

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**В. В. Лотоус**

ОАО «Полтавский ГОК»

ул. Строителей, 16, г. Комсомольск, 39802, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

**М. В. Загирняк, В. В. Драгобецкий**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Обоснована актуальность исследований по повышению износостойкости деталей горного оборудования. Это связано с тем, что в настоящее время физический износ производственных фондов горно-металлургического комплекса Украины составляет 70–75 %. Дан анализ факторов, которые влияют на прочностные показатели поверхностного слоя упрочняемой детали. Нашло подтверждение положение о том, что приращение износостойкости поверхностного слоя детали будет наибольшим при граничном значении равномерной деформации. Аналитическое значение граничной равномерной деформации определяется с учетом динамики упрочнения. Расчет параметров нагружения при взрывном упрочнении выполнен с использованием уравнений сжатого ударной волной металла и условия Чепмена-Жуге. Исследования могут быть использованы при оптимальном проектировании процессов упрочнения пластическим деформированием и штамповки деталей, работающих в условиях интенсивного износа и знакопеременных нагрузок.

**Ключевые слова:** износ, равномерная деформация, упрочнение, взрыв, зубья ковшей экскаваторов.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ЗМІЦНЕННІ ДЕТАЛЕЙ ГІРНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ

**В. В. Лотоус**

ВАТ «Полтавський ГЗК»,

вул. Будівельників, 16, м. Комсомольськ, 39802, Україна.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

**М. В. Загірняк, В. В. Драгобецький**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Обґрунтована актуальність досліджень щодо підвищення зносостійкості деталей гірничого устаткування. Це пов'язано з тим, що на даний час фізичний знос виробничих фондів гірничо-металургійного комплексу України складає 70–75 %. Надано аналіз чинників, які впливають на показники міцності поверхневого шару зміцнюваної деталі. Знайшло підтвердження положення про те, що приріст зносостійкості поверхневого шару деталі буде найбільшим при гранич-

ному значенні рівномірної деформації. Аналітичне значення граничної рівномірної деформації визначається з урахуванням динаміки зміцнення. Розрахунок параметрів навантаження при вибуховому зміцненні виконаний з використанням рівнянь стислого ударною хвилею металу та умови Чепмена-Жуге. Дослідження можуть бути використані при оптимальному проектуванні процесів зміцнення пластичною деформацією і штампування деталей, що працюють в умовах інтенсивного зносу і знакозмінних навантажень.

**Ключові слова:** знос, рівномірна деформація, зміцнення, вибух, зуби ковшів екскаваторів.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Горно-металлургический комплекс Украины (ГМК) занимает основное место в национальной экономике, обеспечивая треть промышленного производства и приблизительно 40 % экспортной выручки. Согласно Постановлению Кабинета министров Украины от 12 сентября в 2011 г. № 1130 "Об утверждении Государственной программы развития внутреннего производства" предусмотрено обеспечение развития перспективных промышленных технологий с использованием достижений отечественной науки и техники.

Динамическое развитие ГМК Украины не представляется успешным без повышения качества металлоизделий и снижения потерь на их производство. В условиях, когда физический износ производственных фондов ГМК Украины по оценкам специалистов представляет приблизительно 70–75 %, актуальной научно-технической проблемой является разработка комплекса мероприятий повышения ресурса технологического и вспомогательного горнодобывающего оборудования, которое обеспечит эффективность переработки горной породы улучшенного качества и конкурентоспособной на мировых рынках металлов.

В настоящее время исследования по разработке технологий упрочнения взрывом проводятся в Болгарии, Великобритании, Польше, России, США, Украине и Японии. Наиболее полно и детально изучено и используется в промышленности упрочнение взрывом высокомарганцовистых сталей. Основная область применения процесса – детали горнообогатительного оборудования и элементы рельсовых путей. Основные особенности упрочнения взрывом и его основные преимущества широко освещены в научно-технической литературе [1–3]. Установлено, что на степень упрочнения высокомарганцовистых сталей наибольшее влияние оказывает приложенное давление, длительность ударного импульса, характер нагружения, скорость перемещения линейного ударноволнового импульса, степень деформации (интенсивность деформаций) упрочняемых деталей [1]. Считается [1–2], что на степень упрочнения влияет комплекс прочностных свойств, характеризующихся условиями эксплуатации зубьев ковшей экскаватора. Однако согласно современной теории абразивного износа на износостойкость влияют не только прочностные свойства материала, но и показатели пластичности материалов (ударная вязкость, относительное сужение и удлинение) [4].

Важнейшим фактором, влияющим на структуру, свойства и деформируемого металла, является давление, которое в свою очередь зависит от давления фронта волны детонации. В свою очередь, последнее взаимосвязано со скоростью дето-

нации. Как правило, при взрывном упрочнении металлов, в том числе и высокомарганцевистой стали, наиболее часто используют взрывчатые вещества со скоростью детонации 7000–9000 м·с<sup>-1</sup>. Считается, что чем выше скорость детонации, тем больше прочностные показатели металла и глубина упрочнения [1]. Однако, как это сказывается на износостойкости упрочняемых деталей, в литературе не упоминается.

На упрочнение оказывает влияние и длительность взрывного нагружения. Принято считать [1], что влияние времени воздействия заключается в обеспечении более продолжительного периода перестройки дислокационных перемещений. Экстремальное значение объемной доли двойников и плотности их границ приходится на 0,07 мкс [1]. Это время соответствует завершению перехода  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ , происходящему по мартенситному типу [1].

На упрочнение влияет степень деформации (остаточная деформация упрочняемой детали). С одной стороны она приводит к созданию новых дефектов, а с другой – сопровождается тепловым эффектом, ликвидируя большинство созданных дефектов [1–3]. Для металлов существует определенная степень деформации до которой происходит возрастание твердости поверхностных слоев, при дальнейшем увеличении степени деформации упрочнение снижается, доходя до первоначальной твердости. В работе [1] приведены экспериментальные данные, согласно которым на степень остаточной деформации влияет отношение  $\frac{S}{n}$  ( $S$  – площадь

обработанного взрывом образца;  $H$  – его высота). При определенной степени деформации, для определенного упрочняемого материала прочность поверхностного слоя становится максимальной. В некоторых случаях при взрывном упрочнении наблюдается значительное повышение прочности при отсутствии внешних признаков остаточной деформации, причем в поверхностном слое возникает наклеп такой же, как от холодной прокатки при деформации 80–90 %.

Проводились также исследования [1] по влиянию степени деформации на упрочнение взрывом предварительно упрочняемой статически высокомарганцевистой стали 110Г13Л. Установлено, что по мере упрочнения взрывом способность стали 110Г13Л к статической деформации несколько уменьшается и при упрочнении поверхности образца импульсной нагрузкой до HB4100 образец покрывается трещинами при степени деформации 36–40 %, приобретая при этом твердость свыше HB 5000. В процессе работы зубья ковшей экскаваторов, взаимодействующие с кусками горной массы, получают остаточную деформацию до 30–35 % с увеличением средней твердости HB 5500 при износе на 75 % [1]. Высокие приращения износостойкости возможно получать при предварительном упрочнении поверхности для создания малой степени деформации рабочей поверхности. Однако в данных исследованиях не установлена величина оптимальной деформации, а приведенные графические зависимости не имеют экстремуму и не соответствуют ранее проведенным исследованиям.

При разработке технологии взрывного упрочнения следует учитывать, что остаточная степень деформации зависит от способа нагружения или схемы упрочнения: плоской и бегущей волной при контактном взрыве, плоской и бе-

гущей ударными волнами от соударения с метаемой пластинами. При контактном взрыве остаточная деформация, как правило, в два раза выше последней, чем от соударения с метаемой пластиной.

На показатели упрочнения при эксплуатации и упрочняющей обработке влияет схема напряженно-деформированного состояния. Ударно-волновое нагружение можно проводить в условиях неравномерного сжатия и двухосного сжатия. При двухосном сжатии достигаются более значительные остаточные деформации.

Таким образом, накоплен значительный экспериментальный материал по упрочнению взрывом деталей из высокомарганцовистых сталей, и установлено влияние параметров процесса упрочнения взрывом на прочностные показатели деталей. Однако параметры и их соотношение, при которых детали при заданных эксплуатационных условиях обладают максимальной износостойкостью, не найдены.

Цель работы – установление параметров процесса взрывного упрочнения, обеспечивающих такое сочетание физико-механических характеристик материала поверхностного слоя, при которых износостойкость зубьев ковшей экскаватора максимальна.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Оптимальным режимом упрочнения является такой, который обеспечивает максимальное приращение износостойкости зубьев ковшей экскаваторов. Решение задачи оптимизации параметров процесса упрочнения имеет следующие аспекты: физический, технологический, экономический и экологический.

Физический заключается в выборе целевой функции (критерия оптимизации) и определении параметров оптимизации.

Технологический – в обеспечении условий поверхностного упрочнения рабочей поверхности зуба, соответствующих параметрам оптимизации.

Экономический – связан с минимизацией технологической себестоимости технологических затрат на упрочняющую обработку. При этом затраты на процессе упрочнения должны быть существенно меньшими затрат на производство новых зубьев.

Экологический – связан с минимизацией ущерба окружающей среде при упрочняющей обработке.

Для зубьев ковшей экскаваторов с принятой технологией их изготовления – литые с последующей закалкой, заданной формой режущей части зуба и имеющимися в наличии условиями эксплуатации, – износостойкость, обусловленная поверхностным упрочнением взрывом, зависит от твердости и прочности упрочняемого слоя, пластических свойств и глубины упрочнения.

В рамках современной теории износа износостойкость марганцовистых сталей зависит от следующих механических характеристик:  $HV$ ,  $HB$ ,  $HRC$  – твердость стали;  $\sigma_s$  – предел прочности;  $\psi$  – относительное сужение. Одни и те же авторы приводят зависимости, где износостойкость прямопропорциональна величине произведения  $HB \cdot \psi$  [4], или выражается через более сложные выражения содержащие произведение  $(HV)^{0,5}$  на двучлен, содержащий показатель

енергоемкости стали, характеризующий количество внешней энергии поглощенной единицей объема металла при его пластической деформацией до разрушения. Максимум энергоемкости находится на границе хрупковязкого перехода [4]: в вязкой области разрушения прослеживается ее рост, а в хрупкой – снижение [4]. Следовательно, оптимальное физическое состояние поверхностного слоя зубьев в процессе нагружения (в процессе эксплуатации или при поверхностном упрочнении), определяется конкурирующим влиянием двух одновременно протекающих процессов – физико-механического упрочнения (наклепа) и разупрочнения, обусловленного образованием и развитием микродефектов в поверхностном слое металла зуба [4] в хрупкой области.

Следовательно, увеличение износостойкости будет наибольшим при оптимальном значении интенсивности деформаций  $\varepsilon_{iopt}$ , причем  $\varepsilon_{is} < \varepsilon_{iopt} < \varepsilon_{ипраз}$ , где  $\varepsilon_{is}$  и  $\varepsilon_{ипраз}$  – интенсивность деформаций на пределе текучести и непосредственно перед разрушением.

В настоящее время установлено, что главная часть деформационного упрочнения высокомарганцевой стали исчерпывается на стадии равномерной деформации [4] или, что соответствует границе хрупковязкого перехода. Кроме того, наиболее интенсивный рост количества и размеров микродефектов наблюдается за пределами равномерной деформации. Следовательно, из этих рассуждений, приведенных в работах [4–6] следует, что оптимальная интенсивность деформаций равна  $\varepsilon_p = \varepsilon_{iopt}$ , где  $\varepsilon_p$  – предельная равномерная деформация высокомарганцевой стали.

Предельная деформация определяется по результатам либо стандартных испытаний образцов на растяжение при использовании статических методов упрочнения, либо динамических испытаний на растяжение при взрывном упрочнении.

Достаточно точные значения  $\varepsilon_p$  с учетом динамики процесса упрочнения можно находить по уточненной зависимости, полученной в работе [6]:

$$\varepsilon_p = 245 \cdot (K_D \cdot HD)^{-1} \quad (1)$$

где  $K_D = \frac{\sigma_T^D}{\sigma_T}$  – коэффициент динамический для высокомарганцевой стали;

HD – пластическая твердость материала зуба ковша экскаватора (МПа);  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_T^D$  – динамический предел текучести.

Учитывая, что данных по пластической твердости высокомарганцевых сталей нет, ее можно выразить через твердость по Бринеллю или Роквеллу по зависимостям и графикам, приведенным в работе [6].

При исходной твердости поверхности зубьев ковшей экскаваторов из стали Гадфильда  $HB=2000$ ,  $HD=2450$ . Если сталь подвергнута предварительному упрочнению до твердости до  $HB=4000$ ,  $HD=5280$ . Для стали Гадфильда

$K_D = \frac{\sigma_T^D}{\sigma_T} = \frac{106}{40,2} = 2,64$  и значения  $\varepsilon_p = 4,6\%$  при  $HV=2000$ ;  $\varepsilon_p = 2,3\%$  при  $HV=4000$ .

Подтверждением факта существования подобного явления при взрывном упрочнении является то, что на конечный результат упрочнения оказывают влияние исходные механические свойства (история нагружения) обрабатываемого материала [1]. Кроме того, установлено [1], что повышение давления на металл со стороны продуктов взрыва приводит к упрочнению металла до определенного значения, и дальнейшее повышение давления на металл дает степень упрочнения меньше предыдущей, максимально возможной, т.е. для каждого металла существует оптимальное значение давления нагружения, соответствующее определенному значению интенсивности деформаций, а именно, предельному значению равномерной степени.

Приведенная методика определения оптимальных параметров нагружения при упрочнении методами холодной пластической деформации, в том числе и взрывном упрочнении, может найти применение при определении параметров деформирования для получения деталей, работающих в экстремальных условиях эксплуатации при знакопеременных нагрузках. При проектировании штампованных деталей необходимо также учитывать то, что максимальная износостойкость деталей соответствует деформациям равным равномерным. Следовательно, при изготовлении штампованных, профилированных и катанных деталей максимальные деформации (интенсивность деформаций) не должны превышать предельных.

Наиболее эффективное упрочнение в результате взрывного поверхностного нагружения достигается при определенном соотношении давления детонационной волны и скорости детонации. По этим параметрам проводится расчет продольной и поперечной деформации.

Таким образом, накоплен большой эмпирический материал по упрочнению изделий из высокомарганцевых сталей. Однако до сих пор не установлены наиболее эффективные параметры взрывного нагружения при упрочнении.

Зубья ковшей одноковшовых экскаваторов, работающих при разборке взорванной скалы, испытывают значительные динамические нагрузки. Об этом свидетельствует величина степени поверхностного наклепа твердостью порядка 5000–5500 *HV* при его глубине до 5–6 мм при исходной твердости поверхности зуба 2000–2500 *HV*.

Располагая значениями  $\varepsilon_p$ , определяем величину параметров нагружения при взрывном упрочнении с использованием уравнения, описывающего изменения параметров сжатого ударной волной металла, установленными на основании общих законов механики:

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_t = \frac{u}{D} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i = \frac{2\sqrt{2}}{3} \varepsilon_r \quad (3)$$

$$P_x = \left( \frac{3k-1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}} P_n \left[ \frac{H}{D(H \cdot D^{-1} + t_o)} \right]^k, \quad (4)$$

$$a_m = a + \lambda u, \quad (5)$$

$$t_o = \delta_m (a + \lambda u), \quad (6)$$

$$P_x = \rho u \cdot a_m, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_t$  – относительные деформации по нормали и касательной к фронту ударной волны;

$P_n$  – давление на фронте детонации, определяемое согласно условию Чопмена-Жуге;

$P_x$  – давление на поверхности упрочняемой детали;

$t_o$  – время прохождения ударной волны по упрочняемой детали;

$a$ ,  $\lambda$  – коэффициенты ударного сжатия металла;

$k$  – показатель адиабаты взрывчатого вещества;

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформации.

Из системы уравнений (2) – (7) по значению  $\varepsilon_p = 2,3$  % вычисляем соответствующие максимальной износостойкости поверхностного слоя значения  $P_x$  и  $D$ .

Дополнительно учитываем зависимости  $P_x$  и  $D$  и от высоты заряда для стальных деталей разной толщины, которые приведены в работе [1].

По значениям  $P_x$  и  $D$  подбираем взрывчатое вещество.

Сопоставление эксплуатационных параметров зубьев ковшей экскаваторов упрочненных при применении традиционных взрывчатых веществ и обеспечивающих оптимальные значения  $D$  и  $P_x$  показало повышение износостойкости упрочненных по оптимальной технологии на 28–35 %.

**ВЫВОДЫ.** В результате анализа опубликованных в научно-технической литературе результатов экспериментальных исследований подтверждено положение о том, что приращение износостойкости поверхностного слоя деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа, будет наибольшим на границе стадии равномерной деформации материала.

Приведена методика расчета оптимального давления и скорости детонации при взрывном упрочнении, основанная на решении системы уравнений изменения параметров сжатого ударной волной металла и условия Чепмена-Жуге.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Г.С. Попов, М.Р. Кръстев. – М.: Металлургия, 1991. – 496 с.
2. Mahajan S. Metallurgical effects of planar shock waves in metals and alloys // II Phys. status solid; Ser. A 1970. – 2, N 2. – P.P. 187–200.

3. Weertnran J. Dislocation mechanics at high strain rates // Metallurgical effects at high strain rate. – N. Y.; L.: Plenum Press. 1973. – P.P. 319–332.

4. Новый метод взрывного упрочнения элементов горного оборудования / В.В. Лотоус, В.М. Чебенко, В.В. Драгобецький // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2 (10). – С. 68–72.

5. Абразивная износостойкость материалов: справочное пособие. / А.Г. Добровольский, П.И. Кошеленко. – К.: Техника, 1989. – 128 с.

6. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

### OPTIMIZATION OF PLASTIC DEFORMATION PARAMETERS AT HARDENING MINING EQUIPMENT ELEMENTS

**V. Lotous,**

OAS «Poltava GOK»

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

**M. Zagirnjak, V. Dragobetsky**

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

The urgency of researches on increase of wear resistance of parts of the mining equipment is proved. It is connected with the fact that now physical deterioration of the production assets of the mining metallurgical complex of Ukraine makes 70–25 %. The analysis of the factors which influence the strength parameters of the superficial layer of the part is given. The postulate that an increment in wear resistance of the superficial layer of the part will be the greatest at the boundary value of the uniform deformation proved to be true. The analytical value of boundary uniform deformation is determined in view of the dynamics of hardening. The calculation of the loading parameters at the explosive hardening is executed with the help of the equations of the compressed by a shock wave metal and condition Chapmen-Guge. The researches can be used at the optimum designing of the processes of hardening by plastic deformation and stamping of parts working under conditions of intensive deterioration and character variable loadings.

**Key words:** deterioration, uniform deformation, hardening, explosion, dredge bucket teeth.

### REFERENCES

1. Krupin, A. (1991), *Obrabotka metalov vzrivom* [Explosive working of metals], Metalurgiya, Moscow, Russia.

2. Mahajan S. Metallurgical effects of planar shock waves in metals and alloys II Phys. status solid; Ser. A 1970. – 2, № 2. – Pp. 187–200.

3. Weertnran J. Dislocation mechanics at high strain rates // Metallurgical effects at high strain rate. – N.Y.; L.: Plenum Press. ] 973. – Pp. 319–332.

4. Lotous V., Chebenko, V., and Dragobetskiy, V. (2012), “A new explosive hardening method of mining machine components”, *Suchasni resursoenergozberigauchi*



*technologii girnichogo virbnictva.* – Kremenchuk: KrNU, 2012. – Vip. 2(10). – pp. 68–72.

5. Dobrovolskiy, A., Koshelenko, P. (1989), *Abrazivnaya iznosostoikost materialov: spravochnoe posobie* [Abrasive wear materials], Technika, Kyiv, Ukraine.

6. Drozd, M., Matlin, M., and Sidyakin, U. (1986) *Ingenernie raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoy deformacii* [Engineering calculations of elastic-plastic contact deformation ], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 23.10.2013.

УДК 622.281

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ**

**А. Н. Шашенко, К. В. Кравченко, А. Ю. Король**

Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»

просп. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, kravchenko\_k\_v@i.ua

Предложен новый подход к численному моделированию процесса потери устойчивости пород почвы в выработках глубоких угольных шахт. В его основу положена теория бифуркации эмпирического состояния приконтурного породного массива в окрестности одиночной выработки глубокого заложения. Установлены закономерности протекания геомеханических процессов в окрестности одиночной выработки. В численные модели заложены горно-геологические условия ПСП «Шахта «Алмазная» и шахта «Добропольская» ШУ «Добропольское» ОАО ДТЭК.

**Ключевые слова:** численная модель, устойчивость пород почвы, бифуркация, закономерности деформирования контура.

## **ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПОРІД ГРУНТУ У ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДЕННЯ**

**О. М. Шашенко, К. В. Кравченко, А. Ю. Король**

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»

просп. Карла Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, kravchenko\_k\_v@i.ua

Запропоновано новий підхід до чисельного моделювання про-процесу втрати стійкості порід ґрунту у виробках глибоких вугільних шахт. У його основу покладена теорія біфуркації емпіричного стану приконтурного породного масиву навколо одиночної виробки глибокого закладення. Встановлено закономірності протікання геомеханічних процесів навколо одиночної виробки. У чисельні моделі закладені гірничо-геологічні умови ПСП «Шахта» Алмазна» і шахта «Добропольська» ШУ «Добропольское» ВАТ ДТЕК.

**Ключові слова:** чисельна модель, стійкість порід ґрунту, біфуркація, закономірності деформування контуру.