

УДК 621.9.048.4

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЗРЫВНОГО УПРОЧНЕНИЯ****В. В. Лотоус**ОАО «Полтавский ГОК», председатель правления  
ул. Строителей, 16, г. Комсомльск, 39802, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Представлен детальный анализ явлений, сопровождающих процесс взрывной обработки материалов, и наиболее эффективных методов взрывного упрочнения. Наиболее высокие показатели износостойкости зубьев ковшей экскаватора достигнуты при взрыво-термической обработке. Обоснована возможность разработки альтернативной технологии, включающей комбинации взрывных нагрузений без термообработки. Представлена методика экспериментальных исследований. В результате исследований установлено, что сочетание контактного взрывного упрочнения с интенсивной пластической деформацией поверхностного слоя приводит к более высоким показателям износостойкости.

**Ключевые слова:** износостойкость, зубья ковшей экскаваторов, сталь Гадфильда, взрыво-термическая обработка, комбинированные технологии.

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИБУХОВОГО ЗМІЦНЕННЯ****В. В. Лотоус**ВАТ «Полтавський ГОК», голова правління  
вул. Будівельників, 16, м. Комсомльськ, 39802, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Представлений детальний аналіз явищ, супроводжуваних процес вибухової обробки матеріалів і найбільш ефективних методів вибухового зміцнення. Найбільш високі показники зносостійкості зубів ковшів экскаватора досягнуті при вибухово-термічній обробці. Обґрунтована можливість розробки альтернативної технології, що включає комбінації вибухових навантажень без термообробки. Представлена методика експериментальних досліджень. У результаті досліджень встановлено, що поєднання контактного вибухового зміцнення з інтенсивною пластичною деформацією поверхневого шару приводить до вищих показників зносостійкості.

**Ключові слова:** зносостійкість, зуби ковшів экскаваторів, сталь Гадфільда, вибухо-термічна обробка, комбіновані технології.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Несмотря на расширение номенклатуры металлов и сплавов, применяемых в горнодобывающей промышленности, повышение свойств изделий, изготавливаемых из высокомарганцовистой стали Гадфильда, остается актуальным и на сегодняшний день. Главное преимущество этой стали – способность к интенсивному упрочнению при деформации, наиболее эффективно реализуется при упрочнении ударными волнами, т.е. методом взрывного упрочнения. Последний отличается простотой, высокой производительностью и обеспечивает лучшее сочетание ряда свойств металла, чем при прокатке, накатке роликами и закалке. Интенсивное упрочнение стали Гадфильда при воздействии ударных волн связано с одновременной реализацией нескольких механизмов упрочнения [1]. Во-первых, в зернах наблюдаются развитые системы скольжения с большой плотностью дислокаций. Во-вторых, деформация ударными волнами вызывает активное двойникование по нескольким системам одновременно. В третьих, протекание под действием ударных волн фазового превращения  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ , протекающее по-мартенситному типу.

В нашей стране и за рубежом проведен большой объем исследований по упрочнению различных марок сталей в том числе высокомарганцовистых сталей. Детальный обзор этих исследований представлен в работах [1–3]. Установлено, что при использовании различных схем упрочнения (контактное и ударом твердого тела) кривые, выражающие изменение характеристик прочности (твердость, предел текучести, предел прочности) имеют максимумы,

лежащие в интервале давлений  $P=40\text{--}50$  ГПа, а характеристики пластичности (ударная вязкость, относительное удлинение и сужение) минимумы в том же диапазоне давлений. Более высокие показатели износостойкости, например, зубьев ковшей экскаваторов достигаются при взрыво-термической обработке и при упрочнении сходящимися ударными волнами.

Взрыво-термическое упрочнение [2] включает контактное взрывное упрочнение и гомогенизационный отжиг. Гомогенизация состоит из нагрева стали до  $1050$  °С и длительной выдержки (10–15 ч) при этой температуре. В результате гомогенизационного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу и уменьшение ликвации.

Большое разнообразие схем и методов взрывного упрочнения наводит на мысль: не приведет ли сочетание этих процессов к существенному повышению эксплуатационных характеристик упрочняемых деталей. Контактное упрочнение позволяет достигнуть максимальной твердости и прочности упрочняемых материалов, но износостойкость уступает взрыво-термическому упрочнению. Упрочнение бегущей «косой» ударной волной позволяет получить мелкозернистую гомогенную структуру в поверхностном слое. Это приводит к повышению ударной вязкости до уровня соответствующего гомогенизационному отжигу. Необходимость отжига после ударно-волнового нагружения, сопровождающее деформацией металла, связано с появлением микропоры и микротрещины. Возникновение последних проявляется в из-

менении плотности обрабатываемого материала неоднородности после распределения показателей пластичности по объему тела. Это вызывает появление в обрабатываемом материале упругих напряжений подобных термическим [3]. Возникновение микроскопических нарушений сплошности, существенно влияют на эксплуатационные свойства и характеристики изделия, в частности на стойкость к ударно абразивному изнашиванию. Микроскопические нарушения сплошности могут самопроизвольно развиваться после ударно-волнового нагружения, когда в материале произошли фазовые превращения. В основе восстановления сплошности и показателей пластичности лежат диффузионные процессы переноса вещества в поры и микротрещины и их диффузия к поверхности [4]. Учитывая тот факт, что при воздействии ударных волн с высоким градиентом напряжений коэффициент диффузии возрастает в несколько тысяч раз, эффективность взрывного нагружения может превзойти по своим эффектам длительное термическое воздействие [2].

Цель исследований – обоснование возможности разработки комбинированных технологий взрывного упрочнения, эффективность которых по повышению износостойкости.

#### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Получение мелкозернистой структуры наблюдалась не только в процессах взрывной обработки бегущей ударной волной, но и при нагружении сходящими ударными волнами. Поэтому при разработке схем комбинированной обработки следует рассмотреть и комбинации упрочнения и с этим методом. Кроме того, при взрывном нагружении ударная волна, распространяющаяся по металлу, распадается на две волны напряжений – продольная или объемная и поперечная или сдвиговая. Прохождение поперечных волн, скорость которых в два-три раза меньше скорости продольных, приводит к образованию тангенциальных напряжений. То, что скорость сдвиговых волн меньше объемных, приводит к чисто сдвиговому нагружению. В этих условиях происходит интенсивная пластическая деформация с образованием микро и субмикроскопических структур с высокими эксплуатационными характеристиками. Следовательно можно выделить такие комбинации комбинированных технологий взрывного упрочнения взамен технологии взрывотермической обработки:

1. Контактный взрыв + соударение с метаемой пластиной.
2. Контактный взрыв + упрочнение сходящими ударными волнами.
3. Контактный взрыв + интенсивная пластическая деформация (импульсная).

Контактный взрыв может производиться плоской и бегущей волной. Установлено [1], что схема упрочнения бегущей волной, скорость фронта которой превышает скорость звука в обрабатываемом материале, более эффективна, чем упрочнение плоской волной. Поэтому рассматривает только этот вариант. При построении классификатора процессов им-

пульсной обработки имеет смысл рассмотрения и второго варианта нагружения плоской волны. При выборе комбинированного метода взрывного упрочнения необходимо контактный взрыв выполнить при параметрах, обеспечивающих наиболее эффективное упрочнение и благоприятную структуру обрабатываемого материала. Это соответствует давлению на фронте ударной волны 40–42 ГПа и скорости детонации 5000–5200 м·с<sup>-1</sup>. Параметры повторного нагружения должны обеспечить сочетание физико-механических, при котором износостойкость обрабатываемых деталей будет максимальной. При разработке комбинированной технологии взрывного упрочнения необходимо, чтобы одно из основных преимуществ взрывного упрочнения было сохранено. Это можно достигнуть при реализации комбинированного нагружения по следующей схеме. На первом этапе происходит контактное упрочнение партии зубьев ковшей экскаватора. На втором этапе упрочнение осуществляется по следующей схеме. Необработанные зубья – 4 – располагают веерообразно (рис. 1). На упрочняемые поверхности устанавливают накладной заряд взрывчатого вещества 1. Между зарядами рядом расположенных зубьев располагают предварительно упрочненные зубья 5.

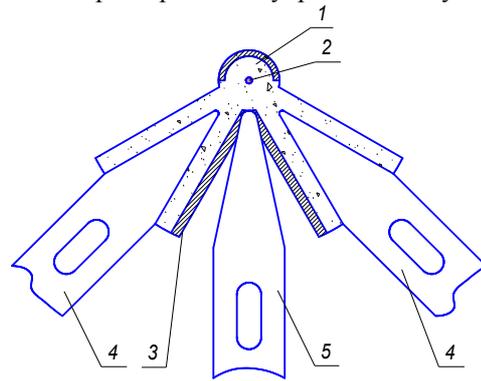


Рисунок 1 – Схема многократного упрочнения зубьев ковшей экскаваторов: 1 – взрывчатое вещество; 2 – электродетонатор; 3 – пластина ударника; 4 – зубья ковшей экскаватора, подвергаемые первичному упрочнению; 5 – зуб ковша экскаватора, подвергаемый вторичному упрочнению

В зависимости от повторной схемы нагружения можно реализовывать:

- 1) упрочнение зубьев четыре косым ударом метаемой пластины;
- 2) упрочнение сходящимися ударными волнами;
- 3) нагружение, обеспечивающее интенсивную пластическую деформацию в поверхностном слое упрочняемых поверхностей.

В *первом случае* (рис. 2) между накладным зарядом взрывчатого вещества 1 и упрочняемой поверхностью устанавливают пластину ударник 3.

Во *втором случае* (рис. 3) пространство между накладным зарядом ВВ и упрочняемой поверхностью зубьев устанавливают прокладки из резины или полиуретана, либо оставляют пустым.

В третьем случае (рис. 3) это пространство (между накладным зарядом и упрочняемой поверхностью) заполняют ВВ, которое имеет скорость детонации. Изменяя высоту накладного заряда взрывчатого вещества и угол  $\beta$  – между осями зубьев можно в широких пределах регулировать параметры нагружения. В первом случае это скорость точки  $V_k$  контакта и угол соударения  $\gamma$ . Во втором случае угол конусности и передающая среда (воздух, резина). В третьем случае – скорость детонации взрывчатого вещества.

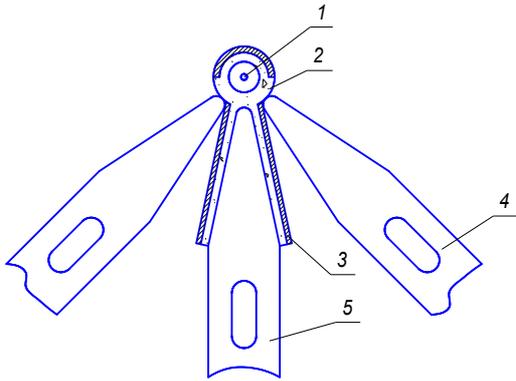


Рисунок 2 – Схема зубьев:

- 1 – взрывчатое вещество; 2 – электродетонатор;  
3 – пластина ударника; 4 – зубья ковше экскаватора, подвергаемые первичному упрочнению;  
5 – зуб ковша экскаватора, подвергаемый вторичному упрочнению

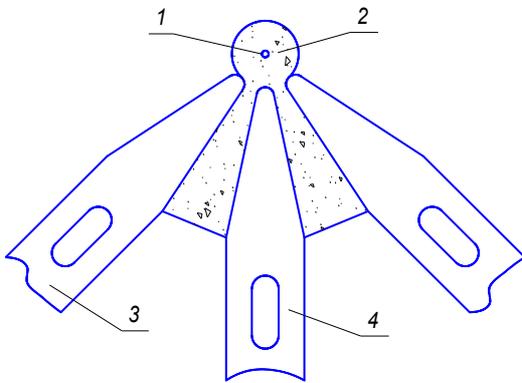


Рисунок 3 – Схема получения самозатачивающихся зубьев: 1 – взрывчатое вещество; 2 – электродетонатор; 3 – зубья ковше экскаватора, подвергаемые первичному упрочнению; 4 – зуб ковша экскаватора, подвергаемый вторичному упрочнению

При выборе параметров процесса следует учесть ранее полученные данные по взрывному упрочнению [1–4]:

а) при упрочнении сходящимися волнами для каждого материала существует свой «критический» угол между наклонно расположенными зарядами ВВ и для сталей он составляет  $33^\circ$ ;

б) степень упрочнения зависит от количества и мощности ВВ до определенной для каждого материала границы;

в) увеличение высоты заряда ВВ незначительно влияет на поверхностное упрочнение;

г) по мере наращивания давления во фронте ударной волны наблюдается повышение твердости, при дальнейшем увеличении давления (свыше 42 ГПа) твердость снижается.

Учет этих факторов позволяет существенно уменьшить объем экспериментальных исследований для определения степени упрочнения и степени увеличения износостойкости в зависимости от метода упрочнения и параметров упрочнения.

В экспериментах использовались зубья ковше экскаваторов из высокомарганцевой стали закаленные и незакаленные. В качестве ВВ использовались накладные (пластиковые) и насыпные заряды. Иницирование зарядов осуществлялось электродетонатором.

Сравнение различных схем упрочнения и определение влияния параметров нагружения проводилось контролем упрочнения, который осуществлялся измерением твердости и испытаниями на износостойкость в производственных условиях. Измерение твердости производилось твердомером универсальным NOVOTEST T, который позволяет производить экспресс-анализ твердости зубьев ковше экскаваторов на месте эксплуатации и упрочнения (специализированный участок для взрывной обработки и испытаний). Измерение производилось по методу Роквелла (HRC), Бринелля (HB), и Викерса (HV). Использование метода Бринелля связано с тем, что этот метод позволяет оценить и величину предела прочности ( $\sigma_b$ ) на растяжение путем автоматического пересчета со шкалы твердости Бринелля в соответствии с ГОСТ 22761–77. Твердость измерялась перед упрочнением и на всех этапах упрочнения зубьев.

Программа экспериментов включала следующие этапы. При упрочнении сходящимися ударными волнами углом между зарядами соответствовал критическому. Между зарядом ВВ и упрочняемой поверхностью располагали передающую среду: воду, резину и воздух.

При упрочнении путем создания условий для интенсивной пластической деформации использовались ВВ с различной скоростью детонации (смесь аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой в соотношениях 1:1; 1:2; 1:4). Интервал варьирования скоростей детонации принимался равным удвоенной среднеквадратичной ошибке определения скорости детонации –  $450 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Для упрочнения косым ударом пластины проведен полнофакторный эксперимент 2<sup>2</sup>. Значение основных факторов и интервал их варьирования приведен в табл. 1 и результаты экспериментов – в табл. 2.

Таблиця 1 – Значение факторов

Фактор	Интервал варьирования		
	- 1	0	+ 1
$x_1$ – угол наклона пластины-ударник	4	11	18
$x_2$ – скорость точки контакта	2200	3100	4000

Таблиця 2 – Матрица планирования эксперимента  $2^2$

Номер эксперимента	Вспомогательная переменная	Планирование		Расчет $x_1 \cdot x_2$	Скорость линейного износа $V_n$ мм/мин
		$x_1$	$x_2$		
1	+1	- 1	- 1	+1	0,3
2	-1	+ 1	- 1	-1	0,24
3	-1	- 1	+ 1	-1	0,28
4	+1	+ 1	+ 1	+1	0,3

Для оценки величины износа используется скорость линейного износа [5]:

$$V_n = \frac{l_o - l_t}{t} \quad (1)$$

где  $l_o$  – расстояние от режущей части кромки зуба до базы;  $l_t$  – расстояние от кромки зуба до той же базы после эксплуатации;  $t$  – время эксплуатации.

Значения коэффициентов регрессии рассчитанных по известной методике:  $b_0 = 0,18$ ;  $b_1 = - 0,01$ ;  $b_2 = + 0,01$ ;  $b_3 = 0,22$ .

Уравнение регрессии

$$V_n = 0,18 - 0,01x_1 + 0,01x_2 + 0,02x_1x_2. \quad (2)$$

После расчета дисперсии параметра оптимизации, критерия Стьюдента и доверительного интервала установлено, что значимыми являются только линейные члены регрессии. Следовательно, для уменьшения скорости линейного износа более эффективно увеличить угол наклона пластины ударника.

Предварительно упрочнялась партия зубьев ковшей экскаватора (6 шт.) с использованием накладного заряда ВВ (контактный взрыв). Затем упрочнению по этой же технологии упрочнялась следующая партия зубьев (6 шт.) между этими зубьями располагались пять предварительно упрочненных зубьев (рис. 1). Цикл повторялся до использования всех схем упрочнения (рис. 1, 2). На заключительной стадии проводилось одностороннее упрочнение

зубьев для обеспечения условий для самозатачивания. Кроме того, была изготовлена партия зубьев, на упрочняемые поверхности которых локально приваривались пластины из твердых сплавов.

На всех этапах упрочнения производился замер твердости. При контактном взрыве достигнуто увеличение твердости с 2700–2900 МПа до 5000–5800 МПа. При повторном нагружении твердость снижалась практически во всех проведенных экспериментах на 100–100 МПа.

Производственные испытания на линейный износ показали, что упрочнение по комбинированной технологии с использованием всех вариантов нагружения позволили достигнуть показателей износостойкости, соответствующих взрыво-термическому упрочнению. При некоторых параметрах нагружения  $V_k$  и  $\alpha$  (схема рис. 1) и скоростях детонации (схема рис. 2,в) достигнуто аномально высокое повышение износостойкости. Зубья практически не изнашивались.

**ВЫВОДЫ.** Детальный анализ явлений сопровождающих процессы взрывной обработки и наиболее эффективный процесс взрывного упрочнения позволил установить возможность получения сочетания механических свойств материалов характерных для взрыво-термического упрочнения при комбинированных технологиях взрывного упрочнения.

Наиболее высокие показатели износостойкости достигнуты при сочетании технологии контактного взрыва с интенсивной пластической деформацией в условиях импульсного нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Драгобецький В.В. Нові напрями удосконалення властивостей металевих виробів методами вибухового оброблення // *Машинознавство: Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал.* – Львів, 2002. – № 6 (60). – С. 38–41.
2. Новый метод взрывного упрочнения элементов горного оборудования / В. В. Лотоус, В. М. Чебенко, В. В. Драгобецький // *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва.* – Науково-виробничий журнал: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2 (10). – С. 68–72.
3. Драгобецький В.В. Нові напрямки удосконалення металевих виробів методами вибухового оброблення // *Машинознавство.* – 2002. – № 6. – С. 38–42.
4. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов / В.С. Кривцов, В.К. Борисевич // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 11 (47). – С. 10–17.
5. Абразивная износостойкость материалов / А.Г. Добровольский, П.И. Кошеленко // *Справочное пособие.* – К.: Техника, 1989. – 128 с.

## EFFICIENCY ESTIMATION OF THE COMBINED EXPLOSIVE WORK-HARDENING TECHNOLOGIES

**V. Lotous**

«Poltava Ore Mining and Processing Plant», OJSC

vul. Stroitelei 16, Komsomolsk, 39802, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

In this paper, the author has presented a detailed analysis of the phenomena accompanying the process of the explosive treatment of materials and the most effective methods of the explosive work-hardening. It is shown that the highest indexes of wear resistance of bucket teeth of a power-shovel were attained at the explosive thermal treatment. A possibility of development of the alternative technology including combinations of explosive loading without heat treatment is grounded. Also, the technique of the experimental researches conducted is described in the paper. The research results allow determining that combination of the contact explosive work-hardening with the intensive elastic deformation of a superficial layer results in higher indexes of wear resistance.

**Key words:** wear resistance, bucket teeth of power-shovels, Gadfield's steel, explosive and thermal treatment, combined technologies.

### REFERENCES

1. Dragobetskyi, V. (2002), "New ways of hardware property improvement by explosive forming", *Mechanical Engineering: National Monthly Scientific-Technical and Industrial Journal*, Lviv, Ukraine, no. 6 (60), pp. 38–41.

2. Lotous, V., Chebenko, V., Dragobetsky, V. (2012), "A new explosive hardening method of mining machine components", *Up-to-date resource – and energy – saving technologies in mining industry*, iss. 2 (10), pp. 68–72.

3. Dragobetskyi, V. (2002), "New ways of hardware property improvement by explosive forming", *Mechanical Engineering*, no. 6, pp. 38–42.

4. Kryvtsov, V., Borisevich, V. (2007), "The state and prospects of application of the impulsive energy sources for technological processes of working of materials", *Aerospace technique and technology*, no.11 (47), pp.10–17.

5. Dobrovolskiy, A., Koshelenko, P. (1989), *Abrazivnaya iznosostoikost materialov* [Abrasive wear resistance of materials], Tekhnika, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла 25.06.2013.