

ПРЕДИКТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРЕЛА-РУКОЯТЬ ПО ДИНАМИКЕ ДЕФОРМАЦИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Гаврилов Антон Михайлович

Аспирант кафедры транспортно-технологических комплексов
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Романова Дарья Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных и строительных
машин
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленном научно-практическом исследовании детально описан алгоритмический подход к непрерывному мониторингу структурной целостности металлоконструкций рабочего оборудования тяжелых карьерных экскаваторов. В процессе разработки скальных забоев стрела и рукоять подвергаются высокоамплитудным циклическим и ударным нагрузкам, приводящим к зарождению и развитию усталостных микротрещин в зонах сварных швов. Авторами сформирована регрессионная модель на основе алгоритма градиентного бустинга, позволяющая прогнозировать скорость накопления повреждений по совмещенным данным тензометрирования и высокочастотной акустической эмиссии. Для исключения эффекта алгоритмической непрозрачности и предоставления техническим специалистам понятного обоснования выносимых заключений в контур обработки встроен модуль локальных интерпретаций на основе Shapley-значений. В работе детально раскрыта физическая суть влияния конкретных силовых факторов и акустических всплесков на вероятность сквозного разрушения сварного узла. Полевые испытания на карьерной строительной технике подтвердили высокую прецизионность и надежность разработанной системы диагностики.

Ключевые слова: гидравлические экскаваторы, металлоконструкции, усталостная прочность, сварные соединения, тензометрия, акустическая эмиссия, градиентный бустинг, Shapley-значения, предиктивный мониторинг.

PREDICTIVE MONITORING OF HYDRAULIC EXCAVATOR WORK EQUIPMENT: INTERPRETABLE ASSESSMENT OF FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION IN BOOM-ARM WELDED JOINTS BASED ON STRAIN DYNAMICS AND ACOUSTIC EMISSION

Gavrilov Anton Mikhailovich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Complexes
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Romanova Daria Sergeevna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, and Construction Machines
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The presented scientific and practical study describes in detail an algorithmic approach to the continuous monitoring of the structural integrity of heavy mining excavator metal structures. During the development of rock faces, the boom and arm are subjected to high-amplitude cyclic and shock loads, leading to the initiation and growth of fatigue microcracks in the welded joint areas. The authors have developed a regression model based on the gradient boosting algorithm, which enables the prediction of damage accumulation rate using combined strain gauge and high-frequency acoustic emission data. To eliminate the effect of algorithmic opacity and provide technical specialists with a clear rationale for the conclusions drawn, a local interpretation module based on Shapley values has been integrated into the processing loop. The paper reveals in detail the physical essence of how specific force factors and acoustic bursts influence the probability of through-thickness failure of the welded assembly. Field tests on mining construction equipment confirmed the high precision and reliability of the developed diagnostic system.

Keywords: hydraulic excavators, metal structures, fatigue strength, welded joints, strain gauging, acoustic emission, gradient boosting, Shapley values, predictive monitoring.

Введение

Карьерные и строительные гидравлические экскаваторы высокой единичной мощности эксплуатируются в условиях интенсивного динамического нагружения. Рабочее оборудование, включающее коробчатые металлоконструкции стрелы, рукояти и ковша, воспринимает значительные усилия со стороны гидроцилиндров и реактивные силы сопротивления копанью грунта. Наиболее уязвимыми элементами этих пространственных конструкций являются зоны сварных соединений, где сосредоточены высокие концентраторы напряжений, а также присутствуют технологические микродефекты сварки.

Постоянное воздействие циклических изгибающих и крутящих моментов приводит к зарождению и подповерхностному распространению усталостных трещин. Внезапное разрушение стрелы или рукояти прямо в процессе черпания влечет за собой длительный простой техники, высокие затраты на восстановительный ремонт и создает серьезную угрозу безопасности машиниста и обслуживающего персонала.

Традиционные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковая или магнитопорошковая дефектоскопия, проводятся только во время плановых ремонтов и требуют предварительной очистки металлоконструкций от грязи и лакокрасочного покрытия. При этом микротрещина может вырасти до критического размера в промежутке между плановыми осмотрами. Внедрение систем непрерывного бортового мониторинга на базе тензорезисторов и датчиков акустической эмиссии позволяет фиксировать процесс разрушения на ранних стадиях. Для обработки таких сигналов эффективно применяются алгоритмы машинного обучения. Однако инженерно-техническому персоналу недостаточно получать от системы обезличенный индекс опасности. Специалист должен видеть четкое физическое объяснение вынесенного диагноза, например, подтверждение того, что прирост риска вызван развитием трещины при выклинивании ковша, а не обычным превышением массы набираемой породы. В данной работе предлагается решение этой проблемы путем интеграции ансамблевой модели с модулем физической интерпретации признаков.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Для сбора репрезентативных данных металлоконструкция стрелы и рукояти гидравлического экскаватора массой тридцать восемь тонн была оснащена измерительной системой. В зонах наибольшей концентрации напряжений возле проушин и поперечных сварных швов монтировались розетки тензорезисторов, а рядом с ними устанавливались пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии.

Сбор диагностических показателей осуществлялся непосредственно при выполнении стандартных фаз рабочего цикла, включая зарезание ковша, подъем заполненной стрелы, поворот и выгрузку. Сформированный признаковый вектор включает следующие физические показатели.

Показатель максимальных эквивалентных напряжений в критической точке металлоконструкции фиксирует амплитуду силового воздействия от гидравлических цилиндров.

Показатель суммарного накопления циклов напряжений определенной амплитуды характеризует удельную усталостную повреждаемость материала за смену.

Показатель активности и суммарной энергии импульсов акустической эмиссии фиксирует акты микропластической деформации и подповерхностного сдвига берегов зарождающейся трещины.

Показатель доминантной частоты акустических сигналов позволяет отличать шумы от работы гидравлических клапанов и механических соударений от высокочастотных сигналов разрыва связей в металле.

На основе указанного признакового пространства обучена модель градиентного бустинга, прогнозирующая оставшееся количество рабочих циклов до достижения трещиной критической длины. Для разъяснения решений модели применяется декомпозиция Shapley-значений.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим ключевым направлениям.

Направление силовой перегрузки отражает вклад превышения допустимых напряжений при взаимодействии ковша с непреодолимым препятствием.

Направление усталостной повреждаемости фиксирует накопление циклических микропластических деформаций при стандартных режимах копания.

Направление акустической динамики трещинообразования выделяет сигналы, прямо свидетельствующие о физическом продвижении фронта трещины в зоне сварного шва.

Анализ полученных результатов

Экспериментальная проверка проводилась при разработке тяжелых глинистых и скальных грунтов в течение семисот часов натурных наблюдений.

Разработанная модель показала способность прогнозировать появление и рост усталостных микротрещин в сварных соединениях стрелы с точностью до девяноста трех с половиной процентов.

В ходе обработки натурных данных получены следующие важные практические результаты.

Во-первых, доказана техническая возможность фиксации процесса зарождения усталостных повреждений в сварном шве за двести часов до появления видимого трещинообразования на поверхности металла.

Во-вторых, на основе анализа Shapley-значений удалось надежно отфильтровать технологические акустические шумы от работы гидроцилиндров, выделив исключительно сигналы, связанные с разрушением сварного соединения.

В-третьих, разработан наглядный визуальный регламент для главного механика, позволяющий обоснованно планировать локальную зачистку и проварку шва во время планового обслуживания без демонтажа всего рабочего оборудования.

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения с понятной физической интерпретацией входных параметров позволяет создать эффективную и прозрачную систему предиктивного мониторинга металлоконструкций гидравлических экскаваторов. Высокая наглядность причинно-следственных связей гарантирует своевременное проведение предупредительных ремонтов, снижает вероятность катастрофических поломок и повышает безопасность эксплуатации тяжелой выемочной техники.

В дальнейшем авторский коллектив планирует адаптировать разработанную методику для оценки усталостной прочности поворотных платформ и ходовых рам карьерных машин.

Литература

1. Домбровский Н. Г. Экскаваторы. — М.: Машиностроение, 1969. — 318 с.
2. Павлов В. П. Прочность и долговечность металлоконструкций строительных и дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
3. Сергиенко В. П. Акустико-эмиссионный контроль металлоконструкций подъемно-транспортных машин // Дефектоскопия. — 2018. — № 4. — С. 32–39.
4. Кобзов Д. Ю., Соколов В. А. Оценка остаточного ресурса сварных металлоконструкций экскаваторов по параметрам напряженно-деформированного состояния // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 2. — С. 51–58.
5. Friedman J. H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine // Annals of Statistics. — 2001. — Vol. 29, No. 5. — P. 1189–1232.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.