УДК 672.9

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА КОРРОЗИЮ И ИЗНОС СТАЛЬНЫХ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМАХ

INFLUENCE OF CORROSION ON WEAR AND DEGRADATION OF FRICTION INSERTS WITH FIBROUS FILLERS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Юсубов Фикрет Фахраддин
доцент кафедры материаловедения и технологий обработки,
Азербайджанский государственный университет
нефти и промышленности
fikratyusub@gmail.com

Аннотация. В этом исследовании изучается влияние коррозии на фрикционные характеристики дисков из низкоуглеродистой стали и композиционных материалов на основе фенольной смолы. Испытания показали, что NaCl и HCl ускоряют деградацию материалов, снижая трение и эффективность торможения. Погружение в NaCl вызывает значительную потерю массы и точечную коррозию, в то время как HCl вызывает локализованную, агрессивную коррозию.

Ключевые слова: тормозной диск, сталь, фрикционные композиты, коррозия, деградация, износ.

Yusubov Fikrat Fakhraddin
Associate Professor of the Department
of Materials Science and Processing,
Azerbaijan State Oil and Industry University
fikratyusub@gmail.com

Annotation. This study examines the impact of corrosion on the frictional characteristics of low-carbon steel discs and phenolic resin-based composite materials. Tests showed that NaCl and HCl accelerate material degradation, reducing friction and braking efficiency. NaCl immersion causes significant mass loss and pitting corrosion, while HCl exposure leads to localized, aggressive corrosion.

Keywords: brake disc, steel, friction composites, corrosion, degradation, wear l.

Износо-коррозионная деградация стальных тормозных дисков обусловлена механическим износом и химической коррозией, что снижает эффективность торможения и долговечность [1]. Высокие нагрузки и трение способствуют образованию частиц износа, ускоряющих коррозию, особенно во влажной и хлорсодержащей среде. Это приводит к потере материала, увеличению шероховатости и снижению эффективности, при этом ключевые факторы – состав диска, воздействие окружающей среды и наличие загрязнений [2].

Низкоуглеродистая сталь, хотя и встречается реже, чем чугун или высокоуглеродистые стали, рассматривается как материал для тормозных дисков, но обладает меньшей твердостью и склонностью к ржавлению без защитных покрытий [3]. В данной работе исследуется ее коррозионная деградация с акцентом на изменения микроструктуры, твердости и шероховатости, а также влияние коррозии на трение и эффективность торможения.

Для оценки коррозионного поведения материалов тормозных дисков использованы два метода: воздействие паров HCl и погружение в раствор NaCl. Образец прототипа материала тормозного диска полностью погружён в раствор NaCl с концентрацией 3,5 мас.% при температуре 28 °C, что имитирует условия воздействия морской воды или дорожной соли. Образец находился в растворе 72 часа, что обеспечило достаточное время для взаимодействия хлоридных ионов с поверхностью материала. Второй метод включает размещение образца в камере над раствором HCl, при этом он не контактирует напрямую с кислотой, а подвергается воздействию паров, которые поднимаются из раствора (рис. 1).

а) б)

Рисунок 1 – Испытание на коррозию:
a) воздействие паров HCl и b) погружение в раствор NaCl

Трибологические свойства корродированных образцов были оценены с использованием вертикального испытательного устройства MMW-1, с применением настройки «палець-диск». Эксперименты включали одновременное трение трех идентичных цилиндрических образцов о вращающийся диск при заданной нагрузке.

Исследование результатов коррозии выявило существенные различия между двумя испытанными методами: погружением в раствор NaCl и воздействием паров HCl (таб). При погружении в раствор NaCl материал потерял 0,0449 г массы, что соответствует снижению на 0,1036 %. Это свидетельствует о более высоком уровне коррозии по сравнению с воздействием паров HCl, в результате которого потеря массы составила только 0,0200 г, или 0,0462 %.

Таблица 1 – Результаты испытаний на коррозию

Метод коррозии	До (г)	После (г)	Уменьшение (%)
Погружение в раствор NaCl	43.3277	43.2828	0.1036
Воздействие паров HCl	43.2952	43.2752	0.0462

Из-за отсутствия значительных легирующих элементов (например, хрома, характерного для нержавеющих сталей) углеродистая сталь не обладает прочным пассивным оксидным слоем, который мог бы защитить от агрессивных ионов, таких как хлорид. В растворах NaCl ионы хлора проникают в материал и разрушают тонкую оксидную пленку на поверхности, что приводит к возникновению питовидной коррозии. Со временем окисление и питовидная коррозия в углеродистой стали уменьшают её поперечное сечение и приводят к снижению механических свойств, особенно прочности на растяжение и ударной вязкости. Длительное воздействие также может вызвать концентрацию напряжений вокруг питов, что приводит к образованию трещин при циклических нагрузках.

Микроструктура поверхности диска после испытаний на коррозию в растворе NaCl показывает значительное локальное разрушение. Наличие множества тёмных пятен свидетельствует о точечном коррозионном повреждении, характерном для агрессивных сред, содержащих хлорид-ион (рис. 2).

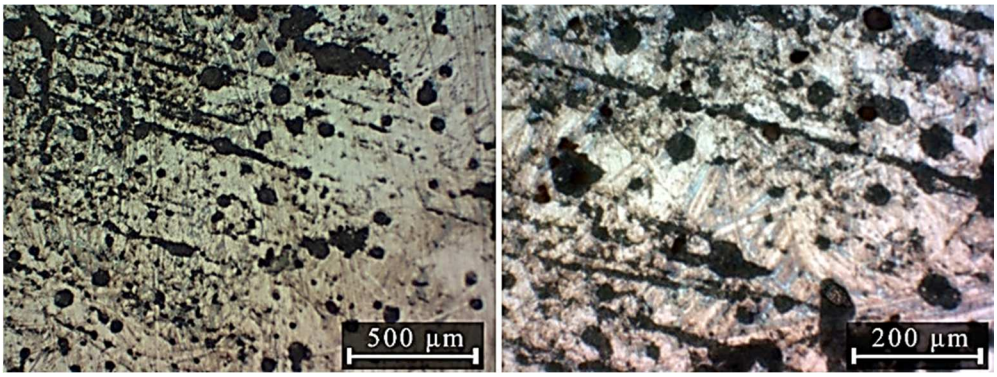

Рисунок 2 – Микроструктура поверхности прототипа стального диска после коррозионных испытаний в растворе NaCl для двух случайно выбранных точек

Дополнительно, вытянутые тёмные области могут свидетельствовать о коррозионном поражении вдоль границ зёрен или включений. Шероховатость поверхности указывает на существенное растворение материала, что может привести к ухудшению механических свойств, особенно в условиях циклических нагрузок. Тёмные участки, вероятно, содержат продукты коррозии, такие как оксиды и хлориды железа, образующиеся в средах, богатых хлоридами. Такое разрушение поверхности может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках, например, снизить фрикционные свойства и прочностные показатели тормозных дисков.

На рисунке 3 показан профиль изношенной поверхности тормозного диска, демонстрирующий коррозионные и износные следы. Пики и впадины в распределении высот свидетельствуют о значительном неровности поверхности, что влияет на эффективность торможения и уровень шума. Более высокие пики, обозначенные жёлтыми областями на графике, могут соответствовать более твёрдым, менее изношенным участкам или накоплению материала вследствие коррозии, в то время как более низкие впадины могут указывать на зоны потери материала или более глубокий абразивный износ.

На рисунке 4 показана изношенная поверхность образца тормозной колодки, который находился в контакте с корродированным диском из углеродистой стали. Реальная и неровная поверхность, на которой видны накопленные частицы износа и мусор, указывает на значительное разрушение материала тормозной колодки в результате трения с диском. Это разрушение соответствует теории

«разрушения пассивной пленки», которая является общепринятым механизмом в трибокоррозии. Эта теория объясняет, как защитные пассивные пленки на поверхностях могут разрушаться под воздействием сил трения. Когда эта пассивная пленка нарушается, основной материал подвергается дальнейшему износу и химическим взаимодействиям, что приводит к ускоренной потере материала и образованию частиц износа. Таким образом, наблюдаемый износ на поверхности тормозной колодки можно объяснить как механическим трением, так и разрушением защитных пассивных пленок, что согласуется с принципами трибокоррозии.

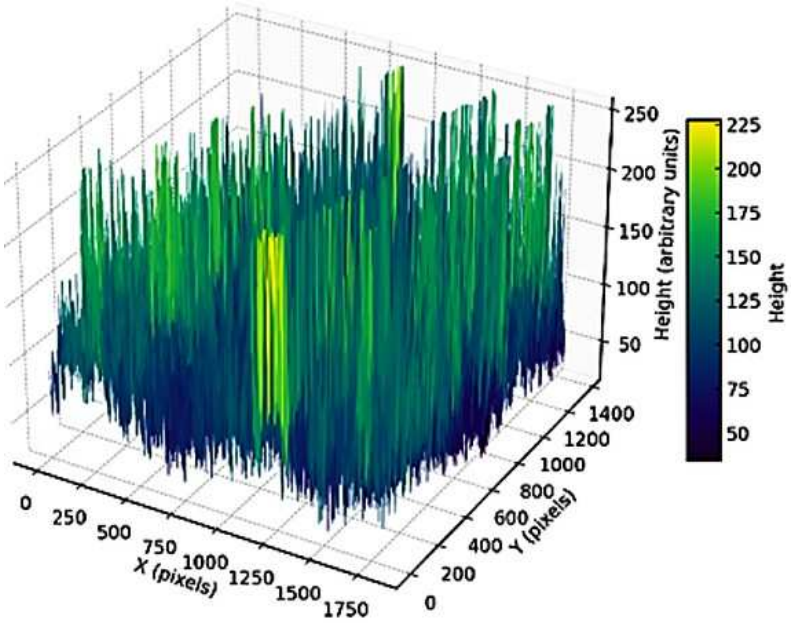

Рисунок 3 – Профиль изношенной поверхности тормозного диска

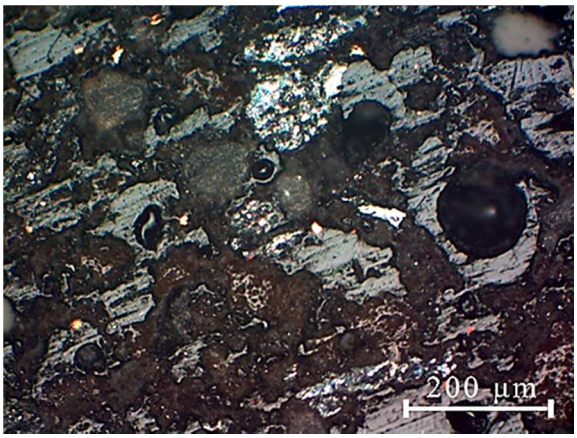

Рисунок 4 – Изношенная поверхность образца тормозной колодки

Теория «разрушения пассивной пленки» объясняет, как коррозия происходит в металлах, защищённых тонким стабильным оксидным слоем, известным как пассивная пленка [4]. Этот защитный слой образуется естественным образом на таких металлах, как нержавеющая сталь, предотвращая дальнейшие реакции с окружающей средой. Однако когда эта пассивная пленка нарушается из-за механического повреждения, химического воздействия или локальных дефектов, основной металл подвергается воздействию коррозионных элементов.

Потемневшие участки на поверхности свидетельствуют о присутствии продуктов коррозии от диска из углеродистой стали, которые, вероятно, образовались в результате окислительных процессов, ускоренных высокими температурами и влажностью окружающей среды во время торможения. Яркие или отражающие полосы на изображении указывают на отполированные участки, вероятно, из-за действия трения. Эти участки могут содержать металлические или другие твёрдые неорганические материалы, входящие в состав тормозной колодки, которые стали гладкими и отражающими в ре-

зультате многократного контакта. Этот трениевый слой играет важную роль в износостойкости колодки, так как может изменять коэффициент трения между тормозной колодкой и диском, что влияет на общую эффективность торможения.

В связи с вышеизложенным, исследование показало, что коррозия влияет на тормозные диски из низкоуглеродистой стали по-разному в зависимости от окружающей среды. Погружение в раствор NaCl 3,5 % вызвало более высокую потерю массы (0,1036 %) по сравнению с воздействием паров HCl (0,0462 %), что указывает на более сильное разрушение от NaCl. Микроскопический анализ показал, что погружение в NaCl приводило к равномерному образованию ямок и увеличению шероховатости поверхности, в то время как пары HCl вызывали более агрессивную, локализованную коррозию. Испытания на трение показали увеличение износа и шероховатости на корродированных поверхностях, что повлияло на характеристики торможения. В целом, результаты подчеркивают важность учета воздействия окружающей среды, поскольку дорожные соли могут вызывать постепенный, широкий износ, в то время как кислотные среды могут привести к быстрому, локализованному повреждению. Разнообразие текстур, цветов и структурных особенностей на поверхности тормозных дисков подчеркивает сложность взаимодействия между различными фазами материала. Присутствие различных материалов и их реакции с окружающей средой имеют решающее значение для обеспечения надёжности тормозных систем и их долгосрочной работы в различных условиях эксплуатации.

Список литературы / List of references:

1. Physico-chemical characterization of corrosion scales in braking systems. In Nace Corrosion. NACE-2020-14687 / M. Bandiera [et al.]. – 2020.

2. Salohiddinov F.A. Corrosion and wear of machine parts. Alley of Science. – 2021. – № 1(6). – P. 299–302.

3. Optimization of process variables for shielded metal arc welding dissimilar mild steel and medium carbon steel joints / S. Vijayakumar [et al.] // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2024. – № 38 (2). – P. 185–202.

4. Wang Z. Tribocorrosion behavior of nanocrystalline metals – a review / Z. Wang, Y. Yan, L. Qiao // Materials Transactions. – 2015. – № 56(11). – P. 1759–1763.