

Громыка Дмитрий Сергеевич*, аспирант, **Гоголинский Кирилл Валерьевич**, доктор техн. наук, заведующий кафедрой, **Кремчеев Эльдар Абдоллович**, доктор техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский Горный Университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2;

*E-mail: poloronta@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ ЗУБА ЭКСКАВАТОРА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОВИМ ВОЗДЕЙСТВИИ

***Аннотация:** при добыче полезных ископаемых, а также на других видах горных работ ковши экскаваторов подвергаются различным видам изнашивания, что приводит к расходованию ресурса исполнительного оборудования. На месторождениях бурого угля, подверженного самовозгоранию, зачастую работы по добыче, отвалообразованию, рекультивации и ликвидации чрезвычайных ситуаций осложнены повышенной температурой массива. Такие условия значительно ускоряют расход ресурса ковшеи, так как циклическое воздействие высоких температур на поверхность ковша и зубьев приводит к термической усталости и образованию усталостных микротрещин. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса циклического нагрева зуба ковша с целью прогнозирования процессов термической усталости для оценки ресурса ковша экскаватора в описанных условиях.*

***Ключевые слова:** изнашивание, термическая усталость, экскаватор, математическое моделирование, ковш, исполнительные органы.*

***Информация о статье:** принята 15 февраля 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-23-29*

ВВЕДЕНИЕ

Открытые горные работы на угольных месторождениях, в особенности на месторождениях бурых углей, зачастую осложнены повышенной температурой массива, вызванной процессом самовозгорания угля. Вследствие окисления кислородом воздуха уголь в нарушенном массиве нагревается, а по достижению определенной температуры возможно его самовозгорание. В зависимости от региональных особенностей и характеристик месторождений температура возгорания различается, в частности, для Челябинского бассейна она составляет 60°C [1]. При высокой температуре воздуха процесс самовозгорания может ускориться. Температура при этом может достигать 800-1000 °C в очаге на глубине и до 350°C на поверхности [2, 3].

Повышенные температуры массива вызывают повышение интенсивности изнашивания исполнительных органов горных машин. При этом происходит увеличение интенсивности абразивного изнашивания вследствие уменьшения нагрузки, необходимой для появления дефектов, а также активизируются процессы, способствующие развитию проявлений диффузионного и адгезионного изнашивания [4, 5].

Кроме того, при циклическом температурном воздействии на исполнительные органы выемочно-погрузочных машин проявляется термическая усталость металла ковша в виде образования микротрещин на стальном полотне вследствие накопления дефектов кристаллической решетки металла [6,7]. Ав-

торы [8] выявили, что стойкость против термической усталости зависит от параметров макро- и микроструктуры. После циклического теплового воздействия в стали происходит изменение микротвердости, ударной вязкости, пределов прочности, текучести и модуля упругости [7, 9].

Авторами [10] было экспериментально доказано, что характер деформирования стали, покрытой сеткой термоусталостных микротрещин, и исходного недеформированного образца значительно различается, в частности, сопротивление сдвигу оказалось ниже у термоциклированного материала. При этом, как отмечают авторы [11], характер термоциклирования также влияет на ресурс детали: наличие температурного градиента при испытании на усталость заметно снижает время жизни детали по сравнению с изотермическими испытаниями.

Для изучения термической усталости применяются экспериментальные установки, в которых воспроизводятся условия циклического нагрева и охлаждения с последующим исследованием свойств материала. В [6] производится циклический нагрев до 500-700°C и охлаждение, после чего проводятся измерения механических свойств и параметров микротрещин спустя определенное число циклов. По мнению авторов этой работы термическая усталость в основном связана с процессами накопления дефектов, которые связаны с процессом циклического термического расширения и сжатия.

Определение срока службы элементов исполнительного оборудования горных машин необходимо

для определения оптимального срока их эксплуатации. Одним из примеров термического воздействия на исполнительные механизмы горных машин является наличие термического градиента на режущей кромке при интенсивном бурении. При этом температура поверхности контакта может достигать 800-1000 град [5].

Продолжительность эксплуатации до наступления предельного состояния для таких инструментов описывается уравнением Тейлора [12]:

$$v_c T^n = C_t, \quad (1)$$

где T – продолжительность эксплуатации, мин, v_c – скорость резания, мм/мин, n – коэффициент, зависящий от типа сплава, C_t – константа, численно равная T при скорости резания 1 мм/мин.

Однако данное уравнение в классическом виде не учитывает многие факторы, в том числе повышенную температуру и ее вариацию.

В процессе эксплуатации экскаваторов уменьшается их производительность и общее время на линии производства [13]. На величину эффективного срока эксплуатации влияет интенсивность изнашивания ковша и зубьев, так как работа при изношенных зубьях существенно увеличивает потребляемую экскаватором мощность, что сказывается на общем ресурсе машины [14].

Оценка остаточного ресурса исполнительных органов в полевых условиях производится методами технического диагностирования [15], однако данные исследования возможны и лабораторными методами по косвенным признакам. В работе [16] срок службы зубьев при абразивном изнашивании определяют по изменению значений твердости в процессе изнашивания. Авторы исследования [17] для определения остаточного ресурса также прибегают к оценке изменения твердости поверхностного слоя. Подобные исследования позволяют скорректировать график работ по техническому обслуживанию и ремонту экскаваторов [18]. Как уже было отмечено, на ускорение процесса абразивного изнашивания влияют не только повышенные температуры, но и продолжительное циклическое воздействие высоких температур, что уменьшает ресурс зубьев вследствие термической усталости.

В современной практике для получения прогнозных сведений о ресурсе широко используются методы компьютерного моделирования, такие как конечно-элементный анализ. Это позволяет рассчитать поле напряжений при термическом расширении и создать приближенную модель термической усталости зубьев экскаваторов. Как отмечают авторы [19], для создания подобной модели необходим расчет напряжений, вызванных упругой деформацией, термическим расширением и упругим восстановлением. Математическое описание данных процессов и построение расчетной модели термической усталости зуба экскаватора представлено в этой статье.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для построения модели была спроектирована сборка зуба ковша экскаватора ET-25, в качестве материала зуба была выбрана сталь 110Г13Л по ГОСТ

977-88 или ASTM A128 (сталь Гадфильда) с содержанием марганца 14%. В качестве источника тепла был выбран массив бурого угля. В расчетной модели контакт горячего угля и зуба происходит по всей площади поверхности зуба равномерно.

Задача была условно разделена на четыре составляющих:

1. Расчет теплообмена между зубом и углем в течение одного цикла работы экскаватора;
2. Расчет величины термического расширения;
3. Определение величины напряжений после цикла работы экскаватора;
4. Расчет числа усталостных циклов до наступления предельного состояния зуба;

Расчет теплообмена между зубом ковша и горячим углем сводится к решению уравнения теплового баланса:

$$\rho C_p \left(\frac{\delta T}{\delta t} + u_{trans} * \nabla T \right) + \nabla * (q + q_r + q_c) = Q + Q_{ted}, \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; C_p – теплоемкость стали при постоянном давлении, Дж/(кг*К); T – температура стали, К; u_{trans} – вектор скорости системы, м/с; q , q_r , q_c – тепловой поток, вызванный соответственно теплопроводностью, излучением или конвекцией, Вт/м²; Q – тепло от дополнительных источников тепла, Вт/м³; Q_{ted} – термоупругое демпфирование, Вт/м³.

При этом в данной модели система принята как неподвижная, а влияние теплового излучения с поверхности зуба не учитывалось.

Термическое расширение стали зависит от разности температур и описывается уравнением:

$$\epsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}), \quad (3)$$

где α – коэффициент термического расширения стали, 1/К

Необходимые для расчета характеристики стали ASTM A128 были взяты из источника [20] и из встроенной материальной базы программы COMSOL Multiphysics и указаны в нижеприведенной таблице.

Таблица. Характеристики стали

Table. Parameters of steel

Параметр	Размерность	Значение
ρ	кг/м ³	7900
k	Вт/(м*К)	13,6
C_p	Дж/(кг*К)	530
α	1/К	2,22E-05
E	ГПа	170
ν	-	0,29

Пояснения к таблице: ρ – плотность, кг/м³; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К); C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг*К); α – коэффициент термического расширения, 1/К; E – модуль упругости, ГПа; ν – коэффициент Пуассона

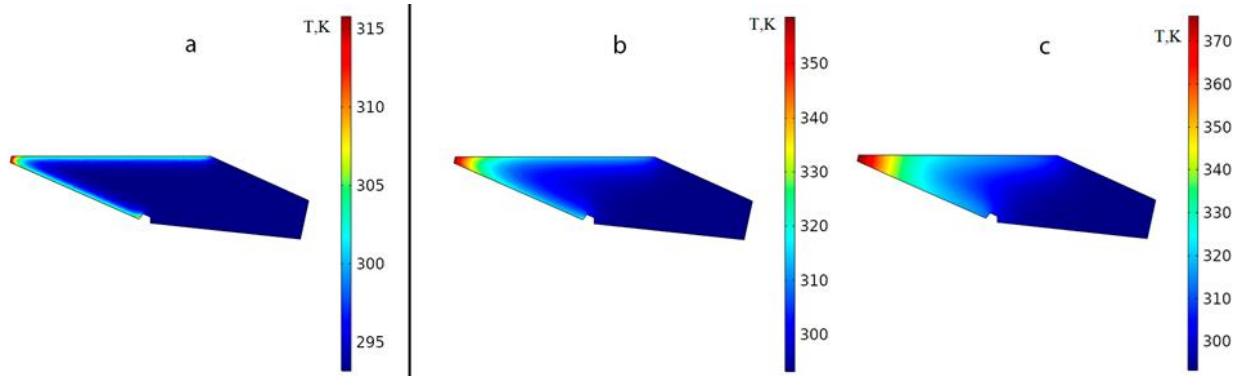


Рис. 1. Изменение температуры зуба при нагреве. а – Начало цикла, б – середина цикла, соответствующая окончанию операции по опорожнению ковша, с – конец цикла
 Fig. 1. Temperature change during heating. a – beginning of the cycle, b – middle part of the cycle, which corresponds to the end of bucket discharge, c – the end of the cycle

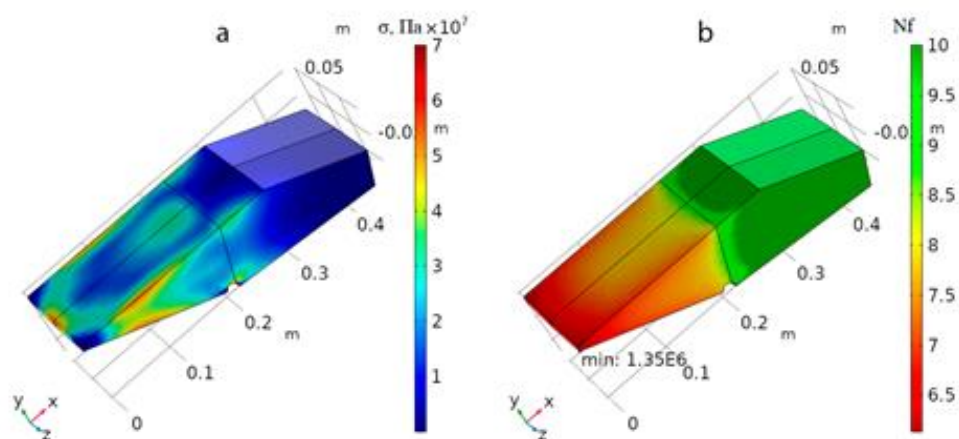


Рис. 2. Результат моделирования циклического теплового воздействия на зуб экскаватора. а – поле нагрузок по Мизесу, б – поле, маркирующее число усталостных циклов
 Fig. 2. Results of cyclic thermal loads modelling of excavator tooth. a – von Mises stress field, b – fatigue cycles field

Напряжения, вызванные упругой деформацией, термическим расширением и упругим восстановлением для материала зуба, рассчитываются по закону Гука для линейного упругого изотропного тела. Для расчета числа циклов до разрушения была принята модель усталости Coffin-Manson-Basquin [21]:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

где $\varepsilon_{a,e}$ – амплитуда упругой деформации; $\varepsilon_{a,p}$ – амплитуда пластической деформации; σ_f' – коэффициент предела выносливости; E – модуль упругости, Па; N_f – число циклов до разрушения; b – экспонента предела выносливости; ε_f' – коэффициент предела текучести; c – экспонента предела текучести.

Компьютерное моделирование циклического теплового воздействия проводилось на базе программного обеспечения для конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics. Цикл работы экскаватора при черпании грунта состоит из четырех операций: экскавация грунта из массива, поворот платформы с нагруженным ковшом от массива к месту разгрузки (автосамосвалу или отвалу), опорожнение ковша и поворот платформы с порожним ковшом от места разгрузки к массиву.

Для расчета теплообмена был принят ряд упрощений: на поверхности зуба был размещен источник

тепла, тепловой поток от которого менялся искусственно, в зависимости от выполняемой операции в рамках цикла. Для определения величины теплового потока от искусственного источника тепла предварительно была решена задача теплообмена между реальным источником тепла – массивом угля и зубом. Углю была задана начальная температура в 800К, и была рассчитана величина теплового потока от угля к поверхности зуба.

Тепловой поток был задан таким образом, что в первые две операции цикла зуб получал тепло от источника тепла, а в последние операции – нет, так как горячего угля в ковше уже нет. Таким образом, в ходе одного цикла температура зуба будет повышаться в течение первых двух операций, а после – уменьшаться при завершении цикла. В итоге, к концу первого цикла температура поверхности зуба возрастает до 320К, а при увеличении числа циклов – устанавливается в рамках 380-400К. Полученные результаты по моделированию температуры зуба представлены на рисунке 1. Величина цикла экскаватора ET-25 по паспорту составляет 22 секунды, расчет произведен для 10 циклов, при этом температура зуба достигает максимума к десятому циклу.

Вместе с моделированием температурного поля был проведен расчет деформаций, возникающих

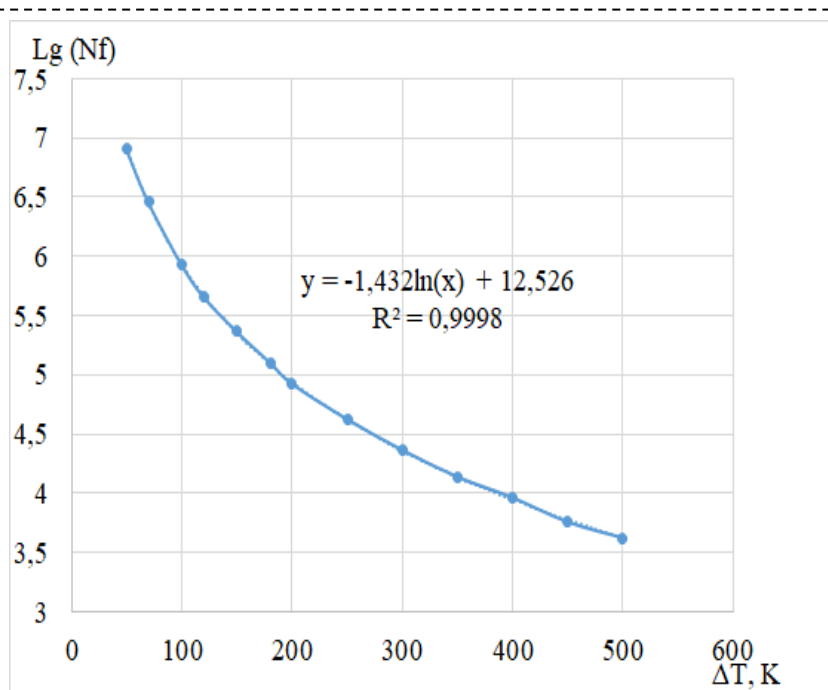


Рис. 3. Зависимость десятичного логарифма числа циклов до наступления предельного состояния N_f от градиента температур
 Fig. 3. Relationship between decimal logarithm of fatigue cycles N_f and temperature gradient

вследствие термической усталости материала зуба, а также выполнен расчет напряжений, накапливающихся в процессах упругих деформаций и восстановления. Созданная модель позволяет автоматически выполнять расчет деформации поверхности, возникающей вследствие циклических процессов упругой и пластичной деформации и восстановления.

Число циклов до наступления предельного состояния было рассчитано на основе модели Coffin-Manson-Basquin. Для стали ASTM A128 необходимые коэффициенты были взяты из исследований [20, 22]. Результаты моделирования поля напряжений и усталостных циклов представлены на рисунке 2.

На основе полученных расчетных данных по формуле (4) была построена зависимость числа циклов до наступления напряженного состояния от величины температурного градиента при начальной температуре зуба 350K (рисунок 3). При увеличении градиента от 100 до 500 K расчетное число циклов до разрушения уменьшается на 3 порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов моделирования, представленных на рисунках 1 и 2, показал, что наиболее подвержены разрушению угловые и кромочные элементы зуба, вступающие в контакт с нагретым горным массивом.

Большие значения параметра N_f обусловлены относительно небольшим перепадом температур поверхности стали и незначительными механическими напряжениями, приводящих к появлению микротрещин и разрушению стали. Однако при увеличении

температурного градиента число циклов до разрушения уменьшается стремительно.

К тому же, как описывают источники [4, 5, 7, 10], циклическое влияние высоких температур не только приводит к термической усталости, но и ускоряет абразивное изнашивание. При этом даже небольшие температурные градиенты, как отмечается в [11], способны ускорить процесс расходования ресурса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено исследование процесса циклического нагрева зуба ковша экскаватора с целью прогнозирования процессов термической усталости для оценки ресурса ковша экскаватора на операциях по добыче, отвалообразованию и ликвидации чрезвычайных ситуаций при процессе самовозгорания угля. Результаты компьютерного моделирования процессов термической усталости зуба ковша экскаватора ET-25, выполненого из стали ASTM A128, показали, что циклический нагрев зуба до температуры 380K с последующим охлаждением до 320K приводит к разрушению режущей кромки зуба по истечению 10^6 усталостных циклов. При увеличении перепада температур количество циклов до разрушения уменьшается по логарифмической зависимости.

Несмотря на то, что при небольшом температурном градиенте процесс термической усталости сам по себе не приводит к быстрому разрушению зуба, термическое воздействие способно интенсифицировать расходование ресурса ковша и зубьев экскаватора вследствие абразивного и других видов изнашивания.

Источником финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смолин Д.В., Лымбина Л.Е. Анализ качества бурых углей и возможности их сжигания на ТЭЦ Челябинской области // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2017. – № 1. – С. 206–210;
2. Гамов М.И., Гордеев И.В. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт восточного Донбасса // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. — 2017. — №. 2. — С. 92-100;
3. Портола В.А., Скударнов Д.Е., Протасов С.И., Подображин С.Н. Оценка параметров очагов самовозгорания породных отвалов угольных

карьеров и способов их тушения // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — №. 11. — С. 42-47;

4. Dmitrii Gromyka, Eldar Kremcheev (2020). High temperature wear assessment of mining machines operating tools. E3S Web of Conference, 174, pp. 03013;

5. Grzesik, W. (2017). Chapter 12 - Tool Wear and Damage. In Advanced machining processes of metallic materials: Theory, modelling and applications (pp. 215-239). Amsterdam: Elsevier.

6. Bombač, D., Gintalas, M., Kugler, G., Terčelj, M. (2018). Thermal fatigue behaviour of Fe-1.7C-11.3Cr-1.9Ni-1.2Mo roller steel in temperature range 500 – 700 °C, International Journal of Fatigue;

7. Березин Д.Т. Исследование физико-механических свойств штамповых сталей в условиях термической усталости // Международный научный журнал «Инновационная наука». — 2015. — №. 3. — С. 152-156;

8. Иващенко В.Ю. Влияние ТЦО на стойкость против термической усталости стали 50XH // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2012. — №. 25. — С. 114-119;

9. Полякова Н.В. Оценка качества материалов, применяемых для производства валков горячей прокатки, по их термостойкости // Науковий та інформаційний журнал «Металознавство та термічна обробка металів». — 2015. — №. 3. — С. 38-43;

10. Ясний П.В., Марущак П.О., Панин С.В., Бищак Р.Т. Масштабные уровни деформации и разрушения и механические свойства стали 25X1M1Ф до и после неизотремического нагружения //Физическая мезомеханика. — 2010. — №. 13 (2). — С. 87-96;

11. Le Chang, et. al. (2019). Thermal-mechanical fatigue behaviour and life prediction of P92 steel, including average temperature and dwell effects. J Mater Res Technol;

12. G. Boothroyd, W.A. Knight. (2006). Fundamentals of Machining and Machine Tools, CRC Press, Boca Raton;

13. Аннистратов К.Ю., Конопелько С.А. Оптимальный срок службы карьерных одноковшовых экскаваторов с электрическим приводом //

Горная промышленность. — 2012. №. 3 (103). — С. 8-12;

14. Тургунбаев М.С. Оценка сопротивления усталости локальных участков конструкции ковша экскаватора ЭО-2621 с использованием конечно-элементного анализа // Высокие технологии в строительстве. — 2020. — №. 1. — С. 141-150;

15. Андреева Л.И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии // Известия вузов. Горный журнал. — 2017. — №. 4. — С. 78-85;

16. Попов Д.А., Патюков С.С. Особенности условий эксплуатации рабочих органов строительного-дорожных машин и факторы, влияющие на их ресурс // Воронежский научно-технический вестник. — 2015. — №. 1 (11). — С. 85-94;

17. Звонарев И.Е., Иванов С.Л., Шишлянников Д.И., Фокин А.С. Исследования поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2014. — № 11. — С. 67–76;

18. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 228-233.;

19. Wuhao Zhuang, et al. (2019). FE prediction method for tooth variation in hot forging of spur bevel gears. Journal of Manufacturing Processes, 38, pp. 244-255;

20. Dhar, S. (2019). Microstructure and Fatigue Properties of Railway Steels for Switches and Crossings. DTU Wind Energy;

21. Adam Niesłony, Chalid el Dsoki, Heinz Kaufmann, Peter Krug (2008). New method for evaluation of the Manson–Coffin–Basquin and Ramberg–Osgood equations with respect to compatibility. International Journal of Fatigue, 30, pp. 1967-1977;

22. D. Rittel, I. Roman. (1989). Cyclic properties of coarse-grained cast austenitic manganese steels. Int J Fatigue, 3, pp. 177-182

Dmitrii S. Gromyka*, postgraduate, **Kirill V. Gogolinskiy**, Dr. Sc. In Engineering, Professor, head of department, **Eldar A. Kremcheev**, Dr. Sc. In Engineering, Associate professor

Saint-Petersburg Mining University, 199106, Russia, St Petersburg, 2, 21st Line

*E-mail: poloronta@yandex.ru

THERMAL FATIGUE MODELLING OF EXCAVATOR TEETH DURING CYCLIC HEAT LOADING

Abstract: During mining, as well as in other types of work, excavator buckets are exposed to abrasive wear which leads to the operating tools resource loss. In lignite deposits subjected to spontaneous combustion such duties as mining, dumping and reclamation are often complicated by the increased coal temperature. Such conditions significantly accelerate the loss of residual resource, since the cyclic high temperature loads of bucket surface and teeth lead to thermal fatigue and the formation of fatigue microcracks. This paper presents the results of computer modeling of the process of cyclic heating of a bucket tooth in order to predict thermal fatigue properties to predict the resource loss of an excavator bucket under the described conditions.

Keywords: wear, thermal fatigue, excavator, mathematical modelling, bucket, operating tools.

Article info: received February 15, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-23-29

REFERENCES

1. Smolin D.V., Lymbina L.E. An analysis on quality of lignite and possibility of it's burning on Chelyabinsk CHPP // Jenergo- i resursosberezhenie v teplojenergetike i social'noj sfere: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov, uchenyh. – 2017. – № 1. – S. 206–210;
2. Gamov M.I., Gordeev I.V The main factors and ecological effects of spontaneous combustion of coal mine waste dumps of the eastern donbass // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. — 2017. — № 2. — S. 92-100;
3. Portola V.A., Skudarnov D.E., Protasov S.I., Podobrazhin S.N. Assessment of the Parameters of the Places of Spontaneous Combustion of the Coal Pits Waste Dumps and the Ways of their Suppression // Occupation Safety in Industry. — 2017. — № 11. — S. 42-47;
4. Dmitrii Gromyka, Eldar Krecmcheev (2020). High temperature wear assessment of mining machines operating tools. E3S Web of Conference, 174, pp. 03013;
5. Grzesik, W. (2017). Chapter 12 - Tool Wear and Damage. In Advanced machining processes of metallic materials: Theory, modelling and applications (pp. 215-239). Amsterdam: Elsevier.
6. Bombač, D., Gintalas, M., Kugler, G., Terčelj, M. (2018). Thermal fatigue behaviour of Fe-1.7C-11.3Cr-1.9Ni-1.2Mo roller steel in temperature range 500 – 700 °C, International Journal of Fatigue;
7. Berezin D.T. An Assessment of mechanical properties of die steels in condition of thermal fatigue // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Innovacionnaja nauka». — 2015. — № 3. — S. 152-156;
8. Ivashhenko V.Ju. Thermocyclical treatment's influence on resistance to thermal weariness of steel // Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. — 2012. — № 25. — S. 114-119;
9. Poljakova N.V. Evaluation of the quality of materials used for hot rolling mill rolls, by their heat-resistance // Naukovij ta informacijnij zhurnal «Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv». — 2015. — № 3. — S. 38-43;
10. Jasnij P.V., Marushhak P.O., Panin S.V., Bishhak R.T. Scale levels of deformation and fracture and mechanical properties of 25CrMnV steel before and after nonisothermic loading // Fizičeskaja mezomehanika. — 2010. — № 13 (2). — S. 87-96;
11. Le Chang, et. al. (2019). Thermal-mechanical fatigue behaviour and life prediction of P92 steel, including average temperature and dwell effects. J Mater Res Technol;
12. G. Boothroyd, W.A. Knight. (2006). Fundamentals of Machining and Machine Tools, CRC Press, Boca Raton;
13. Annistratov K.Ju., Konopel'ko S.A. Optimal service life of electric mining shovels // Gornaja promyshlennost'. — 2012. № 3 (103). — S. 8-12;
14. Turgunbaev M.S. Assessments of the fatigue resistance of local sections of the excavator bucket using the finite element method // Vysokie tehnologii v stroitel'stve. — 2020. — № 1. — S. 141-150;
15. Andreeva L.I. The use of mining equipment performance estimation methods at the mining enterprise // Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal. — 2017. — № 4. — S. 78-85;
16. Popov D.A., Patjukov S.S. Particular operating conditions of the working bodies of building and road machines and factors affect their resource // Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik. — 2015. — № 1 (11). — S. 85-94;
17. Zvonarev I.E., Ivanov S.L., Shishljannikov D.I., Fokin A.S. Study of the metal surface hardness in the areas of high wear and tear of parts for mining machines // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo. — 2014. — № 11. — S. 67–76;
18. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Ju. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions // Zapiski Gornogo instituta. — 2020. — T. 242. — S. 228-233.;
19. Wuhao Zhuang. et al. (2019). FE prediction method for tooth variation in hot forging of spur bevel gears. Journal of Manufacturing Processes, 38, pp. 244-255;
20. Dhar, S. (2019). Microstructure and Fatigue Properties of Railway Steels for Switches and Crossings. DTU Wind Energy;
21. Adam Niesłony, Chalid el Dsoki, Heinz Kaufmann, Peter Krug (2008). New method for eval-

uation of the Manson–Coffin–Basquin and Ramberg–Osgood equations with respect to compatibility. *International Journal of Fatigue*, 30, pp. 1967-1977;

Библиографическое описание статьи

Громыка Д.С., Гоголинский К.В., Кремчев Э.А. Моделирование термической усталости зуба экскаватора при циклическом тепловом воздействии // *Горное оборудование и электромеханика* – 2021. – № 2 (154). – С. 23-29.

22. D. Rittel, I. Roman. (1989). Cyclic properties of coarse-grained cast austenitic manganese steels. *Int J Fatigue*, 3, pp. 177-182.

Reference to article

Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V., Kremcheev E.A. Thermal fatigue modelling of excavator teeth during cyclic heat loading. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2021, no.2 (154), pp. 23-29.