

А.А. Ковалев¹, Н.В. Рогов¹

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА НАНЕСЕНИЯ КОРРОЗИЕСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ МАШИН С УЧЕТОМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК



¹Артем Александрович Ковалев,
Московский государственный технический университет им.
Н.Э. Баумана
Россия, Москва
Тел.: (910)445-0210, E-mail: kovalevarta@gmail.com.



²Николай Вадимович Рогов,
Московский государственный технический университет им.
Н.Э. Баумана
Россия, Москва
Тел.: (968)852-6721, E-mail: nikolayrogov_24@mail.ru.

Аннотация

Рассматриваются распространенные в машиностроительной отрасли методы нанесения коррозиестойких покрытий на корпусные детали машин с учётом их эксплуатационно-технических характеристик. Разработана формализованная методика, основанная на многокритериальном выборе эффективного метода нанесения. Установлено, что полимерное порошковое покрытие обеспечивает наилучшее сочетание коррозионной стойкости, технологичности, экономичности и экологичности.

Ключевые слова: коррозиестойкие покрытия, методы нанесения покрытий, корпусные детали, методика выбора коррозиестойких покрытий, полимерные порошковые покрытия.

Введение

Коррозия металлических деталей является одним из наиболее существенных внешних воздействующих факторов снижения долговечности и надёжности деталей машин. Данный процесс, связанный с химическим или электрохимическим взаимодействием материала с окружающей средой, приводит к постепенному разрушению его поверхностных слоёв, что неизбежно отражается на эксплуатационно-технических характеристиках изделий. Особенно значима эта проблема проявляется в тех случаях, когда машины эксплуатируются в условиях повышенной влажности, широких температурных колебаний, воздействия агрессивных жидкостей и газов. Примерами могут служить авиационная техника, двигатели, насосные агрегаты, где требования к надёжности деталей и сборочных единиц чрезвычайно высоки [1-4].

Наиболее уязвимыми к коррозии являются ответственные изделия, такие как корпусные детали, например, редукторов, двигателей, насосов, работающих в условиях агрессивных сред, а также вибраций, высоких нагрузок и под давлением. Учитывая высокую стоимость подобных изделий, а также возможные последствия их отказа, задача повышения их коррозионной стойкости становится актуальной. Необходимо отметить, что выбор метода защиты требует учёта целого комплекса факторов – от материала, геометрии детали и условий эксплуатации до особенностей условий производства.

Современные технологии предлагают широкий спектр методов нанесения коррозиестойких покрытий, отличающихся не только составом применяемых материалов, но и технологическими режимами, трудоёмкостью, стоимостью и экологичностью. В данных условиях возникает необходимость в достоверной оценке каждого из распространенных в машиностроительной отрасли методов, что требует применения формализованных подходов, основанных на количественных критериях. Такая оценка позволит определить наиболее эффективный метод нанесения коррозиестойких покрытий для конкретных типов изделий с учётом различных факторов, определяющих их ресурс (в частности, физико-механические свойства покрытий, их толщина, пористость, шероховатость) и влияющих на затраты производства [5-7].

Настоящее исследование направлено на разработку и применение методики оценки различных методов нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин. В качестве объекта анализа выбраны корпусные элементы плунжерных насосов, используемые в авиационной технике. Эти детали подвергаются интенсивному воздействию агрессивных сред и соответственно требуется их защита. Целью работы является выбор эффективного метода нанесения коррозиестойких покрытий,

обеспечивающего необходимый уровень защиты при минимальных производственных затратах.

Методы

Для выбора метода нанесения коррозиестойких покрытий на корпусные детали машин необходимо провести анализ технологий защиты металла. В настоящее время применяется широкий спектр методов нанесения покрытий, обеспечивающие не только защитные коррозиестойкие, но и декоративные свойства поверхностей корпусных деталей [8-12].

В первую очередь целесообразно выделить металлические покрытия, сформированные следующими базовыми методами: горячее и холодное цинкование, никелирование, хромирование и алитирование.

Вторую большую группу составляют неметаллические неорганические покрытия, полученные воронением, оксидированием, пассивацией и фосфатированием.

В отдельную категорию необходимо выделить лакокрасочные покрытия (ЛКП), обладающие широким спектром декоративных и защитных свойств, и полимерные порошковые покрытия – наиболее прогрессивная технология, основанная на нанесении термореактивного или термопластичного порошка с последующим оплавлением. Такие покрытия обеспечивают высокий уровень защиты от коррозии, устойчивость к УФ-излучению, агрессивным химическим веществам и истиранию [13-15].

Для корректного сравнения вышеперечисленных методов была разработана формализованная методика, основанная на многокритериальном выборе, включающая следующие этапы.

1. Формирование матрицы параметров – каждая строка соответствует критерию (например, толщина покрытия, коррозионная стойкость, адгезия и т.д.), а каждый столбец – определённому методу нанесения коррозиестойкого покрытия.

2. Нормализация данных – так как параметры имеют различные физические размерности и шкалы, все они переводятся в балльную оценку по 100-балльной шкале, где 100 – наилучшее значение среди всех методов, а 0 – наихудшее.

3. Весовая коррекция (при необходимости) – методика допускает назначение весов различным критериям в зависимости от приоритетов конкретного производства (например, приоритет на минимальную энергоёмкость или на высокую адгезию).

4. Суммирование баллов по каждому способу – итоговая оценка отражает обобщённую эффективность метода и позволяет осуществить

ранжирование рассматриваемых вариантов нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин.

Критерии для оценки предлагается сгруппировать по пяти блокам:

- качество покрытия: коррозионная стойкость, адгезия, толщина;
- экономичность: сырьевые затраты, стоимость оборудования, коэффициент использования материала;
- технологичность: энергоёмкость, возможность автоматизации, требования к подготовке;
- временные затраты: на подготовку состава, поверхности, нанесение и последующую обработку;
- экологичность нанесения покрытия.

Результаты

Результатом применения предложенной выше методики стала сравнительная оценка типовых методов нанесения коррозиестойких покрытий. Каждый из методов был проанализирован по двенадцати количественным критериям, охватывающим ключевые эксплуатационные, технологические и экономические аспекты.

Исходные данные были получены как из литературных источников, так и из нормативной и справочной документации. Значения критериев включали:

- коррозионную стойкость покрытия (в г);
- толщину покрытия (в мкм);
- адгезию (в баллах);
- сырьевые затраты (в руб/м²);
- энергоёмкость (в кВт);
- стоимость оборудования (в тыс. руб.);
- коэффициент использования материала (от 0 до 1);
- время на подготовку оборудования;
- время подготовки поверхности;
- время нанесения покрытия;
- время последующей обработки;
- экологичность (оценивалась бинарно: безопасно/опасно).

После приведения всех характеристик к единому масштабируемому виду (в баллах от 0 до 100) и нормализации значений были рассчитаны суммарные оценки по каждому способу. Итоговые баллы характеризуют общий рейтинг метода – чем выше сумма, тем более предпочтительным он является с учётом рассмотренных критериев.

Результаты анализа показали следующее.

1. Полимерное порошковое покрытие получило наивысшую суммарную оценку – 851 балл, что обусловлено его высокой коррозионной стойкостью, низкой энергоёмкостью, высокой адгезией и минимальными затратами на последующую обработку. Кроме того, оно требует значительно меньшее время подготовки и нанесения по сравнению с другими методами.

2. Хромирование и холодное цинкование заняли второе и третье места соответственно (636 и 630 баллов). Они обладают высокой прочностью покрытия, но требуют либо значительных затрат энергии (в случае хромирования), либо обеспечивают ограниченную долговечность при экстремальных климатических условиях (в случае цинкования).

3. Фосфатирование и оксидирование показали сбалансированные, но умеренные результаты (607 и 595 баллов). Эти методы не обеспечивают максимальных защитных характеристик, однако являются экономичными и характеризуются низкими требованиями к технологическому обеспечению.

4. Никелирование оказалось неэффективным в суммарной оценке по причине высокой стоимости и энергозатрат (577 баллов), несмотря на хорошие физико-химические свойства покрытия.

5. Лакокрасочные покрытия продемонстрировали противоречивые результаты: отличные показатели по времени и стоимости нанесения, но слабые – по стойкости и долговечности. Суммарный балл – 629.

6. Наименьшие оценки получили воронение (500 баллов) и пассивирование (568 баллов), что объясняется их ограниченной коррозионной стойкостью и узкой областью применения.

7. Для наглядности полученные данные были представлены в виде столбчатой диаграммы сравнения (рис. 1). Диаграмма отражает выраженное преимущество полимерного порошкового метода над альтернативными технологиями.

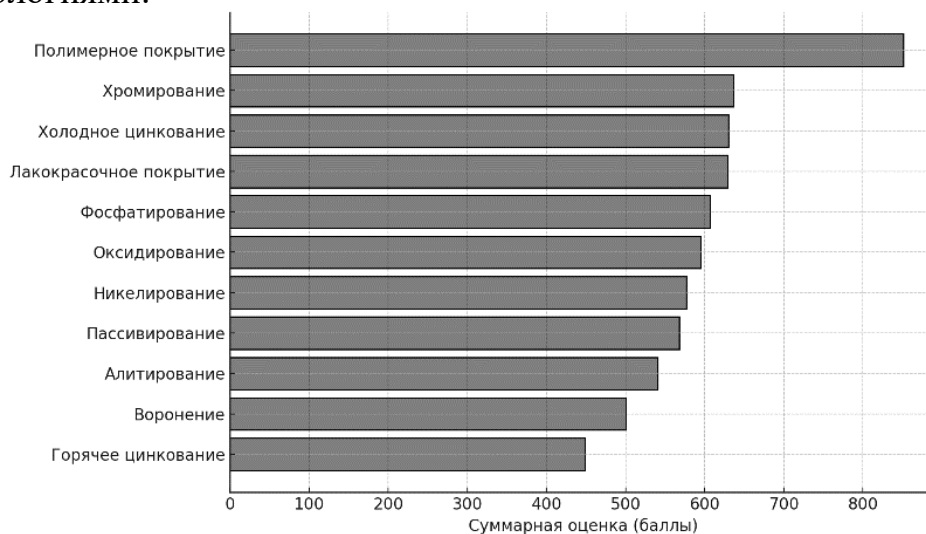


Рис. 1. Сравнение методов нанесения коррозионно-стойких покрытий

8. На основании этих результатов можно сделать вывод, что формализованный подход позволяет не только выбрать эффективный метод покрытия для конкретных условий, но и выявить слабые места технологий, что целесообразно учитывать при разработке технологических процессов.

Обсуждение

Результаты, полученные с помощью многокритериального анализа, подтверждают важность системного подхода к выбору метода нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин. Предложенная методика позволяет учесть совокупность эксплуатационных, технологических, экономических и экологических характеристик. Это особенно важно в условиях рыночной конкуренции, где высокие требования к надёжности выпускаемых изделий сочетаются с необходимостью оптимизации производственных затрат.

Один из ключевых выводов работы заключается в том, что не существует универсального метода нанесения коррозиестойких покрытий, который бы обеспечивал наилучшие показатели по всем критериям одновременно. Например, хромирование обеспечивает высокие показатели в отношении твёрдости и, соответственно, износостойкости, но требует значительных энергозатрат, применения агрессивных электролитов и соблюдения условий производственной безопасности. Лакокрасочные покрытия выигрывают по простоте и дешевизне нанесения, но быстро теряют защитные свойства в условиях абразивного или химического воздействия.

Таким образом, при выборе метода необходимо опираться на целевую область применения покрытия. Если изделие будет эксплуатироваться при высоких механических нагрузках и в условиях агрессивной среды (например, в авиационных плунжерных насосах), ключевыми критериями становятся коррозионная стойкость и прочность. В этих условиях наиболее сбалансированный результат показывает метод нанесения полимерного порошкового покрытия.

Следует также подчеркнуть, что полимерные порошковые покрытия обеспечивают высокую технологическую гибкость. Они могут применяться как для массового, так и для мелкосерийного производства. Кроме того, процесс может быть легко автоматизирован: применяются роботизированные системы напыления, которые обеспечивают равномерность слоя и минимизируют участие оператора, снижая риск дефектов и увеличивая повторяемость результата. При этом покрытие формируется из одного слоя без необходимости грунтовки или

многослойного нанесения, что значительно сокращает общее время производственного цикла.

С точки зрения экологической безопасности полимерные порошковые составы выгодно отличаются от гальванических методов, поскольку не содержат хроматов, кислот и тяжёлых металлов, а неиспользованный порошок может быть возвращён в технологический цикл. Это делает метод предпочтительным в условиях современных требований к экологичности и принципам ресурсосбережения.

Также стоит отметить, что предложенная методика оценки может быть адаптирована к конкретным условиям производства. Например, если есть ограничения по стоимости оборудования, можно ввести соответствующий весовой коэффициент для данного критерия. Аналогично, приоритет может быть отдан времени нанесения или энергоэффективности, если технологическая линия работает в режиме высокой производственной загрузки.

Выводы

Разработана и апробирована формализованная методика сравнительной оценки методов нанесения коррозионно-стойких покрытий на корпусные детали машин, основанная на многокритериальном анализе с учётом эксплуатационных, технологических, экономических и экологических параметров. Методика включает нормализацию разноразмерных показателей, балльную оценку по каждому критерию, а также возможность весовой корректировки в зависимости от приоритетов производства, что обеспечивает её универсальность и адаптивность к различным условиям.

Выполненный анализ по разработанной методике подтвердил, что наивысшие баллы соответствуют способу нанесения полимерных порошковых покрытий, что обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, низкой энергоёмкостью, технологичностью и экологической безопасностью. Установлено, что ни один из альтернативных методов не обладает превалирующим преимуществом по рассмотренным критериям и их положительные характеристики нивелируются эксплуатационными или технологическими ограничениями.

Предложенная методика может быть использована при проектировании и оптимизации технологических процессов в машиностроении для выбора эффективного метода нанесения коррозионно-стойких покрытий на детали машин с учетом их эксплуатационно-технических характеристик, а также при разработке новых способов защиты от коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мухаметшина Р.М., Петров А.В. Влияние технического состояния на экологическую безопасность дорожно-строительных машин // Техника и технология транспорта. 2018. № 1 (6). С. 13.
- [2] Медведев М.С. Современные способы защиты металла от коррозии// Эпоха науки. 2019. №20. С. 182-185.
- [3] Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Антипин М.А., Шаховцев М.М. Обеспечение однородности оксидной пленки на поверхности монокристаллических кремниевых подложек в процессе их термического оксидирования // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. №4. С. 170-177.
- [4] Говорков А.С. Методика количественной оценки технологичности конструкции изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. №1. С. 31-37.
- [5] Blankenship, K., & Manuel, J. (2025). Two-Coat Inorganic Coating System for Steel Bridges. *Transportation Research Record*, 0(0).
- [6] Shinde, V. (2024). EIS Study of Anticorrosive Nanocomposite Films. In *Novel Anti-Corrosion and Anti-Fouling Coatings and Thin Films* (eds H. Murthy, V.J. Pillai, K.P. Kumar and M. Cowan).
- [7] Rzaiz, D.R., Mahmoudi, E., Yong, N.L. et al. Synthesis and characterizations of hybrid nanocomposite coatings for enhanced anticorrosion performance. *J Coat Technol Res* (2025).
- [8] Multidimensional Hybrid Metal Phosphonate Coordination Networks as Synergistic Anticorrosion Coatings. A. Fanourgiakis, E. Chachlaki, N. Plesu, D. Choquesillo-Lazarte, A. M. Kirillov, and K. D. Demadis. *Inorganic Chemistry* 2024 63 (34), 16018-16036.
- [9] Zh. Li, Y. Huang, T. Guo et al. Enhancing anticorrosion performance of metals by incorporating cellulose nanofibrils/ α -ZrP composite as nanofiller into water-based coating. *Carbohydrate Polymers*. Volume 347, 2025, 122755.
- [10] Han Zhang et al 2024 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2740 012021.
- [11] Kaixuan Ye, Zili Li; Toward Ceramic Anticorrosion Coatings: A Review. *CORROSION* 1 October 2020; 76 (10): 895–917.
- [12] Taveira L.V. et al. // *Corrosion Science*. 2010. V. 52. P. 2813–2818.
- [13] Бобров, Г. В. Теория и технология формирования неорганических покрытий: Монография / Г.В. Бобров, А.А. Ильин, В.С. Спектор. - Москва : Альфа-М, 2014. - 928 с.
- [14] Слепцов О.В. Фофанов Б.А. Шальнев А.Н. Соловьев К.А. Химическое осаждение никелевых покрытий и их коррозионная устойчивость // Физико-химические проблемы строительного материаловедения. №1. - 2008. -С.47-51.

- [15] Нагурянская Ю.Н. Исследование свойств оксидных пленок металлических катализаторов // Качество в производственных и социально-экономических системах. – 2014. Том 2. С. 252-256.

A.A. Kovalev, N.V. Rogov

SELECTION OF AN EFFECTIVE METHOD FOR APPLYING CORROSION-RESISTANT COATINGS TO MACHINE PARTS CONSIDERING THEIR PERFORMANCE AND TECHNICAL CHARACTERISTICS

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Abstract

The commonly used methods for applying corrosion-resistant coatings to machine housing components in the mechanical engineering industry are examined, taking into account their operational and technical characteristics. A formalized methodology based on a multi-criteria approach for selecting the most effective coating method has been developed. It has been established that polymer powder coating offers the best combination of corrosion resistance, manufacturability, cost-effectiveness, and environmental safety.

Key words: corrosion-resistant coatings, coating application methods, housing components, methodology for selecting corrosion-resistant coatings, polymer powder coatings.

REFERENCES

- [1] Mukhametshina R.M., Petrov A.V. Influence of Technical Condition on the Environmental Safety of Road Construction Machines // *Transport Engineering and Technology*. 2018. No. 1 (6). P. 13. (rus.)
- [2] Medvedev M.S. Modern Methods of Metal Corrosion Protection // *Epoch of Science*. 2019. No. 20. P. 182–185. (rus.)
- [3] Kovalev A.A., Tishchenko L.A., Antipin M.A., Shakhovtsev M.M. Ensuring the Uniformity of the Oxide Film on the Surface of Monocrystalline Silicon Wafers During Thermal Oxidation // *Bulletin of Moscow Aviation Institute*. 2018. Vol. 25. No. 4. P. 170–177. (rus.)
- [4] Govorkov A.S. Methodology for Quantitative Assessment of the Technological Effectiveness of Aircraft Product Design // *Bulletin of Moscow Aviation Institute*. 2013. Vol. 20. No. 1. P. 31–37. (rus.)
- [5] Blankenship K., Manuel J. Two-Coat Inorganic Coating System for Steel Bridges. *Transportation Research Record*. 2025. 0(0).

- [6] Shinde V. EIS Study of Anticorrosive Nanocomposite Films. In: *Novel Anti-Corrosion and Anti-Fouling Coatings and Thin Films*. Eds: H. Murthy, V.J. Pillai, K.P. Kumar, M. Cowan. 2024.
- [7] Rzaiz D.R., Mahmoudi E., Yong N.L. et al. Synthesis and Characterizations of Hybrid Nanocomposite Coatings for Enhanced Anticorrosion Performance. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2025.
- [8] Fanourgiakis A., Chachlaki E., Plesu N., Choquesillo-Lazarte D., Kirillov A.M., Demadis K.D. Multidimensional Hybrid Metal Phosphonate Coordination Networks as Synergistic Anticorrosion Coatings. *Inorganic Chemistry*. 2024. Vol. 63 (34). P. 16018–16036.
- [9] Li Zh., Huang Y., Guo T. et al. Enhancing Anticorrosion Performance of Metals by Incorporating Cellulose Nanofibrils/ α -ZrP Composite as Nanofiller into Water-Based Coating. *Carbohydrate Polymers*. 2025. Vol. 347. 122755.
- [10] Zhang H. et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2740. 012021.
- [11] Ye K., Li Z. Toward Ceramic Anticorrosion Coatings: A Review. *CORROSION*. 2020. Vol. 76 (10). P. 895–917.
- [12] Taveira L.V. et al. *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. P. 2813–2818.
- [13] Bobrov G.V., Ilyin A.A., Spektor V.S. *Theory and Technology of Inorganic Coatings Formation: Monograph*. Moscow: Alfa-M, 2014. 928 p. (rus.)
- [14] Sleptsov O.V., Fofanov B.A., Shalnev A.N., Solovyov K.A. Chemical Deposition of Nickel Coatings and Their Corrosion Resistance // *Physico-Chemical Problems of Construction Materials Science*. 2008. No. 1. P. 47–51. (rus.)
- [15] Naguryanskaya Yu.N. Study of Properties of Oxide Films on Metal Catalysts // *Quality in Production and Socio-Economic Systems*. 2014. Vol. 2. P. 252–256. (rus.)