходе электронного торможения частицы в твердом теле происходит ионизация близлежащих к траектории атомов мишени с образованием ионов и электронов, причем некоторая часть электронов имеет энергию, достаточную для выхода за пределы трека имплантируемого иона. Вместе с тем испытывавшие соударения атомы могут также перейти в возбужденное состояние.

Температура области трека определяется конкурирующими процессами передачи атомам мишени энергии возбужденной подсистемы электронов посредством электрон-фононного взаимодействия и отвода тепла в окружающую матрицу. Свидетельством достижения высоких температур в области движения частицы могут служить экспериментальные результаты по распылению мишени высокоэнергетическими ионами, когда энергия распыленных атомов мишени соответствует температуре 3500 К. Локальный разогрев вдоль пути прохождения высокоэнергетической частицы, а затем быстрое охлаждение вызывают образование нарушенных областей

вдоль траектории движения частицы, т.е. скрытых (латентных) треков. Интенсивность дефектообразования в треках, согласно этой модели, должна зависеть от теплофизических характеристик облучаемого материала, а также от величины электрон-фононного взаимодействия.

Концентрацию дефектов в условиях отсутствия отжига мишени в общем случае (без уточнения природы дефектов) можно оценить по следующему уравнению:

$$N_d = N \left[1 - \exp \left(- \frac{0,42}{E_d N dx} \frac{dE}{dx} D \right) \right], \quad (2.17)$$

где N – атомная плотность; E_d – энергия смещения частицы; D – доза; dE/dx – энергия, выделяющаяся в мишени на единицу пути.

Проведенные исследования имплантации при низких температурах показали, что не более 30 % пар сохраняются после заключительных стадий каскадного процесса. Радиационные эффекты, связанные с повреждениями структуры материала в результате электронных и ядерных взаимодействий, переводят его в неравновесное термодинамическое состояние, сохраняющееся достаточно долго после прекращения облучения.

За быстро протекающими процессами первичного радиационного воздействия следуют относительно медленные термически активируемые процессы релаксации. Взаимодействие первичных дефектов между собой и с внедренными атомами приводит к образованию кластеров и других видов дефектов. Многообразие типов и форм вторичных дефектов в облученном веществе отражает как сложный характер процессов релаксации при переходе системы к минимуму свободной энергии, так и неравномерность пространственного разупорядочения структуры, которая заложена в самом характере взаимодействия ускоренных ионов с веществом.

2.2. Нанесение покрытий

2.2.1. Основные принципы взаимодействия ионов с поверхностью

Основные принципы взаимодействия ионов с материалами в процессах вакуумного электродугового нанесения покрытий аналогичны рассмотренным в п. 2.1 и реализуются на поверхности и приповерхностных слоях, поскольку кинетическая энергия частиц не превышает 1 – 2 кэВ.

В основном используются положительные одно- и двух-, реже трех-зарядные ионы, а также молекулярные ионы и заряженные кластеры, микрокапли. При таких энергиях толщина поверхностного слоя, в котором осуществляется взаимодействие ионов с материалами, не превышает 1 – 2 Нм, т. е. ограничена максимум двумя десятками атомных слоев у поверхности.

Двигаясь от вакуумной дуги к обрабатываемой поверхности, ионы взаимодействуют не только между собой, но и с молекулами и атомами паров и остаточных газов, содержащихся в вакуумном объеме. При этом первичные ионы рассеиваются и теряют энергию, происходят процессы перезарядки ионов и изменяется состав ионного потока. Чтобы этого не происходило, длина свободного пробега ионов, которая обратно пропорциональна произведению плотности атомов паров и газов на сечение соответствующего взаимодействия, должна быть намного больше, чем путь, проходимый ионами.

При сближении иона с поверхностью твердого тела на расстояние порядка атомных размеров напряженность электрического поля между ионом и поверхностью становится настолько большой, что возможен переход электрона из твердого тела к иону и его нейтрализация. При этом освобождается энергия, которая может излучаться, а также безизлучательно передаваться другому электрону твердого тела. Для ионов с энергией 1 – 2 кэВ вероятность их нейтрализации весьма большая, особенно если твердым телом является металл. Таким образом, в материал непосредственно начинают внедряться нейтральные атомы. Однако в литературе для краткости применяется термин «ион», и здесь он тоже используется для обозначения движущейся внутри твердого тела частицы.

Внедрение иона внутрь твердого тела происходит одновременно с потерей им энергии вследствие столкновений с ядрами атомов и электронной подсистемой тела. При этом ионы испытывают два типа соударений – упругие и неупругие.

Упругими (ядерными) соударениями называют такие, при которых энергия передается атомам твердого тела. При этом характер торможения внедряющегося иона будет дискретным. Результатом упругих столкновений является рассеяние иона (в том числе и обратное), усиление колебаний решетки, смещение атомов, т.е. образование дефектов. В случае, когда энергия и импульс внедряемого иона передаются поверхностным атомам, происходит распыление поверхности.

Неупругими (электронными) являются соударения, в которых энергия иона сообщается электронам. Эти соударения обуславливают возбуждение и ионизацию атомов и молекул, диссоциацию молекул в результате передачи энергии электронам на атомных орбиталях, а также возбуждение всей электронной подсистемы обрабатываемого металла. В результате неупругих столкновений возникают электромагнитное излучение, вторичная электронная эмиссия, зарядка распыленных частиц, перезарядка и т.д.

В зависимости от энергии бомбардирующих ионов преобладает ядерное или электронное торможение. Ядерное торможение имеет место при низких энергиях ионов, а электронное – при высоких. Для случая вакуумного электродугового нанесения покрытий следует рассматривать только механизм ядерного торможения (упругие столкновения), так как используемые энергии ионов невысоки.

Рассмотрим процессы, происходящие в поверхностных атомных слоях материала при упругом (ядерном) взаимодействии падающих (первичных) ионов. Одним из них является обратное рассеяние ионов (вторичные ионы), характеризуемое коэффициентом рассеяния, определяемым как число обратно рассеянных ионов, приходящихся на один бомбардирующий ион R_N . Ион в материале испытывает множество столкновений с атомами. В результате его импульс может изменить свое направление на обратное и ион вылетит из материала.

Вероятность обратного рассеяния зависит от энергии, массы иона, свойств и структуры обрабатываемой поверхности. В частности, с уменьшением энергии вероятность обратного рассеяния увеличивается. Если измерять распределение по энергиям ионов, отраженных в определенном направлении в результате однократного рассеяния, то можно найти элементный состав материала. На этом основаны методы обратного рассеяния медленных ионов, которые позволяют определять состав тонких поверхностных слоев (≈ 1 Нм).

Бомбардирующие поверхность ионы рассеиваются обратно в виде нейтральных атомов, а также положительно и отрицательно заряженных ионов. Доля заряженной составляющей уменьшается относительно нейтральной составляющей со снижением энергии обратно рассеянных ионов. Это позволяет сделать вывод, что в методе вакуумного электродугового нанесения покрытий при использовании ионов с энергией 1 – 1,5 кэВ доля обратно рассеянных заряженных частиц весьма невелика и не превышает 10 %. Более того, оказывается, что при энергии менее 1 кэВ большая часть

ионов даже не проникает в материал (рассеивается обратно), а лишь передает атомам свою энергию и импульс, оставаясь на поверхности материала, т.е. конденсируясь на ней.

Рассмотрим еще один процесс, происходящий при взаимодействии бомбардирующих ионов с поверхностью материала. Атом или группы атомов в поверхностном слое толщиной до нескольких нанометров, получившие достаточно сильный импульс в направлении границы материал – вакуум, могут выйти с поверхности, в результате чего произойдет распыление вещества. Согласно современным представлениям предполагается, что проникновение иона в материал вызывает каскад бинарных упругих столкновений смещенных атомов.

Конечным результатом каскада столкновений может стать передача поверхностному атому достаточной энергии и импульса необходимого направления для того, чтобы покинуть поверхность. Распыление будет происходить, если энергия иона превышает некоторое значение E_{II} .

Предполагая, что энергия связи поверхностного атома материала равна энергии сублимации E_C , пороговую энергию распыления можно оценить с помощью соотношения

$$\frac{4M_1M_2E_{II}}{(M_1 + M_2)^2} > E_C, \quad (2.18)$$

где M_1 и M_2 – атомные массы соответственно бомбардирующего иона и обрабатываемого материала.

Для характеристики процесса ионного распыления вводится коэффициент распыления S , равный количеству распыленных атомов, приходящихся на один бомбардирующий ион. Установлено, что коэффициент зависит от массы, энергии, направления движения бомбардирующего иона, свойств обрабатываемого материала, плотности потока ионов, давления и состава адсорбированных поверхностью газов и других факторов. В частности, с увеличением энергии бомбардирующего иона коэффициент распыления возрастает, достигает максимума, а затем уменьшается. Практически для всех материалов с увеличением угла падения ионов относительно нормали к поверхности коэффициент распыления S возрастает.

Многие материалы, поверхность которых подвергается воздействию ионных потоков, многокомпонентны. Ионное распыление многокомпонентных материалов и соединений имеет особенности, связанные с раз-

личной распыляемостью компонентов. Преимущественное распыление какого-либо компонента приводит к формированию на ней развитого рельефа. Основное влияние на эффект такого преимущественного или селективного распыления оказывают различие масс атомных компонент материала, прочность их связи с поверхностью, энергия и масса бомбардирующего иона. Этот эффект особенно усиливается, если поток ионов также многокомпонентный.

Распыленные частицы имеют более высокую кинетическую энергию, чем испаренные. В основном это атомы, ионы, молекулы и кластеры, иногда в возбужденном состоянии. При энергии бомбардирующих ионов 1 – 2 кэВ частицы выбиваются из поверхностных слоев материала и коэффициент распыления $S > 1$. Если энергию ионов уменьшить до 30 – 200 эВ, то $S < 1$. Первый вариант можно эффективно использовать для ионного распыления поверхности подложки в вакууме, а второй – для нанесения покрытий из ионного потока, что широко применяется на практике при создании установок вакуумного электродугового нанесения покрытий.

Если при упругом столкновении иона с атомом материала энергия, передаваемая атому, меньше необходимой для выбивания его из узла, то колебания атома относительно положения равновесия увеличиваются, что приводит к возрастанию амплитуды колебаний соседних атомов, т.е. происходят нагрев материала и конденсация иона. Как правило, около 90 % всей внесенной ионами в материал энергии превращается в теплоту. Такой процесс находит практическое применение в установках для нагрева изделий до необходимой температуры нанесения покрытий. Причем два процесса происходят одновременно – нагрев и распыление поверхности обрабатываемого материала.

Помимо рассмотренных выше процессов при бомбардировке ионами поверхности материала может происходить смещение атомов из занимаемых ими узлов кристаллической решетки, т.е. в поверхностном слое материала образуются радиационные дефекты. Они обладают определенной подвижностью и, объединяясь между собой или с примесями, могут создавать сложные комплексы дефектов.

В процессе ионной бомбардировки с поверхности обрабатываемого материала происходит эмиссия электронов. Это связано с тем, что в поле иона потенциальный барьер для электронов значительно понижается и они могут выходить из материала. При этом возможны два вида электронных переходов, связанных с нейтрализацией иона – резонансные и оже-переходы. Как правило, нейтрализация ионов происходит в основном че-

рез оже-переходы как наиболее вероятные. Большая часть вторичных электронов имеет энергию менее 5 эВ. Явление эмиссии электронов с поверхности при ионной обработке материалов используется для анализа их состава (метод оже-электронной спектроскопии).

Таким образом, из изложенного выше следует, что процесс нанесения покрытий имеет место, когда коэффициент распыления $S < 1$. В этом случае большая часть энергии ионов, падающих на подложку, идет на ее нагрев и аккумулируется.

2.2.2. Формирование ионных потоков

На формирование ионных потоков, направленных к подложке, оказывают влияние величина прикладываемого потенциала и форма самой подложки. Это следует из уравнения движения ионов

$$M_i \frac{d^2 r}{dt^2} = Z_i e E = -Z_i e \Delta \phi, \quad (2.19)$$

где M_i – масса иона; dr – расстояние между ионами; dt – время; $Z_i e$ – заряд иона; E – напряженность электрического поля; $\Delta \phi$ – постоянная.

Величина $\Delta \phi$ находится из уравнения Пуассона:

$$\Delta \phi = -\frac{1}{\epsilon_0} n_i Z_i e, \quad (2.20)$$

где n_i – плотность ионов плазмы; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Из уравнений (2.19) и (2.20) следует, что если подложка представляет собой бесконечно плоскую поверхность, то только в этом случае поток ионов к ней будет однородным, т.е. концентрация ионов в местах, равноудаленных от поверхности, будет одинаковой. Если же на поверхности подложки имеются выступы и углубления различной формы, то это приводит к искривлению траектории движения ионов и, соответственно, к тому, что количество ионов, попадающих на подложку в единицу времени, неодинаково в разных ее местах. Как следствие, толщина наносимого покрытия будет разной. Из уравнений (2.19) и (2.20) понятно, что с увеличением потенциала неоднородность плотности ионов в плазме повышается.

Область возникающих неоднородностей ограничивается в основном толщиной примыкающего к ней слоя Дебая, т.е. слоя, в котором потенциал, прилагаемый к подложке, эффективно воздействует на ионы. Толщину слоя Дебая d_D можно найти из уравнения (2.20). Однако это уравнение имеет аналитическое решение для немногих случаев. В частности, для бесконечной и идеально гладкой поверхности имеем

$$d_D = \sqrt{\frac{\Delta\phi\epsilon_0}{n_i Z_i e}}. \quad (2.21)$$

Учитывая, что скорости ионов различные, толщину слоя Дебая можно рассчитать по другому уравнению. Потенциальная энергия иона в электрическом поле равна $Z_i e\phi$. Согласно формуле Больцмана ионы в единице объема в слое Дебая распределяются по энергиям следующим образом:

$$n_i = n_{i0} e^{-\frac{Z_i e\phi}{kT}}, \quad (2.22)$$

где n_{i0} – плотность ионов вдали от слоя Дебая.

Подставляя (2.22) в (2.20), получаем уравнение

$$\Delta\phi = -\frac{Z_i e n_i}{\epsilon_0} e^{-\frac{Z_i e\phi}{kT}}. \quad (2.23)$$

Решение уравнения (2.23) для бесконечной и идеально гладкой поверхности может быть представлено следующей формулой:

$$\frac{\sqrt{1 - \frac{n_{i0}(Z_i e)^2 e^{-\frac{Z_i e\phi}{kT}}}{C\epsilon_0 kT}} - 1}{\sqrt{1 - \frac{n_{i0}(Z_i e)^2 e^{-\frac{Z_i e\phi}{kT}}}{C\epsilon_0 kT}} + 1}} = e^{-\sqrt{2Cx}} + C_1, \quad (2.24)$$

где C , C_1 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий; x – расстояние от поверхности до искомой точки.

Таким образом, видно, что, решив уравнение (2.20), можно найти зависимость $\varphi(x)$ с учетом изменения плотности ионов $n_i(x)$ в слое Дебая и тем самым определить все основные особенности формирования ионных потоков. Поэтому при решении конкретных задач необходимо учитывать соотношение величины d_D , размера и формы подложки. Если длина и ширина плоского изделия на подложке значительно превышает d_D , тогда его можно рассматривать как бесконечное, плоское, идеально гладкое тело и краевые эффекты не будут сказываться на толщине и структуре наносимого покрытия. В обратном случае краевые эффекты приводят к неоднородности и разнотолщинности наносимого покрытия.

Как следует из уравнения (2.21), толщина слоя Дебая d_D зависит от плотности ионов n_i . С увеличением плотности d_D уменьшается, а, следовательно, уменьшается размер изделий, поверхности которых можно рассматривать как бесконечные. В случае использования вакуумного электродугового источника ионов плотность n_i повышается с увеличением разрядного тока вакуумной дуги, а также при напуске (до некоторых пределов) в вакуумную систему инертных (гелий, аргон) или реакционных (азот, кислород, ацетилен) газов, которые ионизируются. Это обстоятельство необходимо учитывать при оптимизации технологических параметров процесса нанесения покрытий.

Следовательно, можно сделать вывод, что формирование ионных потоков, идущих к подложке, происходит в основном в слое Дебая, толщина которого зависит от плотности ионов n_i их зарядов, масс и энергии. Развитая поверхность подложки, наличие на ней неровностей вызывают разнотолщинность наносимого покрытия, формирование в нем различных структур.

Для снижения разнотолщинности покрытий необходимо стремиться к уменьшению толщины слоя Дебая, что достигается уменьшением прикладываемого к подложке потенциала либо увеличением плотности ионов n_i . Однако такое изменение указанных параметров может приводить к ухудшению эксплуатационных свойств покрытий, поэтому требуется определение оптимального соотношения параметров.

ТЕМА 3. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

3.1. Установки для проведения ионно-лучевой обработки

Получение и формирование ионных пучков, обработка материалов при ионной имплантации происходят в специально разработанных ионно-лучевых установках, к которым в зависимости от назначения предъявляются разные требования. В установках для исследовательских целей на первом плане стоит возможность получения пучков различных ионов, точный контроль максимально возможного числа параметров, чистота экспериментальных условий. От промышленных установок требуются высокая надежность в работе, простота обслуживания, высокая степень автоматизации, высокая производительность и низкая себестоимость обработки.

К установкам для имплантации материалов электронной промышленности и конструкционных материалов предъявляются разные требования. В первом случае возникают более жесткие требования к воспроизводимости результатов имплантации, однородности пучка, допустимым температурам ионной обработки.

При обработке конструкционных материалов необходимо быстрое достижение концентрации легирующей примеси в единицы и десятки процентов. Легирование деталей сложной формы ужесточает требования к конструкции камеры для обработки образцов.

В ряде случаев требуется использование ионов тугоплавких металлов, получение которых представляет технически более сложную задачу, чем ионизация газов. Вместе с тем требования к чистоте, стабильности и однородности ионного пучка при имплантации машиностроительных материалов не столь высоки. Следствием широкого диапазона требований явилась тенденция к разработке все более узкоспециализированного оборудования для ионной имплантации.

К основным элементам установки ионной имплантации относятся масс-сепаратор, системы ускорения, формирования и сканирования пучка, камера обработки, система откачки и ионный источник.

Масс-сепаратор позволяет очистить пучок от атомов примеси и выделить ионы необходимого заряда и энергии. Как правило, при имплантации машиностроительных материалов требования к уровню сепарации не слишком высоки.

Вместе с тем важной характеристикой является коэффициент переноса пучка ионов высокой интенсивности, определяющий отношение числа частиц на выходе и входе сепаратора. Для компенсации уменьшения коэффициента переноса необходимо принятие специальных мер. Применяются различные способы механической и электрической сепарации ионов, но наибольшее распространение получили секторные электромагниты, разворачивающие пучок на угол $60 - 90^\circ$.

Системы ускорения, формирования и сканирования пучка. Ускорение пучка осуществляется системой электронных линз. Возможность потери части ионов, связанная с существованием значительного объемного электрического заряда при формировании пучков высокой интенсивности, создает дополнительные проблемы при конструировании ускоряющих систем. Чаще всего применяют двух- и трехэлектродные линзы для создания одно- и двухзакорного ускорения. В сильноточных установках ионной имплантации используют магнитные квадрупольные линзы, способные компенсировать расширение пучка под действием пространственного заряда. Для обработки больших площадей необходимо расфокусировать пучок либо обеспечить его сканирование. Расфокусировка приводит к неравномерной плотности ионного тока в поперечном сечении, поэтому на практике чаще используют сканирование пучка. Разработаны различные системы сканирования – электростатическое, электромагнитное, механическое сканирование, а также комбинированные системы. Механическое сканирование, при котором равномерность облучения обеспечивается перемещением обрабатываемой детали, а пучок ионов неподвижен, широко используют в сильноточных установках.

Системы откачки. В сильноточных ионных ускорителях оптимальным считается вакуум порядка $10^{-3} - 10^{-4}$ Па. В каждом конкретном случае эта величина определяется как компромисс между производительностью, стоимостью и надежностью системы откачки, условиями работы ионного источника, длиной пробега ионов, предельно допустимой концентрацией молекул газа в ускоряющем межэлектродном пространстве. Наиболее распространенные и дешевые вакуумные системы основаны на использовании паромасляных насосов. Основной недостаток этих систем – возможность загрязнения обрабатываемой поверхности парами углеводородных соединений, компоненты которых могут проникать в матрицу обрабатываемого материала. Для предотвращения отрицательного влияния

углеводородных загрязнений используются азотные ловушки или безмасляные средства откачки (турбомолекулярные, геттерные и т.п. насосы).

Камеры обработки образцов. Основное требование к камере обработки образцов – обеспечение высокой производительности процесса. Разработка шлюзовых камер различных типов позволила приблизиться к решению проблемы. Дополнительные трудности связаны с обеспечением равномерности имплантации при обработке деталей сложной формы. Один из путей решения – вращение обрабатываемой детали в различных плоскостях. При этом могут быть существенно снижены требования к системе сканирования, а механическое сканирование исключено вообще. В ряде стран ведется разработка специализированного оборудования для ионной имплантации машиностроительных деталей и инструмента. В настоящее время разработаны установки, позволяющие обрабатывать изделия массой до 1000 кг с линейными размерами свыше 2 м.

В зависимости от класса задач, для решения которых разработана установка, ее компоновка и устройство могут различаться. На рис. 3.1 показаны основные типы установок [5].

Рассмотрим подробнее конструктивные особенности и функциональные возможности отдельных узлов оборудования, применяемого для ионно-лучевой обработки материалов.

Ионные источники. Можно выделить следующие важнейшие требования к источнику для имплантации конструкционных материалов:

- 1) получение высокоинтенсивных пучков ионов (десятки, сотни миллиампер и выше);
- 2) возможность ионизации атомов твердых тел, в том числе тугоплавких;
- 3) высокая надежность и простота обслуживания.

Проще обстоит дело с генерацией интенсивных пучков газовых ионов, получаемых, например, при взаимодействии атомов или молекул газа со свободными электронами достаточно высокой энергии. Ионы летучих веществ можно получить аналогичным образом, испаря соответствующий материал. Возможный путь получения интенсивных пучков нелетучих веществ – распыление поверхности ионами инертных газов с последующей ионизацией выбитых частиц.

В установках для имплантации применяются ионные источники различных типов – Кауфмана, Фримана, Пеннинга, Холла, магнетроны высокочастотные и источники сверхвысокой частоты (СВЧ), дуоплазмотроны, дуговые с прямонакальным катодом, с полым катодом, вакуумно-дуговые.

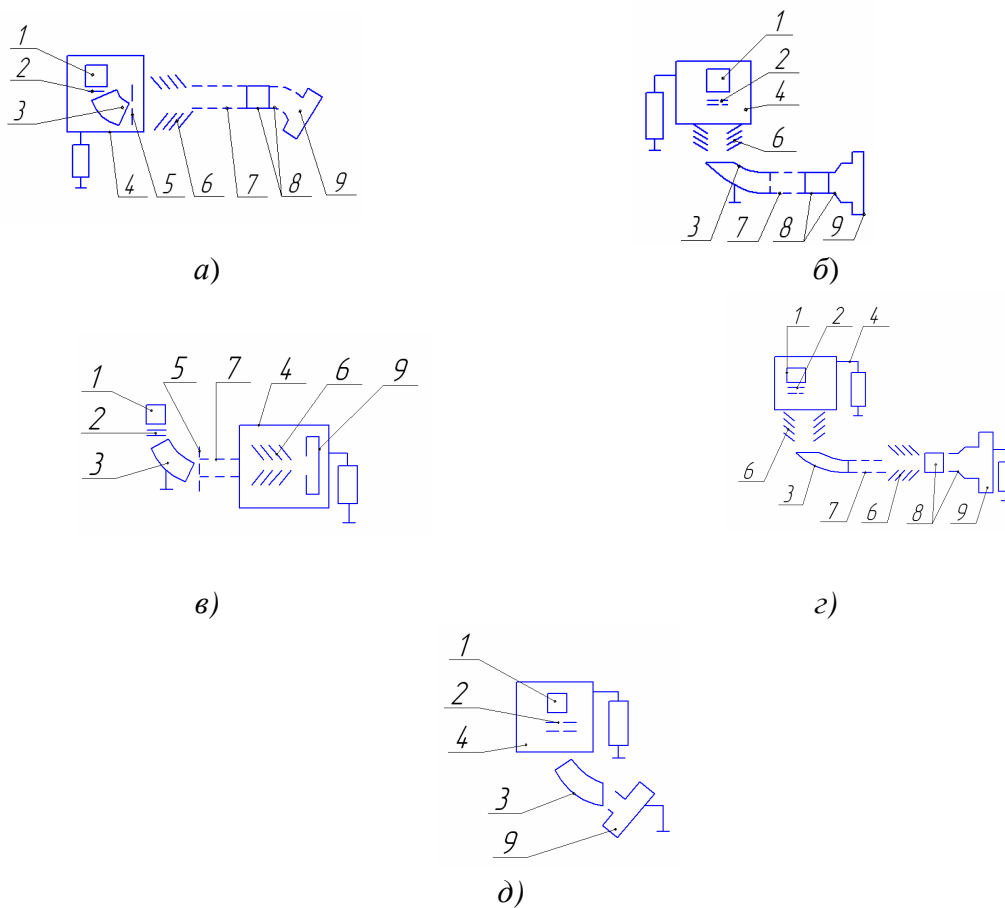


Рис. 3.1. Основные типы установок для ионно-лучевой обработки:
а – установка малых и средних доз; *б* – установка с разделением по массам после ускорения; *в* – сильноточная установка; *г* – высокоэнергетическая установка;
д – установка больших доз с источником, находящимся под высоким потенциалом;
 1 – ионный источник; 2 – система вытягивания и формирования пучка;
 3 – масс-сепаратор; 4 – высоковольтный модуль; 5 – регулируемая диафрагма;
б – система ускорения; 7 – фокусирующая линза; 8 – система сканирования пучка;
 9 – камера обработки образцов

Схемы некоторых источников приведены на рис. 3.2 – 3.5. Отдельно необходимо выделить источники, работающие в импульсном режиме, позволяющие создавать пучки с энергией несколько сотен кэВ и плотностью тока до 500 A/cm^2 при длительности импульса порядка 50 – 100 нс.

Несмотря на существование большого количества различных типов источников, наибольшее распространение получили плазменные источники, в которых генерация ионов происходит в результате столкновения молекул рабочего вещества, находящегося в газо- или парообразном состоянии, с электронами. Плазменные источники ионов различаются типом и

формой разряда, геометрией электродов, температурным диапазоном и зарядовым составом извлекаемого ионного пучка. Для повышения эффективности ионизации используют комбинации магнитных и электрических полей (например, магнетронный разряд), увеличивающие дрейфовый путь электрона в плазме.

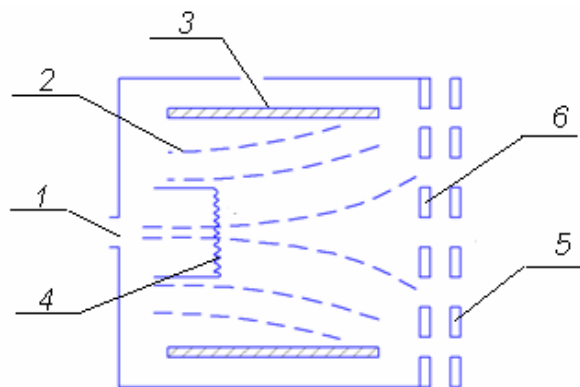


Рис. 3.2. Схема ионного источника Кауфмана с аксиальным катодом:
1 – газ; 2 – линии магнитного поля; 3 – анод; 4 – катод;
5, 6 – экранирующая и ускорительная сетки

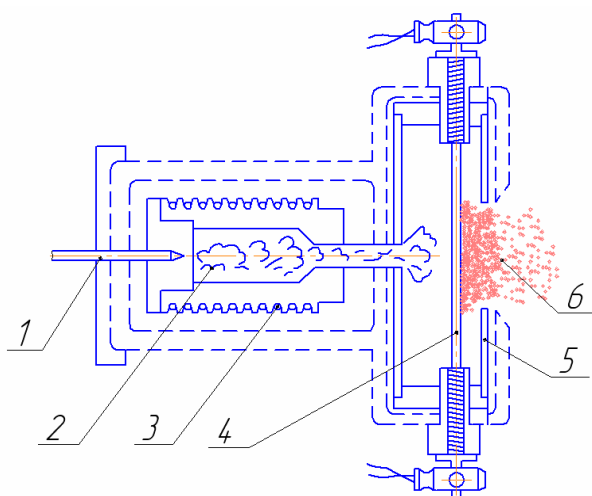


Рис. 3.3. Схема разрядной камеры и нагревателя источника Фримана:
1 – ионный пучок; 2 – разрядная камера; 3 – накаливаемый катод;
4 – магнитное поле; 5 – нагреватель; 6 – плазма

Источники Кауфмана обеспечивают генерацию широких пучков с энергией $10^1 - 10^3$ эВ и плотностью тока $1 - 5$ мА/см², а также независимый контроль плотности и энергии ионного потока. Источники Кауфмана в меньшей степени подходят для получения химически активных ионов,

например, кислорода, из-за быстрой деградации нити накала, однако возможно применение специальных методов ее защиты. Увеличение эффективности отбора ионов из плазмы достигается при использовании источников со щелевидным отверстием, в которых отбор ионов производится поперек оси плазмы. Классическим примером является источник Фримана. При необходимости генерировать ионы тугоплавких элементов источник Фримана допускает встраивание распыляющего электрода. Разновидностью ионных источников с накаливаемым катодом являются дуоплазмотроны, которые обеспечивают большую интенсивность ионного пучка. Ток легких ионов, например, водорода может достигать нескольких ампер. При необходимости генерации в дуоплазмотронах тяжелых ионов используют перезарядку первичных легких ионов.

Проблема деградации нити накала решается с переходом к источникам с холодным катодом. Примером являются источники, использующие тлеющий разряд Пеннинга в продольном магнитном поле (см. рис. 3.4).

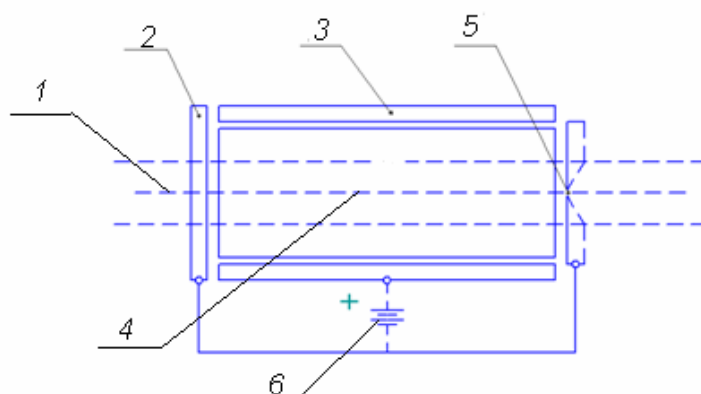


Рис. 3.4. Схема ионного источника Пеннинга: 1 – аксиальное магнитное поле; 2 – катод; 3 – анод; 4 – плазма; 5 – апертура; 6 – источник питания разряда

В источниках Пеннинга степень ионизации плазмы возрастает благодаря большой длине пути электронов, движущихся по спиральным траекториям вдоль силовых линий магнитного поля. Необходимые для ионизации электроны извлекаются из холодного катода под действием высокого напряжения. Источники Пеннинга с холодным катодом очень просты, надежны и долговечны, обеспечивают создание большого количества многозарядных ионов, но, в отличие от источников Кауфмана, не позволяют независимо контролировать плотность и энергию ионного потока. Степень ионизации в таких источниках ниже, а рабочее давление достигает 10^2 Па, что делает необходимой дополнительную откачку вблизи источника.

Проблема деградации катода отсутствует также при использовании источников, в которых ионизация атомов и молекул осуществляется высокочастотным электромагнитным полем. В источниках, основанных на эффекте электронного циклотронного резонанса, генерируется большое число многозарядных ионов. Для получения пучков, состоящих в основном из однозарядных ионов, увеличивают концентрацию электронов в плазме, повышают давление газа и величину магнитного поля. В микроволновых источниках роль нити накала выполняет микроволновой генератор плазмы с частотой колебаний в несколько ГГц. Разброс ионов по энергиям в таких источниках достигает $10 - 10^2$ эВ, то есть превышает разброс в источниках с накаливаемым катодом. Высокочастотные источники весьма чувствительны к загрязнению конструктивных элементов и наиболее эффективны для получения ионов инертных газов, азота и т.п. К преимуществам высокочастотных источников относятся возможность получения ионов низкой энергии, простота и надежность в работе.

Общим недостатком сеточных источников, в том числе многоапертурных, является сравнительно быстрая деградация сеток. Применение вместо сеток электрических и магнитных полей, например, в источниках Холла увеличивает долговечность источника в целом.

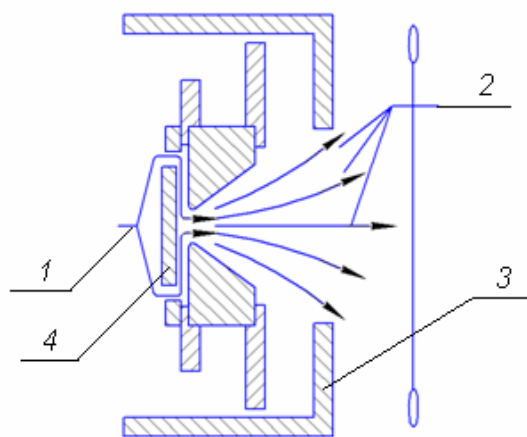


Рис 3.5. Схема ионного источника Холла: 1 – газ; 2 – магнитное поле; 3 – катод; 4 – анод

Источники Холла отличаются простотой конструкции и управления. К основным недостаткам относятся эрозия катода при использовании химически активных газов, взаимозависимость ионного тока и ускоряющего напряжения. Энергия ионов в источниках Холла обычно не превышает 100 эВ.

Для получения ионов металлов широко применяется термическое или электронно-лучевое испарение с последующей ионизацией, а также распыление поверхности металлов и извлечение ионов из дуги паров металла. Каждый из перечисленных методов не лишен тех или иных недостатков. Так, испарение эффективно для металлов с высоким давлением паров, использование дуговых источников связано с генерацией микрокапельной фазы. Получение ионных пучков посредством распыления приводит к разбросу ионов по энергиям до 10 – 50 эВ, что существенно выше, чем в источниках с накаливаемым катодом.

3.1.1. Особенности оборудования для сильноточной ионной имплантации

Основным узлом, обеспечивающим реализацию преимуществ сильноточной низкоэнергетической ионной имплантации, является ионный источник, параметры которого в основном определяют степень изменения физико-механических и эксплуатационных характеристик изделий, а также технико-экономические показатели процесса (производительность, надежность, стоимость, простота управления, экологическая чистота и т.д.).

Для обеспечения конкурентоспособности создаваемых на базе сильноточных ионных источников технологических процессов по производительности и уровню достигаемых эксплуатационных характеристик изделий они должны обладать следующими параметрами: плотность ионного тока на мишени – несколько миллиампер на квадратный сантиметр, энергия ионов – не менее 0,5 кэВ, возможность регулировки энергетических параметров в широком диапазоне. Предпочтительными являются источники, позволяющие за счет собственной мощности нагревать обрабатываемые детали до температур, обеспечивающих эффективное диффузионное перераспределение имплантированной примеси, что исключает применение дополнительных источников нагрева.

Применение сильноточных ионных источников для упрочнения металлов и сплавов имеет свои особенности. Речь идет о контроле за параметрами процесса, определяющими необходимый уровень получаемых физико-механических и эксплуатационных характеристик изделий. Обычно в исследованиях по ионной имплантации одним из основных параметров является доза облучения, требуемая точность определения которой, особенно в микроэлектронике, весьма высока и требует применения спе-

циальных устройств типа цилиндра Фарадея. При сильноточной ионной имплантации, использующей пучки $\sim 1 \text{ мА/см}^2$ и выше, концентрация примеси, достаточная для получения эффекта упрочнения, достигается за время в несколько секунд и дальнейшее облучение вызывает прежде всего увеличение толщины упрочненной зоны за счет процессов диффузионного переноса. В результате оказывается достаточным осуществляемый стандартным амперметром контроль ионного тока на детали. Другим важным параметром при использовании сильноточных ионных пучков является температура обрабатываемой детали, контроль которой не имеет принципиальных отличий и может осуществляться как пирометрическими методами, так и различными контактными датчиками.

Применение сильноточной имплантации низкоэнергетических ионов существенно снижает требования к степени откачки рабочей камеры, так как необходимость ускорения ионов до энергии, не превышающей 1 кэВ, уменьшает вероятность электрического пробоя в ускоряющем межэлектродном зазоре. Одновременно снижаются требования к энергетическому разбросу ионов, выходящих из ионного источника.

К распространенным в сильноточных ионно-лучевых установках источникам ионов относятся источники на базе ускорителей с замкнутым дрейфом электронов. Такие устройства используют ускоряющее напряжение 0,1 – 2,0 кВ, суммарный ионный ток может достигать нескольких ампер, а средняя энергия ионов – порядка 0,7 ускоряющего напряжения $U_{УСК}$. Разновидностью такого типа источников является ускоритель с анодным слоем, ускоряющее напряжение в котором достигает нескольких киловольт, энергия ионов – порядка $(0,3 - 0,5)U_{УСК}$, а ионный ток – от нескольких сотен миллиампер до единиц ампер.

Упрощенная схема источника приведена на рис. 3.6. Источник обладает достаточной для производственных целей производительностью, прост в обслуживании и имеет большой срок службы, фактически лимитируемый временем «запыления» изоляторов, которые легко подвергаются очистке.

В последнее время в имплантационной металлургии стали достаточно широко применяться источники ионов, разработанные в качестве двигателей для управления космическими объектами и имеющие диаметр до 1,5 м. Такие источники могут генерировать пучки различного размера и формы с однородным распределением плотности ионного тока по сечению. К важным преимуществам этого типа источников относятся простота конструк-

ции, надежность в работе, долговечность и экономное расходование как электроэнергии, так и ионизируемого вещества.

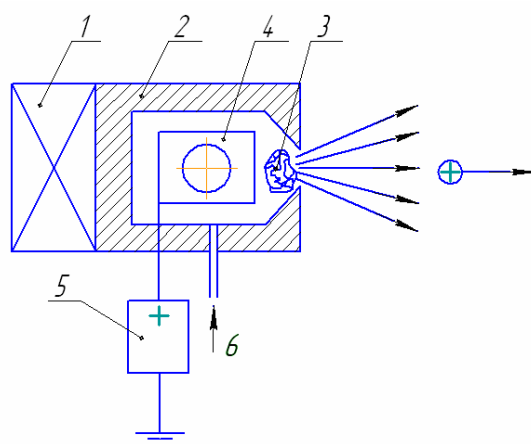


Рис. 3.6. Схема ионного источника с замкнутым дрейфом электронов:
1 – магнит; 2 – магнитопровод-катод; 3 – разрядное пространство; 4 – анод;
5 – блок питания; 6 – подача газа

Практическое использования ионной имплантации конструкционных материалов требует решения проблемы обработки больших площадей. В таких случаях эффективными оказываются ленточные источники, в которых для формирования необходимой геометрии пучка используются магнитные и электрические поля.

Схема простейшего источника такого типа, имеющего одну вытягивающую апертуру, приведена на рис. 3.7. Источник обеспечивает ток до 50 мА, плотность ионного тока – от 10^{-2} мА/см² до 1,5 мА/см² при ускоряющем напряжении до 150 кВ.

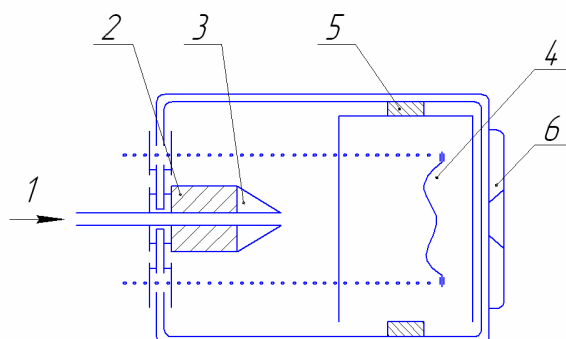


Рис. 3.7. Схема сильноточного ионного источника: 1 – подача газа; 2 – магнит; 3 – анод;
4 – катод; 5 – кольцевой магнит, 6 – сетки

3.2 Технологические процессы и оборудование

Технологический процесс ионно-лучевой обработки поверхностей деталей рассмотрим на примере ионного азотирования. Процесс включает следующие операции.

Комплектование. На столе оператора производится комплектование подлежащих обработке деталей одного типоразмера.

Очистка. Поверхность детали протирается белой бязью, смоченной в нефрасе до удаления загрязнений.

Протирка. С поверхности детали удаляются остатки нефраса, сначала белой бязью, пропитанной спиртом, а затем сухой бязью.

Контрольная. Производится осмотр поверхности на отсутствие жировых пятен, ворсинок ткани. Подготовленные к ионно-лучевой обработке детали необходимо выдержать с силикагелем до 12 ч.

Загрузка. Детали устанавливаются на оснастку в вакуумной камере установки УВН-70-2А. Из камеры откачивается воздух. Включается привод вращения.

Ионно-лучевая обработка:

1. Производится ионная очистка поверхностей деталей. Ускоряющее напряжение на ионном источнике 3000 В. Плотность ионного тока 2 мА/см², время – 5 мин.

2. Проводится ионно-лучевая обработка деталей. Ускоряющее напряжение на ионном источнике 3000 В. Плотность ионного тока 2 мА/см². Температура обработки 400 °С. Время обработки 90 мин.

3. Отключается напряжение на ионном источнике.

4. Останавливается подача азота в камеру.

5. Проводится заполнение камеры воздухом, охлаждение и извлечение оснастки из камеры и деталей из оснастки.

Контрольная:

1. На столе оператора производится визуальный осмотр каждой детали.

2. Контролируется микротвердость на образце-свидетеле.

Транспортная. Готовые детали передаются на склад.

Перед проведением ионной имплантации деталь должна пройти предварительную подготовку. Накопленный опыт работы по подготовке поверхностей деталей позволяет рекомендовать следующие основные операции: механическую очистку от крупных слоев смазки или консерванта, а

также очистку в ультразвуковой ванне и специально приготовленном растворе; отмывку в горячей воде; промывку проточной водой и этиловым спиртом. При необходимости вводится дополнительная операция – снятие ржавчины. Деталь помещают в тару с раствором для удаления ржавчины, после чего повторяются перечисленные операции промывки. Затем деталь высушивается в сушильном шкафу. Учитывая многообразие деталей, для некоторых их видов в технологию подготовки и очистки поверхностей могут вноситься уточнения и дополнения, которые не отменяют приведенных технологических операций [12].

Общий вид модернизированной установки УВН-70-2А для проведения ионно-лучевой обработки азотом приведен на рис. 3.8.

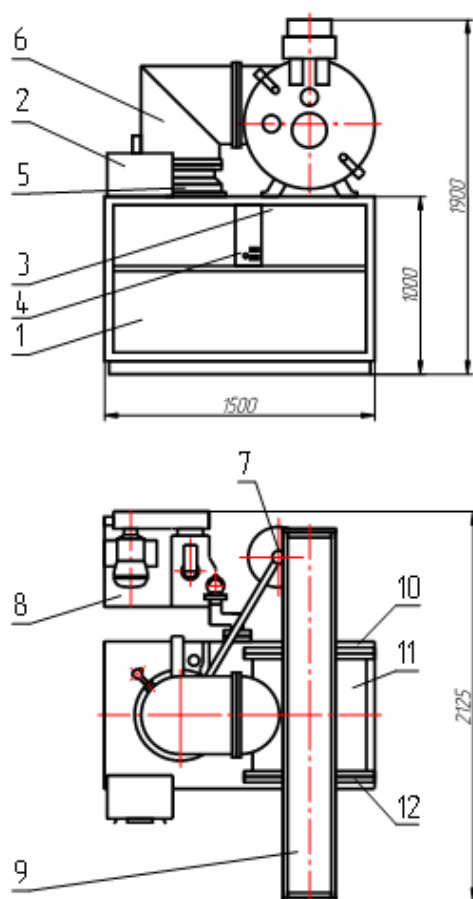


Рис. 3.8. Общий вид установки УВН-70-2А: 1 – панель включения питания установки; 2 – вакуумметр ВМБ-8; 3 – блок управления вакуумной системой; 4 – корпус; 5 – ловушка азотная; 6 – затвор высоковакуумный; 7 – питатель азотный; 8 – механический вакуумный насос НВЗ-20; 9 – направляющая; 10, 12 – крышка; 11 – камера

ТЕМА 4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОТВЕРДОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

4.1. Методика исследования имплантированных поверхностей

Исследование проводится на цилиндрических образцах, изготовленных из прокатанных прутков промышленной стали X12BM (диаметр 10 мм, высота 6 мм) и стали X12M (диаметр 20 мм, высота 6 мм). Стали X12BM и X12M относятся к инструментальным полутеплостойким сталям высокой износостойкости. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Концентрация элементов, масс. %								
	Fe	C	Cr	Mo	W	V	Ni	Mn	Si
X12BM	Основа	2,05	11,90	0,75	0,68	0,25	0,28	0,26	0,15
X12M	Основа	1,60	11,50	0,58	–	0,20	0,22	0,30	0,18

Предварительная обработка сталей X12BM и X12M включает в себя закалку при температуре от 1300 К и выше (масло) и отпуск при температуре 700 – 800 К (1,5 ч).

Ионно-лучевая обработка образцов осуществляется на ускорителе ионов, оснащенный ионным источником с замкнутым дрейфом электронов (рис. 4.1).

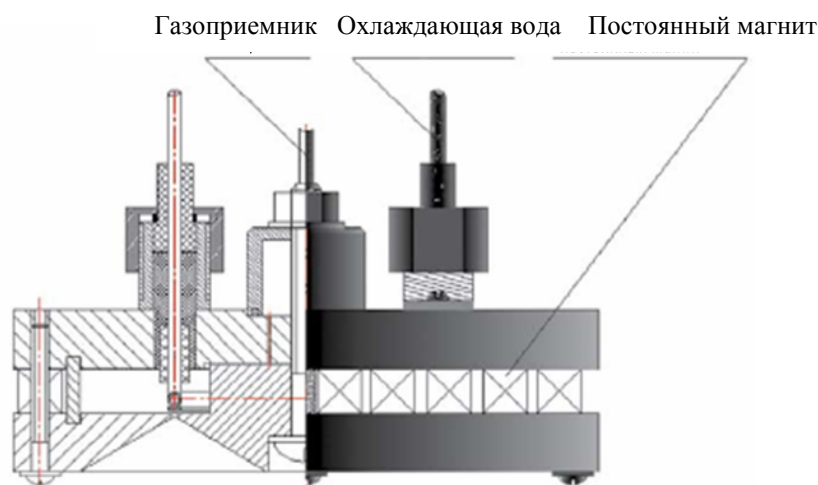


Рис. 4.1. Конструкция ионного источника

В качестве легирующего элемента используется азот. Пучок содержит около 70 % ионов молекулярного азота и 30 % ионов атомарного азота. Имплантация образцов стали X12BM проводится в течение 120 минут при энергии ионов 3 кэВ и плотности ионного тока 2 мА/см^2 , что обеспечивает флюенс легирования $\approx 3,0 \cdot 10^{19}$. Сталь X12M обрабатывается в течение 160 минут при энергии ионов 3 кэВ и плотности ионного тока $\approx 1,0 \text{ мА/см}^2$. Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки контролируется с помощью термопары, прикрепленной с обратной стороны рабочей поверхности образца, и варьируется в диапазоне 620 – 770 К.

Рентгеноструктурные исследования поверхностных слоев проводятся на дифрактометре ДРОН-2,0 в монохроматизированном CuK_α - и CoK_α -излучениях с фокусировкой по схеме Брэгга-Брентано. Ускоряющее напряжение на трубке составляет 34 кВ, а анодный ток – 10 мА. Запись дифрактограмм осуществляется в режиме сканирования с фиксированным временем счета, равным 40 с на точку, и шагом сканирования $0,1^\circ$. Рентгенофазовый анализ осуществлялся на основании данных картотеки PDF (ASTM).

Измерение твердости образцов проводится по методу Виккерса на твердомере ТП при нагрузке 300 Н. Микротвердость модифицированных слоев измеряется при нагрузках 0,19 и 0,98 Н. Время действия нагрузки на индентор при измерении микротвердости составляет 10 с, а значение твердости определяется как среднее по результатам 10-и измерений.

Триботехнические испытания проводятся на лабораторном трибометре АТВП, оснащенный специально разработанным устройством для измерения коэффициента трения. Сравнительные испытания антифрикционных свойств образцов сталей X12M и X12BM в исходном состоянии и после ионно-лучевой обработки осуществляются в режиме сухого трения. Давление испытаний составляет 2 МПа. Испытания проводятся с использованием контртела, изготовленного из закаленной стали У8 ($\text{HV}_{30} = 8000 \text{ МПа}$) с размерами $2 \times 40 \times 90 \text{ мм}$. Рабочая поверхность стального контртела подвергается шлифованию с последующим полированием на тонкой абразивной бумаге с зернистостью М40. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжириваются спиртом и ацетоном и высушиваются. Измерение величины износа цилиндрических образцов осуществляется по потере веса при испытаниях. Испытания проводятся до достижения 10000 – 15000 циклов с периодическими взвешиваниями. Путь трения составляет 900 м.

Значения накопленного весового износа пересчитываются в линейный износ по формуле

$$I_h = Q \cdot 10^4 / S\gamma, \quad (4.1)$$

где I_h – линейный износ, мкм; Q – весовой износ, г; S – площадь поверхности трения, см²; γ – плотность материала образца, г/см³.

Интенсивность линейного изнашивания I_h определяется отношением величины линейного износа к длине пути, на котором произошло изнашивание.

4.2. Методика исследования износостойкости покрытий

Экспериментальные исследования и испытания режущих инструментов с износостойким покрытием (РИИП) проводятся на универсальном токарно-винторезном станке модели 16К20, токарном станке с ЧПУ модели СТП220АП, фрезерном станке с ЧПУ модели 6Р13ФЗ.

Обрабатываются заготовки в виде прутков диаметром 10 – 45 мм и заготовки корпусных деталей из легированных сталей марок 12Х18Н10Т, 36НХТЮ, 07Х16Н6, ХН67МТЮ, титанового ОТ4, алюминиевого Д16Т и магнитно-мягкого 29НК сплавов.

Режимы резания устанавливаются по рекомендациям предприятий и литературным данным [17] в следующих пределах: при обработке легированных сталей и магнитно-мягких сплавов резцом и сверлом скорость резания изменяется от 1,5 до 200 м/мин, подача – от 0,5 до 0,1 мм/об, глубина резания – от 0,1 до 0,7 мм; при обработке титанового сплава скорость резания изменяется от 35 до 105 м/мин, подача – от 0,1 до 0,3 мм/об, глубина резания – от 0,5 до 1,0 мм; при обработке алюминиевого сплава частота вращения шпинделя станка изменяется от 800 до 2000 об/мин, величина подачи – 300 мм/мин и глубина резания – 6 мм. Обработка заготовок проводится по «корке» и без «корки», с применением СОЖ и без нее. При испытаниях используются методы ступенчатого изменения диаметра заготовки и скорости резания [18].

Износ по передней и задней поверхностям инструмента измеряется на инструментальном микроскопе БМИ-1, шероховатость обработанной поверхности детали – на установке «Абрис». В отдельных случаях проводятся измерения с помощью динамометрической установки УДМ-600 силы резания и с помощью естественной термопары фиксируется температу-

ра резания. Период стойкости покрытия на режущем инструменте определяется по способу [19], согласно которому вначале производится обработка деталей РИИП и без него. При этом фиксируется ЭДС в зоне резания, которая включает такие составляющие, как термо-ЭДС (E), возникающая за счет разности потенциалов контактирующих тел, и деформационная ЭДС (E_D), возникающая за счет изменения трения и деформаций контактирующих тел (рис. 4.2, *а*).

Интерес представляет деформационная составляющая ЭДС, достоверно и точно характеризующая период истирания поверхностей контактирующих тел, так как с изменением толщины покрытия изменяется характер и величина трения и деформаций. Поэтому при фиксации ЭДС определяется скорость резания, при которой в парах деталь – РИИП и деталь – РИ возникают деформационные составляющие ЭДС E_{D1} и E_{D2} (на рис. 4.2, *а* проявляется в виде скачкообразного изменения ЭДС за счет деформационной составляющей). Так как материалы контактирующих пар различны, то и скорости, при которых возникает деформационная ЭДС, также различны. Из двух значений скоростей v_1 и v_2 выбирается наибольшее, так как оно обеспечивает возникновение E_D как в паре деталь – РИИП, так и в паре деталь – РИ.

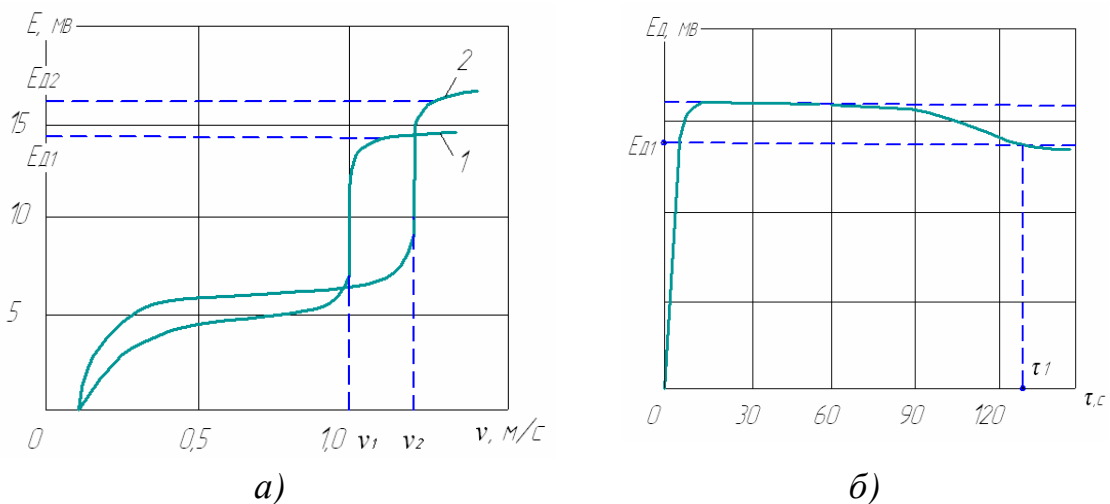


Рис. 4.2. Зависимость термо-ЭДС от скорости резания (*а*) и деформационной ЭДС от времени (*б*) при обработке: 1 – РИ; 2 – РИИП

Затем обрабатываются детали РИИП. При этом фиксируется период работы покрытия до его полного износа, т.е. фактически – до времени начала работы инструментом без покрытия – τ_1 (см. рис. 4.2, *б*). Время от 0 до τ_1 определяет период стойкости покрытия.

ТЕМА 5. СТРУКТУРА, СОСТАВ И СВОЙСТВА УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

5.1. Структура и фазовый состав упрочненной поверхности

Структуру и фазовый состав рассмотрим на примере стали X12VM, которая в исходном термообработанном состоянии (закалка и отпуск) имеет размер аустенитного зерна $\sim 30 - 40$ мкм [13]. Твердость стали $HV = 5900$ МПа. Фазовый состав: α -Fe (мартенсит отпуска) и частицы карбида M_7C_3 (типа Cr_7C_3) с гексагональной решеткой (пространственная группа $P3 1c$, $a = 1,3980$ Нм, $c = 0,4523$ Нм и $c/a = 0,3235$), а также железо-молибденовый карбид $(Fe, Mo)_3C$ (п.г. $P222_1$ с параметрами решетки $a = 1,627$ Нм, $b = 1,003$ Нм, $c = 1,132$ Нм).

На основании результатов проведенных экспериментов была получена зависимость толщины модифицированного слоя от плотности ионного потока (рис. 5.1).

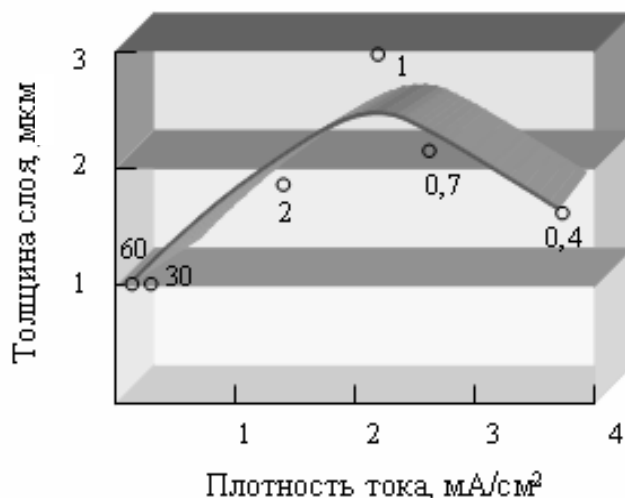


Рис. 5.1. Влияние плотности ионного тока на толщину модифицированного слоя при имплантации ионов азота

Как видно из графика, наибольшая толщина слоя формируется при плотности тока от 1,5 до 2,5 мА/см².

Результаты измерения твердости (HV) и микротвердости ($H_{0,19}$) стали X12VM после различных режимов ионной обработки представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Твердость HV и микротвердость H_{0,19} термообработанной стали X12VM до и после обработки ионами азота ($j \approx 2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) при различных температурах

Сталь X12VM					
Измеряемая характеристика	Режим обработки				
	Исходное состояние	Температура ионно-лучевой обработки, К			
		620	670	720	770
Микротвердость поверхности H _{0,19} , МПа	6100	9600 – 10000	16000 – 16500	14000 – 15000	10500 – 11000
Твердость стали HV, МПа	5950	5800	5700	5300	4900

Определение HV проводилось на неимплантированной поверхности образцов и характеризовало изменение твердости стали в процессе высокотемпературного воздействия при ионном легировании. Измерением H_{0,19} оценивалось упрочнение имплантированных ионами азота поверхностных слоев стали. Как можно видеть из данных табл. 5.1, при температуре ионного легирования 620 – 770 К твердость стали несколько понижается. Уменьшение твердости матричной стали при обработке ионами азота может быть связано с коагуляцией карбидов и релаксацией мартенситной структуры.

На рис. 5.2 приведен график распределения микротвердости по глубине модифицированного азотом слоя. Имплантация ионов азота при 670 К приводит к увеличению глубины модифицированного слоя до ~ 10 – 15 мкм. Микротвердость слоя существенно возрастает и достигает уровня H_{0,19} = 16000 МПа. В слое регистрируется карбонитрид Fe₃(C, N) и нитридные фазы ε-Fe₂₋₃N и α"-Fe₈N. Интенсивность дифракционных линий от частиц карбида хрома сильно снижается, что свидетельствует о растворении карбида в процессе ионно-лучевой обработки при 670 К.

В результате обработки стали при 720 К глубина модифицированного азотом поверхностного слоя возрастает до 15 – 20 мкм. Микротвердость слоя составляет 14000 – 15000 МПа. В слое уменьшается содержание высокоазотистой фазы ε-Fe₂₋₃N и обнаруживается присутствие частиц нитридных фаз γ'-Fe₄N и CrN (см. рис. 5.2). Частицы карбидных фаз в имплантированном азотом при 720 К слое отсутствуют. Кроме этого, на рентгеновской дифракционной картине появляются линии, принадлежащие α-Fe, что указывает на процессы распада высокоазотистого ε-нитрида.

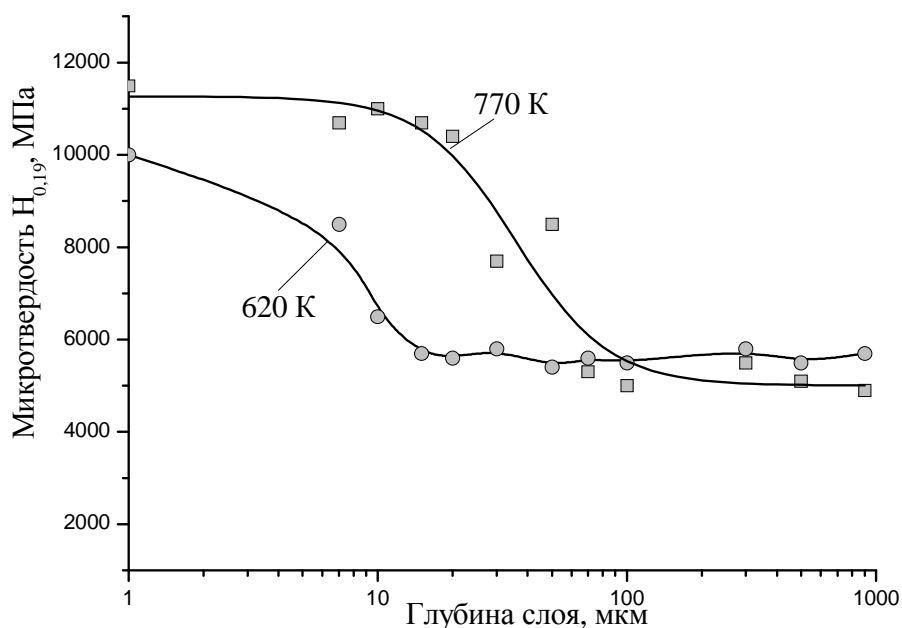


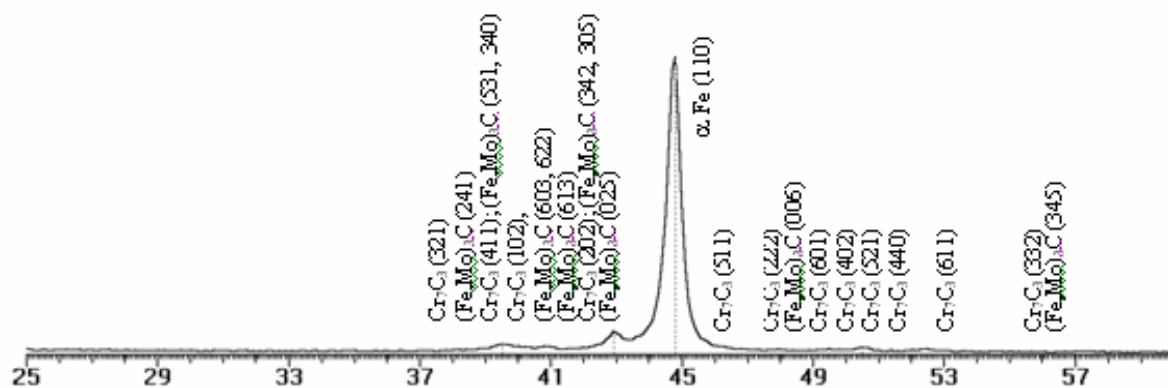
Рис. 5.2. Распределение микротвердости по глубине модифицированных ионами азота слоев в стали X12VM

Высокотемпературная обработка концентрированными потоками ионов азота стали X12VM при 770 К приводит к образованию модифицированного слоя глубиной 30 – 35 мкм с микротвердостью $H_{\mu} = 10000 - 11000$ МПа. Основными фазами, присутствующими в азотированном слое, являются высокопрочный, термостабильный нитрид хрома CrN и α -Fe. Узкий профиль дифракционных линий матричной α -фазы и малое значение периода ее кристаллической решетки ($a = 0,2878$ Нм) свидетельствует о глубоком распаде азотистого мартенсита в процессе ионно-лучевой обработки при 770 К.

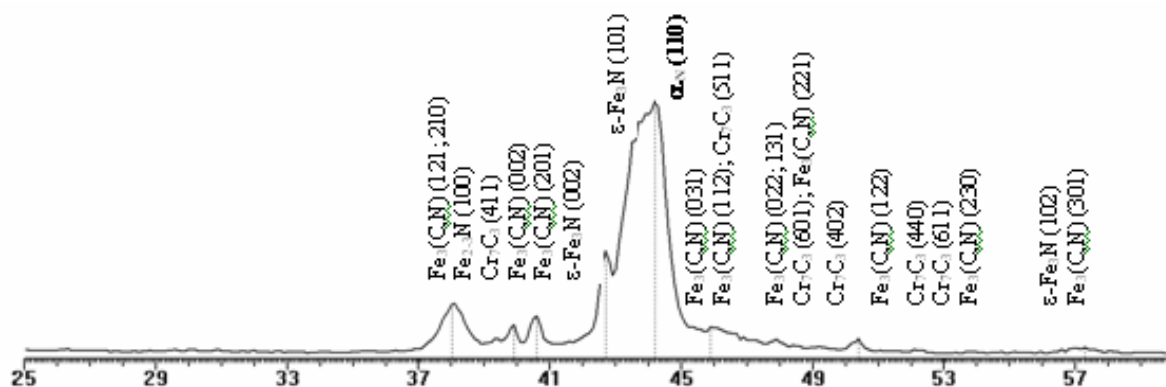
Ионная имплантация N^{+} при 620 К вызывает образование азотированных слоев глубиной до 5 – 10 мкм микротвердостью $H_{0,19} = 9600 - 10000$ МПа. Основными фазами, содержащимися в поверхностных слоях, являются карбидные фазы $(Fe,Mo)_3C$, Cr_7C_3 , азотистый мартенсит, $s-Fe_{2-3}N$, (рис. 5.3).

Дифракционные линии от матричной α -фазы размыты и смещены в сторону малых углов рассеяния, что свидетельствует о насыщении мартенсита азотом.

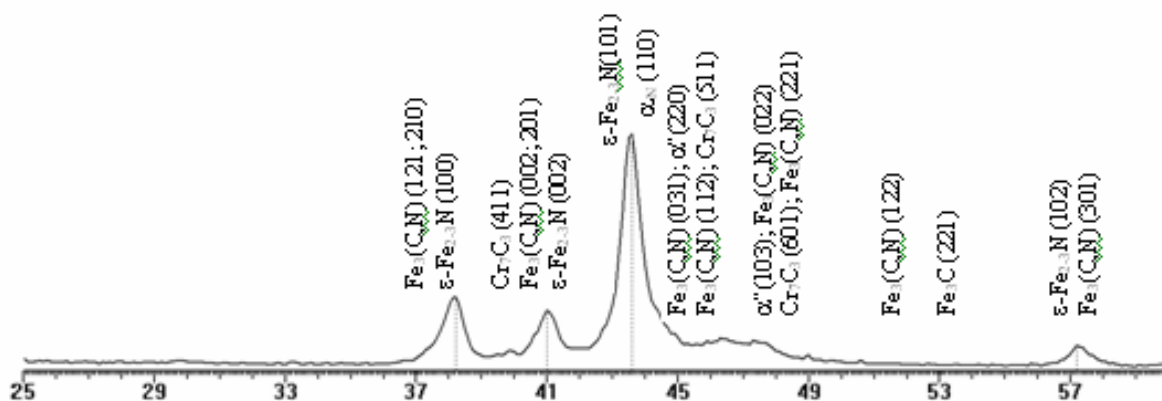
Полученные результаты исследований структуры и фазового состава упрочненной поверхности служат основой и ориентиром для проведения лабораторных работ по дисциплине.



a)



b)



c)

Рис. 5.3. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CoK}\alpha$) от поверхностных слоев стали X12BM, обработанной на различных режимах: *a* – исходное состояние (отпуск); *б* – имплантация N^+ при 680 К

5.2. Триботехнические свойства ионно-модифицированных слоев

Триботехнические испытания проводились для предварительно закаленных и отпущенных инструментальных сталей, подвергнутых ионно-лучевой обработке азотом при различных температурах. На рис. 5.4 приведены зависимости линейного износа обработанной на различных режимах стали X12VM от продолжительности испытаний в условиях трения без смазки по закаленной стали У8. Можно видеть, что в исходном неимплантированном состоянии сталь характеризуется сравнительно невысокой износостойкостью. Интенсивность линейного износа составляет $1,47 \cdot 10^{-2}$ мкм/м.

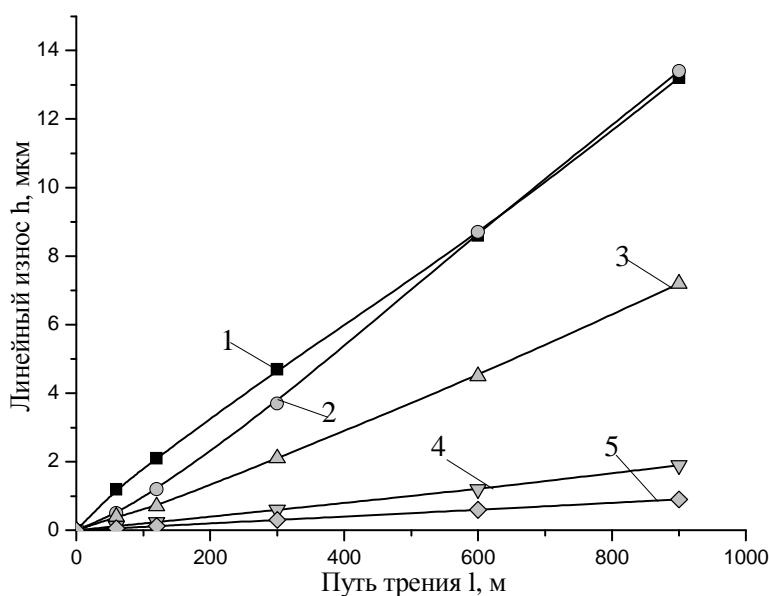


Рис. 5.4. Зависимость линейного износа от пути трения для стали X12VM, прошедшей обработку на различных режимах: 1 – исходное состояние (закалка + отпуск); 2 – имплантация N⁺ при 620 К ($j = 2 \text{ мАсм}^{-2}$); 3 – то же, при 670 К; 4 – то же, при 720 К; 5 – то же, при 770 К

Коэффициент трения стали находится на уровне $f = 0,9 - 1,0$ (табл. 5.2). Ионно-лучевая имплантация стали при 620 К приводит к некоторому снижению износа стали X12VM на начальных стадиях испытаний. Однако на более поздних стадиях испытаний ($l \geq 300$ м) интенсивность изнашивания существенно возрастает и выходит на уровень $I_h = 1,49 \cdot 10^{-2}$ мкм/м.

**Значения интенсивности линейного износа I_h и коэффициента трения f
стали X12BM после различных режимов обработки**

Режим обработки	Интенсивность износа I_h , мкм/м	Коэффициент трения f
Закалка + отпуск	$1,47 \cdot 10^{-2}$	0,8 – 0,9
Имплантация N ⁺ 620 К	$1,49 \cdot 10^{-2}$	0,8 – 1,0
Имплантация N ⁺ 670 К	$0,80 \cdot 10^{-2}$	1,0 – 1,2
Имплантация N ⁺ 720 К	$0,21 \cdot 10^{-2}$	1,1 – 1,2
Имплантация N ⁺ 770 К	$0,10 \cdot 10^{-2}$	0,9 – 1,1

Повышение I_h вызвано износом упрочненного слоя и выходом на поверхность трения неимплантированных слоев подложки. Увеличение температуры обработки до 670 – 720 К приводит к резкому возрастанию износостойкости модифицированного слоя, что связано с увеличением его толщины. Коэффициент трения при этом выходит на уровень максимальных значений: $f = 1,0 – 1,2$.

Наиболее высокие триботехнические свойства стали достигаются после ионной обработки при 770 К (см. табл. 5.2). Значения коэффициента трения при этом несколько снижаются – до $f = 0,9 – 1,1$. На рис. 5.5 приведена зависимость коэффициента трения от пути пробега для имплантированной ионами азота при 770 К стали X12BM. Интенсивность износа поверхностного слоя стали после обработки при 770 К уменьшается примерно в 15 раз по сравнению с исходным неимплантированным состоянием. Вместе с тем, при температуре обработки 770 К регистрируется сильное разупрочнение подложки, что может снижать стойкость штамповой оснастки.

На рис. 5.6 представлены зависимости линейного износа h от пути трения l для стали X12M, имплантированной азотом с пониженной плотностью тока ионного пучка ($j = 1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^2$) при 680 – 740 К. В табл. 5.3 приведены триботехнические характеристики стали, обработанной по различным режимам. В исходном состоянии сталь X12M имеет интенсивность износа $I_h = 1,4 \cdot 10^{-2}$ мкм/м ($1,4 \cdot 10^{-8}$), близкую к значениям I_h для закаленной и отпущенной стали X12BM (см. табл. 5.2). Некоторое увеличение интенсивности износа стали X12M, имплантированной азотом при 680 К,

связано с быстрым износом модифицированного слоя и выходом на поверхность трения подложки, имеющей несколько пониженную твердость по сравнению с ее исходным необработанным состоянием.

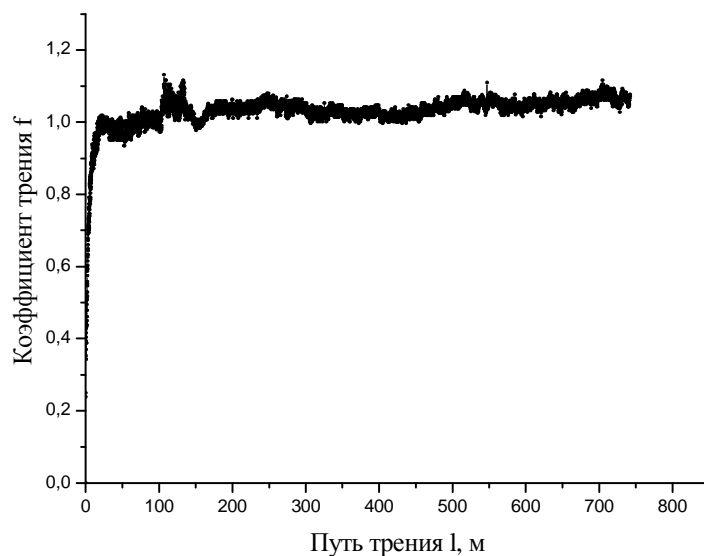


Рис. 5.5. Зависимость коэффициента трения имплантированной ионами азота при 770 К стали X12VM ($j = 2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^2$) от пути трения (трение без смазки; $p = 2 \text{ МПа}$; контртело – закаленная сталь У8)

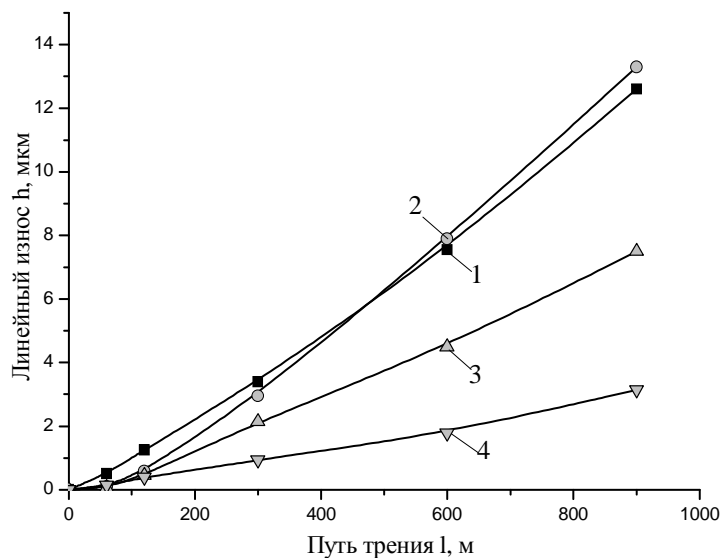


Рис. 5.6. Зависимость линейного износа от пути трения стали X12M, прошедшей обработку на различных режимах: 1 – исходное состояние (закалка + отпуск); 2 – имплантация N^+ при 680 К ($j = 1 \text{ мАсм}$); 3 – то же, при 720 К; 4 – то же, при 740 К

**Значения интенсивности линейного износа I_h и коэффициента трения f
стали X12M после различных режимов обработки**

Режим обработки	Интенсивность износа I_h , мкм/м	Коэффициент трения f
Закалка + отпуск	$1,40 \cdot 10^{-2}$	0,8 – 0,9
Имплантация N ⁺ 680 К	$1,47 \cdot 10^{-2}$	0,8 – 1,0
Имплантация N ⁺ 720 К	$0,83 \cdot 10^{-2}$	1,0 – 1,1
Имплантация N ⁺ 740 К	$0,35 \cdot 10^{-2}$	1,0 – 1,1

Увеличение температуры ионно-лучевой обработки до 720 и 740 К приводит к существенному возрастанию износостойкости поверхностных слоев стали (см. рис. 5.6, табл. 5.3) и увеличению ее коэффициента трения.

В частности, интенсивность изнашивания обработанной при 740 К стали уменьшается примерно в 4 раза по сравнению с исходным состоянием. Сопоставляя данные по триботехническим свойствам имплантированных сталей X12M и X12BM, можно констатировать, что обработка штамповой стали при пониженной плотности ионного тока ($j = 1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) приводит к некоторому снижению износостойкости модифицированного слоя по сравнению со случаем обработки, проведенной при $j = 2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Несколько пониженная износостойкость имплантированной при 720 – 740 К стали X12M связана с выделением в поверхностных слоях стали карбонитридной фазы Fe₃(C,N) вследствие относительно более низкой концентрации азота в поверхностных слоях имплантированной стали.

Приведенные в данном разделе результаты исследований твердости и износостойкости упрочненной поверхности используются при проведении лабораторных работ по дисциплине.

5.3. Износостойкость покрытий

Примером нанесения на изделия покрытий в промышленности является режущий инструмент. В настоящее время до 90 % режущего инструмента, выпускаемого ведущими зарубежными инструментальными фирмами, имеют износостойкие покрытия. Используются как одно-, так и многослойные покрытия.

Покрyтия наносятся двумя основными методами – химическим Chemical Vapor Deposition (CVD) и физическим Physical Vapor Deposition (PVD) (рис. 5.7).

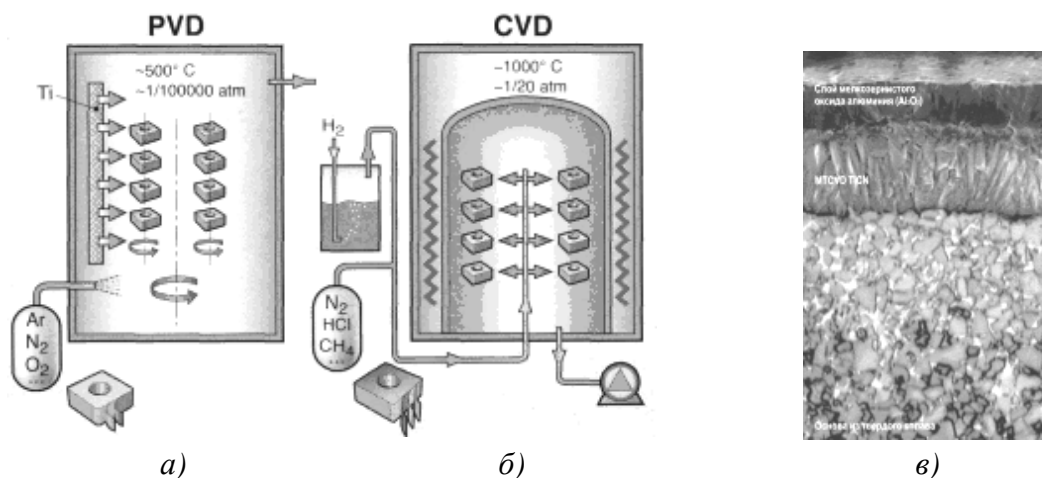


Рис. 5.7. Методы нанесения покрытий PVD (а) и CVD (б) и структура покрытия (в), полученная методом CVD

Покрyтия CVD используются для пластин с повышенными требованиями к износостойкости, покрытие PVD – при повышенных требованиях к прочности режущей кромки. Процесс нанесения CVD-покрытия протекает при температуре от 880 до 1000 °С. Покрытие наносят в специальной печи с подачей ряда химически активных газов в строго определенной последовательности. Каждый слой наносится постепенно, атом за атомом. Столь высокая температура нанесения покрытия обеспечивает почти полное обезуглероживание. В современных покрытиях Sandvik Coromant [14] используют слои металлов CVD TiCN, Al₂O₃ и TiN, предназначенные для увеличения адгезии и получения требуемых размеров и формы кристаллов (рис. 5.8).



Рис. 5.8. Внешний вид многослойного покрытия MT-CVD TiCN в сочетании со слоем Al₂O₃ (а) и его структура (б)

Фирмой «Mitsubishi» применяются новые сплавы UE 6010 с многослойным покрытием [15], получаемые по так называемой «технологии равномерного покрытия» (рис. 5.9).

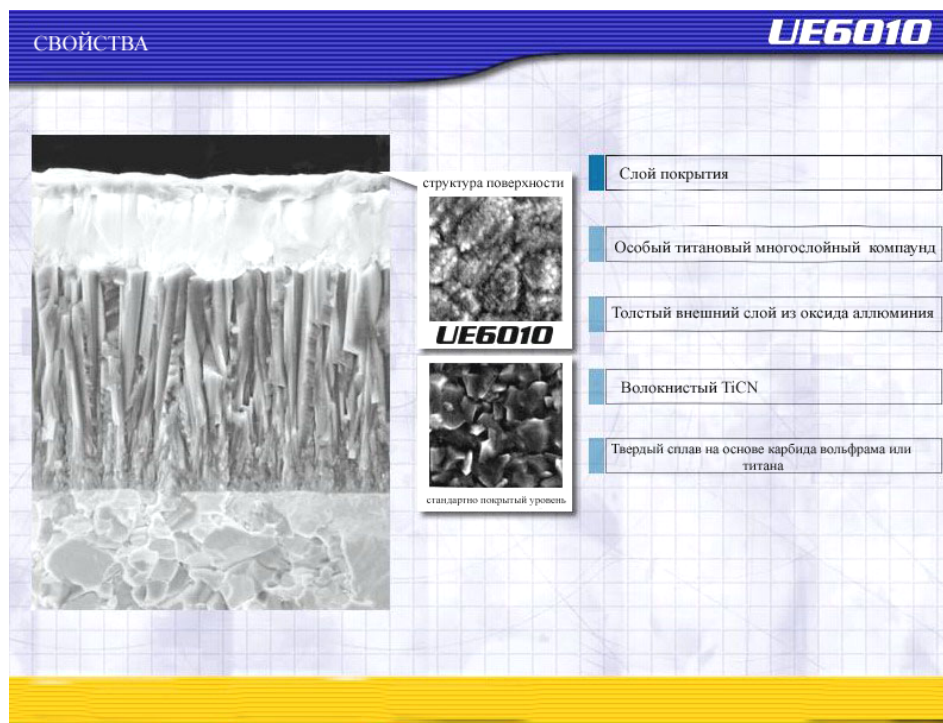


Рис. 5.9. Структура многослойного покрытия фирмы «Mitsubishi»

Наносится специальная цементированная подложка с тонкой структурой поверхности. Внутренний слой подложки очень твердый, что предотвращает разрушение режущей кромки. Для внутреннего слоя покрытия используется комбинация кристаллического титана. Внешний слой состоит из оксида алюминия, который обеспечивает высокую пластичность.

Новые технологии PVD-покрытий и комплект оборудования предлагаются фирмой «PLATIT AG» (Швейцария) [16]. Установки фирмы позволяют наносить нанокompозитные покрытия. Сравнительная износостойкость разных покрытий представлена на рис. 5.10.

В зависимости от условий обработки доминирует один из механизмов изнашивания, что обуславливает выбор состава покрытия. Если преобладает абразивное изнашивание, то важна твердость покрытия; если преобладает адгезионное изнашивание, то важна низкая адгезия с обрабатываемым материалом; если изнашивание обусловлено химической нестабильностью, то важна диффузионная изоляция или низкая растворимость покрытия.

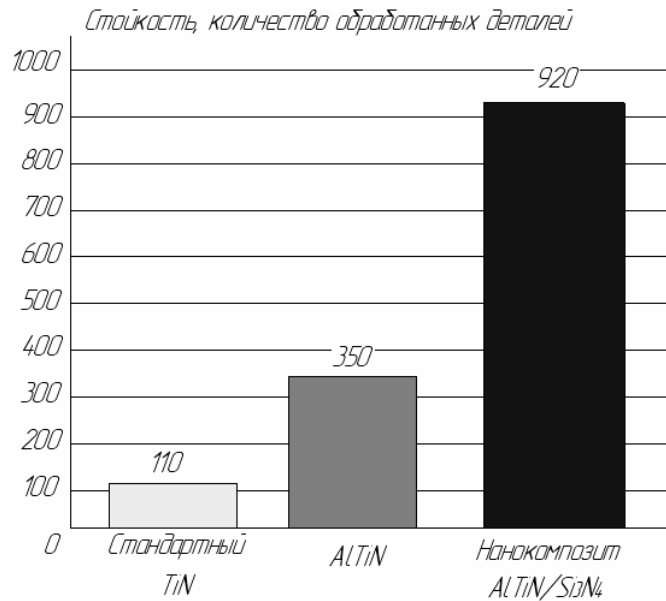


Рис. 5.10. Сравнительная износостойкость покрытий (обрабатываемый материал – сталь X40CrMoV5; инструмент – цельная твердосплавная концевая фреза, $r = 2$ мм, $V_c = 218$ м/мин, $S = 0,26$ мм/мин; $a_e = 8$ мм, СОЖ)

Типичная картина разрушения покрытия на режущем инструменте представлена на рис. 5.11.

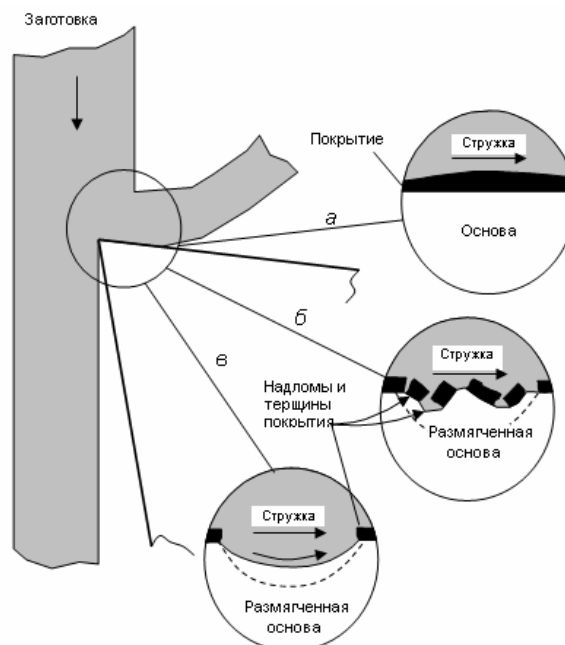


Рис. 5.11. Схематическая диаграмма процесса износа покрытия: *а* – начальная стадия; *б* – размягчение основы и трещинообразование, *в* – стадия разрушения, наблюдаемая для покрытий из нитридов и карбидов быстрорежущего инструмента, полученная при сухом резании стали, при скорости по передней поверхности 100 м/мин

На рис. 5.12 показаны диаграммы прочности покрытия.

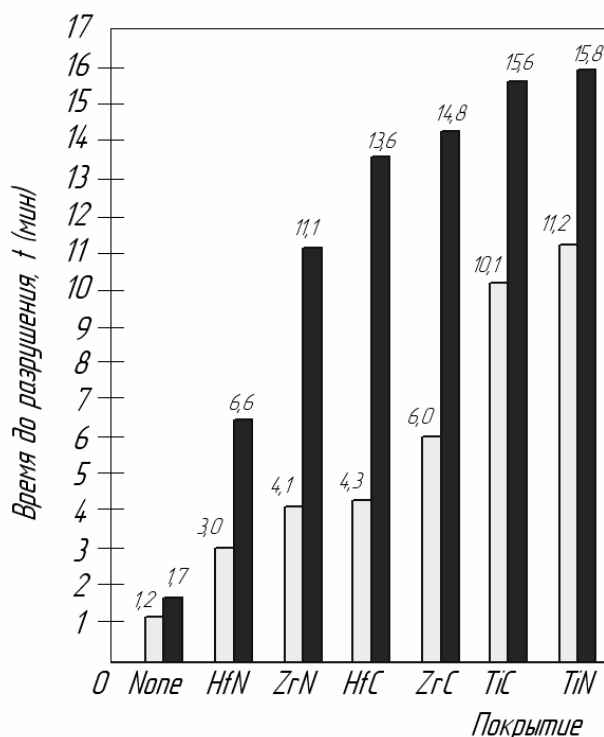


Рис. 5.12. Время до разрушения пластин из быстрорежущей стали с покрытием и без него: ■ – обработка закаленной стали с использованием смазочного материала; ■ – обработка отожженной стали без использования смазочного материала

Для эффективной работы наносимых покрытий важна геометрия рельефа поверхностей режущего лезвия. Как показали исследования [20], если учитываются условия эксплуатации инструмента, то эффективность покрытия резко повышается. Выявлено, что наиболее часто в производстве изделий используются сверла, концевые фрезы и резцы определенных типоразмеров. На режущие лезвия этих инструментов в заводских условиях с использованием ионно-вакуумной установки УНВ-70-2А были нанесены износостойкие покрытия. Для сравнения были взяты режущие инструменты без покрытия с твердосплавными пластинами Т15К6, ВК8, ТН20, со вставками сверхтвёрдого материала «Белбор», а также из быстрорежущей стали Р6М5 и РЗМЗФ2.

В результате экспериментальных исследований и испытаний было установлено, что при точении легированных сталей наибольшую стойкость имеют резцы с пластинами ВК8 (в табл. 5.4 для примера представлена часть полученных данных).

У пластин ВК8 наблюдалось характерное истирание по задней поверхности, в то время как износ вставок из «Белбора» происходил в основном за счет выкрашивания режущей кромки. Упрочнение пластин Т15К6 нитридом титана не привело к повышению их стойкости по сравнению с неупрочненными, что, по-видимому, связано с химическим сродством обрабатываемого материала и материала покрытия и недостаточной адгезией покрытия. Для пластин ТН20, например, при обработке стали 36НХТЮ не удалось подобрать скорость резания, при которой износ режущей кромки не носил бы катастрофического характера. Пластина Т15К6 обрабатывала эту сталь только при скорости резания < 5 м/мин, а «Белбор» обеспечивал необходимую стойкость на длине прохода инструмента < 20 мм.

Таблица 5.4

Износ инструмента с пластинами

№ прохода инструмента	Величина фаски износа f_{II} на пластинах, мкм			
	ВК8*	«Белбор»**	Т15К6 ⁺	Т15К6 + TiN ⁺
1	33	369	47	95
2	81	80	91	104
3	82	80	149	150
4	84	82	159	155
5	92	86	167	170
6	99	90	174	172
7	99	96	187	193
8	106	104	233	230
9	110	108	246	288
10	110	116	263	290

Примечание: * $l = 100$ мм;
 ** $l_{ПР} = 50$ мм; $v = 96$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм.

Сверление заготовок из стали ХН67ВМТЮ упрочненными нитридом титана и неупрочненными сверлами диаметром 5 мм без применения СОЖ не показало заметных отличий в их стойкости, что обусловлено теми же причинами, что и в случае точения. Использование СОЖ приводит к некоторому увеличению стойкости упрочненных сверл.

При точении заготовок из титанового сплава ОТ4 по «корке» и без «корки» установлено, что наименьший износ имеют пластины ТН20 с покрытием TiN (рис. 5.13).

По-видимому, это связано с более прочным сцеплением (адгезией) покрытия с основой в силу их химического сродства. Покрытие на пластинах ВК8 обеспечивает повышение стойкости по сравнению с пластинами без покрытия при максимальных режимах обработки.

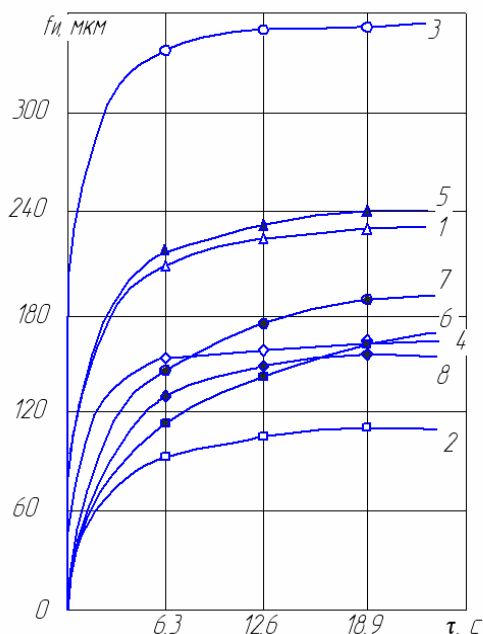


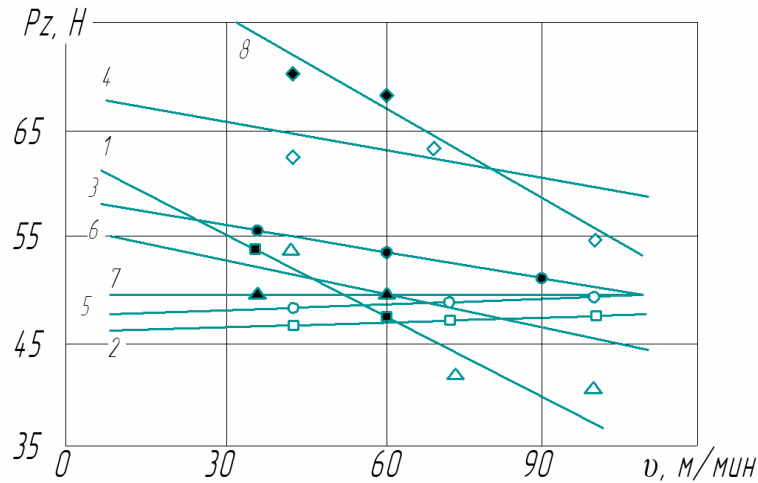
Рис. 5.13. Зависимость износа инструмента от времени обработки титанового сплава ОТ-4 по «корке»: 1 – ТН20; 2 – ТН + TiN; 3 – ВК8; 4 – ВК8 + TiN; без «корки»: 5 – ТН20; 6 – ТН20 + TiN; 7 – ВК8; 8 – ВК8 + TiN; условия обработки: $v = 106$ об/мин, $S = 0,3$ мм/об, $l = 1,0$ мм

Значения силы резания и характер ее изменения при различных скоростях резания (рис. 5.14, а) и подачах (см. рис. 5.14, б) примерно одинаковы для всех инструментальных материалов. Применение пластин ТН20 с покрытием обеспечивало наименьшую шероховатость обработанной поверхности детали.

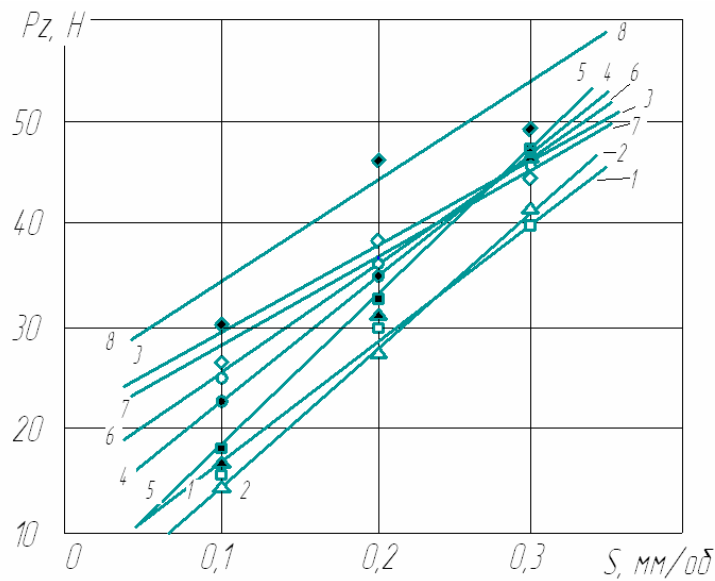
При точении магнитно-мягких сплавов наибольшую стойкость инструмента обеспечивает применение пластин ВК8 без покрытия и ТН20 с покрытием нитридом титана (табл. 5.5).

Износ упрочненных пластин в период приработки инструмента происходит в виде выкрашиваний, в то время как у неупрочненных пластин преобладает истирание по задней поверхности. Для инструмента, оснащенного «Белбором», характерно интенсивное разрушение режущей кромки в период приработки. Зафиксировано незначительное (10 – 20 %) уве-

личение температуры и силы резания при обработке упрочненными пластинами по сравнению с неупрочненными, что, по-видимому, связано с бóльшим радиусом скругления режущей кромки упрочненных пластин (32 – 50 мкм) по сравнению с неупрочненными (7 – 10 мкм).



а)



б)

Рис. 5.14. Зависимость силы резания от скорости резания (а) и подачи (б) при обработке титанового сплава ОТ-4 по «корке»: 1 – ТН20; 2 – ТН20 + TiN; 3 – ВК8; 4 – ВК8 + TiN; без «корки»: 5 – ТН20; 6 – ТН20 + TiN; 7 – ВК8; 8 – ВК8 + TiN (условия обработки те же, что и на рис. 5.14)

Таблица 5.5

**Величина фаски износа инструмента $f_{И}$ при обработке
магнитно-мягкого сплава, мкм**

Материал инструмента	$f_{И1}$	$f_{И2}$	$f_{И3}$
Вк8	75	78	85
T15K6	45	85	100
То же + TiN	65	105	115
«Белбор»	80	170	225
TN20+TiN	61	75	80
<i>Примечание: $l_{ПР} = 50$ мм; $s = 0,05$ мм/об; $t = 0,05$ мм; $n_1 = 800$ об/мин; $n_2 = 1600$ об/мин.</i>			

При фрезеровании заготовок из алюминиевого сплава Д16Т упрочненными нитридом титана и неупрочненными концевыми фрезами диаметром 16 мм при $n = 800$ мин⁻¹ и $n = 45$ мин⁻¹ признаков размерного износа не обнаружено, а при $n = 200$ мин⁻¹ и $T = 90$ мин зафиксирован износ в виде округления режущей кромки: у упрочненных фрез 60 – 65 мкм и у неупрочненных 40 – 45 мкм. Износостойкое покрытие исключало образование нароста на режущей кромке и вибрации в зоне резания, что несколько повышало качество обработки. Силы резания примерно одинаковы для фрез с покрытием и без него (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Сила резания при обработке алюминиевого сплава Д16Т

№ опыта	Режимы резания			Сила резания при обработке фрезой P_Z , Н		
	t , мм	S , м/мин	n , мин ⁻¹	без покрытия	с покрытием	
1	2	240	1000	200	205	
2	3			285	290	
3	4			360	380	
4	5			450	445	
5	2	288		220	235	
6		240		200	205	
7		192		160	175	
8		144		135	140	
9		240		195	165	160
10				1250	135	145
11				1600	110	110
12				2000		
<i>Примечание: $\gamma = 12^\circ$; $\alpha = 18^\circ$; $\lambda = 40^\circ$; $d_\phi = 16$ мм.</i>						

Так как износостойкое покрытие из нитрида титана, наносимое на инструмент в условиях предприятия, как правило, не обеспечивает повышения стойкости инструмента по сравнению с традиционно применяемыми на предприятиях инструментальными материалами, были проведены исследования покрытий из нитрида циркония и многослойных покрытий, наносимых на инструмент в условиях лаборатории Физико-технического института НАН Беларуси. Полученные результаты свидетельствуют, что износостойкость этих РИИП зависит от числа слоев и взаимного расположения материалов в покрытии (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Величины фаски износа инструмента при последовательных проходах в процессе точения стали 12X18 H10T

Инструментальный материал	Номер прохода инструмента		
	1	2	3
T15K6	213	247	260
T15K6 +TiN	137	151	183
T15K6+TiC+TiN	162	165	181
T15K6+ TiN+ TiC+TiN	123	124	130
T15K6+ZrN	66	80	124

Примечание: l = 500 мм; n = 500 об/мин; t = 1 мм; s = 0,3 мм/об.

Наилучшие результаты по снижению износа пластин, а также сил резания были достигнуты при использовании трех- и пятислойных покрытий, в которых внутренний и внешний по отношению к подложке слои покрытия были из нитрида титана. Микроанализ и растровая электронная микроскопия изношенных поверхностей инструмента показали, что покрытия эффективно препятствуют диффузии вольфрама, кобальта и железа на границе раздела инструментального и обрабатываемого материалов. При максимальной толщине карбидного слоя происходит хрупкое разрушение покрытия и увеличение фактической площади контакта передней поверхности инструмента со стружкой, что может приводить к некоторому увеличению коэффициента трения. Эти покрытия обеспечивали повышение стойкости инструмента в 2 – 5 раз по сравнению с инструментом без покрытия. В производственных условиях испытания пластин с многослойными покрытиями показали повышение стойкости инструмента в 2 – 3 раза.

Приведенные в этом разделе результаты исследований износостойкости покрытий используются при оценке данных лабораторных работ по дисциплине.

ТЕМА 6. ПРИМЕНЕНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

6.1. Ионно-лучевое азотирование

Ионно-лучевая имплантация N^+ стали X12BM при 620 – 770 К с плотностью тока $j = 2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ вызывает образование азотированных слоев глубиной от 5 – 10 мкм до 30 – 35 мкм микротвердостью от $H_\mu = 9500 - 10000$ МПа до $H_\mu = 14000 - 16000$ МПа. Основными фазами, содержащимися в поверхностных слоях при низких температурах обработки (620 – 670 К), являются карбидные фазы Fe_3C , Cr_7C_3 , азотистый мартенсит, $\epsilon\text{-Fe}_3N$. При 720 – 770 К в поверхностном слое стали образуются нитридные фазы $\gamma'\text{Fe}_4N$ и CrN . Ионно-лучевое азотирование стали X12BM при 720 – 770 К приводит к увеличению износостойкости ее поверхностных слоев (в режиме адгезионного взаимодействия) от 7 до 15 раз и возрастанию коэффициента трения.

Обработка стали X12M ионами азота с пониженной плотностью ионного тока $i = 1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ при 670 – 740 К приводит к формированию модифицированного слоя толщиной от 10 до 30 мкм с микротвердостью от 9500 до 11500 МПа. Фазовый состав имплантированных слоев включает в себя $Fe_3(C,N)$, $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}N$, $\gamma'\text{-Fe}_4N$ и CrN . Ионно-лучевое азотирование стали X12M при 720 – 740 К с пониженной плотностью тока ионного пучка приводит к увеличению коэффициента трения, а также износостойкости поверхностных слоев стали от ~2 до 4 раз.

Для повышения стойкости, например, пробивных штампов рекомендуется понизить температуру ионно-лучевой обработки до 670 – 700 К, что позволит сформировать на поверхности рабочих вставок модифицированный азотом слой повышенной твердости и сохранить при этом высокие прочностные свойства матрицы.

6.2. Нанесение покрытий

С учетом результатов изучения процесса резания режущим инструментом с покрытием предложена [21] оптимальная форма режущего лезвия (рис. 6.1) с формированием рельефа как передней, так и задней поверхностей. Выработаны рекомендации по геометрическим параметрам лезвия и режимам резания:

при обработке сталей

$\gamma_r = 15 - 20^\circ$; $\alpha_r = 12 - 15^\circ$; $\gamma_\phi = 0 - 45^\circ$; $\phi_r = 30 - 60^\circ$; $f = 0,1 - 0,2 \text{ мм}$;
 $v = 1,5 - 2,5 \text{ м/с}$; $s = 0,3 - 1 \text{ мм/об}$; $t = 0,5 - 5 \text{ мм}$;

при обработке титановых сплавов

$\gamma_r = 5 - 10^\circ$; $\alpha_r = 10 - 12^\circ$; $\gamma_\phi = 45 - 90^\circ$; $\phi_r = 30 - 60^\circ$; $f = 0,5 - 1,5 \text{ мм}$;
 $v = 0,5 - 1,5 \text{ м/с}$; $s = 0,1 - 0,6 \text{ мм/об}$; $t = 0,5 - 3 \text{ мм}$.

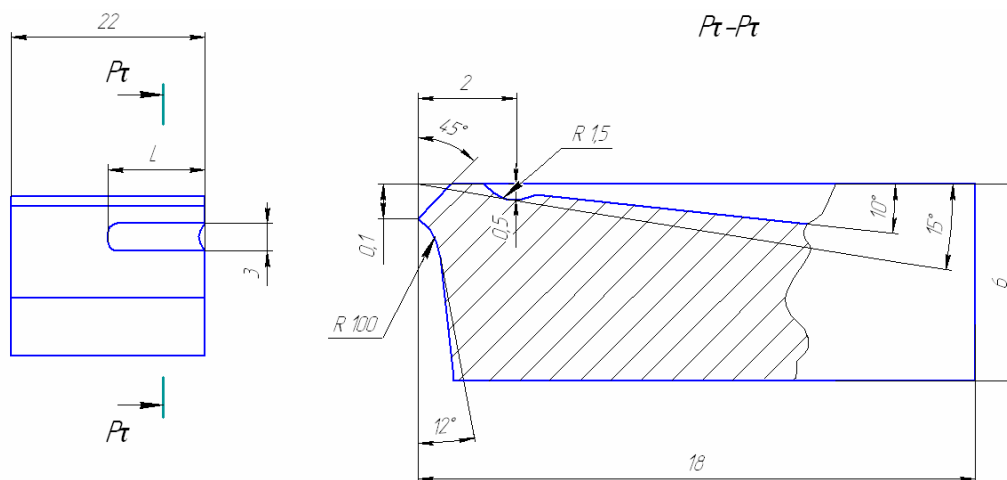


Рис. 6.1. Оптимальная форма режущей пластины

Такого рода рекомендации предлагаются в настоящее время многими ведущими инструментальными фирмами. Например, в [22] за счет изменения переднего угла γ предлагается уменьшать длину контакта с передней поверхностью лезвия.

В [23] предложена форма режущего лезвия с самозатачиванием его в процессе резания. Однако в предложенных вариантах оптимальных форм лезвий не учитывается нанесение покрытий, которое снижает, в том числе, трение на передней и задней поверхностях лезвия. А это значит, что должна быть несколько изменена геометрия лезвия. Это изменение геометрии под покрытие учитывается в формах передней и задней поверхностей режущих пластин, выпускаемых фирмами «Sandvik Coromant», «Mitsubishi», «ISCAR» и др. Пример таких форм пластин, выпускаемых фирмой «Sandvik-MKTC», представлен в табл. 6.1.

Результаты исследований основаны на зависимости режущей способности лезвия от количества слоев в многослойном покрытии (табл. 6.2). Скорость резания в этой серии экспериментов изменялась от 40 до 100 м/мин, подача – от 0,1 до 0,3 мм/об, глубина резания была 0,5 мм.

Наибольшую режущую способность инструмента обеспечивают пятислойные покрытия, для трехслойных покрытий наилучшей является структура с малой толщиной слоя TiC, равной примерно 1 мкм. Анализ полученных с применением оже-спектроскопии концентрационных профилей распределения N и C по толщине покрытия показывает, что на границах между слоями TiC и TiN имеется слой Ti (C, N), достигающий 0,5 – 1,0 мкм. Это означает, что при общей толщине покрытия 5 мкм создание более пяти слоев в покрытии нецелесообразно, т.к. в этом случае формируется многослойная структура покрытия Ti (C, N).

Форма сменных режущих пластин «Sandvik-MKTC»

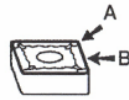
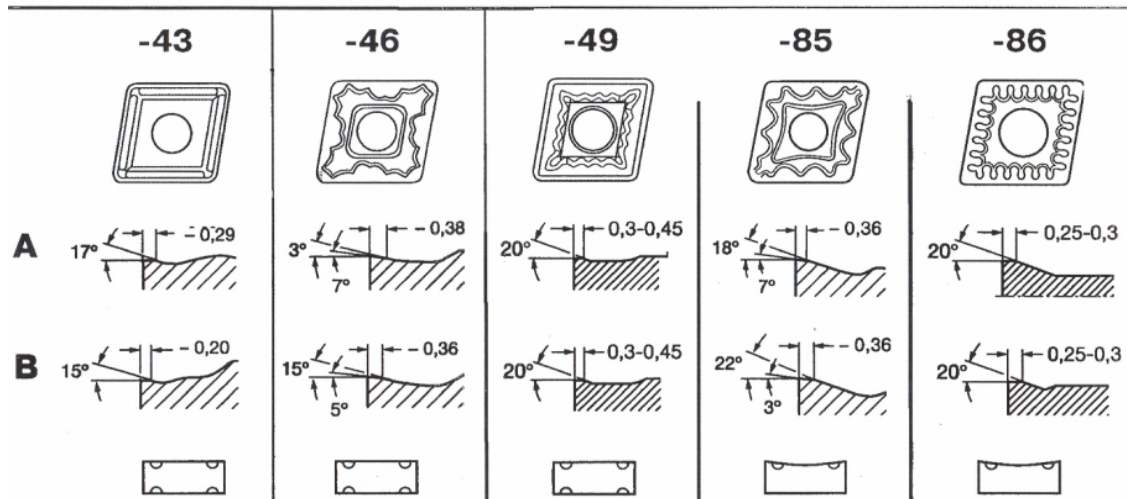
10 Особое обозначение
изготовителяА – сечение по вершине
В – поперечное сечение

Таблица 6.2

Зависимость режущей способности лезвия от количества слоев
в многослойном покрытии

1. Многослойное покрытие	4 мкм TiN
2. Многослойное покрытие	4 мкм TiC
3. Двухслойное покрытие	1 мкм TiC + 3 мкм TiN
4. Трехслойное покрытие	1 мкм TiN + 1 мкм TiC + 3 мкм TiN
5. Пятислойное покрытие	1 мкм TiN + 1 мкм TiC + 1 мкм TiN + 1 мкм TiC + 1 мкм TiN

Модельные испытания покрытий Ti (C, N) показывают, что снижение скорости изнашивания по сравнению с TiN было незначительным. Однако их адгезия к подложке, оцененная по величине усилия задиорообразования, приблизительно в 2,5 раза выше, чем у TiN. Поэтому основные преимущества покрытий Ti (C, N) перед TiN связываются с их высокой адгезией к подложке. Поскольку структурные характеристики покрытий аналогичны, а также т.к. вследствие одинаковой текстуры исключается влияние ориентационных эффектов, можно предполагать, что основной причиной высокой адгезии является высокая диффузионная подвижность C. Однако возможность обеспечения достаточной для режущего инструмента адгезионной прочности слоя TiN делает нецелесообразным использование семи-слойных покрытий (а фактически – однослойного карбонитрида титана).

6.3. Сравнение технологий

Сравнительный анализ технологий нанесения покрытий и ионно-лучевого упрочнения поверхностных слоев материалов позволяет сделать ряд выводов о целесообразности применения первого или второго вида обработки, а также о их достоинствах и недостатках.

Эффект от **нанесения покрытий**, в частности, на инструмент, выражается:

- в повышении производительности обработки резанием;
- в увеличении срока службы инструмента при обработке конструкционных сталей, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, а также при обработке титановых и никелевых сплавов.

К **недостаткам технологии нанесения покрытий** следует отнести:

- изменение геометрического размера инструмента, особенно в тех случаях, когда нанесение покрытия осуществляется при высоких температурах, что нежелательно для прецизионного инструмента;
- изменение геометрии режущего клина через радиус скругления режущей кромки. С развитием высокоскоростной обработки, когда толщина срезаемого слоя соизмерима с радиусом скругления, актуальна сама возможность получения острого лезвия;
- отслоение покрытия;
- высокие поверхностные напряжения, за счет которых удерживается покрытие на поверхности инструмента, в некоторых случаях приводят к выкрашиванию инструмента.

При анализе **технологии ионно-лучевого упрочнения** поверхностей материалов очевидными становятся следующие ее преимущества:

- изменение структуры материала на большую глубину и формирование в поверхностном слое повышенной микротвердости и остаточных напряжений сжатия без изменения геометрических параметров поверхности;
- образование в поверхностном слое путем обработки активными ионами (азот, углерод и др.) устойчивых химических соединений (нитриды, карбиды), которые существенно изменяют как физико-механические, так и химические свойства поверхности;
- введение в поверхность не только ионов различных атомов, но и химических соединений.

Однако при этом следует отметить и недостатки процесса:

- высокая требовательность процесса к подбору режимов и параметров;
- значительная энергоемкость.

Краткий словарь терминов

Атомная плотность – характеристика свойства вещества, определяемая выражением $n = N_a \rho / A$, где N_a – число Авогадро; ρ – плотность вещества, A – массовое число.

Геттерный насос – вакуумный насос, действие которого основано преимущественно на явлении хемосорбции откачиваемого газа геттером (титан, барий и т.п.). Различают геттерные насосы испарительные, ионно-геттерные, магнитные, электроразрядные.

Диссоциация молекул – (от лат. *dissociatio* – разделение, разъединение) – распад молекулы на две или несколько частей – свободные радикалы, ионы или др. частицы. Диссоциация молекул возникает под воздействием тепла, света, электрического поля и т.д.

Ионы (от греч. *ion* – идущий) – электрически заряженные атомы или группы атомов, образующиеся при потере или присоединении электронов (или других заряженных частиц) атомами или группами атомов.

Каскад бинарных упругих столкновений смещенных атомов – при внедрении ускоренной заряженной частицы в твердое тело происходит каскад взаимодействий частицы с атомами и электронами мишени, приводящих к упругому смещению атомов из узлов кристаллической решетки. При этом заряженная частица теряет свою энергию.

Каскадный процесс – преобразование низкого переменного напряжения в высокое постоянное посредством выпрямления низкого напряжения в отдельных каскадах с последовательным суммированием напряжений. Связь каскадов с источником питания осуществляется через емкостные реактивные сопротивления или посредством взаимоиндукции.

Квадрупольная линза – квадрупольные магнитная и электростатическая линзы имеют поля с двумя взаимно перпендикулярными плоскостями симметрии. Векторы напряженности полей в области распространения электронного пучка почти перпендикулярны к скоростям электронов. Благодаря этому фокусирующее действие на пучки электронов многократно возрастает по сравнению с осесимметричным полем.

Кластер – (англ. *cluster*, букв. – пучок) – система из большого числа слабосвязанных атомов или молекул. Кластеры занимают промежуточное положение между ван-дер-ваальсовыми молекулами, содержащими несколько атомов или молекул, и мелкодисперсными частицами (аэрозолями).

Латентные треки – формируются в облучаемом веществе при прохождении через него тяжелых ионов, создающих каналы сильного радиационного повреждения. В результате такого воздействия образуются области вещества с измененной структурой, которые, как правило, обладают повышенной химической растворимостью.

Метод вторичной масс-спектропии – метод исследования вещества путем определения массы m (чаще – отношения массы к заряду m/e) и относительного количества ионов, образующихся (или имеющих) в веществе. Масс-спектропия применяется для прецизионного определения массы ионов, изотопного анализа, молекулярного химического анализа, идентификации и установления структуры сложных органических молекул и др.

Метод Монте-Карло – метод статистических испытаний, основанный на генерации случайных последовательностей, для моделирования физических явлений и решения задач в различных областях физики, химии, математики, экономики, оптимизации, теории управления и др.

Метод оже-электронной спектроскопии – область электронной спектроскопии, в основе которой лежат измерение энергии и интенсивностей токов оже-электронов, а также анализ формы линий спектров оже-электронов, эмитированных атомами, молекулами и твердыми телами в результате оже-эффекта. Энергия оже-электронов определяется природой испускающих их атомов и взаимодействием этих атомов с окружающими, что приводит к небольшим изменениям энергии оже-электронов. Поэтому по оже-спектрам можно определять элементный состав приповерхностных слоев твердых тел, получать информацию о межатомных взаимодействиях, осуществлять химический анализ газов.

Метод резерфордовского обратного рассеяния – ядерно-физический метод исследования твердых тел, основанный на применении физического явления – упругого рассеяния ускоренных частиц на большие углы при их взаимодействии с атомами вещества. Спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния позволяет получать информацию о химическом составе и кристалличности образца как функции расстояния от поверхности образца (глубины), а также о структуре поверхности монокристаллического образца.

Модель теплового пика – при прохождении тяжелых ионов через конденсированные среды энергия ионов расходуется на упругое, неупругое взаимодействие и фононные возбуждения. Режим нелинейных каскадов (тепловых пиков) реализуется при прохождении ионов с большими массами, которые при своем движении выбивают атомы из узлов кристаллической решетки. При этом плотность распределения выбитых атомов столь высока, что большинство атомов внутри некоторого объема находится в тепловом движении.

Оже-переходы (оже-эффект) – эмиссия электрона из атома, происходящая в результате безызлучательного перехода при наличии в атоме вакансии на внутренней электронной оболочке.

Пинч-эффект (от англ. *pinch* – сужение, сжатие) – эффект сжатия, стягивания сильноточного газового разряда (плазменного образования) в результате взаимодействия тока разряда с магнитным полем, собственным или внешним.

Принцип аддитивности – суммирование значений свойств образующих компонентов пропорционально их содержанию.

Процесс релаксации – процесс установления статистического (а, следовательно, и термодинамического) равновесия в физической системе, состоящей из большого числа частиц. **Релаксация компонент плазмы** – процесс изменения функций распределения заряженных частиц в плазме за счет столкновений при стремлении их к термодинамическому равновесию, приводящий к установлению максвелловского распределения.

Радиационные дефекты – структурные повреждения, образующиеся при облучении кристаллов потоками ядерных частиц и жестким электромагнитным (гамма- и рентгеновским) излучением.

Радиационные эффекты (радиационные дефекты) – дефекты кристаллической структуры, образующиеся при облучении потоками частиц или квантов электромагнитного излучения. Энергия, переданная твердому телу (мишени), может привести к разрыву межатомных связей и смещению атомов с образованием первичного радиационного дефекта типа пары Френкеля (вакансия и межузельный атом).

Резонансные переходы – явление резонансного взаимодействия электромагнитных и акустических полей с квантовыми системами (резонансная флуоресценция, резонансное рассеяние, резонансная люминесценция).

Слой Дебая (дебаевский радиус экранирования) – характерный пространственный слой в плазме, электролитах или полупроводниках, на котором экранируется поле заряженной частицы за счет накапливающегося вокруг нее облака зарядов противоположного знака.

Турбомолекулярный насос – один из видов вакуумных насосов, служащий для создания и поддержки высокого вакуума. Действие турбомолекулярного насоса основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в направлении откачки вращающимся ротором. Ротор состоит из системы дисков. Вакуум, создаваемый турбомолекулярным насосом, – до 10^{-8} Па (10^{-10} мм рт. ст.). Скорость вращения ротора – десятки тысяч оборотов в минуту. Для работы требуется применение форвакуумного насоса.

Фонон (от греч. *phone* – звук) – квант поля колебаний кристаллической решетки (по аналогии с квантом электромагнитного поля – фотоном).

Фотон – элементарный носитель (квант) электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами, не имеет заряда и массы покоя.

Холловское ускорение ионов (эффект Холла) – возникновение в проводнике с током плотностью j , помещенном в магнитное поле H , электрического поля в направлении, перпендикулярном к j и H . Используется для ускорения ионов в ионных источниках. Ионные двигатели Холла – это лишенные решетки ионные двигатели, которые производят тягу с помощью электростатического ускорения ионов из кольцевой камеры выпуска.

Электронные линзы – устройства, создающие магнитные или электрические поля для фокусировки электронных пучков, их формирования и получения электронно-оптических изображений (аналогичные устройства для ионных пучков называются ионными линзами). Их классифицируют по типу поля (магнитные, электростатические), по виду симметрии (осесимметричные, цилиндрические, квадрупольные и др.) и по др. характерным признакам.

Электрон-фотонное взаимодействие – электронно-фотонные ливни (электромагнитные каскады, электронно-фотонные лавины) – группы генетически связанных частиц, обусловленные многократными последовательными актами взаимодействия электронов и фотонов.

Электростатическое ускорение ионов – ускорение ионов за счет взаимодействия заряженных частиц с электрическим полем. Электрическое поле способно напрямую совершать работу над частицей, т.е. увеличивать ее энергию.

Эмиссия электронов – испускание электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум или др. среду. Возможно испускание электронов холодной металлической поверхностью при механическом воздействии на нее.

Энергия смещения – при облучении твердого тела энергия излучения накапливается в нем в виде энергии смещенных атомов. Энергия смещения называется вигнеровской по имени американского физика Е. Вигнера, открывшего это явление. Энергия смещения имеет большое значение в реакторостроении, т.к. в ядерных реакторах материалы могут накопить огромные количества такой энергии. В этом отношении особенно опасен графит – наиболее часто применяемый замедлитель нейтронов. Ядерные реакторы время от времени приходится останавливать и прогревать, чтобы атомы вернулись на свои места в кристаллической решетке. В тех случаях, когда нагрев производится очень быстро, выделяющаяся при возвращении атомов на свои места (рекристаллизации атомов) вигнеровская энергия вызывает саморазогревание, в результате которого происходит тепловой взрыв. По этой причине зарегистрировано несколько случаев аварий ядерных реакторов.

Эффект диффузии – явление проникновения насыщающего элемента вглубь материала, происходящего вследствие теплового движения атомов в направлении уменьшения концентрации насыщающего элемента.

Эффект каналирования – движение заряженной частицы в кристалле вдоль главных кристаллографических направлений, при котором она претерпевает серию малоугловых коррелированных отклонений на соседних атомах цепочки. Атомы кристаллической решетки вдоль основных кристаллографических направлений формируют так называемые каналы, которые ограничиваются плотно упакованными атомными рядами или плоскостями.

Явление радиационно-стимулированной диффузии – явление ускорения диффузии, стимулированное дефектами кристаллической решетки, образующимися при облучении кристаллов потоками ядерных частиц и жестким электромагнитным излучением.

ФОРМЫ ПРОТОКОЛОВ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Протокол исследований видов лучевой обработки

№ п/п	Вид обработки	Характеристики обработки			
		Напряжение, кВ	Плотность тока, А/см ²	Температура, К	Толщина обработанного слоя, мм
1	2	3	4	5	6
1	Лучевая обработка резанием				
2	Ионно-лучевая обработка нанесением покрытий				
3	Ионно-лучевая имплантация				
...	...				

Протокол исследований микротвердости упрочненной поверхности

Материал образца	Температура ионно-лучевой обработки, К	Напряжение, кВ	Плотность тока, А/см ²	Время обработки, мин	Микротвердость детали-образца, МПА	
					до обработки	после обработки
1	2	3	4	5	6	7

Протокол исследований износостойкости покрытий

№ п/п	Материал	Величина фаски износа, мкм		
		1-ое измерение	2-ое измерение	3-е измерение
1	2	3	4	5

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Виды лучевой обработки.
2. Дайте определение электронно-лучевой обработке.
3. Дайте определение ионно-лучевой обработке.
4. Дайте определение светолучевой обработке.
5. Виды лучевой упрочняющей обработки.
6. Способы нанесения покрытий.
7. Схема установки для вакуумного электродугового нанесения покрытий.
8. Схема устройства для ионно-лучевой обработки.
9. Схема концентрации легирующего элемента в обрабатываемом материале.
10. Схема фазовых состояний материала после ионно-лучевой обработки.
11. Механизм торможения ионов в твердом теле.
12. Ядерное торможение.
13. Электронное торможение.
14. Основные принципы взаимодействия ионов на поверхности.
15. Формирование ионных потоков.
16. Основные элементы установок для ионной имплантации.
17. Основные типы установок для ионно-лучевой обработки.
18. Виды ионных источников.
19. Ионный источник Кауфмана.
20. Ионный источник Фримана.
21. Ионный источник Пеннинга.
22. Ионный источник Холла.
23. Характеристика низкоэнергетической имплантации.
24. Характеристика имплантации ионов средней энергии.
25. Высокоэнергетическая ионная имплантация.
26. Сильноточная ионная имплантация.
27. Имплантация атомами отдачи и ионное перемешивание.
28. Схема ионного источника с замкнутым дрейфом электронов.
29. Схема сильноточного ионного источника.
30. Технологический маршрут ионно-лучевой обработки.
31. Состав установки УВН-70-2А.
32. Методика исследования имплантированных поверхностей.
33. Конструкция ионного источника для высокоточной ионно-лучевой имплантации.
34. Методика исследования износостойкости покрытий.
35. Влияние плотности тока на толщину модифицированного слоя.
36. Распределение микротвердости по глубине модифицированного слоя.
37. Зависимость износа обработанных образцов от пути трения.
38. Методы нанесения покрытий (физический и химический).
39. Сравнительная износостойкость покрытий.
40. Схема процесса износа покрытия.
41. Стойкость инструмента с покрытием.
42. Оптимизация формы режущих пластин под покрытие.
43. Сравнительная эффективность технологий ионно-лучевого упрочнения.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Варианты заданий

№ варианта	Материал образца
1	P6M5
2	12X18H10T
3	12XM
4	12X1MФ
5	12XH3A
6	38XMЮA
7	40XH
8	35XH1MФА
9	15X1M1Ф
10	25X1MФ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рекомендуемые режимы ионно-лучевой обработки

Напряжение, кВ	Плотность тока, А/см ²	Температура ионно-лучевой обработки, К
1,0	0,5	620
1,5	1,0	670
2,0	1,5	720
2,5	2,0	720

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы сайта www.profyproject.ru/iznosostoykie_pokrytiya_i_uprochnenie.
2. Материалы сайта www.galvanicworld.com.
3. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
4. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан [и др.]; под. общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение: Ленингр. отд.-ие, 1988. – 719 с.
5. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / А.В. Белый [и др.]. – Минск: Изд-во физ.-техн. ин-та Национальной академии наук Беларуси, 1998. – 220 с.
6. Белый, А.В. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А.В. Белый, В.А. Кукареко, А. Патеюк. – Минск: Бел. наука, 2007. – 244 с.
7. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н.Н. Попок. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 396 с.
8. Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В.А. Емельянов, И.А. Иванов, Ж.А. Мрочек; под. общ. ред. Ж.А. Мрочека. – Минск: Изд-во НПО «Интеграл», 1998. – 284 с.
9. Прогрессивные методы изготовления металлорежущего инструмента / А.В. Белый [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ, 1989. – 56 с.
10. Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродных покрытий / Ж.А. Мрочек, Б.А. Эйзнер, Г.В. Марков. – Минск: Наука и техника, 1991. – 96 с.
11. Ионная имплантация материалов / В.Б. Оджаев [и др.]. – Мин.: БГУ, 1998. – 197 с.
12. Организовать опытно-экспериментальный участок и освоить производство упрочненных рабочих вставок штамповой оснастки» (заключительный): НИР / науч. рук. Н.Н. Попок. – № госрегистрации 20066210. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – 68 с.
13. Попок, Н.Н. Исследование процесса ионно-лучевой обработки инструментальных материалов / Н.Н. Попок, В.А. Кукареко, С.В. Дербуш // Вестник ПГУ. Сер. С. – 2008. – С. 99 – 105.
14. Маккларенс, Э. Снижая напряжения. Оптимизация свойств передовых износостойких покрытий // Metal Working Wored: деловой и технический каталог от Sandvik Coromant / Э. Маккларенс. – № 1. – 2007. – С. 22 – 23.
15. Материалы сайта www.mitsubishicarbide.ru.
16. Стружка: журнал по металлообработке. – № 3. – 2007. – С. 40.
17. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Гуревич [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
18. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.
19. Способ определения периода стойкости покрытия на режущем инструменте: а.с. 1658025, МКИ GO 1№3 /58 / Н.Н. Попок, О.А. Алексеев // Бюллетень изобретений. – № 23, 1990. что такое БИ?
20. Попок, Н.Н. Сравнительная эффективность режущих инструментов с износостойкими покрытиями / Н.Н. Попок // Трение и износ. – Т. 17. – № 4. – 1996. – С. 538 – 543.
21. Попок, Н.Н. Формообразование износостойких поверхностей режущих инструментов с покрытиями: современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: сб. / Н.Н. Попок. – Новополоцк: ПГУ, 1999, С. 322 – 324.
22. Режущий инструмент: экспресс-информация // Fertigungs- und Industrietechnologie Techn. – 1980. – № 5. – С. 263 – 265.
23. Самозатачивающиеся режущие пластины // Tech. Briefs Tooling Production. – 1984. – № 10. – V. 49. – P. 104 – 105.
24. Cutting Performance of Coated Tools / А.А. Minevich [et al.]: 10-th International Colloquium Trebology, Stuttgart/Osttildern, Germany. – Jaunary 9 – 10. – 1996. – P. 105 – 117.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение.....	4
Методика обучения и контроля уровня знаний, умений и навыков	5
Рабочая программа.....	7
Лекционный курс	9
Тема 1. Виды лучевой обработки материалов.....	9
1.1. Лучевая обработка резанием	9
1.2. Лучевая упрочняющая обработка	13
1.2.1. Ионно-лучевая упрочняющая обработка	13
1.2.1.1. Нанесение покрытий	16
1.2.1.2. Ионная имплантация	19
Тема 2. Физические основы ионно-лучевой обработки	23
2.1. Ионная имплантация	23
2.1.1. Ядерное торможение.....	24
2.1.2. Электронное торможение	26
2.2. Нанесение покрытий	30
2.2.1. Основные принципы взаимодействия ионов с поверхностью.....	30
2.2.2. Формирование ионных потоков.....	35
Тема 3. Технологии и оборудование ионно-лучевой обработки.....	38
3.1. Установки для проведения ионно-лучевой обработки.....	38
3.1.1. Особенности оборудования для сильноточной ионной имплантации.....	45
3.2. Технологические процессы и оборудование	48
Тема 4. Методики исследований микротвердости и износостойкости упрочненного слоя поверхности детали	50
4.1. Методика исследования имплантированных поверхностей	50
4.2. Методика исследования износостойкости покрытий	52
Тема 5. Структура, состав и свойства упрочненных поверхностей	54
5.1. Структура и фазовый состав упрочненной поверхности	54
5.2. Триботехнические свойства ионно-модифицированных слоев.....	58
5.3. Износостойкость покрытий	61
Тема 6. Практическое применение ионно-лучевой обработки.....	71
6.1. Ионно-лучевое азотирование	71
6.2. Нанесение покрытий	71
6.3. Сравнение технологий	74
Краткий словарь терминов	75
Формы протоколов учебно-исследовательских лабораторных работ	79
Вопросы для самоконтроля	80
Приложение А	81
Приложение Б.....	81
Литература	82

Учебное издание

БЕЛЫЙ Алексей Владимирович
КУКАРЕКО Владимир Аркадьевич
ПОПОК Николай Николаевич
ДЕРБУШ Сергей Викторович

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
ПОСОБИЕ
для студентов машиностроительных специальностей

Редактор *Т. В. Булах*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 15.11.2010. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 4,87. Уч.-изд. л. 4,1. Тираж 99 экз. Заказ 1871.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.