

1546389

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени
государственный технический университет
им. И.Э.Баумана

На правах рукописи

Волчкович Илья Леонидович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ИМПУЛЬСНО-ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Специальность 05.03.01. "Процессы
механической и физико-технической
обработки, станки и инструменты"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

И. Волков

Москва 1994 г.

ИТУ

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель : доктор технических наук, профессор
Подураев В.Н.
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Верещака А.С.
кандидат технических наук
Андреев В.Н.

Ведущая организация - Национальный Институт Авиационных
Технологий (НИАТ)

Защита состоится "16" сентября 1995 года на заседании
диссертационного совета К 053.15.15 в Московском Государственном
Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, В - 5, 2-я В

С диссертацией можно
Н.Э.Баумана.

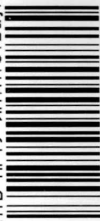
Ваш отзыв на авторефе
рат, просим направлять

Автореферат разослан

Учёный секретарь
диссертационного Со
кандидат технически
доцент

Подписано к печати
Объем 1 п.л. Типо

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1546389

Волчкевич И. П. Исследован

1546389

Актуальность проблемы. На современном этапе развития металлообработки её важнейшими проблемами являются с одной стороны повышение качества продукции, с другой - снижение экологического ущерба от процессов, обеспечивающих это повышение качества. Повышение требований к качеству вызывает развитие процессов, обеспечивающих улучшение динамической прочности, коррозионной стойкости, износостойкости материалов, их внешнего вида и т.п. Это достигается: а) облагораживанием поверхности путём удаления микродефектов, коррозионных плёнок, загрязнений, как подготовка к последующим операциям нанесения покрытий, сборки и т.п.; б) модификацией свойств поверхности путём изменения химического состава и структуры поверхностным насыщением; в) нанесением защитных покрытий различных видов.

Однако, выполнение этих процессов связано как правило с применением высоких температур и токсичных сред, наличием ядовитых стоков и выбросов (очистка химическим травлением, высокотемпературное насыщение из жидкой или газовой фазы, гальваническое нанесение покрытий и т.п.). Таким образом, традиционные методы борьбы за высокое качество вступают в глубокий конфликт с экологией.

Разрешением этого конфликта при нанесении защитных, декоративных, твёрдосмазочных и др. покрытий может стать создание экологически чистых безотходных технологий, выполняемых без специальных технологических сред (электролиты, вакуум) и без изменения агрегатного состояния наносимых материалов (плавление, ионизация, испарение), с максимальным использованием материалов.

С этих позиций перспективным является импульсно - динамическое нанесение (ИДН) тонкоплёночных покрытий, которые формируются контактным массопереносом материала с первичных носителей благодаря высокоинтенсивным контактным нагрузкам, создаваемым при соударениях твёрдых тел, вызываемых вращением, вибрацией, перемешиванием и т.п.

Концептуально ИДН было предложено ещё в 50-60-е годы, однако до сих пор не вызвало серьёзного интереса прикладной науки и производства. Не определена номенклатура наносимых материалов, слабо исследованы процессы формирования покрытий, отсутствуют технологические рекомендации, нет оценок свойств покры-

тий.

Цель настоящей работы - на основе исследований процессов формирования покрытий и анализа их свойств раскрыть реальные возможности метода ИДН тонкоплёночных покрытий, с доведением результатов до уровня, близкого к промышленным технологиям.

Задачи работы: 1) разработка физических и математических моделей импульсно - динамических воздействий на поверхность через слой наносимого материала;

2) оценка номенклатуры материалов наносимых покрытий;

3) экспериментальное исследование процессов формирования однокомпонентных и многокомпонентных покрытий и анализа их свойств;

4) разработка технологических схем нанесения декоративных, антикоррозионных и твёрдосмазочных покрытий;

5) создание широкогодиапа зонной специализированной опытной установки импульсно - динамической обработки.

Автор за ящает: - физические и математические модели процесса ИД-нанесения покрытий; - принципы построения технологических процессов нанесения одной многокомпонентных покрытий, - предложения по перспективным видам покрытий, наносимых ИД-методом.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились на основе теорий физики твёрдого тела и вибрационных процессов. Экспериментальные исследования проводились в лабораториях МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием современного экспериментального технологического и контрольно-измерительного оборудования.

Научная новизна. 1) Раскрыты основные стадии формирования и закрепления покрытий. На начальной стадии происходит микрорезание и другие процессы устранения дефектов поверхности, что позволяет обойтись без предварительной подготовки последней. Одновременно формируется оптимальный гранулометрический состав наносимого материала, что позволяет обойтись без дорогих ультрадисперсных порошков и использовать в качестве сырья стружку, фольгу, проволоку и т.п. 2) Показано, что процесс роста плёнки является экстремальным во времени, он сопровождается не только деформированием материала, но и механохимическими твёрдофазными реакциями, что приводит к образованию новых структур типа твёрдых растворов и химических соединений и позволяет формировать нужный химический и фазовый состав покрытия непосредственно в процессе нанесения. 3) Доказано, что связь покрытия с основным

материалом улучшается последующей термической обработкой при температуре в диапазоне температур диффузии.

Практическая ценность. 1) Установлены возможности ИД нанесения алюминия, цинка, хрома, никеля, молибдена, меди, титана, вольфрама; многослойных и многокомпонентных покрытий: бронзы, латуни, нержавеющей стали, дисульфида молибдена, карбида вольфрама; многих сложных композиций, в том числе с формированием состава в процессе нанесения. 2) Разработаны технологические процессы нанесения декоративных, антикоррозионных, твёрдосмазочных покрытий. 3) Создана широкодиапазонная экспериментальная установка.

Реализация результатов работы. Научные и практические результаты работы использованы при разработке проекта опытно-промышленной установки, намеченной к изготовлению в 1995 г. Изготовлены опытные партии образцов изделий для ряда предприятий и организаций г. Москвы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: 2-м конгрессе международного консорциума "Вибромасса" (Сочи, 1992), 1-ом Международном симпозиуме украинских инженеров - механиков (Львов, 1992), международной научно-технической конференции "Новые технологии получения слоистых и порошковых материалов, композиционных покрытий" (Сочи, 1993), Научных семинарах кафедры МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 3 печатных работах.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 163 страницах и содержит 114 страниц машинописного текста, 67 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены основные идеи предлагаемых решений, сформулирована поль работы.

В первой главе даётся обзор современных видов тонкоплёночных покрытий и требований к ним, анализ существующих методов нанесения, сущность импульсно-динамического метода и обзор существующих исследований. формулируются цель и задачи работы. Наиболее распространены в настоящее время покрытия цинком, никелем, хромом, алюминием, медью и её сплавами. Требования к покрытиям: заданный химический состав, толщина покрытия и её равномерность, плотность, шероховатость, адгезия к основному матери-

алу, способность сопротивляться изнашиванию и деформациям.

Требования к процессам и оборудованию: экологическая чистота и безотходность, высокая производительность и конструктивная простота, максимальное полезное использование наносимого материала.

В настоящее время наиболее распространёнными являются химические методы нанесения покрытий (включая электрохимические), прежде всего гальванические, связанные с наличием токсичных рабочих сред, ядовитых и труднолокализуемых стоков, выбросов, тяжёлыми и вредными условиями труда на производстве.

Поиски альтернативных решений привели к довольно широкому развитию физических методов, связанных с изменением агрегатного состояния наносимых материалов (вакуумное осаждение, металлизация погружением, газотермическая наплавка, плазменное напыление и т.д.). Они более благоприятны с экологических позиций, но требуют как правило применения сложного и дорогого оборудования, многие связаны с высокими температурами; подготовка поверхности остаётся химической со всеми последствиями.

Менее распространены механические методы контактного массопереноса: нанесение методами сварки трением, ультразвуком и т.п. Одним из перспективных механических методов может стать метод импульсно - динамического нанесения (ИДН) тонкоплёночных покрытий.

Принцип реализации метода можно иллюстрировать рис. 1. Изделия - комплект трубок - крепятся к торцевым стенкам камеры, в которую загружается наносимый материал в виде порошка, фольги, стружки и т.п., а также рабочие тела, например - шарики. Камера приводится в движение (вращательное, колебательное или их комбинация), в результате чего происходят многочисленные высокоэнергетические соударения частиц загрузки, наносимый материал в сверхпластичном состоянии "обволакивается" тонкой плёнкой вокруг всех поверхностей внутри камеры - рабочих тел, наружных поверхностей трубок, стенок камеры. После достижения необходимой толщины покрытия движение камеры останавливается, партия изделий заменяется, добавляется порция наносимого материала и процесс возобновляется. Нанесение многокомпонентных покрытий достигается загрузкой нескольких материалов в нужном соотношении, а многослойных - добавлением новых доз материала без замены изделий. Процесс является безотходным, так как выполняется в герметичном объёме камеры; подбором величины доз

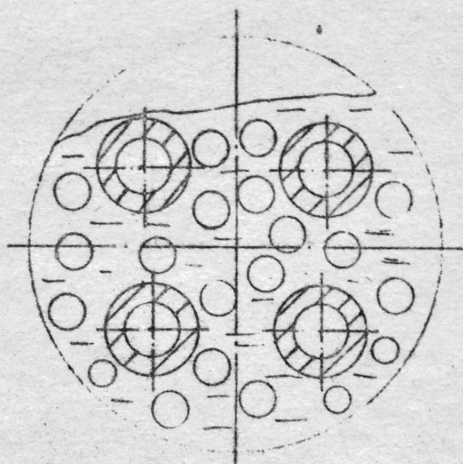


Рис. 1. Принцип реализации метода ИДН

можно получить эффективное использование всей массы наносимого материала. Производительность зависит от объема камеры и габаритов изделий.

Концептуально идеи ИДН были высказаны ещё в 50 - 60 гг. (патент США 2723204, а.с. СССР 247982, 349767, 349767, 1211337 и др.), в практическом плане можно отметить работы А.П.Вабичева. В последнее время ряд поисковых работ выполнен в Институте Синтетических Полимерных Материалов РАН (акад. Ениколопов Н.С.), в МНТК "Мосмеханообр" (Лесин А.Д.). Однако, к настоящему времени спектр возможных ИДН - покрытий не изучен как с точки зрения материалов, так и видов покрытий. Слабо исследованы процессы формирования покрытий, нет оценок их свойств. В научно-технической литературе не обнаружено попыток создания даже опытных технологий по данному методу. Эти проблемы и сформировали перечень задач диссертации, сформулированных выше.

Вторая глава посвящена физическим и математическим моделям процесса ИДН. На первой стадии процесса благодаря соударениям происходит микрорезание, удаление загрязнений и дефектов и активация поверхностей что позволяет обойтись без специальных операций подготовки поверхностей к покрытию. Одновременно самопроизвольно формируется оптимальный гранулометрический состав порошка. На второй стадии формируется плёнка благодаря соударе-

нием рабочих тел через слой наносимого материала. На третьей стадии - уплотнение и закрепление плёнки на поверхности изделий. Энергия формирования и закрепления плёнки сообщается в виде тепла, механической энергии упруго - пластической деформации и др. При ударных воздействиях даже в нормальных условиях (комнатная температура, атмосферное давление) могут происходить твердофазные химические реакции, обычно требующие высоких температур и давлений.

Максимальное давление при соударении сферы с плоскостью описывается уравнением (рис. 2):

$$f_{\max} = \frac{P}{2\pi \cdot r^2 \cdot \mu^2}$$

где P - интегральная сила удара, зависящая от скорости соударения, r - радиус шара, $\mu = \operatorname{tg} \phi$ - коэффициент заземления материала.

При соударении двух шаров через слой материала

$$f_{\max} = \frac{2P}{3\pi \cdot r^2 \cdot \mu^2}$$

Так как вероятность соударения рабочих тел между собой больше, чем с поверхностями изделий, а контактное давление выше, покрытия формируются первоначально в основном на рабочих телах как промежуточных носителях, а затем на поверхностях изделий.

Теоретически показано, что в процессе работы непрерывно идут процессы измельчения и агрегатирования ("слипания") частиц порошка, в результате средний размер свободной частицы стремится к установившемуся значению

$$r_1^* = \left(\tilde{r} + \frac{\delta^2}{\theta} \right) - \sqrt{\left(\tilde{r} + \frac{\delta^2}{\theta} \right)^2 - \left(\tilde{r}^2 \cdot \ln \left(\frac{\theta}{\sqrt{2\pi} \delta} \right)^2 \right)}$$

где $\tilde{r}$, δ^2 , θ - параметры, характеризующие вероятность протекания процессов измельчения и агрегатирования.

Частицы, размеры которых превышают

$$r_2^* = \left(\tilde{r} + \frac{\delta^2}{\theta} \right) + \sqrt{\left(\tilde{r} + \frac{\delta^2}{\theta} \right)^2 - \left(\tilde{r}^2 \cdot \ln \left(\frac{\theta}{\sqrt{2\pi} \delta} \right)^2 \right)}$$

измельчаться не могут и в покрытие не интегрируются. Анализ

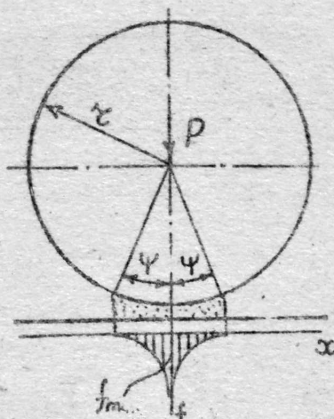


Рис. 2. Соударение твердых тел через слой мелких частиц материала

процессов взаимодействия элементов загрузки камеры позволил не только вычислить составляющие сил давления на стенки камеры (для прочностных расчетов), но и предсказывать явление самопроизвольного вращения камеры вокруг своей оси, что в дальнейшем было использовано при конструировании опытно - промышленной установки, где вращение камеры происходит без специальных приводов.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям процессов ИД - нанесения. Работы выполнялись на существующих вибрационных установках с объемами камер 0,1 и 10 л., а также специально спроектированной установке с комбинированным воздействием.

На первом этапе экспериментальных исследований оценивались технологические возможности метода, а именно номенклатура материалов (металлов и неметаллов, их композиций), которые можно наносить данным методом на поверхность деталей из стали, алюминиевых и цинковых сплавов.

На втором этапе изучались динамические характеристики порошковых материалов в рабочей камере, изменение температуры в процессе обработки в условиях предварительного нагрева камер и без него; процессы формирования во времени однокомпонентных и многокомпонентных покрытий в зависимости от состава и количества закладываемого материала, параметров вибрации, длительности обработки; исследовался химический состав нанесенных покрытий. Значительные эксперименты были проведены в целях закрепления

покрытий путём последующей термической обработки.

Была установлена возможность нанесения на стальные поверхности чистых металлов: Al, Zn, Mo, W, Ni, Cr, Ti; композиций Al-Zn, Al-Cu, Al-Zn-Cu, Cu-Ni, кал: из отдельных компонентов, так и из порошков сплавов с корректировкой состава; оксидов алюминия и циркония, дисульфида молибдена, композиций металл - неметалл и др. Не наносятся без подслоя медь и медные сплавы. Аналогичным образом исследованы возможности нанесения различных покрытий на алюминиевые и цинковые сплавы. Материал загружался в камеру в виде порошка, фольги, проволоки, стружки (толщиной до 0,15 мм).

Опыты показывали, что гранулометрический состав находящийся в камере порошков в процессе обработки не остается постоянным. Так, для цинкового порошка со средним исходным размером частиц 4 мкм в начальный период (до 2 мин) наблюдается процесс слипания в гранулы размером в среднем 350 мкм (рис. 3). В дальнейшем происходит процесс монотонного измельчения с постоянным переходом части порошка в покрытие, с размерами остающихся в зоне обработки частиц порядка 80 - 100 мкм, что инвариантно и для других материалов (медь, алюминий). Таким образом ИДН не нуждается в дорогих и дефицитных ультрадисперсных порошках, оптимальный размер загружаемых в камеру частиц составляет 60 - 80 мкм.

Толщина покрытия измерялась на образцах гравиметрическим методом с использованием аналитических весов с ценой деления 0,005 гр; контрольные замеры производились на электронном микроскопе. Эксперименты показали экстремальную зависимость толщины покрытия от времени обработки при однократной заправке дозы наносимого материала и асимптотическую при многократном добавлении. При этом максимальная толщина покрытия зависит от вида материала и величины дозы. На рис. 4 показаны зависимости толщины алюминиевых покрытий от длительности процесса и количества закладываемого материала. При дозе 0,25 г/л (кривая 1) покрытие получается тонким (до 5 мкм); доза 0,75 г/л (кривая 2) близка к оптимальной, толщина покрытия составляет более 20 мкм, но процесс не следует вести более 10 мин; Увеличение дозы до 1,0 г/л приводит к обратным результатам (кривая 3), так как слишком большое количество порошка ухудшает условия соударения сквозь слой. Подбирая оптимальные режимы, можно получить отнок-

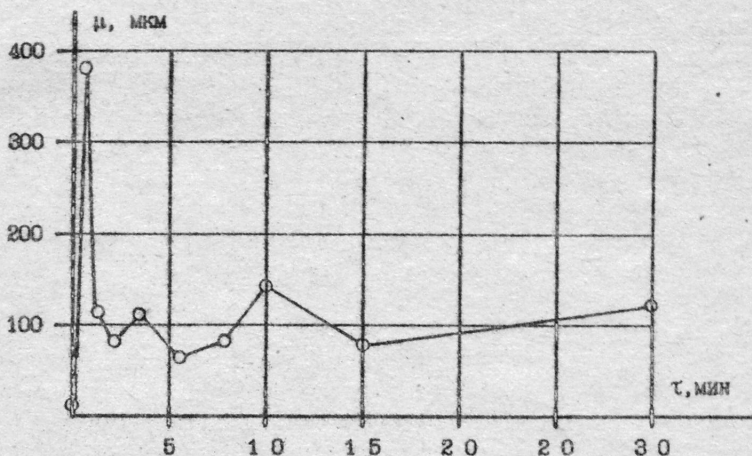


Рис. 3. Зависимость среднего размера частиц порошка цинка от времени импульсно - динамической обработки

ратным процессом покрытия W, Ni и Mo толщиной до 5 мкм, хрома - до 25 мкм и т.д. При этом температура внутри рабочей камеры достигает 100 - 120 С и остаётся стабильной вне зависимости от наличия или отсутствия предварительного нагрева.

Закрепление покрытия и улучшение его плотности достигается последующей термической обработкой в температурной зоне диффузии ($T > 0,8T_{пл}$). На пластины из стали 3 был нанесён подслои цинка толщиной 2 мкм и далее покрытие из латунной стружки толщиной 6 мкм, после чего часть образцов была подвергнута термообработке; химический состав покрытий обеих гр, лп образцов замерялся на электронном сканирующем микроскопе. На поверхности покрытия установлена миграция атомов цинка и меди к поверхности, а железа - вглубь. В поперечном сечении (по шлифу) отмечено проникновение частиц покрытия в основу (до 0,5 %) и образование переходного слоя между ними.

Четвёртая глава содержит анализ свойств изделий с ИДН - покрытиями по параметрам шероховатости поверхности, адгезионной связи с основой, износостойчивости, коррозионной стойкости, цветности.

Исследования образцов с различной исходной шероховатостью ($0,05 < Ra < 2,5$) показывали, что на начальной стадии обработки происходит выравнивание и стабилизация значения $Ra = 0,2 - 0,6$

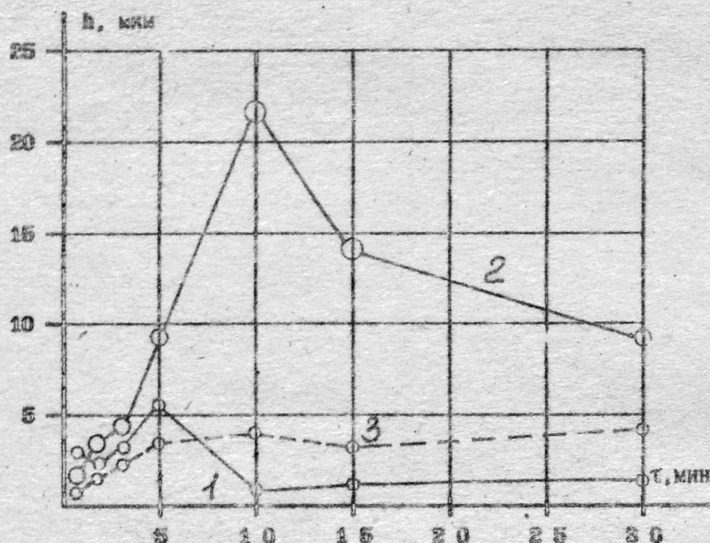


Рис. 4. Зависимость толщины покрытия от времени обработки при различных исходных количествах порошка алюминия

мкм, что идентично при наличии или отсутствии покрытий. При последующей термообработке в температурной зоне диффузии материала покрытия отмечено уменьшение шероховатости, особенно при удлинении температурного воздействия.

Сопротивление изношению исследовалось путём абразивного изнашивания образцов с покрытиями в вибрирующей камере. Степень износа оценивалась как потерей веса покрытия, так и по удельной площади исчезнувшего покрытия. Сравнивались образцы с гальваническими и ИДН - покрытиями (однокомпонентными и многокомпонентными). Замеры показали многократно более высокую износостойкость ИДН - образцов, особенно - многокомпонентных.

Следующая серия экспериментов ставила задачей изучение влияния на износостойкость последующей термообработки. На рис. 5 показана полученная для покрытий латуни (6 мкм) зависимость износостойкости (время достижения 90%-ного исчезновения плёнки с поверхности) от длительности термообработки ($\tau = 1, 2, 4$ часа) при температуре 360°C с охлаждением в печи. График показывает существенное увеличение износостойкости по сравнению с образцами без термообработки и монотонное увеличение при удли-

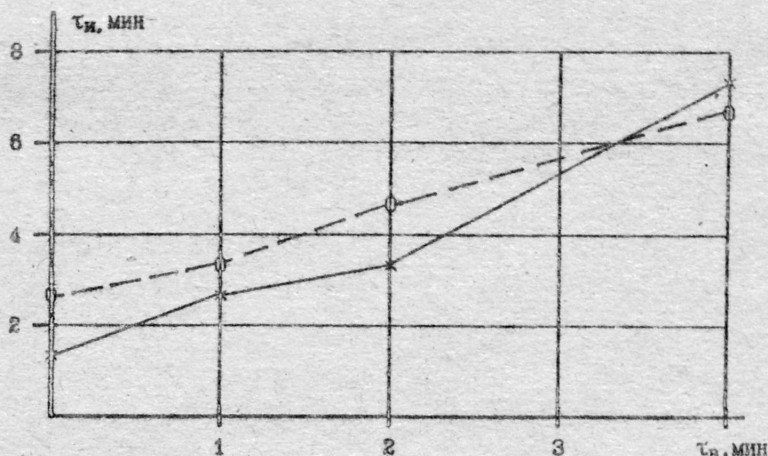


Рис. 5. Зависимость времени 90 - % - ного износа латунных ИДН - покрытий от времени выдержки при термообработке для шаров (x) и пластин (o)

нении выдержки. Аналогичные результаты были получены для алюминия и цинка. Опыты с никелевым покрытием дали отрицательный результат - покрытия темнели, износостойкость ухудшалась.

Адгезионная прочность испытывалась на специальном приспособлении для отрыва пленки от поверхности основы. Вычлененный на пластине фрагмент покрытия склеивался с контробразцом и через него посредством приложения нарастающих тарированных усилий (до 100 кгс) производились испытания на отрыв.

Испытывались образцы с гальваническими покрытиями (никель) и ИДН - покрытиями (никель, латунь, алюминий). По никелю прочность гальванических покрытий (с подслоем меди) оказалась выше, чем ИДН - покрытий, нанесенных без подслоя (30 - 40 кгс/см²). прочность ИДН - покрытий из алюминия и латуни значительно выше (разрыв при > 70 кгс/см² происходит по клею).

Декоративные свойства покрытий оценивались цветовой гаммой в зависимости от состава и толщины покрытий, характера термообработки. На образцах - шарах, пластинах, роликах были получены покрытия: а) желтые "под золото", б) красно - коричневые "под бронзу" в) белые с оттенками, г) черные с оттенками. Покрытия имеют матовый или блестящий вид, но не до уровня зеркального, попытки последующей шлифовки или полировки приводят к изменению цвета покрытия. Наиболее интересны по цветовой гамме

многослойные и многокомпонентные покрытия, они же имеют наилучшую износостойкость.

Антикоррозионные покрытия создавались на основе традиционных материалов: алюминия, цинка, никеля и их сочетаний. Согласно результатам сравнительных испытаний стальные изделия с ИДН - покрытиями цинка и алюминия имеют скорость коррозии в 6 - 7 раз ниже, чем незащищенные, но уступают в 1,5 - 1,7 раз изделиям с гальваническими покрытиями. Однако, истинные возможности ИДН - метода пока не выявлены, поскольку не удалось в достаточной степени исследовать композиции на основе алюминия, а гальванически такие покрытия нанести невозможно.

Пятая глава посвящена некоторым практическим результатам работы. Сформулированы требования, общие для всех технологий ИДН. Покрытия можно наносить лишь на достаточно прочные, недеформируемые поверхности, не имеющие конструктивных элементов, которые могут быть повреждены пластическим деформированием при соударениях. Поверхности покрываемых изделий, ударные тела и наносимый материал не должны иметь видимых следов смазки и аналогичных загрязнений; допускается наличие участков коррозии не более 7 - 10% от покрываемой площади. Поверхности должны быть сухими, свободными от любых растворителей и иных химических реагентов. Наносимый материал должен быть сухим. При влажности в помещении менее 90 % сухую поверхность, изделий и ударных тел можно не производить.

Конструкции технологических камер должны быть герметичными в процессе обработки и предусматривать возможность продувки содержимого в процессе загрузки - выгрузки. Степень заполнения объема рабочей камеры 65 - 70 %. Разработаны на уровне опытных технологии нанесения декоративных, антикоррозионных и твердосмазочных покрытий, с охватом подготовки поверхности и материалов, формирования покрытий и их последующего закрепления. Конкретно разработаны: 1) технологии нанесения декоративных покрытий медь - цинк, медь - алюминий на стальные поверхности; медь - цинк на алюминиевые поверхности; белых блестящих и черных покрытий на цинковые сплавы; 2) технологии нанесения защитных покрытий: цинк на сталь, алюминий на сталь, алюминий - медь на сталь; 3) технологии нанесения защитно - декоративных покрытий алюминий - медь - цинк на сталь; 4) технологии нанесения твердосмазочных покрытий дисульфида молибдена на детали подшипников качения. В целях последующего проектирования технологического

оборудования для ИДН покрытий выполнен анализ вариантов структурно - компоновочных решений, отличающихся источником энергии соударений (сопловая бомбардировка, вращение камеры, вибрация, принудительное перемешивание и пр.). Показана перспективность комбинированных методов (вибрация плюс перемешивание, вибрация плюс вращение) и соответствующих конструкций. На этих принципах разработана, изготовлена и апробирована широкодиапазонная экспериментальная установка, сочетающая вибрацию камер при широком регулировании её частоты и амплитуды с перемешиванием элементов при помощи регулируемой мешалки внутри одной из камер. Разработан проект опытно - промышленной установки с двумя параллельно работающими камерами, сочетающими вибрационное воздействие с самопроизвольным вращением вокруг собственной оси.

ВЫВОДЫ

1. Импульсно-динамическое нанесение тонкоплёночных покрытий (ИДН) является безотходным экологически чистым процессом, который для определённых видов изделий и материалов может стать альтернативой гальванике и другим процессам при нанесении декоративных, коррозионно-стойких и твёрдосмазочных покрытий.
2. Процесс осуществляется в технологической камере путём контактного массопереноса на рабочие поверхности изделий материалов, которые могут быть использованы не только в виде порошка, но и стружки, других видов отходов.
3. Импульсно-динамические методы позволяют наносить тонкоплёночные покрытия алюминия, цинка, хрома, никеля, молибдена, меди, вольфрама, титана и др.; многослойные покрытия различных материалов; многокомпонентные покрытия (бронза, нержавеющая сталь, карбид титана и др.), неметаллические покрытия, в том числе с формированием необходимого состава непосредственно в камере.
4. На начальных стадиях процесса происходят микрорезание и другие процессы удаления дефектов поверхности, что позволяет обойтись без специальных операций подготовки поверхности и производить все стадии нанесения покрытия в одной камере; одновременно формируется оптимальный гранулометрический состав порошка (40-60 мкм); применения дорогих и дефицитных ультрадисперсных порошков не требуется.
5. Процесс сопровождается не только механическим взаимодействием, но и механохимическими реакциями с выделением тепла; температура массы изделий стабилизируется на уровне $100-120^{\circ}\text{C}$, не-

зависимо от исходных условий (наличие или отсутствие предварительного нагрева).

6. Процесс роста плёнки во времени носит экстремальный характер, так как процессы контактного массопереноса продолжаются и после израсходования материала; при превышении некоторого оптимального времени может происходить уменьшение толщины покрытия ввиду переноса частиц материала на стенки камеры.

7. Однократным процессом можно получить плёнку алюминия толщиной до 25 мкм., цинка до 6-8 мкм, вольфрама до 3-5 мкм, латуни до 8 мкм и т. д. Многократным процессом, добавлением новых порций материала, можно получить многослойные и многокомпонентные покрытия толщиной до 200 мкм, однако с ростом толщины равномерность покрытия может уменьшаться.

8. Закрепление плёнки на поверхности и улучшение её свойства может быть достигнуто последующей термической обработкой благодаря взаимной диффузии материалов и формирования переходного слоя, "размывающего" границу между основным материалом и покрытием.

9. Оптимальный подбор технологических режимов позволяет получать покрытия из различных материалов (алюминий, цинк, латунь и т. п.) со следующими характеристиками: шероховатость Ra-1.0-1.5 мкм, адгезионная прочность на отрыв до 70 кгс/см², стойкость на истирание в 2-3 раза выше, чем у аналогичных покрытий, нанесённых гальваническим способом.

10. Декоративные покрытия целесообразно наносить, непосредственно используя латунную стружку, покрытие толщиной 8-10 мкм формируется при амплитуде колебаний 5 мм и частоте 150 с⁻¹ за 25 мин. Подбор добавок, варьирование толщиной и параметрами последующей термообработки позволяет получить гамму цветности изделия (красную или золотистую со множеством оттенков).

11. Антикоррозионные покрытия на основе композиций алюминий-цинк-никель имеют преимущества перед полученными гальваническими методами, которыми алюминий не наносится. Скорость коррозии стальных образцов с ИД покрытием толщиной 6 мкм в 6-7 раз ниже, чем у незащищённых, однако в 1,5-1,7 раза выше, чем у образцов с гальваническим цинковым покрытием.

12. Твёрдосмазочные покрытия на основе дисульфида молибдена могут наноситься на шарики и беговые дорожки подшипников совместно или раздельно; толщина плёнки до 5 мкм при длительности процесса до 30 мин. т. д.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Волчкевич И.Л. Импульсно - динамическое нанесение тонкоплёночных покрытий // 1-й Международный симпозиум украинских инженеров - механиков: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. - Львов, 1993. - С. 383.
2. Волчкевич И.Л. Нанесение тонкоплёночных покрытий из порошковых материалов импульсно - динамическим методом (ИДН) // Новые технологии получения слоистых и порошковых материалов, композиционных покрытий : Тез. докл. междунар. научно - техн. конф. - Сочи, 1993. - С. 14-15.
3. Волчкевич Л.И., Волчкевич И.Л. Импульсно - динамическое нанесение тонкоплёночных покрытий // Метроном. - 1994. - N 5 - 6. - С. 35 - 37.