УДК 621.81:539.4

И.Е.ЗВОНАРЕВ, *аспирант, ZVano@mail.ru*
С.Л.ИВАНОВ, *д-р техн. наук, профессор, lisa_lisa74@mail.ru*
А.С.ФОКИН, *канд. техн. наук, доцент, Fokin@spmi.ru*
Д.А.ШИБАНОВ, *аспирант, dan11l88@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

I.E.ZVONAREV, *post-graduate student, ZVano@mail.ru*
S.L.IVANOV, *Dr. in eng. sc., professor, lisa_lisa74@mail.ru*
A.S.FOKIN, *PhD in eng. sc., associate professor, Fokin@spmi.ru*
D.A.SHIBANOV, *post-graduate student, dan11l88@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВАНИИ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ

Выявлен эффект локального изменения поверхностной твердости торцевых поверхностей зубьев крупномодульных зубчатых колес трансмиссий горных машин. Представлены закономерности изменения величин поверхностной твердости нестандартных образцов от вида их нагружения. Дана оценка величины работы разрушения образцов. Предложено оценивать остаточный ресурс крупномодульных зубчатых передач с учетом анализа изменения локальной поверхностной твердости по разработанной методике.

***Ключевые слова*:** поверхностная твердость, горные машины, зубчатые передачи, энергоресурс.

RESIDUAL LIFE ASSESSMENT GEARS COARSE-GRAINED OPEN TRANSFER OF MINING MACHINES BASED ON THE LOCAL CHANGES OF THEIR SURFACE HARDNESS

The effect of local changes in the surface hardness of the end surfaces of teeth of coarse-grained gear transmissions mining machines. Represented by patterns of change of the surface hardness is not the type of reference to the loading. The estimation of the value of destruction of samples. Proposed to assess the remaining amount of coarse-grained gears with consideration of changes in the local surface hardness developed technique.

***Key words*:** superficial hardness, mining machines, tooth gearings, power resource.

Зубчатые передачи горных машин определяют ресурс трансмиссий, испытывая при работе нагрузки, вызывающие поверхностный износ и усталостное контактное разрушение рабочих поверхностей зубьев, а также их изгибные напряжения. При этом сложно достоверно разделить единый поток энергии, проходящий через зацепление при передаче нагрузки на потоки, вызывающие нарушения в структуре материала зубьев зубчатых колес, способствующие их разрушению при износе, усталостном разрушении и изломе зубьев.

При анализе поверхностной твердости торцов зубьев зубчатых колес лебедки подъема экскаватора типа ЭКГ, отработавшей около 10000 ч, на торцевых поверхностях зубьев шестерни (модуль $m = 8$ мм, $z = 19$)

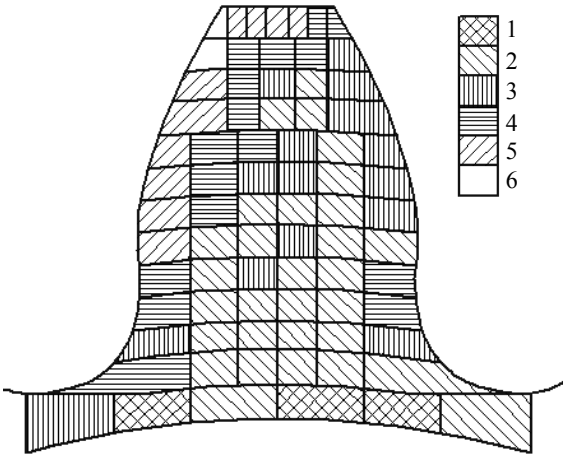


Рис.1. Изменение поверхностной твердости зуба крупномодульного зубчатого колеса

Номинальная твердость 173 HV; 1 – HV>220; 2 – 210-220; 3 – 200-210; 4 – 190-200; 5 – 180-190; 6 – <180

были выявлены локальные изменения их поверхностной твердости. Измерения проводились на универсальном твердомере Zwick ZHU 187 (индентор – четырехгранная алмазная пирамидка; нагрузка – 100 Н; время выдержки – 10 с).

Для выявления закономерностей проявления локального изменения поверхностной твердости торцевая поверхность каждого зуба была разбита на 76 секторов, в пределах которых проводились соответствующие измерения в 3-5 точках. Обработанные и усредненные результаты измерений представлены на рис.1.

При сравнении полученных результатов измерений с результатами моделирования напряженно-деформированного состояния зуба при его работе [2] выявлено подобие расположения областей повышенной твердости с зонами максимальных напряжений при изгибном напряжении зуба.

Выявленный характер изменения локальной твердости обусловлен изменением прочностных свойств металлов с учетом микро- и макромеханизмов пластических и упругих деформаций, вызывающих искажение кристаллической решетки. При этом повышение микротвердости происходит лишь в зонах возрастания напряжений выше предела пропорциональности $\delta_{пц}$, а работа сил разрушения, отнесенная к плотности дислокаций непосредственно прилегающей к плоскости разрушения, выражается через приращение микротвердости и есть величина постоянная. Область повышения микротвердости целиком определяется ареалом изменения напряженного состояния, вызванного работой действующих внешних сил разрушения, прикладываемых к образцу [4, 5].

Для изучения процессов формоизменения и механизма накопления нарушений (дислокаций и вакансий) в материале были проведены лабораторные испытания по разрушению растяжением нестандартных образцов на машине Zwick Roell с последующим измерением локальной твердости по длине образцов и в зоне разрушения. Была проведена оценка остаточных деформаций разрушенных образцов в сравнении с образцами, не подвергавшимся силовому воздействию. В качестве материала образцов была выбрана монтажная лента ЛВП 12×5,5 (рис.2, *а*) толщиной 0,55 мм. Образец имеет исходную длину 210 мм, что соответствует 14 звеньям. Плоскость разрушения образцов проходила через диаметр отверстия в области, обозначенной позицией 1 (рис.2).

Такой выбор позволил получить необходимое количество образцов с едиными физико-механическими свойствами для получения достоверной информации в результате проводимых экспериментов. Периодически изменяющаяся форма образцов позволила создавать различные по величине напряжения и соответствующие деформации в однородном силовом поле воздействия на образец. Геометрические размеры и соответствующие деформации разрушенных и исходных образцов были измерены методом сравнения с мерой в графическом редакторе Paint в пикселях с последующим переводом их в метрические единицы.

По результатам измерения геометрических размеров до и после разрушения было выявлено, что размеры осей эллипсов *a* и *b* (рис.2) составили +41,7 и –29,7 % соответственно от значений в исходных образцах. Размеры отверстий образцов, начиная с первого от плоскости разрушения, изменяются по линейному закону, приближаясь в перспективе к соответствующим размерам исходного образца. Однако, размеры между

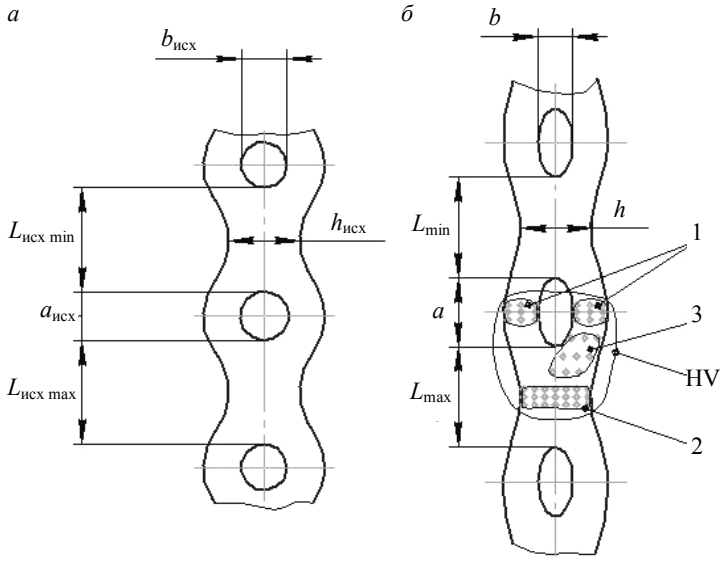


Рис.2. Нестандартный образец до (*а*) и после (*б*) растяжения

осями L_{min} и L_{max} и ширина перемычки h изменились всего на 6,9, 3,2 и 0,12 % соответственно, что для элемента h находится в пределах точности измерений. Это говорит о том, что образец в районе перемычки h не имел остаточной деформации, удлинения образца вне отверстий минимальны, а деформации подверглись участки образцов в районах их отверстий. Там же находится и опасное сечение образца.

Средняя работа разрушения при статических испытаниях на растяжение серии из пяти образцов составила 3,07 Дж. Помимо измерений линейных размеров, проводились измерения микротвердости образцов на твердомере Zwick ZHU 187. В пределах области 1 образцов было выбрано 18 точек измерений твердости для каждого звена (рис.2). В зонах 2 и 3 точек измерения выбиралось 9 и 21 соответственно.

Результаты измерений, подвергнутые статистической обработке и усреднению, представлены на рис.3.

Изменение величины твердости материала образцов от плоскости разрушения к периферии представляет собой волнообразную слабо ниспадающую кривую 1 с максимальными значениями твердости в плоскости разрушения (позиция 1, рис.2, *б*) и соответствующими пиками повышенной локальной твердости. Минимальная твердость – в области сужения звеньев образцов. Сопоставляя результаты измерений деформированных образцов с исходными геометрическими размерами и учитывая характер изменения твердости образцов по их длине, можно видеть, что области наибольшей деформации согласуются с повышением микротвердости поверхности, максимум которых приходится на зону разрушения.

Аналогичные исследования были проведены на стандартных образцах (размером 990×20×3 мм) из чугуна ВЧ 60-9. Максимальная твердость была выявлена в зоне разрушения. С удалением от нее вдоль оси образца величина микротвердости интенсивно снижается, стремясь к номиналу, что подтверждает выявленную тенденцию.

Вместе с тем, нестандартные образцы были подвергнуты знакопеременному изгибу вплоть до разрушения на стенде, имитирующим диссипативные потоки при работе зубчатого колеса. Стенда представлял собой физический маятник с кареткой и элементами трения [4].

Изгибные напряжения образцов, установленных в стенд, соответствуют изгибным напряжениям зубьев, нагрузки растяжения образцов – имитируют контактные напряжения, а трение и износ в зацеплении соответствует процессу проскальзывания ролика маятника о поверхность элемента трения каретки. Для оценки влияния на баланс диссипативных потерь каждого из пе-

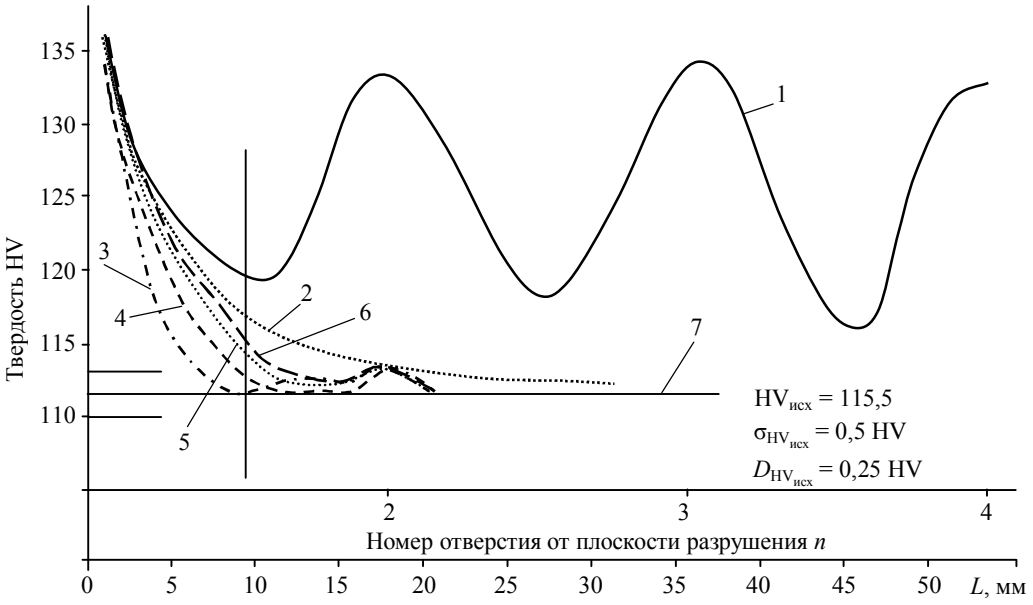


Рис.3. Изменение твердости по длине исходного образца и разрушенных образцов растяжением, изгибом и совместным действием изгиба

1 – статическое растяжение; 2 – чистый изгиб; 3-6 – изгиб с растяжением при нагрузке 51,15; 41,15; 31,15; 21,15 Н соответственно; 7 – исходный образец

речисленных элементов имеется возможность их поэлементного определения в произвольном сочетании или совокупно.

В первых сериях опытов (каждая серия состояла из семи испытаний при одинаковых условиях) образцы подвергались нагружению чистым изгибом и изгибом с одновременным растяжением под действием силы тяжести маятника, равного соответственно 51,15; 41,15; 31,15; 21,15 Н. В результате экспериментов фиксировалось количество блоков переменных циклов нагружения и количество циклов в блоке, продолжительность блока нагружения. Одновременно проводился контроль температуры и влажности воздуха для оценки сопротивления движению подвижных частей стенда в воздушной среде. После разрушения образцов измерялась микротвердость по их длине. Методика измерений аналогична ранее примененной.

На рис.3 кривая 2 соответствует чистому изгибу. Микротвердость по длине образца плавно снижается от максимального значения в зоне разрушения до номинальной в пределах одного звена образца. Кривая 3 соответствует изменению микротвердости образца, разрушенного при совместном действии изгиба с растяжением под действием силы тяжести маятника 51,15 Н и имеет большую интенсивность снижения твердости образца по его длине. Амплитуда качения маятника в обоих опытах одинакова и соответствует углу отклонения 30°.

Функция изменения твердости образцов, разрушенных изгибом с растяжением, с уменьшенным весом маятника, соответствует кривым 4, 5 и 6. Как видно из рис.3, форма кривых в пределе приближается к кривой 2, соответствующей разрушению чистым изгибом. При этом независимо от способа нагружения, в непосредственной близости от плоскости разрушения значения твердости имеют примерно одинаковые значения, что говорит о том, что разрушение происходит в объеме материала при достижении определенного накопления нарушений в кристаллической решетке.

Чистая работа разрушения образцов с учетом диссипации системы при движении в воздухе составила: 1,69 Дж (51,15 Н); 2,288 Дж (41,15 Н); 2,81 Дж (31,15 Н); 3,032 Дж (21,15 Н) (в скобках указано усилие растяжения образца при изгибе) [7].

Предполагая, что работа разрушения пропорциональна плотности дислокаций,

возникающих в образце под действием внутренних напряжений, а напряжения в свою очередь есть суть реакции на внешнее силовое воздействие, которое пропорционально вызывает соответствующие деформации, оценим удельную работу на создание критической плотности дислокаций в непосредственной близости от плоскости разрушения. Учитывая тот факт, что плотность дислокаций пропорциональна микротвердости поверхности, воспользуемся результатами экспериментов (рис.3). Интегрированием определим площадь, ограниченную кривыми 1-6, 7 и сечением I-I, и полученные результаты для единичной площади (объема) отнесем к соответствующей работе разрушения образцов. Так как образцы представляют собой ленту, допустимо считать, что по толщине образца плотность дислокаций постоянна, что позволяет по сути перейти от объема к поверхности (сечению).

После необходимых математических вычислений была получена удельная работа разрушения, отнесенная к плотности дислокаций, выраженная через значение микротвердости поверхности в зоне разрушения, во всех случаях равная 0,023 Дж, что можно считать величиной постоянной в пределах точности эксперимента. Полученный результат не противоречит теории энергоресурса и кинетики разрушения [5, 6].

Учитывая, что предельная прочность нарушений в материале, предшествующая его разрушению, является величиной постоянной для этого материала вне зависимости от вида нагружения и определяется лишь плотностью дислокаций в зоне разрушения [4, 5], а результатом накопления дислокаций является локальное повышение микротвердости материала [1], попытаемся оценить остаточный ресурс зуба крупномодульного зубчатого колеса по критерию изгибной усталостной прочности.

Несмотря на то, что накопление повреждений, а следовательно и поверхностной микротвердости, не является процессом обязательно монотонно изменяющимся [3], можно считать, что процесс имеет некоторую постоянную скорость на отрезке времени (или наработки), значительно превышающий цикл силового воздействия. Тогда в предположении стационарности протекания процесса накопления повреждений, зная действительное значение этой микротвердости, например, торцевой поверхности зуба, выявленной при проведении диагностических процедур, и имея предельное значение твердости для разрушенного образца материала, возможно оценить величину условного остаточного ресурса зуба по критерию усталостной изгибной прочности:

$$T_{YF\text{Р}_{\text{ост}}} = T\left(1 - \frac{\Delta\text{HV}_F}{\Delta\text{HV}_{\max}}\right), \qquad (1)$$

где ΔHV_F – приращение микротвердости торцевой поверхности зуба в опасном сечении; $\Delta\text{HV}_{\max}$ – максимально возможное (опасное) приращение твердости торцевой поверхности зуба по отношению к исходному состоянию.

Аналогично, условная величина остаточного ресурса по критерию износа

$$T_{Y\text{Р}_{\text{ост}}} = T\left(1 - \frac{\Delta S}{[S]}\right), \qquad (2)$$

где $[S]$ – допускаемый износ; ΔS – величина износа на момент проведения мероприятий по диагностике.

Контроль микротвердости рабочей поверхности зуба позволяет оценить соотношение процессов изнашивания и разрушения по критерию контактной усталости поверхности зубьев. Если микротвердость рабочих поверхностей зубьев не меняется, следовательно, превалирует процесс износа.

В случае, если требуется оценить условный остаточный ресурс по критерию контактной выносливости, его следует оценивать аналогично выражению (1), но с учетом того, что процесс износа и накопления повреждений контактной усталости происходит в пределах одной и той же поверхности,

$$T_{Y\text{Н}\text{Р}_{\text{ост}}} = T\left(\frac{\Delta\text{HV}_{\text{н}}}{\Delta\text{HV}_{\max}}\right). \qquad (3)$$

Так как все три деградационных процесса идут одновременно, то для оценки ко-

эффициента влияния одного их трех видов разрушения зубчатого колеса (выражения 1-3) целесообразно воспользоваться соотношением

$$K_{\text{в}i} = \frac{T_{Yi\text{Р}_{\text{ост}}}}{\sum T_{Yi\text{Р}_{\text{ост}}}}. \qquad (4)$$

Далее, умножая обе части выражений (1)-(3) на соответствующий $K_{\text{в}i}$ одновременно с оценкой влияния трех факторов разрушения, возможно оценить величину остаточного ресурса непосредственно, исходя из значений зафиксированных диагностических параметров.

Так как значения удельной работы разрушения, отнесенные к плотности дислокаций, выраженной через значение микротвердости поверхности в зоне разрушения, есть величины постоянные, это позволяет оценивать ресурс через предельную плотность дислокаций, а остаточный ресурс – по результатам диагностики и выявления изменения поверхностной твердости локальных областей деталей машин (в частности, торцев зубчатых колес).

При реализации такого подхода возможно решение и обратной задачи: экспериментальное определение потенциально опасных сечений по локализации областей повышенной микротвердости поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров Ю.В.* Ресурсные испытания металла длительно эксплуатируемых трубопроводов / Ю.В.Александров, А.С.Кузьбожев, Р.В.Агиней. СПб, 2011. 304 с.

2. *Голдобин В.А.* Анализ прочности зубьев эвольвентных передач со смещением исходного контура / В.А.Голдобин, А.А.Пустовой // Машинознавство: Матеріали 10-ї регіональної науково-методичної конференції / ДонНТУ, Донецьк, 2008. С.14-16.

3. *Звонарев И.Е.* К вопросу оценки ресурса механических трансмиссий машин энергетическим методом / И.Е.Звонарев, С.Л.Иванов, А.С.Фокин // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 8. С.38-41.

4. *Звонарев И.Е.* Оценка характера повреждаемости образцов при физическом моделировании диссипативных процессов изнашивания в зацеплении / И.Е.Звонарев, А.С.Фокин, С.Л.Иванов // Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых. Минск, 2011, С.308-311.

5. *Ибатуллин И.Д.* Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: Монография / Самар. гос. техн. ун-т, Самара, 2008. 387 с.

6. *Иванов С.Л.* Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / СПГГИ(ТУ), СПб, 1999. 92 с.

7. Оценка удельной работы разрушения не стандартных образцов с учетом локальной твердости в зоне их разрушения / И.Е.Звонарев, С.Л.Иванов, А.С.Фокин, М.А.Семенов // Технические науки – от теории к практике: Материалы XIV Международной заочной научно-практической конференции. Новосибирск, 2012. С.53-62.

REFERENCES

1. *Alexandrov Y.V.*, *Kuzbozhev A.S.*, *Aginey R.V.* Long-term durability tests of metal operated pipelines. Saint Petersburg, 2011. 304 p.

2. *Goldobyn V.A.*, *Pustovoy A.A.* Strength analysis of involute gear teeth with a shift of the initial contour // Mashinoznavstvo: Materials of the 10th regional scientific conference / Donetsk national technical university. Donetsk, 2008. P.14-16.

3. *Zvonarev I.E.*, *Ivanov S.L.*, *Fokin A.S.* On assessment of the resource manual transmission machines energy method / Mining equipment and electrical engineering. 2011. № 8. Pp.38-41.

4. *Zvonarev I.E.*, *Fokin A.S.*, *Ivanov S.L.* Assessing the nature of damage to the samples at the physical modeling of the dissipative processes of wear in the engagement // Processes and means of extraction and processing of minerals. Minsk, 2011. P.308-311.

5. *Ibatullin I.D.* Kinetics of fatigue failure rate and destruction of surface layers: monograph / Samara state technical university. Samara, 2008. 387 p.

6. *Ivanov S.L.* Improving resource transmissions mining machines based on an assessment of the energy load of their elements. Saint Petersburg, 1999. 92 p.

7. *Zvonarev I.E.*, *Ivanov S.L.*, *Fokin A.S.*, *Semenov M.A.* Evaluation of specific work of destruction is not standard samples with the local firm in the area of their destruction // Engineering – from theory to practice: Proceedings XIV international correspondence scientific conference. Novosibirsk, 2012. P.53-62.