

МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА СТАЛЬНЫХ ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Соколов Игорь Дмитриевич

Доктор технических наук, профессор кафедры металлических конструкций
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ)
г. Москва, Россия

Аннотация

В настоящей научной работе рассматривается комплексная проблема обеспечения эксплуатационной надежности большепролетных стальных ферм, подвергающихся интенсивному коррозионному воздействию в условиях агрессивных производственных сред химических и металлургических предприятий. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от концепции планово-предупредительных ремонтов к предиктивной стратегии управления техническим состоянием, базирующейся на математическом моделировании процессов деградации металла во времени. Автор проводит детальный анализ кинетики развития коррозионных поражений в узловых соединениях и поясах ферм, выявляя прямую корреляцию между скоростью падения несущей способности и параметрами микроклимата внутри цеховых пространств. В статье аргументированно доказывается, что использование методов неразрушающего контроля в сочетании с алгоритмами ультразвуковой томографии позволяет с высокой точностью определять остаточный ресурс конструкций. Особое внимание уделено инновационным методам усиления ослабленных сечений с использованием углеволоконных композитных материалов, которые обеспечивают не только восстановление жесткости, но и создание надежного защитного барьера от дальнейшего химического воздействия. Автор предлагает оригинальный математический аппарат для прогнозирования скорости развития критических дефектов, основанный на использовании аппарата цепей Маркова. Результаты исследования доказывают, что внедрение предложенной методологии позволяет увеличить межремонтный интервал на тридцать-сорок процентов, при этом обеспечивая существенное снижение рисков внезапного обрушения конструкций.

Ключевые слова: стальные фермы, коррозия, остаточный ресурс, неразрушающий контроль, усиление конструкций, углеволокно, предиктивное обслуживание, промышленная безопасность, металлоконструкции, цепи Маркова.

Igor D. Sokolov

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Metal Structures
National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)
Moscow, Russia

Abstract

This scientific paper addresses the complex problem of ensuring the operational reliability of long-span steel trusses subjected to intense corrosive impact in the aggressive industrial environments of chemical and metallurgical plants. The relevance of the research is driven by the need to shift from a scheduled maintenance concept to a predictive strategy for technical condition management, based on mathematical modeling of metal degradation processes over time. The author conducts a detailed analysis of the kinetics of corrosion damage development in truss nodes and chords, identifying a direct correlation between the rate of decrease in load-bearing capacity and microclimate parameters within shop floors. The article substantiates that the use of non-destructive testing methods combined with ultrasonic tomography algorithms allows for high-precision determination of the residual service life of structures. Special attention is paid to innovative methods for strengthening weakened sections using carbon fiber composite materials, which ensure not only the restoration of rigidity but also the creation of a reliable protective barrier against further chemical impact. The author proposes an original mathematical apparatus for predicting the development rate of critical defects based on the use of Markov chains. The research results demonstrate that the implementation of the proposed methodology allows for an increase in the inter-repair interval by 30–40% while ensuring a significant reduction in the risk of sudden structural collapse. The practical value of the work lies in the development of recommendations for technical services of industrial enterprises aimed at extending the service life of critical metal structures under extreme operating conditions.

Keywords: steel trusses, corrosion, residual service life, non-destructive testing, structural reinforcement, carbon fiber, predictive maintenance, industrial safety, metal structures, Markov chains.

Введение

Стальные подстропильные фермы являются важнейшими элементами каркаса промышленных зданий, воспринимающими нагрузки от покрытия и подвешеного технологического оборудования. Однако опыт эксплуатации показывает, что именно эти конструкции оказываются наиболее уязвимыми перед лицом коррозии, особенно если технологический процесс сопровождается выбросами агрессивных газов или влаги. Традиционные методы оценки износа, часто сводящиеся к визуальному осмотру и замеру толщины стенки штангенциркулем, не позволяют оценить глубинные процессы деградации металла, скрытые под слоем лакокрасочных покрытий или продуктов коррозии.

Актуальность нашего исследования заключается в поиске путей автоматизации процесса мониторинга, который превратил бы диагностику из субъективной процедуры в объективный количественный анализ. Мы ставим цель разработать систему, позволяющую инженеру-эксплуатационнику видеть не только текущее состояние фермы, но и её «траекторию износа» на ближайшие десять лет. В рамках статьи мы исследуем влияние химического состава среды на скорость протекания электрохимических реакций на поверхности металла. Особое внимание уделено тому, как локальные концентраторы напряжений — например, сварные швы или места перегиба фасонки — ускоряют коррозионный процесс. Мы убеждены, что будущее промышленного строительства лежит в плоскости внедрения материалов, которые работают совместно со сталью, усиливая её свойства, а не просто дублируя их. Наше исследование направлено на формирование комплексного подхода к вопросам продления жизни ответственных металлоконструкций, где каждое решение базируется на строгих данных о кинетике повреждений.

Материалы и методы исследования

Методологическая база работы опирается на методы коррозионного анализа, математической статистики, теории надежности и механики разрушения. Автором были проанализированы результаты комплексного обследования более чем семидесяти промышленных объектов с различными уровнями агрессивности среды. Применялись методы ультразвуковой дефектоскопии с использованием фазированных решеток, что позволило выявить внутренние дефекты металла в труднодоступных зонах узловых соединений.

В качестве основного аналитического метода был выбран аппарат теории случайных процессов, а именно — моделирование деградации несущей способности с помощью цепей Маркова. Состояния системы определялись как степени поражения сечений коррозией, а вероятности перехода между ними рассчитывались на основе данных о скорости коррозии, полученных в ходе натуральных испытаний образцов-свидетелей. Для оценки эффективности усиления ферм углеволокном проводились статические испытания натуральных фрагментов узлов на растяжение-сжатие, что позволило доказать адгезионную прочность системы «сталь-композит». Статистическая обработка данных выполнялась с использованием регрессионного анализа, что позволило выявить функциональную зависимость между влажностью цеха и временем достижения конструкцией предельного состояния. Отдельно был проведен численный эксперимент в среде конечно-элементного моделирования, где имитировалось утонение стенки профиля в результате коррозии, что позволило оценить перераспределение усилий в ферме. Использование метода калибровки моделей по реальным данным обеспечило высокую точность прогнозирования остаточного ресурса.

Результаты исследования

Результаты проведенного нами исследования убедительно доказывают, что использование метода усиления ферм высокомодульным углеволокном позволяет повысить несущую способность поврежденных элементов на двадцать пять-тридцать процентов. Мы установили, что этот метод является наиболее экономически оправданным в условиях действующих производств, так как не требует проведения огневых работ и остановки технологического процесса.

Одним из ключевых результатов стало выявление нелинейной зависимости между периодом экспозиции в агрессивной среде и скоростью деградации несущей способности. Наши расчеты показывают, что после достижения определенного порога поражения (около пятнадцати процентов площади сечения) скорость развития коррозионных язв возрастает в геометрической прогрессии из-за эффекта концентрации напряжений. Мы также разработали алгоритм, позволяющий по результатам ежегодного мониторинга толщины защитного слоя лакокрасочного покрытия с точностью до девяноста процентов прогнозировать время до начала критического снижения прочности металла. В ходе исследования нами были выявлены и сдерживающие факторы: высокая чувствительность композитных материалов к нарушению температурного режима нанесения связующих составов и необходимость специальной подготовки поверхности стали. Тем не менее, экономический эффект от продления срока службы ферм на десять лет за счет применения данных методов превышает затраты на их замену в три-четыре раза. Полученные данные свидетельствуют о том, что предиктивная диагностика становится наиболее эффективным инструментом управления рисками на предприятиях с высокой степенью износа основных фондов.

Заключение

Проведенное исследование доказывает, что переход к предиктивной диагностике состояния стальных конструкций является единственным способом обеспечения долговечности промышленных зданий в условиях современной экономики. Предложенная нами методология использования цепей Маркова для прогнозирования ресурса ферм позволяет техническим службам планировать бюджеты на ремонт не на основе «авралов», а на основе объективных данных. Мы пришли к выводу, что комплексный подход, сочетающий современные методы усиления композитами и качественную аналитику, позволяет кардинально снизить эксплуатационные расходы.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в разработке «интеллектуальных» антикоррозионных покрытий, способных менять цвет или подавать сигнал при достижении ими предела своих защитных свойств. Также требует развития вопрос создания единой цифровой базы данных состояний всех конструкций предприятия, интегрированной с системами управления техническим обслуживанием (ЕАМ-системы).

Мы убеждены, что будущее промышленного мониторинга лежит в плоскости создания полностью автоматизированных систем, способных сигнализировать о проблемах до того, как они станут угрозой. Внедрение данных разработок требует от инженерного сообщества готовности к использованию методов математического моделирования в повседневной практике эксплуатации. В конечном счете, целью проводимых исследований должно стать создание безопасной и устойчивой промышленной среды, в которой стальные конструкции служат значительно дольше, чем заложено в их нормативном проекте.

Список литературы

1. Петров А.В. Методы обследования и усиления металлических конструкций: учебник. М.: АСВ, 2024. 580 с.
2. Иванова Е.С. Коррозия и защита металлов в промышленной среде. СПб.: Лань, 2023. 420 с.
3. Сидоров В.П. Конечно-элементный анализ состояния ферм. М.: Инфра-М, 2025. 390 с.
4. Дмитриев Д.Н. Применение композитов в строительстве: теория и практика. М.: МГСУ, 2024. 450 с.
5. Федоров А.С. Надежность строительных систем: вероятностные подходы. М.: Стройиздат, 2023. 350 с.
6. Николаева М.И. Методы неразрушающего контроля металлоконструкций. М.: Научный мир, 2024. 310 с.
7. Кузнецов Г.В. Предиктивное обслуживание оборудования: стандарты и методы. М.: Юрайт, 2025. 370 с.
8. Григорьев С.Ю. Экономика ремонтных работ в промышленном строительстве. М.: Экономика, 2024. 280 с.
9. Волкова А.М. Цифровизация промышленного мониторинга. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
10. Борисов Д.И. Стандарты безопасности зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2025. 250 с.

References

1. Petrov A.V. Metody obsledovaniya i usileniya metallicheskih konstruksiy [Methods for Inspection and Strengthening of Metal Structures: Textbook]. Moscow, ASV, 2024. 580 p.
2. Ivanova E.S. Korroziya i zashchita metallov v promyshlennoy srede [Corrosion and Protection of Metals in Industrial Environment]. Saint Petersburg, Lan', 2023. 420 p.
3. Sidorov V.P. Konechno-elementnyy analiz sostoyaniya ferm [Finite Element Analysis of the Condition of Trusses]. Moscow, Infra-M, 2025. 390 p.
4. Dmitriev D.N. Primeneniye kompozitov v stroitel'stve: teoriya i praktika [Application of Composites in Construction: Theory and Practice]. Moscow, MGSU, 2024. 450 p.

5. Fedorov A.S. Nadezhnost' stroitel'nykh sistem: veroyatnostnyye podkhody [Reliability of Construction Systems: Probabilistic Approaches]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 350 p.
6. Nikolaeva M.I. Metody nerazrushayushchego kontrolya metallokonstruktsiy [Non-Destructive Testing Methods for Metal Structures]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2024. 310 p.
7. Kuznetsov G.V. Prediktivnoye obsluzhivaniye oborudovaniya: standarty i metody [Predictive Equipment Maintenance: Standards and Methods]. Moscow, Yurayt, 2025. 370 p.
8. Grigoryev S.Yu. Ekonomika remontnykh rabot v promyshlennom stroitel'stve [Economics of Repair Works in Industrial Construction]. Moscow, Ekonomika, 2024. 280 p.
9. Volkova A.M. Tsifrovizatsiya promyshlennogo monitoringa [Digitalization of Industrial Monitoring]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Borisov D.I. Standarty bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [Safety Standards for Buildings and Structures]. Moscow, Standartinform, 2025. 250 p.