

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра материаловедения, технологии
и управления качеством

**КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ АЛМАЗОПОДОБНОГО
УГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента магистратуры 2 курса 2292 группы
направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»,
профиль «Менеджмент высокотехнологичного инновационного производства и
бизнеса»
института физики

Черненко Кирилл Юрьевича

Научный руководитель,
доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

И.В. Синев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой,
д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

С.Б. Вениг

инициалы, фамилия

Саратов 2025

Введение.

Износ поверхности является основной причиной выхода из строя пар трения. Повысить износостойкость можно разными способами: выбором износостойких материалов, использование смазок, модификация поверхности, в том числе нанесение износостойких покрытий. Существует большое разнообразие материалов, используемых для износостойких покрытий, например, твердый хром, нитрид титана, другие нитриды и карбиды переходных металлов, твердые сплавы и т.д. В зависимости от конкретной пары трения (материалы, режим работы, величина нагрузок, наличие смазок) выбирают тот или иной материал покрытия. Для работы в условиях высокой нагрузки, но небольших температур и когда требуется низкий коэффициент трения хорошо себя зарекомендовало алмазоподобное углеродное покрытие.

Работа выполнялась в Инновационно-технологическом кластере, в котором на постоянной основе выполняются работы по нанесению алмазоподобного углеродного покрытия на детали топливной аппаратуры. В ходе контроля качества деталей с покрытием обнаруживаются разнообразные дефекты. Систематизация дефектов, установление места возникновения дефектов и планирование корректирующих действий по предотвращению дефектов является актуальной задачей по повышению качества нанесения покрытия.

Целью выпускной квалификационной работы является изучение дефектов алмазоподобного углеродного покрытия, классификация этих дефектов, а также создание средств сбора и хранения информации о всех видах возникающих дефектах.

На основе поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ научной и технической литературы о свойствах и технологии получения DLC покрытий;
2. Применить инструменты управления качеством для анализа причин возникновения дефектов DLC покрытия;
3. Создать методику контроля качества DLC покрытия;

4. Выполнить сбор данных о дефектах, обнаруженных при визуальном контроле деталей с DLC покрытием (объем выборки не менее 400 процессов);
5. Провести анализ полученных данных о дефектах и составить классификатор дефектов DLC покрытия;
6. Создать базу данных для хранения и обработки информации о дефектах DLC покрытия, обеспечивающую удобный способ ввода и визуализацию данных.

Выпускная квалификационная работа занимает 56 страниц, имеет 32 рисунка и 1 таблицу.

Обзор составлен по 21 информационному источнику.

Во введение рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели, а также определяется предмет и объект исследования.

Первый раздел представляет собой обзор и анализ литературы по теме выпускной квалификационной работы.

Во втором разделе работы приведена практическая часть, а именно рассмотрен процесс анализа и классификации дефектов алмазоподобного углеродного покрытия.

Основное содержание работы

DLC – это аббревиатура Diamond-Like Carbon. Русскоязычный аналог данного термина «алмазоподобное покрытие». Данное покрытие обладает некоторыми ценными свойствами алмаза, в том числе: высокой твердостью, низким трением, износостойкостью, химической инертностью, биологической совместимостью, электрической изоляцией, оптической прозрачностью и гладкостью. DLC покрытия используются для придания нужных характеристик другим материалам. С точки зрения технологии большим плюсом является то, что во многих случаях он может быть нанесен при низкой ($<200^{\circ}\text{C}$) температуре подложки.

DLC покрытие имеет множество коммерческих применений, включая станки, аэрокосмические детали, детали двигателей и медицинские имплантаты.

В зависимости от области применения используются различные составы DLC-покрытий [1].

DLC на раннем этапе развития этой технологии имел проблемы с адгезией [2]. Это связано с тем, что алмазоподобное покрытие, как правило, имеет высокие напряжения в плёнке, которые в сочетании с несоответствиями решетки между DLC и многими подложками приводят к плохой адгезии.

Однако эта проблема была решена применением многослойных покрытий, включающих в себя адгезионный слой. Эти слои уменьшают концентрацию напряжений вблизи границы раздела «покрытие-подложка» за счет создания плавной границы раздела, которая создаёт более высокий модуль упругости. Это гарантирует отсутствие резкого перехода между составами и постепенное введение напряжения в покрытие, что приводит к отличной адгезии DLC.

Поверхности с нанесенным покрытием никогда не бывают идеальными. Помимо канавок и выступов, поверхность также имеет ярко выраженные конусообразные формы, точечные отверстия, поры и другие открытые пустоты, которые образуются в процессе нанесения [3]. Дефекты неравномерно распределены по поверхности и глубине покрытия, а их форма, размер и плотность зависят от условий нанесения. Они возникают либо из-за неровностей поверхности (ямки, шероховатостей), посторонних частиц (пыли, мусора, остатков полировки), либо в процессе нанесения покрытия (образование мелких частиц и микрокапель).

На основании приведенных данных DLC это самый рациональный способ нанесения покрытий для широкого спектра применений, например: износостойкие и коррозионностойкие покрытия, электроника и оптика. Другими преимуществами технологии являются более низкая температура подложки и широкий выбор диапазона материалов.

Один из главных недостатков данной технологии заключается в том, что не всегда можно настроить достаточную равномерность на подложке, и поэтому подложки, имеющие сложную геометрическую конфигурацию, не могут быть равномерно покрыты.

Существует множество различных способов реализации DLC, все из которых действуют путем переноса отдельных атомов материала к подложке и последующего осаждения материала и формирования плёнки. Например, одним из старейших и наиболее широко используемых способов является метод вакуумного испарения. Для этого процесса ток пропускается через лодочку с испаряемым материалом, и благодаря нагреву материал испаряется [4-6].

С прошлого века покрытиям DLC уделялось всё большее внимания в контексте улучшений различных свойств материала. Неоднократно была предпринята попытка разработать общий подход к описанию типов DLC покрытий, позволяющий структурировать различия в технологии получения таких покрытий, а также их физико-химические и эксплуатационные характеристики. Однако из анализа литературы ясно, что предварительно требуется провести большую аналитическую работу для выбора оптимальной технологии получения DLC-покрытия. Основные трудности, связанные с DLC-покрытиями, заключаются в выборе правильного типа пленки для каждого конкретного случая дальнейшего ее применения. Исходя из тенденций ожидается, что будут обнаружены типы DLC-покрытия с новым сочетанием свойств.

Как правило, существующие классификации покрытий DLC основаны на практических и экономических соображениях. Также ввиду распространённости широко применяется разделение по областям применения: биомедицинская, морская, автомобильная и аэрокосмическая техника.

В тоже время существует негативные факторы в технологии нанесения покрытия, такие как дефекты тонких пленок, которые могут включать в себя неоднородность толщины, наличие пор, микротрещин, наличие посторонних включений и адгезионные проблемы. Эти дефекты могут возникать из-за различных факторов, таких как параметры процесса DLC, тип подложки, температура процесса и свойства исходного материала.

В работе приведена информация о следующих типах дефектов:

- поры;

- микротрещины;
- включения;
- адгезия.

Практическая часть выпускной квалификационной работы выполнялась в ИТК СГУ и заключалась в следующем:

- применение инструментов управления качеством в рамках темы работы;
- описание методов контроля качества DLC-покрытия;
- классификация дефектов DLC-покрытия;
- описание методов хранения информации о качестве нанесения DLC-покрытия.

Применение инструментов управления качеством в рамках темы работы;

В работе рассматривалось применение четырех инструментов управления качеством для выявления основных причин возникновения дефектов DLC-покрытий.

Первый инструмент, который был применен – блок-схема. Этот инструмент наглядно показывает этапы выполнения процесса нанесения покрытия, включая входной и выходной контроль.

Далее был применен второй инструмент – контрольный лист. Он является эффективным способом отражения данных, который легко применить при анализе дефектов покрытия. Применение контрольного листа позволило выявить основные дефекты, возникающие при нанесении покрытия. Образец контрольного листа представлен на рисунке 1.

Контрольный лист для сбора данных о дефектах, возникающих после нанесения углеродного алмазоподобного покрытия.		
Место проведения работ: Лаборатория, ООО «ТехноТерм-Саратов»		
Дата: 12.12.2023		
Проверяющий: Черненко К.Ю.		
Количество процессов: 428		
Вид дефекта	Результат контроля	Итого
Точка. Отслоение	////////////////////	442
Молния	////////////////////	246
Невыхожалость	////////////////////	46
Мусор	////////////////////	23
Дефект садки	////////////////////	18
Серая точка	////////////////////	34
Облезание	////////////////////	69
Сыпь	////////////////////	33
Цветная	////////////////////	34
Механический дефект	////////////////////	58
Недораскрытие	////////////////////	65
Капля	////////////////////	146
Капля	////////////////////	77
Ржавчина	////////////////////	40
Потек	////////////////////	46

Рисунок 1 – Контрольный листок

Третий инструмент – диаграмма Парето (рисунок 2). Это эффективный инструмент для анализа качества покрытия, который позволяет сфокусировать усилия и ресурсы для устранения наиболее значимых проблем.

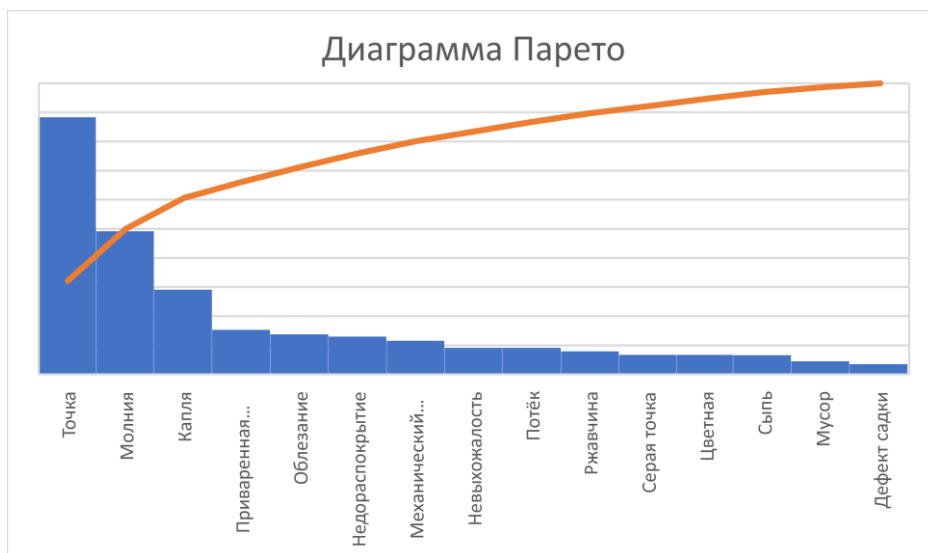


Рисунок 2 – Диаграмма Паретто для определения самых значительных дефектов

Для анализа возникновения дефектов покрытия и графического изображения взаимосвязи исследуемой проблемы и причин, влияющих на эту проблему, была применена диаграмма Исикавы.

В результате применения диаграммы Исикавы были выявлены основные факторы, влияющие на появление дефектов при нанесении покрытия (рисунок 3):

- персонал (мойка, установка деталей);
- оборудование (проведение технического обслуживания);
- методы (режимы процесса);
- материалы (качество расходных материалов);
- окружающая среда (влажность, загрязнение на участках).



Рисунок 3 – диаграмма Исикавы для определения причин возникновения дефектов

Методы контроля качества DLC-покрытия

Существует несколько методов контроля качества DLC покрытия.

В работе будут рассмотрены основные из них:

- измерение адгезии;
- измерение микротвердости;
- измерение толщины покрытия.

Одной из целей данной работы является изучение и разработка наиболее доступных и эффективные методы контроля качества DLC покрытия. Для достижения поставленных целей необходимо выполнить следующие пункты:

- определение требований к проведению измерений (качество работы оператора, наличие контрольных образцов для проведения замеров);
- назначение порядка выполнения измерений;
- подготовка оборудования перед выполнением измерений;
- создание базы данных для хранения результатов измерений с пошаговым созданием отчета о качестве покрытия.

В качестве аналогов применяемых методов контроля можно привести неразрушаемые способы контроля, а именно:

- магнитные методы основаны на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом. Благодаря своей простоте они получили широкое применение в практике толщинометрии;

- электромагнитные методы основаны на взаимодействии электромагнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности преобразователя толщиномера, с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. Они позволяют контролировать толщину однослойных покрытий при различных сочетаниях материалов покрытия и основы, за исключением случая диэлектрических покрытий на изделиях из диэлектриков;

- радиационные методы основаны на измерении параметров ионизирующего излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с контролируемым материалом. Эти методы можно отнести к числу наиболее универсальных методов контроля толщины тонких покрытий. Они позволяют производить контроль практически при любых сочетаниях материалов покрытия и основания. Наиболее эффективно применение радиационных методов при контроле толщины покрытий в диапазоне от 0 до 100 мкм, особенно покрытий из драгоценных металлов на мелких изделиях.

Классификация дефектов DLC-покрытия.

В рамках выпускной квалификационной работы были обнаружены основные типы дефектов возникающие при нанесении DLC-покрытия. Всего

выявлено 20 дефектов. Для каждого дефекта было предложено свое обозначение. А также была установлена причина возникновения дефекта.

Методы хранения информации о качестве нанесения DLC-покрытия.

В качестве метода хранения информации о качестве нанесения DLC-покрытия была использована база данных. И на основе полученной информации в разделе классификация дефектов DLC-покрытия была составлена таблица основных дефектов. Эта таблица содержит следующую информацию: обозначение дефекта (например, А, В, С и т.д), название дефекта (например, «Молния», «Серая точка», «Сыпь»), а также краткое описание этого дефекта. Также в базе данных можно отследить все записи о детали, которые были внесены.

Заключение.

При выполнении выпускной квалификационной работы были решены следующие задачи:

1. Осуществлен сбор информации и изучение литературы по темам: область применения и свойства DLC покрытий, анализ дефектов DLC покрытий.

2. Проведен анализ технологического процесса нанесения покрытий. разработана блок-схема, визуализирующая все этапы процесса.

3. Была создана методика контроля деталей при нанесении DLC покрытия, в которой было описано 11 требований к проведению контроля и процесс проведения контроля. Разработан и внедрен шаблон протокола процесса, позволяющий стандартизировать сбор информации о параметрах качества покрытия и фиксировать возникающие дефекты.

4. Проведен анализ данных, собранных в ходе 428 процессов нанесения DLC покрытий. На основе анализа данных был создан классификатор дефектов DLC покрытий, включающий 18 различных типов дефектов, описание причин их возникновения. Подчеркнута важность классификатора для систематизации знаний, быстрой идентификации дефектов, оптимизации принятия решений.

5. Создана база данных для хранения информации о качестве процессов нанесения DLC покрытий. База данных обеспечивает хранение данных о

дефектах, быстрый доступ к информации, возможность отслеживания истории каждой детали.

6. Применены инструменты управления качеством для выявления основных причин дефектов: контрольный лист, диаграмма Парето и Исикавы. Диаграмма Парето, построенная на основе данных контрольного листа, позволила определить наиболее значимые дефекты, а диаграмма Исикавы – выявить основные причины их возникновения.

Таким образом, цель данной выпускной квалификационной работы, по систематизации информации о дефектах, возникающих в процессе нанесения PVD DLC покрытий, а также создание классификатора, была достигнута.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенных решений для повышения стабильности и надежности процесса нанесения PVD DLC покрытий. Полученные результаты использованы в производственной деятельности ИТК СГУ.

Список используемых источников

1 Complete Guide To DLC Coating [Электронный ресурс] // DEK [Электронный ресурс] : [сайт]. – URL: <https://www.dekmake.com/guide-to-dlc-coating/> (дата обращения: 25.01.2025). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

2 Pogrebnjak, A. Nanocomposite Multilayer Binary Nitride Coatings Based on Transition and Refractory Metals: Structure and Properties / A. Pogrebnjak, K. Smyrnova, A. Bondar // Coatings. – 2019. – № 9. – 155 p.

3 Mazare, A. Silver doped diamond-like carbon antibacterial and corrosion resistance coatings on titanium / A. Mazare, A. Anghel, C. Surdu-Bob // Thin Solid Films. – 2018. – № 657. – P. 16-23.

4 Diamond-like carbon coating under oleic acid lubrication: Evidence for graphene oxide formation in superlow friction [Электронный ресурс] // Scientific reports [Электронный ресурс] : [сайт]. – URL: <https://www.nature.com/articles/srep46394> (дата обращения: 25.01.2025). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

5 Pochet, L. F. CVD coatings: from cutting tools to aerospace applications and its future potential. Surface and Coatings Technology / L. F. Pochet, P. Howard, S. Safaie // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – № 94. – P. 70-75.

6 Jamari, J. The effect of bottom profile dimples on the femoral head on wear in metal-on-metal total hip arthroplasty / J. Jamari [et al.] // J. Funct. Biomater. – 2021. – 38 p.