

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Р.Ш. Набиуллин

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Опыт эксплуатации и анализ документов службы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) показывает, что наиболее часто у экскаваторов ЭКГ-20 трещины образуются в металлоконструкциях рабочего оборудования и, что немаловажно, часто трещины возникают по основному металлу – особенно это касается стрелы экскаватора. Из-за образования и роста трещин значительно сокращается срок службы этого базового узла экскаватора, который в теории должен иметь необходимый запас прочности для обеспечения необходимого уровня надежности машины. В общей доле отказов экскаваторов по причине выхода из строя несущих металлоконструкций на дефекты рабочего оборудования приходится до 70%. Для установления реальных причин образования трещин на металлоконструкциях рабочего оборудования экскаваторов ЭКГ-20 проведена оценка показателей, характеризующих фактическую нагруженность металлоконструкций рабочего оборудования в реальных условиях эксплуатации. Оценено фактическое техническое состояние узлов рабочего оборудования на основе параметров, которые позволяют учесть такие важные составляющие, как усталость, остаточные напряжения и деформации, изменения в микроструктуре металла, которые приобрело оборудование при эксплуатации в условиях циклического нагружения. Выявлены зоны концентрации напряжений и определены их границы. Определены деформации и рассчитаны напряжения, возникающие под действием рабочих нагрузок в различных режимах эксплуатации в зонах концентрации напряжений, металлоконструкций рукояти и стрелы экскаватора. По результатам расчетов произведена выборка максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, возникающих в установленных зонах концентрации напряжений. Проведена оценка выявленных зон концентрации напряжений как источников зарождения усталостных повреждений.

Ключевые слова: рабочее оборудование, главные механизмы, карьерные экскаваторы, нагруженность, металлоконструкции, деформации, напряжения, усталость металла, напряженно-деформированное состояние, зона концентрации напряжений.

Для цитирования: Набиуллин Р.Ш. Комплексная оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкций рабочего оборудования карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 93–105. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_93.

Integrated evaluation of the stress-strain state of metal structures of the working equipment of a mining excavator

R. Sh. Nabiullin

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: Operating experience and analysis of documents of the maintenance and repair service of the Mining Administration shows that most often cracks in EKG-20 excavators are formed in the metal structures of working equipment, and that it is important that cracks often occur in the base metal, especially for the excavator boom. Due to the formation and growth of cracks, the service life of this basic excavator assembly is significantly reduced, which in theory should have the necessary safety margin to ensure the required level of machine reliability. In the total share of failures of excavators due to failure of supporting metal structures, defects in the metal structures of working equipment account for up to 70%. To establish the real reasons for the formation of cracks on the metal structures of the working equipment of the EKG-20 excavators, an assessment was made of indicators characterizing the actual loading of the metal structures of the working equipment in real operating conditions. The actual technical condition of the working equipment units was assessed on the basis of parameters that allow taking into account such important components as: fatigue, residual stresses and deformations, changes in the metal microstructure that the equipment acquired during operation under cyclic loading conditions. Stress concentration zones are identified and their boundaries are determined. The deformations are determined and the stresses arising under the action of working loads in various operating modes in the areas of stress concentration, metal structures of the handle and boom of the excavator are calculated. Based on the calculation results, a selection of the maximum tensile and compressive stresses that occur in the established stress concentration zones was made. The assessment of the identified stress concentration zones as sources of fatigue damage initiation was carried out.

Key words: working equipment, main mechanisms, mining excavators, loading, metal structures, deformations, stresses, metal fatigue, stress-strain state, stress concentration zone.

For citation: Nabiullin R. Sh. Integrated evaluation of the stress-strain state of metal structures of the working equipment of a mining excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):93–105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_93.

Введение

Эффективность ведения горных работ напрямую зависит от надежности экскаваторного парка, оценке которой уделяется большое внимание [1, 2]. Однако на показатель надежности экскаваторов оказывает влияние огромное количество внешних и внутренних факторов.

Эффективность нагружения главных механизмов рабочего оборудования определяется как внутренней, так и внешней динамикой. Основными факторами, влияющими на нагружен-

ность механизмов и узлов рабочего оборудования, являются:

- физико-механические свойства разрабатываемых горных пород, в том числе категория горных пород по трудности экскавации;

- горно-геологические условия эксплуатации и качество подготовки горной массы к выемке (кусковатость, наличие негабаритов);

- противодействие главных механизмов [3] и несоответствие системы индивидуального управления приводами главных механизмов кинематике

совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования при экскавации горных пород;

– опыт и соответствие квалификации машиниста необходимым требованиям при выполнении работ по разборке сложных забоев.

Прогнозирование и продление предельного срока эксплуатации для металлоконструкций рабочего оборудования карьерных экскаваторов, работающих в различных условиях и режимах эксплуатации, является актуальной задачей. Обеспечение прочности, надежности, безотказной работы в течение всего срока эксплуатации во многом зависит от уровня напряженно-деформированного состояния (НДС), который возникает при изготовлении оборудования и постоянно меняется в процессе эксплуатации. Работоспособность металлоконструкций полностью определяется уровнем НДС. Поэтому оценка напряжений в конструкциях является важной составляющей, которая определяет срок безопасной эксплуатации оборудования. Карьерные экскаваторы работают в условиях циклических нагрузок, что приводит к постепенному накоплению повреждений в материале, образованию трещин и усталостному разрушению [4–6]. При работе экскаватора происходит периодическая смена режимов работы и постоянный рост числа циклов нагружения [7–10]. Это обусловлено особенностями выемки взорванных горных пород [11, 12], а также конструкции и структуры приводов главных механизмов (подъемного и напорного) экскаватора [13–16]. Поэтому для точного определения и оценки НДС металлоконструкций нужен комплексный подход [17–19] и надежные методы диагностики, позволяющие выявлять источники развития повреждений в металлоконструкциях до проявления дефекта [20, 21].

Цель исследования

Определение фактических показателей нагруженности металлоконструкций рабочего оборудования карьерного экскаватора с целью установления основных причин возникновения трещин в металлоконструкциях рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-20.

Задачи исследования

1. Выявление наиболее нагруженных участков металлоконструкций рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-20, проявляющихся при различных режимах эксплуатации.

2. Определение количественных значений максимальных деформаций и напряжений на выявленных участках.

3. Проверка прочностных показателей металлоконструкций рабочего оборудования экскаватора с полученными фактическими показателями нагруженности.

4. Оценка влияния уровня нагруженности на образование трещин, исходя из условий прочности.

Решение задач исследования

Оценка фактической нагруженности металлоконструкций рабочего оборудования производилась на экскаваторе ЭКГ-20 (рис. 1). Для выполнения необходимых измерений использовался способ электротензометрирования. Исследования проводились в режимах «рабочий цикл», «повороты платформы», «стопорение подъема», «повороты хода», «передвижение экскаватора», позволяющих реализовать максимальные усилия на выходных звеньях механизмов экскаватора. При этом фиксировались деформации, которые возникали в характерных точках металлоконструкций экскаватора. Для определения характерных точек использовался экспресс-контроль поверхности металлоконструкций методом магнит-

ной памяти металла (МПМ), позволяющим выявлять участки с максимальной напряженностью — зоны концентрации напряжений (ЗКН).

Выявление и определение границ фактических ЗКН проводилось в рамках выполнения работы по проверке и уточнению расчетных, наиболее нагруженных участков металлоконструкций. Задача решалась путем экспресс-контроля напряженности собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхностях металлоконструкций стрелы и рукояти экскаватора методом МПМ.

Данный способ позволяет эффективно выявлять наиболее нагруженные участки, испытывающие наибольшие деформации, а также участки с различными концентраторами напряжений.

Количественная оценка внутренних механических напряжений в ЗКН производилась через измерение деформаций методом электротензометрии, основанном на явлении тензоэффекта, заключающегося в изменении сопротивления проводника при его деформации. В качестве датчиков использовались трехосевые, прямоугольные



Рис. 1. Общий вид экскаватора ЭКГ-20 в забое

Fig. 1. General view of the EKG-20 excavator in the face

тензорозетки 0° - 45° - 90° . Наклейка датчиков осуществлялась непосредственно на металлоконструкции экскаватора. Сигналы с датчиков обрабатывались многоканальным контроллером сбора данных ZET-058 [22].

По полученным значениям максимальных деформаций и главных напряжений элементов конструкций рабочего оборудования экскаватора выполнена проверка по условиям прочности для материала, из которого изготовлены металлоконструкции стрелы и рукояти — сталь 10ХСНД. Исходя из условия прочности, максимальные фактические напряжения, возникающие в процессе эксплуатации, не должны превышать допустимых значений

$$\sigma_{max} \leq [\sigma].$$

Значение допустимого напряжения:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_o}{n},$$

где σ_o — опасное напряжение, зависит от материала, определяется экспериментально. Для стали $\sigma_o = \sigma_{0.2}$ (предел текучести); n — коэффициент запаса прочности = 1,5;

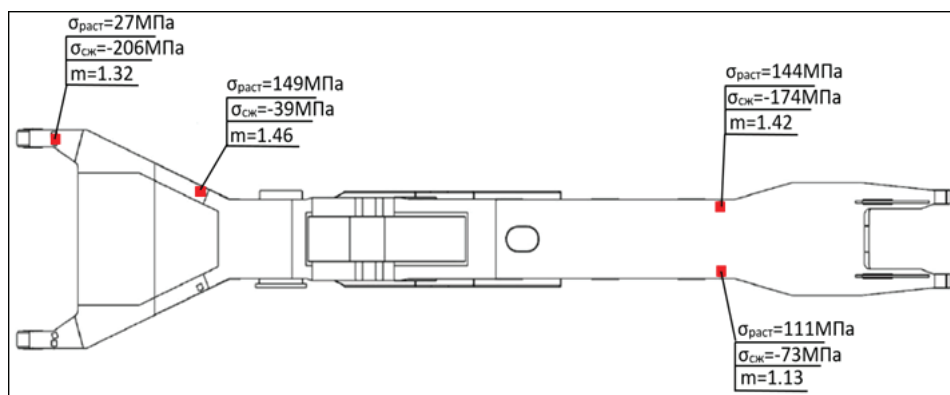
$$[\sigma] = \frac{390}{1,5} = 260 \text{ МПа} \text{ — по справоч-$$

ным данным для стали 10ХСНД.

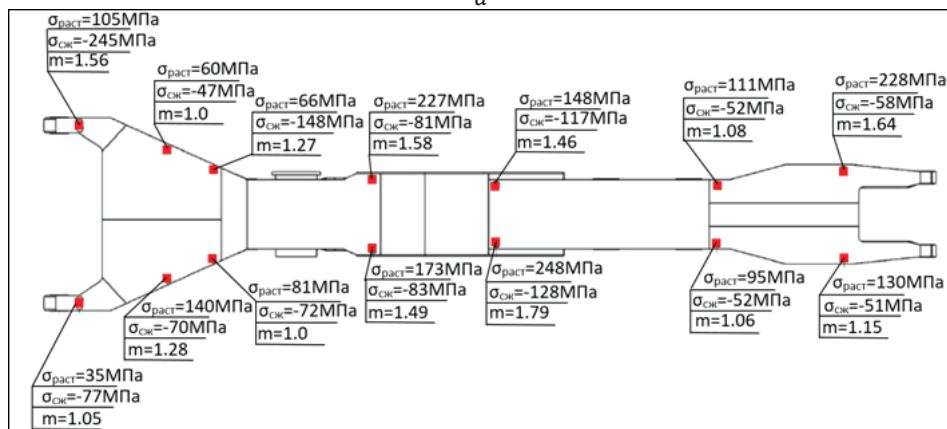
Для пластичных материалов допускаемые напряжения на растяжение и сжатие равны $[\sigma_{раст}] = [\sigma_{сж}]$.

Анализ полученных расчетных данных показывает (рис. 2), что значения напряжений, возникающих в характерных точках металлоконструкций стрелы экскаватора, не превышают допустимого значения для материала сталь 10ХСНД.

При усталостном нагружении начало пластической деформации



a



б

Рис. 2. Общий вид металлоконструкции стрелы с расположением контрольных зон: а – по верхнему настилу; б – по нижнему настилу ($\sigma_{\text{раст}}$ – напряжение растяжения в месте контроля, $\sigma_{\text{сж}}$ – напряжение сжатия в месте контроля, m – магнитный показатель деформационной способности)

Fig.2. General view of the metal structure of the boom with the location of the control zones: а – along the top deck; б – along the bottom deck ($\sigma_{\text{раст}}$ – tensile stress at the control point, $\sigma_{\text{сж}}$ – compressive stress at the control point, m – magnetic indicator of deformability)

проявляется в виде движения дислокаций. Плотность же дислокаций, которая определяется как суммарная длина дислокаций, приходящаяся на единицу объема металла ($\text{см}/\text{см}^3 = \text{см}^{-2}$), определяет способность металла сопротивляться пластической деформации. С увеличением числа циклов нагружения (увеличение срока эксплуатации оборудования) преимущественно в местах, где

имеются конструктивные (изменение сечения), технологические (вмятины, трещины, глубокие царапины), металлургические (раковины, поры) концентраторы напряжений, а также в местах, которые воспринимают наибольшие рабочие нагрузки, увеличивается плотность дислокаций, прежде всего в поверхностных слоях.

Тонкие линии скольжения на поверхности превращаются в характерные

полосы, которые образуют выступы и впадины (рис. 3).

Образовавшиеся на поверхности впадины являются местом зарождения усталостных микротрещин, зонами концентрации напряжений. В местах, где направление микротрещин и действующих напряжений совпадают, микротрещины начинают развиваться по сечению, приводя к постепенному разрушению металлоконструкции.

ЗКН — это не только заранее известные области, где особенности конструкции создают различные условия для распределения напряжений, создаваемых внешней нагрузкой, но и случайно расположенные области, где в силу начальной неоднородности металла в сочетании с нерасчетными дополнительными рабочими нагрузками возникают большие деформации (как правило деформации сдвига).

В качестве метода, позволяющего выявлять такие ЗКН, также был применен метод МПМ [23].

Основной особенностью данного метода является то, что он относится к методам экспресс-контроля. В процессе контроля измеряется и анализируется распределение собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности контролируемого узла.

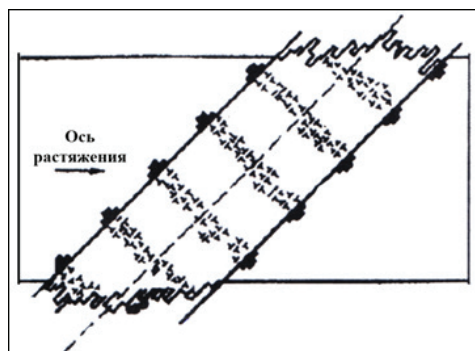


Рис. 3. Схема выхода дислокаций на поверхность с образованием выступов и впадин

Fig. 3. Scheme of the exit of dislocations to the surface with the formation of protrusions and depressions

Параметром контроля является напряженность СМПР — H , (А/м).

Критерием оценки результатов контроля является градиент напряженности СМПР — dH/dx или K ((А/м)/мм), который характеризует интенсивность изменения напряженности СМПР.

Количественная оценка уровня концентрации напряжений (источников повреждений) при сканировании вдоль поверхности объекта контроля определяется градиентом нормальной (H_y) и/или тангенциальной (H_x) составляющих СМПР:

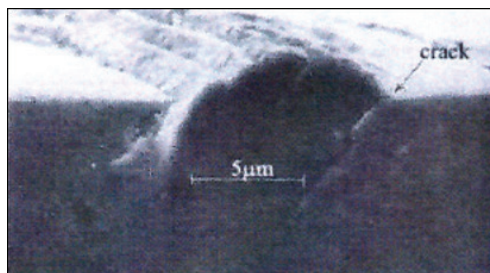
$$K = \frac{|\Delta H|}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x \rightarrow 0 \quad K = \frac{dH}{dx},$$

где Δx — расстояние между соседними точками контроля.

Основным расчетным диагностическим параметром является параметр m , характеризующий деформационную способность материала, т.е. фактическое напряженное состояние в зоне концентрации напряжений:

$$m = \frac{K_{max}}{K_{cp}},$$

где K_{max} и K_{cp} , соответственно, максимальное и среднее значения градиента поля,



$$K_{cp} = \frac{\sum_i^n K^i}{n}.$$

Оценка напряженно-деформированного состояния металла определяется путем сравнения магнитного показателя деформационной способности m , выявленного при контроле с предельным значением m_{np} , рассчитываемым по прочностным характеристикам материала:

$$m_{np} = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} \right)^2,$$

где σ_s — предел прочности материала при растяжении, МПа, $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести материала, МПа.

Переход металла к интенсивному развитию повреждения наступает при условии превышения магнитного показателя m прочностных характеристик материала m_{np} .

Таким образом, условие прочности имеет следующий вид:

$$m \leq m_{np}$$

Для контроля на стреле было выделено 18, а на рукояти 9 зон сканирования, которые являются наиболее напряженными сечениями (по расчету) (рис. 2, 4), каждая из зон контроля

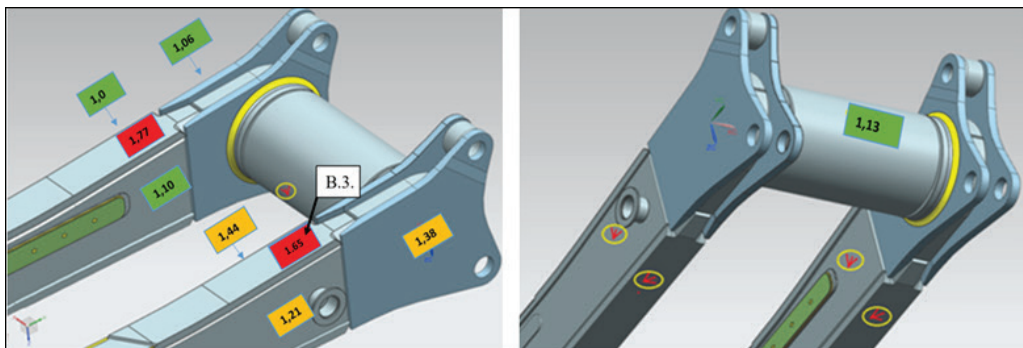


Рис. 4. Зоны сканирования на рукояти
Fig. 4. Scan zones on the handle

имела от 3 до 6 секторов сканирования. По результатам анализа, полученных магнитограмм максимальные значения градиента СМПР были зафиксированы в зоне сканирования В.3.

Из анализа полученной магнитограммы (рис. 5) имеем:

- в верхней части магнитограммы приведен график основного параметра контроля напряженности СМПР — H , (А/м);

- в нижней части магнитограммы приведен главный оценочный параметр, градиент напряженности СМПР — dH/dx или K ((А/м)/мм).

Как видно из графика, максимальное значение градиента поля — точка К4 составляет: $K_{max} = 26$ ((А/м)/мм).

Зона концентрации напряжений отмечена красными вертикальными линиями от 45 мм до 185 мм контролируемого участка. Пределы данной ЗКН определяются высокими значениями градиента поля.

$$K_{cp} = 15,7 \text{ ((А/м)/мм)}.$$

Рассчитываем параметр m , характеризующий деформационную способность материала, т.е. фактическое напряженное состояние в зоне концентрации напряжений:

$$m = 26/15,7 = 1,65.$$

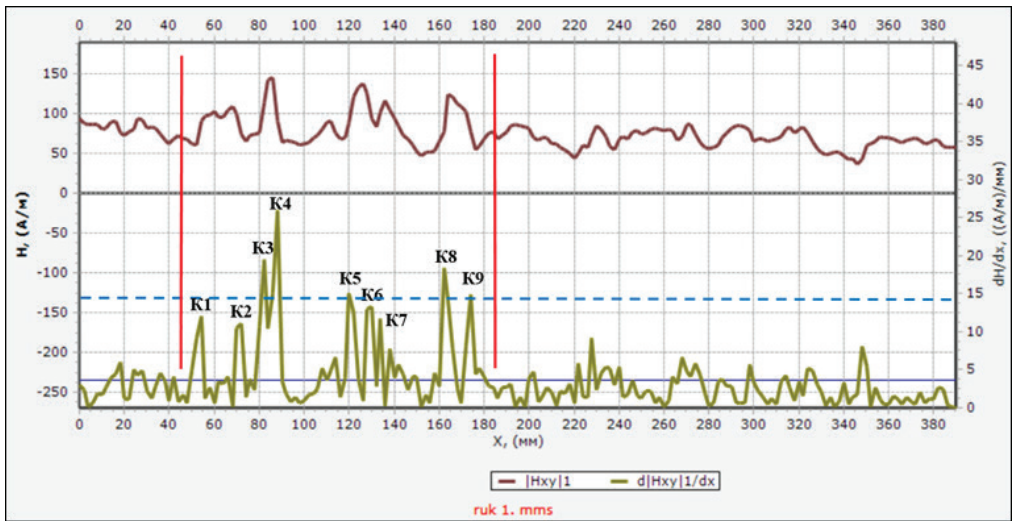


Рис. 5. Результирующая магнитограмма
Fig. 5. The resulting magnetogram

Рассчитаем предельное значение m_{np} по прочностным характеристикам материала:

$$m_{np} = \left(\frac{530}{390} \right)^2 = (1,36)^2 = 1,85 -$$

по справочным данным для стали 10ХСНД.

Расчетное значение параметра $m = 1,65$, характеризующего деформационную способность материала, т.е. фактическое напряженное состояние в ЗКН, не превышает предельного значения $m_{np} = 1,85$ по прочностным характеристикам материала стали 10ХСНД. Условие прочности выполняется.

Аналогичные расчеты были проведены для остальных зон сканирования стрелы и рукояти. Полученные результаты представлены на рис. 2, 4.

Из полученных расчетов видно, что значения напряжений, возникающих в металлоконструкциях стрелы, не превышают допустимых значений. Однако в этих местах также наблюдается повышение усталости металла в виде посте-

пенного накопления повреждений (повышения плотности дислокаций) и образования локальных ЗКН со значениями параметра m близкими к предельному $m_{np} = 1,85$. НДС металлоконструкции рукояти оценено только по показателю m , это обусловлено технической невозможностью установления проводного контакта между тензометрическими датчиками (на рукояти) и контроллером сбора данных ввиду подвижности конструкции, рабочий ход которой составляет около 10 метров. На рукояти также имеются локальные участки ЗКН со значением параметра m , близким к предельному.

При условии превышения магнитного показателя m прочностных характеристик материала в этих местах может произойти переход металла к интенсивному развитию повреждений.

В результате проведенных исследований установлено, что условия прочности для материала рукояти и стрелы выполняются. Коэффициент запаса прочности = 1,5. Однако на стреле по основному металлу уже в первый год эксплуатации проявляются



Рис. 6. Рост трещин на стреле экскаватора ЭКГ-20
Fig. 6. Growth of cracks on the boom of the excavator EKG-20

трещины, и в условиях циклических нагрузок при экскавации горных пород VI–VIII категории по трудности экскавации происходит их быстрый рост, что приводит к дополнительным простоям и преждевременному выходу из строя базовых узлов (рис. 6).

Было обследовано три стрелы экскаваторов ЭКГ-20, работающих на одном предприятии в одинаковых горно-геологических условиях. На всех стрелах экскаваторов имеются характерные технологические дефекты (вмятины), которые возникают при ударах рукояти о стрелу при работе экскаватора в сложных забоях с некачественной подготовкой горных пород к выемке.

Выводы

1. Образование трещин в металлоконструкции стрелы экскаватора ЭКГ-20 происходит в начальный период эксплуатации при отсутствии нагрузок, вызывающих возникновение напряжений, превышающих допустимые значения.

2. Так как повреждения проявляются в первый год эксплуатации (срок службы всех обследованных экскаваторов не превышал двух лет), следовательно, повреждения не имеют усталостный характер.

3. Основным фактором возникновения дефектов металлоконструкций

рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-20 в виде трещин в начальный период эксплуатации является несовершенство конструкции стрелы, а именно несовершенство конструкции боковых направляющих ограничителей (ползунов) на стреле, обеспечивающих ограничение боковых движений двухбалочной рукояти, и недостаточная жесткость металлоконструкции рукояти, что при работе приводит к ударам рукояти о стрелу и образованию вмятин, являющихся источниками зарождения трещин.

4. Комплексное использование методов магнитной памяти металла и электротензометрии, как взаимодополняющих, позволяет повысить эффективность оценки нагруженности металлоконструкций, так как предварительно экспресс-методом МПМ проводится выявление наиболее нагруженных участков, где и размещаются тензодатчики для измерения деформаций, что позволяет своевременно выявлять максимально нагруженные участки, где происходит накопление усталостной повреждаемости металла.

5. Полученные результаты могут быть использованы конструкторскими отделами машиностроительных заводов для совершенствования конструкции узлов рабочего оборудования экскаваторов ЭКГ-20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шутова М. Н., Евтушенко С. И., Гонтаренко И. В.* Определение надежности и категории технического состояния поврежденных металлических конструкций на основе численного эксперимента // Известия вузов: Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2018. — № 4. — С. 98–104. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-4-98–104.
2. *Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Гладковский С. В., Голиков Н. И.* О повышении надежности металлических конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур посредством комплексного применения современных методов модифицирования зоны сварного соединения // Сварочное производство. — 2016. — № 9. — С. 3–9.
3. *Подэрни Р. Ю., Булес П.* Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой // Горный журнал. — 2015. — № 1. — С. 55–61. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.10.
4. *Насонов М. Ю., Юнгмейстер Д. А., До Дык Чонг.* Оценка долговечности металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при наличии трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11. — С. 67–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_67.
5. *Сероштан В. И., Гаах Т. В.* Процесс образования трещин в металлоконструкциях грузоподъемных кранов // Известия ТулГУ. — 2016. — № 5. — С. 213–220.
6. *Fadeev D., Ivanov S.* Features of the walking mechanism of a floating platform autonomous modular complex for the extraction and processing of peat raw materials // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion, 2019. London: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2020, pp. 239–243. DOI: 10.1201/9781003017226-33.
7. *Krasnyy V. A., Maksarov V. V., Maksimov D. D.* Improving the wear resistance of piston rings of internal combustion engines when using ion-plasma coatings // Key Engineering Materials. 2020, vol. 854, pp. 133–139. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.133.
8. *Насонов М. Ю., Лыков Ю. В., До Дык Чонг.* Исследование ресурса и долговечности металлических конструкций экскаваторов после истечения срока эксплуатации // Уголь. — 2020. — № 2. — С. 13–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-2-13-17>.
9. *Manyele S.* Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time // Engineering. 2017, vol. 9, pp. 599–624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
10. *Макаров А. П., Шевченко А. Н., Павлов А. М.* Определение критической длины трещины в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Вестник ИрГТУ. — 2015. — № 12. — С. 57–63.
11. *Никитин И. С., Бураго Н. Г., Никитин А. Д., Якушев В. Л.* Определение критической плоскости и оценка усталостной долговечности при различных режимах циклического нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2017. — № 4. — С. 238–252. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.15.
12. *Горбовец М. А., Ходинев И. А., Рыжков П. В.* Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ. — 2018. — № 9. — С. 51–60. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
13. *Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А.* Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 4. — С. 156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.

14. Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Имитационная модель функционирования рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. — 2013. — № 8. — С. 20–24.

15. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of dynamic properties of mine excavator hoisting mechanism versus design parameters of operating equipment // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1118, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742–6596/1118/1/012054.

16. Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang S. Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic // Journal of Drive and Control. 2013, vol. 10, iss. 1, pp. 29–36. DOI: 10.7839/ksfc.2013.10.1.029.

17. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Емельянов А. А., Пумпур Е. В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 86–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

18. Skibin G. M., Shutova M. N., Evtushenko S. I., Chutchenko I. A. Reliability increase of running gears elements of mining traction locomotives using finite-element analysis package // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, no. 2, article 022021. DOI: 10.1088/1755–1315/87/2/022021.

19. Лахова Е. Н. Методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2012. — 18 с.

20. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742–6596/1753/1/012052.

21. Bolobov V. I., Chupin S. A. About the use of 110G13L steel as a material for the excavator bucket teeth // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1755–1315/378/1/012005.

22. Набиуллин Р. Ш., Мальцев В. В. Подбор оборудования для тензометрического сопровождения силовых испытаний // Сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. — Екатеринбург: УГГУ, 2022. — С. 56–59.

23. Дубов А. А. Метрологические аспекты в методе магнитной памяти металла // Мир измерений. — 2018. — № 3. — С. 42–45; № 4. — С. 16–18. **МИАБ**

REFERENCES

1. Shutova M. N., Evtushenko S. I., Gontarenko I. V. A determination of reliability and technical conditions category of the damaged metal construction using the numerical experiment. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2018, no. 4, pp. 98–104. [In Russ]. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-4-98-104.

2. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Gladkovsky S. V., Golikov N. I. On improving reliability of metal structures when operating at low climatic temperatures through the integrated use of modern methods of modification of the zone welded joint. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2016, no. 9, pp. 3–9. [In Russ].

3. Poderni R. Yu., Bules P. Comparative analysis of hydraulic and mechanical excavators with a straight shovel. *Mining Journal*. 2015, no. 1, pp. 55–61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.10.

4. Nasonov M. Yu., lungmeister D. A., Do Duc Trong. Endurance evaluation of metal structures containing cracks in mining shovel EKG-10. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 67–79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_67.

5. Seroshtan V. I., Gaah T. V. Process of formation of cracks in metal structures of cargolifting cranes. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2016, no. 5, pp. 213–220. [In Russ].
6. Fadeev D., Ivanov S. Features of the walking mechanism of a floating platform autonomous modular complex for the extraction and processing of peat raw materials. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*, 2019. London, CRC Press / Taylor & Francis Group, 2020, pp. 239–243. DOI: 10.1201/9781003017226–33.
7. Krasnyy V. A., Maksarov V. V., Maksimov D. D. Improving the wear resistance of piston rings of internal combustion engines when using ion-plasma coatings. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 854, pp. 133–139. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.133.
8. Nasonov M. Yu., Lykov Yu. V., Do Duc Trong. The study of the resource and durability of metal structures of excavators after the expiration of the service life. *Ugol' – Russian Coal Journal*. 2020, no. 2, pp. 13–17. [In Russ]. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-2-13-17>.
9. Manyele S. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time. *Engineering*. 2017, vol. 9, pp. 599–624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
10. Makarov A. P., Shevchenko A. N., Pavlov A. M. Determination of the critical length of a crack in the metal structures of quarry excavators. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015, no. 12, pp. 57–63. [In Russ].
11. Nikitin I. S., Burago N. G., Nikitin A. D., Yakushev V. L. Determination of the critical plane and assessment of fatigue durability under various cyclic loading regimes. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017, no. 4, pp. 238–252. [In Russ]. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.15.
12. Gorbovets M. A., Khodinev I. A., Ryzhkov P. V. Equipment for testing low-cycle fatigue with a «hard» loading cycle. *Trudy VIAM*. 2018, no. 9, pp. 51–60. [In Russ]. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9–51–60.
13. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. Sh., Khoroshavin S. A. Digital model of shovel work process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 156–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.
14. Komissarov A. P., Shestakov V. S. Simulation model of hydraulic excavator working equipment functioning. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2013, no. 8, pp. 20–24. [In Russ].
15. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of dynamic properties of mine excavator hoisting mechanism versus design parameters of operating equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1118, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742–6596/1118/1/012054.
16. Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang S. Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic. *Journal of Drive and Control*. 2013, vol. 10, iss. 1, pp. 29–36. DOI: 10.7839/ksfc.2013.10.1.029.
17. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Yemelyanov A. A., Pumpur E. V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 86–94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10–0-86–94.
18. Skibin G. M., Shutova M. N., Evtushenko S. I., Chutchenko I. A. Reliability increase of running gears elements of mining traction locomotives using finite-element analysis package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 2, article 022021. DOI: 10.1088/1755–1315/87/2/022021.
19. Lakhova E. N. Methods of predicting the performance of critically loaded machine building objects, Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2012, 18 p. [In Russ].

20. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

21. Bolobov V. I., Chupin S. A. About the use of 110G13L steel as a material for the excavator bucket teeth. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012005.

22. Nabiullin R. Sh., Maltsev V. V. Selection of equipment for tensometric support of force tests. *Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference "Readings in Memory of V. R. Kubachek", held as part of the Ural Mining Decade, Yekaterinburg, USGU, 2022*, pp. 56–59. [In Russ].

23. Dubov A. A. Metrological aspects in the method of metal magnetic memory. *World of measurements*. 2018, no. 3, pp. 42–45; no. 4, pp.16–18. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Набиуллин Рустем Шафкатович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Горных машин и комплексов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, 620144, ул. Куйбышева, 30, e-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0001-7519-2156.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nabiullin R. Sh., Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, department of mining machines and complexes, «Ural State Mining University», Ekaterinburg city, e-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0001-7519-2156.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 27.09.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 27.09.2023; accepted for printing 10.11.2023.

