

ГОРНЫЕ МАШИНЫ MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622.232

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-46-53

Набиуллин Рустем Шафкатович

Уральский государственный горный университет

*E-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru

ОЦЕНКА НДС И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ СТРЕЛЫ ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-20



Информация о статье

Поступила:

02 сентября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 октября 2024 г.

Принята к печати:

24 октября 2024 г.

Опубликована:

31 октября 2024 г.

Ключевые слова:

рабочее оборудование, карьерный экскаватор, металлоконструкция, зона концентрации напряжений, напряженно-деформированное состояние, физико-механические свойства металла, показатель деформационной способности

Аннотация.

Установлено, что одной из основных причин разрушения металлоконструкций карьерных экскаваторов является деградация и старение металла. Изменение физико-механического состояния металла при длительной эксплуатации, его старение и охрупчивание под воздействием ряда факторов, в том числе за счет знакопеременных циклических нагрузок и термоциклирования происходит как в основном металле, так и в сварных соединениях, как правило, в зоне термического влияния, что приводит к резкому снижению надежной и безопасной работоспособности всей конструкции. Установлено, что для объективной оценки состояния рабочего оборудования карьерных экскаваторов необходимо применять комплексную методiku с использованием нескольких методов оценки состояния металлоконструкций рабочего оборудования. Для оценки состояния материала головной части стрелы экскаватора была использована комплексная методика, включающая несколько основных методов, в том числе метод магнитной памяти металла и метод косвенной оценки характеристик механических свойств материала по параметрам пирамидального отпечатка на поверхности материала после определения твердости по Виккерсу. На основе анализа существующих эмпирических зависимостей, определяющих взаимосвязи между различными механическими свойствами металла, а именно показателями, которые можно определить методами неразрушающего контроля, выделены формулы, отражающие корреляционную зависимость относительного сужения с твердостью по Виккерсу, а также с параметрами пирамидального отпечатка на материале. Найдена зависимость ударной вязкости с относительным сужением, что позволяет дать оценку материала диагностируемой конструкции и установить склонность к хрупкому разрушению. Разработаны основные элементы методики оценки фактического состояния основного металла и сварных соединений металлоконструкций рабочего оборудования на примере головной части стрелы экскаватора ЭКГ-20.

Для цитирования: Набиуллин Р.Ш. Оценка НДС и механических свойств металлоконструкции головной части стрелы экскаватора ЭКГ-20 // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 4 (174). С. 46-53. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-46-53, EDN: NPYOLQ

Введение: Проведение научных исследований и разработка системы и методики диагностики, позволяющей обеспечить проведение объективного мониторинга состояния металлоконструкций базовых

узлов карьерных экскаваторов имеет важнейшее значение [1-5]. Установлено, что для этого целесообразно применять комплексную методiku, включающую несколько методов [6-10].



Рис. 1. Головная часть стрелы экскаватора на этапе производства

Fig. 1. Excavator boom head during production

Все приведенные ниже методы контроля относятся к неразрушающим методам, позволяющим определять фактическое состояние металла в любом доступном месте диагностируемой конструкции [11-14].

Первый метод – магнитной памяти металла (МПМ) – основан на использовании магнитоупругого эффекта (эффекта Виллари). В основе предложенного метода магнитной памяти металла лежит регистрация и анализ распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности контролируемого узла. Метод позволяет выявлять зоны концентрации напряжений (ЗКН) путем экспресс-контроля поверхности объекта без предварительной подготовки.

Критерием оценки результатов контроля является

ся градиент напряженности СМПР – dH/dx или K ((А/м)/мм), который характеризует интенсивность изменения напряженности СМПР.

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 [8].

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

Второй метод – дюрометрический (метод косвенного определения механических свойств материала). Основан на возможности определения механических свойств: пределов прочности, текучести, относительного удлинения и сужения, а также ударной вязкости по параметрам пирамидального отпечатка на поверхности материала после определения твердости по Виккерсу [16-20].

Расчетные уравнения:

– предел прочности:

$$\sigma_s = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S), \text{ МПа};$$

– относительное удлинение:

$$\delta_5 = D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S), \%;$$

– относительное сужение:

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot k \cdot S, \%;$$

– ударная вязкость:

$$KCU = \gamma \cdot \frac{\psi}{1-\psi}, \text{ МДж/м}^2.$$

где k – коэффициент кратности, зависящий от



Рис. 2. Разметка для сканирования методом МПМ

Fig. 2. Markings for scanning using the MMM method

Таблица 1. Результаты контроля методом МПМ

Table 1. Results of control using the MMM method

Сектор контроля	Максимальное значение градиента СМПР, K_{max} , ((А/м)/мм)	Значение показателя, m
Сектор №1	7,89	1,75
Сектор №2	10,56 <i>max</i>	1,77 <i>max</i>
Сектор №3	6,47	1,45 <i>min</i>
Сектор №4	5,03	1,63
Сектор №5	4,93 <i>min</i>	1,57

нагрузки на пирамидальный индентор (для нагрузки 50Н $k=4,472$); D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм; γ – коэффициент, зависящий от уровня механических свойств материала (при $\psi > 80$, $60 < \psi \leq 80$, $40 < \psi \leq 60$, $20 < \psi \leq 40$, $\psi \leq 20$ коэффициент γ соответственно равен 0,61, 0,76, 0,83, 1,19, 1,66).

Исследования по этой методике проводились на металле стрелы экскаватора ЭКГ-20 (Рис. 1).

Задачи исследования:

- установление точности оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкции стрелы методом МПМ;

- установление влияния уровня НДС металлоконструкции стрелы на изменение физико-механических свойств металла;

- подтверждение возможности косвенной оценки уровня механических свойств металла по параметрам отпечатка при определении твердости по Виккерсу;

Решение задач исследования:

На первом этапе работ была выполнена разметка секторов для сканирования металлоконструкции головной части стрелы экскаватора ЭКГ-20 в месте перехода (изменения толщины листа верхнего настила) (Рис. 2).

С помощью измерителя концентрации напряжений ИКН-2М-16 в комплекте со сканирующим устройством 8Э (ООО «Энергодиагностика») было выполнено 50 замеров, 10 замеров по каждому сектору сканирования и установлены зоны концентрации напряжений ЗКН с максимальным и минимальным значением градиента СМПР. По результатам были выявлены зоны концентрации напряжений с максимальным значением градиента СМПР и рассчитано значение показателя деформационной способности для полученных ЗКН.

Результаты замеров сведены в Таблицу 1.

Анализ результатов контроля методом МПМ:

Максимальные значения градиента СМПР и расчетного показателя деформационной способности получены в секторе №2. Границы выявленной ЗКН отмечены вертикальными красными линиями: 525 мм-1000 мм. (Рис. 3).

ЗКН характеризуется максимальным значением градиента поля $K_{max} = 10,56$ (А/м)/мм, а также максимальным расчетным значением показателя $m = 1,77$. Показатель m характеризует фактическое напряженное состояние металла в ЗКН на макроуровне. Переход металла к интенсивному развитию повреждения наступает при условии превышения магнитного показателя – m , предельного значения – m_{np} , рассчитываемого по прочностным характеристикам материала.

$$m_{np} = \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} \right)^2 = \left(\frac{530}{390} \right)^2 = (1,36)^2 = 1,85$$
 – по справочным данным для стали 10ХСНД

$$m \leq m_{np}$$

$$1,77 < 1,85$$

В данном случае условие прочности выполняется. Однако можно сделать вывод, что сечение с величиной $K_{max} = 10,56$ (А/м)/мм – это локальная

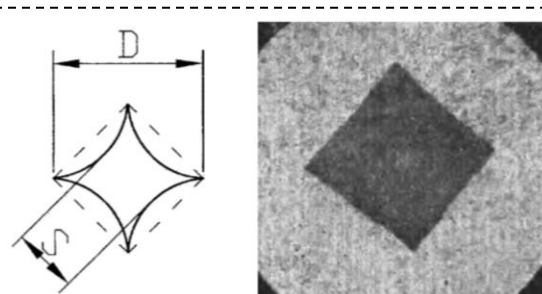


Рис. 5. Пирамидальные отпечатки на материале сталь 10 ХСНД, полученные при измерении твердости по Виккерсу
Fig. 5. Pyramidal prints on the material steel 10 HSND obtained when measuring Vickers hardness

зона, в которой концентрируется максимум напряжений.

Предполагалось, что именно в этой локальной зоне физико-механические свойства металла будут ниже, чем в других точках контролируемых секторов.

Для дальнейшего исследования были выявлены участки (Рис. 4) с максимальным и минимальным значениями показателя деформационной способности – m , так как именно он характеризует фактическое напряженное состояние в зоне концентрации напряжений:

- Сектор №2 – участок 915 мм – 935 мм (здесь наблюдается максимальное значение градиента СМПР);

- Сектор №3 – ЗКН в данном секторе характеризуется минимальным показателем m , поэтому для контроля был выбран произвольный участок из данной ЗКН (740 мм – 760 мм).

Для измерения твердости использовался переносной твердомер ТКМ-459С (принцип действия ультразвукового контактного импеданса). Твердость измерялась по шкале Виккерса алмазным наконечником пирамидальной формы.

Параметры формы пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) измерялись в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием окуляр-микрометра на портативном металлографическом микроскопе Альтами МЕД II при увеличении 400 крат.

Типичные отпечатки, получаемые на материале сталь 10ХСНД при измерении твердости по Виккерсу (получены с помощью цифровой камеры через окуляр микроскопа), приведены на Рис. 5.

Сектор №2 – средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 5 измерений):

HV – твердость = 1572 Мпа;

D – диагональ отпечатка = 0,2204 мм;

S – ширина отпечатка = 0,1573 мм;

– предел прочности:

$$\sigma_B = 1572 \cdot (0,285 + 0,057 \cdot 4,472 \cdot 0,1573) = 511 \text{ МПа};$$

– относительное удлинение:

$$\delta_5 = 0,2204 \cdot 4,472 \cdot (9,38 + 24,43 \cdot 4,472 \cdot 0,1573) = 26,18 \%;$$

– относительное сужение:

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot 4,472 \cdot 0,1573 = 72,6 \%;$$

– ударная вязкость:

$$KCU = 0,76 \cdot \frac{0,726}{1-0,726} = 2,01 \text{ МДж/м}^2 = 201 \text{ Дж/см}^2$$

Сектор №3 – средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 5 измерений):

HV – твердость = 1484 МПа

D – диагональ отпечатка = 0,2228 мм;

S – ширина отпечатка = 0,1612 мм;

– предел прочности:

$$\sigma_6 = 1484 \cdot (0,285 + 0,057 \cdot 4,472 \cdot 0,1612) = 484 \text{ МПа};$$

– относительное удлинение:

$$\delta_5 = 0,2228 \cdot 4,472 \cdot (9,38 + 24,43 \cdot 4,472 \cdot 0,1612) = 26,89 \%;$$

– относительное сужение:

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot 4,472 \cdot 0,1612 = 74,07 \%;$$

– ударная вязкость:

$$KCU = 0,76 \cdot \frac{0,741}{1-0,741} = 2,17 \text{ МДж/м}^2 = 217 \text{ Дж/см}^2$$

Полученные результаты сведены в Таблицу 2.

Выводы:

1. Сектор №2 характеризуется более высоким значением показателя деформационной способности, показатель m выше на 17,1%, что отражает бо-

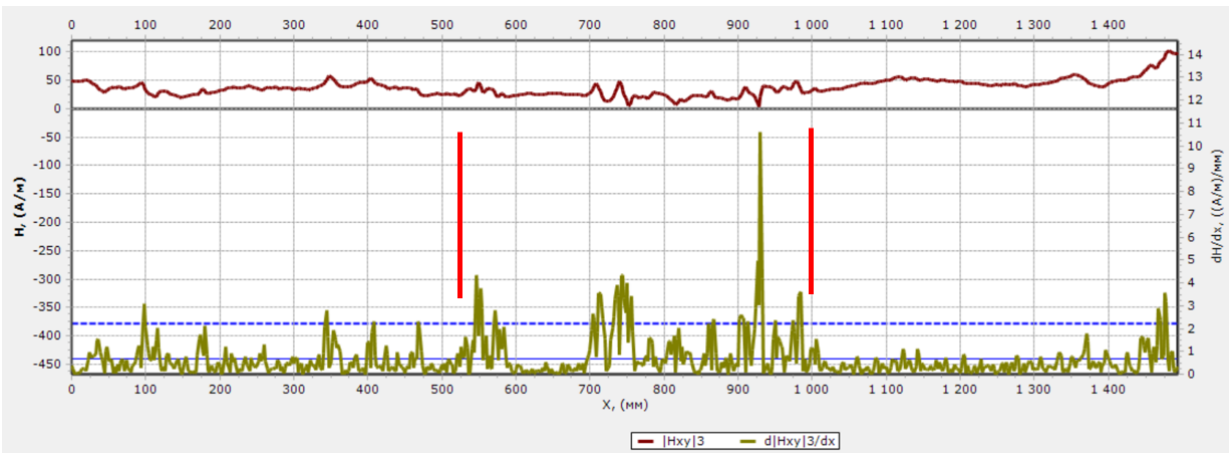
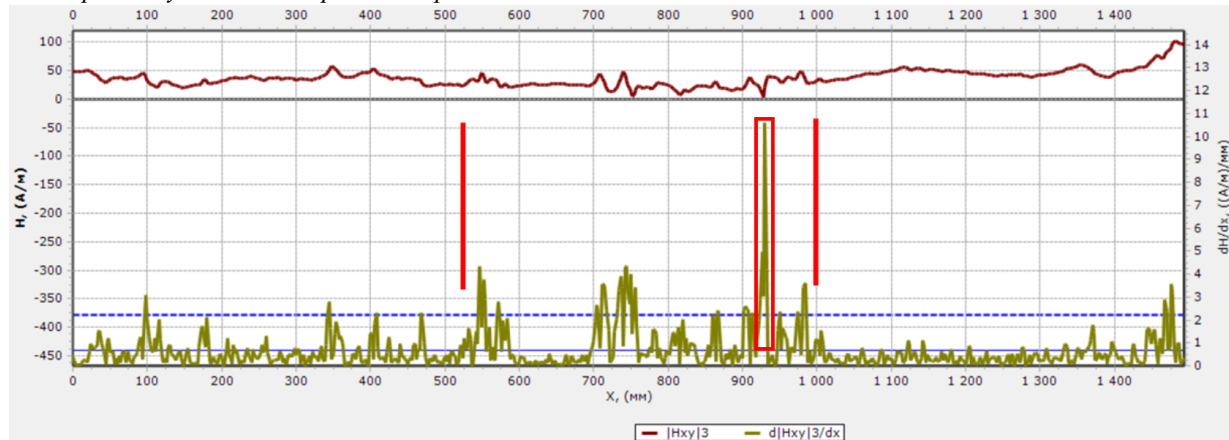


Рис. 3. Границы выявленной ЗКН 525мм-1000мм
Fig. 3. Boundaries of the identified SCZ 525mm-1000mm

Сектор №2 – участок измерения твердости 915мм – 935мм



Сектор №3 – участок измерения твердости 740мм – 760мм

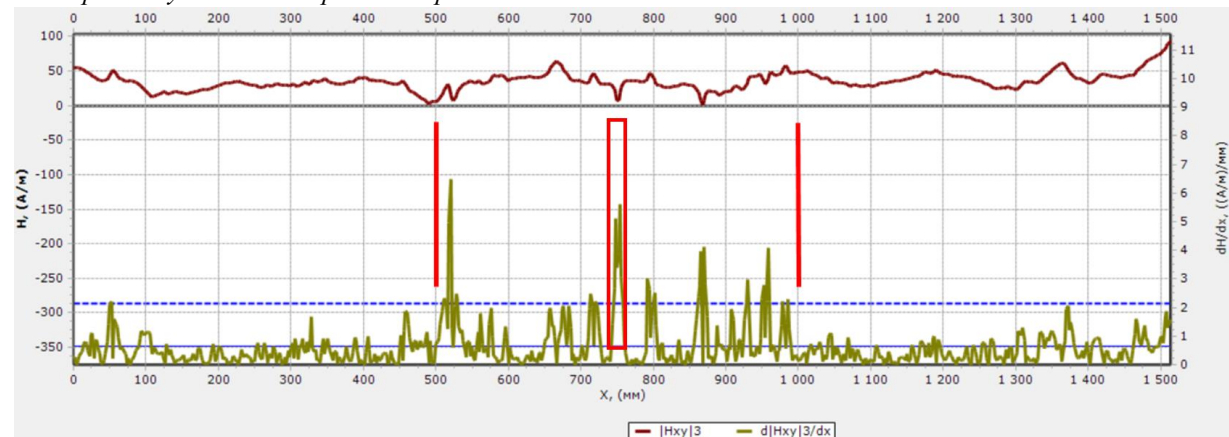


Рис. 4. Участки контроля твердости по шкале Виккерса
Fig. 4. Vickers hardness control areas

Таблица 2. Результаты анализа металлоконструкции головной части стрелы экскаватора ЭКГ-20
Table 2. Results of analysis of the metal structure of the boom head of the EKG-20 excavator

Параметр	Сектор №2	Сектор №3	Разница между параметрами, %
Показатель деформационной способности, t	1,77 max	1,45 min	17,1
Уровень внутренних напряжений в металле	Максимальный	Минимальный	-
Твердость, HV	157,2	148,4	5,6
Предел прочности, МПа	511	484	5,3
Относительное удлинение, %	26,18	26,89	2,7
Относительное сужение, %	72,6	74,1	2,1
Ударная вязкость, Дж/см ²	201	217	8,0

лее высокое напряженное состояние сектора №2 в локальной зоне с максимальным значением градиента поля (915 мм – 935 мм);

2. Сектор №2 характеризуется более низкими механическими свойствами металла, что подтверждает точность оценки НДС металлоконструкции головной части стрелы методом МПМ, а также устанавливает влияние уровня НДС на изменение физико-механических свойств металла:

- снижение ударной вязкости на 8,0%;
- снижение пластичности (по относительному удлинению) на 2,7%;

3. Метод косвенной оценки фактических механических свойств металла по параметрам полученного пирамидального отпечатка является эффективным с позиции возможности определения механических свойств непосредственно на конструкции без вырезки опытного образца;

4. Приведенные экспериментальные данные показывают эффективность именно комплексной методики контроля фактического состояния металла диагностируемой конструкции.

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. 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.
3. Макаров А. П., Шевченко А. Н., Павлов А. М. Определение критической длины трещины в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Вестник ИрГТУ. — 2015. — № 12. — С. 57–63.
4. 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.

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

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Сероштан В. И., Гаах Т. В. Процесс образования трещин в металлоконструкциях грузоподъемных кранов // Известия ТулГУ. — 2016. — № 5. — С. 213–220.

10. 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.

11. Лагунова Ю.А., Хорошавин С.А., Набиуллин Р.Ш., Калянов А.Е. Анализ металлоконструкций стрелы карьерного экскаватора методом неразрушающего контроля // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2022. — №15. — С. 115-123.

12. Лагунова Ю.А., Макарова В.В., Набиуллин Р.Ш. Анализ методов диагностирования состояния

металлоконструкций на примере экскаваторостроения // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6 (164). С. 17-25.

13. 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/pern.mech/2017.4.15.

14. 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.

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

16. Киселев Ю.А. Зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом прочности при разры-

ве // Заводская лаборатория. – 1968. – Т. 34, №5. – С.596-597.

17. Киселев Ю.А. Исследование связи между характеристиками пластичности и формой отпечатка по Виккерсу // Заводская лаборатория. – 1969. – Т. 35, №8. – С.974-976.

18. Снарский А.С. Определение физико-механических характеристик материала методом неразрушающего контроля // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2005. – №10. – С. 133-137.

19. Снарский А.С. Установление закономерности деградации механических свойств металла нефтехимического оборудования и конструкций // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2004. – №3. – С. 44-49.

20. Manye 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.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Набиуллин Рустем Шафкатович, доцент, канд. техн. наук, Уральский государственный горный университет, (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), e-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru

Заявленный вклад авторов:

Набиуллин Рустем Шафкатович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-46-53

Rustem Sh. Nabiullin

Ural state mining University

*E-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE AND MECHANICAL PROPERTIES OF METAL STRUCTURES OF THE BOOM HEAD OF EKG-20 EXCAVATOR



Article info

Received:

02 September 2024

Accepted for publication:

15 October 2024

Abstract.

It has been established that one of the main reasons for the destruction of metal structures of quarry excavators is degradation and aging of the metal. Changes in the physical and mechanical state of the metal during long-term operation, its aging and embrittlement under the influence of a number of factors, including due to alternating cyclic loads and thermal cycling, occur both in the base metal and in welded joints, as a rule, in the heat-affected zone, which leads to a sharp decrease in the reliable and safe performance of the entire structure. It has been established that in order to objectively assess the condition of the working equipment of mining excavators, it is necessary to apply a comprehensive methodology using several

Accepted:
24 October 2024

Published:
31 October 2024

Keywords: working equipment, mining excavator, metal structures, stress concentration zone, stress-strain state, physical and mechanical properties of metal, deformability index.

methods for assessing the condition of the metal structures of the working equipment. To assess the condition of the material of the excavator boom head, a complex methodology was used, including several basic methods, including the metal magnetic memory method and the method of indirect assessment of the characteristics of the mechanical properties of the material based on the parameters of the pyramidal imprint on the surface of the material after determining the Vickers hardness. Based on the analysis of existing empirical dependencies that determine the relationships between various mechanical properties of metal, namely indicators that can be determined by non-destructive testing methods, formulas are identified that reflect the correlation dependence of the relative narrowing with the Wickes hardness, as well as with the parameters of the pyramidal imprint on the material. The dependence of impact toughness with relative narrowing is found, which allows us to evaluate the material of the diagnosed structure and establish the tendency to brittle failure. The main elements of a methodology for assessing the actual condition of the base metal and welded joints of metal structures of working equipment have been developed using the example of the boom head of the EKG-20 excavator.

For citation: Nabiullin R.Sh. Assessment of stress-strain state and mechanical properties of metal structures of the boom head of EKG-20 excavator. Mining Equipment and Electromechanics, 2024; 4(174):46-53 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-46-53, EDN: NPYOLQ

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. Poderni R.Yu., Bules P. Comparative analysis of hydraulic and mechanical excavators with a straight shovel // Mining Journal. - 2015. - No. 1. - p. 55-61. DOI:10.17580/gzh.2015.01.10.
3. 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].
4. 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.
5. Lakhova E. N. Metodika prognozirovaniya rabotosposobnosti kriticheskoi nagruzhennykh ob"ektov mashinostroeniya [Methods of predicting the performance of critically loaded machine building objects], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2012, 18 p.
6. 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.
7. 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].
8. Nasonov M. Yu., Iungmeister D. A., Do Duc Trong Endurance evaluation of metal structures containing cracks in mining shovel EKG-10. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2022;(11):67-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_67.
9. 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].
10. 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.
11. Lagunova Yu. A., Khoroshavin S. A., Nabiullin R. Sh., Kalyanov A.E. Evaluation of Metal Structures of a Mining Excavator Boom by Non-destructive Testing. Transport, mining and construction engineering: science and production. – 2022. – №15. – pp. 115-123. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658_3305_2022_15_115_123.
12. Lagunova Yu. A., Makarova V.V., Nabiullin R. Sh. Analysis of methods for diagnosing the state of metal structures on the example of excavator construction. Mining Equipment and Electromechanics. 2022. № 6 (164). p. 17 - 25. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816_4528_2022_6_17_25.
13. 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.
14. 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: 10.18577/2307-6046-2018-09-51-60.

15. Dubov A.A. Metrological aspects in the method of metal magnetic memory // World of measurements. - 2018. - No. 3. - p. 42–45; No. 4. p.16–18.

16. Kiselev Yu.A. Relationship between Vickers hardness and tensile strength // Factory laboratory. – 1968. – T. 34, No. 5. – p.596-597.

17. Kiselev Yu.A. Study of the relationship between plasticity characteristics and the shape of the Vickers imprint // Factory Laboratory. – 1969. – T. 35, No. 8. – p.974-976.

18. Snarsky A.S. Determination of physical and mechanical characteristics of a material by non-

destructive testing // Bulletin of Polotsk State University. – 2005. – No. 10. – pp. 133-137.

19. Snarsky A.S. Establishment of patterns of degradation of mechanical properties of metal of petrochemical equipment and structures // Bulletin of Polotsk State University. – 2004. – No. 3. – pp. 44-49.

20. 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.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Rustem Sh. Nabiullin, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Ural state mining University, (20144, Russia, Yekaterinburg, Str. Kuybysheva, 30), e-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru

Contribution of the authors:

Rustem Sh. Nabiullin – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Authors have read and approved the final manuscript.

