

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой»

Н. Н. Попок
В. С. Анисимов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области машиностроительного оборудования и технологий
в качестве учебно-методического пособия
для студентов специальности 6-05-0714-02
«Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты»*

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
2025

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.5-8я73
П58

Одобрено и рекомендовано к изданию
УМО по образованию в области машиностроительного оборудования
и технологий (протокол № 46 от 31.05.2023 г.)

Кафедра технологии и оборудования машиностроительного производства

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

кафедра «Теплоэнергетика»

Витебского государственного технологического университета

(зав. каф. канд. техн. наук, проф. В. И. ОЛЬШАНСКИЙ);

д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Технологическое оборудование»

Белорусского национального технического университета

В. А. ДАНИЛОВ

Попок, Н. Н.

П58 Технологические основы ионно-плазменной обработки материалов
и изделий: учеб.-метод. пособие / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов. –
Новополоцк : Полоц. гос. ун-т имени Е. Полоцкой, 2025. – 104 с.
ISBN 978-985-531-914-7.

Приведен обзор видов и технологий обработки материалов и изделий, в том числе упрочняющей обработки. Рассмотрены составы и механизм формирования покрытий, методика и результаты экспериментальных исследований структуры, фазового состава и физико-механических свойств комбинированных покрытий. Даны материалы для выполнения комплексной лабораторной работы и контроля знаний обучающихся.

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

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.5-8я73

ISBN 978-985-531-914-7

© Попок Н. Н., Анисимов В. С., 2025
© Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Теоретическая часть	
1.1 Виды и технологии обработки материалов и изделий	5
1.2 Упрочняющая обработка без изменения объема заготовки	24
1.3 Упрочняющая обработка путем нанесения покрытий в вакууме	28
1.4 Упрочняющая обработка путем нанесения покрытий электродуговым и газопламенным методами	30
Контрольные вопросы	37
Практическая часть	
2.1 Обоснование состава и механизма формирования покрытия	38
2.2 Методика экспериментальных исследований	40
2.3 Исследование влияния ионно-лучевого азотирования на свойства инструментальной стали и твердого сплава	43
2.3.1 Структурно-фазовое состояние и микротвердость	43
2.3.2 Износостойкость	46
2.3.3 Коррозионная стойкость	49
2.4 Исследование свойств комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана	50
2.4.1 Структура и фазовый состав	51
2.4.2 Шероховатость и микротвердость	53
2.4.3 Коэффициент трения и износостойкость покрытий	58
2.4.4 Коррозионная стойкость	63
2.5 Исследование свойств комбинированного покрытия сталь–медный сплав–нитрид титана	64
2.5.1 Коэффициент трения	64
2.5.2 Износостойкость	67
2.5.3 Коррозионная стойкость	68
2.6 Технологический регламент и рекомендации по нанесению комбинированного покрытия	69
Контрольные вопросы	74
Лабораторная работа	75
Заключение	79
Литература	82
Приложения	84

Введение

Решение проблемы повышения стойкости машин, работающих в условиях фрикционного взаимодействия, а также режущих инструментов, функционирующих при повышенных температурах и давлениях, становится все более значимым в связи с постоянным увеличением уровня действующих нагрузок, скоростей и рабочих температур, а также применением агрессивных сред.

Одним из наиболее перспективных способов существенного повышения физико-механических, триботехнических характеристик и антикоррозионных свойств является инженерия поверхностных слоев этих материалов путем нанесения регулярного микрорельефа резанием, газотермических и ионно-плазменных покрытий из металлов и газов. В частности, регулярный микрорельеф способствует удержанию и хорошей адгезии смазок и покрытий, использованию определенных комбинаций металлов-псевдосплавов, а ведение процесса с ускоренными ионами азота и титана позволяет при сравнительно кратковременной гиперзвуковой газотермической и ионно-плазменной обработке достигать в поверхностных слоях сверхвысокую концентрацию легирующих элементов (~30 ат.%) и за счет радиационно-стимулированной диффузии транспортировать их в подповерхностные слои. Важной особенностью такого комбинированного метода является сохранение прочностных свойств подложки за счет малой глубины микрорельефа, а также пониженной температуры резания и ионно-плазменной обработки, что оказывает существенное влияние на повышение ресурса работоспособности материалов с упрочненными поверхностными слоями.

Несмотря на вышеперечисленные преимущества и полученные результаты исследований влияние геометрических параметров и физико-механических свойств поверхности образцов после их комбинированной механической, газотермической и ионно-плазменной обработки на повышение износо- и коррозионной стойкости деталей и режущих инструментов, работающих в экстремальных условиях, изучено недостаточно.

В данном учебном пособии с системных позиций рассматриваются виды и технологии обработки материалов и изделий, при этом основное внимание уделяется упрочняющей обработке. В практической части пособия приводятся составы и механизм формирования комбинированных покрытий, методика и результаты исследований структуры и физико-механических свойств различных покрытий, рекомендации по нанесению комбинированных покрытий. Предлагается выполнение лабораторной работы, включающей основные этапы реализации методики экспериментальных исследований. Каждый раздел пособия завершается вопросами для контроля знаний обучающихся. В комплексе пособие обеспечивает получение учащимися необходимых знаний, умений и навыков для использования современных упрочняющих технологий в машиностроении.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Виды и технологии обработки материалов и изделий

Технология получения изделий, в которой используется тот или иной вид обработки, тип оборудования и оснастки, определяется согласно общепринятым теоретическим подходам [1] материей, энергией и информацией и может быть представлена следующей моделью (рисунок 1.1).

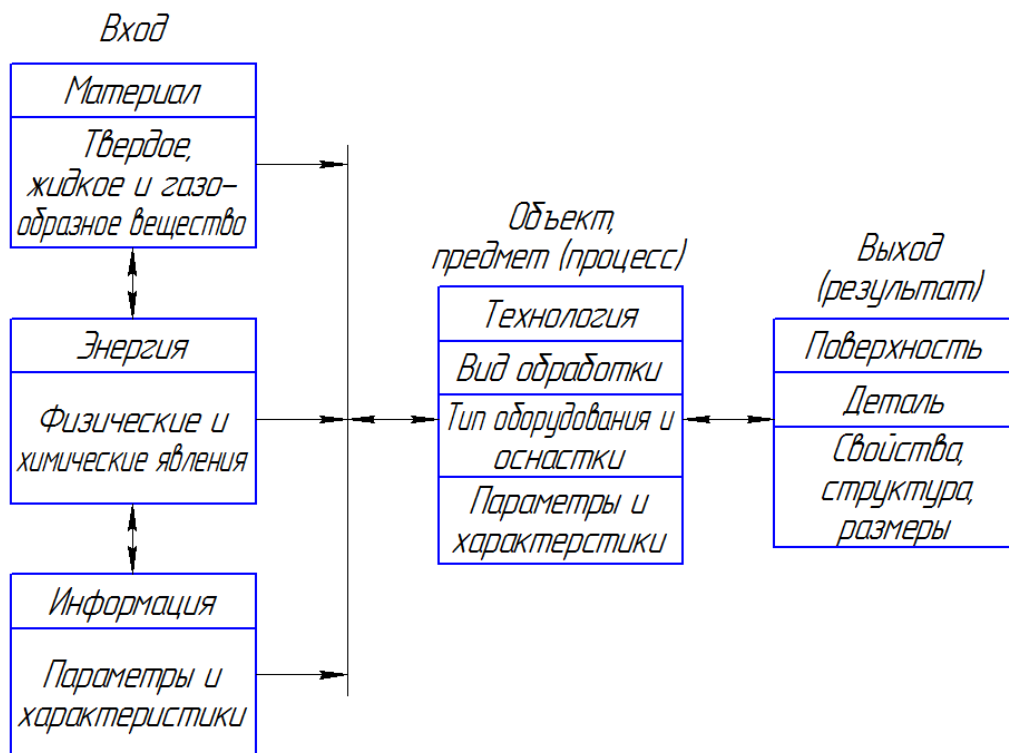


Рисунок 1.1. – Системная модель обработки материала и изделия

На входе системы находится материя, под которой понимается рабочее вещество в твердом, жидком и газообразном состояниях, формирующее поверхностные слои детали. Воспроизведение или генерация рабочего вещества осуществляется путем подвода энергии, основанной на физических и химических явлениях. Наличие информации предполагает отличие параметров и характеристик материала и заготовки на входе и изделия на выходе системы. Материя, энергия и информация, взаимодействуя между собой, создают объект и предмет в виде технологии процесса обработки и типа оборудования и оснастки с определенными закономерностями изменений их характеристик и параметров. На выходе системы получается результат в виде поверхности с требуемыми свойствами и структурой

материала, размерами и другими характеристиками и параметрами детали (изделия).

Машины, используемые в технологиях, в зависимости от объекта воздействия классифицируются [2] на энергетические, рабочие, информационные и кибернетические (рисунок 1.2). По определению И.И. Артоболевского, «Машина есть устройство, выполняющее механические движения для преобразования материи, энергии и информации». По этой классификации оборудование для формообразования относят к рабочим технологическим машинам, специфическим признаком которых является входной поток материалов.

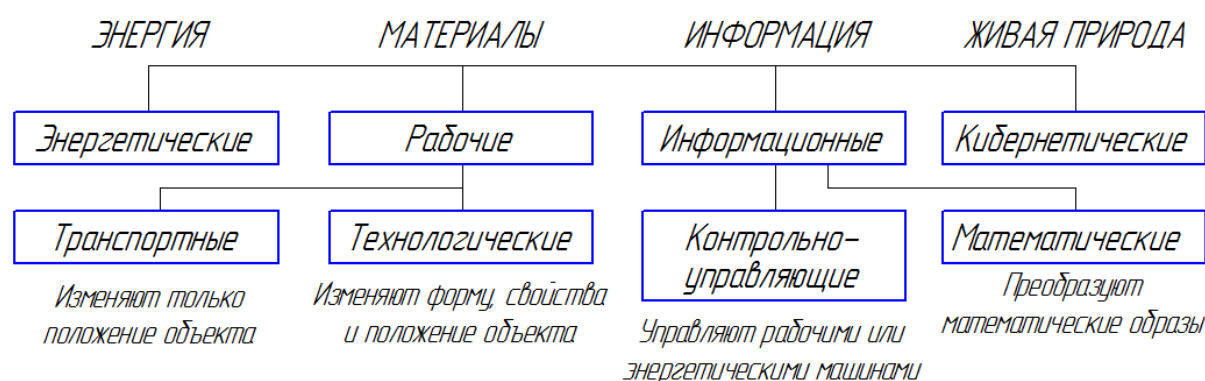


Рисунок 1.2. – Общая классификация машин академика И.И. Артоболевского

Следует отметить, что предложенная спустя тридцать лет концепция конвергенции (сближения) технологий и создание так называемых НБИК-технологий [3;4] реализуют на более высоком уровне идеи И.И. Артоболевского, в частности «природоподобных» и «когнитивных» технологий.

В данном случае аббревиатура НБИК означает следующее:

- Н – «нано» (предполагает наличие наноструктуры, обеспечивающей свойства материала);
- Б – «био» (биологические аналоги предлагаемых технологий и объектов представителям живой природы);
- И – «инфо» (информационные потоки, характеризующие объекты и предметы;
- К – «когно» (когнитивные элементы нейросетей, искусственного интеллекта («умной машины»), заменяющих человека).

НБИК-конвергенция предполагает:

- 1) Нано- и Био-: создание конструкций наноразмера, обладающих свойствами, которые присущи биологическим системам;

2) Био- и Инфо-: создание информационных систем, которые используют принципы хранения информации, применяемые в биологических системах (ДНК, человеческий мозг), а также создание «нанобиопроцессоров» для вычислительных устройств;

3) Инфо- и Когно-: создание вычислительных и информационных систем, обладающих определенными характеристиками человеческого интеллекта (например, способностью к самообучению и самостоятельному анализу). Это «природоподобные» технологии.

Связи внутри НБИК-технологий демонстрируются рисунком 1.3.

Каждая из ключевых составляющих структуры «нано-био-инфо-когно» включает возможные области их применения, например, материалы, устройства, технологии, электроника, химия, биология, фармакология, генная инженерия, информатика, здоровье и медицина, искусственный интеллект, нейросети и т.д.

Анализ потоков материала положен в основу общей классификации технологий, приведенной в немецком стандарте DIN8580 [5]. Согласно этой классификации, все виды формообразования по топологическим характеристикам результата процесса делятся на четыре группы: создающие связи, например, «литье»; сохраняющие связи, например, «гибка»; разрывающие связи, например, «резание»; увеличивающие число связей, например, «сварка» (рисунок 1.4).

Стандарт ASTM F 2792 1549323-1 [6] подразделяет виды обработки на субтрактивные («вычитающие») и аддитивные («прибавляющие») и в какой-то мере согласуется со стандартом DIN8580.

В свою очередь субтрактивные виды обработки систематизированы в ГОСТ 25761-83 [7] и справочнике [8], по которым выделены лезвийная, а также абразивная (ГОСТ 23505-79) обработки. Виды лезвийной обработки подразделяются по кинематическим признакам на вырезание, разрезание, затылование, точение, растачивание, подрезание, фасонное точение, копировальное точение, строгание, долбление, зубострогание, зубодолбление, осевая обработка: сверление, рассверливание, центрование, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, фрезерование, круговое фрезерование, охватывающее фрезерование, зубофрезерование, встречное и попутное фрезерование, протягивание, внутреннее и наружное протягивание, шевингование, опилование, ротационная обработка. К этим видам обработки также относятся виды, основанные на комбинации физических и химических явлений, например, электрофизические и электрохимические [9], пластического деформирования и выглаживания [10]. Подробное описание субтрактивных и аддитивных видов обработки приведено в соответствующих стандартах и справочниках [5–10].

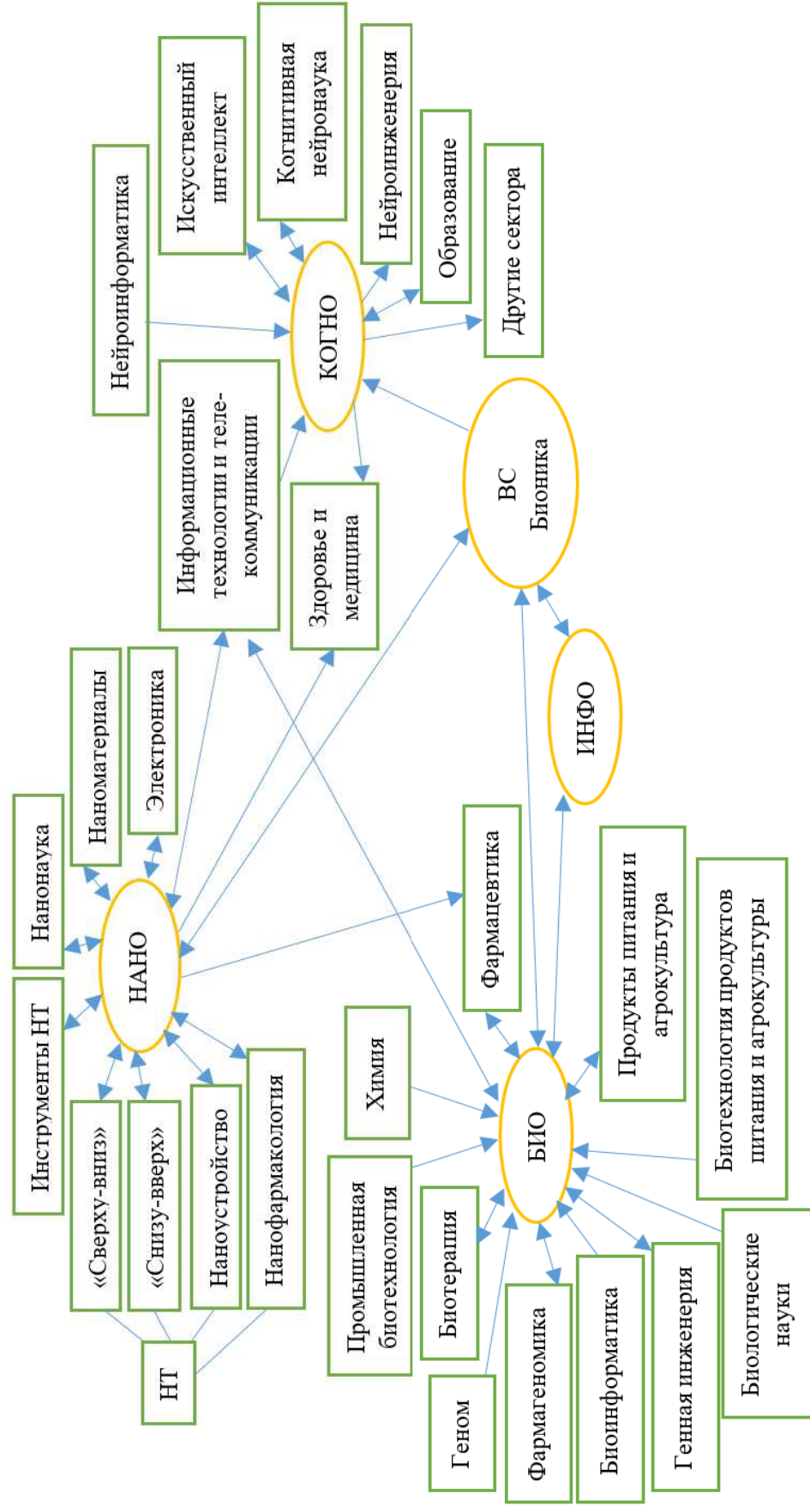


Рисунок 1.3. – Связи внутри НБИК-технологий

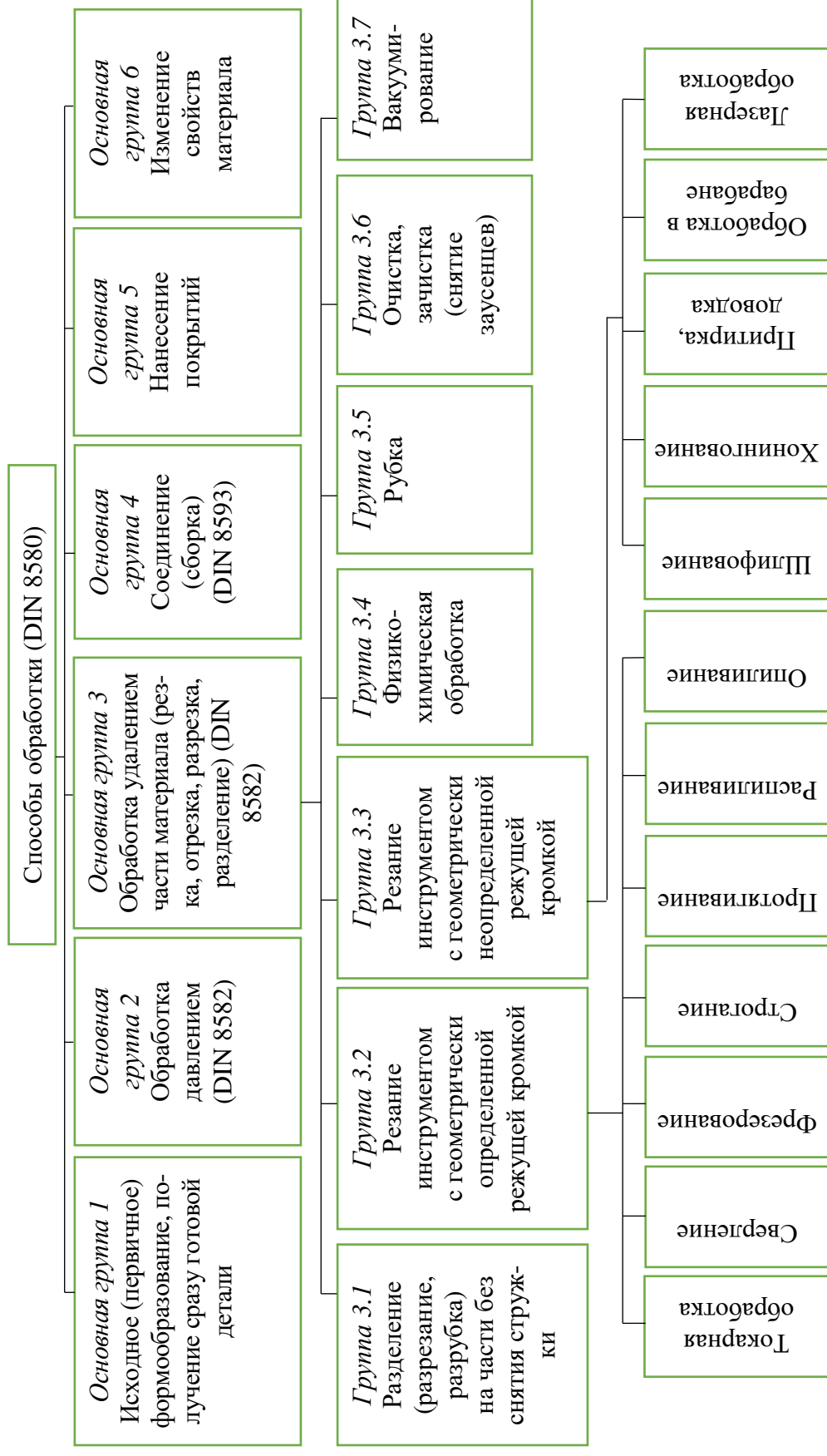


Рисунок 1.4. – Подразделение способов обработки по DIN8580

Термины и определения этих разновидностей приведены в действующих стандартах (ГОСТ 3.1109-82 и др.). Разновидности группируются по характеру явлений, происходящих вследствие воздействия на заготовку электрического тока – основного вида энергии, затрачиваемой на осуществление обработки. При этом определены группы методов, основанные на использовании (рисунок 1.5): 1) химического воздействия электрического тока (разновидности ЭХО); 2) теплового воздействия электрического тока (разновидности ЭЭО, ПЗО, СЛО); 3) механического воздействия электрического тока или электромагнитного поля (разновидности УЗО, ЭГИО, МАО); 4) сочетаний различных воздействий электрического тока или электромагнитного поля одновременно друг с другом, а также с различными процессами механической обработки, например, резанием или давлением (разновидности ЭХФКМО).

Для ориентировочной оценки технологических возможностей ЭХФКМО в таблице 1.1 приведены общие характеристики некоторых из них. Более подробные и конкретные данные приводятся в соответствующих разделах справочников [9; 10].

К «прибавляющим» видам обработки, кроме аддитивных, относятся все разновидности упрочнения и восстановления материалов и изделий. Их условно можно подразделить на виды обработки, не изменяющие объема изделия, но изменяющие структуру и свойства его поверхностного слоя, и виды обработки путем нанесения покрытий значительных размеров («толстых») и тонкопленочных покрытий («тонких»), в т.ч. в вакууме.

Согласно [11] методы получения покрытий подразделяются на электролитические, химические, физические и механические.

Электролитический метод. В водный раствор соли металла помещают металлическую пластину и изделие, на которое наносится покрытие. К металлической пластине и изделию подводят постоянный ток. При этом пластина является анодом, а изделие – катодом. В результате электролиза происходит растворение пластины, а на поверхности изделия осаждается покрытие. Таким образом наносят покрытия из меди, никеля, цинка, хрома, олова и других металлов.

Никелирование. Покрытия, полученные никелированием, обладают хорошими антикоррозионными свойствами, являются ковкими и хорошо противостоят действию ударных нагрузок, имеют твердость HV 140-240. Никелирование используют для получения декоративных и износостойких покрытий, для ремонта бракованных деталей и т.д.

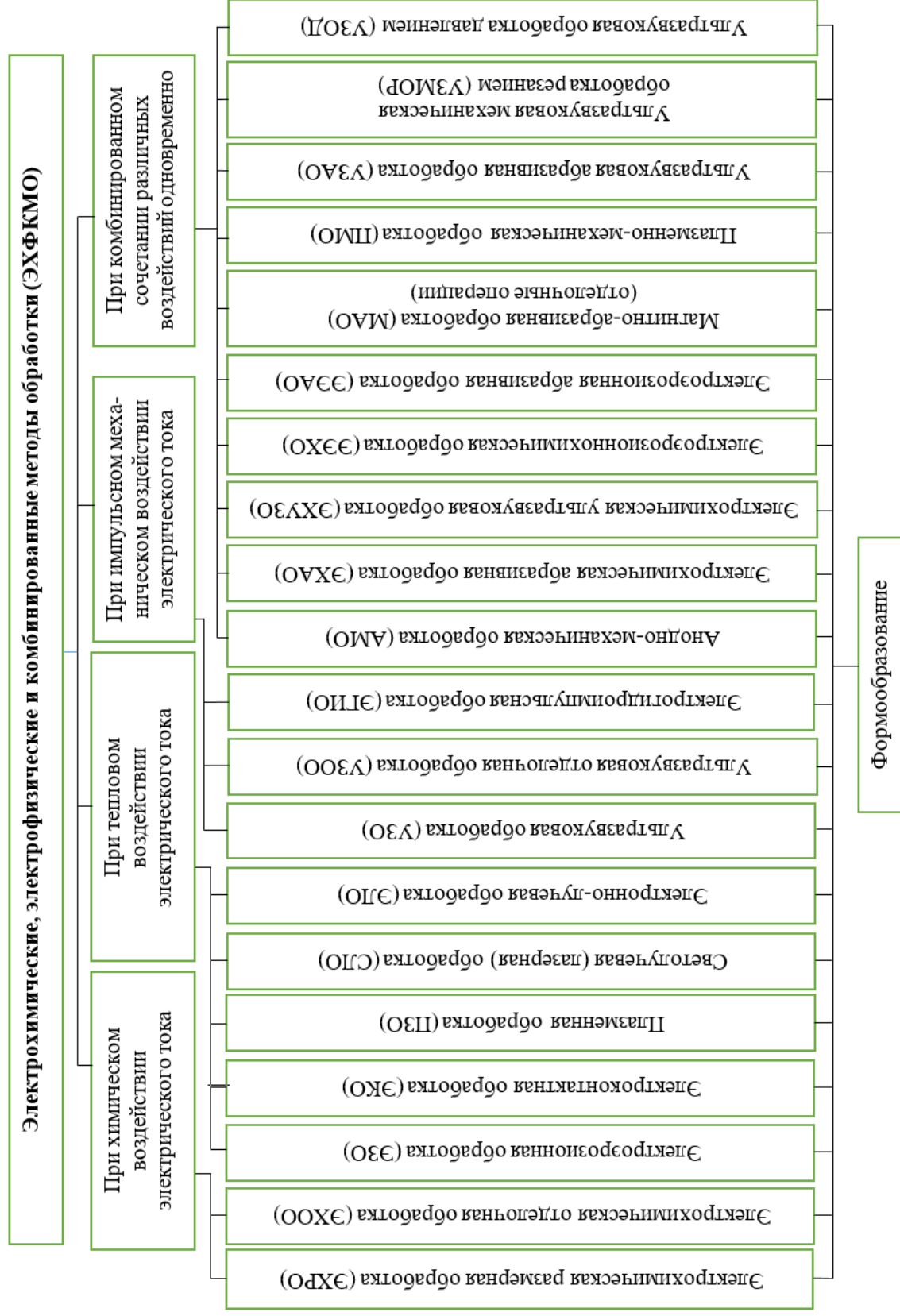


Рисунок 1.5. – Группы электро-химико-физических и комбинированных обработки методов

Таблица 1.1. – Основные технические характеристики некоторых электро-химико-физических и комбинированных видов обработки

Метод	Сущность метода	Производительность (максимальная)		Достижимая точность обработки, мм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Удельная мощность, Вт/см ²	Рабочая среда	Обрабатываемый материал
		мм ³ /мин	кг/ч					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЭХО	Анодное растворение	25 000	–	0,08–0,15	Ra = 2,5–1,25	10 ³ –10 ⁴	Электролиты	Токопроводящий
АМО	Анодное растворение и абразивное резание	6 000	–	0,05	Rz = 0,4			
ЭЭО	Электроэрозионное разрушение	25 000	–	0,04–0,2	Ra = 1,25–2,5		Диэлектрические жидкости	
ЭКО		–	450	–	Rz = 20–160	10 ³ –10 ⁴⁸	Воздух, вода	Любой
ПЗО	Разрушение под воздействием концентрированного теплого потока	–	200–1000	0,1–0,5	Rz = 320	10 ³ –10 ⁵	Газ, жидкость	
СЛО	Разрушение под воздействием концентрированного светового потока	–	20–40	0,01–0,02	Rz = 20	10 ⁶ –10 ⁸	Вода, газ, вакуум	

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЭЛО	Разрушение под воздействием концентрированного потока электронов	–	$3 \cdot 10^{-2}$ –1	0,01–0,02	Rz = 20	10^6 – 10^8	Вакуум (защитный газ)	Токопроводящий
УЗАО	Хрупкое абразивное разрушение	20 000	–	0,01–0,02	Ra = 2,5–1,25	10^3 – 10^4	Абразивная суспензия	Твердые хрупкие; твердые сплавы
МАО	Механическое абразивное резание	–	0,6 (на 1 м ²)	Исходная	Rz = 0,1–0,04	10^2	Магнитно-абразивные порошки, СОЖ	Ферромагнитный и немагнитный
ЭГИО	Формирование волн сжатия при высоком вольтном электрическом разряде в жидкости	–	–	0,1–0,2	Исходная	10^6 – 10^8	Жидкость	Пластичный

Хромирование. Различают мягкое и твердое (промышленное) хромирование. Мягкое хромирование применяют для нанесения коррозионностойких покрытий, которые используют для декоративных целей. Методом твердого хромирования получают твердые (HV 800–1000) покрытия, которые хорошо противостоят износу. Такое хромирование используют для повышения износостойкости деталей аппаратов и машин, инструмента, для ремонта трущихся участков, для защиты поверхностей пресс-форм и т.д.

Оксидирование. Металлическое изделие помещают в специальный раствор электролита и подводят постоянный электрический ток. В процессе электролиза на поверхности детали, которая является анодом, происходит выделение кислорода и образование прочной защитной пленки из окислов металла изделия. Этот способ применяют для обработки изделий из алюминия, циркония и других металлов. При обработке алюминия образуется твердая окисная пленка, состоящая из окиси алюминия. Этот способ в основном используют для получения износостойких покрытий.

Химический метод. Осаждение металлов, находящихся в водных растворах в виде ионов, на покрываемые поверхности изделий можно производить и без подвода постоянного тока к изделиям при погружении наносимого металла в водный раствор соли. Этим способом наносят покрытия из бронзы, кадмия, меди, золота, никеля, олова и других металлов.

Фосфатирование. Покрытие наносят путем погружения изделия в раствор соответствующего состава. При этом на поверхности изделия образуются различные химические соединения (окислы, соли щавелевой, фосфорной кислоты и т.д.). Этим способом можно создавать покрытия на изделиях из алюминия, меди, магния, черных металлов и т.д. Для черных металлов часто используют фосфатирование в растворе $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Полученные таким способом покрытия используют в декоративных целях, для защиты от коррозии. Применяют также фосфатирование как предварительную обработку поверхности деталей перед окрашиванием.

Сульфидирование. Этот способ заключается в образовании сульфатов в результате диффузии серы на поверхности черных металлов. При сульфидировании свободная сера образуется в процессе нагрева (до температуры ниже 600 °С) смеси соединений серы с неорганическими веществами (нейтральными солями, карбонатами, солями, обладающими восстановительными свойствами, и т.д.). Сульфидирование повышает износостойкость деталей.

К физическим методам относятся следующие.

Нанесение покрытий из жидкой фазы. Металлическое изделие погружают на определенное время в расплав наносимого металла. Этим способом можно получать покрытия из цинка, олова, алюминия, свинца и т.д.

Алитирование. Стальное изделие погружают в ванну с расплавленным алюминием, температура которого превышает 680 °С. На поверхности металла изделия происходит реакция с алюминием, в результате которой образуется интерметаллидное покрытие из соединений железа с алюминием. Толщина покрытия составляет приблизительно 0,1 мм. Покрытия, полученные таким способом, обладают хорошей коррозионной стойкостью и жаростойкостью.

Цинкование. Изделия погружают в ванну с расплавленным цинком. Нанесенное покрытие состоит из слоя чистого цинка и нескольких слоев твердых хрупких соединений железа с цинком.

Диффузионное насыщение. Диффузионные покрытия образуются в результате насыщения различными металлами и неметаллами поверхности металлов и сплавов, нагреваемых в контакте с диффундирующим материалом. Диффундирующий материал в основном состоит из порошков металлов и сплавов. В качестве диффундирующего элемента могут быть использованы также газообразные продукты различных соединений металлов и пары самих металлов. Метод диффузионного нанесения покрытий широко используют для улучшения физико-технических свойств поверхности черных металлов. К методу диффузионного нанесения относятся: алитирование, диффузионное хромирование и цинкование, силицирование, покрытие родием и т.д.

Алитирование из газовой фазы. Деталь помещают во вращающуюся печь вместе со смесью, состоящей из алюминиевого порошка, небольшого количества хлористого аммония и других добавок и выдерживают при температуре 850–1000 °С. В результате такой обработки на поверхности металлического изделия образуется диффузионная зона соединений железа с алюминием, которые обладают высокой жаростойкостью.

Диффузионное хромирование. Деталь помещают в герметическую печь вместе со смесью, состоящей из порошков феррохрома, йодистого аммония, каолина и некоторых других веществ. Для сталей, содержание углерода в которых не превышает 0,3%, диффузионное хромирование производится при температуре 950–1000 °С. Для сталей с высоким содержанием углерода температура в печи поддерживается в пределах 800–950 °С. В первом случае на поверхности образуется коррозионностойкий слой,

подобный высоколегированным хромоникелевым сталям, во втором – образуется слой, который обладает высокой твердостью.

Карбидизация. Насыщение металлов и сплавов углеродом производится путем нагревания и выдержки при 900–950 °С в течение нескольких часов или при 1050–1100 °С в течение одного часа изделий в восстановительной атмосфере, содержащей углерод, окислы углерода, метан, или же в смеси, состоящей из древесного угля, углекислого натрия, углекислого бария, углекислого кальция и некоторых других добавок. При этом происходит диффузия углерода в обрабатываемый материал и образование диффузионного слоя, который обладает высокой твердостью (обычно HV 720–850).

Азотирование. Стальные изделия, содержащие алюминий, хром, молибден и некоторые другие металлы, нагревают в среде аммиака в течение 50–100 ч при 250–500 °С, что приводит к образованию на поверхности нитридов, обладающих высокой твердостью (HV 900–1200). Азотирование проводят для повышения коррозионной стойкости, износостойкости, сопротивления усталости и в некоторых других случаях. Образовавшееся диффузионное покрытие обладает твердостью, которая остается устойчивой при высоких температурах.

Цианирование. При карбидизации углеродистой стали в используемый газ добавляют несколько процентов аммиака и в такой среде выдерживают при 750–900 °С. В результате этого на поверхности стали происходит одновременно процесс карбидизации и азотирования и образуется твердое карбонитридное покрытие, обладающее высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Поверхностная закалка пламенем. Поверхность металлов нагревают кислородно-ацетиленовым пламенем таким образом, чтобы до закалочных температур прогрелся лишь поверхностный слой. В результате мартенситных превращений твердость этого слоя повысится.

Поверхностная закалка токами высокой частоты. Стальную деталь помещают в высокочастотный индуктор. Под действием токов высокой частоты происходит нагрев поверхностного слоя, при последующей закалке твердость поверхностного слоя повышается. Этот способ используют для повышения износостойкости обрабатываемых поверхностей.

Вакуумное напыление покрытий. Металлы или химические соединения испаряются при нагревании в вакууме 10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст. Атомы или молекулы их паров оседают на обрабатываемую поверхность, образуя тонкую пленку металла или химического соединения. Этот метод может быть использован для нанесения покрытий, изменяющих спектральные характеристики поверхности материалов.

Эмалирование. Покрытия наносят спеканием стекла или эмалей с металлической поверхностью. Этот метод используют для получения износостойких, коррозионностойких, теплостойких, декоративных и электроизоляционных покрытий.

Механические методы включают следующие способы.

Плакирование. Способ заключается в соединении двух или более разнородных металлических пластин прокаткой, сваркой, взрывом, литьем и т.д. или нанесения покрытия путем «втирания» порошка в основу специальными инструментами (щетками). Плакирующими металлами могут быть коррозионная сталь, никель, монель, медь, титан и др. Используют для защиты металлов от коррозии.

Пластическое деформирование. На поверхность воздействуют по определенной кинематической или динамической схемам специальным деформирующим инструментом (индексатором, роликом, выглаживателем и т.п.), что приводит к созданию наклепа и упрочнения поверхностного слоя.

Дробеструйный наклеп. Для повышения усталостной прочности металлическое изделие подвергают дробеструйной обработке стальной дробью, в результате чего на поверхности металла образуется упрочненный слой толщиной 0,3–0,5 мм. Применение дробеструйной обработки не вызывает структурных изменений в металле изделия.

В работах [12–16] виды (методы) поверхностного упрочнения материалов подразделяются по признакам, приведенным на рисунке 1.6.

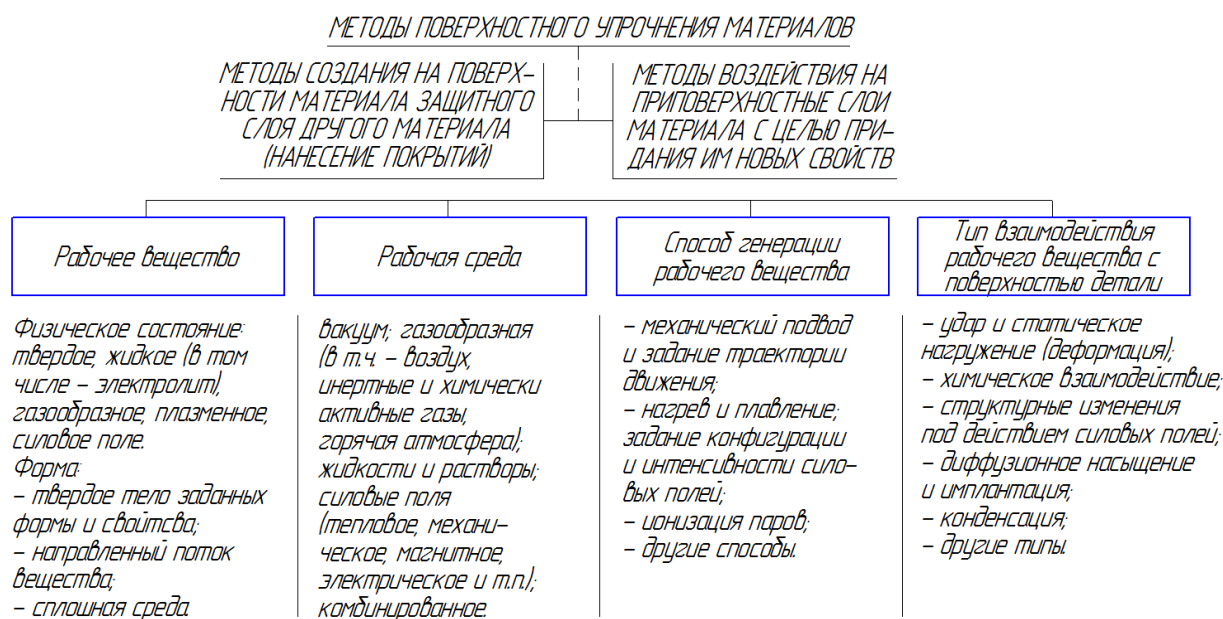


Рисунок 1.6. – Классификация методов поверхностного упрочнения

Рабочее вещество, рабочая среда, способ генерации рабочего вещества, тип взаимодействия рабочего вещества с поверхностью детали

Рабочее вещество определяет его физическое состояние: твердое, жидкое (в т.ч. – электролит), газообразное, плазменное, силовое поле; форма: твердое тело, направленный поток вещества, сплошная среда. Рабочая среда: в виде легкоплавких металлов, вакуума, газообразной (воздух, инертные и химически активные газы, горячая атмосфера), жидкости и растворы; силовые поля (тепловое, механическое, магнитное, электрическое и т.п.); комбинированное. Способ генерации рабочего вещества может быть реализован механическим подводом и заданием траектории движения; нагрева и плавления; заданием конфигурации и интенсивности силовых полей; ионизация паров и др. Тип взаимодействия рабочего вещества с поверхностью детали характеризуется ударом и статическим нагружением (деформация); химическим взаимодействием; структурным изменением под действием силовых полей; диффузионным насыщением и имплантацией; конденсацией и другими типами.

Например, процесс взаимодействия ионного потока с поверхностью может происходить в режимах конденсации, распыления и имплантации. На диаграмме (рисунок 1.7) приводятся энергетические параметры этих режимов [13; 15].

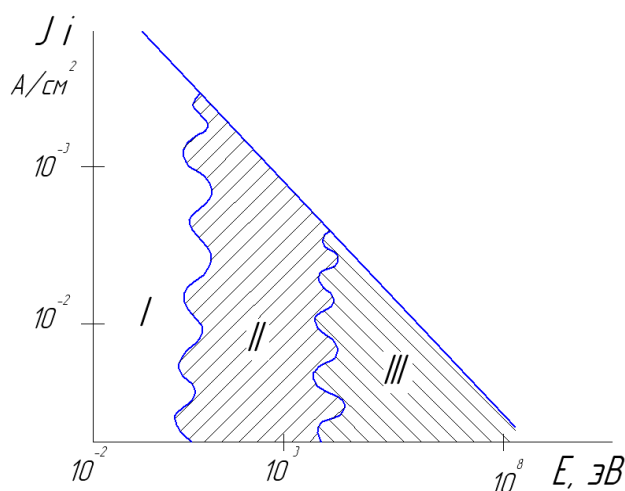


Рисунок 1.7. – Диаграмма, характеризующая режимы взаимодействия ионных потоков с поверхностью твердых тел

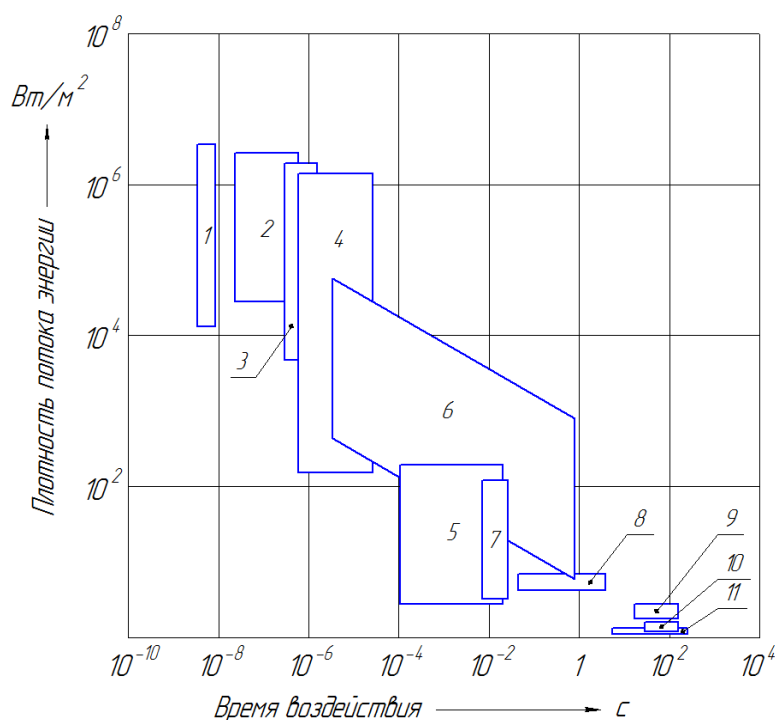
В области I (энергия ионов составляет несколько десятков электрон вольт) конденсация преобладает над распылением, поэтому имеют место рост толщины покрытия и его высокая адгезия.

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

В работе [17] приводятся виды упрочнения твердосплавных материалов исходя из энергетических характеристик (рисунок 1.8), которые подразделяются на методы упрочнения, связанные с нанесением защитных покрытий, и методы, связанные с воздействием потока энергии.



1 – электронно-лучевое; 2 – лазерное шокосвое; 3 – электроискровое; 4 – лазерная амортизация; 5 – лазерное термоупрочнение; 6 – термообработка; 7 – алмазное выглаживание; 8 – поверхностное-пластическое деформирование; 9 – аэродинамическое звуковое; 10 – ультразвуковое; 11 – в тлеющем разряде

Рисунок 1.8. – Энергетические характеристики различных методов упрочнения

В свою очередь, методы нанесения защитных покрытий включают процессы химико-термической обработки путем диффузионного насыщения, нанесения двухкомпонентных покрытий, нанесения покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов, газофазного осаждения,

катодного напыления с ионной бомбардировкой, термодиффузионного насыщения, фрикционного упрочнения, электроискрового легирования, нанесения алмазоподобных пленок и покрытий, нанесения пленок с помощью лазера, бомбардировки с помощью азота, термогидрохимической обработки. Процессы химического осаждения покрытий – Chemical Vapor Deposition (CVD), к которым относятся метод нанесения карбидотитановых покрытий, технология гамма-коутинг, метод вакуумного титанирования и образования твердосмазочных покрытий. Процессы, связанные с физическим осаждением покрытий, – Physical Vapor Deposition (PVD) путем ионного осаждения, реактивного электронно-плазменного осаждения, магнетронно-ионного распыления, ионного плакирования, нанесения комбинированных и многослойных покрытий.

В работе [18] с учетом специфики протекания процессов формирования покрытий существующие методы подразделяются на три основные группы. К первой группе относятся методы, при которых формирование покрытий осуществляется преимущественно за счет диффузионных реакций между насыщаемыми элементами и структурами инструментального материала. Во вторую группу входят методы формирования покрытий по комплексному механизму. Покрытие образуется за счет реакций между парогазовыми смесями, состоящими из соединения металлоносителя, носителя второго компонента, служащего как газом-транспортером, так и восстановителем. При этом одновременно в процесс формирования покрытия большой вклад вносят субструктура поверхности материала инструмента и интердиффузионные реакции между конденсатом и материалом инструмента. К третьей группе можно отнести методы формирования покрытий за счет химических и плазмохимических реакций потока частиц одновременно в объемах пространства, непосредственно примыкающего к насыщаемым поверхностям инструментального материала.

Классификация методов нанесения покрытий на режущие инструменты по характеру формирования покрытия приведена на рисунках 1.9, 1.10.

К методам первой группы относятся химико-термические методы образования покрытий (ХТМ), основанные на твердофазовом, жидкостном и газофазовом насыщении поверхностей инструмента. Диффундирующие элементы могут насытить поверхности инструментов непосредственно, без промежуточных реакций либо с предшествующей химической реакцией на границе между инструментальным материалом и покрытием, или же в объеме исходных реагентов. ХТМ включает такие методы, как насыщение поверхности инструментальных сталей азотом и углеродом в газофазовых и жидких средах, ионное азотирование и цементация в плазме тлеющего разряда, борирование, интрооксидирование и др. (рисунки 1.9, 1.10).

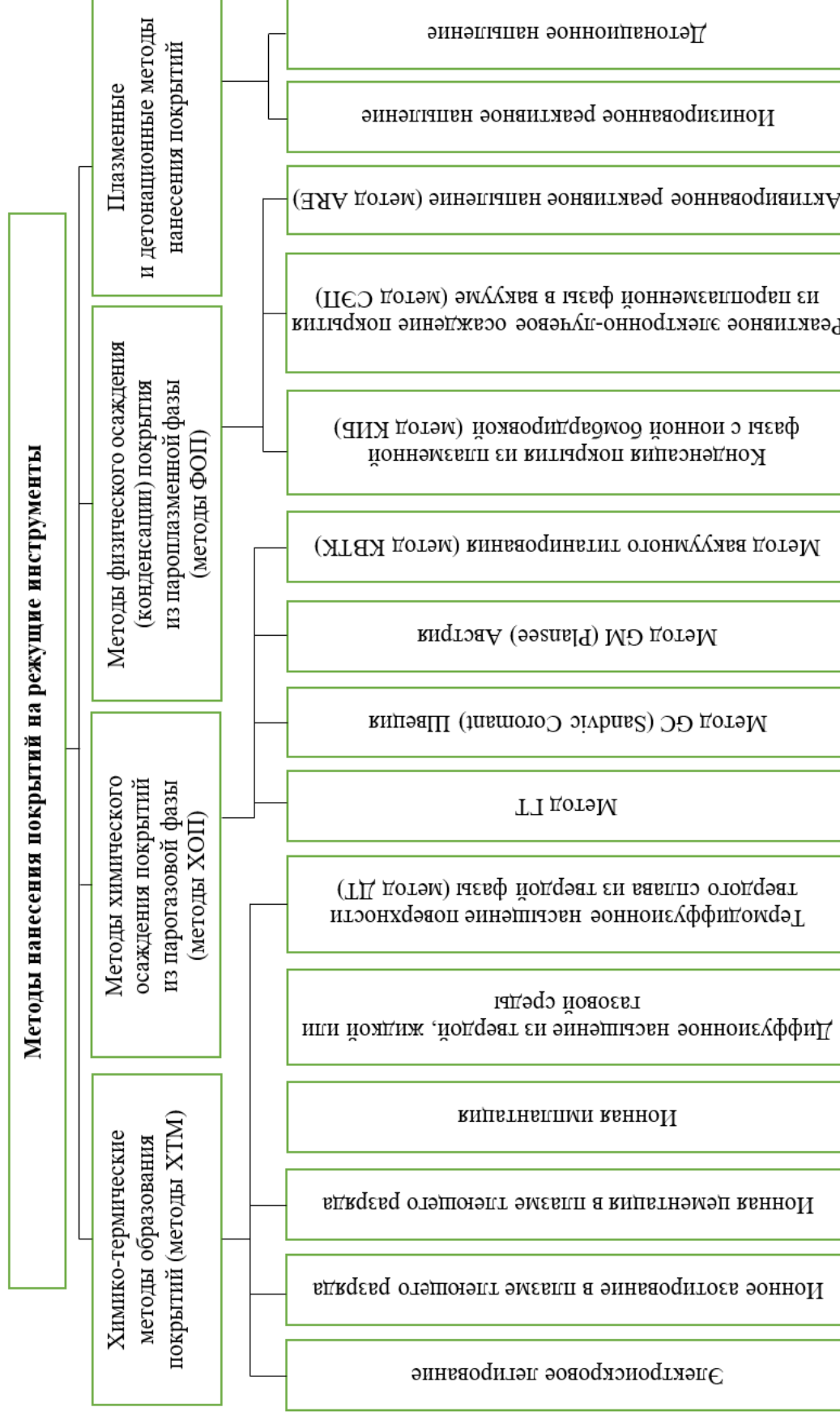


Рисунок 1.9. – Методы нанесения покрытий на режущий инструмент

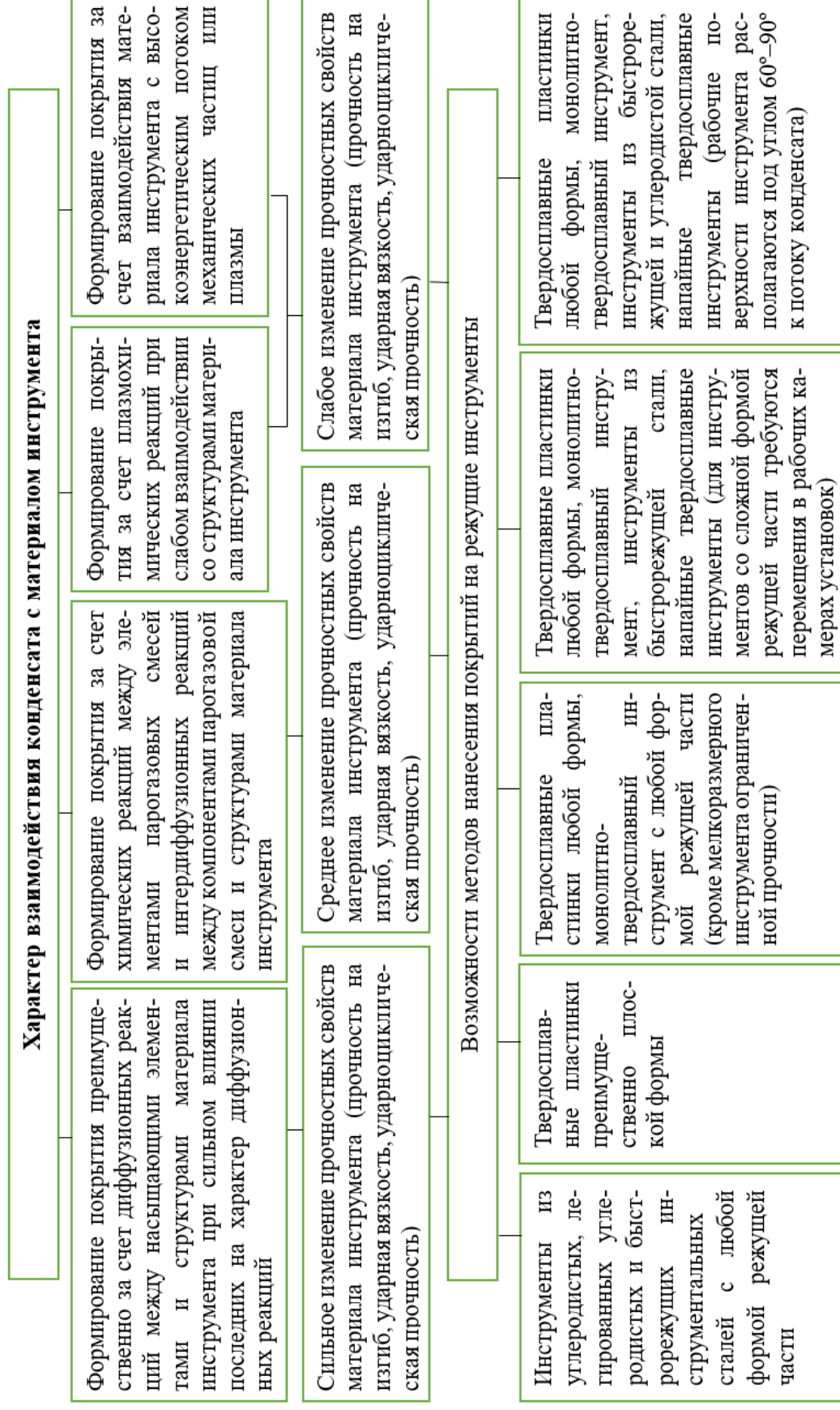


Рисунок 1.10. – Характер взаимодействия конденсата с материалом инструмента

Методы ХТМ позволяют получить покрытия толщиной 10–40 мкм, что дает возможность увеличить стойкость различных типов инструментов из быстрорежущих и углеродистых сталей в 1,5–2 раза.

Ко второй группе методов по классификации, показанной на рисунке 1.9, относятся методы химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (метод ХОП), получившие в мировой практике наименование CVD (Chemical vapor deposition).

Методы второй группы обычно реализуются при температурах около 1000–1100 °С, что исключает их использование для нанесения покрытий на инструменты из быстрорежущей стали, подвергнутые полной термической обработке. Используя методы второй группы, можно получить покрытие на основе карбидов, нитридов и карбонитридов металлов IV–VI групп Периодической системы элементов, использование которых позволяет повысить стойкость твердосплавных пластин в 3–10 раз в широкой области применения.

К третьей группе методов (см. рисунок 1.9) могут быть отнесены методы физического осаждения покрытия (методы ФОП), получившие название в мировой практике PVD (Physical vapor deposition). При этом процессы ФОП обычно включают вакуумное испарение тугоплавкого металла – образователя соединения покрытия, его частичную или полную ионизацию (при частичной ионизации образуется пароплазменная фаза), подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию покрытия на рабочих поверхностях режущего инструмента.

Среди методов ФОП наибольшее распространение получил метод конденсации покрытий из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхностей инструмента (метод КИБ), а также метод реактивного электронно-лучевого плазменного осаждения покрытий из пароплазменной фазы в вакууме (метод РЭП).

В работе [19] рассматриваются традиционные способы обработки материалов – термические, термомеханические и химико-термические. В частности, к ХТО отнесены основные виды, представленные на рисунке 1.11 и связанные с насыщением путем нагрева, диссоциации, адсорбации и диффузии поверхностного слоя изделий различными веществами (элементами), в частности металлами.

Основными разновидностями ХТО инструментальной оснастки являются: цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом); азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом); цианирование или нитроцементация (насыщение поверхностного слоя углеродом и азотом).



Рисунок 1.11. – Основные виды химико-термической обработки

Сианирование – вид ХТО, основанный на системе активации насыщения (СИАН) в индукционных соляных печах-ваннах с углеграфитовой футеровкой.

Диссоциация – процесс распада сложных химических соединений на более простые компоненты или ионы при ХТО.

Термомеханическая обработка (ТМО) заключается в сочетании механической обработки давлением (прокатки, штамповки) с термической обработкой (закалкой). Выделяют три основных способа ТМО: высокотемпературная (ВТМО), когда сталь деформируется при температуре, соответствующей аустенитной структуре; низкотемпературная (НТМО), когда сталь деформируется в температурной зоне существования переохлажденного аустенита (400–600 °С); предварительная ТМО, осуществляемая при температуре НТМО и ВТМО или при температуре 20 °С, далее – закалка и отжиг.

Для повышения износостойкости инструментальной оснастки применяется большое количество способов обработки в магнитном поле, в частности в горячем состоянии в вакуумной камере дуговым разрядом или, наоборот, с охлаждением изделия до криогенных температур, воздействием на поверхность управляемым лазерным и электромагнитным излучением.

Рассмотрены методы химического CVD и физического PVD осаждения покрытий, описанные выше. В методах CVD выделено как химическое, так и плазменно-химическое осаждение (PCVD), при котором активация химических реакций обусловлена не температурой, а плазмой. При PVD различают методы нанесения электронным пучком, электрической дугой, магнитронным распылением, конденсацией веществ в вакууме с ионной бомбардировкой (способ КИБ).

Для модификации поверхностных слоев (без нанесения покрытий) используются методы, основанные на воздействии потоков частиц, ускоренных под действием электрических разрядов, а также пучков ионов, ускоренных в специальных ускорительных трубках. К первой группе из перечисленных методов относится обработка в плазме тлеющего разряда и обработка в плазме дугового разряда, ко второй группе – методы низко- и сильноточной ионной имплантации.

При низкоэнергетической ионной имплантации используются большие значения плотности тока и энергии ионов около нескольких килоэлектронвольт, что приводит к разогреву поверхности до 400–600 °С. При сильноточной ионной имплантации (значение тока порядка 150 А) поверхностное структурообразование материала происходит за счет термических, термомеханических и диффузионных явлений.

Азотирование в тлеющем разряде осуществляется в среде диссоциированного аммиака за счет распыляющего действия ионов газа, которое

приводит к частичной очистке поверхностей от оксидов и нитридов, насыщение азотом в тлеющем разряде осуществляется интенсивнее по сравнению с обычным газовым азотированием. Азотирование в тлеющем разряде проводится при значениях давления от 100 до 500 Па, плотности тока до нескольких сотен миллиампер на квадратный сантиметр и высоком напряжении (от 600 до 900 В).

Легирование поверхности в плазме дугового разряда заключается в термической обработке струей плазмы, получаемой с помощью дугового разряда в вакууме. Отмечается также перспективность применения лазерного упрочнения поверхностей при температуре до 1600 °С и давлении до 100 Па.

Таким образом, технологии и виды обработки материалов и изделий разнообразны, классифицируются разными авторами и стандартами по различным признакам и достаточно подробно рассмотрены в специальной литературе. В данном пособии особое внимание уделяется азотированию в вакууме, сохраняющему объем изделия, но изменяющему структуру и свойства поверхностного слоя, нанесению «тонких» покрытий ионно-плазменным методом в вакууме, гиперзвуковому газодинамическому нанесению «толстых» покрытий, увеличивающих объем изделия, и комбинированному покрытию, сочетающему использование двух последних методов.

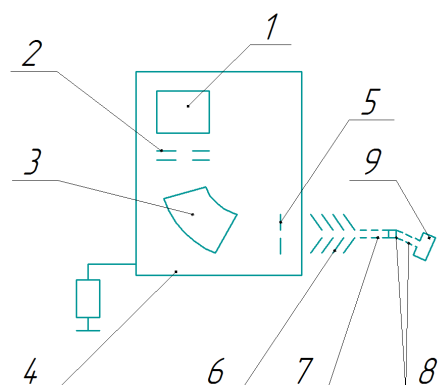
1.2 Упрочняющая обработка без изменения объема заготовки

Одним из перспективных методов (видов) упрочняющей обработки без изменения объема заготовки является азотирование. По сравнению, например, с цементацией азотирование позволяет получить более высокие показатели твердости поверхности, его можно применять к готовым изделиям, которые прошли термическую закалку с высоким отпускком и прошлифованы до окончательных форм и размеров. После азотирования детали можно полировать.

Как было рассмотрено в разделе 1.1, методы азотирования зачастую различают по агрегатному состоянию азота в исходном состоянии и применяемым химическим и физическим процессам:

- жидкий. Карбонитрирование (цианирование) в расплаве соли;
- газообразный. Газовое азотирование и карбонитрирование;
- ионизированный газ. Азотирование и карбонитрирование в тлеющем разряде;
- ионизированный газ. Азотирование в плазме электродугового разряда.

Для реализации процесса азотирования используют установки, в которых основным конструктивным элементом является источник электронов или ионов *1* (рисунок 1.12).



1 – ионный источник; 2 – система вытягивания и формирования пучка; 3 – масс-сепаратор; 4 – высоковольтный модуль; 5 – регулируемая диафрагма; 6 – система ускорения; 7 – фокусирующая линза; 8 – система сканирования пучка; 9 – камера обработки образцов

Рисунок 1.12. – Схема установки для ионно-лучевой обработки

Применяются различные типы ионных источников [15; 20; 21]: Кауфмана, Фримана, Пеннинга, Холла, магнитроны высокочастотные и СВЧ источники, дуоплазмотроны, дуговые с прямоканальным или полым катодом, вакуумно-дуговые источники, работающие в плазменном режиме. Общими положительными особенностями этих источников является наличие катода и анода, между которыми создается электрический потенциал. Вытягиваемые электромагнитным полем 2 электроны и ионы (сгусток электронов) формируются в пучок или луч (ионно-лучевая обработка) или в плазму (ионно-плазменная обработка) электродугового или тлеющего разрядов. Масс-сепаратор 3 позволяет очистить пучок от атомов примеси и выделить ионы необходимого заряда и энергии.

Вид той или иной обработки определяется значениями тока и напряжения, создаваемых высоковольтным модулем 4. При обработке в тлеющем разряде: давление газа 1,3–13,3 Па, напряжение 1–3 кВ, плотность тока 0,005–0,05 мА/см²; при ионно-лучевой обработке: низкоэнергетической 1–10 кЭв, среднеэнергетической 10²–10³ кЭв, высокоэнергетической 1 МэВ, плотность тока 1–5 мА/см², при сильноточной обработке – 1–10³ мА/см²; при ионно-плазменной обработке: давление газа 100–1300 Па, напряжение 400–1500 В, температура 720–870 К, плотность тока 1–2,5 мА/см².

Регулируемая диафрагма 5, система ускорения 6 и фокусирующая линза 7 представляют собой систему электронных линз, позволяющая

избегать потери части ионов. Система сканирования пучка 8 обеспечивает равномерность облучения изделия за счет его механического перемещения.

В процессе азотирования при столкновении электронов с молекулами азота происходит их диссоциация. Кроме того, диссоциация азота происходит также в результате создания ионов и нейтральных частиц с поверхностью катода и столкновения с частицами газа. Процесс ионно-плазменного азотирования представляет две стадии: катодного распыления и насыщения азотом. В качестве рабочих газов используется азот, смесь азота с водородом или аммиаком. Основными фазами, формирующимися в нитридной зоне материалов на основе железа является γ' -Fe₄N₄E- Fe₂₋₃N. В подповерхностных слоях образуется зона внутреннего азотирования (высокочастотный твердый раствор). Концентрация водорода в газовой смеси может варьироваться в широком диапазоне без существенного изменения параметров азотированного слоя. Присутствие кислорода в рабочей зоне резко понижает глубину азотированного слоя. Для получения на поверхности высокоазотного твердого раствора без нитридного слоя производится разбавление азотосодержащей рабочей среды аргоном. При этом в процессе насыщения массивные ионы аргона распыляют нитридный слой и глубина зоны внутреннего азотирования возрастает.

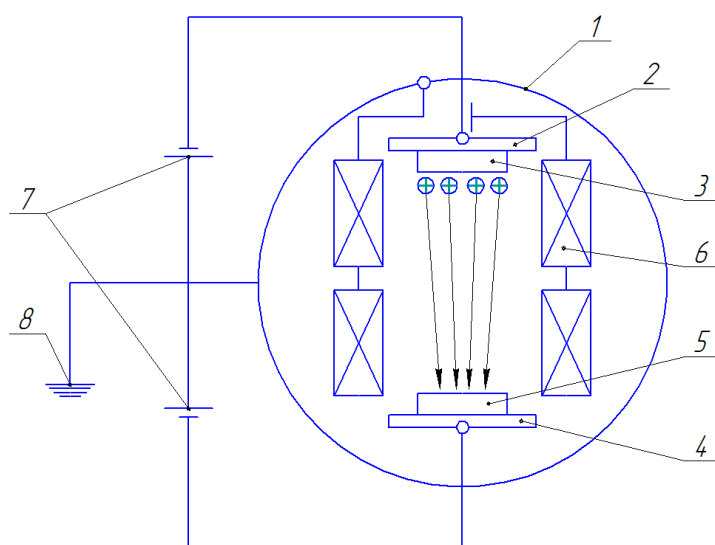
1.3 Упрочняющая обработка путем нанесения покрытий в вакууме

Процесс нанесения тонкопленочных покрытий от нескольких ангстрем до нескольких десятков миллиметров реализуется на вакуумных установках путем или магнетронного распыления, или электродугового и магнитного осаждения, или ионной имплантации (см. раздел 1.1). В качестве источника ионов используются один или несколько катодов из различных материалов (титана, циркония, алюминия, вольфрама, молибдена, железа, никеля, меди, хрома) и их сплавов.

В технологическую среду может быть добавлен химически активный газ, например, азот, ацетилен, кислород, что обеспечивает создание соединений, например, TiN, TiO₂, Al₂O₃, 2nN, и др. Химическая реакция на поверхности подложки активируется нагревом либо ионизацией и диссоциацией газа той или иной формой газового разряда. Процесс вакуумного электродугового нанесения покрытия охватывает области I и II, представленной на рисунке 1.7 диаграммы.

Принципиальная схема установки вакуумного электродугового нанесения покрытий представлена на рисунке 1.13 [21].

В вакуумной камере I при остаточном давлении $P < 10^{-2}$ – 10^{-3} Па между анодом, которым служат металлические стенки вакуумной камеры 1, и катодом 2 зажигается вакуумная дуга, являющаяся источником ионов материала мишени 3. Для того чтобы создать направленный поток ионов к подложке 4 и изделию 5 прикладывается отрицательный потенциал и создается магнитное поле с помощью системы 6. Варьируя величину потенциала и магнитного поля, можно значительно изменять энергию движущихся ионов.



1 – камера (анод (+)); 2 – катод (–); 3 – мишень; 4 – подложка; 5 – изделие;
6 – магнитная система; 7 – источник питания; 8 – заземление

Рисунок 1.13. – Схема установки вакуумного электродугового нанесения покрытий

В большинстве случаев возникновение и стационарное горение дуги происходят в парах материала мишени. 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 мишени 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 мишени не превышает обычно 5–30%. После возникновения вакуумной дуги пространство вакуумной камеры заполняется плазмой. Большая часть ионов плазмы бомбардирует мишень, что приводит к испарению с ее поверхности нейтральных и возбужденных атомов, которые в свою очередь ионизируются в вакуумной

дуге и снова возвращаются на мишень 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 мишени. При этом подразумевается, что подложка является электропроводящей. Однако зачистую 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 накладывается переменная составляющая. Выбор потенциала зависит в основном от материала подложки и наносимого покрытия.

Таким образом, при вакуумном нанесении покрытия создается пар (плазма) из частиц материала мишени и ионов технологической среды, производится при помощи магнитной системы и разности потенциалов между катодом и подложкой транспортировка пара к изделию, конденсация (имплантация) пара на подложке и формирование покрытия на изделии.

1.4 Упрочняющая обработка путем нанесения покрытий электродуговым и газопламенным методами

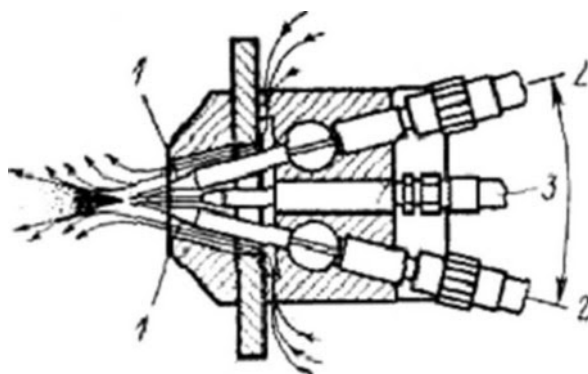
При нанесении «толстых» покрытий толщиной от нескольких микрон до нескольких миллиметров используются электродуговые, газопламенные и плазменные методы, классифицируемые как металлизация и газотермическое напыление [22].

Принципиальная схема электродуговой металлизации (ЭДМ) показана на рисунке 1.14.

Через два канала в горелке непрерывно подаются две проволоки (диаметром 1,5–3,2 мм), между концами которых возбуждается дуга, за счет теплоты которой и происходит расплавление проволок.

Расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающего из центрального сопла электрометаллизатора, распыляется и в виде жидких капель переносится на поверхность напыляемой детали.

Производительность процесса электродуговой металлизации чрезвычайно высока, например, можно напылять стальное покрытие с производительностью до 36 кг/ч, цинковое покрытие – до 1,2 кг/мин. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытие из их сплава. Такого рода сплавы называют псевдосплавами.



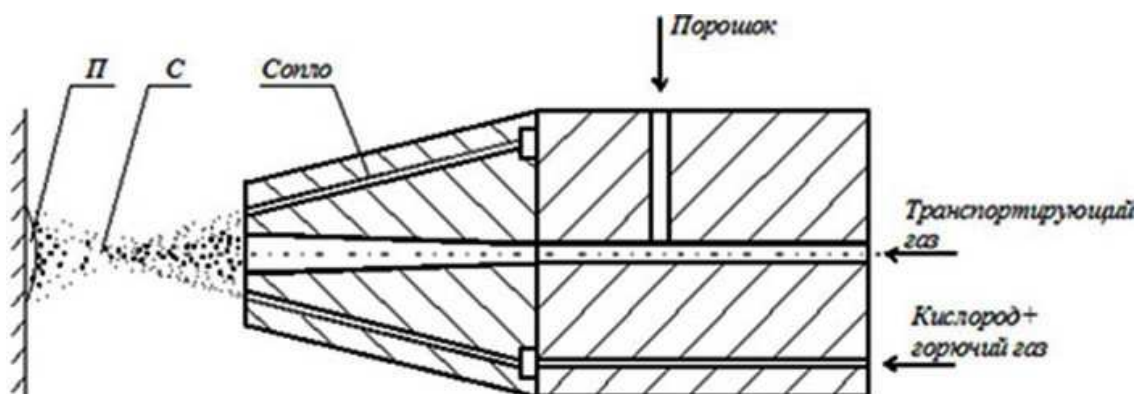
1 – сопло; 2 – штуцер для ввода напыляемого материала (проволоки);
3 – штуцер для подачи сжатого воздуха

Рисунок 1.14. – Схема установки для электродугового напыления

Эксплуатационные расходы при электрометаллизации небольшие. Процесс дугового напыления хорошо поддается автоматизации.

Краткие характеристики покрытия: пористость покрытия 5–20%; прочность сцепления покрытия с основой (адгезия) 3,0–5,0 кг/мм²; толщина напыленного слоя 0,5–15 мм.

Газопламенное напыление в зависимости от состояния напыляемого материала может быть трех типов: напыление проволокой, прутком или порошком (рисунок 1.15).



П – покрытие; С – струя напыляемого материала
продуктов сгорания газов

Рисунок 1.15. – Схема установки для газопламенного напыления

Напыляемый материал, имеющий форму прутка или проволоки, подается через центральное отверстие (сопло) горелки и расплавляется пламенем горючей смеси. Расплавленные частицы металла подхватываются струей сжатого воздуха и в мелкораспыленном виде направляются на поверхность изделия. Проволока подается с заданной скоростью роликами,

приводимыми в движение встроенной в горелку воздушной турбиной, работающей на сжатом воздухе, используемом при напылении, или электродвигателем через редуктор.

Для напыления обычно используют проволоку диаметром не более 3 мм, однако при напылении легкоплавкими металлами (алюминием, цинком и т.п.) в интересах повышения производительности процесса допускается использование проволоки диаметром 5–7 мм. В качестве горючего газа в большинстве случаев используют ацетилен, можно также применять пропан и водород, а в качестве окислителя – кислород.

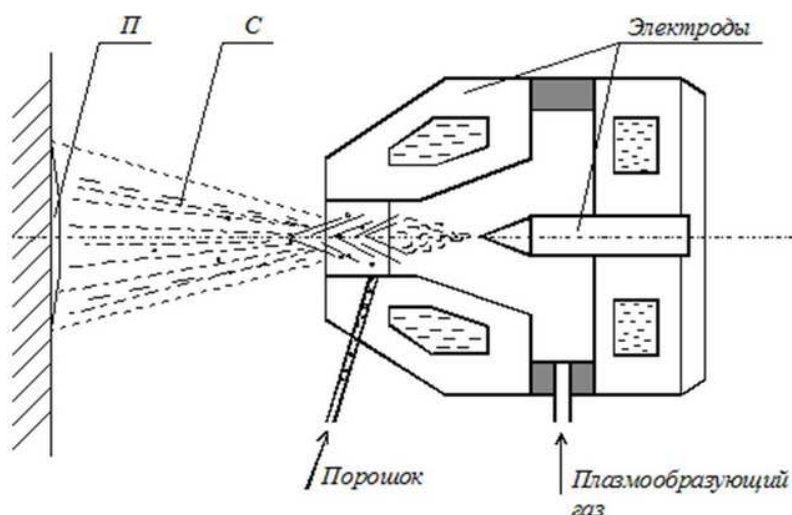
При газопламенном способе напыление осуществляется в основном теми материалами, температура плавления которых ниже температуры пламени. После напыления иногда проводят оплавление покрытия, которому, в частности, подвергают покрытия, напыленные самофлюсующимися сплавами на никелевой и кобальтовой основе с добавлением в них в качестве флюсующих добавок бора и кремния.

Оплавление обеспечивает получение плотного покрытия, практически без пористости. Технология газопламенного напыления довольно проста, а стоимость оборудования и затраты на эксплуатацию низкие, в связи с этим данный способ находит широкое применение в практике. Процесс газопламенного напыления хорошо поддается автоматизации. Краткие характеристики покрытия: пористость покрытия 5–12%; прочность сцепления покрытия с основой (адгезия) 2,5–5,0 кг/мм²; толщина напыленного слоя 0,5–10 мм.

При **плазменном напылении** между катодом и медным водоохлаждаемым соплом, служащим анодом, возникает дуга, нагревающая поступающий в сопло горелки рабочий газ, который истекает из сопла в виде плазменной струи. В качестве рабочего газа используют аргон или азот, к которым иногда добавляют водород. Схема плазменного напыления показана на рисунке 1.16.

Порошковый наплавочный материал подается в сопло струей транспортирующего инертного газа, нагревается плазмой и с ускорением переносится на поверхность основного материала для образования покрытия. Средняя температура плазмы на выходе из сопла плазмотрона находится в пределах от нескольких тысяч градусов до десятков тысяч градусов Кельвина.

КПД плазменной горелки составляет 50–70%. Высокая температура плазмы позволяет проводить напыление тугоплавких материалов. Возможность регулирования температуры и скорости плазменной струи путем выбора формы и диаметра сопла и режима напыления расширяет диапазон напыляемых материалов (металлы, керамика и органические материалы).



П – покрытие; С – струя напыляемого материала и продуктов сгорания газов.

Рисунок 1.16. – Схема установки для плазменного напыления

Покрyтия, полученные методом плазменного напыления, обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой. Процесс плазменного напыления хорошо поддается автоматизации. Краткие характеристики покрyтия: пористость покрyтия – 4–8%; прочность сцепления покрyтия с основой (адгезия) – 5,0–8,0 кг/мм²; толщина напыленного слоя: при напылении металлов и сплавов – 0,05–5,0 мм; при напылении керамики – 0,05–0,5 мм.

В таблице 1.2 приведены сравнительные характеристики методов газотермического напыления.

Таблица 1.2. – Характеристика методов газотермического напыления

Электродуговая металлизация	Газопламенное напыление	Плазменное напыление
<i>Потребляемая мощность, кВт</i>		
16 –20	0,3	40—50
<i>Потребляемые газы</i>		
сжатый воздух	ацетилен (пропан), кислород	аргон, азот
<i>Расход потребляемых газов, л/мин</i>		
воздуха, 2000—2500	ацетилена, л/мин 10—30	аргона 30—70
	кислорода 13—40	азота 5—10
<i>Производительность, кг/час</i>		
12 – 45	3—10	2—5

Основные особенности технологий представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. – Особенности технологий газотермического напыления

Электродугуговая металлизация	Газопламенное напыление	Плазменное напыление
– Применяются стандартные проволоки практически любого химического состава; – высокая производительность напыления; – в металле покрытия образуются нитриды, увеличивающие его твердость; – простота в обслуживании; – экономичность при эксплуатации	– высокая мобильность (возможность использования в «полевых» условиях); – применяется для напыления проволок, шнуров и порошков; – применяется для напыления пластмасс; – несложное оборудование	– нанесение покрытия из тугоплавких оксидов, карбидов, нитридов, боридов, композиционных материалов; – распыление проволочных и порошковых материалов; – не происходит окисления поверхности детали и распыляемого материала

В настоящее время широко применяется **высокоскоростное** (сверхзвуковое или гиперзвуковое) **газопламенное напыление** – одна из технологий газотермического напыления защитных покрытий, при которой порошковый материал наносится на подложку на высокой (обычно более 5 скоростей звука) скорости.

Методы высокоскоростного газопламенного напыления как проволокой, так и порошком принципиально аналогичны соответствующим методам простого газопламенного напыления. Разница состоит в конструкциях устройств и в скоростях струи пламени, реализуемых этими конструкциями. На рисунке 1.17 изображена принципиальная схема горелки высокоскоростного газопламенного напыления порошком.

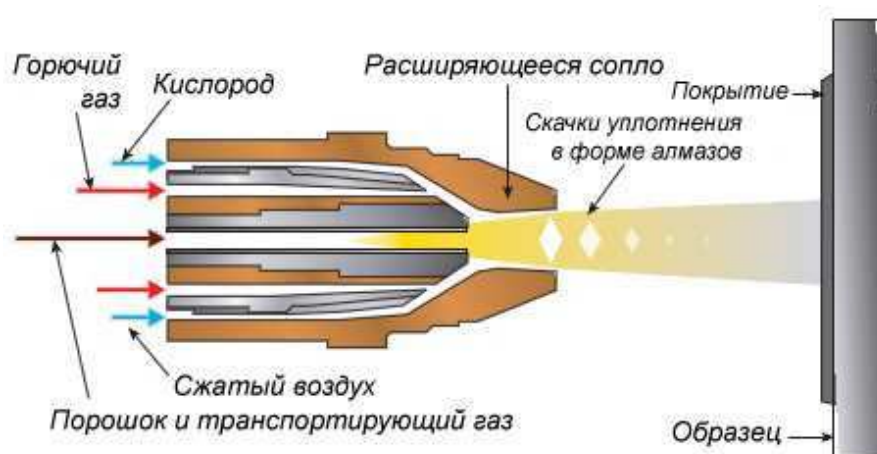


Рисунок 1.17. – Принципиальная схема горелки для высокоскоростного газопламенного напыления

Основная конструкционная особенность всех устройств сверхзвукового газопламенного напыления состоит в наличии реактивного сопла (сопла Лавалья), позволяющего разогнать пламя с частицами до сверхзвуковых скоростей. Низкая скорость частиц составляет основную проблему устройств простого газопламенного напыления, поэтому значительное увеличение этой скорости устройствами высокоскоростного газопламенного напыления дает безусловное преимущество последним.

В настоящее время установки высокоскоростного газопламенного напыления порошком вышли на первое место по популярности среди всех методов термического напыления. Высокоскоростное напыление проволокой распространено реже, т.к. не дает больших преимуществ по сравнению с обычным газопламенным напылением проволокой, имея все недостатки этого метода.

Системы высокоскоростного газопламенного напыления делятся по типу оборудования на системы керосин-кислород (HVOF, High Velocity Oxyge Fuel) и системы пропан-воздух (HVOF, High Velocity Air Fuel). С помощью высокоскоростного напыления наносятся покрытия из карбидов вольфрама, хрома, никель-, кобальт- и железо-базированных порошков, MeCrAlY. Важным преимуществом технологии является формирование в получаемых покрытиях напряжений растяжения, что позволяет получать более толстые покрытия, чем при других технологиях напыления.

Применяется холодное газодинамическое напыление (ХГН) (англ. Cold Spray) металлических покрытий – это процесс формирования металлических покрытий при соударении холодных (с температурой, существенно меньшей температуры плавления) металлических частиц, ускоренных сверхзвуковым газовым потоком до скорости несколько сот метров в секунду, с поверхностью обрабатываемой детали. При ударах нерасплавленных металлических частиц о подложку происходит их пластическая деформация, и кинетическая энергия частиц преобразуется в тепло, обеспечивая формирование сплошного слоя из плотно упакованных металлических частиц.

Основной особенностью ХГН является отсутствие высоких температур в процессе формирования металлических покрытий, следовательно, отсутствие окисления материалов частиц и основы, процессов неравновесной кристаллизации, высоких внутренних напряжений в обрабатываемых деталях.

К настоящему времени существуют две основных разновидности ХГН:
– «холодное газодинамическое напыление высокого давления» (англ. High Pressure Cold Spray). В качестве рабочего газа использу-

ются азот или гелий при давлениях выше 1,5 МПа (15 атм), расходе более 2 м³/мин, и мощностью подогрева более 18 кВт. Для напыления обычно используются чистые металлические порошки размером 5–50 мкм;

– «холодное газодинамическое напыление низкого давления» (англ. – Low Pressure Cold Spray). В качестве рабочего газа используется сжатый воздух давлением 0,5–1,0 МПа (5–10 атм), расходом 0,5 м³/мин и мощностью подогрева 3–5 кВт. Для напыления покрытий используются механические смеси металлических и керамических порошков. Включение керамического компонента в напыляемую смесь обеспечивает получение качественных покрытий при сравнительно небольших энергозатратах.

Технология находит применение в различных отраслях промышленности для решения целого ряда задач по нанесению металлических покрытий в производстве машиностроительной продукции, ремонте деталей машин и декоративно-прикладном искусстве.

Контрольные вопросы

1. Что такое системная модель обработки материала и изделия?
2. Что называется машиной? Классификация машин.
3. Что такое НБИК-технологии?
4. Классификация технологий по топологическим характеристикам.
5. Что означают субтрактивные и аддитивные технологии?
6. Назовите основные виды обработки резанием.
7. Что относится к электрофизическим и электрохимическим видам обработки?
Назовите их основные виды.
8. Назовите основные виды (методы) нанесения покрытий.
9. Дайте определение гальваническим и химическим методам упрочнения деталей.
10. Дайте определение физическим и механическим методам упрочнения деталей.
11. По каким признакам классифицируются методы поверхностного упрочнения материалов?
12. Назовите основные виды взаимодействия ионного потока с поверхностью изделия и энергетические параметры режима этих взаимодействий
13. Приведите классификацию методов упрочнения твердых сплавов по энергетическим характеристикам.
14. Перечислите основные методы нанесения покрытий на режущий инструмент.
15. Назовите основные виды химико-термической обработки.
16. Перечислите признаки, по которым подразделяются методы азотирования в вакууме.
17. Назовите основные конструктивные элементы установок для азотирования в вакууме.
18. Какие конструктивные элементы входят в состав установок вакуумного электродугового нанесения покрытий.
19. Укажите режимы нанесения покрытий в тлеющем разряде.
20. Укажите режимы нанесения покрытий при ионно-плазменной обработке.
21. Укажите режимы нанесения покрытий при ионно-лучевой обработке.
22. Укажите режимы нанесения покрытий при низко-, средне- и высокоэнергетической обработке.
23. Укажите режимы нанесения покрытий при сильноточной обработке.
24. Опишите работу установки при электродуговом напылении.
25. Опишите работу установки при газопламенном напылении.
26. Опишите работу установки при плазменном напылении.
27. Приведите сравнительные характеристики методов газотермического напыления.
28. Что такое высокоскоростное (гиперзвуковое) газопламенное напыление?
Назовите основные его характеристики.
29. Что такое холодное газодинамическое напыление низкого давления?
30. Что такое холодное газодинамическое напыление высокого давления?

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Обоснование состава и механизма формирования покрытия

С учетом ранее полученных авторами результатов исследований [23] предложены в качестве основы для упрочнения и нанесения покрытий наиболее распространенные представители марок конструкционных – сталь 40Х, и нержавеющей – сталь 12Х18Н10Т, сталей, а также такие инструментальные стали и сплавы, как быстрорежущая сталь Р6М5, твердый сплав ВК8 и углеродистая инструментальная сталь 95Х18.

Использование того или иного метода упрочнения и нанесения покрытия определяется как свойствами материала (основы), так и функционального назначения изделия.

Для инструментальных материалов предлагается вакуумное ионно-лучевое азотирование, изменяющее фазовый состав поверхностного слоя и повышающее прочность и коррозионную стойкость изделия. Азотирование также применяется для покрытий состава Cu-Ni. При этом не изменяются размеры изделия. Процесс легирования материалов азотом достаточно хорошо изучен при химико-термической обработке. Процесс фазообразования при использовании атомов и молекул азота высокой энергии на сегодня носит в основном феноменологический характер.

При необходимости восстановления размеров изношенной детали эффективно применение методов электродугового и газопламенного нанесения «толстых» покрытий. При этом используют инструментальный материал 95Х18 с подложкой из материала ХН20.

Предложено нанесение на «толстое» покрытие из инструментальной стали «тонкого» покрытия типа «нитрид–титан» ионно-плазменным методом, которое будет способствовать повышению твердости и износостойкости изделия, работающего в условиях больших нагрузок и температур.

Для снижения трения между тяжело нагруженными деталями в узлах машин предлагается вводить в состав «толстого» покрытия сталь и бронзу, для повышения твердости «толстого» покрытия производить нанесение ионно-плазменным методом «тонкого» покрытия из «нитрида титана».

Таким образом, для сравнительных исследований предлагаются образцы с покрытием следующих групп составов: 1) 12Х18Н10Т + TiN; 2) 12Х18Н10Т + бронза–сталь + TiN; 3) 40Х + бронза–сталь + TiN; 4) 40Х + бронза–сталь.

Механизм формирования данных составов покрытий иллюстрируется рисунком 2.1.

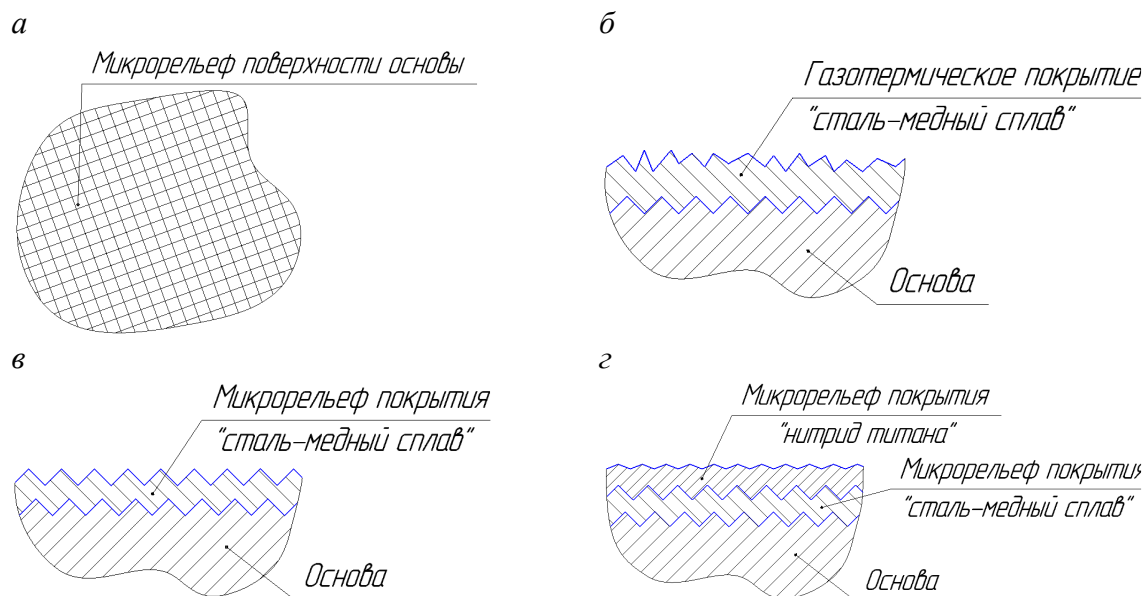


Рисунок 2.1. – Схема формирования составов покрытий

Вначале производится формирование микрорельефа поверхности детали лезвийной обработкой на высокой скорости резания, исключаяющей по сравнению со шлифованием шаржирование поверхности абразивными частицами (см. рисунок 2.1, *а*); нанесение газотермическим методом «толстого» (1–2 мм) покрытия из хромистой стали и медного сплава, создающего на вершинах микронеровностей поверхности прочную (жесткую) решетку, а во впадинах – «мягкую» основу из медного сплава (см. рисунок 2.1, *б*); шлифование покрытия (см. рисунок 2.1, *в*); нанесение в вакууме ионно-плазменным методом «тонкого» (до 3–5 мкм) покрытия из нитрида титана, которое упрочняет поверхность по вершинам микронеровностей (см. рисунок 2.1, *г*). Таким образом, создается комбинированное покрытие, обладающее одновременно высокой твердостью и износостойкостью за счет хромистой стали и нитрида титана и хорошими смазывающими свойствами за счет медного сплава, что в конечном итоге должно обеспечить повышение работоспособности тяжело нагруженных узлов трения в машинах.

При выборе способа производительного формирования поверхности основы под покрытие и нанесения «толстого» покрытия учитываются рекомендации, изложенные, в частности, в работах [24–27]. Графическое представление данных анализа исследований зависимости прочности сцепления покрытия с поверхностью основы показано на рисунке 2.2 [27].



Рисунок 2.2. – Графическое представление данных анализа исследований зависимости прочности сцепления поверхности от различных способов обработки при формировании тонкопленочных покрытий

Источник: [15; 23; 28].

Как видно из диаграммы, максимальная прочность сцепления поверхности возникает при нанесении так называемой авторами «треугольной нарезки» с последующей обработкой дробью, и наименьшая – при применении технологий пескоструйной и электродуговой обработки.

Предлагаемый состав комбинированного покрытия и механизм его формирования предполагает создание так называемого «псевдосплава», включающего тугоплавкий пористый каркас в виде стали и нитрида титана, заполненный более легкоплавким металлом – бронзой. В результате получается беспористая структура комбинированного материала, обеспечивающая повышение твердости и смазывающего эффекта, что важно для тяжело нагруженных деталей узлов трения и режущих инструментов.

2.2 Методика экспериментальных исследований

Методика исследований включает несколько этапов, отличающихся целями работы, видами упрочнения и составами покрытий [26].

На первом этапе исследуется вакуумное азотирование инструментальных сталей и сплавов с целью повышения износ- и коррозионной стойкости режущих инструментов.

На втором этапе исследуются покрытия из инструментальной стали, нанесенные гиперзвуковой металлизацией с последующей ионно-плазменной обработкой.

На третьем этапе исследуются покрытия на основе хромистых сталей и медных сплавов, полученных газотермическим методом и ионно-плазменной их обработкой с целью формирования «псевдосплава».

Второй и третий этапы исследований включают формирование регулярного микрорельефа поверхности перед нанесением покрытий.

При вакуумном азотировании исследуются образцы высоколегированной инструментальной стали ННС-0024 (инструментальная сталь типа Р6М5), твердого сплава ВК8 и стали с покрытием Cu-Ni. Ионно-лучевая обработка образцов осуществляется с помощью ионного источника на установке РVM-0,5FN. Источник с замкнутым дрейфом электронов генерирует пучок ионов азота ленточного типа длиной 120 мм и шириной 25 мм. В процессе обработки используется система механического сканирования модифицируемых поверхностей, обеспечивающая их равномерное облучение. Имплантация проводится в течение 3 ч при энергии ионов азота 3 кэВ и плотности ионного тока 1,5–2,0 мА/см², что обеспечивает суммарную дозу ионов порядка $\approx 3 \times 10^{19}$ ион/см². Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки составляет 720–820 К. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары типа ПП.

Для нанесения «толстых» покрытий используется установка гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10, напыляемые материалы – проволоки из сталей 95Х18Ш, 40Х13, 20Х13, АД 1. Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносится промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80 (см. раздел 2.6). В качестве материала образцов используется низкоуглеродистая сталь Ст 3. Перед нанесением покрытий производится струйно-абразивная обработка при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа и расходе стальной колотой дроби марки ДСК 0,3–2,0 около 1,2 кг/с. Для определения скорости полета частиц напыляемого материала применяется измеритель скорости светящихся объектов типа ИССО-1. Изменяя скорость вращения зеркала в приборе, добивались параллельности треков светящихся частиц и контрольных линий, видимых в окуляре прибора, после чего отсчитывали величину скорости по стрелочному индикатору. Для измерения скорости частиц в различных областях конуса распыла используется медный водоохлаждаемый экран, через продольную щель которого фиксировали с помощью ИССО-1 скорость полета частиц. Данный метод позволяет

оперативно определять максимальную $v_{ч \max}$ и минимальную $v_{ч \min}$ скорости частиц.

Твердость и микротвердость образцов измеряется методом Виккерса на приборе Durascan 20 при нагрузке 10 г и 50 г. Шероховатость поверхности измеряется на профилограф-профиллометре модели «Taylot Hobson Precision Form Taly Surb 120» и атомно-силовом микроскопе модели NT-206.

Анализ фазового состава исследуемых материалов проводится с использованием методов рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3. Съемки профилей интенсивности рассеянного рентгеновского излучения осуществляется в монохроматизированном $\text{CoK}\alpha$ излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Рентгеновская съемка проводится с фокусировкой по Бреггу–Брентано в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,10 и временем набора импульсов на точку, равном 10 с.

Триботехнические испытания образцов проводятся на трибометре АТВП. Испытания осуществляются по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов проводятся в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла $p = 1,5$ МПа). При испытаниях используется контртело с размерами 90×40×5 мм, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10).

Исследования коэффициента трения и износа образцов также проводятся на машине трения модели MMW-1A (рисунок 2.3) путем истирания образцов при частоте вращения образцов 200 мин⁻¹ и усилием прижима 20–40 Н. Ответный образец изготавливается из стали Р6М5.



а



б



в

Рисунок 2.3. – Внешний вид машины трения (а) и образцов до (б) и после (в) испытания

Измерение величины износа образцов осуществляется весовым методом с использованием аналитических весов модели АДВ-200М или модели ВК-1500.1. Погрешность измерения массы образца составляет 0,05 мг. Испытания проводятся до достижения 20 000 циклов с промежуточными взвешиваниями. Путь трения составляет примерно 1200–1500 м.

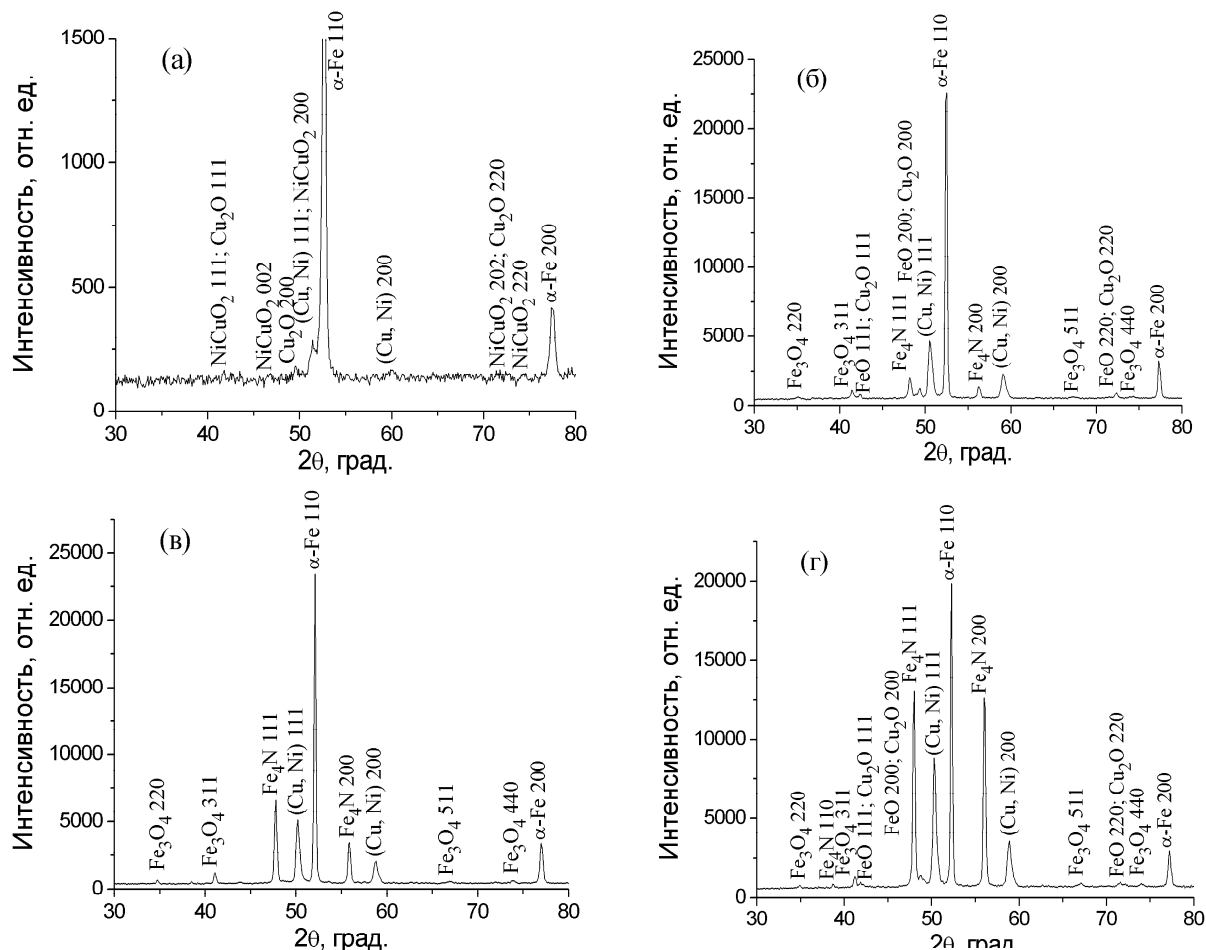
Коррозионные испытания проводятся на образцах в среде 10% водного раствора NaCl. В качестве основного метода определения коррозионной стойкости исследуемых материалов выбирали весовой метод. Перед испытанием образец тщательно промывается, протирается и высушивается. Затем проводится его взвешивание на аналитических весах модели АДВ-200М или модели ВК-1500.1 и изолирование нерабочих поверхностей с помощью изолирующей химически-стойкой полимерной ленты. Далее образец погружается в 10% водный раствор NaCl и выдерживается при комнатной температуре в течение 70 и 120 ч. Проводится промежуточное измерение величины потери массы призматических образцов после выдерживания в коррозионной среде в течение заданного времени. С поверхности образцов перед взвешиванием тщательно удаляются продукты коррозии, затем образцы промываются, протираются спиртом и просушиваются в сушильном шкафу при температуре 370 К. После высушивания образцы взвешиваются на аналитических весах модели АДВ-200М или модели ВК-1500.1. Взвешивание каждого образца производится не менее 2–3 раз. Погрешность измерения массы образца составляет 0,05 мг.

2.3 Исследование влияния ионно-лучевого азотирования на свойства инструментальной стали и твердого сплава

2.3.1 Структурно-фазовое состояние и микротвердость

На рисунке 2.4 приведены рентгеновские дифрактограммы, полученные от поверхностных слоев исследуемых сталей и сплавов, подвергнутых ионно-лучевому азотированию при температуре 720–820 К [29; 32]. В исходном состоянии образец стали с покрытием Cu-Ni содержит двойные оксиды Ni-Cu (NiCuO_3 , NiCuO_2) и оксид меди (Cu_2O). Кроме этого, на дифрактограмме регистрируются дифракционные линии от α -Fe, γ -Fe (рисунок 2.4, а), а также образование нитридов типа Fe_4N (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Pm-3m, $a = 0,3795$ нм, карточка PDF № 06-0627). Кроме них в поверхностном слое присутствуют фазы Cu_2O , Cu-Ni, α -Fe, Fe_3O_4 (рисунок 2.4, б–г).

Микротвердость поверхностного слоя образца стали с покрытием составляет 350 HV 0,2. В результате ионно-лучевого азотирования при 720, 770 и 820 К микротвердость поверхностных слоев возрастает до 670, 720 и 850 HV 0,05, соответственно.

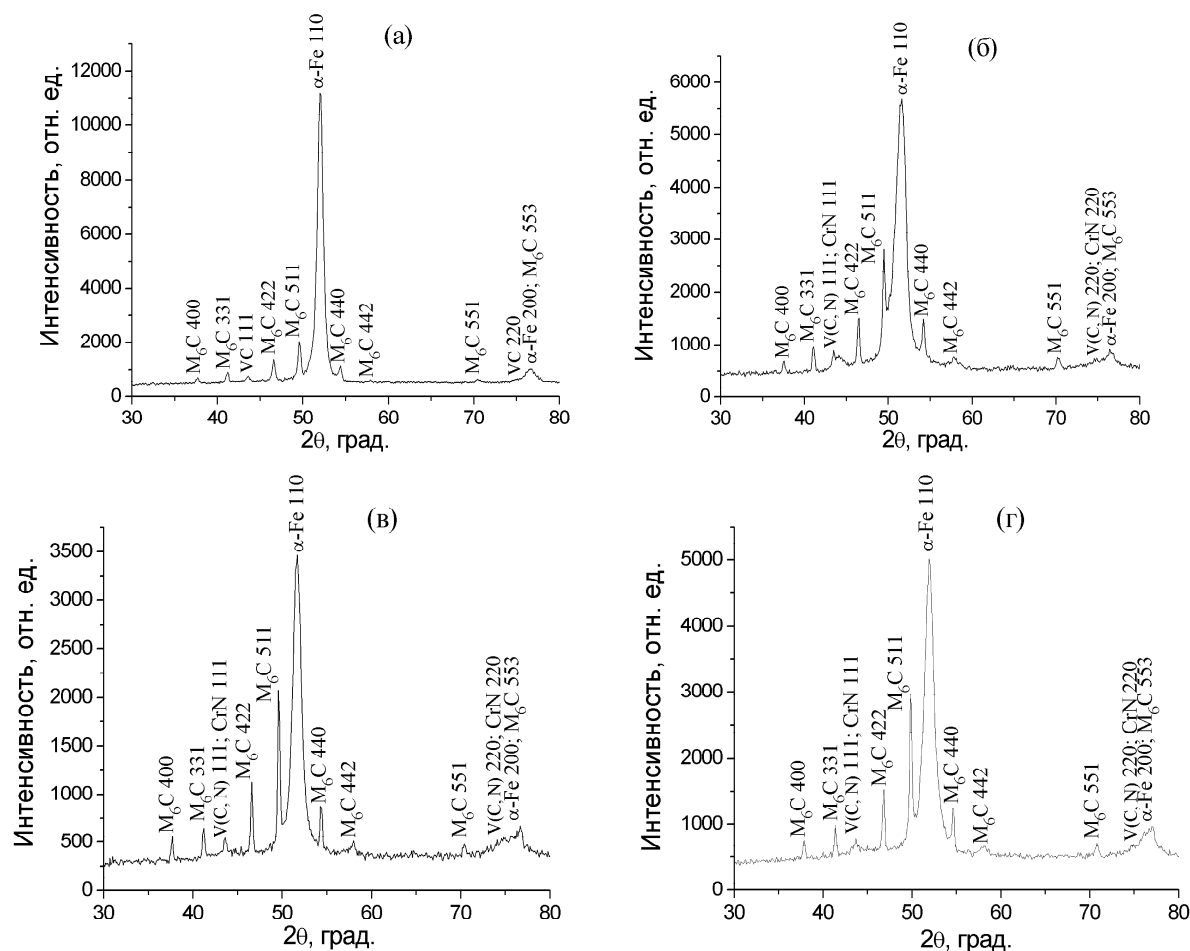


a – исходное состояние; *б* – обработка N^+ при 720 К; *в* – то же, при 770 К;
г – то же, при 820 К

Рисунок 2.4. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностных слоев стального образца с покрытием из сплава Cu-Ni

Дифрактограммы от поверхностных слоев образцов быстрорежущей стали ННС-0024, обработанной ионами азота с пониженной плотностью ионного тока и при различных температурах, приведены на рисунке 2.5. В исходном состоянии сталь содержит $\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$, а также карбиды $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, VC . Указанный состав фаз является типичным для быстрорежущих сталей. Ионная обработка при пониженной плотности ионного тока приводит к выделению в поверхностном слое нитридных частиц CrN с ГЦК кристаллической решеткой (пространственная группа Fm-3m , $a = 0,4140$ нм, карточка PDF № 11-0065), а также к образованию карбонитрида $\text{V}(\text{C},\text{N})$,

имеющего изоморфную VC гранецентрированную кристаллическую решетку, но отличающегося пониженным значением параметра кристаллической решетки (рисунок 2.5, б–г). Микротвердость стали – 865 HV 0,2, что характерно для сталей данного типа. Микротвердость поверхностного слоя стали, обработанной ионами азота при 720, 770 и 820 К оставляет соответственно 1000, 1150 и 1050 HV 0,05.

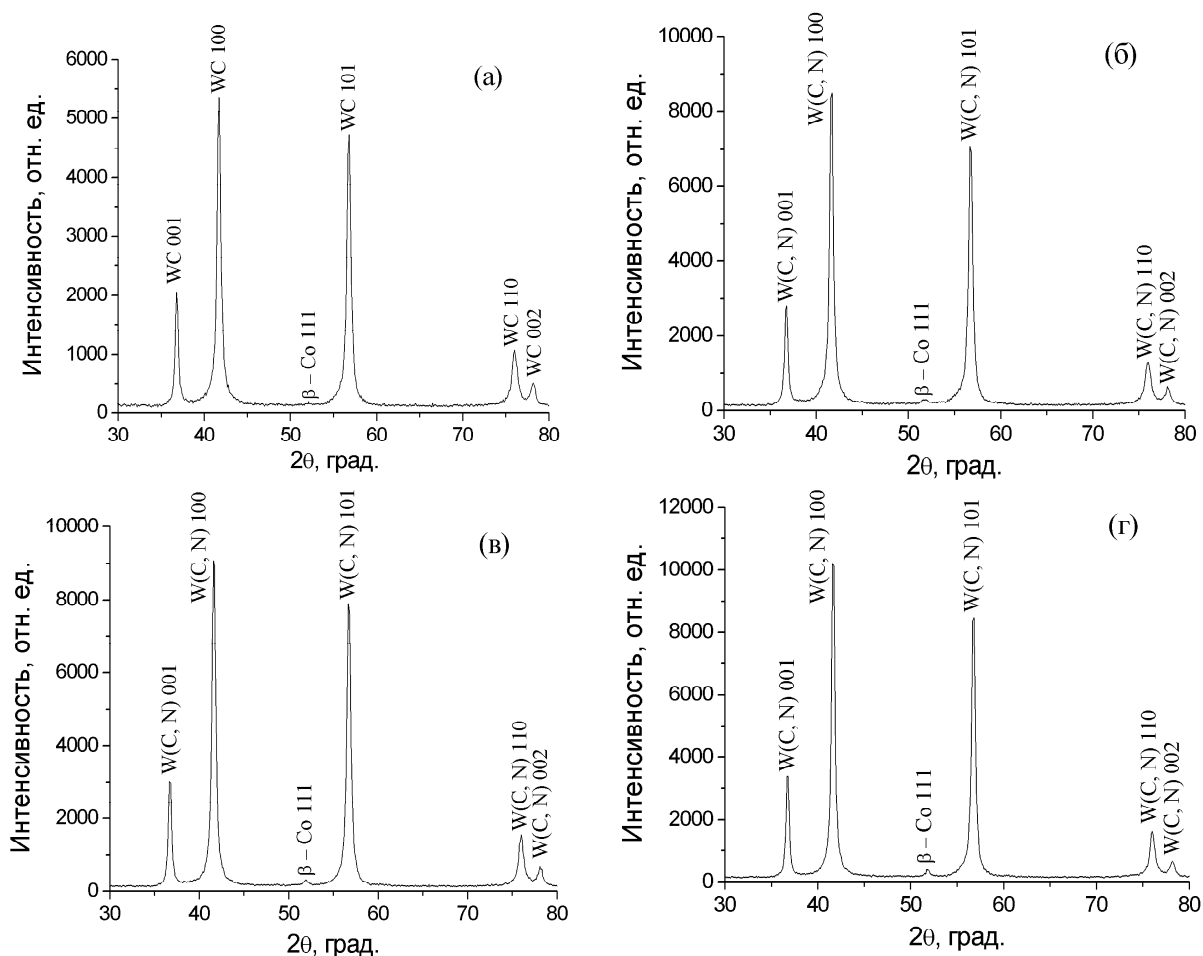


а – исходное состояние; б – обработка N^+ при 720 К; в – то же, при 770 К; г – то же, при 820 К

Рисунок 2.5. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($CoK\alpha$) от поверхностных слоев образцов стали HSS после различных режимов обработки

Твердый сплав ВК8 в исходном состоянии содержит фазы WC и Co (рисунок 2.6). Фазовый состав обработанного ионами азота твердого сплава не изменяется. Вместе с тем регистрируется некоторое уменьшение значений параметра кристаллической решетки карбидной фазы WC после ионного азотирования ($c = 0,2835$ нм), что указывает на ее легирование азотом.

Микротвердость сплава ВК8 составляет 950–1000 HV 0,2. В результате ионно-лучевой обработки при температуре 720–820 К микротвердость поверхностного слоя твердого сплава возрастает до 1300–1400 HV 0,05.



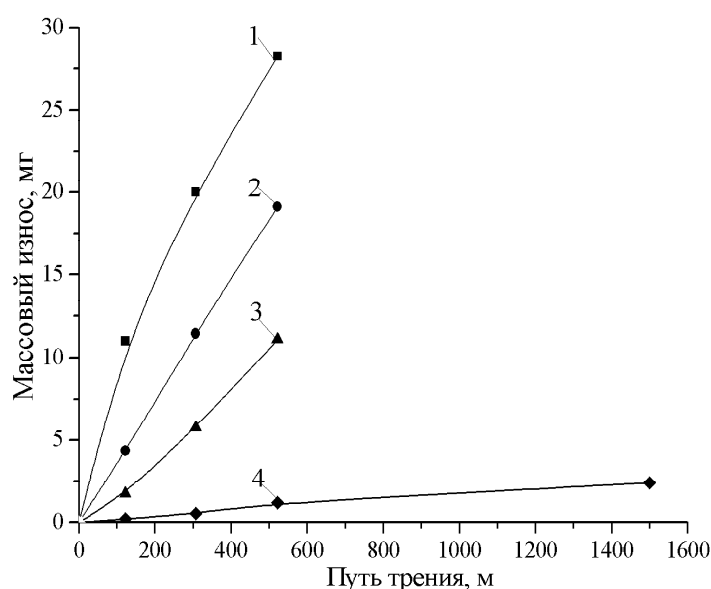
a – исходное состояние; *б* – обработка N⁺ при 720 К; *в* – то же, при 770 К;
г – то же, при 820 К

**Рисунок 2.6. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α)
от поверхностных слоев образцов стали ВК8
после различных режимов обработки**

2.3.2 Износостойкость

На рисунках 2.7–2.9 приведены зависимости массового износа от пути трения для обработанных ионами азота образцов стали с покрытием Cu-Ni (рисунок 2.7), образцов инструментальной стали ННС-0024 (рисунок 2.8) и образцах твердого сплава ВК8 (рисунок 2.9). Можно видеть, что стали с покрытием Cu-Ni в исходном состоянии имеет низкую износостойкость. Интенсивность массового изнашивания стали составляет $I_q = 54,1 \cdot 10^{-3}$ мг/м. В результате обработки ионами азота при температуре

720 К и 770 К износостойкость стали возрастает и интенсивность изнашивания снижается до значений $I_q = 36,9 \cdot 10^{-3}$ и $I_q = 21,2 \cdot 10^{-3}$ мг/м, соответственно. Наиболее сильное возрастание износостойкости регистрируется после ионно-лучевого азотирования при температуре 820 К и величина интенсивности массового изнашивания снижается в 55 раз и составляет $I_q = 1,6 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Такое существенное возрастание износостойкости вызвано повышенной глубиной азотированного слоя и высоким содержанием частиц упрочняющих нитридных фаз (см. рисунок 2.4, з), возможной причиной повышенной износостойкости также является наличие оксидов в ее поверхностных слоях, что повышает задиростойкость трибосопряжения в условиях сухого трения. Значения коэффициента трения имплантированной азотом стали с покрытием Cu-Ni составляют 0,8–1,0.

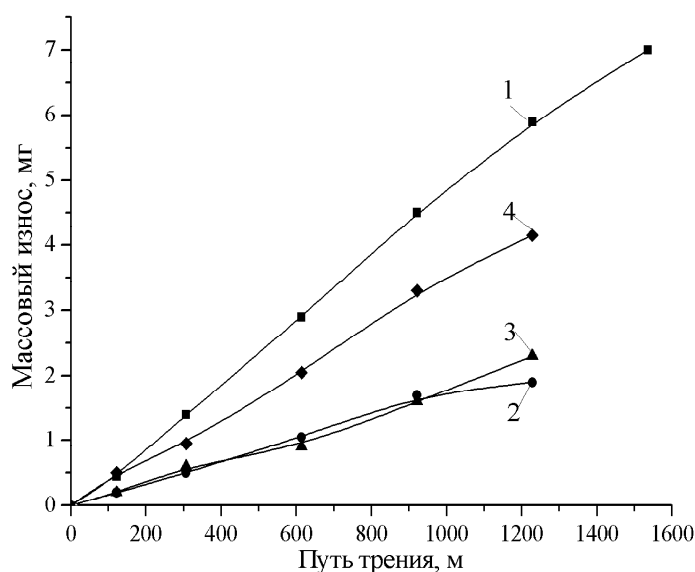


1 – исходное состояние; 2 – обработка N⁺ при 720 К; 3 – то же, при 770 К;
4 – то же, при 820 К

Рисунок 2.7. – Зависимости величины массового износа от пути трения для образцов стали с покрытием Cu-Ni, обработанных по различным режимам

Зависимости величины накопленного массового износа от пути трения для образцов инструментальной стали HNS-0024, обработанной ионами азота при различных температурах, представлены на рисунке 2.8. Из приведенных на рисунке графиков можно видеть, что ионно-лучевое азотирование приводит к существенному увеличению износостойкости быстрорежущей стали обработанной при температурах 720–770 К. Значе-

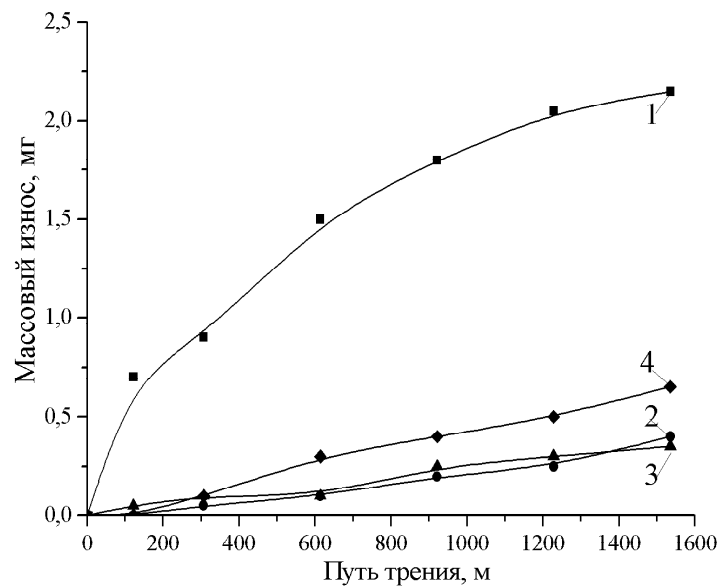
ния интенсивности массового изнашивания после обработки при температуре 720 и 770 К составляют $I_q = 1,8 \cdot 10^{-3}$ мг/м и $I_q = 1,5 \cdot 10^{-3}$ мг/м, соответственно. В то же время необработанная ионами азота сталь имеет величину интенсивности изнашивания $I_q = 4,8 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Увеличение температуры ионной обработки до 820 К приводит к снижению износостойкости стали. Значения коэффициента трения в случае испытаний стали ННС-0024, обработанной ионами азота при температуре 720 и 770 К, составляют $f = 1,0$ – $1,1$. После обработки при 820 К значения коэффициента трения составляет $f = 0,8$ – $1,0$.



1 – исходное состояние; 2 – обработка N⁺ при 720 К; 3 – то же, при 770 К;
4 – то же, при 820 К

Рисунок 2.8. – Зависимости величины массового износа от пути трения для образцов стали ННС-0024, обработанных по различным режимам

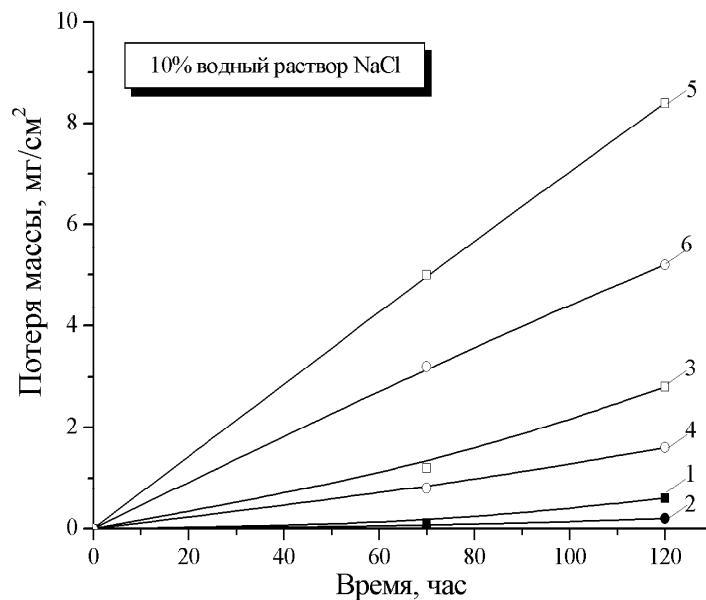
Результаты триботехнических испытаний твердого сплава ВК8 приведены на рисунке 2.9. Можно видеть, что ионно-лучевое азотирование способствует существенному увеличению износостойкости твердого сплава ВК8 в условиях адгезионного взаимодействия. В частности, ионное азотирование при температуре 720 и 820 К приводит к снижению интенсивности массового изнашивания от $I_q = 1,3 \cdot 10^{-3}$ мг/м (исходное состояние), до $I_q = 0,3$ – $0,4 \cdot 10^{-3}$ мг/м (обработка ионами азота при температуре 720–820 К). Значения коэффициента трения при этом сохраняются на уровне 0,8–0,9.



1 – исходное состояние; 2 – обработка N⁺ при 720 К; 3 – то же, при 770 К;
4 – то же, при 820 К

Рисунок 2.9. – Зависимости величины массового износа от пути трения для образцов твердого сплава ВК8, обработанных по различным режимам

2.3.3 Коррозионная стойкость



1, 3, 5 – исходное состояние; 2, 4, 6 – обработка N⁺ при 770 К.

Рисунок 2.10. – Зависимость величины коррозионного растворения в 10% водном растворе NaCl от времени испытания и режима обработки образцов стали с покрытием Cu-Ni (1, 2), стали ННС-0024 (3, 4) и твердого сплава ВК8 (5, 6)

На рисунке 2.10 приведены зависимости величины коррозионного растворения исследуемой стали с покрытием Cu-Ni и высоколегированной инструментальной стали HNS-0024 (инструментальная сталь типа P6M5), твердого сплава BK8 от времени выдержки в 10% водном растворе NaCl.

Можно видеть, что ионно-лучевое азотирование при температуре 770 К приводит к существенному снижению скорости коррозионного растворения стали HNS-0024, твердого сплава BK8 и стали с покрытием Cu-Ni. Наиболее низкая скорость коррозии зарегистрирована для обработанной ионами азота стали с покрытием Cu-Ni. Указанная закономерность может быть вызвана наличием защитного покрытия на поверхности стали.

2.4 Исследование свойств комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана

Методика исследований предусматривает (см. раздел 2.2) предварительную подготовку плоской поверхности первой группы образцов из стали 40X путем ее фрезерования и шлифования, нанесения газотермическим методом подслоя из стали X20H80 толщиной 0,1 мм и покрытия из инструментальной стали 95X18 толщиной 1 мм, затем шлифования и полирования нанесенного покрытия, ионно-плазменную его обработку нитридом титана в вакуумной установке PVM-0,5FN с созданием покрытия толщиной 5–10 мкм. Вторая группа образцов из стали 40X со сферическими поверхностями предварительно обрабатывается вращающимся лезвийным инструментом с созданием на поверхности регулярного микрорельефа «сетчатой» формы и высотой неровностей «сетки» Ra 0,6–1,2 мкм и между сторонами «сетки» Ra 0,021–0,064 мкм. Затем на эти поверхности ионно-плазменным методом наносится слой из нитрида титана толщиной 5–10 мкм. Плоские и цилиндрические поверхности третьей группы образцов из нержавеющей стали 12X18H10T предварительно полируются, и затем на них наносится покрытие из нитрида титана [7]. Внешний вид образцов первой, второй и третьей групп представлен на рисунке 2.11.

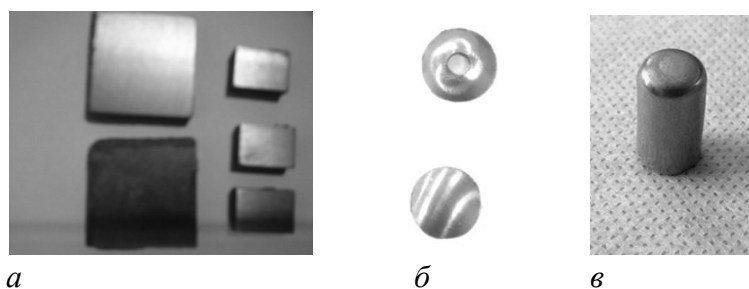


Рисунок 2.11. – Внешний вид образцов плоских поверхностей (а) с газотермическим и ионно-плазменным покрытием, сферических (б) и цилиндрических (в) поверхностей с ионно-плазменным покрытием

2.4.1 Структура и фазовый состав

На рисунке 2.12 представлена характерная микроструктура напыленного покрытия из стали 95X18. Покрытие из высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 содержит перемежающиеся прослойки металла и оксидов, а также поры. Остаточная пористость покрытия не превышает ~ 3%, а содержание оксидов составляет ~ 25 об.%.

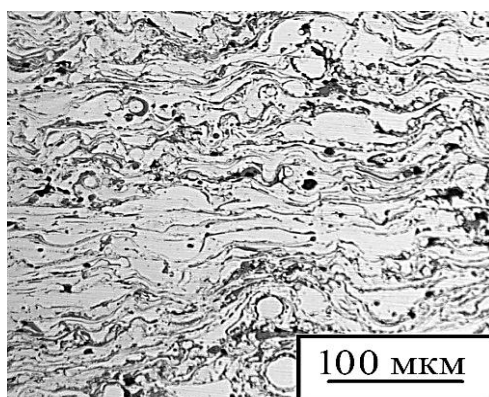


Рисунок 2.12. – Микроструктура газотермического покрытия из проволоочной стали 95X18

В покрытии регистрируются фазы (рисунок 2.13): γ -Fe (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Fm-3m, $a = 0,35975$ нм, карточка PDF № 47-1417), α -Fe (ОЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Im-3m, $a = 0,28664$ нм, карточка PDF № 06-0696), Fe_3O_4 (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Fd-3m, $a = 0,8396$ нм, карточка PDF № 19-0629), FeO (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Fm-3m, $a = 0,4307$ нм, карточка PDF № 06-0615). Содержание метастабильного остаточного аустенита в покрытии из мартенситной стали 95X18 составляет $V_\gamma = 63$ об.%, что существенно превышает содержание γ -фазы в монолитной стали 95X18.

На рисунке 2.14 представлен фрагмент рентгеновской дифрактограммы от нешлифованного покрытия из стали 95X18 с осажденным слоем TiN. На дифракционной картине регистрируются фазы: TiN (TiN – ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Fm-3m, $a = 0,424173$ нм, карточка PDF № 38-1420), α -Ti (ГПУ кристаллическая решетка, пространственная группа P63/mmc, $a = 0,29505$ нм, $c = 0,46826$, карточка PDF № 44-1294), а также γ -Fe, α -Fe, Fe_3O_4 , FeO. Фазы γ -Fe, α -Fe, Fe_3O_4 , FeO регистрируются от газотермического покрытия из стали 95X18 вследствие малой толщины осажденного нитридного слоя. Необходимо отметить, что в нешлифованном покрытии несколько снижается содержание γ -фазы.

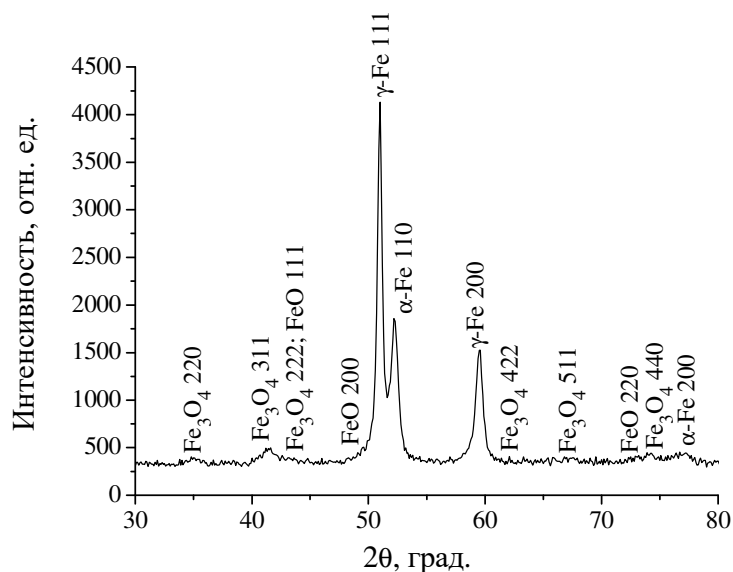


Рисунок 2.13. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKa) покрытия из стали 95X18

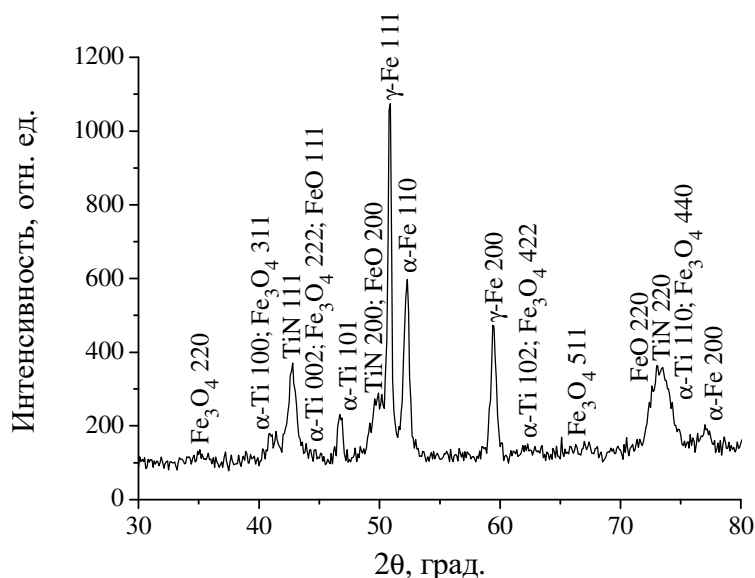


Рисунок 2.14. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKa) нешлифованного образца из стали 95X18 с осажденным слоем TiN

Рентгеновская дифрактограмма от шлифованного покрытия из стали 95X18 с осажденным слоем TiN представлена на рисунке 2.15.

На дифракционной картине регистрируются фазы: TiN (TiN – ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Fm-3m, $a = 0,424173$ нм, карточка PDF № 38-1420), α -Ti (ГПУ кристаллическая решетка, пространственная группа P63/mmc, $a = 0,29505$ нм, $c = 0,46826$, карточка PDF № 44-1294), а также γ -Fe, α -Fe, Fe_3O_4 , FeO. Интенсивность дифракционных линий от подложки снижается, что связано с большей толщиной нитридно-

го слоя, чем у нешлифованного образца. Необходимо отметить, что в шлифованном покрытии 95X18 существенно уменьшается содержание γ -фазы ($V_\gamma = 25$ об. %), что связано с $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением при шлифовании.

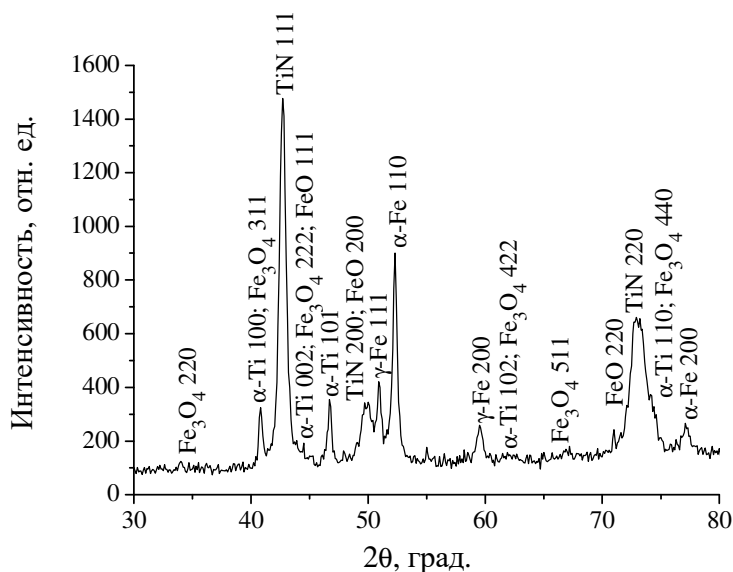


Рисунок 2.15. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKa) шлифованного покрытия из стали 95X18 с покрытием из нитрида титана

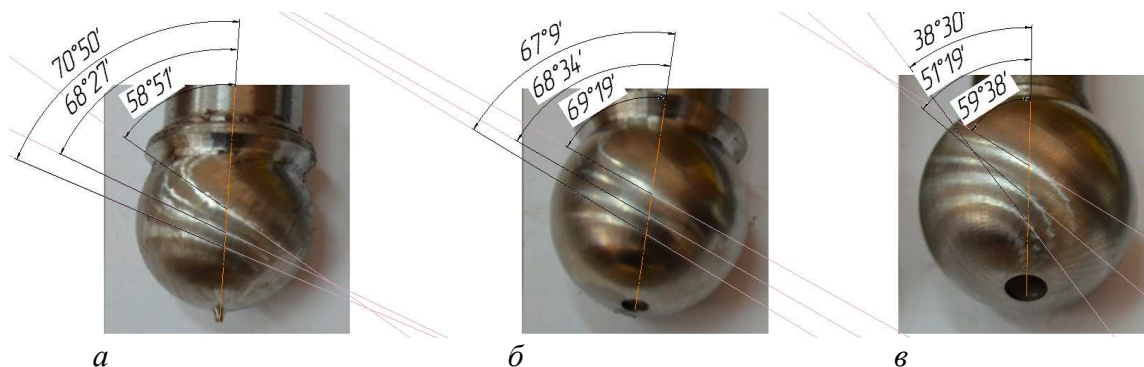
На дифракционной картине регистрируются фазы: TiN (TiN – ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа Fm-3m, $a = 0,424173$ нм, карточка PDF № 38-1420), α -Ti (ГПУ кристаллическая решетка, пространственная группа P63/mmc, $a = 0,29505$ нм, $c = 0,46826$, карточка PDF № 44-1294), а также γ -Fe, α -Fe, Fe_3O_4 , FeO. Интенсивность дифракционных линий от подложки снижается, что связано с большей толщиной нитридного слоя, чем у нешлифованного образца. Необходимо отметить, что в шлифованном покрытии 95X18 существенно уменьшается содержание γ -фазы ($V_\gamma = 25$ об.%), что связано с $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением при шлифовании.

2.4.2 Шероховатость и микротвердость

Как было отмечено в разделе 2.2, перед нанесением покрытия поверхности образцов второй группы обрабатывались механическим способом – резанием токарным резцом и вращающимся режущим инструментом [29; 30]. Эти способы механической обработки обеспечивают формирование различного рельефа поверхности образца.

На рисунке 2.16 показано, что сферическая поверхность образца при обработке вращающимся режущим инструментом формируется в виде «сетки» за счет пересечения траекторий движений образца и инструмента, а направление формирования одинаковых по высоте неровностей на по-

верхности определяется углом η наклона оси вращения образца по отношению к оси вращения инструмента и величиной частоты их вращения. Угол наклона линий с одинаковой величиной неровностей находится в пределах $65\text{--}75^\circ$ при угле $\eta = 15\text{--}25^\circ$. Известно [30; 31], что снижению шероховатости обработанной поверхности способствует применение крутоспиральных фрез (борфрез) с углом наклона режущих кромок лезвий в данных пределах, а также ротационных инструментов, обеспечивающих угол наклона траекторий резания равным $50\text{--}70^\circ$.



- a* – $Ra\ 1,3\ \mu\text{m}$ при $n_1 = 3150\ \text{мин}^{-1}$; $n_2 = 20\ \text{мин}^{-1}$ и $D_{сф} = 25\ \text{мм}$;
б – $Ra\ 0,6\ \mu\text{m}$ при $n_1 = 3150\ \text{мин}^{-1}$; $n_2 = 20\ \text{мин}^{-1}$ и $D_{сф} = 30\ \text{мм}$;
в – $Ra\ 0,7\ \mu\text{m}$ при $n_1 = 6300\ \text{мин}^{-1}$; $n_2 = 180\ \text{мин}^{-1}$ и $D_{сф} = 35\ \text{мм}$

Рисунок 2.16. – Вид образцов со сферической поверхностью и углами наклона линий равной шероховатости

Данный вывод подтверждают исследования сферической поверхности образцов на атомно-силовом микроскопе модели NT-206 (рисунок 2.17 и таблица 2.2).

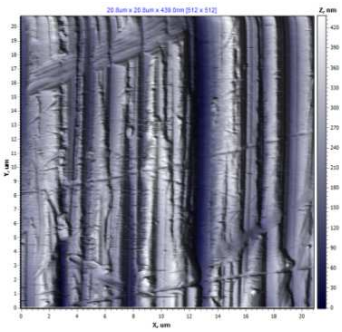
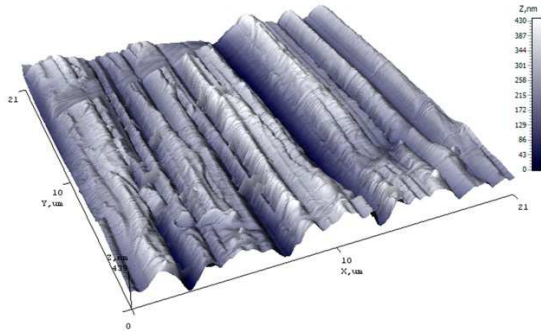
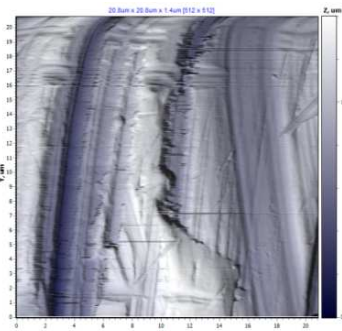
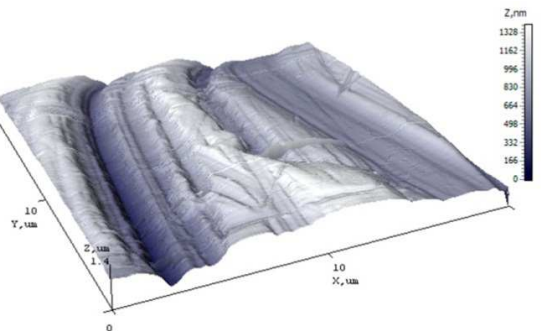
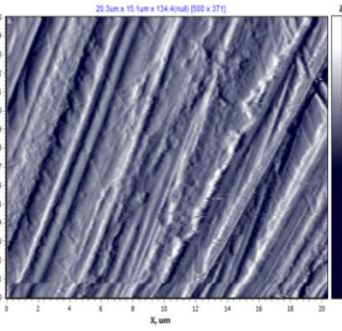
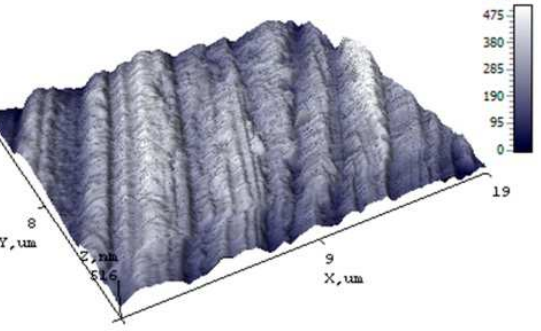


- 1, 2 – $n_1 = 3150\ \text{мин}^{-1}$; $n_2 = 20\ \text{мин}^{-1}$; 3, 4 – $n_1 = 6300\ \text{мин}^{-1}$; $n_2 = 180\ \text{мин}^{-1}$;
 5, 6 – $n_1 = 12000\ \text{мин}^{-1}$; $n_2 = 20\ \text{мин}^{-1}$; 7, 8 – при обработке резцом на токарном станке с ЧПУ $n = 1200\ \text{мин}^{-1}$ и $S_o = 0,2\ \text{мм/об}$
 (верхний ряд – вид поверхности вблизи оси вращения (полюса сферы);
 нижний ряд – вид поверхности на максимальном удалении от оси вращения (экватор сферы))

Рисунок 2.17. – Вид образцов для исследования на атомно-силовом микроскопе при обработке вращающимся лезвийным инструментом

В таблице 2.2 представлена топография обработанных сферических поверхностей, на которой видны неровности-риски по траектории резания, что обеспечивает низкую шероховатость поверхности в промежутке между рисками – траекториями ($Ra\ 0,021\text{--}0,064\ \mu\text{м}$). При этом отмечается повышение микротвердости поверхности в 1,5–1,7 раза по сравнению с основой – увеличение частоты вращения инструмента с 3000 до 6 000 мин^{-1} приводит к увеличению микротвердости поверхности на 10–20% (таблица 2.3).

Таблица 2.2. – Топография поверхности после механической обработки

№ образца	Топография поверхности	
1	2	
2	 	
3	 	
4	 	

Окончание таблицы 2.2

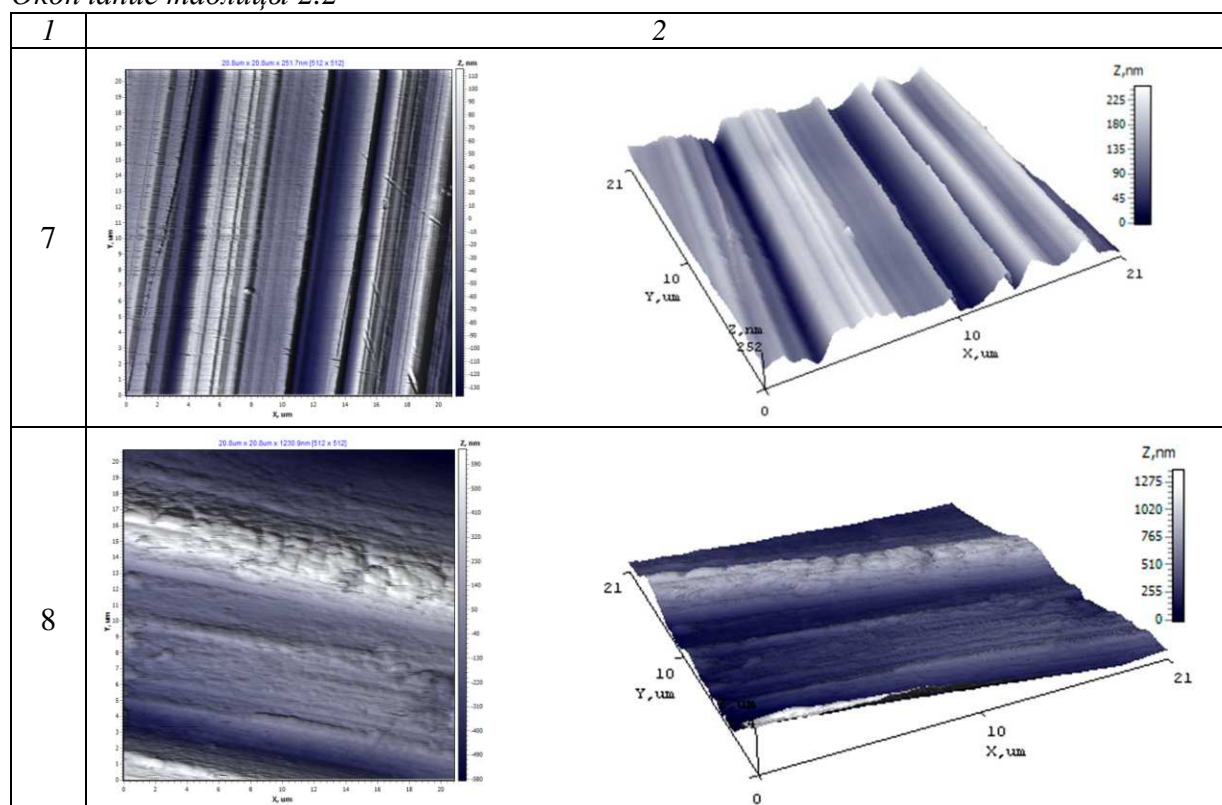


Таблица 2.3. – Значения микротвердости поверхностей образцов после механической обработки

№ образца	Вид обработки	Режимы резания	Микротвердость, HV 0,025
Образец 1	вращающимся инструментом	$n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$	625
Образец 2		$n_1 = 20 \text{ мин}^{-1}$	750
Образец 3	вращающимся инструментом	$n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$	780
Образец 4		$n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$	850 (твердость подложки 282 HV 10)
Образец 5	вращающимся инструментом	$n_1 = 12\,000 \text{ мин}^{-1}$	515
Образец 6		$n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$	525
Образец 7	токарным	$n = 1200 \text{ мин}^{-1}$;	565
Образец 8	резцом	$S_o = 0,2 \text{ мм/об}$	390 (твердость подложки 278 HV 10)

С целью повышения качества деталей на сферическую поверхность, предварительно полированную, наносится покрытие из TiN в вакуумной камере установки PVM-0,5FN. Нанесение покрытия обеспечивает уменьшение параметра шероховатости Ra поверхности по сравнению с поверхностью без покрытия примерно в 10 раз – с Ra 56,9–176,9 до Ra 5,647–12,031 (таблица 2.4). Причем по мере уменьшения плотности покрытия шероховатость повышается:

- образец А – Ra 5,647; 6,278; 12,031;
- образец Б – Ra 19,271; 10,970; 10,195;
- образец В – Ra 259,181; 29,945; 341,140.

Таблица 2.4. – Значения параметров шероховатости поверхности образцов с покрытием TiN

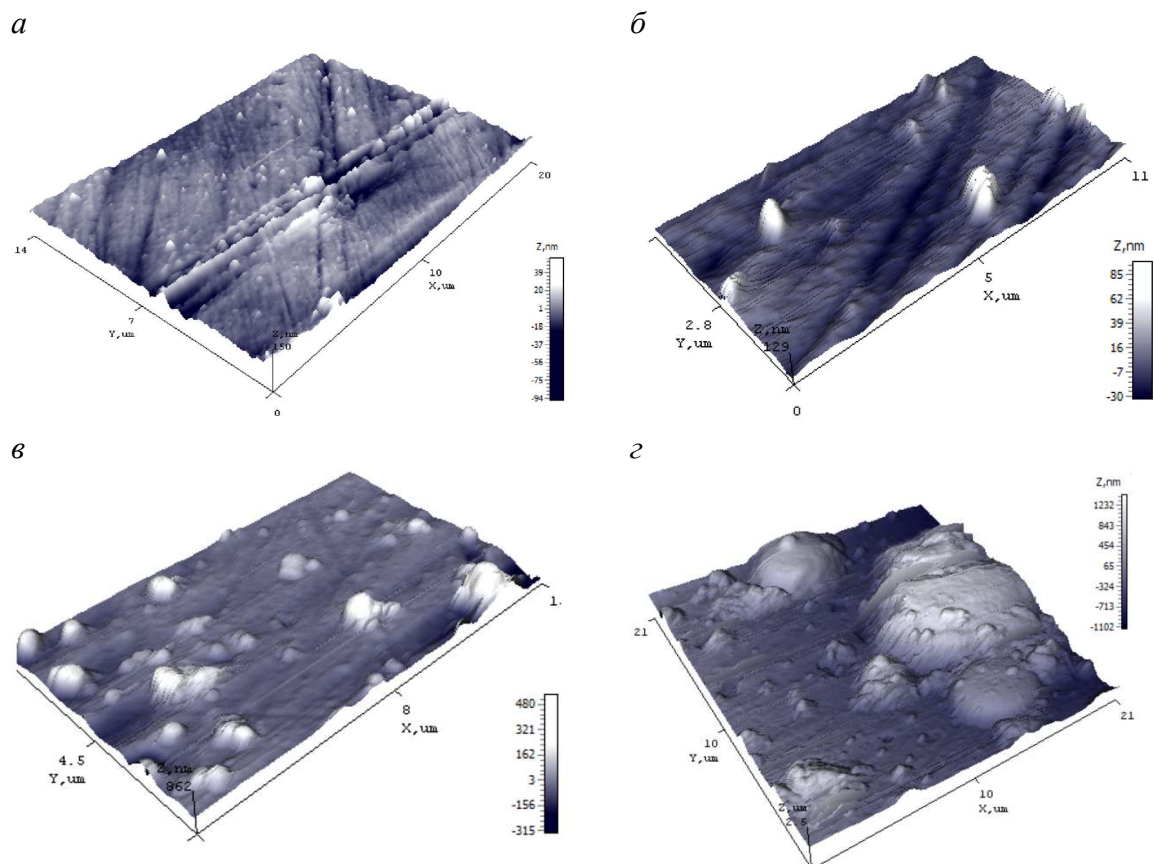
Образец А						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra	5,647	5,380	6,278	4,457	12,031	6,457
Rq	7,699	7,245	8,786	5,954	17,779	7,803
Образец Б						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra	259,181	253,016	29,945	30,982	341,140	481,256
Rq	316,278	306,588	52,396	41,530	406,016	507,758
Образец В						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra	19,271	15,281	10,970	9,210	10,195	11,998
Rq	29,292	25,509	20,590	15,324	18,832	22,289

Микротвердость различных участков поверхности сферы с покрытием представлена в таблице 2.5. Участок с высокой плотностью покрытия имеет микротвердость 790–800 HV 0,01 с пониженной плотностью покрытия 750–760 HV 0,01 и низкой плотностью покрытия 650–660 HV 0,01.

Таблица 2.5. – Значения микротвердости участков поверхности сферы с покрытием

Номер измерения	Маркировка образца	Микротвердость, HV 0,01
1	Образец А (блестящий)	802
2		747
3		815
4		797
Среднее значение образца А		790–800
1	Образец Б (с отверстием)	797
2		747
3		747
4		731
Среднее значение образца Б		750–760
1	Образец В (матовый)	656
2		634
3		647
4		673
Среднее значение образца В		650–660

Характерный вид участков поверхности сферы с покрытием представлен на рисунке 2.18.



a – образец А; *б* – образец Б; *в*, *г* – образец В

Рисунок 2.18. – Топография поверхности сферы с нанесенным покрытием TiN после обработки вращающимся инструментом

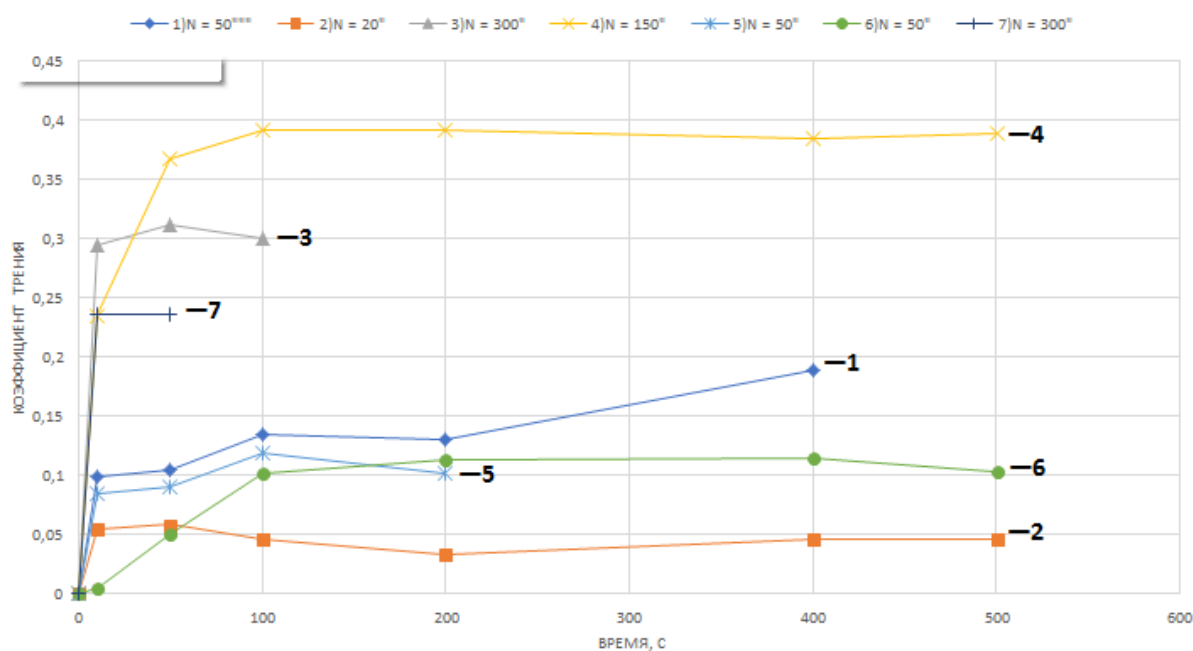
Сравнение данных значений микротвердости покрытия с микротвердостью поверхности сферы без покрытия (таблицы 2.3 и 2.5) показывает, что покрытие обеспечивает повышение микротвердости в среднем на 100 HV 0,01.

2.4.3 Коэффициент трения и износостойкость покрытий

Изменения коэффициента трения от времени испытаний и усилия прижима представлены в виде графиков на рисунке 2.19.

Анализ зависимостей показывает, что они имеют примерно одинаковый характер изменения коэффициента трения от времени испытаний – в течение первых 100 с интенсивное изменение коэффициента трения, а затем стабилизация его значений на одном уровне. При значениях усилия прижима образцов в пределах 50 Н коэффициент трения имеет значения

от 0,05 до 0,15. При увеличении усилия нагружения образцов коэффициент трения возрастает до значения 0,3–0,4.



1 – N = 50; 2 – N = 20; 3 – N = 300; 4 – N = 150; 5 – N = 50; 6 – N = 50; 7 – N = 300
(материал – сталь 12X18H10T с покрытием TiN)

Рисунок 2.19. – Зависимость коэффициента трения от времени испытания при нагрузке

Результаты исследования изнашивания образцов представлены в таблице 2.6 и на рисунке 2.20.

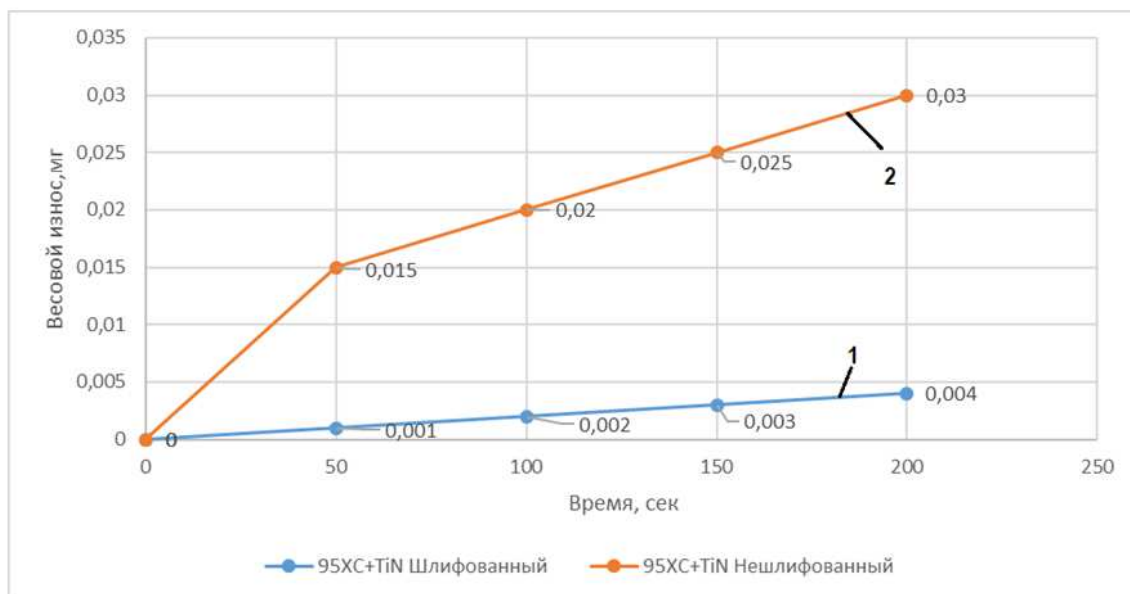
Таблица 2.6. – Износ шлифованных и нешлифованных образцов

Номер образца	Вес до испытаний, мг	Вес после испытаний, мг	Весовой износ, мг	Материал
1	4,510	4,505	0,005	95XC+TiN шлифованный
2	4,470	4,440	0,030	95XC+TiN нешлифованный

Как видно из графика на рисунке 2.20, износостойкость образцов, полученных нанесением покрытия из нитрида титана на шлифованную поверхность газотермического покрытия 95X18, выше в 2 раза, чем нешлифованных.

Согласно методике были проведены исследования износостойкости третьей группы образцов из стали 12X18H10T без покрытия и с покрытием

нитридом титана на машине трения модели MMW-1A при различных режимах.



1 – шлифованный, 2 – нешлифованный

Рисунок 2.20. – Зависимости износостойкости образцов от времени испытания

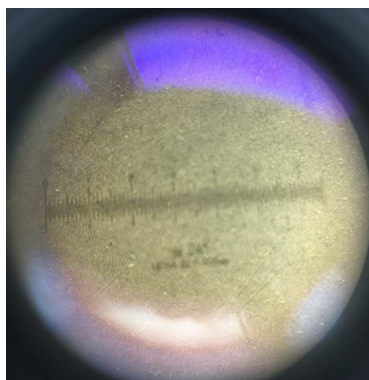
Внешний вид образцов после испытания приведен на рисунках 2.21–2.27.



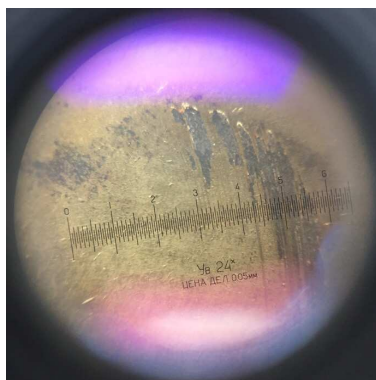
Рисунок 2.21. – Внешний вид образцов после испытания на машине трения при следующих режимах: усилие прижима – 20 Н, скорость – 200 мин⁻¹, время – 560 с



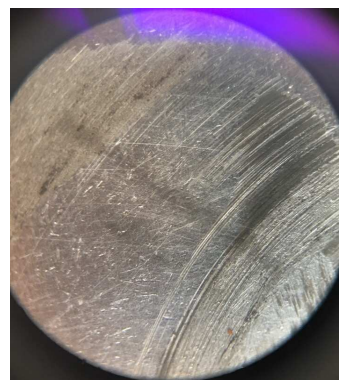
Рисунок 2.22. – Внешний вид образцов после испытания на машине трения при следующих режимах: усилие прижима – 40 Н, скорость – 200 мин⁻¹, время – 560 с



a



б

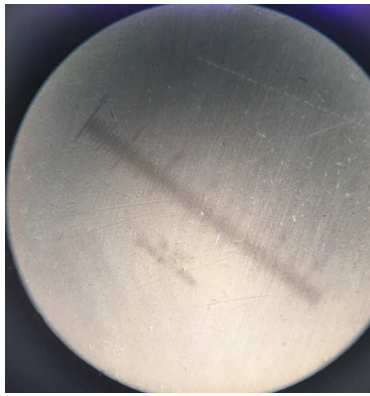


в

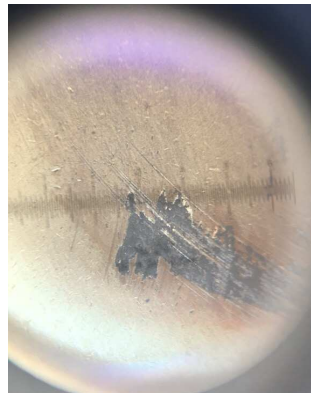
Рисунок 2.23. – Внешний вид образцов с напыленным покрытием из нитрида титана (*a, б*) и без напыления (*в*) после испытания с нагрузкой 40 Н



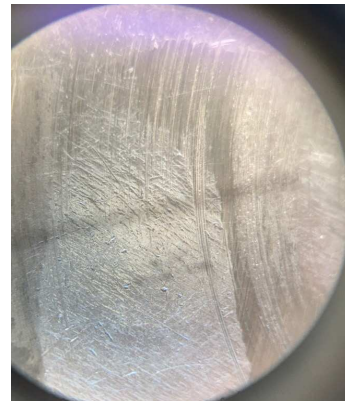
Рисунок 2.24. – Внешний вид образцов после испытания на машине трения при следующих режимах: усилие прижима – 70 Н, скорость – 200 мин⁻¹, время – 560 с



a



б



в

Рисунок 2.25. – Внешний вид образцов с напыленным покрытием из нитрида титана (*a, б*) и без напыления (*в*) после испытания с нагрузкой 70 Н



Рисунок 2.26. – Внешний вид образцов после испытания на машине трения при следующих режимах: усилие прижима – 150 Н, скорость – 200 мин⁻¹, время – 560 с



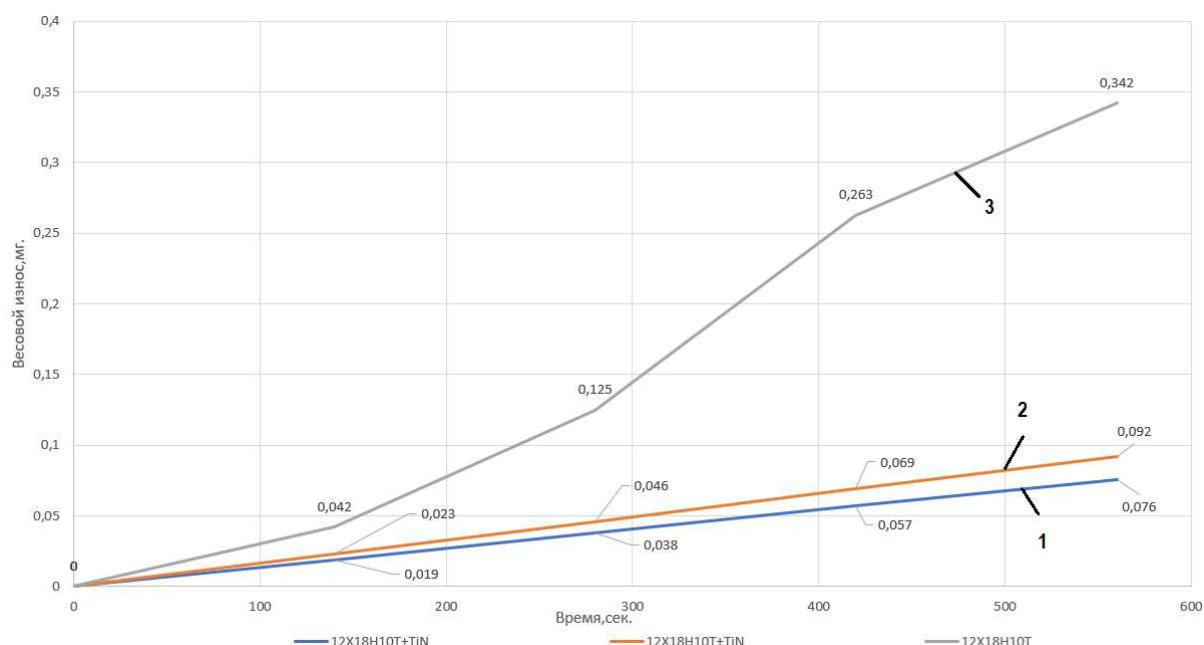
Рисунок 2.27. – Внешний вид образцов после испытания на машине трения при следующих режимах: усилие прижима – 300 Н, скорость – 200 мин⁻¹, время – 560 с

С увеличением усилия прижима с 40Н до 70, 150 и 300Н износ образца и перенос частиц материала с ответного образца возрастают. Предел нагрузки для образцов с покрытием нитрида титана составляет 150 Н, после этого предела нагрузки применение покрытия нецелесообразно. На образцах без покрытия более заметны следы истирания поверхности.

Результаты исследований износа образцов третьей группы представлены в таблице 2.7 и на рисунке 2.28.

Таблица 2.7. – Износ образцов

Номер образца	Материал	Вес до испытаний, г	Вес после испытаний, г	Весовой износ, г
1	12X18H10T+TiN	1,110	1,034	0,076
2	12X18H10T+TiN	1,305	1,213	0,092
3	12X18H10T	1,086	0,744	0,342



1 и 2 – образцы с напыленным нитридом титана;
3 – образец без напыления

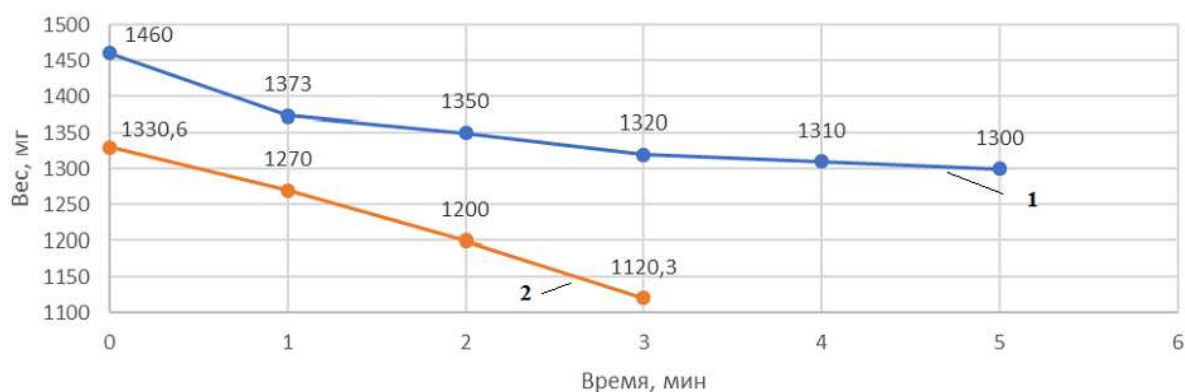
Рисунок 2.28. – Зависимости износа образцов от времени испытания

Как видно из графика на рисунке 2.28, износостойкость образцов с покрытием из нитрида титана выше, чем у образцов без покрытия.

2.4.4 Коррозионная стойкость

Согласно методике были проведены исследования коррозионной стойкости третьей группы образцов из стали 12X18H10T без покрытия

и с покрытием из нитрида титана путем их травления в плавиковой кислоте. Результаты исследования представлены на рисунке 2.29.

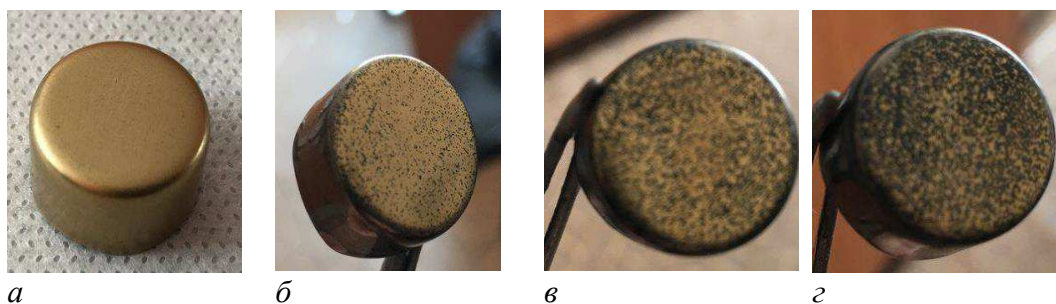


1 – без покрытия; 2 – с покрытием TiN

Рисунок 2.29. – Зависимости износа образцов от времени травления

Как видно из графика на рисунке 2.29, коррозионная стойкость образцов после нанесения покрытия (нитрид титана) выше на 10–15% образцов без покрытия.

На рисунке 2.30 показан внешний вид образцов при проведении исследований коррозионной стойкости.



а – 1 мин; б – 2 мин; в – 3 мин; г – 4 мин

Рисунок 2.30. – Внешний вид образцов после времени обработки в плавиковой кислоте

2.5 Исследование свойств комбинированного покрытия сталь–медный сплав–нитрид титана

2.5.1 Коэффициент трения

Исследование коэффициента трения проводится для следующих групп составов покрытий: 1) 12X18H10T+TiN; 2) 12X18H10T+бронза–сталь+TiN; 3) 40X+бронза–сталь+TiN; 4) 40X+бронза–сталь.

- При испытании первой группы образцов наблюдается (рисунок 2.31):
- вначале резкое увеличение коэффициента трения до момента притирки поверхностей (20–30 с);
 - далее постепенное увеличение коэффициента трения (с 0,06 до 0,1 за время 600 с);
 - на последнем этапе испытаний наблюдается резкое увеличение коэффициента трения (до 0,02–0,26) из-за протирания покрытия.



Рисунок 2.31. – Испытание первой группы образцов

- При испытании второй группы образцов наблюдается (рисунок 2.32):
- вначале резкое увеличение коэффициента трения до момента притирки поверхностей (10–15 с);
 - далее – кратковременное уменьшение коэффициента трения (с 0,06 до 0,04 в течение 20–30 с);
 - после 60–70 с испытания коэффициент трения резко увеличивается до 0,26, появляется металлический шум, испытание прекращается.

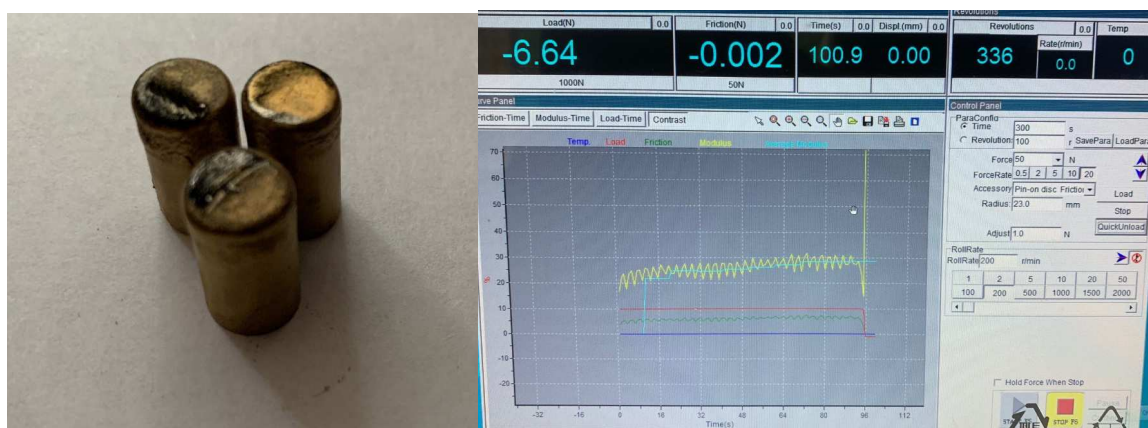


Рисунок 2.32. – Испытание второй группы образцов

- При испытании третьей группы образцов наблюдается (рисунок 2.33):
- вначале увеличение коэффициента трения (с 0,06 до 0,02) до момента притирки поверхностей (40–50 с);
 - далее – уменьшение коэффициента трения (с 0,02 до 0,14–0,16 за время 600 с);
 - далее – коэффициент трения изменяется от 0,14 до 0,16 на протяжении 600 с;
 - на последнем этапе испытаний наблюдается резкое увеличение коэффициента трения (до 0,28–0,3) из-за протирания покрытия.



Рисунок 2.33. – Испытание третьей группы образцов

- При испытании четвертой группы образцов наблюдается (рисунок 2.34):
- вначале резкое увеличение коэффициента трения до момента притирки поверхностей (10–15 с);
 - далее – кратковременное уменьшение коэффициента трения (с 0,06 до 0,04 в течение 15–20 с);
 - после 40–50 с испытания коэффициент трения резко увеличивается до 0,3–0,32, появляется металлический шум, испытание прекращается.

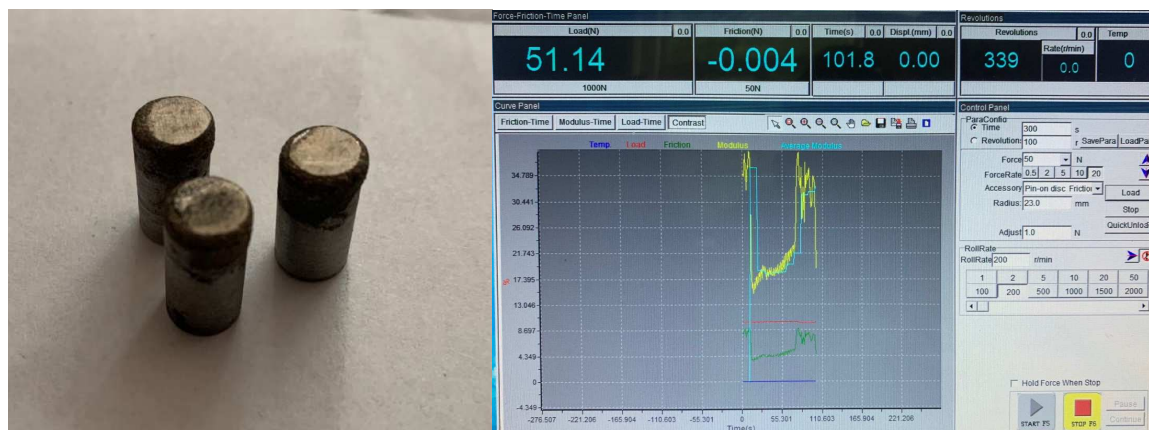
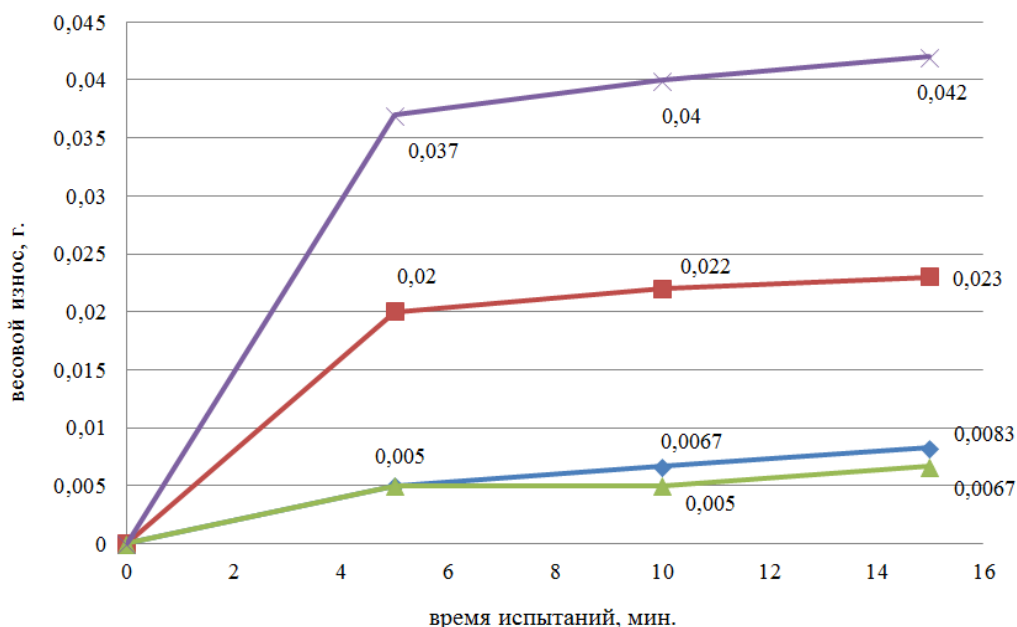


Рисунок 2.34. – Испытание четвертой группы образцов

Анализ изменения коэффициента трения в течение времени испытаний показывает, что введение в состав покрытия сплава бронза–сталь способствует смазке трущихся пар и снижению коэффициента трения на этапе притирания до 0,04–0,06; после притирания покрытия коэффициент трения увеличивается до 0,26–0,32, причем в большей степени (0,3–0,32) при отсутствии в покрытии нитрида титана (группа 4); для этой же группы характерна самая низкая стойкость покрытия (40–50 с); введение в состав покрытия нитрида титана без сплава бронза–сталь (группа 1) немного увеличивает коэффициент трения на этапе притирания до 0,1.

2.5.2 Износостойкость

Результаты исследований показали [31], что потеря веса образцов происходит примерно с одинаковой интенсивностью (рисунок 2.35).



1 – 12X18H10T+TiN; 2 – 12X18H10T+бронза–сталь+TiN;
3 – 40X+бронза–сталь+TiN; 4 – 40X+бронза–сталь

Рисунок 2.35. – Весовой износ покрытий составов

Наибольшая износостойкость наблюдается у образцов с дополнительным покрытием TiN (группы 1 и 3). Причем у этих групп образцов подложка из покрытия бронза–сталь обеспечивает некоторое снижение износа (группы 2 и 3). Наиболее заметно снижение износа у группы образцов 3. Объясняется это снижение износа смазывающим эффектом бронза–сталь покрытия, уменьшающим коэффициент трения, и повышением твердости образцов за счет покрытия TiN.

2.5.3 Коррозионная стойкость

Коррозионный износ образцов исследуется при погружении их с периодичностью 1 мин. в раствор плавиковой кислоты (концентрация 45%) и затем взвешивании на аналитических весах.

На рисунке 2.36 показано изменение внешнего вида образцов 1–4 групп составов покрытий в течение 1–5 мин. испытаний, а на рисунке 2.37 – графики зависимостей весового износа образцов от времени испытаний.

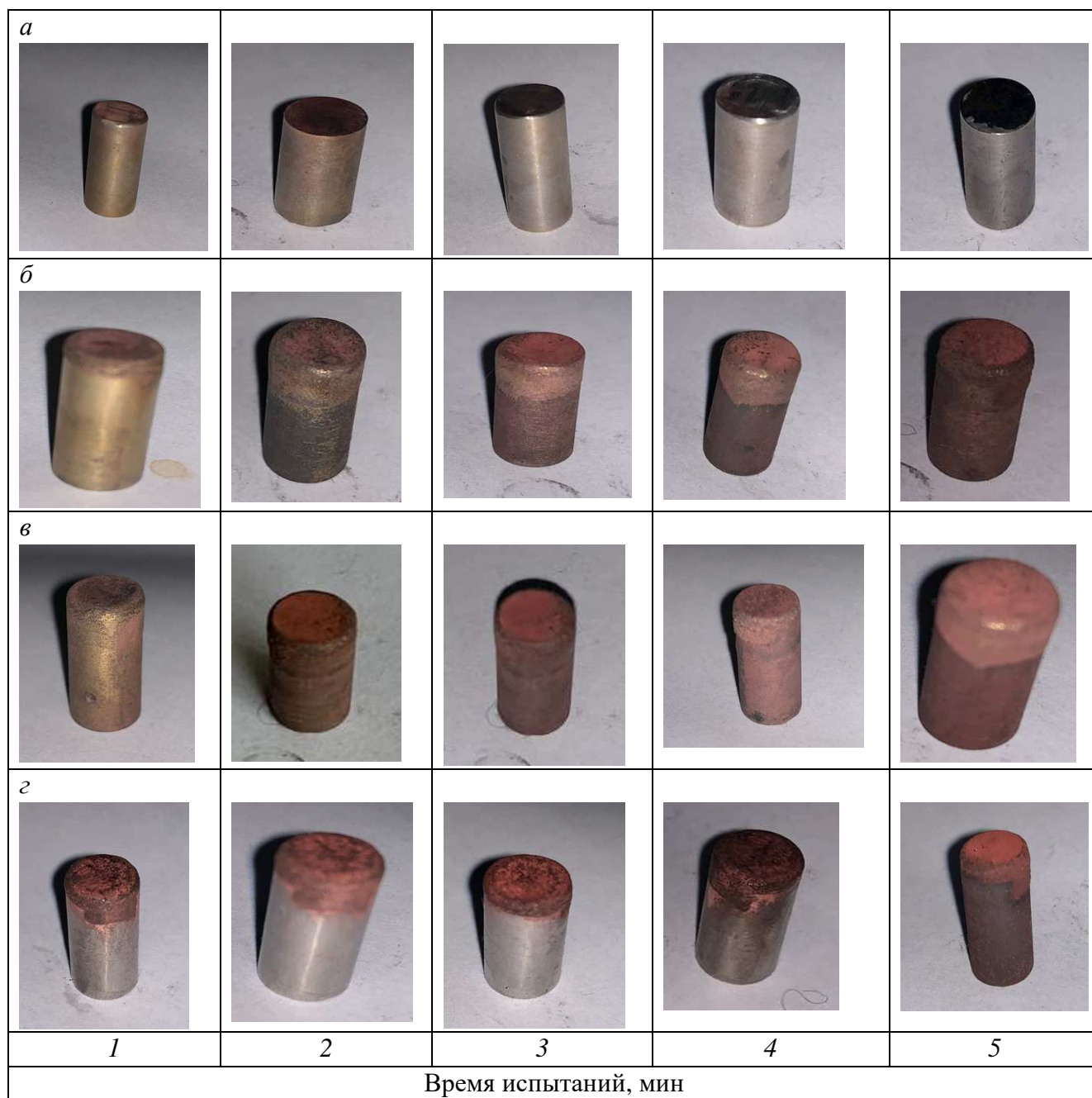
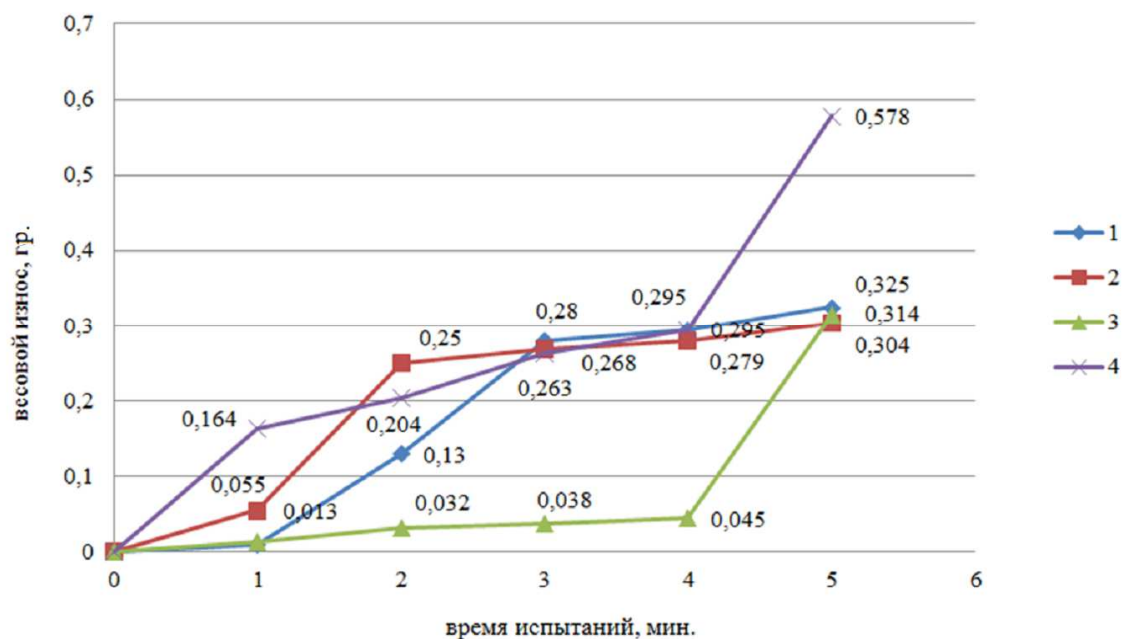


Рисунок 2.36. – Внешний вид образцов первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) групп составов покрытий после 1–5 мин испытаний



1 – 12X18H10T+TiN; 2 – 12X18H10T+бронза–сталь+TiN;
3 – 40X+бронза–сталь+TiN; 4 – 40X+бронза–сталь

Рисунок 2.37. – Коррозионный износ покрытий составов

Как видно из графиков на рисунке 2.37, коррозионный износ покрытий составов 1 и 2 незначительный и примерно одинаков, что объясняется свойствами основы из нержавеющей стали и покрытия TiN. Для покрытия 3 характерна потеря коррозионной стойкости после 4 минут испытаний. Наиболее интенсивному коррозионному износу подвергается покрытие 4 с основой из стали 40X и без покрытия TiN. Для 2–4 групп составов характерен выход меди на поверхности образцов в конце времени испытаний¹.

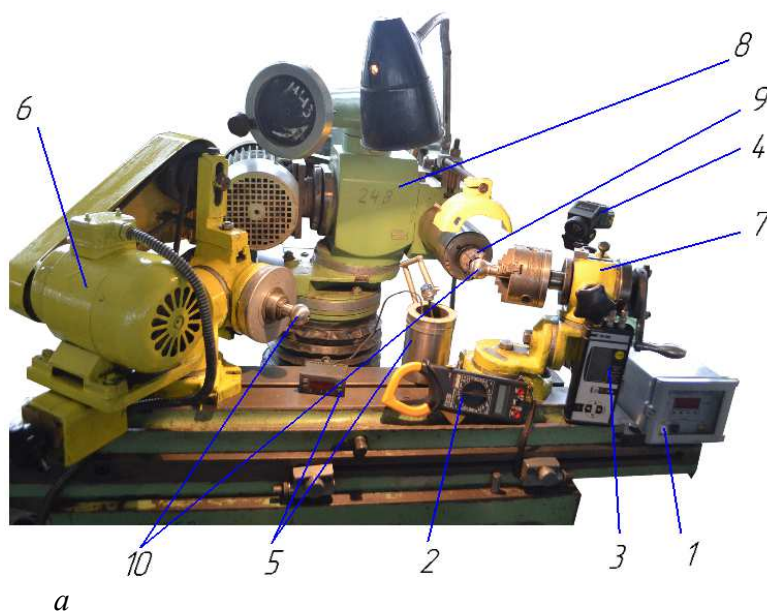
2.6 Технологический регламент и рекомендации по нанесению комбинированного покрытия

Разработан технологический регламент нанесения комбинированного покрытия, который включает следующие этапы (операции) и режимы [32].

На первом этапе осуществляется подготовка поверхности изделия под покрытие путем создания «сетчатого» микрорельефа, способствующе-

¹ Полученные результаты исследований (см. разделы 2.3–2.5) более полно представлены в материалах раздела 2.7 для использования их при выполнении лабораторной работы.

го повышению адгезии покрытия с основой. Для этого используется высокоскоростная лезвийная обработка поверхности детали с частотой вращения режущего инструмента порядка $6000\text{--}10000\text{ мин}^{-1}$, реализуемая на модернизированных универсальных станках и станках с ЧПУ. Например, для формирования микрорельефа поверхности детали «шаровой палец» используется модернизированный универсальный станок модели 3М642 и 16К20Ф3 (рисунок 2.38), а также станок с ЧПУ «Robodrill» фирмы «Fanuc» (Япония) (рисунок 2.39).



***а* – 3М642 модернизированный; *б* – 16К20Ф3 модернизированный**

Рисунок 2.38. – Внешний вид станка модели



Рисунок 2.39. – Внешний вид станка с ЧПУ «Robodrill» фирмы «Fanuc»

Высокоскоростная лезвийная обработка поверхностей деталей обеспечивает требуемый рельеф с низкой шероховатостью и исключает, в отличие от шлифования, шаржирование поверхности образца абразивными частицами.

На втором этапе наносится методом гиперзвуковой металлизации покрытие «инструментальная сталь 95X18 с подложкой X20H80» или сталь–медный сплав толщиной 0,1–1 мм. Для нанесения покрытия используется разработанная в ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси установка АДМ-10, технические характеристики которой указаны в таблице 2.8.

Таблица 2.8. – Технические характеристики установки АДМ-10

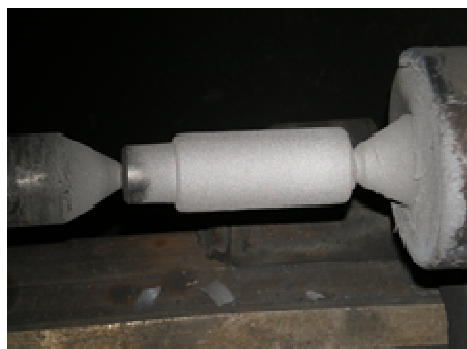
Показатель	Величина
Диаметр применяемой проволоки, мм	1,2–2,0
Скорость подачи проволоки, м/мин	0–6,3
Рабочий ток дуги, А	до 500
Коэффициент использования материала, не менее	0,85
Расход воздуха при 0,6 МПа, м ³ /ч	60
Расход горючего газа (пропан–бутан), кг/мин	0,011

Процесс нанесения покрытия и внешний вид образцов представлен на рисунке 2.40. Скорость полета напыляемых частиц составляет 400–500 м/с, размер частиц 5–40 мкм.

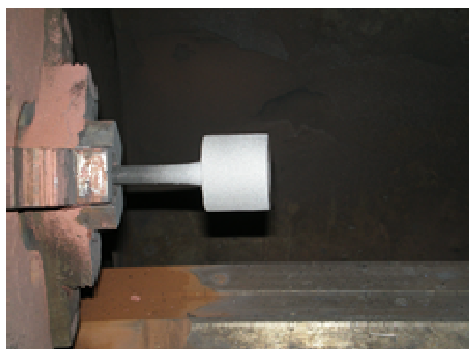
На третьем этапе поверхность покрытия или шлифуется и полируется традиционными методами, или подвергается чистовой лезвийной обработке на высокой скорости резания с обеспечением регулярного микрорельефа поверхности.



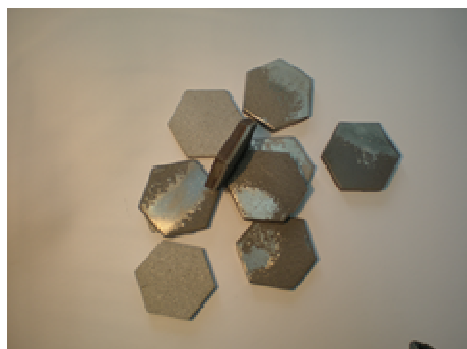
а



б



в



г

**Рисунок 2.40. – Процесс нанесения покрытия (*а*)
и внешний вид образцов (*б, в, г*)**

На четвертом этапе ионно-плазменным методом с использованием вакуумной установки PVM-0,5FN наносится покрытие из нитрида титана толщиной 1–3 мкм (рисунок 2.41).



Рисунок 2.41. – Внешний вид вакуумной установки PVM-0,5FN

Технологический регламент включает следующие операции и режимы:

- ультразвуковая очистка и температурная сушка поверхностей образцов;
- загрузка образцов в камеру вакуумной установки;
- плазменная обработка образцов ионами азота и титана и формирование покрытия TiN при вакууме $3\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ МПа, давление азота 0,097 Па и пропана 100 Па, температура нагрева образцов 200°С, ток 90А;
- отключение и выгрузка образцов;
- остывание образцов;
- контроль качества нанесенного покрытия.

Рекомендуется использовать предлагаемые покрытия и технологии для упрочнения деталей подвески автомобилей, в частности, шаровых пальцев, запорной арматуры гидро- и пневмооборудования, насосов и компрессоров, а также режущих инструментов.

Контрольные вопросы

1. Каков состав и механизм формирования комбинированного покрытия?
2. Перечислите основные этапы методики экспериментальных исследований упрочненных материалов.
3. Как изменяется твердость и микротвердость образцов?
4. Как определяется фазовый состав материалов?
5. Назовите основные параметры и характеристики триботехнических испытаний с использованием трибомера модели АТВП и машины трения MMW-1A.
6. Опишите влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя заготовки.
7. Опишите влияние ионно-лучевого азотирования на износостойкость поверхностного слоя заготовки.
8. Опишите влияние ионно-лучевого азотирования на коррозионную стойкость поверхностного слоя заготовки.
9. Опишите структурно-фазовый состав комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана.
10. Опишите изменение шероховатости и микротвердости комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана.
11. Опишите изменение коэффициента трения комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана.
12. Опишите изменение износостойкости комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана.
13. Опишите изменение коррозионной стойкости комбинированного покрытия инструментальная сталь–нитрид титана.
14. Опишите изменение коэффициента трения комбинированного покрытия сталь–медный сплав–нитрид титана.
15. Опишите изменение износостойкости комбинированного покрытия сталь–медный сплав–нитрид титана.
16. Опишите изменение коррозионной стойкости комбинированного покрытия сталь–медный сплав–нитрид титана.
17. Приведите параметры технологического регламента ионно-плазменного упрочнения материалов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Лабораторная работа является комплексной и включает несколько этапов проведения – по сути четырех лабораторных работ согласно учебной программе по дисциплине «Технологические основы ионно-плазменной обработки материалов».

1 Цель и порядок выполнения работы

Целью работы является изучение технологии ионно-лучевой обработки материалов и используемого оборудования, а также исследование влияния режимов процесса обработки на физико-механические свойства поверхностных слоев деталей.

Рекомендуется выполнять работу в следующем порядке:

1. Ознакомится с видами упрочняющей обработки материалов.
2. Изучить технологический процесс и оборудование для ионно-лучевой обработки.
3. Провести подготовку поверхности детали-образца.
4. Осуществить ионно-лучевую обработку поверхности образца в соответствии с предварительно выбранными режимами обработки.
5. Произвести количественную оценку и сравнение микротвердости, износостойкости и коррозионной стойкости обработанных и необработанных поверхностей образцов.
6. Заполнить протоколы исследования и составить отчет по работе.

2 Виды упрочняющей обработки материалов (см. разделы 1.1–1.4)

3 Технологический процесс и оборудование

Технологический процесс ионно-лучевой обработки материалов 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 PVM-0.5F. Из камеры откачивается воздух. Включается привод вращения;

– *ионно-лучевая обработка:*

1) проводится ионная чистка поверхности деталей. Ускоряющее напряжение на ионном источнике 3000 В. Плотность ионного тока 2 мА/см², время – 5 мин;

2) проводится ионно-лучевая обработка деталей: ток 90А; температура 170–200 °С; вакуум $5 \cdot 10^{-3}$ МПа; давление азота 0,097 Па, пропана 100 Па; время нанесения покрытия 20–30 мин; остывание 30–40 мин; катод титана ВТ10;

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 (упрочненная поверхность должна иметь равномерную окраску);

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:

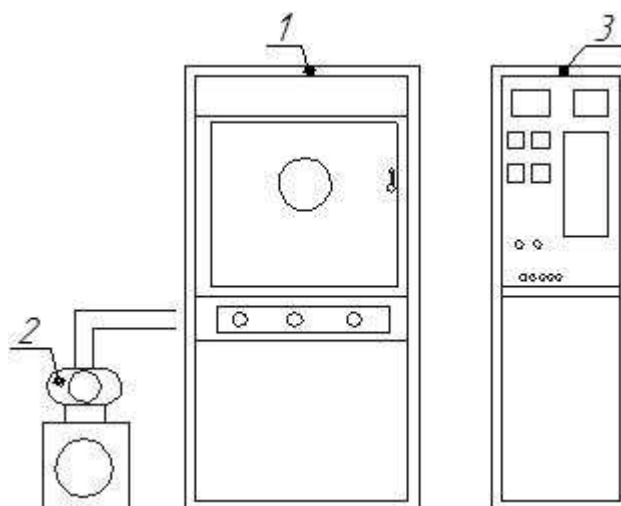
– механическую очистку от крупных слоев смазки или консерванта, а также очистку в ультразвуковой ванне и специально приготовленном растворе;

– отмывку в горячей воде;

– промывку проточной водой и этиловым спиртом.

При необходимости вводится дополнительная операция снятия ржавчины. Деталь помещают в тару с раствором для удаления ржавчины, после которой 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.

Общий вид установки PVM-0.5FN для проведения ионно-лучевой обработки азотом приведен на рисунке.



**1 – моноблок откачного поста; 2 – насос вакуумный АВР 50 – 2;
3 – стойка управления**

Рисунок. – Общий вид установки PVM-0.5FN

Порядок работы на установке представлен в инструкции по ее эксплуатации, которая выдается студентам при выполнении лабораторной работы.

4 Методика исследования качества упрочнения и микротвердости материала (см. раздел 2.2)

5 Задание

5.1. Для заданного варианта материала образца (Приложение А) подобрать режимы ионно-лучевой обработки (Приложение Б).

5.2. Произвести ионно-лучевую обработку образца.

5.3. Измерить твердость и микротвердость образца после обработки и сравнить ее с твердостью и микротвердостью образца, не подвергавшегося процессу.

5.4. Провести исследование коэффициента трения и износа образцов.

5.5. Провести исследования коррозионного износа образцов.

5.6. Заполнить протокол исследования процесса ионно-лучевой обработки поверхностей образца и сделать необходимые выводы.

5.7. Построить графики, воспользовавшись данными: рисунков Г.8–Г.16, Г.22–Г.30, таблиц Г.1–Г.5, и дать пояснения полученным зависимостям.

6 Структура отчета

- 6.1. Название, цель и порядок выполнения лабораторной работы.
- 6.2. Краткие сведения о современных видах и методах упрочнения поверхностей деталей, технологическом оборудовании и оснастке.
- 6.3. Сущность и особенности ионно-лучевой и плазменной обработки, применяемое оборудование, технологические режимы.
- 6.4. Привести протоколы назначенных режимов обработки материала и результатов измерения коэффициента трения, износа, твердости и микротвердости поверхностей образцов (Приложение В).
- 6.5. Привести дифрактограммы, таблицы, графики согласно заданию.
- 6.6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какова цель и порядок выполнения работы?
2. Какие виды обработки и методы упрочнения металлов вы знаете?
3. Дайте определение процессу ионно-лучевой обработки.
4. Укажите особенности и достоинства ионно-лучевой обработки.
5. Какие операции включает подготовка поверхности детали перед обработкой?
6. Назовите основные операции техпроцесса ионно-лучевой обработки.
7. Какие факторы (режимы) оказывают определяющее влияние на качество обработки?
8. Опишите методику измерения коэффициента трения, износа, твердости и микротвердости поверхности детали-образца.

Заключение

Представленный в теоретической части аналитический обзор свидетельствует о разнообразии видов и технологий обработки материалов и изделий и различных их классификациях по используемым веществам, способам и генерации вещества и энергии и другим признакам. Особое внимание уделяется упрочняющей обработке без изменения объема заготовки и путем нанесения покрытий, позволяющих изменять свойства и повышать качество изделий.

В практической части и лабораторной работе приведены методики и результаты собственных исследований авторов в области упрочняющей обработки, которые позволяют получить обучающимся новые знания по методам и способам обработки, структуре и фазовому составу, твердости и микротвердости, коэффициенту трения, износо- и коррозионной стойкости материалов после ионного азотирования и нанесения комбинированных покрытий.

В результате проведенных исследований научно обоснован состав комбинированных покрытий и механизм их формирования, включающий механическую подготовку микрорельефа поверхности основы и нанесение гиперзвукового газотермического и вакуумного ионно-плазменного покрытий.

Установлено, что структурно-фазовое состояние и микротвердость исследуемых сталей и сплавов при ионном азотировании и нанесении покрытий изменяется. В частности, ионное азотирование приводит к росту интенсивности дифракционных линий α -Fe и это увеличение минимально для быстрорежущей стали HNS-0024. Для твердого сплава BK8 регистрируется некоторое уменьшение значений параметра кристаллической решетки карбидной фазы WC, что указывает на ее легирование азотом. Микротвердость поверхностных слоев после ионного азотирования возрастает и тем больше, чем выше температура обработки. Так, например, для покрытия Cu-Ni микротвердость поверхностного слоя возрастает до 850 HV 0.05, для быстрорежущей стали HNS-0024 – до 1050 HV 0.05, для твердого сплава BK8 – до 1300-1400 HV 0.05. Коэффициент трения после ионного азотирования для исследуемых материалов составляет порядка 0,8–1,0. Интенсивность массового изнашивания образцов после ионного азотирования снижается до $1,6 \cdot 10^{-3}$ мг/м для покрытия Cu-Ni, $1,8 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$ мг/м для быстрорежущей стали HNS-0024, до $0,3 \cdot 10^{-3}$ – $0,4 \cdot 10^{-3}$ мг/м для твердого сплава BK8 по сравнению с исходным состоянием (порядка $4,8 \cdot 10^{-3}$ мг/м). Ионно-лучевое азо-

тирование приводит к существенному снижению скорости растворения исследуемых материалов.

Установленные структура и фазовый состав покрытий инструментальная сталь–нитрид титана свидетельствуют о снижении пористости до 3% и уменьшении содержания γ -фазы до 25 об.%, что связано с превращением γ -фазы в α -фазу, микротвердость повышается в 1,5–1,7 раза, коэффициент трения составляет 0,3–0,4.

Экспериментально установлено изменение шероховатости и микротвердости поверхности, а также фазовой структуры в зависимости от состава покрытия и режима его формирования: шероховатость поверхности снижается, а микротвердость повышается при увеличении скорости формирования микрорельефа и нанесения покрытия TiN. Фазовый состав покрытия включает: на основе стали 12X18H10T – не высокой интенсивностью γ -Fe 111 (600 отн.ед.), Cu 200 (450 отн.ед.), TiN 111 (350 отн.ед.) и TiN 220 (570 отн.ед.); введение сплава бронза–сталь увеличивает интенсивность присутствия в составе покрытия α -Fe 110 (1150 отн.ед.) и Cu 111 (900 отн.ед.); на основе стали 40X также отмечена высокая интенсивность α -Fe 110 (1150 отн.ед.) и Cu111 (1250 отн.ед.); исключение покрытия TiN приводит к росту интенсивности Cu111 (2700 отн.ед.).

Введение в состав покрытия сплава бронза–сталь способствует смазке трущихся поверхностей образцов и снижению коэффициента трения на этапе притирания до 0,04–0,06; после протирания покрытия коэффициент трения увеличивается до 0,20–0,32, причем в большей степени (0,3–0,32) при отсутствии в покрытии нитрида титана; введение в состав покрытия нитрида титана без сплава бронза–сталь несколько увеличивает коэффициент трения на этапе притирания (до 0,1).

Наибольшая износостойкость наблюдается у образцов с покрытием из нитрида титана и бронза–сталь, что объясняется смазывающим эффектом бронза–сталь покрытия, снижающим коэффициент трения и одновременно повышающим твердость образцов за счет покрытия из нитрида титана.

Интенсивность коррозионного износа образцов с составами покрытий групп 1 и 2 примерно одинакова и несколько ниже с основой из стали 12X18H10T и покрытием TiN, для групп 3 и 4 характерно резкое повышение износа после четырех минут испытаний, для группы 3 интенсивность износа минимальна.

Разработан технологический регламент нанесения комбинированного покрытия сталь–медный сплав–нитрид титана: подготовка основы под покрытие резанием со скоростью 5–8 м/с и создание «сетчатого» микроре-

льефа поверхности, нанесение газотермическим методом покрытия из стали и медного сплава толщиной 0,1–1 мм (диаметр проволоки 1,2–2,0 мм, скорость подачи проволоки 0–6,3 м/мин, рабочий ток дуги до 500 А, расход воздуха 60 м³/ч, расход газа 0,011 кг/мин), шлифование и полирование поверхности до Ra 0,63 мкм, нанесение ионно-плазменным методом покрытия из нитрида титана толщиной 1–3 мкм (вакуум $5 \cdot 10^{-3}$ Мпа, давление азота 0,097 Па и пропана 100 Па, температура нагрева образцов 200 °С, ток 90А).

Литература

1. Смирнов, А. И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А. И. Смирнов. – М. : НИИМаш, 1982. – 49 с.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Наука, 1988. – 640 с.
3. Roco, M. Convergiug Technologies For Emproviug Human Perfomance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology And Cognitive Science / M. Roco, W. Bainbridge. – Arlington : National Science Foundation, 2004. – 468 p.
4. Ковальчук, М. В. Конвергенция наук и технологий – новый этап научно-технического развития / М. В. Ковальчук, О. С. Нарайкин, Е. Б. Яцинина // Вопросы философии. – 2013. – № 3. – С. 3–12.
5. DIN 8580. Fertigungsverfahren; Einteilung.
6. ГОСТ Р 57558-2017 / ISO / ASTM 52900-15. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – М. : Стандартиформ, 2017. – 16 с.
7. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1983. – 6 с.
8. Справочник по технологии резания материалов. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Г. Шпура, Т. Штеферле. – М. : Машиностроение, 1985. – 614 с.
9. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсунов, Ю. М. Барон [и др.] ; под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л. : Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1988. – 719 с.
10. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 392 с.
11. Хасуй А. Техника напыления: [пер. с япон.]. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.
12. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов ; под ред. В. Н. Чачина. – Минск : Выш. шк., 1988. – 155 с.
13. Мрочек, Ж. А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж. А. Мрочек, Б. А. Эйзнер, Г. В. Марков. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 96 с.
14. Емельянов, В. А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В. А. Емельянов, Ж. А. Мрочек, В. А. Иванов. – Минск : Интеграл, 1998. – 284 с.
15. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / А. В. Белый, В. А. Кукареко, О. В. Лободаева и др. – Минск : ФТИ НАН Б, 1998. – 220 с.
16. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие / М. Л. Хейфец, Л. М. Акулович, Ж. А. Мрочек [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2012. – 292 с.
17. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Минск, 2021. – 43 с.
18. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М. : Машиностроение, 1986. – 192 с.
19. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом / В. М. Шеменков [и др.] ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменкова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с. : ил.

20. Попок, Н. Н. Ионные источники: виды, конструкции, применения (Ion Sources: Variety, Construction, Application) / Н. Н. Попок, С. В. Дербуш, А. Н. Попок. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 41 с.
21. Физические и технологические основы ионно-лучевой обработки материалов : пособие / А. В. Белый, В. А. Кукареко, Н. Н. Попок [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 84 с.
22. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования : учеб. пособие / И. Н. Кравченко, А. Ф. Пузряков, В. М. Корнеев [и др.]. – М. а: ИНФРА-М, 2020. – 346 с.
23. Инженерия поверхностей деталей нанесением регулярного микрорельефа и износостойкого покрытия / Н. Н. Попок, Я. С. Сачивко, Р. С. Хмельницкий [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: в 3 кн. / МНТК, ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2018. – Кн. 2 : Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 212–217.
24. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение : Ленингр. отд-ние, 1982. – 248 с.
25. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов [и др.] ; под ред. В. П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
26. Белоцерковский, М. А. Структурно-фазовое состояние и износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из проволочных высокохромистых сталей / М. А. Белоцерковский, А. Н. Григорчик, Н. Н. Попок // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. В 3 кн. / редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Кн. 2 : Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 117–122.
27. Исследование зависимости прочности сцепления покрытий от различных способов подготовки поверхностей деталей под покрытие напылением. / В. А. Соколова, В. А. Марков, Г. К. Парфенопуло [и др.] // Тр. МАиП ПСиМ. – 2018. – № 1. – С. 104–105.
28. Белый, А. В. Инженерия поверхности конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А. В. Белый, В. А. Кукареко, А. Патеюк. – Минск : Беларус. навука, 2007. – 244 с.
29. Каталог Sandvik Coromant. Металлорежущие вращающиеся инструменты и оснастка. – 2015.
30. Попок, Н. Н. Шероховатость поверхности детали при обработке ротационным инструментом с прерывистой режущей кромкой / Н. Н. Попок // Машиностроение. – Минск, 1990. – Вып. 15. – С. 18–22.
31. Сравнительная стойкость комбинированных покрытий. / Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (21–22 апр. 2020 г.) / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов, Д. А. Башлачев [и др.] ; под ред. В. К. Шелега, Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 157–160.
32. Технологический регламент комбинированного упрочнения деталей машин и режущих инструментов / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, В. С. Анисимов [и др.] // Высокие технологии в машиностроении : материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. / отв. ред. Р. Г. Гришин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 63–68.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1. – 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

Таблица Б.1. – Рекомендуемые режимы ионно-лучевой обработки

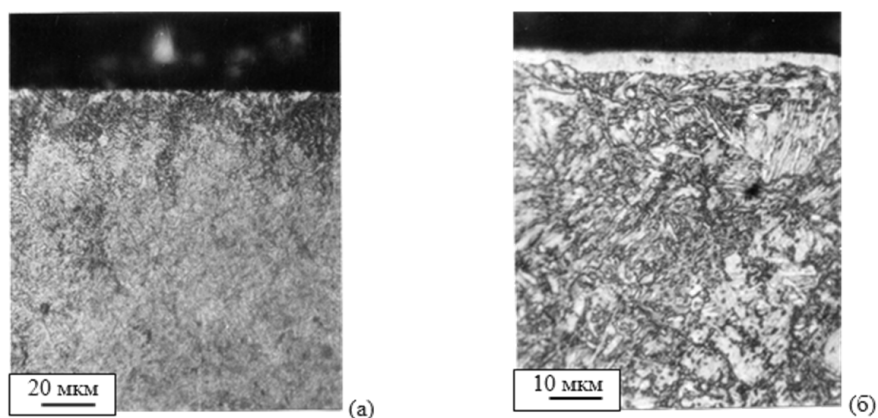
Напряжение, кВ	Плотность тока, А/см ²	Температура ионно-лучевой обработки, К
1,0	0,5	620
1,5	1,0	670
2,0	1,5	720
2,5	2,0	720

ПРИЛОЖЕНИЕ В

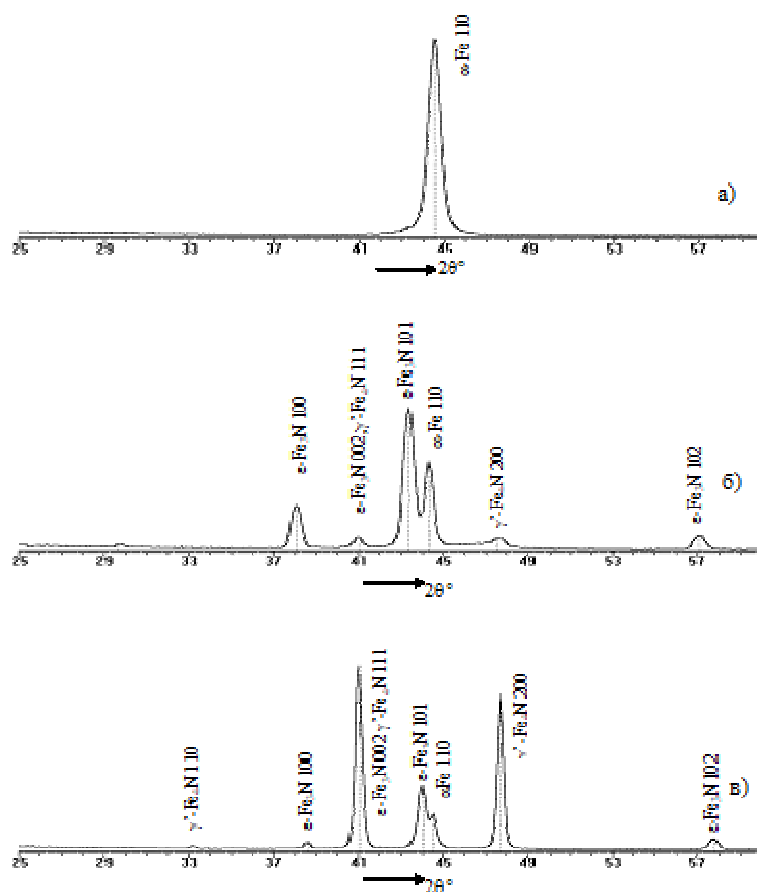
Таблица В.1. – Протокол исследования процесса ионно-лучевой обработки поверхностей детали-образца

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

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



**Рисунок Г.1. – Микроструктура стали 40Х,
обработанной концентрированными потоками ионов азота
при 670 К (а) и 770 К (б)
(плотность тока ионного пучка 2 МА·см⁻², доза – 3·10¹⁹ ион·см⁻²)**



**а – неимплантированная сталь;
б – имплантация Na⁺ при 670; в – то же, при 770 К**

**Рисунок Г.2. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CuKα)
от поверхностных слоев закаленной стали 40Х**

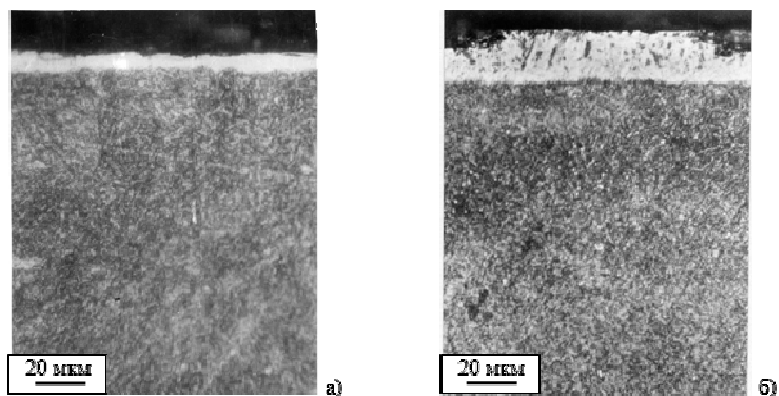
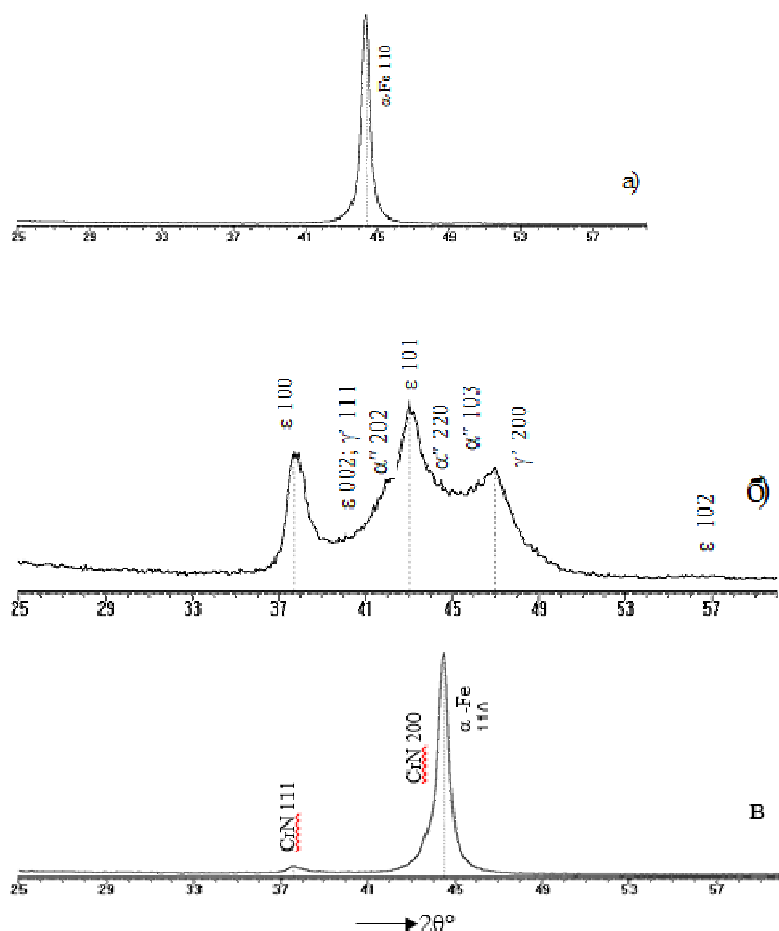
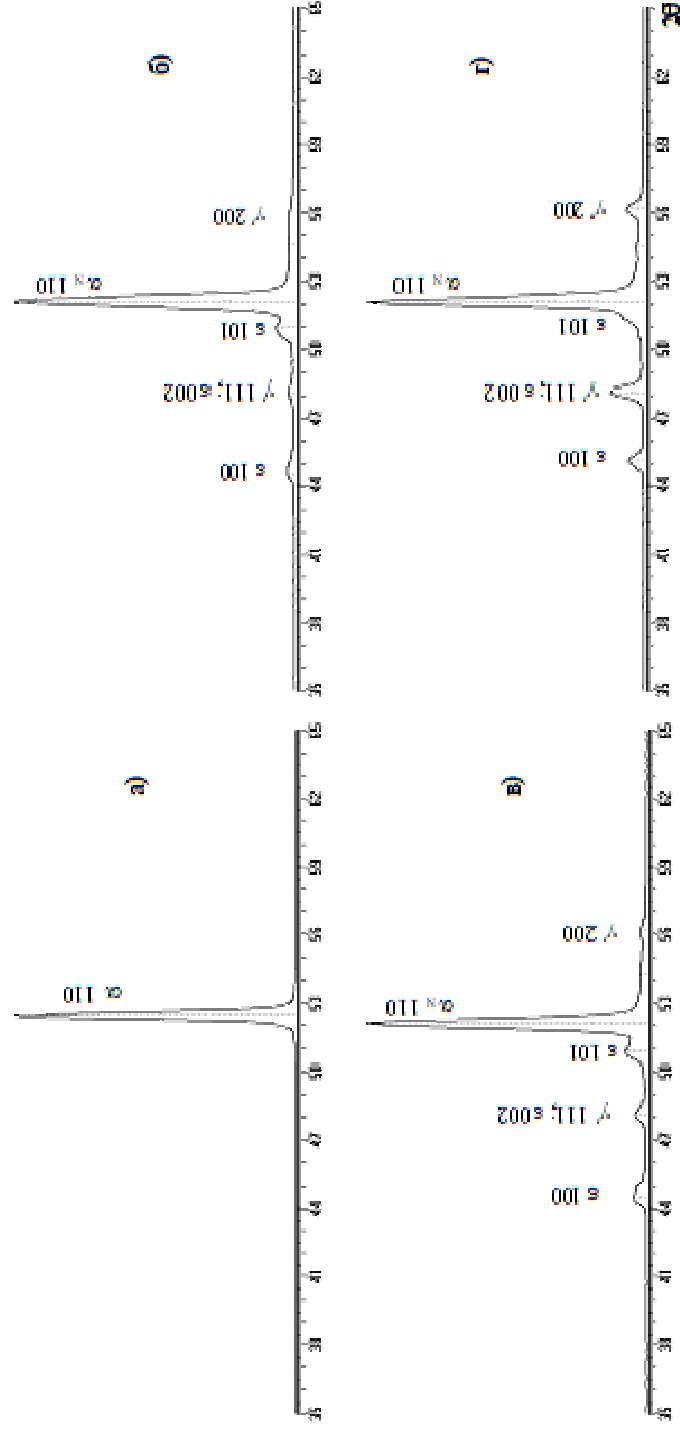


Рисунок Г.3. – Микроструктура стали 40X13, обработанной концентрированными потоками ионов азота при 670 К (а) и 770 К (б) (плотность тока ионного пучка $2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, доза – $3 \cdot 10^{19} \text{ ион} \cdot \text{cm}^{-2}$).



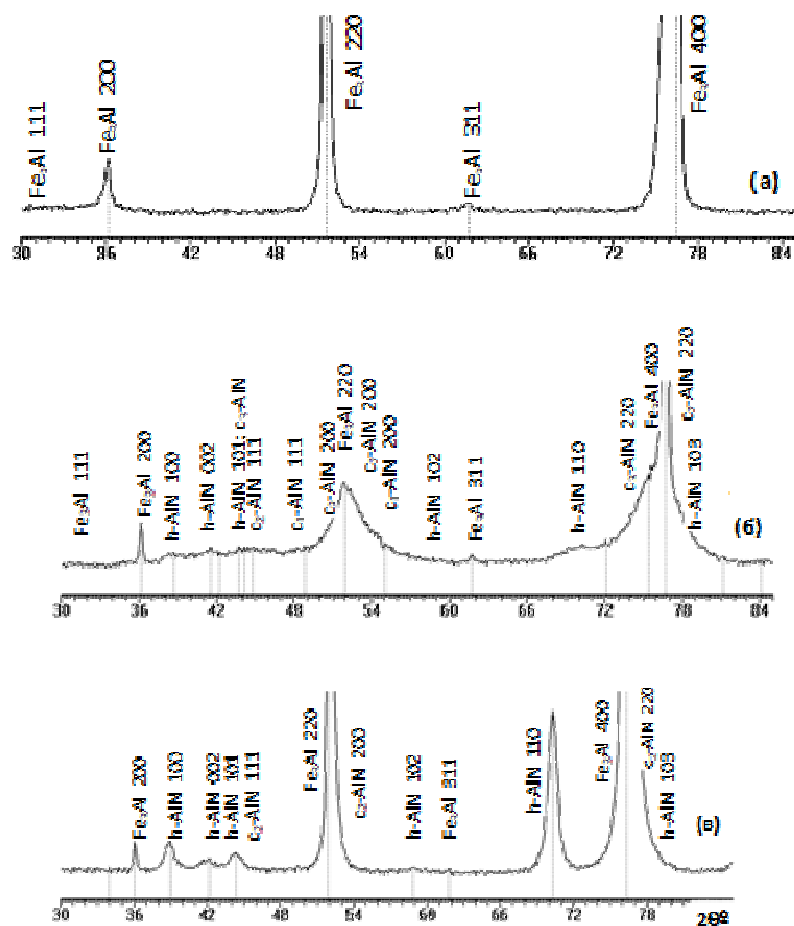
**а – неимплантированная сталь;
б – имплантация Na^+ при 670; в – то же, при 770 К**

Рисунок Г.4. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CuK}\alpha$) от поверхностных слоев закаленной стали 40X13



a – исходное состояние (закалка + отпуск); *б* – имплантация N^+ при 670 K;
в – то же, при 720 K; *г* – то же, при 770 K

Рисунок Г.5. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α)
от поверхностных слоев стали 12X1МФ,
имплантированной концентрированными потоками ионов азота
при различных температурах



а – исходное состояние;
б – обработка N^+ при 770 К; в – то же при 870 К.

Рисунок Г.6. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($CoK\alpha$) от поверхностных слоев сплава Fe_3Al , прошедшего обработку по различным режимам

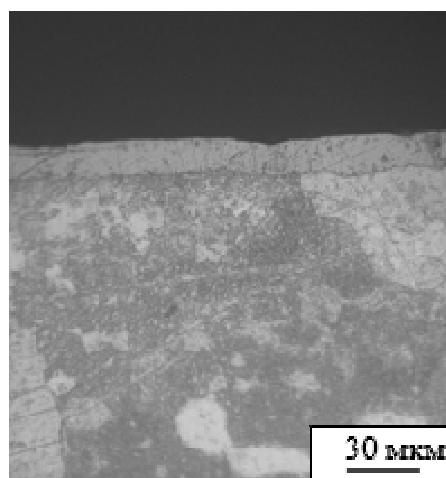


Рисунок Г.7. – Микроструктура интерметаллического сплава Fe_3Al , подвергнутого ионно-лучевому азотированию при температуре 870 К, время 2 ч

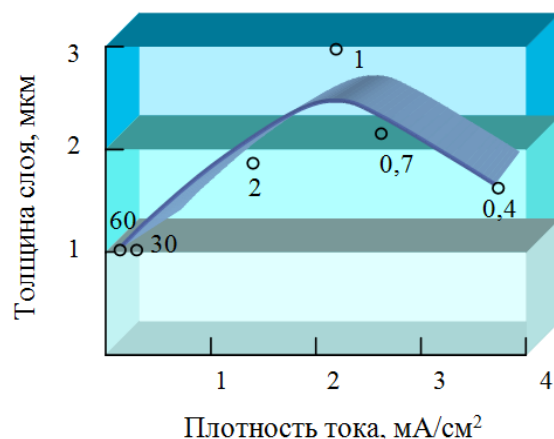
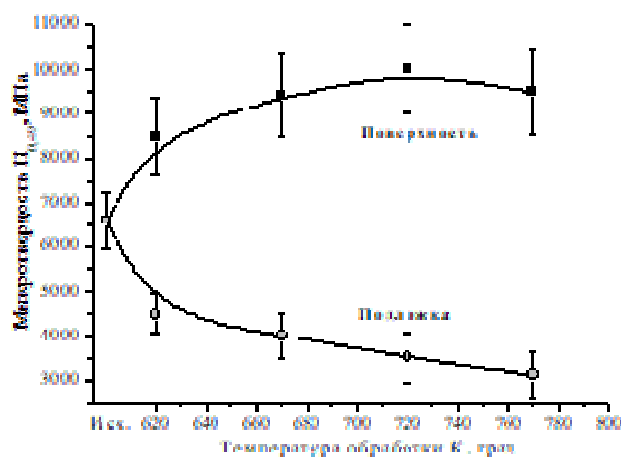
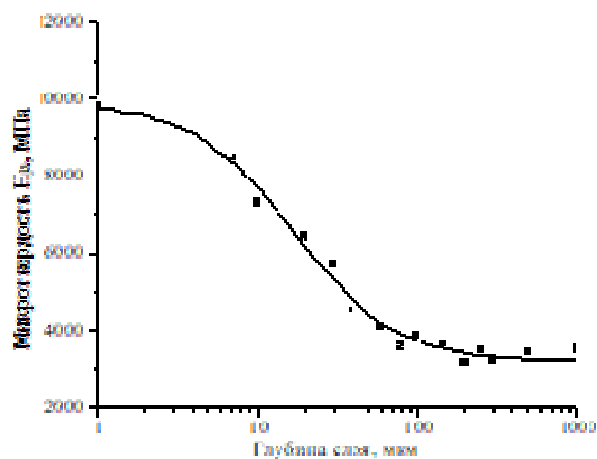


Рисунок Г.8. – Влияние плотности ионного тока на толщину модифицированного слоя при имплантации ионов азота



а



б

Рисунок Г.9. – Зависимость микротвердости Н0,49 модифицированного поверхностного слоя стали 40Х от температуры обработки концентрированными потоками ионов азота (а) и распределение микротвердости по глубине имплантированной при 770 К стали 40Х (б)

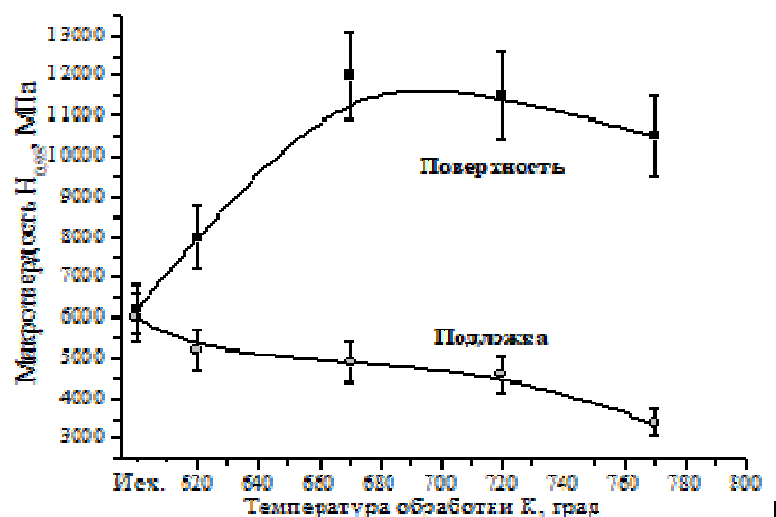


Рисунок Г.10. – Зависимость микротвердости Н0,98 модифицированного концентрированными потоками ионов азота поверхностного слоя и подложки стали 40Х13 от температуры обработки

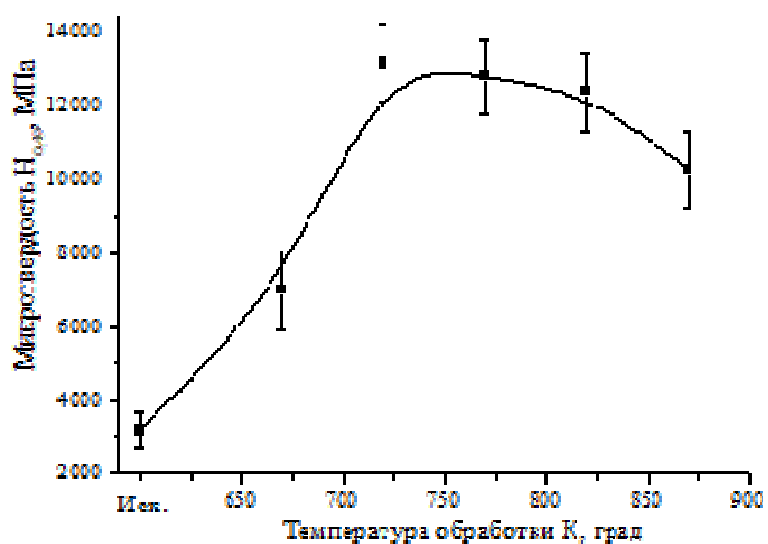
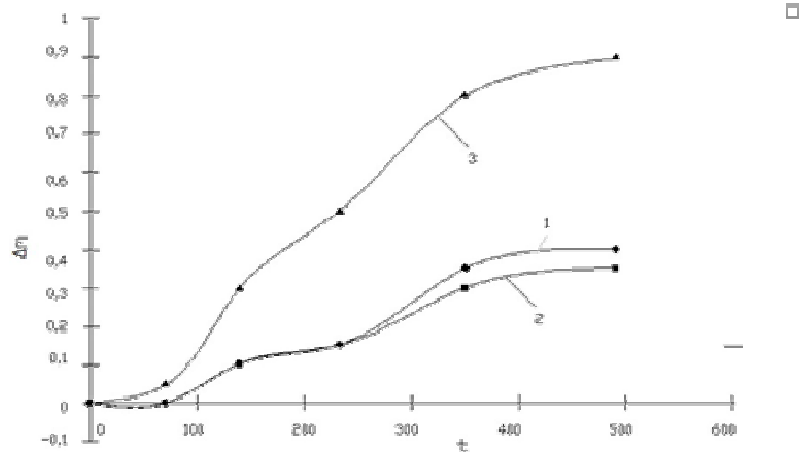


Рисунок Г.11. – Зависимость микротвердости Н0,49 модифицированного концентрированными потоками ионов азота поверхностного слоя сплава Fe3Al от температуры обработки



1 – исходное состояние; 2 – имплантация N^+ при 670 К; 3 – то же при 770 К

Рисунок Г.12. – Зависимость величины коррозионного растворения 10% водном растворе NaCl обработанной по различным режимам стали 12X18H10T от времени испытаний

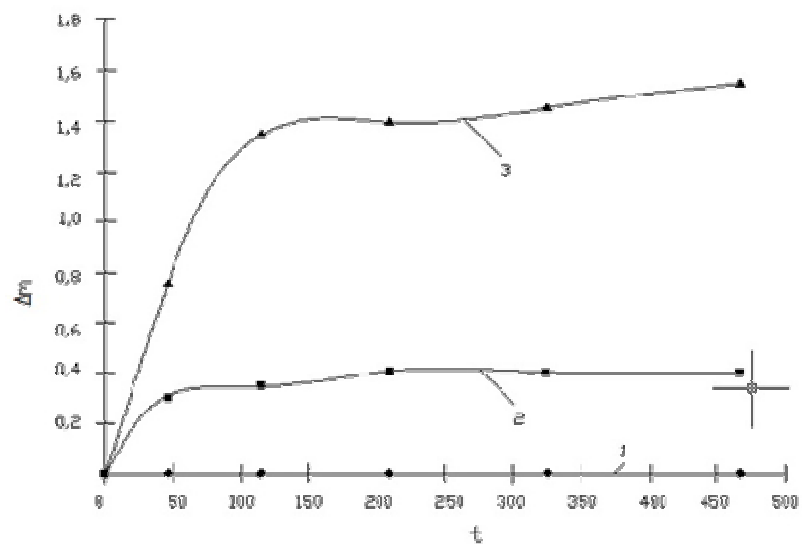
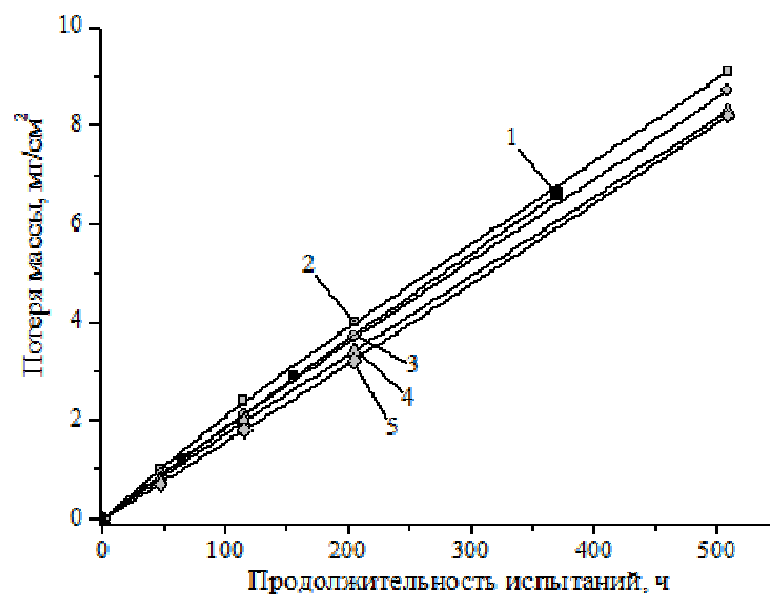
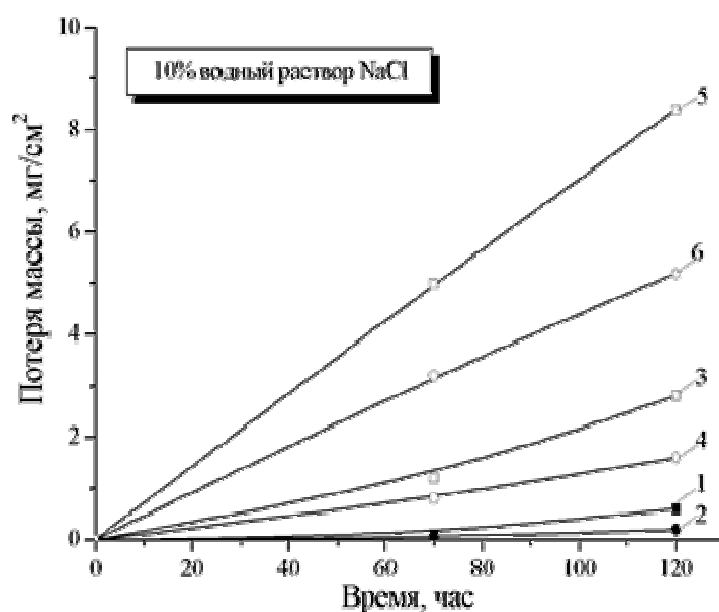


Рисунок Г.13. – Зависимость величины коррозионного растворения в 10% водном растворе CH_3COOH обработанной по различным режимам стали 12X18H10T от времени испытаний



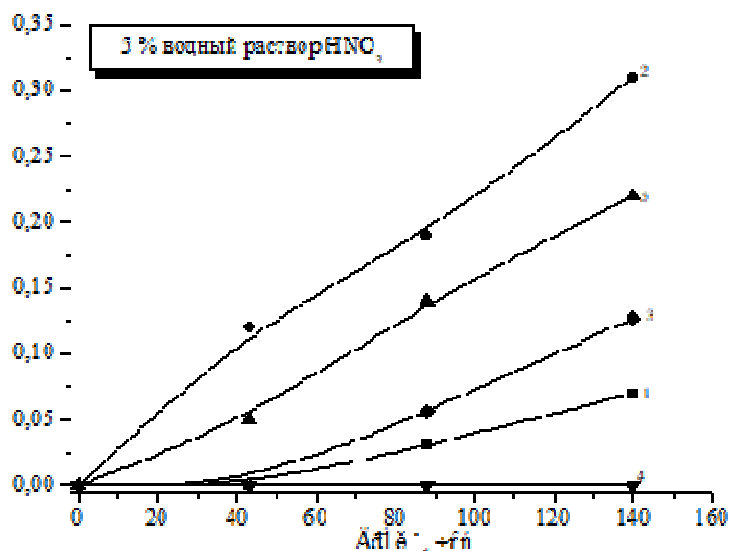
1 – исходное состояние; 2 – имплантация N⁺ при 670;
3 – то же, при 720 К; 4 – то же, при 770 К; 5 – то же, при 820 К

Рисунок Г.14. – Зависимость величины коррозионного растворения в 10% водном растворе NaCl стали 12X1МФ от режима ионно-лучевого азотирования



1. 3, 5 – исходное состояние; 2, 4, 6 – обработка N⁺ при 770 К

Рисунок Г.15. – Зависимость величины коррозионного растворения в 10% водном растворе NaCl от времени испытания и режима обработки образцов стали с покрытием Cu-Ni (1, 2), стали ННS-0024 (3, 4) и твердого сплава ВК8 (5, 6)



1 – VT1-00; 2 – деформация $\epsilon = 2,1$;
 3 – деформация и ионно-лучевое азотирование при 720 К (2 ч);
 4 – то же, при 770 К; 5 – то же, при 820 К

Рисунок Г.16. – Зависимость величины коррозионного растворения титана VT1-00 в 5% водном растворе HNO_3 от режима обработки

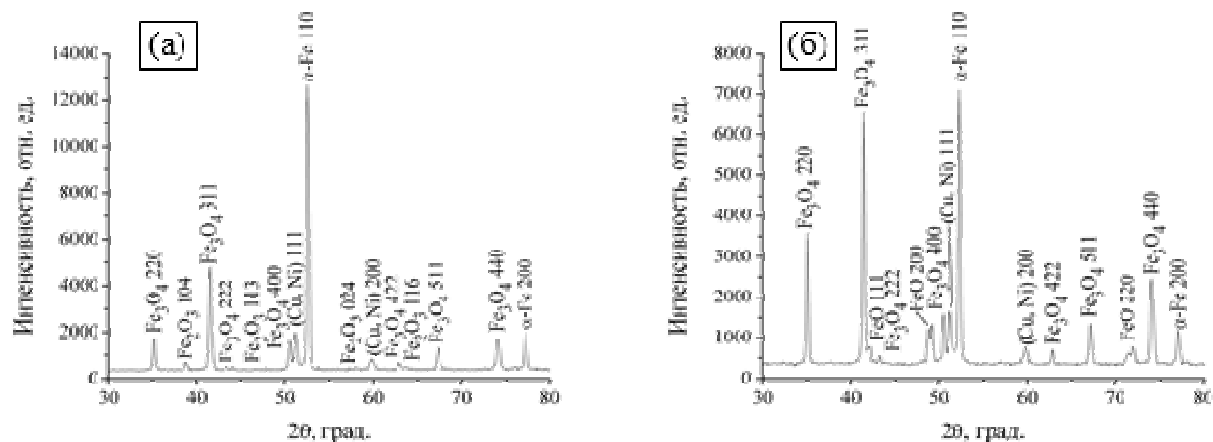


Рисунок Г.17. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKa) от покрытий Cu-Ni, подвергнутых оксинитрированию при температурах 770 К (а) и 850 К (б)

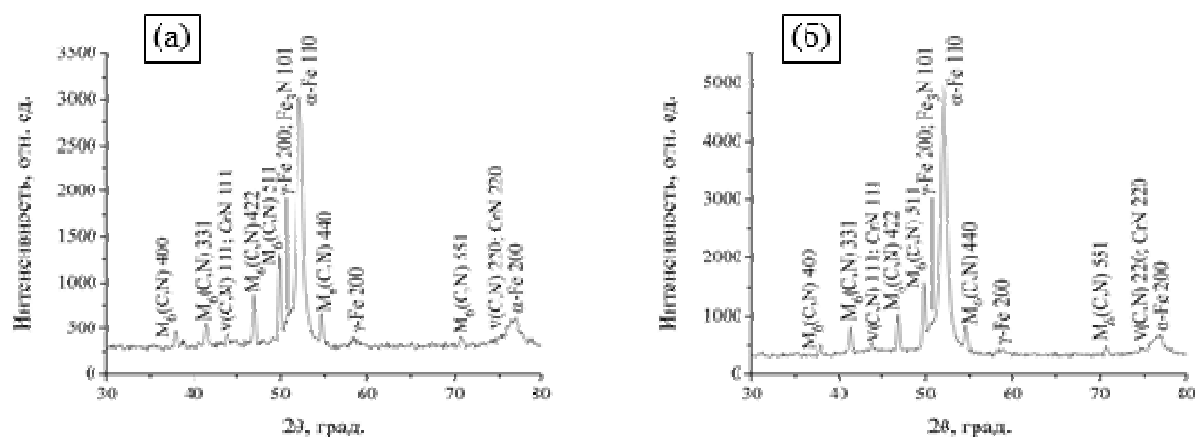
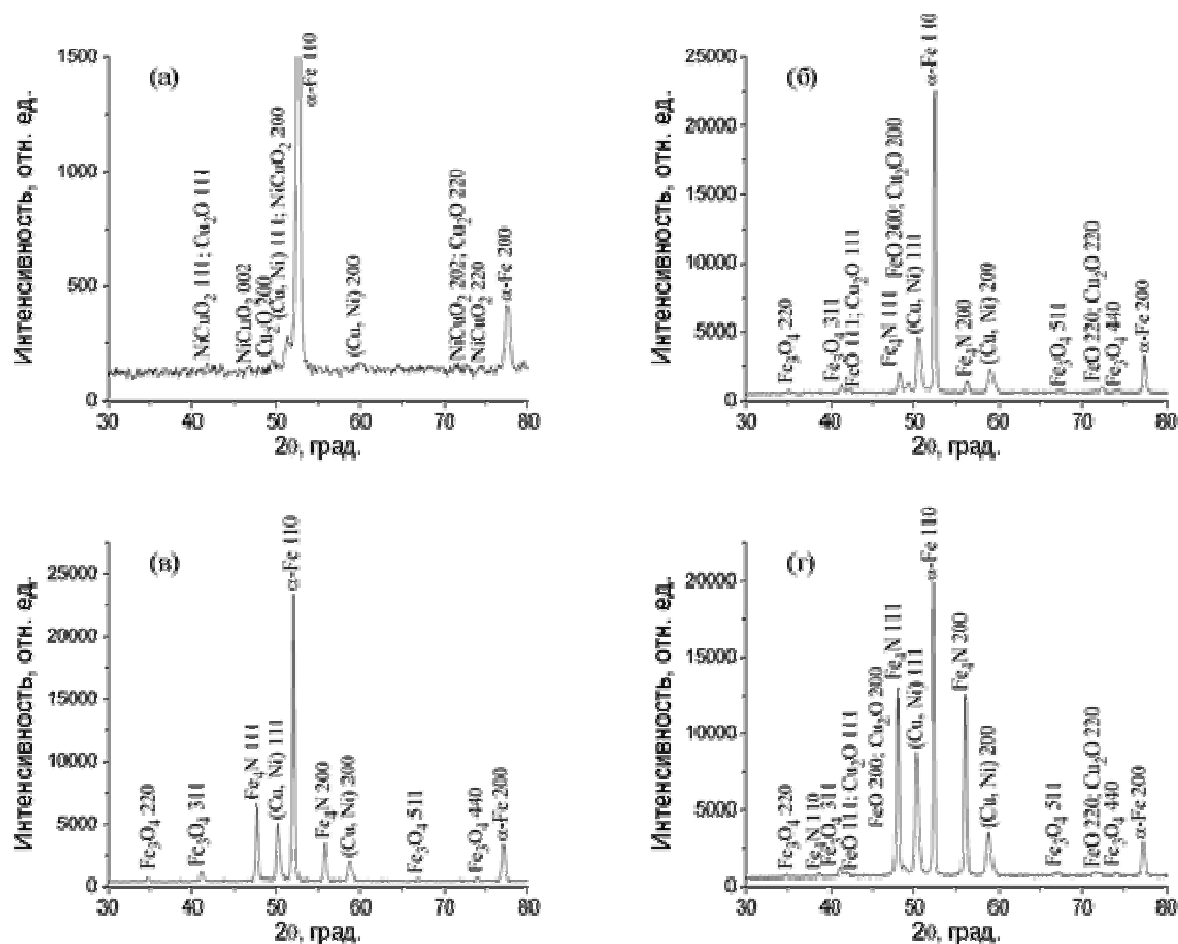
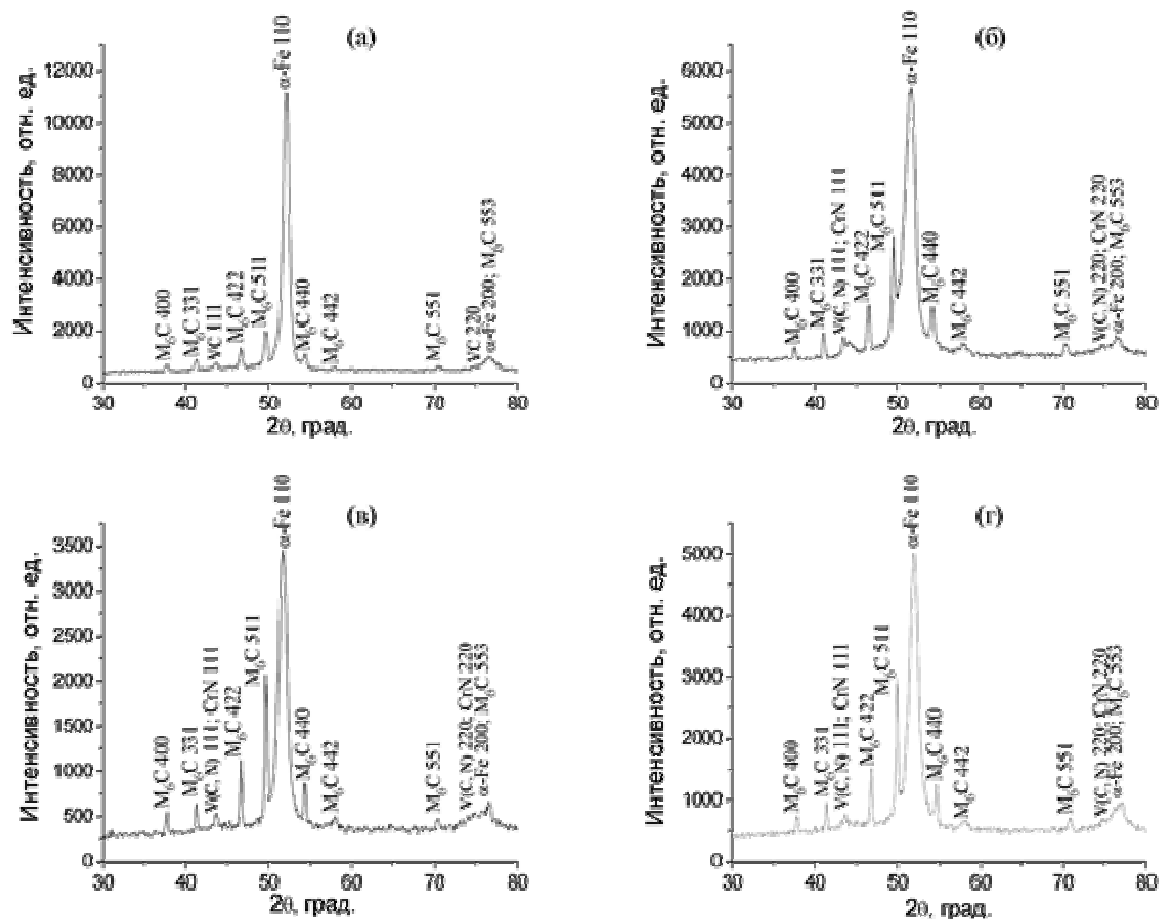


Рисунок Г.18. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от образцов быстрорежущей стали HSS-0024, подвергнутых оксинитрированию при температурах 770 К (а) и 850 К (б)



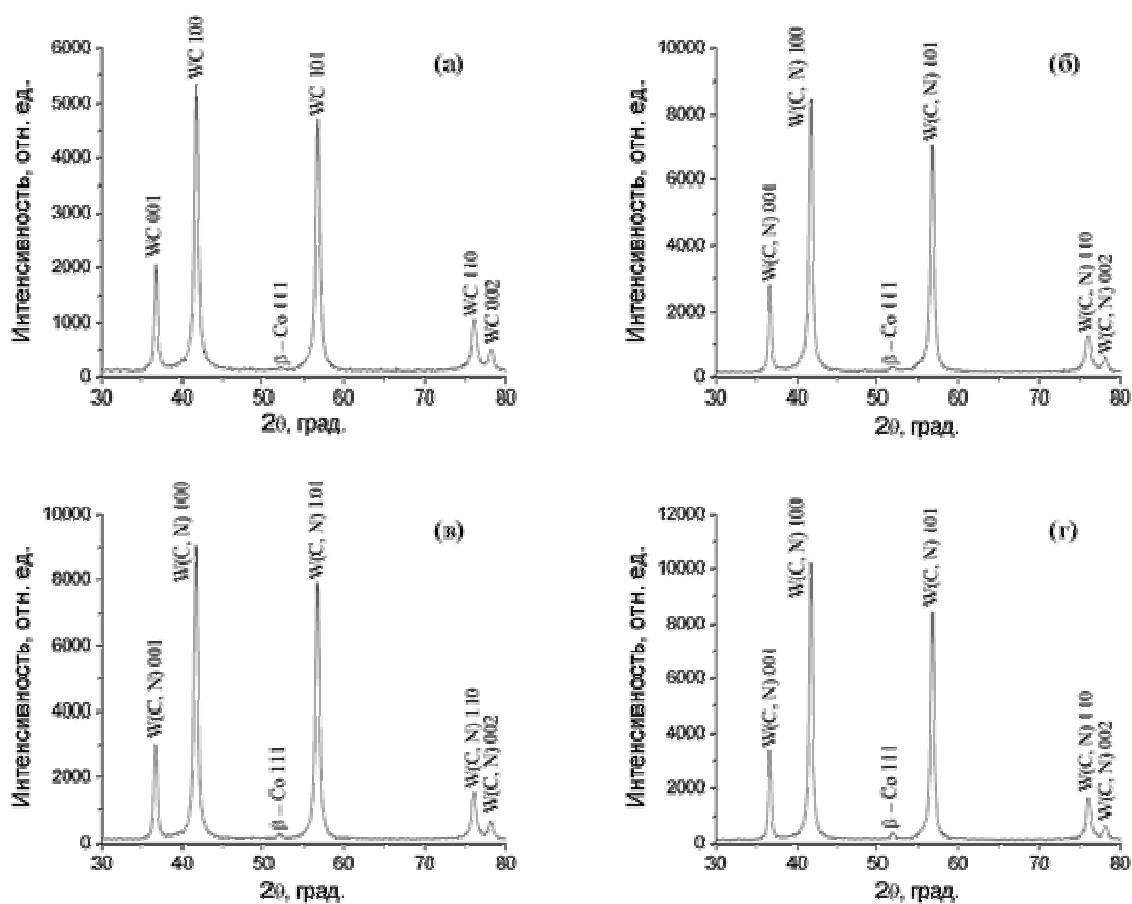
а – исходное состояние; б – обработка N+ при 720 К;
в – то же, при 770 К; г – то же, при 820 К

Рисунок Г.19. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностных слоев стального образца с покрытием из сплава Cu-Ni



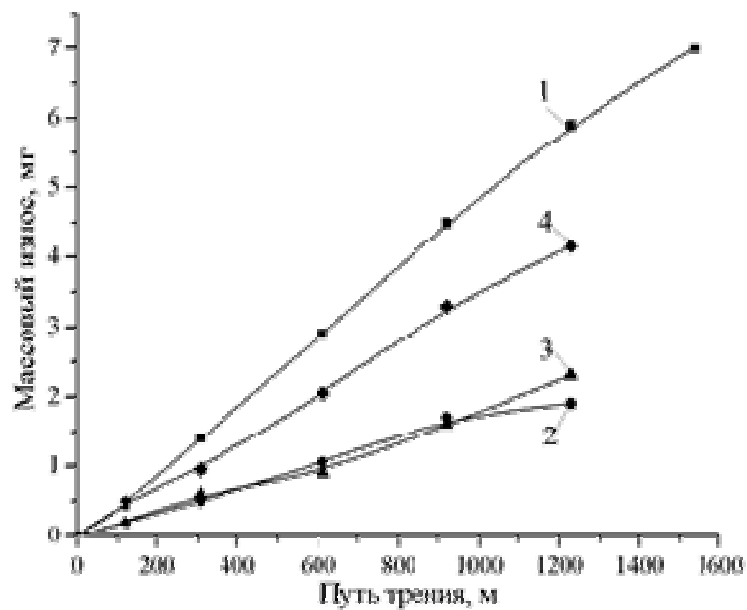
a – исходное состояние; *б* – обработка N+ при 720 К;
в – то же, при 770 К; *г* – то же, при 820 К

**Рисунок Г.20. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKα)
от поверхностных слоев образцов стали HSS
после различных режимов обработки**



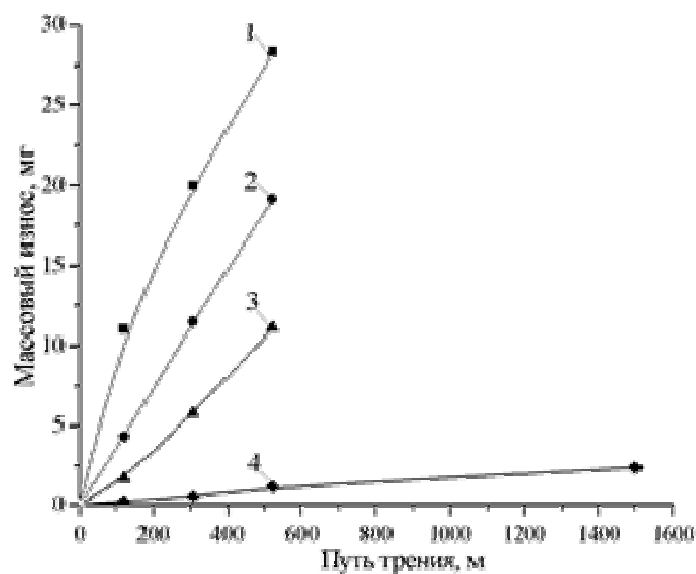
a – исходное состояние; *б* – обработка N+ при 720 К;
в – то же, при 770 К; *г* – то же, при 820 К

**Рисунок Г.21. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKα)
от поверхностных слоев образцов твердого сплава ВК8
после различных режимов обработки**



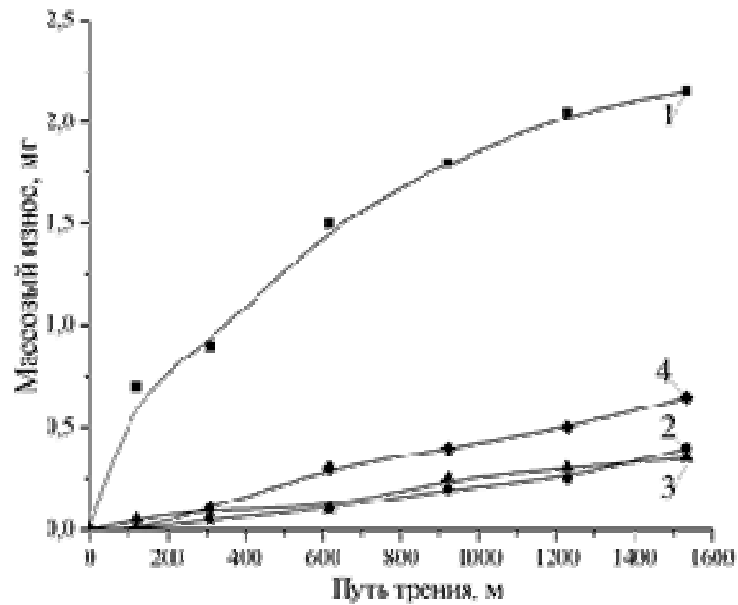
a – исходное состояние; *б* – обработка N+ при 720 К;
в – то же, при 770 К; *г* – то же, при 820 К

Рисунок Г.22. – Зависимости величины массового износа от пути трения для образцов стали ННС-0024, обработанных по различным режимам



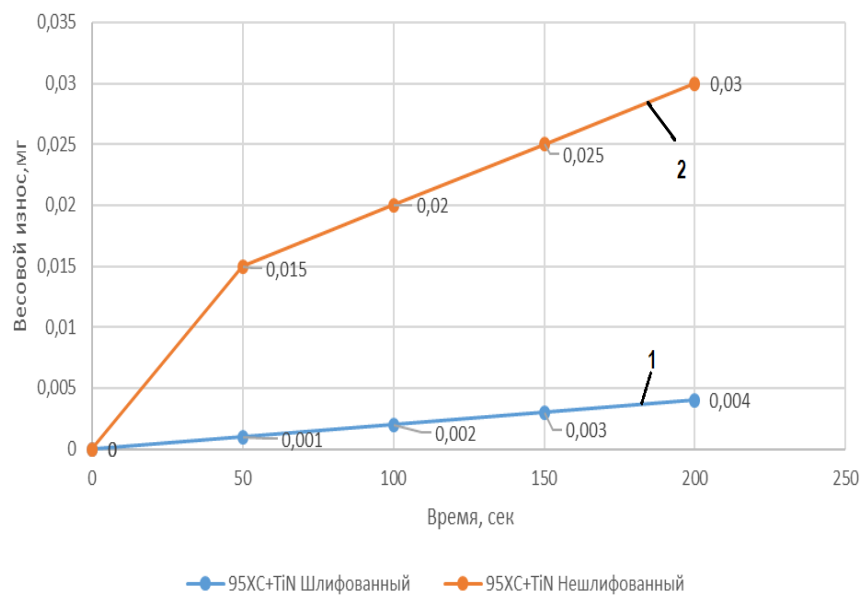
a – исходное состояние; *б* – обработка N+ при 720 К;
в – то же, при 770 К; *г* – то же, при 820 К

Рисунок Г.23. – Зависимости величины массового износа от пути трения для образцов стали с покрытием Cu-Ni, обработанных по различным режимам



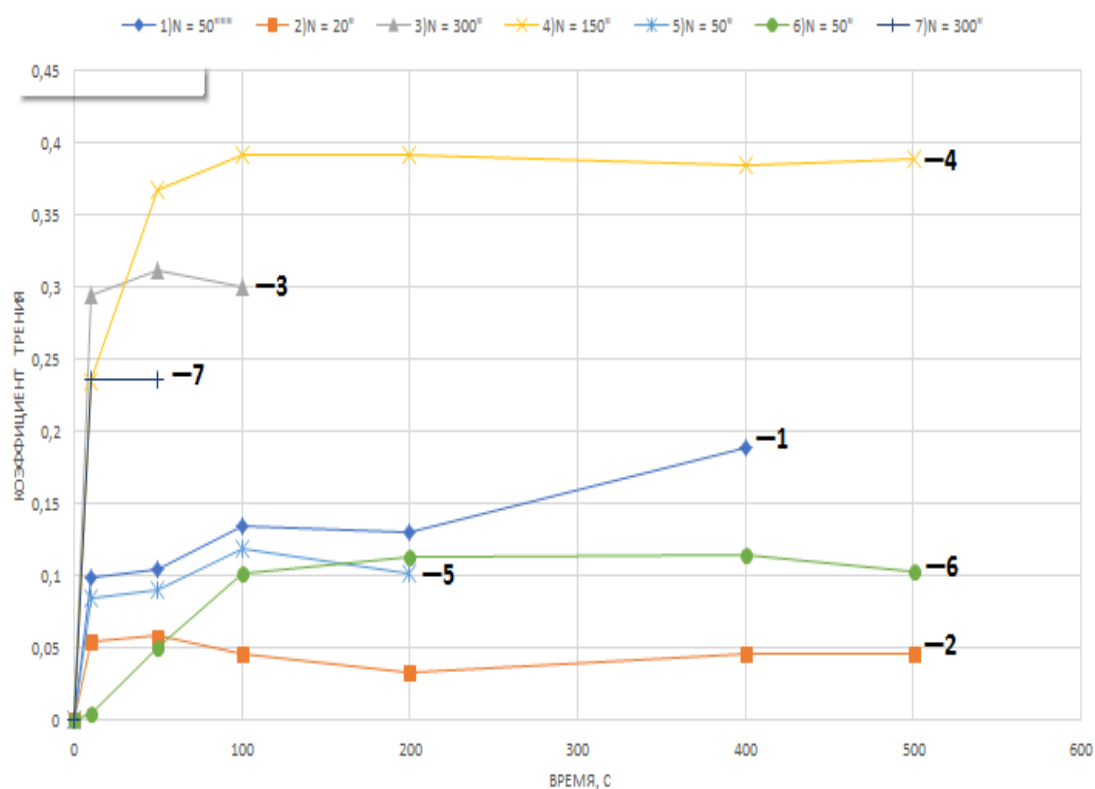
a – исходное состояние; *b* – обработка N+ при 720 К;
в – то же, при 770 К; *г* – то же, при 820 К

Рисунок Г.24. – Зависимости величины массового износа от пути трения для образцов твердого сплава ВК8 с покрытием, обработанных по различным режимам



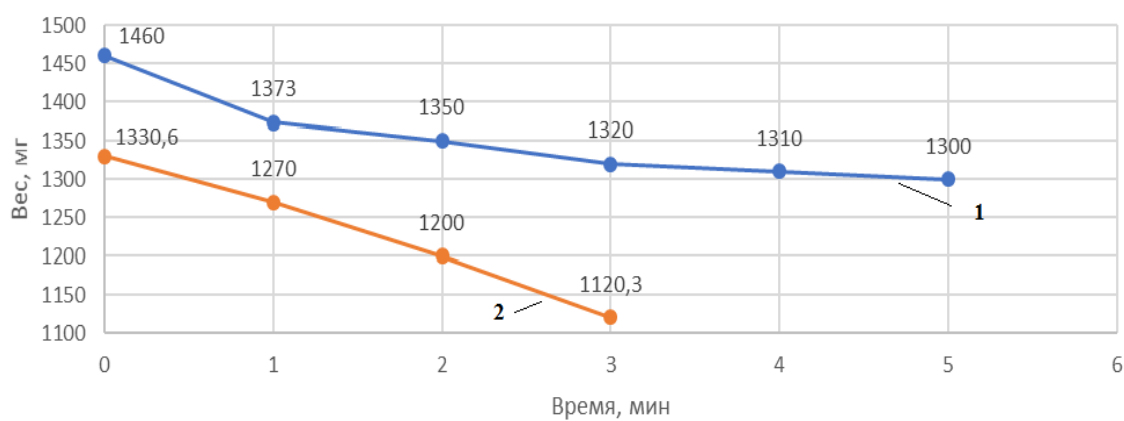
1 – шлифованный; 2 – нешлифованный

Рисунок Г.25. – Зависимости износостойкости образцов от времени испытания



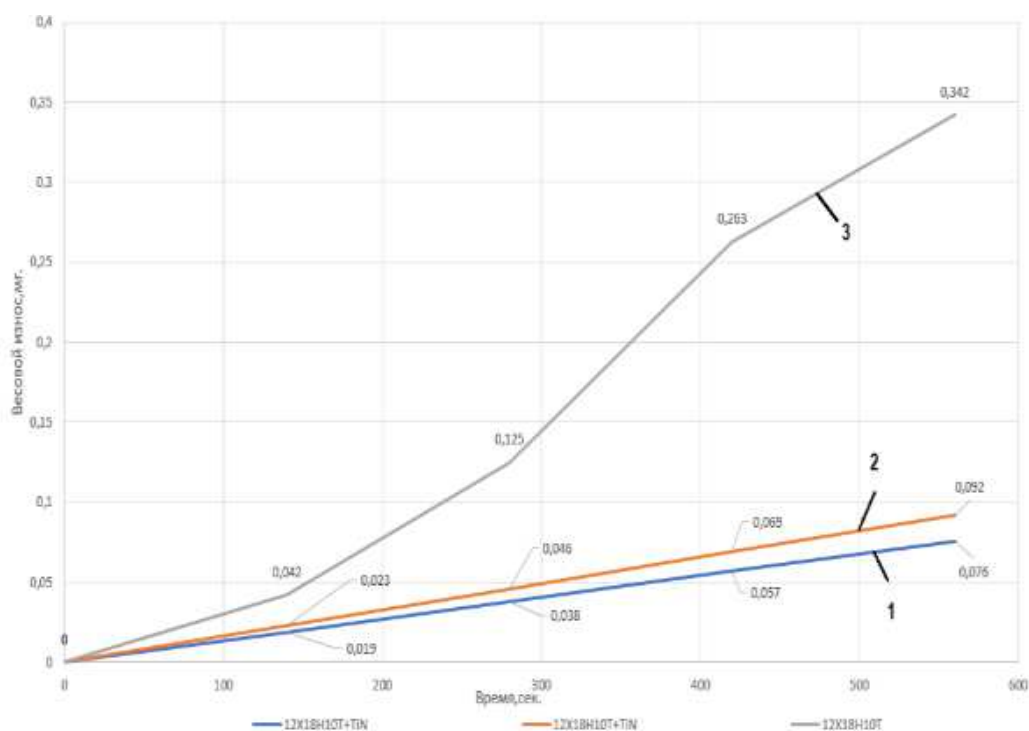
1 – $N = 50^\circ$; 2 – $N = 20^\circ$; 3 – $N = 300^\circ$; 4 – $N = 150^\circ$;
 5 – $N = 50^\circ$; 6 – $N = 50^\circ$; 7 – $N = 300^\circ$

Рисунок Г.26. – Зависимость коэффициента трения от времени нанесения при нагрузке



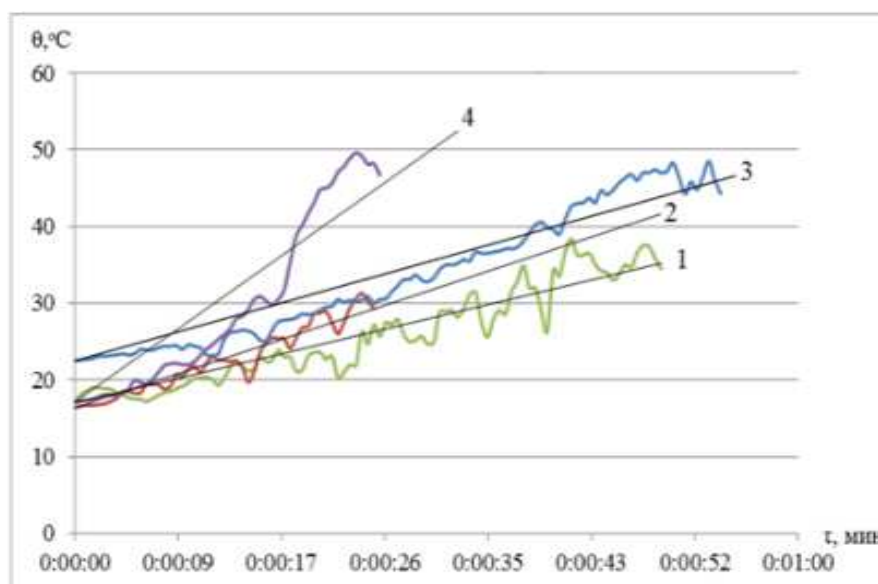
1 – без покрытия; 2 – с покрытием TiN

Рисунок Г.27. – Зависимости износа образцов от времени травления



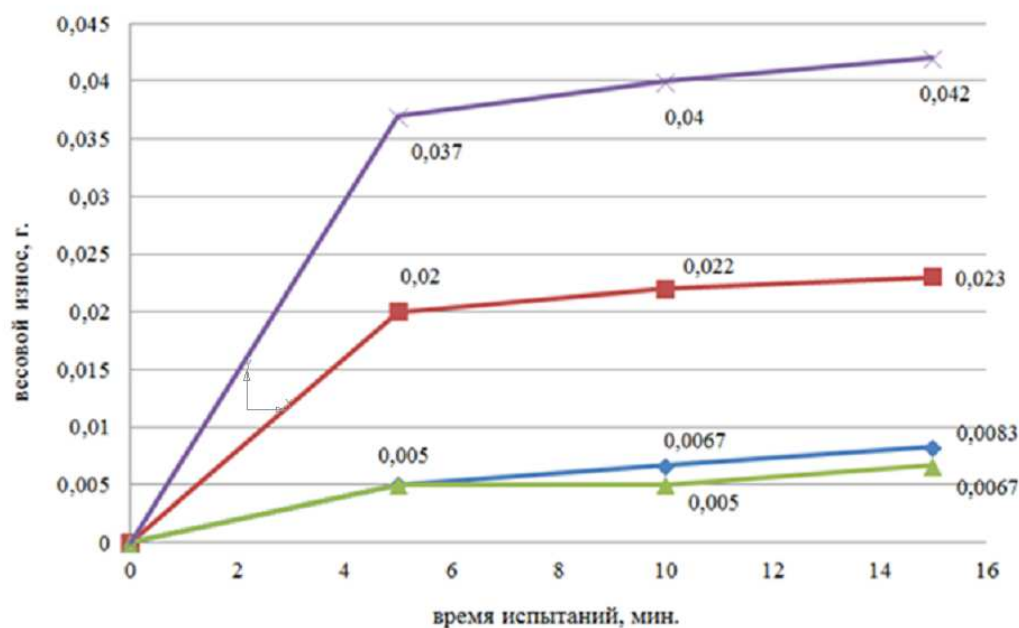
1, 2 – образцы с напыленным нитридом титана;
3 – образец без напыления

Рисунок Г.28. – Зависимости износа образцов третьей группы от времени испытания



1 – при $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$, $S_n = 1,61 \text{ мм/мин}$; 2 – $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$, $S_n = 2,25 \text{ мм/мин}$;
3 – $n_1 = 9000 \text{ мин}^{-1}$, $S_n = 0,853 \text{ мм/мин}$; 4 – $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$, $S_n = 1,543 \text{ мм/мин}$;
диаметр детали – 35 мм, частота вращения детали $n_2 = 200 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок Г.29. – Зависимости изменения температуры поверхности детали от времени обработки



1 – 12X18H10T+TiN; 2 – 12X18H10T+бронза–сталь+TiN;
3 – 40X+бронза–сталь+TiN; 4 – 40X+бронза–сталь

Рисунок Г.30. – Весовой износ покрытий составов

Таблица Г.1. – Твердость HV и микротвердость $H_{0,19}$ термообработанной стали X12BM до и после обработки ионами азота ($j \approx 2 \text{ мА см}^{-2}$) при различных температурах

Сталь X12BM					
Измеряемая характеристика	Режим обработки				
	Исходное состояние	Температура ионно-лучевой обработки, К			
		620	670	720	770
Микротвердость поверхности $H_{0,19}$, МПа	6100	9600–10 000	16 000–16 500	14 000–15 000	10 500–11 000
Твердость стали HV, МПа	5950	5800	5700	5300	4900

Таблица Г.2. – 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

Таблица Г.3. – Глубина слоя, микротвердость и фазовый состав исследуемых материалов после ионно-лучевой обработки

Сталь	Обработка	Глубина модифицированного слоя, мкм	Микротвердость $H_{0,419}$, МПа	Основные фазы
55X20Г9АН4	Исходный	–	3500	γ -Fe, $M_{23}C_6$
	620 К	3–4	4500	γ -Fe, $M_{23}C_6$, γ_N , CrN, α -Fe
	650 К	4–6	5000	γ -Fe, γ_N , CrN, $M_{23}C_6$ (сле- ды), α -Fe
	670 К	6–8	7000	γ -Fe, γ_N , CrN, α -Fe
	690 К	8–10	11500	γ -Fe, γ_N , CrN, α -Fe
	720 К	10–14	15 000	γ -Fe, γ_N , CrN, α -Fe
	770 К	15–25	14 500	γ_N , CrN, α -Fe
	820 К	28–32	12 300	CrN, α -Fe
	870 К	35–40	11 400	CrN, α -Fe
10X17H13M2T	Исходный	–	2200	γ -Fe
	620 К	2–3	2500	γ -Fe, γ_N
	650 К	3–4	4000	γ -Fe, γ_N
	670 К	4–6	4500	γ -Fe, γ_N
	690 К	6–8	5400	γ -Fe, γ_N
	720 К	10–11	14 500	γ -Fe, γ_N
	770 К	17–20	14 000	CrN, α -Fe, γ_N
	820 К	20–25	13 300	CrN, α -Fe, γ_N
	870 К	33–35	12 000	CrN, α -Fe

Таблица. Г.4. – Значение параметров шероховатости поверхности образцов с покрытием TiN

Образец А						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	5,647	5,380	6,278	4,457	12,031	6,457
Rq:	7,699	7,245	8,786	5,954	17,779	7,803
Образец Б						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	259,181	253,016	29,945	30,982	341,140	481,256
Rq:	316,278	306,588	52,396	41,530	406,016	507,758
Образец В						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	19,271	15,281	10,970	9,210	10,195	11,998
Rq:	29,292	25,509	20,590	15,324	18,832	22,289

Таблица Г.5. – Микротвердость участков поверхности сферы с покрытием

Номер измерения	Маркировка образца	Микротвердость, HV 0,01
1	Образец А (блестящий)	802
2		747
3		815
4		797
Среднее значение образца А		790–800
1	Образец Б (с отверстием)	797
2		747
3		747
4		731
Среднее значение образца Б		750–760
1	Образец В (матовый)	656
2		634
3		647
4		673
Среднее значение образца В		650–660

Учебное издание

ПОПОК Николай Николаевич
АНИСИМОВ Виталий Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области машиностроительного оборудования и технологий
в качестве учебно-методического пособия
для студентов специальности 6-05-0714-02
«Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты»*

Редактор *Т. А. Дарьянова*
Дизайн обложки: *отдел по связям с общественностью*

Подписано в печать 12.09.2025. Формат 60х84 1/8. Бумага офсетная 80 г/м².
Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,03. Уч.-изд. л. 4,86. Тираж 30 экз. Заказ 360.

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

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014, перерегистрация от 24.08.2022.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

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