

Методы определения характеристик многокомпонентных покрытий запорной арматуры

А.В. Олейник, А.Х. Лампежев, Ю.А. Соболева

Институт конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН)

Аннотация: Ресурс запорной арматуры, эксплуатируемой на участках опасных производственных объектов со сверхвысокими параметрами рабочей среды, во многом ограничивается износостойкостью контактных поверхностей. В связи с этим, для повышения долговечности контактных поверхностей используют технологические приемы для модификации поверхности и используют специальные функциональные покрытия. Разработка и выбор новых функциональных покрытий неразрывно связаны с их сравнительным исследованием на основе определения наиболее значимых характеристик путем проведения испытаний. Целью настоящей работы является аналитический обзор наиболее распространенных методов проведения испытаний для оценки характеристик многокомпонентных нанокompозитных покрытий, наносимых на контактные поверхности запорной арматуры для повышения её износостойкости. По результатам проведенного аналитического обзора даны рекомендации по проведению испытаний многокомпонентных нанокompозитных покрытий.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, функциональные покрытия, методы испытаний, ресурс, износ, трение, твердость, коррозия, трибология.

Введение

В настоящее время запорная арматура является неотъемлемой частью систем транспортирования жидких и газообразных сред [1]. Условия работы арматуры определяются многими факторами. Основными из них являются давление рабочей среды в трубопроводе, температурный режим и особенности веществ, транспортируемых по данному трубопроводу (агрессивность среды). Эксплуатация арматуры на участках опасных производственных объектов со сверхвысокими параметрами рабочей среды может привести к потере прочности и преждевременному износу арматуры, что чревато аварийными ситуациями на производстве и другими неблагоприятными последствиями [2].

Вопросам надежности и безопасности трубопроводной арматуры посвящены ряд исследований, таких, как [3, 4] и др. Анализ литературы и нормативной документации позволяет утверждать, что одной из основных причин потери

работоспособности и преждевременного истощения ресурса арматуры является износ контактных поверхностей. Зачастую это обусловлено тем, что контактные поверхности запорной арматуры эксплуатируются в агрессивных средах и в условиях абразивного износа [5].

Для повышения эксплуатационных показателей и ресурса трубопроводной арматуры используются различные методы упрочнения поверхностей [6]. Чаще всего на практике применяются следующие методы поверхностного упрочнения: методы пластического деформирования поверхности и методы упрочнения поверхностей концентрированными потоками энергии [7, 8].

Методы пластического деформирования поверхности широко используются в машиностроении для повышения усталостной прочности и твердости поверхностного слоя металла, а также для уменьшения шероховатости [9]. Однако данные методы больше применимы для арматуры низких параметров [10-12].

Наиболее многообещающими для трубопроводной арматуры, эксплуатируемой на участках опасных производственных объектов со сверхвысокими параметрами рабочей среды, являются методы упрочнения поверхностей концентрированными потоками энергии. К ним относятся электронно-лучевая обработка, плазменное и детонационное напыление, лазерная обработка, а также вакуумное ионно-плазменное напыление [13]. Данные методы позволяют получить одно- и многокомпонентные нанокompозитные покрытия. Причем, с точки зрения обеспечения максимальных адгезионных характеристик с основным материалом, наибольший интерес вызывает метод вакуумного ионно-плазменного напыления [14].

В отличие от тонкопленочных износостойких покрытий, состоящих, например, из различных тугоплавких соединений: TiN, TiCN, TiAlN, ZrN, ZrCN, ZrHfN, CrN и др. [15-17], свойства многокомпонентных

нанокompозитных покрытий, имеющие высокие перспективы применения к трубопроводной арматуре, таких, как Ti-TiN-(Ti,Mo,Al)N, Cr-CrN-(Cr,Mo,Al)N, Zr-ZrN-(Zr,Mo,Al)N мало изучены.

Таким образом выбор оптимального состава многокомпонентного нанокompозитного покрытия и технологии его нанесения для улучшения функциональных характеристик поверхностного слоя материала и, соответственно, показателей надежности и долговечности, а также стойкости трубопроводной арматуры к агрессивным средам является актуальной задачей, решаемой в настоящее время.

В то же время, недостаточная изученность данной тематики не позволяет гарантировать справедливость результатов и применимость испытаний, проводимых для определения износостойкости многокомпонентных нанокompозитных покрытий. Износостойкость покрытия, в первую очередь, определяется ее твердостью, трибологическими свойствами и стойкостью к воздействию агрессивных сред. Ввиду этого, целью настоящего исследования является анализ и обобщение имеющегося массива информации о современных методах проведения испытаний для оценки характеристик многокомпонентных нанокompозитных покрытий, определяющих их износостойкость.

Анализ методик проведения испытаний многокомпонентных нанокompозитных покрытий

Испытания по определению твердости многокомпонентных нанокompозитных покрытий

Для определения твердости материалов были разработаны множество методик. Основными исторически сложившимися являются методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, Шора и их модификации [18]. Независимо от многочисленности существующих методов, все они основываются на том, что в испытуемый материал вдавливают индентор, а возникающую при этом

пластическую и/или упругую деформацию рассматривают как меру твердости материала. Индентирование производится с помощью специальной испытательной установки под действием медленно возрастающей нагрузки, после чего нагрузка снимается и регистрируется перемещение индентора в зависимости от нагрузки.

При достаточной толщине покрытия (> 5.6 мкм) ее твердость (модуль упругости при индентировании) можно определить традиционными способами [19], по методикам, соответствующим положениям и требованиям ГОСТ Р 8.748-2011. В данном случае испытания следует проводить на металлических пластинах размером $50 \times 50 \times 5$ мм с исследуемым покрытием. Измерения твердости следует произвести не менее чем в пяти местах на поверхности объекта испытаний, а значение твердости рассчитать, как среднее арифметическое значение твердости проведенных измерений.

Испытания по определению шероховатости поверхности многокомпонентных нанокompозитных покрытий

В настоящее время о микро- и макронеровностях судят по профилограммам поверхности. Для этого используются бесконтактные и контактные методы, такие как интерференционная и теневая проекция падающего и отраженного света, метод слепков, метод ощупывания световым лучом, растровый, рефлектометрический и профильный методы [20].

Методы определения параметров шероховатости не обуславливаются составом и параметрами многокомпонентных нанокompозитных покрытий, а их выбор ограничивается чувствительностью метода и требуемой точностью оценки. Для оценки шероховатости многокомпонентных нанокompозитных покрытий рекомендуется использовать метод щупа. Сущность метода заключается в следующем: по исследуемой поверхности перемещается специальная алмазная игла, колеблющаяся от неровностей поверхности. Такие колебания иглы передаются на датчик, где преобразуется в малые

электрические токи, которые в свою очередь усиливаются и регистрируются. Показания выводятся на дисплей прибора и дают представление о характере неровностей исследуемой поверхности – их высоте и глубине.

В качестве объектов испытаний следует использовать металлические пластины размером 50×50×5 мм с исследуемым покрытием. Испытания образцов проводят, основываясь на инструкции по эксплуатации используемого профилографа-профилометра, а также требованиях и рекомендациях ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 19300-86. В качестве испытательной установки следует использовать профилометр модели 130 либо другой стационарный профилометр 1-й степени точности по ГОСТ 19300-86.

Испытания на стойкость к абразивному износу многокомпонентных нанокompозитных покрытий

Абразивное изнашивание трубопроводной арматуры возникает в результате режущего или царапающего воздействия твердых частиц в транспортируемой среде. Все существующие методы испытаний материалов на абразивный износ можно разделить на три категории: с фиксированным, полуфиксированным и свободным абразивом [21]. В каждом методе испытаний характер взаимодействия между материалом и абразивом определяется характером прилагаемой нагрузки: трение, удар и трение с ударом (промежуточное, характеризующее разрушение поверхности износа абразивными частицами одновременно при скольжении и ударе).

Наибольшее распространение получил метод испытаний на изнашивание о закрепленный (фиксированный) абразив. Поэтому выбор базовой методики исследования абразивной износостойкости многокомпонентных нанокompозитных покрытий производился на основе анализа существующих методов испытаний о закрепленные абразивные материалы [22]. В данном случае в качестве подвижного объекта следует выбрать образец с исследуемым покрытием. Сущность испытания на стойкость к абразивному

износу многокомпонентных нанокompозитных покрытий заключается в том, что на модели создаются температурно-силовые поля, тождественные натурным. Это обеспечивается применением расчетного масштабного фактора. В выбранной среде (воздух, смазочные материалы, абразив) при заданной частоте двойных ходов, нагрузке и температуре среды изнашивают подвижный образец, контактирующий с плоской поверхностью неподвижного образца (пластины). В процессе испытаний контролируют значения температуры и измеряют силу трения с учетом возникающих сил инерции. По изменениям размеров образцов оценивают износостойкость моделируемого трибосопряжения, рассчитывают значения параметров трения и интенсивности изнашивания; устанавливают их зависимость от удельной нагрузки. Для корректности результатов испытание следует проводить на не менее чем трех парах образцов.

Испытания на стойкость к воздействию агрессивных сред многокомпонентных нанокompозитных покрытий

Испытания на стойкость к воздействию агрессивных сред (коррозионную стойкость) проводятся для определения долговечности конструкционных материалов в условиях эксплуатации. Существуют две группы таких испытаний: натурные и ускоренные [23].

Натурные испытания – это метод определения коррозионной стойкости в реальных условиях эксплуатации. Этот метод испытаний позволяет получить точные данные об антикоррозионных характеристиках защитных покрытий и сроке службы деталей в конкретных условиях эксплуатации. Основным недостатком данного метода является длительное время, необходимое для получения результатов, что ограничивает его применение относительно многокомпонентных нанокompозитных покрытий.

В данном случае наиболее применим метод ускоренных испытаний. Испытание рекомендуется проводить, основываясь на ГОСТ Р 51802-2001

«Методы испытаний на стойкость к воздействию агрессивных и других специальных сред машин, приборов и других технических изделий» и ГОСТ Р 51372-99 «Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения». В качестве объектов испытания следует использовать металлические пластины размером 50×30×5 мм с исследуемым покрытием. Сущность ускоренных испытаний заключается в ужесточении (форсировании) воздействия испытательных факторов (кислотность среды, температура и т.д.), за исключением механических. Данный подход в течение непродолжительного периода времени позволяет оценить стойкость многокомпонентных нанокompозитных покрытий к воздействию агрессивных сред.

Термоциклические испытания экспериментальных образцов многокомпонентных нанокompозитных покрытий

Термоциклические испытания проводят для определения способности материалов противостоять воздействию периодической смене температур. Эти испытания проводят без электрической нагрузки, а параметры изделий проверяют до и после термоциклирования, предварительно выдержав их в нормальных климатических условиях.

Термоциклические испытания многокомпонентных нанокompозитных покрытий рекомендуется проводить в климатической камере со скоростью изменения температуры не менее 1°С в минуту с последующим использованием сканирующего электронного микроскопа для металлографического исследования шлифов образцов в плоскости, перпендикулярной плоскости напыления, на предмет выявления возможных дефектов в виде расслоений после термоциклирования, а также определения толщины нанослоев и размера зерен покрытия. В качестве объектов

испытании следует использовать металлические пластины размером 50×50×5 мм с исследуемым покрытием.

Трибологические испытания многокомпонентных нанокompозитных покрытий

Трибологические испытания проводятся для определения ресурса образца материала в заданных условиях эксплуатации. Основным инструментом в трибологических исследованиях является машина трения. Машина трения – это установка, предназначенная для проведения испытаний на трение и износ металлических и неметаллических образцов в условиях наличия или отсутствия смазочных материалов.

Для проведения трибологических испытаний, в качестве объектов испытаний следует использовать металлические цилиндры диаметром 20 мм и длиной 25 мм на торцы которых наносится исследуемое покрытие. Контрообразцы представляют собой плоские диски диаметром 50 мм и толщиной 5 мм. Материал контрообразца в соответствии с материалом пары трения исследуемой детали.

Сущность метода заключается в следующем: универсальная машина трения реализует метод испытаний на трение и изнашивание материалов, который основан на взаимном перемещении прижатых друг к другу в горизонтальной плоскости с заданным усилием испытываемых образцов в среде смазочных материалов или без таковых. В качестве привода используется привод серийно выпускаемого электродвигатель. При этом используется принцип трения торца верхнего подвижного цилиндрического образца о плоскую сторону нижнего неподвижного диска.

Выводы

1. Одним из основных способов увеличения ресурса запорной арматуры является применение износостойких покрытий. Использование

различных по составу многокомпонентных нанокompозитных упрочняющих покрытий для повышения показателей надежности и долговечности запорной арматуры, эксплуатируемой на участках опасных производственных объектов со сверхвысокими параметрами рабочей среды, имеет наибольшие перспективы развития.

2. Проведенные в данной работе анализ и обобщение имеющегося массива информации о современных методах проведения испытаний и данные авторами статьи рекомендации позволят повысить достоверность оценки характеристик многокомпонентных нанокompозитных покрытий, определяющих ее износостойкость.

Информация о финансовой поддержке

Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашению о предоставлении субсидии от 14 декабря 2020 года № 075-11-2020-032 (идентификатор государственного контракта – 000000S207520RNU0002) по теме: «Разработка и организация высокотехнологичного производства запорной арматуры для нужд специальной и медицинской техники с повышенной надежностью и долговечностью на основе применения многокомпонентных нанокompозитных материалов» с Министерством науки и высшего образования РФ.

Литература

1. Шегельман И.Р., Васильев А.С., Щукин П.О. Запорная трубопроводная арматура с компенсационной камерой // Инженерный вестник Дона, 2015. № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Shegelman.pdf_a637e17664.pdf
2. Гостинин И. А., Вирясов А. Н., Семенова М. А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов // Инженерный



вестник Дона, 2013. № 2(25). С. 24. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618

3. Погодин В.К. Концепция обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводной арматуры на промышленных предприятиях // Арматуростроение: журн. №1 (40). - 2006. - С. 24-37.

4. Тарасьев Ю.И., Дунаевский С.Н. Вопросы надежности и безопасности трубопроводной арматуры // Территория Нефтегаз: журн. №9. - 2008. - С. 63-69.

5. Севастьянин Г.И. Задвижки: конструкции, новые разработки. Выбор в зависимости от условий и параметров эксплуатации // Наука и конструирование. - 2006. - № 6. - С. 41-43.

6. Тополянский П.А. Использование нанотехнологий при изготовлении деталей трубопроводной арматуры // Actual Conference: №2(65). - 2010. - С. 70-75.

7. Петухов А.Н. Особенности формирования свойств поверхностного слоя основных деталей ГТД при применении традиционных и современных методов упрочнения // Вестник двигателестроения: журн. №2. - 2006. - С. 20-24. - ISSN 1727-0219.

8. Беляев Л.В., Довбыш Н.С., Жданов А.В. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учебное пособие. // Изд-во ВлГУ. - 2022. - 106 с.

9. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии // Надежность и качество сложных систем: журн. №3 (11). - 2015. - С. 69-79.

10. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение: журн. №11. - 2011. - С.77-82.

11. Тонконогий В.М., Якимов А. А., Бовнегра Л. В., Безнос С.В., Добровольский В.В. Снижение теплового фактора при плоском абразивном шлифовании // Технические науки и технологии: журн. №4 (10). - 2017. - С. 16-25.
 12. Jermolajeva S., Eppb J., Heinzela C., Brinksmeiera E. Material modifications caused by thermal and mechanical load during // 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI) / Procedia CIRP. - 2016. - V.45. - pp. 43-46.
 13. Wang C., Fang Q., Chen J., Liu Y., Jin T. Subsurface damage in high-speed grinding of brittle materials considering kinematic characteristics of the grinding process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, March 2016. - V.83. - Issue 5-8, pp. 937-948.
 14. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие. Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново. - 2009. - 64 с. - ISBN - 5-9616-0315-4.
 15. Кравченко В. И., Ловшенко Ф. Г., Струк В. А. Нанокпозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и перспективы применения // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 21–22 апреля 2005 года. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2005. – С. 3-13.
 16. Кавалейро А., де Хоссон Д. Наноструктурные покрытия // М.: Техносфера. – 2011. – С. 792.
 17. Тополянский П.А., Ермаков С.А., Сосин Н.А., Тополянский А.П. Сравнительный анализ свойств износостойких покрытий для повышения стойкости сверл // Металлообработка журн. №4(76). - 2013. - С. 28-38.
-



18. Сергиев А.П., Макаров А.В., Владимиров А.А., Белов Н.В. Анализ методов измерения твердости и перспективы их совершенствования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова журн. №10. - 2018. - С. 119-125.
19. Быков Ю.А., Карпухин С.Д., Полянский В.М. Определение твердости нанопокровтий: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана. - 2010. - 31 с.
20. Абрамов Л.Д., Носов Я.Д., Подсекин И.А., Воронин В.Н. Оценка шероховатости поверхности опико-электронным методом // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки: журн. - 2005. - С. 89-94.
21. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М. Износостойкость сталей и сплавов: учеб. пособие. М.: Нефть и газ. - 1994. - 415 с.
22. Чулкин С. Г. Анализ современных представлений и подходов при оценке износостойкости и долговечности материалов в различных условиях внешнего трения // Трение, износ, смазка. - 1999. - Т. 1. №2. - С. 47-51.
23. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // Авиационные материалы и технологии: журн. №1 (54). - 2019. - С. 66-73.

References

1. Shegel`man I.R., Vasil`ev A.S., Shhukin P.O. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015. № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Shegelman.pdf_a637e17664.pdf
 2. Gostinin I. A., Virjasov A. N., Semenova M. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618
 3. Pogodin V.K. Armaturostroenie: zhurn. №1 (40). 2006. pp. 24-37.
 4. Taras`ev Yu.I., Dunaevskij S.N. Territoriya Neftegaz: zhurn. №9. 2008. pp. 63-69.
 5. Sevast`yanixin G.I. Nauka i konstruirovanie. 2006. № 6. pp. 41-43.
-



6. Topolyanskij P.A. Actual Conference: №2 (65). 2010. pp. 70-75.
 7. Petuxov A.N. Vestnik dvigatelestroeniya: zhurn. №2. 2006. pp. 20-24.
 8. Belyaev L.V., Dovby`sh N.S., Zhdanov A.V. Tekhnologiya obrabotki koncentrirovanny`mi potokami e`nergii: uchebnoe posobie. [Processing Technology of Concentrated Energy Flows: Tutorial]. Izd-vo VIGU. 2022. 106 p.
 9. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Nadezhnost` i kachestvo slozhny`x sistem: zhurn. №3 (11). 2015. Pp. 69-79.
 10. Vasil`ev S.G., Shulyak Ya.I. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Mashinostroenie: zhurn. №11. 2011. pp.77-82.
 11. Tonkonogij V.M., Yakimov A. A., Bovnegra L. V., Beznos S.V., Dobrovol`skij V.V. Texnicheskie nauki i tekhnologii: zhurn. №4 (10). pp. 16-26.
 12. Jermolajeva S., Eppb J., Heinzela C., Brinksmeiera E. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI). Procedia CIRP. 2016. V.45. pp. 43-46.
 13. Wang C., Fang Q., Chen J., Liu Y., Jin T. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, March 2016. V.83. Issue 5-8, pp. 937-948.
 14. Stepanova T.Yu. Tekhnologii poverxnostnogo uprochneniya detalej mashin: uchebnoe posobie [Technology of surface hardening of machine parts: tutorial]. Ivan. gos. xim.-texnol. un-t.-Ivanovo. 2009. 64 p.
 15. Kravchenko V. I., Lovshenko F. G., Struk V. A. Materialy`, oborudovanie i resursosberegayushhie tekhnologii: Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Mogilev, 21–22 aprelya 2005 goda. – Mogilev: Mezghosudarstvennoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya "Belorussko-Rossijskij universitet", 2005. pp. 3-13.
 16. Kavalejro A., de Xosson D. Nanostrukturny`e pokry`tiya [Nanostructured coatings] M.: Texnosfera. 2011. p. 792.
 17. Topolyanskij P.A., Ermakov S.A., Sosin N.A., Topolyanskij A.P. Metalloobrabotka zhurn. №4 (76). 2013. Pp. 28-38.
-



18. Sergiev A.P., Makarov A.V., Vladimirov A.A., Belov N.V. Vestnik BGTU im. V.G. Shuxova zhurn. №10. 2018. pp. 119-125.
19. By`kov Yu.A. Karpuxin S.D., Polyanskij V.M. Opredelenie tverdosti nanopokry`tij: uchebnoe posobie. [Determination of the hardness of nanocoatings: tutorial]. M.: Izd-vo MGTU im N.E`. Baumana. 2010. 31 p.
20. Abramov L.D., Nosov Ya.D., Podsekin I.A., Voronin V.N. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: Texnicheskie nauki: zhurn. 2005. pp. 89-94.
21. Vinogradov V. N., Sorokin G. M. Iznosostojkost` stalej i splavov: ucheb. posobie. [Determination of the hardness of nanocoatings: tutorial]. M.: Neft` i gaz. 1994. 415 p.
22. Chulkin S. G. Trenie, iznos, smazka. 1999. Vol. 1. No.2. pp. 47-51.
23. Kurs M.G., Nikolaev E.V., Abramov D.V. Aviacionny`e materialy` i texnologii: zhurn. №1 (54). 2019. Pp. 66-73.