

УДК 622-1/-9

Левашова Елена Евгеньевна, аспирант, старший преподаватель, **Пимонов Максим Владимирович**, старший преподаватель, **Абабков Николай Викторович**, канд. техн. наук, доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: pee5152@rambler.ru

РАСЧЕТ РЕСУРСА ДЕТАЛИ «ОСЬ» ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Аннотация: В статье представлен пример расчета ресурса тяжело нагруженной детали типа «ось», соединяющей ковш и проушины стрелы карьерного экскаватора после применения технологии восстановления, заключающейся в использовании механизированной наплавки с последующим электродуговым термическим упрочнением. Частой причиной поломки экскаватора является износ данной детали из-за появления на поверхности задиров, микротрещин, а также выкрашивания металла в процессе трения, что приводит к увеличению зазоров и ускоренному износу детали. Расчет выполнялся на основе полученных результатов конечно-элементного моделирования, при этом одной из прочностных характеристик материала был выбран предел выносливости. При расчете установлены сопоставимые напряжения, возникающие в модели оригинальной детали и после восстановления, поэтому расчет выполнен для детали после восстановления. Установлено, что максимальные напряжения, возникающие в модели оригинальной детали и детали после восстановления механизированной наплавкой с последующим электродуговым термическим упрочнением отличаются на 0,1 МПа, что незначительно влияет на остаточный ресурс детали. Выполнен расчет ориентировочного количества циклов (3,4 млн) работы детали «ось», который сопоставим с ресурсом оригинальной детали.

Ключевые слова: восстановление, наплавка, механические свойства, твердость, предел прочности, конечно-элементное моделирование.

Информация о статье: принята 20 ноября 2020 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-3-9

При эксплуатации карьерных экскаваторов вследствие больших нагрузок, приходящихся на оборудование (например, у экскаватора Р&Н 2800 ХРС номинальная полезная нагрузка 59,0 м. тонн и номинальная емкость ковша 26,8-33,6 м³, а у экскаватора Р&Н 4100ХРС – 108,9 м. тонн и 52,8-61,2 м³ соответственно), происходит интенсивный износ подвижных соединений рабочего оборудования [1]. Наиболее нагруженным и быстроизнашиваемым элементом в карьерном экскаваторе является ось в соединении ковша и проушин стрелы, воспринимающая основные нагрузки при работе ковша. Частой причиной поломки экскаватора является износ данной детали из-за появления на поверхности задиров, микротрещин, выкрашивания металла в процессе трения, что приводит к увеличению зазоров и ускоренному износу детали (рис. 1).

В работах [2-4] представлена технология восстановления габаритных размеров и эксплуатационных свойств детали с анализом механических свойств поверхностного слоя. Технология восстановления заключается в выполнении наплавки механизированным способом в среде

защитного газа с последующим электродуговым термическим упрочнением для повышения механических свойств.

Для анализа эффективности выполненной технологии необходимо выполнить расчет прогнозирования ресурса детали после восстановления. Для расчета взяты характеристики работы карьерного экскаватора Р&Н 2800ХРС с объемом ковша 33,6 м³ и номинальной грузоподъемностью 122,5 м. тонн.

Расчет выполняется на основе одной из прочностных характеристик материала, предела выносливости. В работе [2] представлены результаты измерения твердости поверхностного слоя после электродугового термического упрочнения, которые составляют 53,4 HRC согласно таблице сопоставления значений твердости HRC и предела прочности [5], который составляет 1 800 МПа.



а)



б)



в)

Рис. 1. Характер повреждения пары ось-втулка, а – пара ось-втулка; б – повреждение втулки; в – повреждение оси

Fig.1. The nature of the damage to the axle-bushing pair, a – axle-bushing pair; b – damage to the sleeve; c – axle damage

Для определения остаточного ресурса детали после восстановления необходимо установить напряжения [9-10], действующие при эксплуатации, что можно сделать методом конечно-элементного моделирования в трехмерной постановке [11-16].

При подготовке модели к расчету принят ряд допущений (рис. 2):

- моделирование проушин на стреле выполнено цилиндрическими телами;
- моделирование втулки проушины ковша выполнено цилиндрическим телом;
- нагрузки, действующие в конструкции, моделировались нагружением Bearing Load, так как ось и втулки представляют собой подшипник скольжения;
- коэффициент трения в контактных парах принимался для пары сталь-сталь;
- при моделировании ось закреплялась по торцам, а воздействия на ось передавались через цилиндрические тела.

Для расчета опорной нагрузки учитывались два варианта работы карьерного экскаватора P&N 2800XPC:

- полностью пустой ковш, при этом учитывалась масса пустого ковша $m_1 \approx 35\,280$ кг (345,97 кН).
- полностью загруженный ковш, при этом учитывалась масса ковша $m_1 \approx 35\,280$ кг (345,97 кН) и масса породы, загруженной в ковш до полного объема $m_2 \approx 122\,360$ кг (1 201,3 кН).

Центральное цилиндрическое тело соответствует втулке проушины ковша. Два боковых цилиндрических тела соответствуют

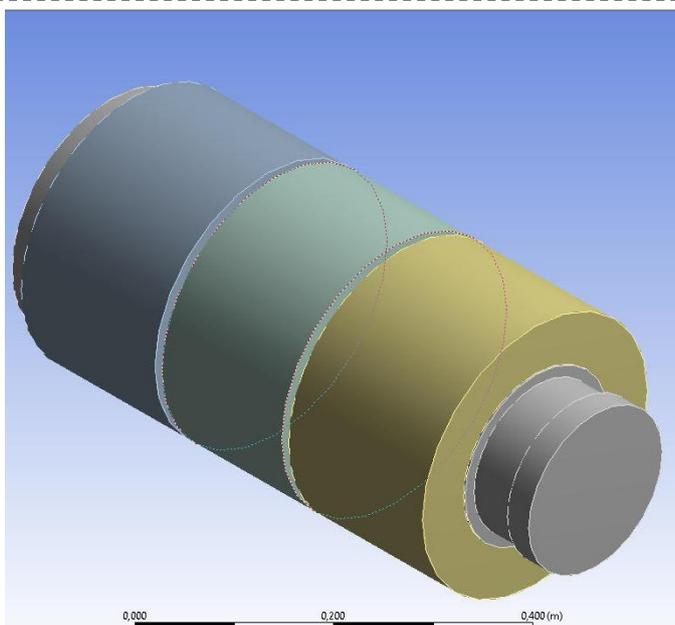


Рис. 2. Внешний вид модели
Fig. 2. Model appearance

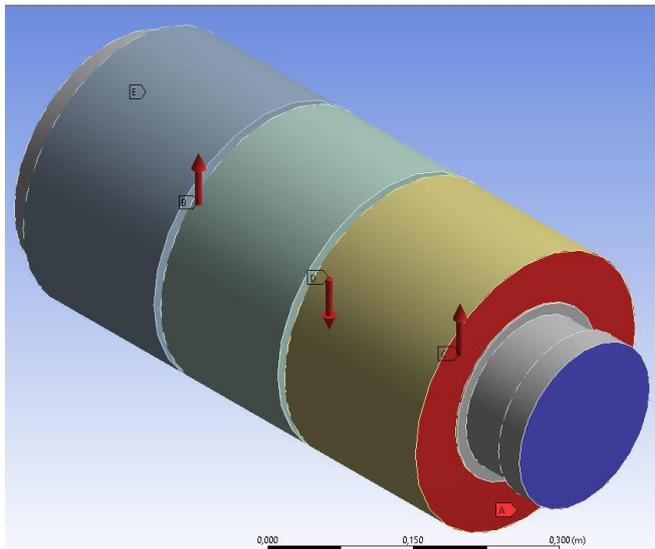


Рис. 3. Вид модели с зонами закрепления и приложенным давлением

Fig. 3. View of the model with fixing zones and applied pressure

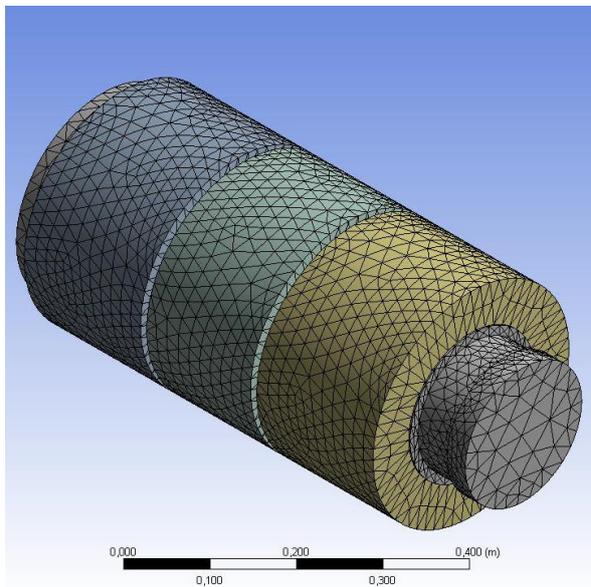


Рис. 4. Вид модели с сеткой конечных элементов

Fig. 4. View of the model with a mesh of finite elements

проушинам, расположенным на стреле экскаватора. Для корректного расчета нагрузки между втулками оставлен зазор.

Прочностные характеристики материала приняты в соответствии со свойствами наплавленного металла порошковой проволокой 35Х5ГНФВМ, коэффициент Пуассона $\mu = 0,27$, модуль упругости $E = 1,9 \cdot 10^{11}$ Па.

При закреплении оси ограничено ее перемещение по оси X, все остальные степени свободы сохранены. Также по оси X было ограничено перемещение крайней втулки, что соответствует ее креплению на конструкции при помощи стопоров (рис. 3). Нагрузки прикладывались по внутренним поверхностям тел, имитирующих втулки, к центральной втулке приложена нагрузка, равная сумме нагрузок на две крайних, но

направленная в противоположную сторону, что соответствует реальным условиям работы оси. На рис. 4 представлен вид модели разбитой сеткой конечных элементов. Разбиение выполнялось методом Free с дальнейшим уменьшением размера сетки до 0,27 м.

Для анализа результатов моделирования цилиндрические тела будут скрыты.

Как видно из рис. 5, а, максимальные деформации возникают в средней части оси со стороны поверхности прилегания проушины ковша и составляют $6,3 \times 10^{-6}$ м. На рис. 5, б показано распределения суммарных напряжений, возникающих в оси, максимальные значения достигают 10 МПа и локализованы в основном в центральной части детали.

Как видно из рис. 6, общий характер распределения напряжений и деформаций не изменился, однако увеличилось их значение, для напряжений увеличение произошло более чем в 9,5 раз и составило 95,1 МПа (рис. 6, б). Деформации увеличились практически в 2,5 раза и составили $5,57 \times 10^{-5}$ м (рис. 6, а).

Аналогичный расчет выполнен для базовой детали, максимальные напряжения составили 95,2 МПа, т.к. исходный материал имеет незначительно больше модуля Юнга, дальнейшие расчеты выполнены для предлагаемой технологии восстановления детали «ось» карьерного экскаватора, т.к. количество циклов получается сопоставимым.

Таким образом, установлено, что:

- максимальные напряжения для обоих вариантов работы значительно ниже предела прочности наплавленного слоя, однако перепады их значений в 2 раза могут привести к быстрому развитию усталостного разрушения;

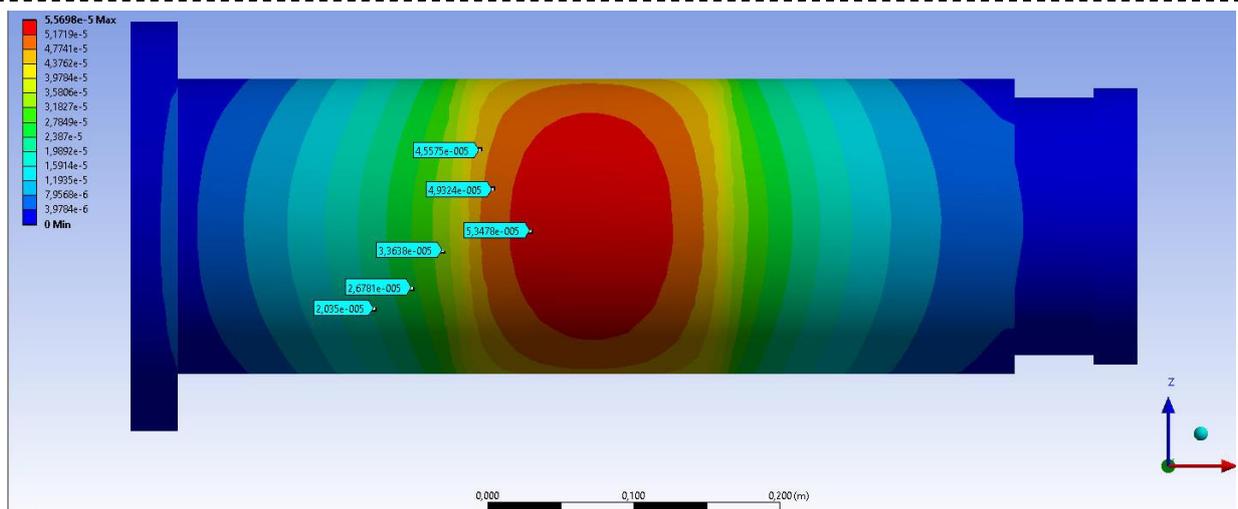
- максимальные деформации являются незначительными по сравнению с общими габаритами конструкции, однако даже при значении $6,3 \times 10^{-6}$ м = 6,3 мкм на поверхности могут возникать локальные участки выкрашивания поверхностей;

- результат расчета показал, что необходимо произвести расчет конструкции на усталостную прочность в условиях знакопеременных нагрузок.

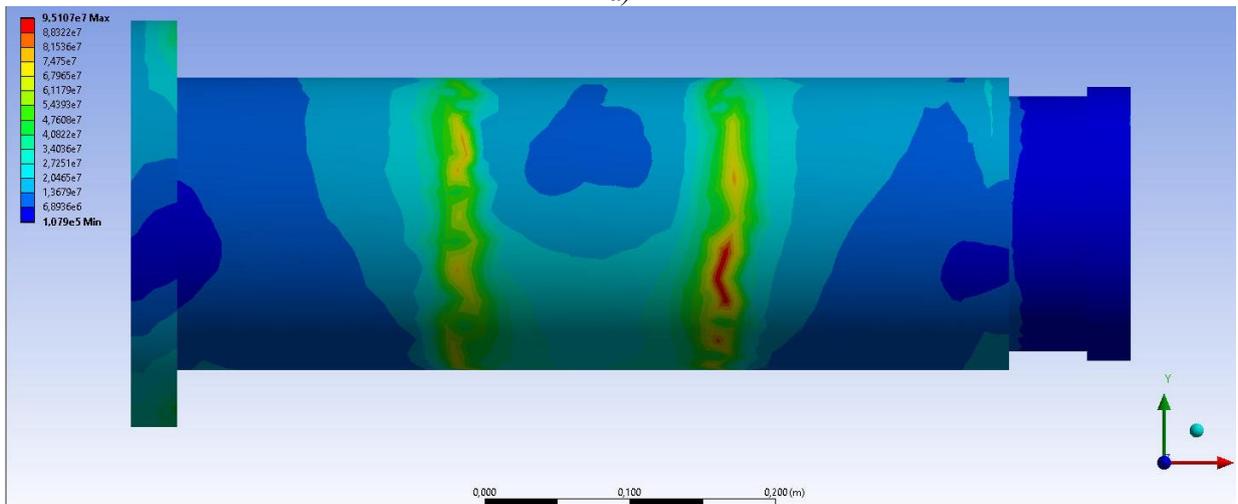
Расчет на усталостную прочность в условиях знакопеременных нагрузок

Результаты расчета показали достаточно высокие значения, близкие к пределу текучести. Однако, как было установлено ранее результатами конечно-элементного моделирования напряжения, действующие напряжения в детали «ось» не превышают 95 МПа.

Оценим максимальную амплитуду колебаний напряжений допустимых, для материала, по формуле [6]:



а)



б)

Рис. 6. Результаты расчета модели оси при максимальных режимах нагружения, а) – суммарные деформации, б) – суммарные напряжения
 Fig. 6. Results of calculating the axle model at maximum loading conditions, а) – total deformations, б) – total stresses

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \times \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}\right); \quad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости материала, МПа;

σ_b – предел прочности материала, МПа (1 800 МПа);

σ_{cp} – действующие напряжения в конструкции, МПа (95,1 МПа);

Для расчета максимальной амплитуды колебаний напряжений необходимо определить предел выносливости σ_{-1} (формула 2), как минимальный, полученный по нормативным значениям для металла. Действующие напряжения $\sigma_{cp}=95,1$ МПа (для предлагаемой технологии) как максимальные по результатам МКЭ-моделирования.

$$\sigma_{-1} = 0,35 \cdot \sigma_b + 122 \quad (2)$$

$$\sigma_{-1} = 0,35 \cdot 1800 + 122 = 752 \text{ МПа}$$

$$\text{Тогда, } \sigma_a = 752 \cdot \left(1 - \frac{95,1}{1800}\right) = 712,3 \text{ МПа}$$

Полученные максимальные амплитуды колебаний не превышают напряжений, полученных

при моделировании, а также предела текучести для наплавленного слоя.

Несмотря на то, что значения расчетных показателей предела выносливости и максимальной амплитуды значительно выше напряжений, полученных в конструкции при моделировании, необходимо оценить ожидаемое количество циклов [7, 8, 17].

Условие расчета примем следующее:

- максимальная нагрузка $P_{max} = 1\,547,2$ кН;
- минимальная нагрузка $P_{min} = 345,97$ кН,

что соответствует полностью разгруженной конструкции.

Максимальные напряжения, действующие в детали $\sigma_{max} = 95,1$ МПа для конструкции, нагруженной весом угля 122 360 кг с учетом веса ковша 35 280 кг.

Рассчитаем коэффициент γ – коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию цикла нагружения.

Для этого определим среднее усилие цикла по формуле (3):

$$P_{cp} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (3)$$

$$P_{cp} = \frac{1547,24 + 345,97}{2} = 946,6 \text{ кН}$$

Так как среднее усилие имеет знак плюс, то вид напряженного состояния – растяжение.

Коэффициент асимметрии цикла рассчитывается по формуле (4):

$$r = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (4)$$

$$r = \frac{345,97}{1547,2} = 0,22$$

Тогда коэффициент γ определяется по формуле (5) [8]:

$$\gamma = 2,0 / (1,2 - r) \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{2,0}{1,2 - 0,22} = 2,05$$

Расчет допустимого количества циклов при максимальном нагружении детали.

Ожидаемое количество циклов учитывается с помощью коэффициента α , который определяется по формуле (6) в соответствии со СП 16.13330.2011:

$$\alpha = 0,07 \left(\frac{n}{10^6} \right)^2 - 0,64 \frac{n}{10^6} + 2,2 \quad (6)$$

Для расчет коэффициента α воспользуемся формулой (7):

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{R_{m\gamma}} \quad (7)$$

где R_m – расчетное сопротивление усталости, МПа

$$\alpha = \frac{95,1}{36 \cdot 2,05} = 1,29$$

Тогда формула (6) приобретает вид:

$$0,07 \left(\frac{n}{10^6} \right)^2 - 0,64 \frac{n}{10^6} + 0,91 = 0$$

Решая квадратное уравнение, получим

$$\frac{n}{10^6} = \frac{0,64 - \sqrt{0,2553}}{0,07 \cdot 2} = 3,446$$

Откуда $n = 3\,446\,005$ циклов.

Выводы

1. Выполнено проектирование тяжелонагруженной детали «ось» в соединении ковша и проушин стрелы, воспринимающей основные нагрузки при работе ковша карьерного экскаватора Р&Н 2800ХРС, методом конечно-элементного моделирования в трехмерной постановке.

2. Установлено, что максимальные напряжения, возникающие в модели оригинальной детали и детали после восстановления механизированной наплавкой с последующим электродуговым термическим упрочнением, отличаются на 0,1 МПа, что незначительно влияет на остаточный ресурс детали.

3. Выполнен расчет ориентировочного количества циклов (3,4 млн) работы детали «ось», который сопоставим с ресурсом оригинальной детали.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-1084.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические карьерные экскаваторы. Обзорная информация об изделии. https://mining.komatsu/docs/default-source/product-documents/surface/electric-rope-shovels/electric-rope-shovel-brochure-russian.pdf?Status=Temp&sfvrsn=f4ffcf6b_48.

2. Князьков В. Л. Механические и трибологические характеристики восстановленной детали горного оборудования после упрочнения/ В. Л. Князьков, Е. Е. Левашова, М. В. Пимонов// XVII Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы сибирей. сибресурс – 2018». – Кемерово, 2018 – С. 406.1 – 406.7.

3. Левашова Е. Е. Анализ изменения акустических и магнитных характеристик, наплавленных образцов до и после электродугового термического упрочнения поверхностных слоев/ Е. Е. Левашова, В. Л. Князьков, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов// Сборник трудов IV Всероссийской молодежной научно-практической школы с международным участием "Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении". – Кемерово, 2018 – С. 21.1 – 21.5.

4. Князьков В. Л. Металлографические исследования и трибологические характеристики восстановленной детали горного оборудования после упрочнения/ В. Л. Князьков, Е. Е. Левашова, М. В. Пимонов// Сборник трудов X Международной научно-практической конференции "Инновации в машиностроении". – Кемерово, 2019 – С. 450-455.

5. ASTM E140-12. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.e140-12#t00003_2

6. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. с ил.

7. Серенсен С. В., Когае В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975, – 488 с.

8. Николаев Г. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.

9. Моделирование напряженно-деформированного состояния вибропитателя секции крепи с

выпуском угля подкровельной толщи / В. И. Клишин, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов, Е. А. Худынец // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – №2. – С. 57-63.

10. Использование УЗ-сигналов для идентификации НДС / А. Н. Смирнов, В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, Н. А. Хапонен, Ю. М. Шапунов // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 3. – С. 32-35.

11. Дышловенко, П. Е. Математические основы конечно-элементных методов моделирования: методические указания по решению задач. – Ульяновск : УЛГТУ, 2011. – 54 с.

12. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 349 с.

13. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 511 с.

14. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах. – Под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с: ил.

15. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 1. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдукова и др. – Учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

16. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 2. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдукова и др. – Учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 148 с.

17. Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components / V. Blumenstein, M. Mahalov, O. Ostanin // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.

Elena E. Levashova, postgraduate, senior lecturer, **Maxim V. Pimonov**, senior lecturer, **Nikolay V. Ababkov**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

LIFE PREDICTION OF PART “AXLE” AFTER RESTORATION

Abstract: The article presents an example of life prediction of a heavy-duty part of the "axle" type connecting the bucket and the lugs of the boom of a mining excavator after applying the recovery technology, which consists in the use of mechanized surfacing with subsequent electric arc thermal hardening. A frequent cause of excavator breakdown is the wear of this part, due to the appearance of scoring, microcracks on the surface, as well as metal chipping during friction, which leads to an increase in gaps and accelerated wear of the part. The calculation was carried out on the basis of the obtained results of finite element modeling, with the endurance limit chosen as one of the strength characteristics of the material. The calculation established comparable stresses arising in the model of the original part and after restoration, therefore the calculation was performed for the part after restoration. It has been established that the maximum stresses arising in the model of the original part and the part after restoration by mechanized surfacing with subsequent electric arc thermal hardening differ by 0.1 MPa, which does not significantly affect the residual life of the part. The calculation of the approximate number of cycles (3.4 million) of work of the "axle" part, which is comparable to the service life of the original part, has been performed.

Keywords: restoration, surfacing, mechanical properties, hardness, tensile strength, finite element modeling.

Article info: received November 20, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-3-9

REFERENCES

1. Electric mining excavators. Product Overview https://mining.komatsu/docs/default-source/product-documents/surface/electric-rope-shovels/electric-rope-shovel-brochure-russian.pdf?Status=Temp&sfvrsn=f4ffcf6b_48.

2. Knjaz'kov V. L. Mehanicheskie i tribologicheskie harakteristiki vosstanovlennoj detali gornogo oborudovanija posle uprochnenija/ V. L. Knjaz'kov, E. E. Levashova, M. V. Pimonov// XVII Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferentsija «PRIRODNYE I INTELEKTUAL'NYE RESURSY SIBIRI. SIBRESURS – 2018». – Kemerovo, 2018 – S. 406.1 – 406.7.

3. Levashova E. E. Analiz izmenenija akusticheskikh i magnitnyh harakteristik, naplavlennyh obraztsov do i posle `elektrodugovogo termicheskogo uprochnenija poverhnostnyh sloev/ E. E. Levashova, V. L. Knjaz'kov, N. V. Ababkov, M. V. Pimonov//Sbornik trudov IV Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy shkoly s mezhdunarodnym uchastiem "UPROChNJJuSchIE TEHNOLOGII I FUNKTsIONAL'NYE POKRYTIJA V MASHINOSTROENII". – Kemerovo, 2018 – S. 21.1 – 21.5.

4. Knjaz'kov V. L. Metallograficheskie issledovanija i tribologicheskie harakteristiki

vosstanovlennoj detali gornogo oborudovaniya posle uprochneniya/ V. L. Knjaz'kov, E. E. Levashova, M. V. Pimonov// Sbornik trudov H Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii "INNOVATsII V MASHINOSTROENII". – Kemerovo, 2019 – S. 450-455.

5. ASTM E140-12. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness <https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.e140-12#t00003>.

6. Markovets M.P. Opredelenie mehanicheskikh svojstv metallov po tverdosti. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 191 s. s il.

7. Serensen S. V., Kogae V. P., Shnejderovich P. M. Nesuschaja sposobnost' i raschet detalej mashin na prochnost'. – M.: Mashinostroenie, 1975, – 488.

8. Nikolaev G. A., Vinokurov V. A. Svarnye konstruksii. Raschet i proektirovanie. – M.: Vysshaja shkola, 1990. – 446 s.

9. Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vibropitatatelya seksii krep'i s vypuskom uglya podkrovel'noy tolshchi / V.I. Klishin, N.V. Ababkov, M.V. Pimonov, Ye.A. Khudyntsev // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika. - 2020. - №2. - С. 57-63.

10. Ispol'zovaniye UZ-signalov dlya identifikatsii NDS / A.N. Smirnov, V.YU. Blyumenshteyn, A.A. Krechetov, N.A. Khaponen, YU.M. Shatunov // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2002. – № 3. – S. 32-35.

11. Dyshlovenko, P. Ye. Matematicheskiye osnovy konechno-elementnykh metodov modelirovaniya: metodicheskiye ukazaniya po resheniyu zadach. – Ul'yanovsk :UIGTU, 2011. – 54 s.

12. Streng, G. Teoriya metoda konechnykh elementov: per. s angl. – M.: Mir, 1977. – 349 s.

13. Chigarev A. V., Kravchuk A. S., Smalyuk A. F. ANSYS dlya inzhenerov: Sprav.posobiye.- M.:Mashinostroyeniye,2004. – 511 s.

14. Basov, K. A. ANSYS v primerakh i zadachakh. – Pod obshch.red. D. G. Kraskovskogo. – M: Komp'yuterPress, 2002. – 224 s: il.

15. Inzhenernyy analiz v Ansys Workbench. Chast' 1. / V. A. Bruyaka, V. G. Fokin, Ye. A. Soldusova i dr. – Uchebnoye posobiye. – Samara: Samar. gos. tekhn.un-t, 2010. – 271 s.

16. Inzhenernyy analiz v Ansys Workbench. Chast' 2. / V. A. Bruyaka, V. G. Fokin, Ye. A. Soldusova i dr. – Uchebnoye posobiye. – Samara: Samar. gos. tekhn.un-t, 2013. – 148 s.

17. Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components / V. Blumenstein, M. Mahalov, O. Ostanin // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.

Библиографическое описание статьи

Левашова Е.Е., Пимонов М.В., Абабков Н.В. Расчет ресурса детали «Ось» после восстановления // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 6 (152). – С. 3-9.

Reference to article

Levashova E.E., Pimonov M.V., Ababkov N.V. Life prediction of part “Axle” after restoration. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.6 (152), pp. 3-9.