

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по направлению подготовки 8D071 – «Инженерия и инженерное дело», по образовательной программе 8D07102 – «Машиностроение»

МАРАТУЛЫ БАУЫРЖАНА ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Актуальность диссертационной работы. Современное машиностроение характеризуется интенсивным использованием металлообрабатывающего оборудования и прецизионных станков с ЧПУ, надежность и долговечность которых напрямую зависят от качества применяемых смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Водосмешиваемые СОЖ являются благоприятной средой для развития микроорганизмов. Как показывают исследования, бактериальная обсемененность систем рециркуляции быстро достигает высоких значений, что приводит к разрушению эмульсии.

Особую опасность представляет формирование устойчивых биопленок на поверхностях оборудования и деталей. Биопленки, в которых доминируют штаммы *Pseudomonas aeruginosa*, обладают высокой резистентностью к стандартным биоцидным присадкам в СОЖ. Жизнедеятельность бактерий не только ухудшает качество обработки и приводит к засорению каналов подачи СОЖ, но и создает условия возникновения коррозии. Кроме того, биообрастание забивает узкие каналы систем подачи СОЖ, что нарушает температурный режим резания и снижает точность обработки деталей.

Традиционные методы борьбы, основанные на периодическом введении биоцидов в объем СОЖ, имеют лишь временный эффект и не способны предотвратить биообрастание непосредственно контактных поверхностей. Более того, они связаны с экологическими рисками и потенциальным вредом для здоровья персонала, так как образующиеся при обработке биоаэрозоли являются причиной профессиональных респираторных заболеваний.

В этой связи возникает необходимость принципиально нового подхода, заключающегося в придании самим поверхностям деталей машин и оборудования бактерицидных свойств. Перспективным решением является нанесение функциональных покрытий, обеспечивающих непрерывное подавление бактерий непосредственно в зоне контакта.

Решение проблемы микробиологического поражения поверхностей деталей машин и оборудования требует не только выбора эффективного материала покрытия, но и обоснованного подхода к технологии его нанесения. Среди существующих методов физического и химического осаждения покрытий метод магнетронного напыления (МН) выделяется как наиболее технологичный и промышленно адаптированный для решения задач машиностроения. В отличие от методов химического осаждения из паровой

фазы, требующих высоких температур, МН является низкотемпературным процессом. Кроме того, метод является экологически чистым, исключая образование токсичных сточных вод, характерных для гальванических процессов.

Особый интерес представляет система тантал – медь (Ta–Cu), где тантал выступает в качестве химически стойкой и тугоплавкой матрицы, обеспечивающей механическую прочность и коррозионную стойкость, а медь, обладающая доказанным бактерицидным эффектом, выполняет функцию активного компонента. Возможность независимого регулирования мощности на танталовом и медном магнетронах позволяет целенаправленно управлять составом, микроструктурой и, как следствие, функциональными свойствами покрытия. При этом, согласно глобальной статистике, на преодоление последствий износа и трения расходуется около 23% мирового потребления энергии, а совокупные потери в промышленно развитых странах достигают 1,5–4% ВВП, что делает разработку износостойких бактерицидных покрытий экономически значимой задачей. Поэтому, обоснование параметров и разработка инновационной технологии нанесения бактерицидных металлопокрытий Ta–Cu методом магнетронного напыления является актуальным научно-техническим направлением, направленным на повышение эксплуатационной надежности машин и оборудования.

Идея диссертационной работы сводится к замене традиционной стратегии периодического введения биоцидных присадок в объем смазочно-охлаждающей жидкости на принципиально иной подход – придание самим поверхностям деталей машин и оборудования постоянных бактерицидных, износостойких и антикоррозионных свойств путем нанесения покрытия на основе системы тантал–медь.

Проблема, решение которой приведено в диссертационной работе, заключается в отсутствии научно обоснованных технологических решений для поверхностей деталей машин и оборудования, эксплуатирующихся в контакте с микробиологически загрязненными смазочно-охлаждающими жидкостями.

Основная гипотеза диссертационной работы состоит в том, что применение МН для формирования покрытий тантал–меди позволяет создать на поверхностях деталей машин износостойкий, коррозионно-устойчивый и бактерицидный слой. Предполагается, что за счет независимого регулирования мощности на танталовой и медной мишенях возможно управление химическим составом покрытия, его микроструктурой и, как следствие, эксплуатационными свойствами.

Цель исследования - обосновать и экспериментально определить оптимальные режимы технологического процесса МН для формирования бактерицидных покрытий Ta–Cu, обладающих заданным комплексом трибологических и защитных свойств.

Задачи исследования:

- Провести оптимизацию параметров процесса напыления покрытий тантал-медь.

- Изучить влияние режимов напыления на микроструктуру, морфологию и элементный состав формируемых покрытий.
- Оценить механические и трибологические характеристики формируемых поверхностей.
- Провести испытания для оценки коррозионной стойкости покрытий.
- Разработать модернизированную конструкцию рабочей головки магнетронной установки.
- Разработать технологический процесс нанесения покрытий с защитными свойствами.

Объект исследования - технологический процесс формирования тонкопленочных защитных металлопокрытий на деталях машиностроительного оборудования методом магнетронного напыления.

Предмет исследования - закономерности и взаимосвязи между технологическими параметрами магнетронного напыления и трибомеханическими, коррозионными и защитными свойствами формируемых покрытий тантал-медь.

Научной новизной является:

- Впервые научно обоснована концепция совмещения высокой коррозионной стойкости тантала и антибактериальных свойств меди в композиционной системе покрытий тантал-медь, формируемой методом магнетронного напыления для защиты деталей, контактирующих со смазочно-охлаждающими жидкостями.
- Установлены новые количественные закономерности влияния параметров процесса магнетронного напыления на химический состав, механические свойства формируемого покрытия.
- Математически определено и описано «технологическое окно» процесса магнетронного напыления при давлении рабочего газа 0,18–0,28 Па и плотности мощности на мишени 8–15 Вт/см², что обеспечивает формирование плотной, беспористой структуры тантал-меди с преобладанием танталовой фазы.

Практическая значимость исследований заключается:

- в разработке и научном обосновании технологического регламента процесса магнетронного напыления на постоянном токе для формирования бактерицидных покрытий;
- в определении оптимальных технологических параметров и воспроизводимости результатов в условиях промышленного производства;
- в создании инженерной методики расчета кинетических параметров процесса для установки EPOS-PVD-440, позволяющей прогнозировать производительность и себестоимость обработки деталей;
- в разработке и изготовлении конструкции рабочей головки магнетронной установки, включая узел уплотнения для обеспечения высокого вакуума;

На защиту выносятся следующие научные положения:

- Технологические режимы магнетронного напыления на постоянном токе, обеспечивающие формирование композиционной структуры покрытий

тантал-медь с равномерным распределением элементов и минимизирующие пористость слоев.

- Количественные зависимости и регрессионная модель, связывающие изменения тока на медной мишени в диапазоне 0,6–1,4 А с итоговым содержанием меди в покрытии от 3,2% до 19,6%

- Научно-техническое обоснование технологического процесса нанесения защитных покрытий тантал-медь, включающего подготовку, осаждение со скоростью 1,46 нм/об на установке EPOS-PVD-440.

Краткое содержание. В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния проблемы микробиологического загрязнения смазочно-охлаждающих жидкостей и механизмов формирования устойчивых биопленок на поверхностях металлообрабатывающего оборудования. Установлено, что традиционные методы борьбы обладают лишь временным эффектом и не предотвращают повторного инфицирования систем рециркуляции. Выполнен сравнительный анализ методов нанесения покрытий, на основе которого обоснован выбор магнетронного напыления на постоянном токе как наиболее производительного, масштабируемого, низкотемпературного и экологически безопасного метода. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы ионно-плазменного распыления, механизмы зарождения и роста покрытий, формирование адгезионных свойств, а также принципы работы и конфигурация магнитного поля магнетронов. Представлена модель структурных зон Торнтон, позволяющая прогнозировать микроструктуру покрытий в зависимости от гомологической температуры и давления рабочего газа. Обоснована целесообразность формирования плотной беспористой структуры типа «зона Т» для обеспечения механической целостности, коррозионной стойкости и контролируемой диффузии бактерицидных ионов меди.

В третьей главе приведены методики проведения исследований и оценки свойств покрытий. Описаны оборудование и методика трибологических испытаний, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом, электрохимических испытаний, оценки адгезии, а также методы оценки бактерицидной активности. Изложена методика подготовки поверхности подложек.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования по разработке технологического процесса нанесения покрытий. Описана постановка эксперимента на установке EPOS-PVD-440 с варьированием тока на медной мишени при фиксированной мощности танталового магнетрона и рабочем давлении 0,18 Па.

В пятой главе разработан технологический процесс нанесения покрытий применительно к промышленной установке EPOS-PVD-440. Выполнен детальный инженерный расчёт кинематических параметров: линейная скорость перемещения подложек, технологическая подача, массовая интенсивность осаждения, расход материалов мишеней, удельная

потребляемая мощность и прямые затраты на электроэнергию. Представлена модернизированная конструкция рабочей головки магнетронной установки.

Личный вклад диссертанта. Диссертационная работа выполнена автором лично. Автор выполнил следующие основные этапы исследования:

- самостоятельный анализ научно-технической литературы по проблеме микробиологического поражения смазочно-охлаждающих жидкостей, методам нанесения функциональных покрытий и физическим основам магнетронного распыления;
- непосредственное проведение экспериментов на установке магнетронного напыления EPOS-PVD-440 в качестве оператора: подготовка вакуумной системы, управление режимами напыления, контроль стабильности тлеющего разряда;
- подготовка подложек к нанесению покрытий.
- участие в модернизации рабочей головки магнетронной установки: сборка и герметизация узла;
- подготовка полученных образцов покрытий к физико-механическим и структурным анализам.
- обработка и интерпретация полученных экспериментальных данных, статистический анализ, регрессионное моделирование, формулирование закономерностей;
- разработка технологического регламента и инженерной методики расчёта параметров процесса нанесения покрытий Ta–Cu.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 171 страницах машинописного текста, состоит из обозначений и сокращений, введения, 5 разделов и заключения, включает 39 рисунков, 11 таблиц, список использованных источников из 140 наименований и 4 приложений.

Результаты исследования и основные выводы. В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для современного машиностроения. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие итоги и выводы.

1. Выполнен анализ современного состояния проблемы микробиологического поражения СОЖ и поверхностей металлообрабатывающего оборудования. Установлено, что традиционные методы борьбы с биообрастанием имеют временный эффект. На основе сравнительного технико-экономического анализа методов нанесения покрытий обоснован выбор МН на постоянном токе как наиболее производительного, масштабируемого и экологически безопасного метода.

2. Технологический процесс нанесения покрытий Ta–Cu включает три основные стадии: подготовку поверхности, непосредственно процесс магнетронного осаждения и последующий контроль качества. Экспериментально определено технологическое окно стабильного ведения процесса, обеспечивающее воспроизводимость требуемых свойств. Мощность танталового магнетрона составило 2,0–2,1 кВт, мощность медного магнетрона

варьировалось 0,33 кВт, 0,46 кВт, 0,80 кВт, рабочее давление составляло 0,18 Па.

3. Установлены закономерности влияния технологических параметров на эксплуатационные характеристики покрытий. ЭДС подтвердила формирование покрытия с преобладанием танталовой фазы и равномерным распределением меди. Содержание меди в покрытии линейно коррелирует с током на медном магнетроне в диапазоне 0,6–1,4 А. Трибологические испытания продемонстрировали, что коэффициент трения покрытий стабилизируется в диапазоне 0,6–0,7 на дистанции 100 м. Наилучшими антифрикционными свойствами обладает покрытие с минимальным содержанием меди, тогда как введение меди, необходимое для бактерицидного эффекта, закономерно повышает коэффициент трения.

4. Выполнен детальный инженерный расчет технологических параметров применительно к промышленной установке EPOS-PVD-440. При линейной скорости перемещения подложек 10,05 м/мин, технологическая подача составила 1,46 нм/об. Расход материала мишеней составил 21–35 г и удельные энергозатраты - 13,95 кВт·ч/м². Выполнена оценка прямых затрат на электроэнергию, которые для оптимального режима TaCu-2 составляет 215 тенге/м².

5. Методом регрессионного анализа установлены количественные зависимости между технологическими параметрами процесса и свойствами покрытий Ta–Cu. Удельная потребляемая мощность линейно возрастает с увеличением мощности медного магнетрона. Увеличение содержания меди не приводит к строго линейному изменению коэффициента трения. Бактерицидная активность покрытий носит пороговый характер.

6. Разработанная технология нанесения бактерицидного покрытия Ta–Cu методом магнетронного напыления прошла производственные испытания на приемных сетках погружных насосов системы циркуляции СОЖ в условиях ТОО «ВК ПРОМЭНЕРГОРЕМОНТ».

7. Разработана и изготовлена модернизированная конструкция рабочей головки магнетронной установки EPOS-PVD-440, обеспечивающая возможность монтажа магнетрона с диаметром мишени 40 мм.