

Драгобецкий В. В. /д. т. н./, Шаповал А. А. /к. т. н./, Лотоус В. В.  
Мосъпан Д. В. /к. т. н./  
Кременчугский национальный университет  
им. Михаила Остроградского

ОАО «Полтавский ГОК»

## Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом

*Дан анализ методов повышения износостойкости деталей горного оборудования. Описана последовательность выбора метода повышения износостойкости деталей. Установлен вид изнашивания для конкретных производственных условий. Метод включает упрочнение накладным зарядом, упрочнение происходит ударными волнами от соударения с метаемой пластиной. Разработаны схемы процессов упрочнения деталей горного оборудования. Ил. 3. Библиогр.: 7 назв.*

**Ключевые слова:** износостойкость, зубья ковшей экскаваторов, сталь Гадфильда, взрывотермическая обработка, комбинированные технологии

*Analysis of means for increase of wear rate of mining equipment pieces is given. The sequence of choice of means for increase of wear rate of pieces is described. The type of wear for certain working conditions is determined. The mean includes pressure charge hardening, which is fulfilled with the help of impulse waves because of hit with driver plate. The schemes of hardening processes of pieces of mining equipment are developed.*

**Keywords:** wear rate, dipper teeth, Hadfield steel, explosive-thermal processing, mixed technologies

### Актуальность работы

Элементы деталей горного оборудования камнедробилок шаровых мельниц, породоразрушающий инструмент, измельчающие устройства ударного действия, пневмо- и гидроударники, буровые долота, зубья ковшей экскаваторов и рыхлителей, работающие в условиях экскавации стальной породы подвергаются ударно-абразивному изнашиванию. Причиной малого срока службы машин (менее одной смены) подобного действия являются не поломки, а износ. Затраты на ремонт и восстановление этих деталей чрезвычайно высоки и существенно увеличивают производственные затраты и снижают эффективность работы предприятий. Преждевременный износ этих деталей наиболее часто является следствием неудачного выбора метода упрочняющей обработки без учета характера воздействия абразива и эксплуатационных нагрузок. Поэтому решение вопросов повышения эксплуатационной долговечности и стойкости к износу деталей горного оборудования чрезвычайно актуально и сулит значительные экономические выгоды.

Для повышения износостойкости или работоспособности деталей применяют конструктивные и технологические способы. Наиболее изнашиваемые поверхности ковшей экскаваторов и зубьев упрочняют приваркой шипов [1], а также путем создания условий для их само-

затачивания. Среди технологических способов упрочнения поверхности деталей наиболее часто применяют следующие: пластическое деформирование, термическая и термомеханическая обработка, химико-термическая обработка, наплавка и напыление, лазерное облучение, припекание порошков, электровзрывное легирование и т. д. Среди методов пластического деформирования наиболее эффективны технологии упрочнения взрывом и взрывотермическая обработка [2]. При этих методах упрочнения достигается наиболее удачное сочетание для условий ударно-абразивного износа механических свойств деталей после упрочнения [2].

### Материалы и результаты исследований

Целью исследований является изыскание резервов повышения износостойкости зубьев ковшей экскаваторов методами взрывного упрочнения, необходимого сочетания свойств деталей после упрочняющей обработки для обеспечения максимальной износостойкости зубьев ковшей экскаватора.

Выбор материала и методов упрочняющей обработки в значительной мере зависит от условий эксплуатации, которые определяются в основном виде изнашивания. При классификации видов изнашивания учитывалась степень закреплённости абразива и характер его воздействия на изнашиваемую деталь [1]. Преобладающим видом изнашивания зубьев ковшей экс-

каваторов в условиях экскавации стальной породы (Полтавский ГОК) является изнашивание жестко закрепленным абразивом, а именно изнашивание о монолит [1]. При этом монолитом считаются крупные куски породы [1].

Выбор метода повышения износостойкости необходимо осуществлять в том же порядке, что и материала для работы деталей в условиях абразивного изнашивания [1]. Вначале определяют кратность необходимого срока службы детали  $n$  [1]. При этом следует учитывать, что срок службы зубьев ковшей экскаватора в зависимости от манеры работы и навыков экскаваторщика разный. Ориентируемся на наиболее изнашиваемые зубья используя диаграмму ресурса работоспособности зубьев ковшей экскаватора. Износостойкость желательнее повысить либо на 15 %, либо в 1,15 раза; 2,15 и т. д.

Вид изнашивания определен ранее. Ударно-абразивное изнашивание зубьев ковшей экскаваторов происходит при ударном взаимодействии частиц или выступов абразива с изнашиваемой поверхностью. Зубья ковшей экскаваторов изготавливают из высокомарганцовистой аустенитной стали Г13Л. В закаленном состоянии эта сталь имеет аустенитную структуру, высокую вязкость и износостойчивость в условиях ударных нагрузок и больших давлений. Износ этой стали происходит в результате пластического отеснения, хрупкого выкрашивания, микро- и макроцарапания. Анализ характера изношенных поверхностей показывает, что при их износе в условиях работы на Полтавском ГОКе на зубьях и ковше при эксплуатации появляются микро- и макроцарапины глубиной от  $2,5 \cdot 10^{-7}$  до  $500 \cdot 10^{-7}$  м, микро- и макрорывы площадью от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $100 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> при глубине до  $6 \cdot 10^{-2}$  м. Таким образом, на износостойкость деталей в условиях ударно-абразивного износа влияют твердость изнашиваемой поверхности, прочность и пластичность. Твердость повышает сопротивление царапанию, а прочность и пластичность – стойкость к выкрашиванию и пластическому отеснению.

Согласно современной теории износа, последний, в условиях ударно-абразивного износа закрепленным абразивом, определяется по зависимостям, полученным Г. М. Сорокиным [3]

$$u = f \frac{H_a}{H_m} \frac{A}{\sigma_\beta \Psi} \beta \gamma, \quad (1)$$

где  $u$  – износ по массе;  $f$  – коэффициент трения;  $A$  – работа, выполняемая внешними силами трения,  $\psi$  – относительное сужение;  $\sigma_\beta$  – временное сопротивление разрушению;  $\gamma$  – плотность стали;  $H_a, H_m$  – твердость материала абразива и зуба.

Однако если ранее считалось, что минимальный износ по массе соответствует максимальному значению интенсивности деформаций, то согласно последним данным, минимальный износ соответствует предельным равномерным деформациям. Следовательно, в зависимости (1) более предпочтительно вместо  $\psi$  использовать выражение  $2\psi - \psi_{eq} + (\psi_e - \psi_{eq})$ ,  $2\psi - \psi_{eq} + \Delta$ , где  $\psi_{eq}$  – предельное равномерное относительное сужение, а  $\Delta = \psi_e - \psi_{eq}$ , где  $\psi_e$  – максимальное относительное сужение. Кроме того, вместо  $H_m + 2H_m - H_{eq} + \Delta$ , где  $H_{eq}$  – твердость, соответствующая максимальной равномерной деформации, следует использовать  $\Delta = H_e - H_{eq}$ ,  $H_e$  – твердость, соответствующая предельному относительному сужению.

В свою очередь, коэффициент трения и работа, выполняемая внешними силами трения, также являются функциями твердости и пластичности. Установление зависимости износа от комплекса параметров в конечном итоге сводится к универсальному критерию долговечности – произведению предела прочности  $\sigma_\beta$  на относительное сужение  $\psi$ . Однако зависимость износостойкости сталей от одновременного влияния прочности и пластичности не имеет оптимума по соотношению этих величин.

Ряд параметров представленных в зависимости (1) можно выразить через относительную деформацию, а именно:

$$- \text{относительное сужение } \psi = \varepsilon / (1 + \varepsilon); \quad (2)$$

$$- \text{коэффициент трения } f = \left( \frac{\lambda}{\sigma_s} + \beta \right), \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести;  $\lambda, \beta$  – константы;

$$- \text{работа сил трения } A = f \sigma_n \cdot u \cdot F, \quad (4)$$

где  $\sigma_n$  – нормальное давление в плоскости контакта,  $F$  – площадь поверхности зуба.

Кроме того установлено [4], что при достижении относительной деформации  $\varepsilon = 0,2-0,3$  связь между твердостью и интенсивностью напряжений приближается к линейной и имеет вид

$$H\beta u = K_1 \varepsilon, \quad (5)$$

$$\sigma_\beta = K_2 \varepsilon, \quad (6)$$

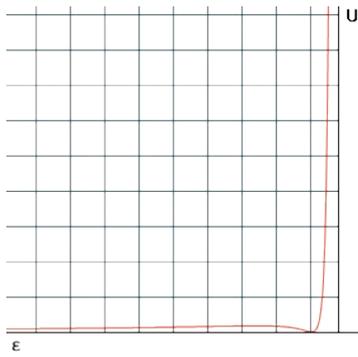
где  $K_1, K_2$  – коэффициент пропорциональности. Для стали Гадфильда  $K_1 = K_2 = K = 0,67$ .

С учетом этого уравнение преобразуется к виду:

$$u = H_a \sigma_n F u \cdot K^{-4} \varepsilon^{-5} \left[ \lambda^2 + 2\beta \lambda \varepsilon + K^2 \beta^2 \varepsilon^2 + \lambda^2 \varepsilon^2 + 2\beta \lambda K \varepsilon^3 + K^2 \varepsilon^4 \beta^2 \right]. \quad (7)$$

Зависимость  $u = F(\varepsilon)$  имеет экстремум при деформациях сжатия (рис. 1). При предельных значениях твердости абразива и нормального давления в плоскости контакта при деформации

циях близких к равномерным износ по массе минимален.



**Рис. 1. Характер изменения износа по массе от деформации**

Среди методов упрочнения высокомарганцовистых сталей – взрывное, обеспечивает высокие показатели прочности и пластичности. Теория и практика взрывной обработки развивается и не все возможности и аспекты действия взрыва раскрыты и нашли должное применение. Повышение эффективности существующих технологий, в частности, взрывного упрочнения, может происходить по следующим направлениям:

- оптимизация параметров взрывного упрочнения;
- разработка комбинированных методов обработки;
- создание принципиально новых методов взрывной обработки.

Оптимальным режимом взрывного нагружения поверхности детали с точки зрения упрочнения и обеспечения максимальной износостойкости является такой, который обеспечивает максимальное приращение предела прочности  $\sigma_B$  (или твердости) при минимальном изменении пластичности, по сравнению с их исходными значениями. Физический аспект процесса оптимизации заключается в выборе и обосновании параметров оптимизации, а технологический – в обеспечении условий нагружения (деформирования) поверхностного слоя детали, соответствующего выбранным значениям этих параметров. Для материала с заданными физико-механическими свойствами величина  $\Delta\sigma_B$  (приращение предела прочности), обусловленная импульсным нагружением, зависит от следующих основных физических факторов: скорости перемещения ударного фронта (при накладном заряде взрывчатого вещества – скорости детонации); величины давления на фронте ударной волны; распределения остаточных напряжений после импульсного нагружения. Оптимальное физическое состояние определяется конкурирующим влиянием двух протекающих процессов физического упроч-

нения (наклепа) с одной стороны, и либо разупрочнения, либо повышения пластичности, обусловленного образованием микродефектов и дробления структурных составляющих материала упрочняемой детали – с другой. В настоящее время установлено [3-6], что степень физического упрочнения с целью повышения износостойкости деталей оптимальна при максимальной интенсивности деформаций. Максимальная интенсивность деформаций в условиях ударно-волнового нагружения возникает при критической скорости удара, когда образец разрушается в точке удара. По Карману и Тейлору [2] эта скорость

$$u_{кр} = \int_0^{\epsilon_M} (\rho^{-1} d\sigma / d\epsilon)^{0,5}, \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $\epsilon, \epsilon_M$  – степень текущей деформации и деформации, соответствующей пределу текучести;  $d\sigma / d\epsilon$  – тангенс угла наклона касательной к кривой упрочнения материала.

По экспериментальным данным Д. С. Кладка и Д. С. Вуда, приведенным в работе [2], для марганцовистой стали Гадфильда  $u_{кр} = 230$  м/с. Расчетные значения по (2) превышают в 2,5 раза это значения.

Относительная деформация по нормали к фронту ударной волны [2]

$$\epsilon_r = u / D = 1 - \rho_0 / \rho = 1 - v / v_0, \quad (9)$$

где  $\rho, \rho_0$  – начальная и конечная (после прохождения ударного фронта) плотность металла;  $v_0, v$  – начальный и конечный объем металла.

Для гексогена  $D = 6200$  м/с,  $\epsilon_r = 3,7\%$ ,  $v / v_0 = 0,963$ .

Полная деформация  $\epsilon_n = \frac{4}{3} v / v_0 = 0,050$ .

Для аммонита 6ЖВ  $D = 3600$  м/с;  $\epsilon_r = 6,4\%$ ,  $v / v_0 = 0,936$ ;  $\epsilon_n = 0,088$ .

Эти данные соответствуют режимам взрывного упрочнения рекомендуемым для промышленного использования [2].

Что касается следующего направления, то в настоящее время наиболее высокая износостойкость стали Гадфильда достигается при взрывотермической обработке [5]. Последняя включает упрочнение взрывом с последующим рекристаллизационным отжигом, который обеспечивает создание равновесной мелкозернистой структуры. Однако применение дополнительной термической обработки деталей в условиях карьера затратно и малопродуктивно. Более эффективно в этом случае использовать дополнительную взрывную обработку, которая приводит к образованию мелкодисперсных структур с реализацией недислокационного ме-

ханизма пластичности [6]. Это возможно при дополнительном упрочнении поверхностей сходящимися ударными волнами [6], через промежуточную среду. В качестве последней, как правило, используется вода. В условиях карьерного производства более технологично использовать мелкие фракции добываемой продукции. Другой вариант предусматривает упрочнение поверхности «бегущей» косой ударной волной соударением с метаемой технологической пластиной. Параметры процесса упрочнения соответствуют параметрам сварки взрывом. В этом случае образовавшиеся на границе раздела расплавы не успевают застыть и сварное соединение разрушается. В поверхностном слое в результате быстрого охлаждения образуется микроструктурная структура. Проведенные испытания показали, что совмещение операций упрочнения взрывом плоской ударной волной с упрочнением сходящимися ударными волнами позволили достичь износостойкости зубьев, упрочняемых взрывотермической обработкой. При совмещении процессов упрочнения «бегущей» косой волной или плоской волной с упрочнением ударными волнами от соударения с метаемой пластиной износостойкость повышается на 25-30 % по сравнению с взрывотермической обработкой. Для повышения производительности процесса комбинированной обработки процессы упрочнения можно совместить по следующей схеме (рис. 2). На первом этапе происходит контактное упрочнение партии зубьев ковшей экскаватора. На втором этапе упрочнение осуществляется по следующей схеме. Необработанные зубья 4 располагают веерообразно (рис. 2а). На упрочняемые поверхности устанавливают накладной заряд взрывчатого вещества 1. Между зарядами рядом расположенных зубьев располагают предварительно упрочненные зубья 5.

В зависимости от повторной схемы нагружения можно реализовывать: 1) упрочнение зубьев 4 косым ударом метаемой пластины; 2) упрочнение сходящимися ударными волнами; 3) нагружение, обеспечивающее интенсивную пластическую деформацию в поверхностном слое упрочняемых поверхностей. В данном случае (рис. 2б) между накладным зарядом взрывчатого вещества 1 и упрочняемой поверхностью устанавливают пластину ударника 3.

Последнее направление видимо будет связано с образованием химических элементов в технически чистом железе и углеродистых сталях в процессе сверхглубокого проникновения микрочастиц и протеканием реакций «нового класса» (ядерных) в ударно-сжатых материалах. Развиваемый в работах В. В. Драгобецкого,

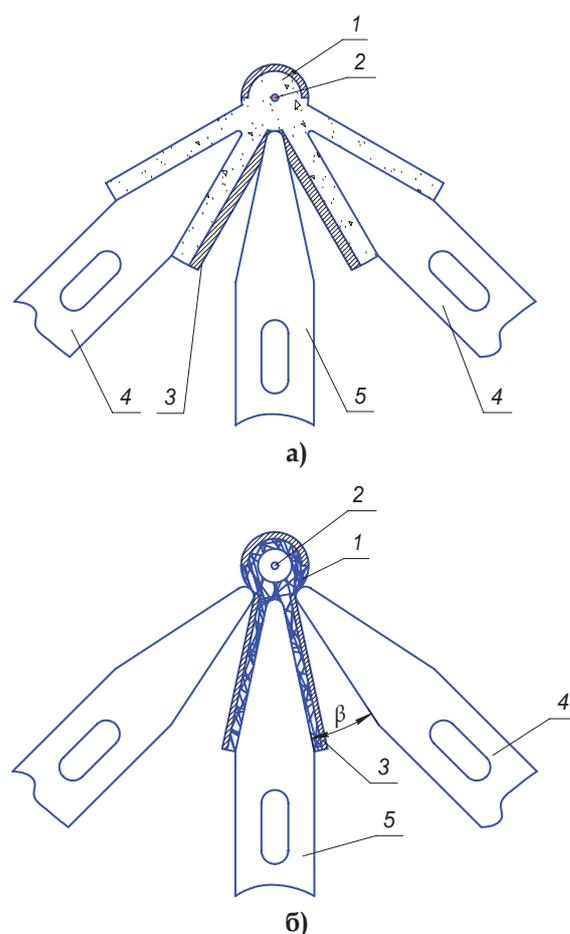


Рис. 2. Схема многократного упрочнения зубьев ковшей экскаваторов:

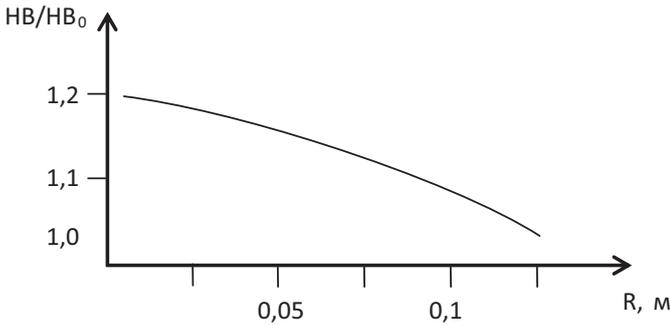
- 1 - взрывчатое вещество; 2 - электродетонатор;
- 3 - пластина ударника; 4 - зубья ковшей экскаватора, подверженные первичному упрочнению; 5 - зуб ковша экскаватора, подверженный вторичному упрочнению

В. К. Борисевича и В. В. Соболева [5] метод динамического воздействия и полученные результаты в перспективе могут быть использованы при разработке и создании принципиально новых технологий взрывной металлообработки.

Таким образом, на первом этапе происходит упрочнение стали Гадфильда плоской ударной волной, на втором - бегущей ударной волной. Дополнительный сдвиг при повторном нагружении упрочняет материал несколько быстрее, чем при плоском динамическом сжатии. При одинаковом уровне давлений параметры упрочнения бегущей волной давления увеличиваются на 6-9 %. Это же явление наблюдается и при высокоскоростной прокатке [7]. Кроме того, в этом случае происходит увеличение пластичности.

При вторичном нагружении основное влияние на степень упрочнения оказывает угол  $\beta$  между поверхностью заряда взрывчатого вещества и поверхностью зуба. Поэтому были вы-

полнены эксперименты по влиянию угла  $\beta$  на упрочнение стали Гадфильда. Величина угла изменялась от  $5^\circ$  до  $45^\circ$  через каждые  $5^\circ$ . В ходе экспериментов и их статистической обработки было установлено, что максимальное упрочнение достигается при угле  $\beta = 16^\circ 30'$ , кроме того в этих экспериментах изменялась и дистанция взрыва. Это позволило построить зависимость отношения твердости поверхности после упрочнения  $HV$  к исходной  $HV_0$  от дистанции взрыва (рис. 3).



**Рис. 3. Зависимость отношения твердости до и после упрочнения к исходной от дистанции взрыва**

Помимо этого следует учесть то, что режущая кромка зуба изнашивается крайне неравномерно. Особенно интенсивно изнашиваются кромки, прилегающие к боковым граням зуба. Дополнительно повысить твердость и износостойкость этих участков возможно, если производить инициирование плоского накладного заряда взрывчатого вещества из трех точек линейными зарядами, расположенными вдоль оси зуба. Одна точка находится в центре кромки зуба, а две другие – по краям. При подрыве линейных зарядов образуются встречные фронты детонационных волн. Это приводит к удвоению давлений на боковых кромках зуба и, соответственно, к повышению твердости и износостойкости этих участков.

**Выводы**

Резервом повышения износостойкости и долговечности деталей горного оборудования, подвергнутых взрывному упрочнению, является

оптимизация параметров процесса, обеспечивающих высокие показатели твердости и пластичности упрочняемого материала, и разработка комбинированных методов взрывной обработки. Наиболее высокие показатели износостойкости в условиях ударно-абразивного износа, более чем в 3 раза, обеспечиваются при использовании комбинации схемы упрочнения плоской ударной волной с ударными волнами от соударения метаемой пластины с упрочняемой поверхностью и при трехточечном инициировании накладных зарядов взрывчатого вещества.

**Библиографический список**

1. Добровольский А. Г. Абразивная износостойкость материалов: Справочное пособие / А. Г. Добровольский, П. И. Кошеленко. – Киев: Техника, 1989. – 126 с.
2. Крупин А. В. Обработка материалов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Г. С. Попов, М. Р. Кръстев. – М.: Металлургия, 1991. – 496 с.
3. Сорокин Г. М. Новые критерии повышения долговечности машин / Г. М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 19-23.
4. Gorbatyuk S. M. Calculation of the geometric parameters of rotary rolling by using the automated design system autodesk inventor / S. M. Gorbatyuk, V. A. Osadchii, E. Z. Tuktarov // Metallurgist. – Vol. 55. – Issue 7-8. – P. 543-546.
5. Некоторые аспекты использования процессов сварки и упрочнения взрывом в металлообработке / В. В. Драгобецкий // Технология машиностроения: журнал. – Российская федерация. – 2003. – Вып. 5 (23). – С. 10-12.
6. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
7. Jonson W. Engineering plasticity W. Jonson, P. B. Mellor. Van Nostrand company. London, 1979. – 568 p.

**Поступила 12.02.2015**

