

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ

© 2022 г. Д.С. Громыка^{1,*}, К.В. Гоголинский^{1,**}

¹Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2
E-mail: *poloronta@yandex.ru; **nanoscan@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.2022; после доработки 08.04.2022

Принята к публикации 22.04.2022

При работе горных машин в экстремальных климатических условиях остро встает вопрос диагностики состояния поверхности контактных частей исполнительного оборудования для их своевременной замены и ремонта. Было проведено диагностирование поверхностной твердости и показателя дефектности поверхности с целью оценки остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов для прогнозирования срока работы коронки и определения необходимости ее замены. В результате была разработана методика оценки остаточного ресурса коронок зубьев, в которой в качестве диагностических параметров были выбраны значения твердости и показания вихретокового дефектоскопа как показателя дефектности поверхности коронки, а также изменения в скорости роста показаний дефектоскопа.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, диагностирование состояния, остаточный ресурс, динамическое индентирование, вихретоковая дефектоскопия, исполнительное оборудование горных машин.

DOI: 10.31857/S0130308222050050; EDN: BLTRJU

ВВЕДЕНИЕ

Работа выемочно-погрузочных горных машин зачастую ведется в экстремальных температурных условиях, примером таких объектов может служить Коркинский разрез, выведенный из эксплуатации вследствие эндогенного горения угля [1, 2], где температура поверхности очагов горения достигает 100—150 °С [3] и увеличивается по мере разработки очага до 300—400 °С [4]. В таких условиях наиболее существенные нагрузки испытывают элементы исполнительного оборудования экскаватора, такие как ковш и зубья ковша, что приводит к ускорению изнашивания зубьев и снижению производительности экскаватора.

Изложенная проблема требует контроля состояния исполнительного оборудования техники для своевременного применения мероприятий по ремонту и техосмотру в рамках технического аудита. Обязательное техническое диагностирование состояния металлоконструкций экскаваторов включено в схемы планово-предупредительного ремонта (ППР) и технического обслуживания и ремонта (ТОиР), регламентированные Положением Минуглепрома СССР [5]. В рамках данных схем основным критерием замены коронок является достижение критического угла затупления [6, 7]. Однако данные методики не позволяют заранее выявить сроки замены коронок, а также сроки мероприятий по техосмотру и ремонту ковшей, что в экстремальных условиях эксплуатации приводит к снижению эффективности и увеличению времени простоя техники. Таким образом, с учетом повышенной интенсивности изнашивания исполнительного оборудования в сложных температурных режимах встает вопрос оценки остаточного ресурса в полевых условиях.

Основными механизмами изнашивания в условиях высокотемпературного горного массива являются ударно-абразивное изнашивание и термическая усталость [8]. Как отмечается в статьях [9—11], циклические термические нагрузки, возникающие при работе с горячим грунтом, приводят к накоплению пластических деформаций в кристаллической решетке металла, что вызывает появление и развитие микротрещин на поверхности металла и сопровождается изменением твердости, пределов прочности и текучести, модуля упругости и др. При ударно-абразивном изнашивании в ходе работы экскаватора, как указано в работах [12, 13], наблюдается увеличение твердости поверхности зубьев вследствие образования наклепа. В то же время влияние высоких температур приводит к умягчению металла, более того, как подчеркивается в работе [14], именно наличие температурного градиента и циклических термических нагрузок приводит к умягчению поверхностного слоя и возникновению трещин.

Задача контроля состояния исполнительного оборудования и оценки его ресурса может быть решена при помощи измерения твердости поверхности [15]. Как сообщается в статье [16], контроль твердости рабочей поверхности зуба позволяет оценить соотношение процессов изнашивания и разрушения по критерию контактной усталости. При работе экскаватора на скальных

грунтах в средней части зуба образуется зона наклепа, имеющая существенно большую твердость, чем твердость острия и задней части зуба, при этом твердость в зоне наклепа уменьшается экспоненциально с глубиной наклепанного слоя [17]. К тому же, в работе [18, 19] авторами удалось рассчитать зависимость между твердостью и параметрами циклических кривых напряжение—деформация, а авторами [20, 21] была получена корреляция экспериментальных и расчетных результатов анализа усталостного ресурса вкупе с использованием метода твердомерии для быстрого определения зон, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, что говорит о возможности использования расчетного значения усталостного ресурса в качестве прогнозного значения остаточного ресурса.

Оценка остаточного ресурса также возможна с помощью контроля процесса трещинообразования, в т.ч. с применением вихретокового контроля, как сообщается в исследованиях [22, 23]. Авторами [24, 25] разработаны модели, учитывающие влияние концентрации напряжений и эксплуатационных температур, что применяется для оценки ресурса элементов конструкций при малоцикловом нагружении.

Величину нагрузок, вызывающих ударно-абразивное изнашивание деталей, можно рассчитать в первом приближении по вызываемому нагрузками наклепу материала деталей, что может быть определено по изменению поверхностной твердости [15—17] и глубины трещин [24] в зоне наклепа зубьев, а также по расчетному значению усталостного ресурса [20, 21]. Как сообщается в [26], применение многопараметрического контроля является одним из ключевых трендов современного развития неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния. Исходя из этого, для разработки методики оценки остаточного ресурса в данной работе был выбран комплекс методов, включающих численный расчет усталостного ресурса, а также инструментальный контроль поверхностной твердости и показателя дефектности поверхности. В связи со сложностью проведения вихретоковой дефектоскопии поверхности в полевых условиях и непосредственной оценки глубины трещин, в качестве интерпретации результатов вихретоковой дефектоскопии и критерия оценки остаточного ресурса были выбраны показания вихретокового дефектоскопа как показателя дефектности поверхности, являющимся интегральным показателем глубины, количества дефектов и изменения магнитных свойств стали на участке поверхности.

РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА

Для расчета был взят ковш гидравлического экскаватора Komatsu PC400LC-7, оборудованный зубьями с коронками для скальных работ 208-70 14152RC. Общий вид CAD-сборки ковша представлен на рис. 1.

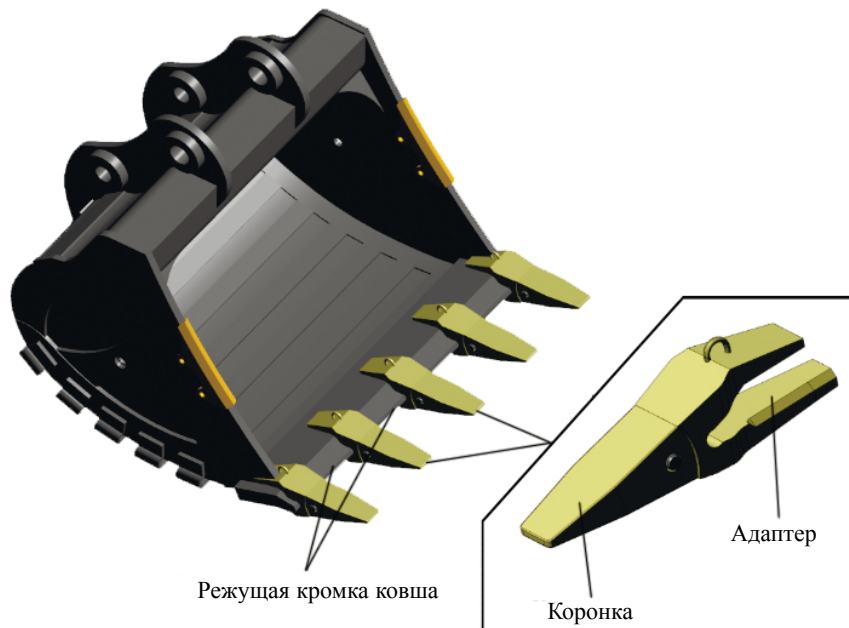


Рис. 1. CAD-сборка ковша Komatsu PC400LC-7.

Согласно исследованию [27], материал коронки изготовлен из стали, близкой по составу к легированной улучшаемой конструкционной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543—71), начальный вес коронки составляет 16 кг, металл коронки имеет, как это свойственно кованным изделиям, зонально неоднородное строение, твердость коронки составляет 41—45 HRC.

Расчет усталостного ресурса был произведен методом конечных элементов в ПО Ansys. Набор начальных и граничных условий, а также характеристики угля для расчета были рассмотрены авторами ранее в работе [9], усталостные параметры для стали 30ХГСА были взяты из работы [28], а механические характеристики — из [29].

Для расчета усталостного ресурса была выбрана модель малоциклового усталости Coffin-Manson-Basquin [30]:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{a,e}$ — амплитуда упругой деформации; $\varepsilon_{a,p}$ — амплитуда пластичной деформации; $\varepsilon_{a,t}$ — амплитуда полной деформации; σ'_f — коэффициент предела выносливости, Па; E — модуль упругости, Па; N_f — число циклов до разрушения; b — экспонента предела выносливости; ε'_f — коэффициент предела текучести; c — экспонента предела текучести

При рассчитанной нагрузке и температурном градиенте усталостный ресурс коронки составляет примерно 500 000 циклов, что при времени цикла 20 с соответствует 2800 ч или 177 сут (25 недель) работы при двухсменном рабочем режиме. Основная нагрузка, по результатам КЭ-анализа, приходится на острие коронки, что соответствует экспериментальным данным и результатам анализа литературных источников.

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРОНОК ЗУБЬЕВ ЭКСКАВАТОРОВ

Исследование состояния поверхности коронок зубьев ковшей экскаваторов с разным сроком их эксплуатации проводили с использованием портативного твердомера и вихретокового дефектоскопа на трех гидравлических экскаваторах Komatsu PC400LC-7, работающих на Коркинском разрезе.

Для измерения твердости был выбран портативный твердомер Константа КТ с ударным преобразователем по методу Либа тип D [31], который оказался наиболее предпочтителен по сравнению с другими преобразователями, поскольку на результат измерений в меньшей степени влияет шероховатость поверхности [32, 33].

Измерение твердости проводилось по равномерной сетке в режиме трех точечных измерений в каждом узле сетки (рис. 2). Замеры проводились на коронках со сроком эксплуатации

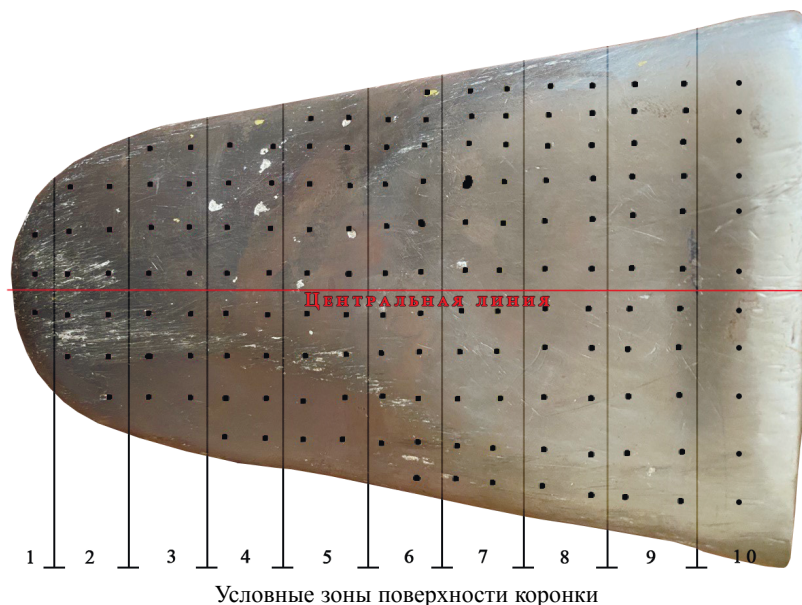


Рис. 2. Верхняя сторона изношенной коронки с размеченной сеткой измерений, а также указанием условных зон с 1 (острие) по 10 (задняя часть), по которым проводился расчет.

в диапазоне от одной-двух недель до четырех месяцев, а также на полностью изношенной коронке со сроком эксплуатации более четырех месяцев. Данная коронка была снята с эксплуатации вследствие критического затупления острия, таким образом можно считать, что для подобных условий максимальный срок эксплуатации коронки составляет четыре месяца.

Вихретоковая дефектоскопия коронок зубьев проводилась по аналогичной схеме. Для исследования был выбран вихретоковый дефектоскоп Константа ВД-1 [34] с преобразователем ПФ-ОН-14-Fe для ферромагнитных сталей, с диаметром ферритового сердечника преобразователя 2,2 мм, частотой тока возбуждения 100 кГц и диаметром зоны контроля 14 мм для поверхностей с большой шероховатостью. В дефектоскопе применен фазовый метод вихретокового контроля с реализацией отстройки от зазора. Для заводской градуировки дефектоскопа используется контрольный образец с искусственными поверхностными дефектами типа прорези известной глубины. Показания прибора при контроле выводятся в мкм — единицах измерения глубины прорезей. Необходимо учесть, что на показания прибора при исследованиях образцов коронок зубьев оказывают влияние глубина поверхностных дефектов и их количество в зоне контроля, а также величина относительной магнитной проницаемости материала, которые изменяются в процессе эксплуатации, в том числе при образовании наклепа. При этом следует учитывать, что отстройка от влияния зазора является важным технологическим решением при проведении контроля в реальных условиях эксплуатации экскаваторов.

При использовании дефектоскопа необходимо руководствоваться ГОСТ Р ИСО 15549—2009 [35]. Перед проведением контроля производится установка нуля дефектоскопа на обратной стороне коронки, так как магнитные характеристики материала в этой области практически совпадают с магнитными характеристиками неизношенной поверхности верхней стороны коронки и не изменяются на протяжении всего срока службы, поскольку зуб в этой зоне не подвержен значительным механическим нагрузкам. Показания дефектоскопа являются одним из диагностических параметров изнашивания поверхности коронки зуба в области наклепа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ

Результаты измерений твердости вдоль центральной линии поверхности коронок зубьев со сроком службы от 1-2 недель до 4 месяцев представлены на рис. 3. Значения твердости, измеренные динамическим твердомером Либя по шкале D, представлены в единицах НВ (твердость по Бринеллю). Преобразование исходной шкалы HLD в шкалу НВ осуществлялось с помощью калибровки для аустенитных сталей. Средний размах показаний в каждой точке составлял около 10 НВ.

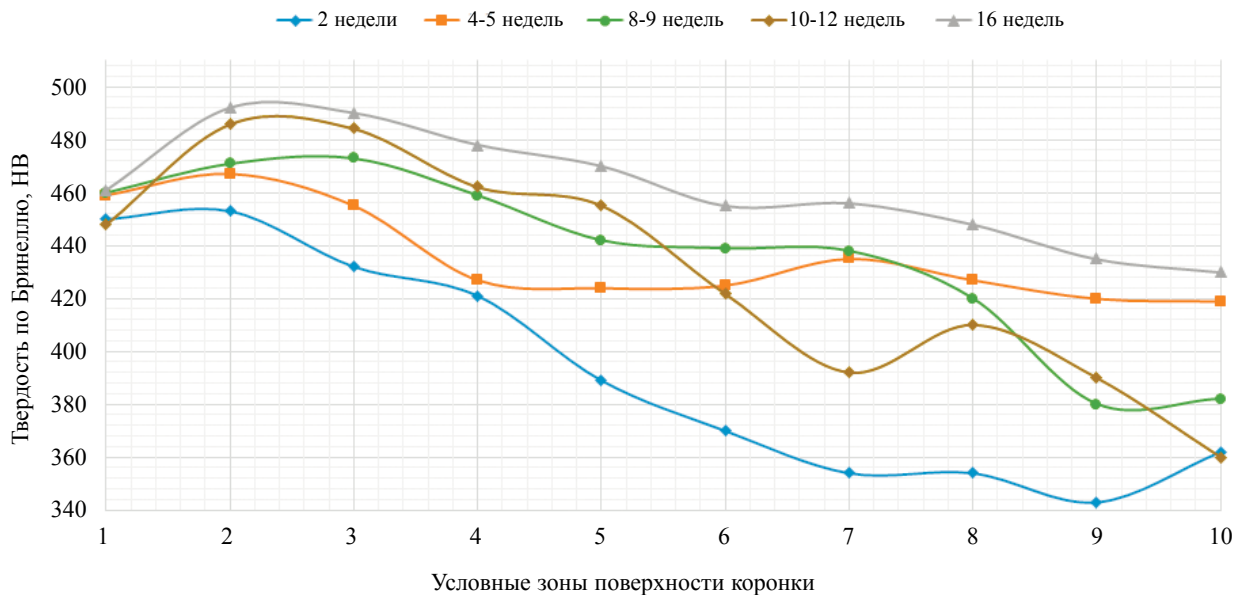


Рис. 3. Графики изменения твердости поверхности коронок зубьев разного срока эксплуатации (в неделях) от острия (зона 1) до задней части (зона 10) по центральной линии.

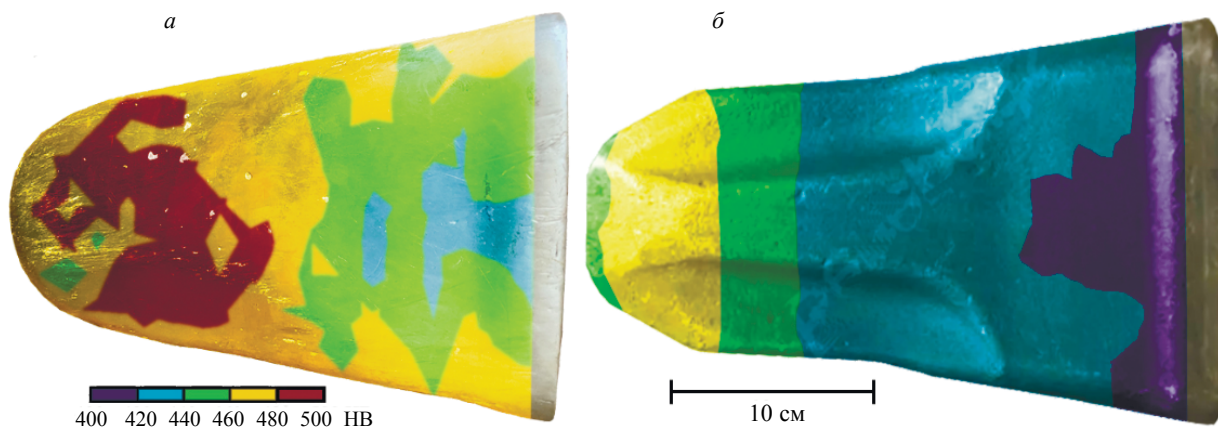


Рис. 4. Карта значений твердости по Бринеллю (НВ) поверхности изношенной коронки зуба ковша со сроком эксплуатации четыре месяца (а) и новой коронки зуба ковша со сроком эксплуатации 1-2 недели (б).

Результаты измерений твердости в виде двумерных карт распределения значений твердости по Бринеллю (НВ) поверхности изношенной коронки представлены на рис. 4а, а новой коронки — на рис. 4б. На этих картах каждому цвету соответствуют определенный диапазон значений НВ. Из представленных результатов следует, что твердость повышается по всей поверхности коронки в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации новая коронка, имеющая равномерную твердость поверхности от острия к средней части (см. рис. 4б), подвергается ударно-абразивному изнашиванию, что приводит к образованию участков наклепа и увеличению твердости всей поверхности коронки. Однако острие коронки сохраняет свою первоначальную твердость в течение четырех месяцев эксплуатации с небольшим увеличением в пределах случайной погрешности измерения (с 450 до 460 НВ) (см. рис. 3), что может быть вызвано размягчением металла в результате эксплуатации коронки в области высоких температур, а также ускоренным абразивным изнашиванием материала.

Результаты вихретоковой дефектоскопии представлены в виде двумерной карты распределения показаний вихретокового дефектоскопа по поверхности коронки (рис. 5).

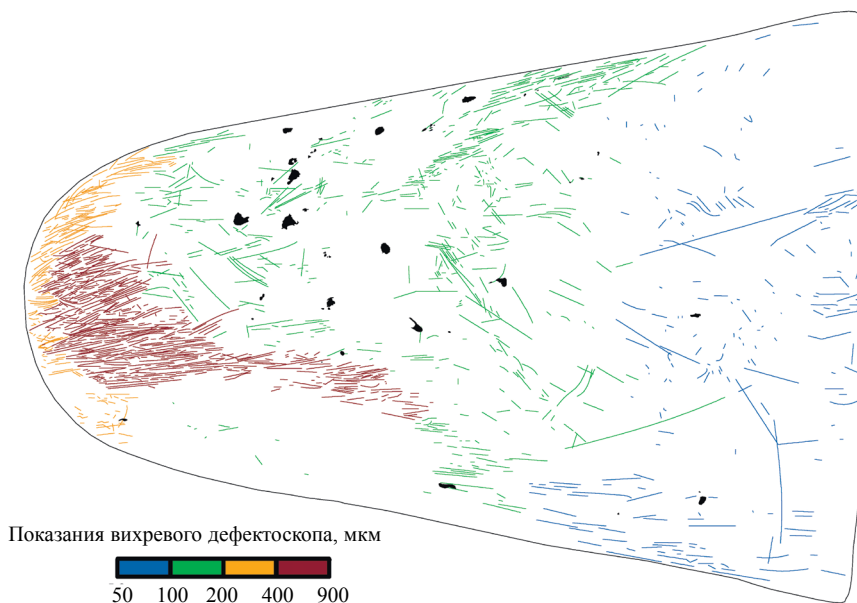


Рис. 5. Двумерная карта распределения показаний вихретокового дефектоскопа по поверхности изношенной коронки со сроком эксплуатации четыре месяца. На рисунке трещины обозначены прямыми линиями, цветом маркируется показание дефектоскопа.

Наибольшие значения показаний дефектоскопа наблюдаются на передней стороне поверхности коронки зуба (красные трещины на рис. 5) в зоне наиболее интенсивного наклепа, тогда как значения показаний на поверхности острия коронки зуба не превышает 350—400 мкм. Высокая плотность трещин и их продольная ориентация наблюдаются в передней части коронки зуба (см. зоны 1—4 на рис. 2). В средней части коронки, а также у задней части, где металл более мягкий, трещины встречаются реже и значения показаний дефектоскопа не превышают 200 мкм в средней зоне и 50 мкм в задней части коронки, однако встречается как продольная, так и поперечная пространственная ориентация трещин.

Для выявления зависимости твердости и показаний дефектоскопа от срока эксплуатации были проведены замеры в разных зонах на коронках разного срока эксплуатации. Результаты исследования приведены на рис. 6.

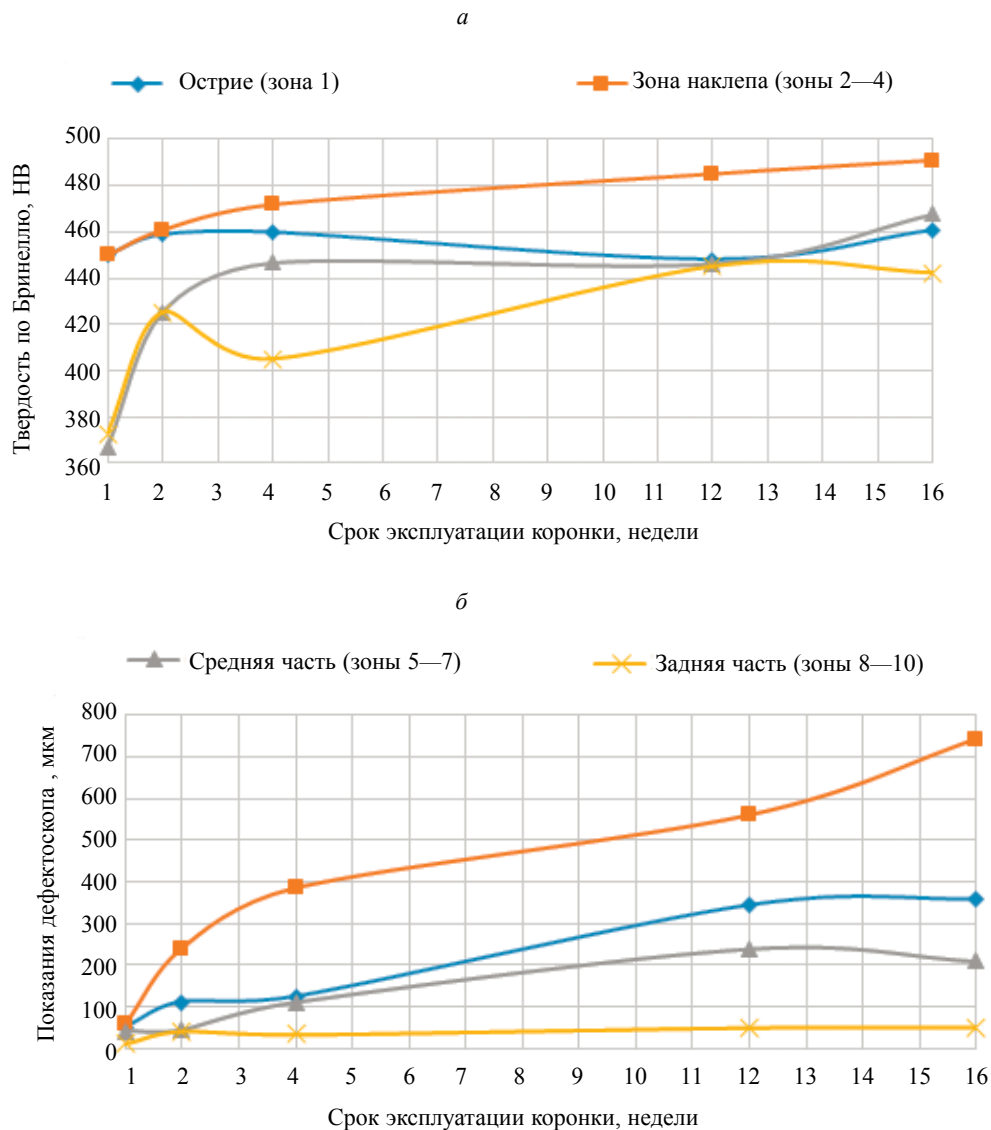


Рис. 6. Результаты замеров твердости (а) и показаний вихретокового дефектоскопа (б) поверхности коронки в зависимости от срока эксплуатации.

С увеличением срока службы показания вихретокового дефектоскопа увеличиваются во всех зонах коронок, кроме задней части, где сохраняется в пределах 50—60 мкм. В зоне максимального наклепа (см. зоны 2—4 на рис. 2) показания дефектоскопа резко увеличиваются с 50 до 400 мкм за месяц эксплуатации коронки, после чего плавно увеличиваются до 550 мкм в течение следующих

двух месяцев. В дальнейшем наблюдается увеличение скорости роста показаний, и к моменту замены коронки к концу четвертого месяца эксплуатации их значения достигают 700—900 мкм. Показания вихретокового дефектоскопа в зоне острия и в средней части коронки увеличиваются соответственно с 30—50 до 250—350 мкм к третьему месяцу эксплуатации, после чего их рост становится незначителен или прекращается вовсе.

Как видно по графикам, отображенным на рис. 6, в ходе эксплуатации зубьев поверхностная твердость и показания вихретокового дефектоскопа в наибольшей степени изменяются в зоне наклепа (см. зоны 2—4 на рис. 2) коронок, в других же зонах (острие, средняя и задняя части) изменение данных параметров не настолько показательно. Таким образом, для оценки остаточного ресурса, а также для определения критерия наступления состояния, близкого к предельному, целесообразно проводить диагностику непосредственно зоны наклепа коронок. Для определения критериев диагностирования состояния и оценки ресурса были сопоставлены графики изменения твердости и показаний вихретокового дефектоскопа в зоне максимального наклепа (рис. 7).

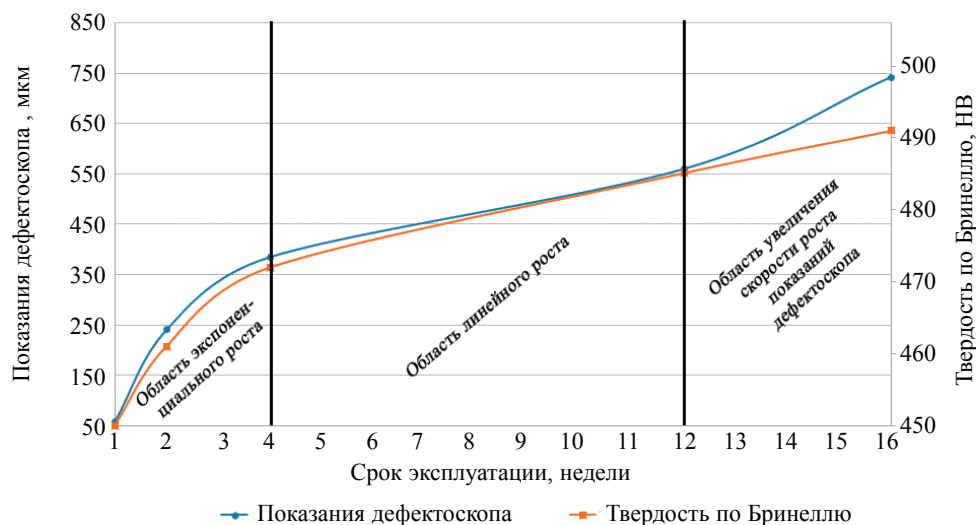


Рис. 7. Сравнение роста твердости и показаний вихретокового дефектоскопа в зоне наклепа коронок с разным сроком эксплуатации.

Как видно из рис. 7, зависимости роста твердости и показаний вихретокового дефектоскопа хорошо коррелируют друг с другом до 12-й недели, и только затем наблюдается расхождение графиков, связанное с увеличением скорости роста показаний дефектоскопа. Можно выделить три характерных области роста твердости и показаний дефектоскопа: 1) область быстрого роста, продолжительностью в 4 недели; 2) область линейного роста с 4-й по 12-ю неделю эксплуатации коронок; 3) область увеличения скорости роста показаний, которая начинается с 12-й недели, при этом скорость роста значений твердости поверхности не меняется.

Таким образом, в качестве диагностических параметров состояния коронки зуба можно установить твердость и показания вихретокового дефектоскопа как показателя дефектности поверхности в зоне максимального наклепа. Поскольку эти два параметра взаимосвязаны, можно утверждать, что ускоренный рост показаний вихретокового дефектоскопа и, соответственно, изнашивание начинается при увеличении твердости на 40 НВ (~10 %) до значений выше 485 НВ и показаний дефектоскопа — до значений выше 550 мкм. После достижения этих значений необходимо планировать замену коронок. Фактические сроки замены зависят от условий и интенсивности эксплуатации и для рассматриваемого случая составляют 16 недель. Кроме того, можно количественно оценить степень изнашивания и, соответственно, остаточный ресурс коронок, если за предельное состояние (100 % износ) принять твердость 495 НВ и показания вихретокового дефектоскопа 750 мкм. Диагностические критерии для определения степени изнашивания в процентах от предельного состояния указаны в табл. 1.

Таким образом, методика определения остаточного ресурса коронок для конкретных условий эксплуатации включает в себя следующие операции:

Диагностические критерии для определения остаточного ресурса коронок в условиях Коркинского разреза

Степень изнашивания, %	Диагностический критерий	
	Диапазон роста значений твердости по Бринеллю, НВ	Диапазон роста показаний вихретокового дефектоскопа, мкм
0—25	450—470	50—400
25—75	470—480	400—550
75—100	480—495	550—750

1) проведение еженедельного измерения диагностических параметров — твердости и показаний дефектоскопа в зоне наклепа поверхности коронок (зоны 2—4 на рис. 2) с построением зависимости, представленной на рис. 7;

2) анализ тенденций изменения диагностических параметров, выявление характерных областей, определение диагностических критериев — значений твердости и показаний дефектоскопа, соответствующих границам зон с разными скоростями изнашивания (см. табл. 1);

3) определение значения твердости, показаний дефектоскопа и срока эксплуатации, соответствующие предельному состоянию коронки (100 % износ).

Процедура диагностирования состояния и оценки остаточного ресурса заключается в измерении значений твердости и снятия показаний вихретокового дефектоскопа, сравнении их с диагностическими критериями и определении степени изнашивания.

Полученные критерии можно использовать для определения остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов для условий эксплуатации, в которых были получены графики роста твердости и показаний вихретокового дефектоскопа в зоне наклепа в течении срока эксплуатации коронок. Таким образом, предложенная методика может быть применима для любых условий эксплуатации в широком диапазоне механических воздействий и температур при условии получения статистически достоверных данных о состоянии контролируемых деталей.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный конечно-элементный анализ усталостного ресурса коронки ковша экскаватора, проведенный по модели малоциклового усталости Coffin-Manson-Basquin, позволил оценить срок начала разрушения материала коронки зуба в 25 недель. При этом фактическое изнашивание коронки, сопровождаемое ростом трещин, начинается уже спустя 1-2 недели эксплуатации, а замена коронок производится через 16 недель. Разница может быть объяснена существенно более высокими нагрузками на поверхностный слой коронки зуба. Данная неточность в модели может быть исправлена путем корректировки граничных условий с учетом полученных результатов диагностики, и таким образом предложенный метод конечно-элементного анализа на основе модели Coffin-Manson-Basquin позволит дать адекватную предварительную оценку срока службы коронок.

Проведенные измерения твердости поверхности коронок продемонстрировали увеличение твердости со временем эксплуатации по всей поверхности коронок, которое объясняется образованием наклепа. По истечению 16 недель эксплуатации в зоне поверхности вблизи острия наблюдается максимальное увеличение твердости — порядка 40 НВ. Непосредственно на острие коронки наблюдается незначительное увеличение твердости.

Вихретоковая дефектоскопия поверхности коронок продемонстрировала появление и рост трещин по всей поверхности в процессе эксплуатации, при этом наибольшие значения показаний дефектоскопа наблюдаются в зоне максимального наклепа, близкой к острию коронки. После 16 недель эксплуатации показания вихретокового дефектоскопа в этой зоне составили более 750 мкм. Авторы предполагают, что меньшие значения твердости и показаний дефектоскопа непосредственно на поверхности зоны острия связаны с наиболее интенсивным изнашиванием и, как следствие, абразивным удалением дефектного материала в этой области.

В качестве критериев оценки состояния и ресурса коронок было предложено использовать следующие величины и параметры, измеряемые в области максимального наклепа, близкой к острию коронки:

приращение значений твердости относительно исходных значений на поверхности в зоне максимального наклепа;

показания вихретокового дефектоскопа;

увеличение скорости роста показаний вихретокового дефектоскопа, являющееся маркером ускорения изнашивания коронки и близости наступления предельного состояния.

Для условий Коркинского разреза наступление предельного состояния коронки зуба ковша экскаватора Komatsu PC400LC-7 соответствует увеличению твердости с 450 до 490 НВ и показаний вихретокового дефектоскопа до 750 мкм. При этом 75 % износ соответствует увеличению скорости роста показаний дефектоскопа и расхождению графиков роста твердости и показаний дефектоскопа.

На основе полученных результатов измерений, проведенных в условиях Коркинского разреза, была предложена обобщенная методика оценки остаточного ресурса коронок. Данная методика применима при любых условиях эксплуатации экскаваторов, однако получение численных значений диагностических критериев требует проведения предварительного исследования роста твердости и показаний дефектоскопа при диагностировании поверхности коронок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет оценить остаточный ресурс коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в широком температурном диапазоне с помощью диагностики состояния поверхности зоны наклепа коронок, образующейся в ходе ударно-абразивного изнашивания при контакте с массивом угля. Основными критериями оценки состояния и остаточного ресурса коронок являются значения твердости и показания вихретокового дефектоскопа, а также изменения в скорости роста показаний дефектоскопа.

Полученные результаты демонстрируют возможность разработки методики технического диагностирования и оценки ресурса исполнительного оборудования горных машин с применением твердомерии и вихретокового вида неразрушающего контроля

Авторы благодарят Павла Валентиновича Соломенчука, ведущего специалиста ООО «Константа», за полезные консультации в области вихретоковой дефектоскопии.

Статья подготовлена при участии финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-38-90131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sokolovskiy A.V., Lapaev V.N., Temnikova M.S., Gordeev A.I. Assessment of the possibility of the Korkinsky open-pit mine liquidation by filling with thickened tailings of enrichment // *Ugol*. 2018. V. 3. No. 1104. P. 91 — 95. [Соколовский А.В., Лапаев В.Н., Темникова М.С., Гордеев А.И. Технологические особенности ликвидации разреза «Коркинский» // *Уголь*. 2018. № 3 (1104). С. 91—95.]
2. Pashkevich M.A., Danilov A.S., Matveeva V.A. Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine // *Eurasian Mining*. 2021. V. 1. No. 35. P. 79.
3. Портола В.А., Лабукин С.Н. Обнаружение очагов самовозгорания угля на ранней стадии развития // *Безопасность труда в промышленности*. 2009. № 4. С. 34—37.
4. Wang H., Chen C. Experimental Study on Greenhouse Gas Emissions Caused by Spontaneous Coal Combustion // *Energy Fuels*. 2015. V. 29. No. 8. P. 5213—5221.
5. Положение о плано-предупредительном ремонте оборудования открытых горных работ на предприятиях угольной промышленности СССР. М.: Минуглепром СССР, 1983. 46 с.
6. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 241. P. 10—21. [Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // *Записки Горного института*. 2020. № 241. С. 10—21.]
7. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Yu. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 242. P. 228—233. [Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // *Записки горного института*. 2020. № 242. С. 228—233.]
8. Grzesik W. Chapter 12 — Tool Wear and Damage, In *Advanced machining processes of metallic materials: Theory, modelling and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2017. P. 215—239.
9. Gogolinskiy K., Gromyka D., Kremcheev E. A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket // *International Review of Mechanical Engineering*. 2021. V. 4. No. 1. P. 20699.
10. Artem'ev A.A., Antonov A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. Test procedure of clad alloys for resistance against high temperature abrasive wear // *Journal of Friction and Wear*. 2017. V. 38. No. 3. P. 225—230.
11. Сахабудинов Р.В., Чукарин А.В. Применение метода вихревых токов для контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций машиностроения при диагностике // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2008. № 2 (79). С. 25—30.
12. Bolobov V.I., Chupin S.A., Bochkov V.S., Akhmerov E.V., Plaschinskiy V.A. The effect of finely divided martensite of austenitic high manganese steel on the wear resistance of the excavator buckets teeth // *Key Engineering Materials*. 2020. V. 854. P. 3—9.

13. *Maksarov V.V., Efimov A.E., Keksin A.I.* Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool systems in the processing of welded structures from dissimilar steels // *Materials Science Forum*. 2021. V. 1022. P. 7—16.
14. *Lu Y., Ripplinger K., Huang X., Mao Y., Detwiler D., Luo A.A.* A new fatigue life model for thermally-induced cracking in H13 steel dies for die casting // *Journal of material processing tech.* 2019. V. 271. P. 444 — 454.
15. *Кашапова И.А., Федоров А.В., Егоров Р.А., Ильинский А.В.* Разработка метода оценки твердости покрытий при динамическом индентировании // *Контроль. Диагностика*. 2020. Т. 23. № 10 (268). С. 65—71.
16. *Звонарев И.Е., Иванов С.Л., Шишляников Д.И., Фокин А.С.* Исследования поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014. № 11. С. 67—76.
17. *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.
18. *Bandara C.S., Siriwardane S.C., Dissanayake U.I., Dissanayake R.* Full range S-N curves for fatigue life evaluation of steels using hardness measurements // *International Journal of Fatigue*. 2015. V. 82. No. 2. P. 325—321.
19. *Gerasimenko A.A., Samigullin G.K.* Evaluation of steel vertical tank residual life by a metal low-cycle fatigue criterion under biaxial loading conditions // *Chemical and petroleum engineering*. 2015. V. 52. No. 1. P. 53—58.
20. *Guo C., Yu D., Sun X., Yu W., Chen X.* Fatigue failure mechanism and life prediction of a cast duplex stainless steel after thermal aging // *International Journal of Fatigue*. 2021. V. 146. P. 106161.
21. *Zhang P., Wang D., Guo Y., Cheng P., Shao C., Lang N., Liu X., Huang J.* Fatigue failure analysis and finite element assessment of the twins torsion spring // *Engineering Failure Analysis*. 2021. V. 122. P. 105187.
22. *Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S.* Ultrasonic and Eddy-Current Fatigue Monitoring of Austenitic Steel Welded Joints // *Russ. J. Nondestruct. Test*. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. [*Гончар А.В., Ключников В.А., Мишаков В.В., Аносов М.С.* Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали // *Дефектоскопия*. 2021. № 7. С. 28—36.]
23. *Potapov A.I., Kondratev A.V.* Non-destructive testing of multilayer medium by the method of velocity of elastic waves hodograph // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 243. P. 348—356. [*Потапов А.И., Кондратьев А.В.* Неразрушающий контроль многослойных сред методом годографа скорости упругих волн // *Записки горного института*. 2020. № 243. С. 348—356.]
24. *Добровольский В.И., Добровольский С.В.* Корреляция долговечностей по трещинообразованию и разрушению элементов конструкций при малоцикловой усталости // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2009. № 1 (41). С. 33—36.
25. *Olenev L.A., Zakieva R.R., Smirnova N.N., Shichiyakh R.A., Ershov K.A., Geetha N.* Accurate composition dependent thermo mechanical lifetime estimation of hour glass type solder joint in electronic assemblies // *Soldering & Surface mount Technology*. 2020. V. 34. No. 1. P. 8—15.
26. *Gogolinskiy K.V., Syasko V.A.* Prospects and challenges of the fourth industrial revolution for instrument engineering and metrology in the field of non-destructive testing and condition monitoring // *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2019. V. 61. No. 8. P. 434 — 439.
27. *Лебедев Д.И., Федоров М.В., Голиков Н.И., Тихонов Р.П., Винокуров Г.Г.* Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A // *Наука и образование*. 2016. № 2. С. 81—87.
28. *Dębski D., Goloś K., Dębski M., Misztela A.* Multiaxial Fatigue Behavior of 30HGSA Steel Under Cyclic Tension-Compression and Reversed Torsion / In: *Niepokolczycki A., Komorowski J.* (eds) *ICAF 2019. Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing*. ICAF 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2020. P. 452 — 460.
29. *Boroński D.* The effect of the method of determination of young's modulus on the estimation of fatigue life of structural elements // *Journal of theoretical and applied mechanics*. 2004. V. 42. No. 2. P. 269 — 283.
30. *Niestony A., el Dsoki C., Kaufmann H., Krug P.* New method for evaluation of the Manson-Coffin-Basquin and Ramberg-Osgood equations with respect to compatibility // *International Journal of Fatigue*. 2008. V. 30. P. 1967—1977.
31. Твердомер портативный многофункциональный. [Электронный ресурс] // Константа. URL: constanta.ru/catalog/tverdomery/konstanta_kt (Дата обращения: 24.12.2021).
32. *Gogolinskiy K.V., Syasko V.A., Umanskiy A.S., Nikazov A.A., Bobkova T.I.* Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects // *Journal of Physics Conference Series*. 2019. V. 1384. P. 012028.
33. *Егоров Р.А., Ильинский А.В., Кузьмичев М.В., Федоров А.В.* Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования // *Дефектоскопия*. 2020. № 6. С. 61—69.
34. Вихретоковый дефектоскоп. [Электронный ресурс] // Константа URL: constanta.ru/catalog/vikhretokovye_defektoskopy_preobrazovateli_kontrolnye_obraztsy (Дата обращения: 24.12.2021).
35. ГОСТ Р ИСО 15549—2009 Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения.