

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРООБРАБОТКЕ

*Розглянуті питання енергетичної сутності явищ, які протікають у поверхневому шарі деталі при деформації, а також теорія деформації та структурно-енергетичний аналіз процесу віброобробки поверхні металу*

*Ключові слова: віброобробка, покриття, процес, поверхня деталей, деформація, енергія деформації*

*Рассмотрены вопросы энергетической сущности явлений, которые протекают в поверхностном слое детали при деформации, а также рассмотрена теория деформации и структурно-энергетический анализ процесса виброобработки поверхности металла*

*Ключевые слова: виброобработка, покрытие, процесс, поверхность деталей, деформация, энергия деформации*

*The issues of energy essence of the phenomena that occur in the surface layer under deformation, and so we consider the theory of deformation and structural and energetic analysis of vibrotreatment metal surface*

*Keywords: vibrating processing, coating, process, surface detail, deformation, deformation energy*

**Л. А. Журавлева**

Младший научный сотрудник

Кафедра «Технология машиностроения и инженерного консалтинга»\*

Контактный тел.: 050-527-28-43

E-mail: 1983mila@inbox.ru

**М. А. Калмыков**

Кандидат технических наук, доцент\*\*

**В. Б. Струтинский**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*\*

\*\*Кафедра «Конструирование станков и машин»

Киевский политехнический институт

пр. Победы, 37, корп. 1, к. 232, г. Киев

**В. В. Яковенко**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Кафедра «Электромеханика»\*

\*Восточнoукраинский национальный университет

им. Владимира Даля

кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, Украина, 91034

Формирование цинкового покрытия представляет собой сложный процесс совместного и химического воздействия на механическую поверхность деталей. Механическое воздействие представляет собой изменение поверхности металла за счет ударов стеклянных шаров в процессе виброобработки. Изменение поверхности также представляет собой пластическую деформацию теория, которой подчиняется законам, изложенным в литературных источниках [1-3].

По современным представлениям [4-8] пластическая деформация поверхностного слоя является ки-

нетическим процессом, который совершается в форме единичных элементарных актов на микроуровне, а затем проявляется в виде макроскопического эффекта [7].

**Цель работы** – изучить процесс пластической деформации, а также энергетическую сущность явлений, которые протекают в поверхностном слое детали при деформации.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить такие **задачи**:

1. Изучить теорию деформации металла при многократных ударах шаров.

2. Провести структурно-энергетический анализ процесса виброобработки поверхности металла.

Энергетическая сущность явлений, протекающих в поверхностном слое детали при деформации, позволяет сделать вывод о том, что одним из основных параметров, определяющих структурное состояние деформируемых объемов твердого тела, а также изменение характеристик поверхностного слоя, является плотность потенциальной составляющей внутренней энергии  $E_p$ , накапливаемой в материале, этот параметр является универсальным при всех видах деформации поверхностного слоя металла.

Согласно современным представлениям [4] скрытая энергия деформации закономерно растет с увеличением степени деформации. Скрытая энергия деформации сначала растет быстро, затем рост ее замедляется, а также падает доля от работы деформации [2]. При большей скорости деформации ( $V > 20$  м/с) запас скрытой энергии увеличивается, набор искажений кристаллической решетки менее устойчивый, чем у образца, деформированного медленно. Состояние такого металла соответствует как бы большей степени деформации, хотя степени деформации макроскопически одинаковы.

Это объясняется тем, что за более короткое время деформации в меньшей степени протекают процессы возврата, частично уничтожающие искажения решетки, возникшие при деформации, и увеличивается степень наклепа. Данное положение подтверждено многочисленными работами металлофизической лаборатории Сибирского физико-технического института.

Установлено, что при большей скорости деформации больше и скрытая энергия при одинаковых степенях деформации, что подтверждается многими исследованиями.

По данным, приведенным в [4,6,8], при динамическом сжатии скрытая энергия деформации составляет значительный процент от работы (15-25%), в то время как при статическом или медленном нагружении 10%. При этом, в первом приближении, можно говорить о двукратном увеличении процента поглощаемой энергии при скорости деформации более 2м/с.

Коэффициент тепловых потерь зависит от температуры и равен [7]:

$$K_T = 1 - \left( \frac{3t}{T_p} \right)^{0.25} \quad (1)$$

где:  $t$  - текущая температура;

$T_p$  - температура плавления по шкале Кельвина.

Рост твердости металла сказывается не только на эксплуатационных свойствах изделия, но значительно влияет на сам процесс упрочнения. Изменение твердости влияет на способность металла накапливать дополнительные повреждения структуры, которое описывается коэффициентом  $K_T$ . Кроме того, упрочненный металл меньше деформируется при каждом последующем соударении, что проявляется в меньшем диаметре отпечатка при прочих равных условиях, и как следствие, уменьшение глубины наклепа от этого соударения.

Кроме того, твердость поверхностного слоя является основным параметром, который позволяет косвенно определить плотность скрытой энергии.

Для расчета плотности скрытой энергии по текущей твердости можно использовать зависимость, предложенную в [9,10]

$$E_p = M HV^C \quad (2)$$

Где:  $HV$  - твердость металла по Викерсу, МПа;

$C$  - коэффициент, зависящий от материала детали;

$$M = \frac{1}{6G} \left( \frac{0.067}{1.2 \cdot 10^{-3} + 6.47 \cdot 10^{-6} HV_0} \right)^2 \quad (3)$$

$G$  - модуль сдвига, МПа;

$HV_0$  - твердость металла в отожженном (исходном) состоянии;

Из (3) следует, что:

$$HV = \left( \frac{E_p}{M} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (4)$$

Зависимости для  $K_y(E_p)$ , и  $K_T(E_p)$ , принимают вид:

$$K_y(E_p) = 0.15 + \frac{0.85 \left( \left( \frac{E_p}{M} \right)^{\frac{1}{C}} - HV_{\min} \right)}{HV_{\max} - HV_{\min}} \quad (5)$$

$$K_T(E_p) = 0.15 + \frac{\left( 1 - \left( \frac{3t}{T_p} \right)^{\frac{1}{4}} \right) \cdot \left( \left( \frac{E_p}{M} \right)^{\frac{1}{C}} - HV_{\min} \right)}{HV_{\max} - HV_{\min}} \quad (6)$$

Распределение скрытой энергии по глубине поверхностно слоя в ходе обработки меняется с повышением твердости. При определении глубины распределения скрытой энергии в поверхностном слое используется зависимость, приведенная в [5], связывающая глубину деформированного слоя с твердостью металла:

$$h = 1.5 \left( \frac{6DE_p}{HV} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Где:  $D$  - диаметр шаров.

С учетом (7) получается:

$$h = 1.5 \left( \frac{6DE_p}{\left( \frac{E_p}{M} \right)^{\frac{1}{C}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

Таким образом, уравнение, связывающее энергетический параметр деформации верхнего слоя металла, имеет вид:

$$E_{уд} = 0,5 \int_{E_{p0}}^{H^*} \frac{1,5 \left( \frac{6DE_p}{M} \right)^{\frac{1}{4}}}{\left[ \frac{0,85 \left( \left( \frac{E_p}{M} \right)^{\frac{1}{C}} - HV_{min} \right)}{HV_{max} - HV_{min}} \right] \cdot \left[ 1 - 0,2 \frac{\left( 1 - \left( \frac{3t}{T_p} \right)^{\frac{1}{4}} \right) \cdot \left( \left( \frac{E_p}{M} \right)^{\frac{1}{C}} - HV_{min} \right)}{HV_{max} - HV_{min}} \right]} dE_p \quad (9)$$

Для виброударной обработки используется следующая зависимость:

$$E_{уд} = \frac{KmV^2 60f}{2000D}, \text{ кДж/м}^2\text{мин} \quad (10)$$

Где:  $K$  - коэффициент, учитывающий неравномерность энергетического воздействия, который зависит от положения детали относительно контейнера;

- $m$  - масса стального шарика, кг;
- $V$  - скорость соударения, м/с,  $V = \omega A = 2\pi f A$ ;
- $f$  - частота колебаний, Гц;
- $A$  - амплитуда колебаний, м;
- $D$  - диаметр шариков, м.

Формула (10) позволяет рассчитывать время обработки поверхности детали. Для этой цели определены предельная плотность потенциальной энергии обработанного материала:

$$H = H_{TS} - H_{293}, \text{ МДж/м}^3 \quad (11)$$

Где:  $H_{TS}$  - энтальпия материала в твердом состоянии при температуре плавления;

$H_{293}$  - энтальпия металла при нормальных условиях (293°K)

Рассчитывается твердость и плотность скрытой энергии наиболее деформированных микрообъемов также:

$$HV_m = HV_0 = \left( \frac{HV_{max}}{HV_0} \right)^{0,95} \quad (12)$$

$$E_{pm} = MHV_m^c$$

$$M = \frac{1}{6G} \cdot \left( \frac{0,067}{1,2 \cdot 10^{-3} + 6,47 \cdot 10^{-6} HV_{min}} \right)^2 \quad (13)$$

Где:  $HV_m$  - твердость наиболее деформированных микрообъемов, МПа;

$HV_0$  - твердость материала детали в исходном состоянии перед виброобработкой, МПа;

$HV_{min}$  - твердость материала детали в отожженном состоянии, МПа;

$HV_{max}$  - наибольшая твердость металла детали, МПа;

$G$  - модуль сдвига детали, МПа;

$C$  - коэффициент, зависящий от металла детали.

Определяется удельная работа, которую необходимо совершить над поверхностным слоем для нанесения цинкового покрытия:

$$A_p = 0,5 \int_{E_{pm0}}^{H^*} \frac{h_s(E_{pm})}{(1 - K_y(E_{pm})) \cdot (1 - K_p(E_{pm}))} dE_{pm} \text{ 6МДж/м}^2 \quad (14)$$

Определяется расчетное время обработки детали  $t_p$ , соответствующее наиболее эффективному цинковому покрытию.

$$t_p = 10^3 \cdot \frac{A_p}{E_p} \quad (15)$$

Величина коэффициента  $K$  принимается равной  $K = 0,25$ .

В качестве примера рассматривается расчет времени обработки поверхности шарами диаметром  $D = 10$  мм, с частотой  $f = 35$  Гц и амплитудой  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м. Величина удельной энергии составляет  $E_p = 5$  кДж/м<sup>2</sup> · мин. Твердость поверхности перед обработкой  $HV_0 = 8 \cdot 10^3$  МПа; предельные твердости стали  $HV_{min} = 10^3$  МПа;  $HV_{max} = 11 \cdot 10^3$  МПа; энтальпия стали  $H_i = 10500$  МДж/м<sup>3</sup>. Температура плавления стали и температура, при которой происходит деформация верхнего слоя соответственно равны:  $T_p = 1800$  К;  $k = 293$  К. Модуль сдвига стали  $G = 8 \cdot 10^4$  МПа; плотность стали  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>

верхности шарами диаметром  $D = 10$  мм, с частотой  $f = 35$  Гц и амплитудой  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м. Величина удельной энергии составляет  $E_p = 5$  кДж/м<sup>2</sup> · мин. Твердость поверхности перед обработкой  $HV_0 = 8 \cdot 10^3$  МПа; предельные твердости стали  $HV_{min} = 10^3$  МПа;  $HV_{max} = 11 \cdot 10^3$  МПа; энтальпия стали  $H_i = 10500$  МДж/м<sup>3</sup>. Температура плавления стали и температура, при которой происходит деформация верхнего слоя соответственно равны:  $T_p = 1800$  К;  $k = 293$  К. Модуль сдвига стали  $G = 8 \cdot 10^4$  МПа; плотность стали  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>

$$M = \frac{1}{6G} \cdot \left( \frac{0,067}{1,2 \cdot 10^{-3} + 6,47 \cdot 10^{-6} HV_{min}} \right)^2 = 1,5 \cdot 10^{-4} 1/\text{МПа}$$

Плотность скрытой энергии:

$$E_p(HV) = M(HV)^{1,34}$$

Твердость наиболее деформированных микрообъемов:

$$HV_1(HV) = HV \left( \frac{HV_{max}}{HV} \right)^{0,95}$$

Плотность скрытой энергии в зависимости от твердости:

$$E_{p1}(HV) = M(HV_1(HV))^{1,94}$$

$$E_{p1}(HV_0) = 10^4 \text{ кДж/м}^2$$

Зависимость твердости от плотности скрытой энергии наиболее упрочненных объемов:

$$HV(E_{p1}) = \left( \frac{E_{p1}}{MHV_{max}^{1,845}} \right)^{\frac{1}{0,037}}$$

Коэффициент восстановления равен:

$$k_y(E_{p1}) = 0,1 + 0,8 \frac{(HV(E_{p1})) - HV_{min}}{HV_{max} - HV_{min}}$$

Коэффициент тепловых потерь находится по формуле:

$$h_t(E_{p1}) = \frac{HV(E_{p1}) - HV_{min}}{HV_{max} - HV_{min}} \cdot \left( 1 - \sqrt[4]{\frac{3t}{T_p}} \right)$$

Зависимость коэффициентов тепловых потерь от температуры обработки:

$$k_p(t_1) = 1 - \left( \frac{3t_1}{T_p} \right)^{0.25}$$

Толщина деформированного слоя в зависимости от условия деформирования:

$$h(E_{p1}, D, f, A) = 1.510^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{6 \cdot 10^6 DW_{330}(D, f, A)}{HV(E_{p1})}}, \text{ м}$$

Удельная скрытая энергия, запасенная в поверхностном слое металла в процессе обработки:

$$E_p(HV_{01}) = 0.5 \int_{E_{p1}}^{H_1} h(E_{p1}) dE_{p1}$$

При виброобработке:

$$E_p = 0.081 \text{ МДж/м}^2$$

Удельная работа, совершенная рабочей средой над поверхностным слоем в процессе виброобработки:

$$A_{уд} = 0,5 \int_{E_{p1}}^{H_1} \frac{h(E_{p1})}{(1 - k_y(E_{p1}))(1 - k_t(E_{p1}))} dE_{p1}$$

Для виброобработки:  $A_{уд} = 0.318 \text{ МДж/м}^2$ .

Оптимальное время для виброобработки:

$$T_{опт} = 10^3 \cdot \frac{A_{уд}}{E_p}$$

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Теория деформации металла при многократных ударах шаров, основанная на понятии потенциальной энергии слоя металла, дает возможность произвести оценку оптимальной по критерию максимальной твердости в режиме обработки.

2. Структурно-энергетический анализ процесса виброобработки поверхности металла показывает, что при достижении количественной меры поврежденности элементов поверхности обрабатываемой детали критической величины, происходит достижение максимальной твердости поверхностного слоя металла. При дальнейшем деформировании поверхности металла происходит разрушение поверхностного слоя.

#### Литература

1. Подольский, М.А. Анализ экспериментальных данных с позиции термодинамической модели упрочнения [Текст] / М. А. Подольский – Ростов-на-Дону: ДГТУ. – 2004. с. 78-82.
2. Прокопец, Г.А. Интенсификация процесса виброударной обработки на основе повышения вибрационного воздействия и учета ударно-волновых процессов [Текст] : дисс...канд. техн. наук / Г.А. Прокопец – Ростов-на-Дону, 1995. – 196с.
3. Павлов, В.А. Физические основы пластической деформации металлов [Текст] / В.А. Павлов – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 198с.
4. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Д.Д. Папшев – М.: Машиностроение, 1978. – 152с.
5. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель – М. – 1997. – 167с.
6. Отрадный, В.В. Работоспособность стальных деталей, подвергаемых объемному упрочнению пластическим деформированием // Известия ВУЗов машиностроения: М. – 2002. - №4. с.18-22.
7. Попов, М.Е. Обработка деталей методами поверхностного пластического деформирования [Текст] / М.Е. Попов, В.А. Лебедев – Ростов-на-Дону: РИСХМ. – 1986.- 45с.
8. Лебедев, В.А. Структурно-энергетическая интерпретация процесса ППД [Текст] / В.А. Лебедев, М.А. Подольский // Прогрессивные технологии в машиностроении: сборник статей по материалам Всероссийской научно-технической конференции. Книжный Новгород. – Арзана: НГТУ – 2001. – с. 152-156.
9. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель – М. – 1977. – 167с.
10. Федоров, В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел [Текст] / В.В. Федоров – Ташкент: Изд-во «Фан». – 1985. – 166с.