

Ю. П. Анкудимов, канд. техн. наук, доц., **И. В. Садовая**, **Ю. Г. Чернега**

Донской государственный технический университет, Россия

Таганрогский политехнический институт, Россия

Тел.: (863)2738385; E-mail: i_sagulenko@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ И ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕЕ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ

В статье приводятся результаты исследования вибрационной обработки на основе модели «динамических столбиков» и теории вероятности, позволяющие оценить амплитудно-частотные режимы и продолжительность процесса исходя из требуемого энергетического воздействия на обрабатываемую поверхность.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, динамическая модель, энергетические режимы.*

U. P. Ankudimov, I. V. Sadovaya, U. G. Chernega

POWER ASSESSMENT OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY AND TEMPORARY MODES OF VIBRATION PROCESSING ON THE BASIS OF MODELLING OF ITS VIBROSHOCK SYSTEM

Results of research of vibration processing on the basis of model of "dynamic columns" and the probability theory allowing to estimate the amplitude-frequency modes and duration of process proceeding from the demanded power impact on the processing surface are given in article.

Keywords: *vibration processing, dynamic model, power modes.*

1. Введение

Вибрационная отработка деталей широко применяется для повышения ресурса работы самых различных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Эффект упрочнения достигается путем многократного упруго-пластического деформирования и передеформирования их поверхностного слоя частицами гранулированной обрабатывающей среды (чаще всего шариками из стали ШХ15) помещенными в рабочую камеру, совершающую низкочастотные колебания. При назначении режимов вибрационной обработки необходимо обеспечивать такие показатели качества поверхностного слоя как степень и глубина упрочнения (наклеп), уровень шероховатости. Особенно актуально иметь гарантированный уровень этих показателей по всей поверхности обрабатываемой детали. Решению этих задач посвящены работы А.П. Бабичева, С.Н. Шевцова, Ю.Р. Копылова, В.А. Лебедева и др. [1,2,3,4]. Авторы этих работ на основе энергетического подхода и компьютерного моделирования определяли необходимые для выполнения операций энергию соударения частиц рабочей среды с деталями, силу удара, амплитудно-частотные режимы, однако в этих работах не выявлена взаимосвязь энергетических (силовых) и временных режимов вибрационной обработки. Целью исследования является разработка теоретико-вероятностной модели вибрационной обработки связывающей энергетические и временные режимы и на этой основе оценка технологических возможностей процесса. Для этого необходимо получить зависимости, позволяющие с требуемой вероятностью определять минимальные значения энергетического воздействия частиц ударной среды и минимальное количество ударов, обеспечивающие равномерную обработку поверхности и достаточные для выполнения требуемых технологических операций. Модель даст возможность выявлять область

амплитудно-частотных и временных режимов вибрационной обработки, обеспечивающих смятие микронеровностей поверхности, требуемую глубину и степень деформационного упрочнения и другие параметры качества поверхностного слоя.

2. Основное содержание и результаты работы

На основе модели «динамических столбиков» А.Е. Кобринского [5], с учетом последних работ в этой области [6,7] предложена модель процесса вибрационной обработки.

Модель описывает процесс вибрационной обработки со следующими допущениями:

- виброударную систему обрабатывающей среды составляют слои сферических тел одного размера, упакованных по «квадрату»;
- система совершает колебания в однородном гравитационном поле вдоль вертикальной оси;
- слои сферических тел взаимодействуют между собой посредством прямых центральных ударов;
- диссипативные свойства системы описываются коэффициентом восстановления K_y ;
- внешнее воздействие передается нижнему слою сферических тел от дна рабочей камеры радиуса $R \rightarrow \infty$, совершающего гармонические колебания по закону $X = A_0 \cdot \sin \omega t$, где A_0 и ω соответственно амплитуда и круговая частота колебаний дна;
- частота колебаний системы обрабатывающей среды равна частоте колебаний дна рабочей камеры.

Используя основные положения работы [5] по динамике столбиков шаров получим при соударении i и $i+1$ слоя сферических тел соотношения: $(U_{i,1} - V_{i+1,1}) \cdot K_y = V_{i+1,2} - U_{i,2}$, $V_{i,1} = U_{i,2} + g \cdot t_i''$, $U_{i,1} = V_{i,2} - g \cdot t_i'$, где t_i'' - время безударного движения i слоя после соударения в $i+1$ паре слоев; t_i' - время безударного движения i слоя после соударения в i паре слоев.

Поскольку скорости элементов слоев являются непостоянными на интервалах безударного движения, то принято, что: $U_{i,1}$ и $U_{i,2}$ - скорости элементов i слоя непосредственно до и после соударения в $i+1$ паре слоев, $V_{i,1}$ и $V_{i,2}$ - скорости элементов i слоя непосредственно до и после соударения в i паре слоев.

Так как частота колебаний слоев принята равной частоте колебаний дна рабочей камеры ω , то период колебаний слоев T , перемещение слоев S_i и амплитуда их колебаний A_i будут: $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$, $i' = i'' = T$, $S_i' = S_{i-1}'' = const$, $A_i = \frac{1}{2} \cdot S_i' = \frac{1}{2} S_i''$.

Действительное движение слоев будет отличаться от смоделированного. Во-первых, в результате косых ударов будет иметь место смещение слоев. Во-вторых, каждый элемент слоя испытывает действие сил сухого или вязкого трения, возникающих вследствие разных скоростей отдельных элементов. Это может привести к нарушению симметрии кинематики движения. Например, время движения элементов слоев вверх i_1' становится меньше времени движения вниз i_1'' , однако, как показано в

работе [1], это не нарушает устойчивости периодических колебательных движений среды, которые являются основным источником энергетического воздействия на обрабатываемую поверхность.

Уравнение удара первого слоя с дном рабочей камеры выразится соотношением:

$$V_{1,2} - K_{y0} \cdot V_{1,1} = (1 + K_{y0}) \cdot A_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t,$$

где K_{y0} - коэффициент восстановления при ударе первого слоя с облицовкой дна рабочей камеры. Свойства материала облицовка целесообразно выбирать таким образом, чтобы K_{y0} приближался к единице.

Потеря энергии в i слое выразится соотношением:

$$\Delta E_i = \frac{m \cdot (U_{i,1}^2 - U_{i,2}^2)}{2} = \frac{m}{3} \cdot \frac{1 - K_y}{1 + K_y} \cdot (n - i) \cdot \left[n + \frac{1}{2} - i \right] \cdot (n + 1 - i), \quad (1)$$

где m - масса частицы слоя,

n - число слоев испытывающих периодические колебания.

Вследствие «динамической вялости», обусловленной большим числом элементов и их диссипативными свойствами, верхняя часть слоев включает элементы, движущиеся как один элемент с массой равной массе всех элементов ее составляющих. От реальной картины поведения такую систему отличает пренебрежение диссипативными свойствами верхней части и стохастическими флуктуациям скоростей, которые возникают в ней и распространяются по ее элементам сверху вниз, постепенно затухая. [5]

Учет «вялой» части загрузки массой M при условии $M > m \times n$, используя основные положения работы [5], приводят к значениям коэффициента потери скорости:

$$K_{Vi} = \frac{V_{i+1}}{V_i} = \frac{(l-i)^2 + 2 \cdot (l-n)^2 \cdot (n-i-1) \cdot \frac{1-K_y}{1+K_y}}{(l-i+1)^2 + 2 \cdot (l-n)^2 \cdot (n-i) \cdot \frac{1-K_y}{1+K_y}} \cdot \frac{l-i+1}{l-i} \quad (2)$$

где $l = \frac{H}{D}$ (H - высота загрузки слоев, D - диаметр сферических тел).

Максимальные значения скорости первого слоя $V_{1,2}$ в зависимости от фазы соударения с дном камеры, материала частиц и облицовки камеры находятся в пределах $A \cdot \omega \leq V_{1,2} < 3 \cdot A \cdot \omega$.

Зная законы изменения скорости частиц рабочей среды (2) и потери энергии (1) по слоям от нижнего к верхнему, можно оценить вероятность того, что каждая точка поверхности детали получит не менее k ударов сферическим телом с энергией $E_0 \geq E_{00}$, достаточной для изменения ее параметров качества при равновероятностном попадании детали в i слой и общем числе колебаний слоев равном $\tau \cdot f$, где τ - продолжительность обработки.

$$P(k \leq x < \tau \cdot f) = \Phi_0(t_{\tau \cdot f}) - \Phi_0(t_k), \quad (3)$$

где $\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ - представляет собой интеграл вероятностей

$$t_{\tau \cdot f} = \frac{\tau \cdot f \cdot (1 - P_{B3})}{\sqrt{\tau \cdot f \cdot P_{B3} \cdot (1 - P_{B3})}} \text{ и } t_k = \frac{k - \tau \cdot f \cdot P_{B3}}{\sqrt{\tau \cdot f \cdot P_{B3} \cdot (1 - P_{B3})}}.$$

$$, P_{B3} = P_{B1} \cdot P_{B2},$$

где $P_{B1} \approx 0,78 \cdot \frac{d_0^2}{D^2}$ - геометрическая вероятность покрытия квадрата упаковки

$D \times D$ следами обработки (отпечатками диаметром d_0^2) за одно колебание рабочей камеры,

$P_{B2} = 1 - F(E_{\partial o})$ - вероятность удара о поверхность детали слоем частиц рабочей среды обладающих энергией $E_{\partial} \geq E_{\partial o}$, зависящая в основном от амплитудно-частотных режимов вибрации и характеристик частиц рабочей среды, где $F(E_{\partial})$ - функция распределения энергии по слоям частиц среды.

Представленные зависимости (1), (2) и (3) позволяют оценить уровень энергетических возможностей вибрационной обработки при различных ее режимах.

Так в таблице 1 представлены результаты расчета продолжительности процесса вибрационной обработки, обеспечивающие диапазон энергий соударения частиц обрабатываемой среды (шаров из стали ШХ15 диаметром 8 мм) с обрабатываемой поверхностью деталей в пределах $E_{\partial} > E_{\partial o} = 10^{-5} \div 10^{-3}$ Дж (с 98% вероятностью) при различных амплитудах колебания рабочей камеры и частоте 25 Гц. Данный диапазон энергий характерен для большинства операций вибрационной обработки [1].

Таблица 1. Данные оценки энергетических режимов вибрационной обработки в среде стальных шаров $D=8$ мм при частоте колебаний 25 Гц.

Уровень энергии $E_{\partial o}$, Дж	Амплитуда колебаний A , мм	Время обработки τ , час
1	2	3
10^{-5}	0,1	92,44
	0,5	3,689
	1	1,847
	2	1,171
	3	0,963
10^{-4}	4	0,86
	0,1	2280556
	0,5	84,95
	0,8	17,5
	1	9,062

Продолжение таблицы 1

1	2	3
10^{-4}	2	2,174
	3	1,181
	4	0,836
	5	0,663
10^{-3}	0,5	721175
	1	8585
	2	318
	3	42,9
	4	13,2
	5	6,14

3. Заключение

Полученные результаты показывают, что продолжительность обработки, как и амплитуда колебаний, оказывает решающее влияние на получение каждой точкой поверхности удара необходимого энергетического уровня для формирования требуемого показателя качества равномерно по всей обрабатываемой поверхности детали.

Изложенные результаты исследования могут представлять интерес для научных работников и инженерно-технических специалистов, работающих в области разработки и использования динамических методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичев А. П., Бабичев И. А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 1998. – 624 с.
2. Шевцов С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦВШ, 2001. – 194 с.
3. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 569 с.
4. Лебедев В. А., Марченко Ю., Соколов В., Апрышкин Д. Энергетическая модель процесса поверхностного пластического деформирования свободнодвижущимися инденторами. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. №8 – С.15–18
5. Кобринский А. Е., Кобринский А. А. Виброударные системы. Динамика и устойчивость. – М.: Наука, 1973. – 591 с.
6. Лебедев В. А., Анкудимов Ю. П. Методические основы проектирования эффективных технологических систем ППД свободно движущимися инденторами // Машиностроение и техносфера XXI века: сб.тр. XIX Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк, 2012. – Т.1
7. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Инженерный журнал. Приложение. – №9. 2012. С.1–32

Поступила в редколлегию 14.01.2016 г.