ISSN 2223-0807 Современное машиностроение: Наука и образование 2025: материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

¹Виталий Геннадьевич Мельников,

УДК 539.43, 621.87 doi:10.18720/SPBPU/2/id-109

В.Г. Мельников¹, М.Ю. Насонов², Н.А. Дударенко³, А.М. Григоров⁴

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗНОСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ



Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II Россия, Санкт-Петербург Тел.: (812) 328-82-22, E-mail: v.g.melnikov@yandex.ru. ²Михаил Юрьевич Насонов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II Россия, Москва Тел.: (812) 328-82-22, E-mail: nasonov_myu@pers.spmi.ru. ³Наталия Александровна Дударенко, Университет ИТМО Россия, Санкт-Петербург Тел.: +7 (812) 232-05-80, dudarenko@itmo.ru



⁴Андрей Михайлович Григоров, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II Россия, Санкт-Петербург Тел.: +7 (921)857-97-41, Grigorov.andrey1@yandex.ru.

Аннотация

В данной работе рассматривается проблема диагностики усталостного разрушения металлоконструкций. Предложен новый метод и разработано устройство нового датчика для диагностики металлоконструкции, находящейся под действием циклического нагружения. Датчик состоит из нескольких прямоугольных пластин, жестко закрепленных на поверхности металлоконструкции, в средней части каждой из пластины выполнены пропилы различной глубины. Показано, что применение предложенного датчика позволяет визуально оценивать накопленный износ металлоконструкции по состоянию его металлических пластин.

Ключевые слова: металлоконструкции, напряжения, циклы нагружения, трещины, датчик.

Введение

основным способом Ha сегодняшний день лобычи полезных ископаемых является открытый способ, им добывается около 80% всех полезных ископаемых [1]. Добыча полезного ископаемого в разрезах может осуществляться карьерными экскаваторами, осуществляющими непосредственную выемку полезного ископаемого, и автосамосвалами, транспортирующими горную массу на внутренние отвалы или на склады [2]. Использование автомобильной техники позволяет упростить процесс добычи ископаемого ввиду отсутствия необходимости полезного предварительного монтажа специальной инфраструктуры, как, например, рельсового полотна, при транспортировании полезного монтаж ископаемого железнодорожным транспортом. Автомобильная техника, как и экскаваторы, в процессе своей эксплуатации подвергаются широкому спектру механических нагрузок. Как следствие - основная часть отказов оборудования и его внепланового ремонта связана, в первую очередь с повреждениями механическими [3,4]. В процессе эксплуатации испытывать вибрации, оборудование может удары, связанные С неровностью поверхности дороги для самосвалов или неоднородностью добываемой породы для экскаваторов [6,7,8]. Циклические нагрузки могут вызывать появление и развитие трещин, которые, как правило, также связаны с различными дефектами и неоднородностью металла [9]. В результате, циклические нагрузки приводят к постепенной утрате прочности металла и последующему разрушению металла [10]. В то же время развитие трещин до критических значений, которые уже могут приводить к разрушению металлоконструкции, обычно происходит за достаточно продолжительное время [11]. Отдельно можно отметить влияние и других факторов условий эксплуатации оборудования, например - холодного климата, который может привести к хрупкому разрушению детали [5]. Прогнозирование эксплуатационного ресурса автосамосвалов в зависимости от различных факторов, таких как время года, износ дорожного [12]. Использование полотна, приведен В микроэлектроники ЛЛЯ диагностирования автосамосвалов описаны в [13]. Различные методы по определению напряжений и деформаций в металлических конструкциях рассмотрены в [14-16].

Одним из наиболее часто применяемых методов для оценивания внутренних напряжений и деформаций объектов экспериментальным путем можно считать тензометрический способ [17]. При деформации объекта происходит изменение электрического сопротивления тензорезистора установленного нём. Ha зафиксированных изменений на основе деформации сопротивления величину объекта рассчитывают [18], оценивают возникающие в материале механические напряжения вероятность появления трещин. Существенным недостатком данного метода является сложность учета влияния температурного воздействия на результаты измерений. Степень этого влияния зависит от множества переменных параметров, погодных условий других факторов И окружающей среды, а также режима работы оборудования. В результате электрическое сопротивление датчика может меняться непредсказуемым образом, что существенно затрудняет получение точных И воспроизводимых измерений.

Другим известным подходом к диагностике состояния изделия является ультразвуковой метод, который позволяет обнаруживать дефекты и трещины в материале [20]. Реже применяется магнитопорошковый метод, основанный на взаимодействии магнитных полей с ферромагнитными частицами [21], который используется для выявления поверхностных и ферромагнитных подповерхностных дефектов В материалах. Для определения дефектов в проводящих материалах может применяться вихретоковый метод, использующий взаимодействие переменного магнитного поля с электрическими токами, индуцированными в материале [22]. Для определения внутренних дефектов в материалах применяется радиационный подход использующий ионизирующее излучение. Общим недостатком всех перечисленных выше методов и подходов является невозможность или сложность размещения реализующих их устройств на работающем в сложных погодных и технических условиях подвижном объекте при необходимости обеспечения его непрерывного мониторинга и диагностики развития в нем трещин и дефектов.

В статье предлагается новый метод определения степени накопления усталостных повреждений металлоконструкциями, который отвечает следующим критериям: дешевизна, простота, возможность применения метода в процессе работы объекта, автономность и полная энергонезависимость.

Конструкция датчика



Рис. 1. Устройство составного датчика: 1-5 – прямоугольные пластины с надрезами различной длины по середине пластин, 6 – места крепления пластин к объекту, 7 – исследуемый объект

На рис. 1 показан разработанный датчик с чувствительными элементами в виде прямоугольных пластинами, неподвижно закрепленный на измеряемой металлоконструкции [23]. Датчик позволяет визуально контролировать число циклов нагружения, полученных металлоконструкцией, а также степень её износа и остаточный ресурс при известного характера циклического нагружения. Для условии поверхности неподвижного закрепление датчика на измеряемой металлоконструкции возможно применение соединения клеевого, точечносварного или другого типа. Для обеспечения точности и воспроизводимости результатов измерения материал пластин желательно выбирать имеющим характеристики близкие к характеристикам материала измеряемой металлоконструкции.

Используемые допущения

В работе считаем сцепление металлоконструкции и датчика идеальным. Все деформации, возникающие в металлоконструкции в месте крепления датчика, считаем передающимися ему без потерь. Кроме того, будем считать, что поверхность датчика не подвергается каким-либо дополнительным сторонним внешним нагрузкам и его деформация обусловлена исключительно деформациями, передаваемыми датчику металлоконструкцией, к которой он прикреплен, напряжениями, перпендикулярными к поверхности датчика будем пренебрегать, а напряженное состояние датчика будем считать плоским. Характер циклического нагружения датчика считаем известным.

Методы

Рассмотрим датчик с чувствительными элементами - пластинами, выполненными из одного материала, различающимися только глубиной пропилов. Число циклов нагружения исследуемого объекта можно визуально оценить по размерам трещин в пластинах датчика при помощи формулы Пэриса:

$$N = \frac{2}{(n-2) \cdot C \cdot M^{(n/2)} \cdot \Delta \sigma^{n}} \cdot \left[\frac{1}{a_{o}^{(n-2)/2}} - \frac{1}{a_{\kappa}^{(n-2)/2}} \right],$$
(1)

где *n* и *C* – параметры циклической трещиностойкости материала пластин; М – параметр формы данной пластины и формы трещины; $\Delta \sigma$ – размах напряжений в пластинах, полученный из предварительных исследований; а₀, а_к – начальный и конечный размер трещины.

Критический размер трещины может быть найден через коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Он вычисляется по следующей формуле:

$$K_{max} = y_1 \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi a_c},\tag{2}$$

где K_{max} – максимальное значение КИН для материала пластины за один цикл нагружения; a_c – критическая длина трещины; y_i – поправочный коэффициент для пластины с боковыми трещинами, σ_{max} – максимальное напряжение за один цикл нагружения.

Поправочный коэффициент зависит от вида трещины, места ее расположения, особенности нагружения объекта и рассчитывается по соответствующей формуле, которая может быть подобрана для каждого случая по справочникам и учебникам. Так, например, для пластины с двумя боковыми трещинами поправочный коэффициент вычисляется по формуле [24]:

$$y_1 = 1,12 + 0,203 \cdot (a/b) - 1,197 \cdot (a/b)^2 + 1,93 \cdot (a/b)^3,$$
 (3)

где *а* и *b* – начальная длина трещины и ширина пластины соответственно, при этом a/b < 0,7.

Отметим, что точные значения параметров, используемых в формуле 1, обычно определяются экспериментальным путем, но для стандартных видов сталей известны их средние значения [24].

Результаты

Выполним анализ влияния глубины пропила на усталостную прочность пластин, а именно – установим взаимосвязь между глубиной пропила и количеством циклов до разрушения пластины.

Рассмотрим пять одинаковых образцов пластин с пропилами разной глубины, которая начинается с минимального значения в 5 мм и заканчивается максимальным пропилом в 25 мм с каждой стороны. При этом ширина самих пластин составляет 400 мм. Для проведения расчетов используем следующие значения параметров: в качестве материала образца используем сталь А514. Начальную длину трещины с каждой стороны пластины примем для всех образцов одинаковой и равной $a_0 = 5$ мм. Максимальное напряжение для пластины без пропилов: $\sigma_{max} = 400$ H/мм², Размах напряжений: $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 200$ H/мм².

Аналогично поправочному коэффициенту значение КИН может быть рассчитан по различным формулам в зависимости от конкретного случая. Для пластины с двумя симметричными краевыми трещинами при изгибе значение коэффициента интенсивности нагружения можно определить по формуле [25]:

$$K_{max} = \frac{6 \cdot M}{t \cdot W^2} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_0} \cdot F_1(\alpha), \tag{4}$$

где М – изгибающий момент, Н · мм; t – толщина пластины, мм; W – ширина пластины, мм; безразмерный коэффициент $F_1(\alpha)$, определяемый по известным графикам [25].

Определим значение коэффициента интенсивности нагружения для пластины с пропилом 5 мм с каждой стороны. Примем толщину пластины t = 0,05 мм; изгибающий момент примем равным: $M = 1000 \text{ Hm} = 10^6 \text{ H} \cdot \text{ мm}$; безразмерный коэффициент $F_1(\alpha)$ для этого случая равен, приблизительно, 1,094. Тогда:

$$K_{max} = \frac{6 \cdot 1000000 \text{ H} \cdot \text{mm}}{0,05 \text{ mm} \cdot 390 \text{ mm}^2} \cdot \sqrt{\pi \cdot 5 \text{ mm}} \cdot 1,094 = 3419,94 \text{ H/mm}^{3/2}.$$

Критическую длину трещины можно определить в соответствии с критерием Ирвина $K_{1C} = K_{max}$ по следующей формуле:

$$a_c = \left(\frac{K_{1c}}{y_1 \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi}}\right)^2. \tag{5}$$

Для пластины с пропилом 10 мм с каждой стороны критическая длина трещины равна:

$$a_c = (\frac{3419,94}{1,12445 \cdot 440 \cdot \sqrt{3,14}})^2 = 15,272$$
 мм

Выполнение в пластинах пропилов уменьшает площадь самих пластин, поэтому величины напряжений, возникающих в пластинах, также будут изменяться, при этом на уменьшение площади влияет не только глубина 179 пропила, но также и ширина пропила. Примем, что выполнение пропила глубиной 5 мм с каждой стороны уменьшает площадь пластины на 10%, а поскольку величина напряжения прямо пропорциональна площади, то напряжения, возникающие в пластине, увеличатся на 10%.

Результаты расчета критической длины трещины для пластин сведем в таблицу 1.

Ширина пластины с учетом пропилов b, мм	$\sigma_{max}, \ H \over MM^2$	Поправочный коэффициент У1	$\frac{a_0}{b}$	Критическая длина трещины, мм
390	440	1,12241	0,0128	15,272
380	480	1,12247	0,0132	14,236
370	520	1,12253	0,0135	13,495
360	560	1,12259	0,0139	12,982
350	600	1,12266	0,0143	12,656

Таблица 1. Результаты расчета критической длины трещины

Построим график зависимости критического размера трещины от ширины пластины (Рис. 2.).



Рис. 2. График зависимости критической длины трещины от ширины пластины с учетом пропилов

Определим количество циклов нагружения пластины. Для этого произведем расчет по формуле 1:

$$N = \frac{2}{(n-2) \cdot C \cdot M^{\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \Delta \sigma^{n}} \cdot \left[\frac{1}{a_{0}^{\frac{n-2}{n}}} - \frac{1}{a_{c}^{\frac{n-2}{n}}}\right] = \frac{2}{(3-2) \cdot 1,84 \cdot 10^{-13} \cdot (1,124^{2} \cdot \pi)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \cdot 200^{3}} \cdot \left[\frac{1}{5^{\frac{3-2}{3}}} - \frac{1}{15,272^{\frac{3-2}{3}}}\right] = 31386,24$$
циклов,

где $M = y_1^2 \pi$; параметр n может принимать значения в пределах 2..6, примем n=3; параметр C можно определить по корреляционной зависимости [24]: C=1,32*10^(-4)*(1/895^n)=1,84*10^-13.

Результаты расчета для пластин другой ширины сведем в таблицу 2.

Ширина пластины с учетом пропилов b (мм)	Критическая длина трещины, мм	Количество циклов нагружения N, тыс. циклов
390	15,272	31386,24
380	14,236	29733,06
370	13,495	28446,00
360	12,982	27498,95
350	12,656	26869,08

Таблица 2. Результаты расчета количества циклов нагружения

Из таблицы 2 видно, что на количество циклов нагружения также, как и на критический размер трещины, влияет ширина пластины в месте выполнения пропилов. Построим график зависимости количества циклов нагружения от ширины пластины (Рис. 3).



Рис. 3. График зависимости количества циклов нагружения от ширины пластины

Как видно из рис. 3, чем больше будет глубина пропила, тем быстрее будет разрушена пластина с этим пропилом, поскольку в пластине с пропилом большой глубины границы сильнее влияют на скорость развития трещины.

Обсуждение

Использование предлагаемого составного датчика позволяет упростить процесс оценки износа металлоконструкции, находящейся под действием циклического нагружения. Низкая стоимость, автономность, энергонезависимость и простота такого датчика обеспечивает широкую область его применения. Используемые в датчике пластины с различной глубиной пропила, а также конструкция датчика и способ его закрепления на измеряемом объекте являются предметом дальнейшей оптимизации и совершенствования.

Заключение

В работе предложен новый составной датчик степени износа металлоконструкции, имеющий несколько чувствительных элементов, имеющих пропилы в средней части чувствительного элемента.

Данный датчик позволяет визуально оценивать степень износа металлоконструкции по последовательному разрушению пластин. На примере было продемонстрировано влияние глубины пропила в пластинах на процесс разрушения этих пластин. Пластины будут поочередно разрушаться, начиная с пластины с наибольшим пропилом и заканчивая пластиной с пропилом наименьшей глубины. Были приведены расчетные значения поправочных коэффициентов для пластин с ДВУМЯ симметричными трещинами, а также значения критической длины трещины для пластин с разной глубиной пропилов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что способ, в виду своей эффективности, дешевизны, энергонезависимости, автономности, а также простоты, возможности применения на изделиях в процессе их работы для контроля их текущего состояния, может найти широкое применение в различных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за I полугодие 2023 года // Уголь. 2023. № 9. С. 5-13. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-5-13.

- [2] Добыча угля открытым способом в провинциях Фри-Стейт и Мпумаланга на территории Южно-Африканской Республики по данным спутниковой съемки / И. В. Зеньков, Чинь Ле Хунг, Е. В. Логинова [и др.] // Уголь. – 2024. – № 1(1176). – С. 109-112. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-109-112. – EDN NGOEVK.
- [3] Overload and variable amplitude load effects on the fatigue strength of welded joints / K. Grönlund, A. Ahola, Ja. Riski [et al.] // Welding in the World. – 2024. – Vol. 68, No. 2. – P. 411-425. – DOI 10.1007/s40194-023-01642-z. – EDN FPLICG.
- [4] Campelo Ana Carla de Melo Moreira, Marin Tatiane. The impact of payload truck factor use in mine performance reports for an open pit copper mine in Brazil. REM // International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Iss. 3, p. 443-449. DOI: 10.1590/0370-44672017710189
- [5] Соколов, С. А. Исследование разрушения сварного узла при отрицательной температуре / С. А. Соколов, А. А. Грачев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 405-417. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-548. – EDN DYQZKO.
- [6] Рябикин, А. Ю. Карта режимов изнашивания износостойких сталей / А. Ю. Рябикин, М. А. Скотникова, Г. В. Иванова // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 259-274. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-537. – EDN HWFEIE.
- [7] Ershov, D. Vibration amplitude and frequency parameters of technological equipment drives / D. Ershov, I. Lukyanenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 187. – P. 537-548. – DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_44. – EDN OVZZLQ.
- [8] I N Budilov, V S Zhernakov, and K V Koneva Calculation of force and energy parameters of fracture in the area of the front of the crack in the shell of the reactor of coke chambers / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033026 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/3/033026
- [9] Vibration Protection of the Robotic Arm from External Effects on the Base / S. Ivanov, T. Zudilova, L. Ivanova [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No. 26. – P. 514-522. – EDN QFCDZC.
- [10] Crack Formation in Metal Structures of Heavy Dump Trucks during Operation at Kuzbass Open Pit Mines / A. Pokatilov, A. Shirokolobova, R. Dobrynin, A. Vinidiktov // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 03020. – DOI 10.1051/e3sconf/202017403020. – EDN UQCAZI.
- [11] Изюмова, А. Ю. Развитие экспериментальной методики оценки эволюции усталостной трещины в титановых сплавах на основе энергетического подхода / А. Ю. Изюмова, А. Н. Вшивков, О. А.

Плехов // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 5. – С. 61-70. – DOI 10.55652/1683-805Х_2023_26_5_61. – EDN RVUCEA.

- [12] Vinogradova A, Gogolinskii K, Umanskii A, Alekhnovich V, Tarasova A, Melnikova A. Method of the Mechanical Properties Evaluation of Polyethylene Gas Pipelines with Portable Hardness Testers. Inventions. 2022; 7(4):125. https://doi.org/10.3390/inventions7040125.
- [13] Повышение эффективности эксплуатации карьерных самосвалов БЕЛАЗ с ГМП, оснащенных бортовыми системами диагностирования / С. А. Рынкевич, А. Н. Егоров, В. П. Тарасик, А. Н. Максименко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 1(34). – С. 99-106. – DOI 10.53078/20778481_2012_1_99. – EDN OZAASR.
- [14] Захаров, М. Н. Оценка напряженного состояния в зоне силового контакта деталей машин методом конечных элементов по различным теориям прочности / М. Н. Захаров, И. В. Магнитский, А. В. Медовщиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 6(771). – С. 32-39. – EDN TPRRLE.
- [15] Bokarev, S. A. Stress-strain behavior of welded joints in railway girders / S. A. Bokarev, K. O. Zhunev, A. M. Usol'tsev // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8(84). P. 119-129. DOI 10.18720/MCE.84.12. EDN RVTGIB.
- [16] О возможности применения магнитного метода неразрушающего контроля для оценки напряженности и остаточного ресурса металлических силовых конструкций объектов наземной космической инфраструктуры / К. В. Алексеев, А. Н. Добролюбов, А. С. Лебедев, Д. П. Мохнаткин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2015. – № 646. – С. 124-127. – EDN TSNEMN.
- [17] Экспериментально-расчетный метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок / Д. А. Троценко, А. К. Давыдов, А. Н. Зайцев [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 1. С. 25-28. EDN JUQBPN.
- [18] До, Д. Ч. Оценка нагруженности основных металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10, работающих на угольных разрезах Вьетнама : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / До Дык Чонг, 2022. – 104 с. – EDN CFBWTA.
- [19] Deshpande, Radhika & Tumminello, Silvana & Ayachi, Sahar & Mueller, Eckhard & Boor, Johannes. (2022). Effect of joining temperature on the interconnection zone and electrical resistance of Ag/n-Mg 2 Si and Ag/n-Mg 2 Sn contacts. Materials Advances. 10.1039/D2MA00038E.
- [20] Косов, Д. А. Анализ напряженно-деформированного состояния алюминиевого сплава Д16Т при сложном напряжённом состоянии с

учетом повреждённости / Д. А. Косов, Д. И. Федоренков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 45-53. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.4.05. – EDN HPYNQK.

- [21] Крицкий, Д. Ю. Организация мониторинга стрел экскаваторовдраглайнов в режиме эксплуатации / Крицкий Д. Ю., Мутыгуллин А. В., Шигин А. О., Бардаков В. В. // Горный журнал. 2018. № 2. С. 91-96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.
- [22] Загидулин, Р. В. Эмпирический метод распознавания группы стресскоррозионных трещин в металле по сигналу накладного вихретокового преобразователя / Р. В. Загидулин, А. Т. Бакиев, Т. А. Бакиев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 11. С. 149-159. DOI 10.18799/24131830/2022/11/3666. EDN EIUXEQ.
- [23] Патент на полезную модель № 231380 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/32. Устройство для визуального контроля износа металлических конструкций : заявл. 24.10.2024 : опубл. 24.01.2025 / В. Г. Мельников, М. Ю. Насонов, А. М. Григоров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II". – EDN KESXIP.
- [24] Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: в 2 т. Т. 2/ В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. Киев: Наукова думка, 1987. 1302 с. 1, 2 т.
- [25] Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : в 2 т. Т. 1 / пер. с англ. ; под ред. Ю. Мураками. М. : Мир, 1990. 448 с. : ил.

V. G. Melnikov¹, M. Yu. Nasonov¹, N.A.Dudarenko², A. M. Grigorov¹

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SENSORS FOR ASSESSING WEAR OF METAL STRUCTURES UNDER CYCLIC LOADING

¹St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Russia; ²ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

In this paper, the problem of diagnosing fatigue failure of metal structures is considered. A new method has been proposed and a new sensor device has been developed for diagnosing metal structures under cyclic loading. The sensor consists of several rectangular plates rigidly fixed to the surface of the metal structure, with cuts of varying depths in the middle part of each plate. It is shown that the use of the proposed sensor makes it possible to visually assess the accumulated wear of a metal structure based on the condition of its metal plates.

Key words: metal structures, stresses, loading cycles, cracks, sensor.

REFERENCES

- [1] Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. The results of the work of the Russian coal industry for the first half of 2023 // Coal. 2023. No. 9. pp. 5-13. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-5-13.
- [2] Open-pit coal mining in the provinces of Free State and Mpumalanga in the territory of the Republic of South Africa according to satellite imagery / I. V. Zenkov, Chin Le Hung, E. V. Loginova [et al.] // Coal. 2024. № 1(1176). Pp. 109-112. DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-109-112. EDN NGOEVK.
- [3] Overload and variable amplitude load effects on the fatigue strength of welded joints / K. Grönlund, A. Ahola, Ja. Riski [et al.] // Welding in the World. – 2024. – Vol. 68, No. 2. – P. 411-425. – DOI 10.1007/s40194-023-01642-z. – EDN FPLICG.
- [4] Campelo Ana Carla de Melo Moreira, Marin Tatiane. The impact of payload truck factor use in mine performance reports for an open pit copper mine in Brazil. REM // International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Iss. 3, p. 443-449. DOI: 10.1590/0370-44672017710189
- [5] Sokolov, S. A. Investigation of the destruction of a welded joint at a negative temperature / S. A. Sokolov, A. A. Grachev // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2023. – No. 12. – PP. 405-417. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-548. – EDN DYQZKO.
- [6] Ryabikin, A. Y. Map of wear modes of wear-resistant steels / A. Y. Ryabikin, M. A. Skotnikova, G. V. Ivanova // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2023. – No. 12. – PP. 259-274. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-537. – EDN HWFEIE.
- [7] Ershov, D. Vibration amplitude and frequency parameters of technological equipment drives / D. Ershov, I. Lukyanenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 187. – P. 537-548. – DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_44. – EDN OVZZLQ.
- [8] Zhernakov, V. S. Calculation of force and energy parameters of fracture in the area of the front of the crack in the shell of the reactor of coke chambers / V. S. Zhernakov, I. N. Budilov, K. V. Koneva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 033026. – DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033026. – EDN OEPYNM.

- [9] Vibration Protection of the Robotic Arm from External Effects on the Base / S. Ivanov, T. Zudilova, L. Ivanova [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No. 26. – P. 514-522. – EDN QFCDZC.
- [10] Crack Formation in Metal Structures of Heavy Dump Trucks during Operation at Kuzbass Open Pit Mines / A. Pokatilov, A. Shirokolobova, R. Dobrynin, A. Vinidiktov // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 03020. – DOI 10.1051/e3sconf/202017403020. – EDN UQCAZI.
- [11] Izyumova A. Yu., Vshivkov A. N., Plekhov O. A. Development of an experimental methodology for assessing the evolution of fatigue cracks in titanium alloys based on an energy approach // Physical Mesomechanics. 2023. Vol. 26, No. 5. pp. 61-70. DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_5_61. EDN RVUCEA.
- [12] Bochkarev, Yu. S. Increasing the efficiency of operation of quarry dump trucks during the development of alluvial deposits of the North / Yu. S. Bochkarev, I. V. Zyryanov // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2022. No. 5-2. P. 80-90. DOI 10.25018/0236_1493_2022_52_0_80. EDN GCMLFJ.
- [13] Increasing the operating efficiency of BELAZ mining dump trucks with GMP equipped with on-board diagnostic systems / S. A. Rynkevich, A. N. Egorov, V. P. Tarasik, A. N. Maksimenko // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2012. No. 1(34). pp. 99-106. DOI 10.53078/20778481_2012_1_99. EDN OZAASR.
- [14] Zakharov, M. N. Assessment of the stress state in the zone of force contact of machine parts by the finite element method according to various strength theories / M. N. Zakharov, I. V. Magnitsky, A.V. Medovshchikov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mechanical engineering. – 2024. – № 6(771). – Pp. 32-39. – EDN TPRRLE.
- [15] Bokarev, S. A. Stress-strain behavior of welded joints in railway girders / S. A. Bokarev, K. O. Zhunev, A. M. Usol'tsev // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8(84). P. 119-129. DOI 10.18720/MCE.84.12. EDN RVTGIB.
- [16] On the possibility of using the magnetic method of non-destructive testing to assess the stress and residual life of metal power structures of ground-based space infrastructure objects / K. V. Alekseev, A. N. Dobrolyubov, A. S. Lebedev, D. P. Mokhnatkin // Proceedings Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2015. No. 646. P. 124-127. EDN TSNEMN.
- [17] Experimental and computational method for predicting the residual life of metal structures of bridge cranes using metal films / D. A. Trotsenko, A. K.

Davydov, A. N. Zaitsev [etc.] // Labor safety in industry. – 2006. – No. 1. – P. 25-28. – EDN JUQBPN.

- [18] Do, D. H. Assessment of the load on the main metal structures of EKG-10 excavators operating in coal mines in Vietnam : specialty 05.05.06 "Mining machines" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Do Duc Chong, 2022. – 104 p. – EDN CFBWTA.
- [19] Deshpande, Radhika & Tumminello, Silvana & Ayachi, Sahar & Mueller, Eckhard & Boor, Johannes. (2022). Effect of joining temperature on the interconnection zone and electrical resistance of Ag/n-Mg 2 Si and Ag/n-Mg 2 Sn contacts. Materials Advances. 10.1039/D2MA00038E.
- [20] Kosov, D. A. Analysis of the stress-strain state of D16T aluminum alloy under complex stress conditions, taking into account damage / D. A. Kosov, D. I. Fedorenkov // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2023. No. 4. pp. 45-53. DOI 10.15593/perm.mech/2023.4.05. EDN HPYNQK.
- [21] Kritsky, D. Yu. Organization of monitoring of the booms of dragline excavators in operating mode / Kritsky D. Yu., Mutygullin A. V., Shigin A. O., Bardakov V. V. // Mining Journal. 2018. No. 2. P. 91-96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.
- [22] Zagidulin, R.V. Empirical method for recognizing a group of stresscorrosion cracks in metal using a signal from an attached eddy current transducer / R.V. Zagidulin, A.T. Bakiev, T.A. Bakiev // News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. – 2022. – T. 333, No. 11. – P. 149-159. – DOI 10.18799/24131830/2022/11/3666. – EDN EIUXEQ.
- [23] Utility Model Patent No. 231380 U1 Russian Federation, IPC G01N 3/32. Device for visual wear monitoring of metal structures : application no. 10/24/2024 : published on 01/24/2025 / V. G. Melnikov, M. Y. Nasonov, A.M. Grigorov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II." – EDN KESXIP.
- [24] Troshchenko V.T. Fatigue resistance of metals and alloys: in 2 volumes vol.
 2/ V.T. Troshchenko, L.A. Sosnovsky. Kiev: Naukova dumka, 1987. 1302
 p. 1, 2 t.
- [25] Handbook of stress intensity coefficients : in 2 volumes Vol. 1 / translated from English ; edited by Yu. Murakami. — M. : Mir, 1990. — 448 p. : ill