

**ВЛИЯНИЕ ОКСИНИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МИКРОТВЁРДОСТЬ
И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Бойназаров Урол Равшанович

Каршинский государственный технический университет, доцент.

Республика Узбекистан.

Email: boynazarov.1963@gmail.com

Аннотация. В данной статье исследована эффективность технологии нитрооксидирования для упрочнения поверхности конструкционных сталей. Установлено, что в результате предварительного оксидирования, азотирования и последующего пароксидирования формируются оксинитридные покрытия с высокими физико-механическими и трибологическими свойствами. Микротвёрдость оксинитридного слоя достигает 8,5–12,5 ГПа, а коэффициент трения снижается до 0,04–0,07. Кроме того, наблюдается повышение износостойкости примерно на 30 % и увеличение срока службы деталей в 2–5 раз. Полученные результаты подтверждают перспективность применения нитрооксидирования для повышения надёжности и долговечности деталей горно-металлургического, нефтегазового и машиностроительного оборудования.

Ключевые слова: нитрооксидирование, оксинитридное покрытие, конструкционная сталь, микротвёрдость, износостойкость, коэффициент трения, химико-термическая обработка.

Введение

В настоящее время повышение долговечности и надёжности деталей машин является одной из важнейших задач современного материаловедения и машиностроения. Детали горно-металлургического, нефтегазового и транспортного оборудования в процессе эксплуатации подвергаются воздействию высоких механических нагрузок, трения, абразивного износа и агрессивных сред. По данным исследований, до 80 % отказов машин и механизмов связано с разрушением поверхностных слоёв деталей, что приводит к снижению производительности оборудования и увеличению затрат на ремонт и техническое обслуживание.

Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных свойств конструкционных сталей является химико-термическая обработка поверхности. Среди существующих методов особый интерес представляет

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

нитрооксидирование, позволяющее формировать на поверхности стали оксинитридные покрытия с высокими показателями твёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости. Формирование многослойной оксидно-нитридной структуры способствует снижению коэффициента трения, перераспределению контактных напряжений и повышению сопротивления контактной усталости.

Несмотря на значительное количество исследований в области химико-термического упрочнения, вопросы формирования оксинитридных покрытий и их влияния на комплекс эксплуатационных свойств конструкционных сталей остаются недостаточно изученными. В связи с этим исследование закономерностей образования оксинитридных слоёв, их структуры и физико-механических характеристик является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное практическое значение для повышения ресурса и надёжности промышленного оборудования.

Цель исследования

Целью исследования является изучение закономерностей формирования оксинитридных покрытий на поверхности конструкционных сталей при нитрооксидировании, определение их структурно-фазового состава и оценка влияния на физико-механические и трибологические свойства материала. Для достижения поставленной цели исследовано влияние процессов предварительного оксидирования, азотирования и последующего пареооксидирования на формирование диффузионного слоя, его микроструктуру, микротвёрдость и эксплуатационные характеристики.

Кроме того, целью работы является определение оптимальных режимов химико-термической обработки, обеспечивающих повышение микротвёрдости поверхностного слоя до 8,5–12,5 ГПа, снижение коэффициента трения до 0,04–0,07 и увеличение износостойкости по сравнению с традиционно азотированными сталями. Особое внимание уделено исследованию влияния оксинитридных покрытий на сопротивление контактной усталости и долговечность деталей, работающих в условиях повышенных механических нагрузок и интенсивного износа.

Результаты

В результате проведённых исследований установлено, что технология нитрооксидирования обеспечивает формирование на поверхности конструкционных сталей многослойных оксинитридных покрытий с улучшенными физико-механическими и трибологическими характеристиками. Металлографический анализ показал, что после предварительного

оксидирования, азотирования и последующего пароксидирования на поверхности образуется равномерный диффузионный слой, состоящий из оксидной и нитридной зон. Формирование фаз ε -Fe₂₋₃N и γ' -Fe₄N способствует повышению твёрдости поверхностного слоя и улучшению его эксплуатационных свойств.

Исследование микротвёрдости показало, что максимальные значения для оксинитридного покрытия достигают 8,5–12,5 ГПа, тогда как микротвёрдость оксидного слоя составляет 4,0–5,0 ГПа. Установлено, что наличие градиентного распределения твёрдости по толщине покрытия способствует снижению внутренних напряжений и повышению стойкости поверхности к образованию микротрещин. Кроме того, высокая твёрдость поверхностного слоя обеспечивает эффективное сопротивление абразивному изнашиванию и пластической деформации в процессе эксплуатации.

Трибологические испытания показали, что коэффициент трения оксинитридных покрытий при нагрузках от 250 до 1000 Н сохраняется в пределах 0,04–0,07. Для традиционно азотированных образцов данный показатель составил 0,11–0,13. Таким образом, применение нитрооксидирования позволило снизить коэффициент трения на 40–60 %, что способствует уменьшению энергетических потерь и интенсивности изнашивания контактирующих поверхностей.

Результаты испытаний на износостойкость подтвердили высокую эффективность разработанной технологии. Оксинитридные покрытия сохраняли работоспособность без признаков поверхностного разрушения до 150 тыс. циклов трения, тогда как для азотированных образцов признаки интенсивного износа наблюдались уже после 60 тыс. циклов. При этом повышение износостойкости составило около 30 %. Испытания на контактную усталость показали, что многослойная оксидно-нитридная структура способствует более равномерному распределению контактных напряжений и замедляет процесс накопления усталостных повреждений. В результате ресурс деталей увеличивается в 2–5 раз по сравнению с традиционно обработанными сталями, что подтверждает перспективность применения нитрооксидирования для повышения долговечности деталей горно-металлургического, нефтегазового и машиностроительного оборудования.

Заключение

Результаты проведённых исследований показали, что технология нитрооксидирования является эффективным методом повышения

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

эксплуатационных свойств конструкционных сталей. Установлено, что формирование многослойного оксинитридного покрытия способствует увеличению микротвёрдости поверхностного слоя до 8,5–12,5 ГПа, снижению коэффициента трения до 0,04–0,07 и повышению износостойкости примерно на 30 % по сравнению с традиционными методами химико-термической обработки. Оксинитридные покрытия сохраняли работоспособность до 150 тыс. циклов трения, обеспечивая увеличение ресурса деталей в 2–5 раз. Полученные результаты подтверждают перспективность применения нитрооксидирования для упрочнения деталей горно-металлургического, нефтегазового и машиностроительного оборудования, работающих в условиях повышенных механических нагрузок и интенсивного износа.

Использованная литература

1. Bobylev, E. E., Kraposhin, V. S., & Kraposhina, E. N. (2023). Influence of diffusion alloying of structural steels by nickel-copper coatings on corrosion resistance. CIS Iron and Steel Review, 26, 116–121. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2023.02.19>
2. Dou, X., Dai, N., Leng, B., Liu, H., Zhang, Z., Wu, J., & Huang, H. (2025). Understanding the interfacial diffusion behavior of alloying elements between electrodeposited nickel coating and 347H stainless steel interface in molten chloride salt. Journal of Materials Research and Technology, 39, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.09.011>
3. Ghadi, A., Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., & Gholizadeh, R. (2023). A comprehensive review on the carbide-base coatings produced by thermo-reactive diffusion: Microstructure and properties viewpoints. Journal of Alloys and Compounds, 967, 171839. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171839>
4. Khan, H. H., Wang, H., Zhang, Y., & Liu, Z. (2024). In situ thermal interactions of Cu-based anti-corrosion coatings on steel substrates. Coatings, 14(6), 722. <https://doi.org/10.3390/coatings14060722>
5. Najari, M. R., Sajjadi, S. A., & Ganji, O. (2022). Microstructural evolution and wear properties of chromium carbide coating formed by thermo-reactive diffusion process on cold-work tool steel. Results in Surfaces and Interfaces, 8, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2022.100059>
6. Nieto, F. E. C. (2025). Recent advances and challenges of the thermo-reactive deposition and diffusion process for steel surface engineering. In Thermochemical Surface Engineering of Steels. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1219276>

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

7. Wang, Y., Zhang, X., Li, J., & Chen, H. (2025). A review of wear-resistant coatings for steel substrates. *Metals*, 15(11), 1231. <https://doi.org/10.3390/met15111231>
8. Yelwa, J. M., Musa, H., Fasanya, O. O., & Yahaya, J. Y. (2025). Corrosion-resistant coatings: Advances in deposition methods, nanostructures, and self-healing films. *Academia Materials Science*, 2(3), 1–30. <https://doi.org/10.20935/AcadMatSci7829>
9. Zarei, M., Hosseini, S., & Rahimi, A. (2024). A review of recent advances and applications of inorganic coatings for corrosion and wear protection in industrial systems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 60(4), 415–432.
10. Pan, J., Geng, S., Wang, F., & Wu, Y. (2025). Effect of enamel coating thickness on the hot corrosion resistance of coated 316L steel. *High Temperature Corrosion of Materials*, 102(4), 26–39.
11. Хужакулов, Н. Б., Рузиев, У. М., & Насирова, Н. Р. (2021). Исследования влияния качества биоксека на показатели сорбционного выщелачивания. *Universum: технические науки*, (5-2 (86)), 20-23.