

УДК 621.01

В. А. Лебедев, канд. техн. наук, профессор, Эль Дакдуки Ахмад, аспирант,
М. А. Белозёров, магистр

Донской государственный технический университет

Тел. +8951539515, 89614314374, 89604489922;

E-mail: va.lebedev@yandex.ru el_dakdoukia81@mail.ru m-belozyorov@rambler.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ВИБРОУДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА ППД

Рассмотрен механизм упрочнения поверхностного слоя в процессе виброударной обработки. Обоснованы закономерности и предложены аналитические зависимости, описывающие основные энергетические параметры процесса, которые могут быть использованы в качестве основы для моделирования технологии упрочняющей обработки деталей виброударным методом. Показана степень влияния шероховатости исходной поверхности на энергетические факторы процесса ППД; создана формула для определения минимальной скорости удара, при которой начинается деформация основания микропрофиля и, как следствие, наблюдается эффект упрочнения поверхностного слоя.

Ключевые слова: виброударная обработка, пластическая деформация поверхности, упрочнение, рабочая среда, поверхностный слой, удар.

V. A. Lebedev, El Duckduki Ahmad, M. A. Belozyorov

ENSURING THE EFFICIENCY OF VIBRO-IMPACT OPERATIONS STRENGTHENING BASED ON THE MODELING OF ENERGY-POWER FACTORS OF PPD PROCESS

The mechanism of the hardening of the surface layer in the process of vibration shock treatment is considered; regularities are substantiated and analytical dependencies are proposed that describe the main energy-power parameters of the process, which can be used as the basis for modeling the technology of hardening machining of parts by the vibro-impact method. The degree of influence of the roughness of the initial surface on the energy-power factors of the PPD process is shown; a formula has been established for determining the minimum impact velocity at which the deformation of the base of the micro-profile begins and, as a consequence, the effect of hardening of the surface layer is observed.

Keywords: vibro-impact treatment, surface plastic deformation, hardening, working medium, surface layer, impact

Введение

Виброударное воздействие рабочей среды при обработке деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД), разновидностью которых является виброударная обработка (рис.1), характеризуется формообразующими и энергетическими свойствами.

Формообразующие свойства проявляются в способности рабочей среды равномерно контактировать с поверхностью детали. Они обусловлены циркуляционным движением и колебаниями частиц среды. Энергетические свойства проявляются в способности соударяться с обрабатываемой поверхностью и формировать во времени, но вое состояние поверхностного слоя детали.

Основными технологическими факторами виброударной обработки (ВиУО) являются амплитуда и частота колебаний, характеристики рабочей среды, материала деталей и время обработки, от которых зависят основные параметры процесса, обуславливающие технологический эффект упрочнения т.к.: характер движения рабочей камеры и частиц рабочей среды, их скорости и ускорения; энергия и сила

микроударов; контактные давления и напряжения; температура, возникающая в зоне контактного взаимодействия частиц с поверхностью.

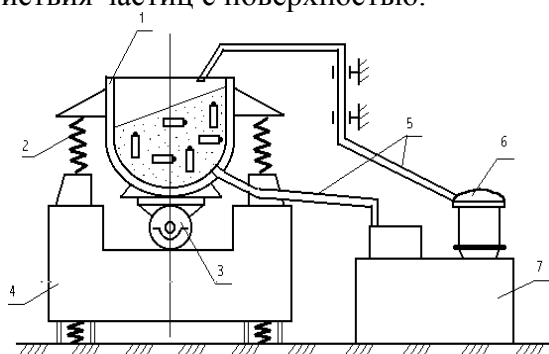


Рисунок 1. Схема процесса виброударной обработки: 1 - рабочая камера; 2 - пружины; 3 - дебалансный вибратор; 4 - основание; 5 - шланги для подачи и слива ТЖ; 6 - помпа; 7 - бак-отстойник.

Основная часть

В результате проведенных исследований научно обоснованы закономерности и предложены аналитические зависимости, описывающие основные энергосиловые параметры процесса, которые могут быть положены в основу моделирования технологии упрочняющей обработки деталей виброударным методом.

Согласно [1], скорость соударения частиц рабочей среды с поверхностью обрабатываемых деталей равна

$$V_{\text{ч}} = K_y \cdot A \cdot \omega \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots(1)$$

где A - амплитуда колебаний рабочей камеры; ω - угловая частота колебаний рабочей камеры; K_y - коэффициент, учитывающий влияние демпфирующих свойств среды на изменение скорости частиц при удалении их от стенок рабочей камеры; α - угол соударения частиц с обрабатываемой поверхностью

Однако использование формулы (1) для оценки скорости соударения частиц с обрабатываемой поверхностью не совсем корректно, так как в ней отсутствует пороговая амплитуда колебаний, ниже которой движение рабочей среды и, естественно, процесс обработки поверхности отсутствуют. Результаты экспериментальных исследований виброабразивной и виброударной обработки [1] показывают, что пороговая амплитуда зависит от частоты вибрации, причем с ростом частоты пороговая амплитуда снижается.

Таким образом, в формуле (1) целесообразно ввести пороговую амплитуду, а амплитудную зависимость записать в виде $A - A_0$, где $A > A_0$. Аналогично амплитуде, более корректно ввести и пороговую частоту, начиная с которой обрабатываемая органическая среда может прийти в движение, представив ее зависимость:

$$\omega - \omega_0 = 2\pi (f - f_0).$$

Экспериментальные данные, представленные в работах [2], свидетельствуют, что для большинства вибростанков с циркуляционным характером движения величина f_0 находится в пределах 14-15 Гц. На основании вышеизложенных рассуждений, формула (1) для определения скорости соударения частиц, включающая амплитудную и частотную зависимости, будет иметь вид

$$V_{\text{ч}} = 2\pi K_y (A - A_0) (f - f_0) \cos \alpha \dots\dots\dots(2)$$

В качестве энергосилового параметра динамических методов ППД в основном рассматриваются силы соударения частиц среды с обрабатываемой поверхностью, которые используются для последующих технологических и конструкторских расчетов (расчет контактных давлений, размера пластического отпечатка и глубины наклепа, глубины внедрения гранулы и другие). Исследованиями установлено, что при взаимодействии тел в виброкамере силы микроударов достигают 15-30 Н, а контактные давления, зависящие от размеров контактных площадок, могут принимать значения от 150–800 до 7000–15000 МПа. Следует отметить, что динамическое воздействие рабочей среды зависит от глубины погружения детали, расстояния от стенок рабочей камеры, режимов вибраций (амплитуды и частоты колебаний), размеров и плотности рабочей среды.

В работе [3] предложено следующее эмпирическое соотношение устанавливающее зависимость динамической нагрузки P_{∂} в зоне локального силового контакта от скорости соударения индентора $V_{\text{ч}}$ с гладкой поверхностью

$$P_{\partial} = \left(\frac{M \cdot V_{\text{ч}}^2}{2\xi} \frac{1+n}{n} \right)^{\frac{1}{1+n}}, \quad (3)$$

где M - приведённая масса инденторов; ξ - коэффициент податливости материала; n - коэффициент, зависящий от условий соударения.

Результат экспериментальных исследований, представленные в этой работе, показали, что для случая удара о жестко закреплённую плиту (характерного для ППД) коэффициент, зависящий от условий соударения хорошо коррелирует с коэффициентом восстановления скорости при соударении инденторов с обрабатываемой поверхностью $K_{\text{в}}$, что позволяет выражение (3) с учётом (5) представить в виде

$$P_{\partial} = \left(\frac{M \cdot (2\pi K_{\text{в}} (A - A_0) (f - f_0) \cos \alpha)^2}{2\xi} \frac{1+K_{\text{в}}}{K_{\text{в}}} \right)^{\frac{1}{1+K_{\text{в}}}} \quad (4)$$

В динамическом отношении рабочая среда представляет собой многомассовую, дискретную, виброударную систему с распределёнными и импульсивно изменяющимися параметрами. В связи со сложностью процессов отрыва и соударения частиц рабочей среды с виброконтейнером и деталью их массовые характеристики, как правило, исследуются экспериментально. Вместе с тем приближенно определяющее значение приведенной массы группы частиц, участвующих в такте соударения с поверхностью детали можно оценить следующим образом

$$M = m_i \cdot N, \quad (5)$$

где m_i - масса одной частицы; N - количество частиц, участвующих в такте соударения с поверхностью

Для обоснования количества частиц, участвующих в такте соударения с поверхностью в результате исследований [2,4] установлено, что период устойчивых стационарных колебаний системы мало зависит от характера соударения элементов, т.к. имеющиеся силы трения стабилизируют их движение. Результатом описания движения элементов ударно-импульсных систем является фазовое уравнение, которое практически всегда при гармоническом возбуждении типа приводится к виду

$$w_1 \sin \varphi + w_2 \cos \varphi = w_3, \quad (6)$$

где w_1, w_2, w_3 - функции параметров системы и возбуждения; φ - фаза колебаний возбуждающего элемента, при которой происходит его соударение с соседним звеном.

Из исследованных в настоящее время моделей ударно-импульсных систем, рассмотрим модель «столбика шариков» (рис. 2) как наиболее адекватно представляющую процесс ВиУО.

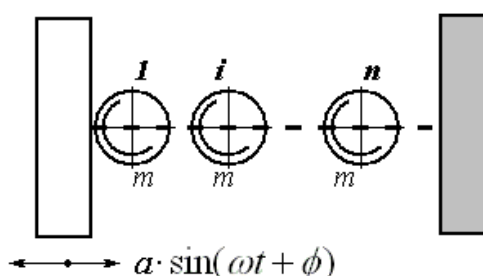


Рисунок 2. Модель ударно-импульсной системы – «столбик шариков»

Эта модель можно описывается следующими соотношениями:

- уравнением движения инденторов в промежутках между соударениями

$$m\ddot{x}_i = 0; 1 \leq i \leq N \tag{7}$$

- коэффициентами фазового уравнения:

$$w_1 = 1; w_2 = \frac{2}{3} \pi l \left(\frac{1+K_{в.ч}+K_{в.ч}^2}{1-K_{в.ч}} - \frac{1-K_{в.ч}}{1+K_{в.ч}} N^2 \right); w_3 = \frac{S}{A} \tag{8}$$

где $K_{в.ч}$ – коэффициент восстановления, одинаковый для всех ударных пар; l – кратность режима N число инденторов в столбике; S – суммарный зазор в системе; A – амплитуда колебаний ударника;

- ударным импульсом, передаваемым преграде:

$$I = \frac{m\omega A}{N} \cdot \frac{1+K_{в.ч}}{1-K_{в.ч}} \cos\phi \tag{9}$$

Стационарные виброударные колебания могут существовать при выполнении условия:

$$N < \frac{1}{1-K_{в.ч}}. \tag{10}$$

Из (10) видно затухание ударного импульса по мере его прохождения вдоль цепочки инденторов. Для стальных сферических инденторов среднее значение коэффициента восстановления составляет около 0,7. Таким образом, при условии оптимальности момента соударения ($\cos\phi = 1$) ударный импульс затухает обратно пропорционально числу слоев инденторов. Рост ударного импульса наблюдается с увеличением амплитуды виброскорости (равной ωA) и массы инденторов. Виброударные колебания полностью затухают при нарушении условия (10), т. е. при $n \geq 1/(1-0,7) \approx 3...4$. Это не означает, что в такой системе энергия вообще не будет передаваться преграде. Однако, процесс при этом будет носить нестационарный, хаотический характер, и большая часть приходящих ударов будет передавать импульс, существенно меньший, чем в (9).

На основе выше приведённых исследований можно сделать вывод, что наиболее эффективное количество частиц, участвующих в такте соударения с поверхностью, не превышает 3-4.

Наличие динамических зазоров и их зависимость от параметров колебаний является характерной особенностью виброударных технологических систем. Величина зазора существенно влияет на производительность и равномерность обработки. Отклонения значений динамических зазоров от оптимальных снижает производительность обработки.

Динамические зазоры между стенками рабочей камеры и прилегающими слоями рабочей среды l_d зависят от динамического состояния среды. Представленные на рис. 3 [5] зависимости позволяют их аппроксимировать в виде:

$$l_d = K_d \cdot A; \quad l_q = 0,25 \cdot d_q \cdot (K_\varphi - 1), \quad (11)$$

где K_d – коэффициент, характеризующий динамическое состояние обрабатываемой среды, изменяется от 0,9 при свободном состоянии до 0 при большом сжатии среды; l_q – динамический зазор между частицами рабочей среды; d_q – диаметр частиц рабочей сред; K_φ – коэффициент, оценивающий заполнение рабочей камеры рабочей средой (определяется как отношение объёма рабочей камеры к объём загружаемой рабочей среды)

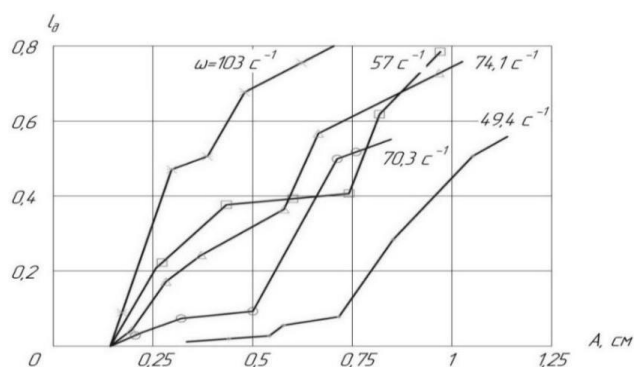


Рисунок 3. Влияние амплитуды на изменение динамического зазора между стенками рабочей камеры и прилегающими слоями обрабатываемой среды [5]

Таким образом, динамические свойства рабочей среды, такие как разрыхление, динамические зазоры, коэффициент восстановления, оказывают влияние на величину приведенной массы частиц, участвующих в соударении с обрабатываемой поверхностью детали.

Связь количества активно взаимодействующих между собой в ударноимпульсной системе частиц и определяющих значение приведенной массы группы частиц, участвующих в такте соударения с поверхностью детали, с динамическими зазорами между ними можно записать в виде

$$N \approx \frac{l_d}{l_q \cdot K_{\varphi,ч}} \quad (12)$$

Предложенные соотношения (10,11,12) позволяют решить ряд оптимизационных задач, связанных с выбором наиболее эффективных энергосиловых параметров виброударного упрочнения и обосновать наиболее рациональные условия обработки.

Обеспечение эффективных энергосиловых параметров виброударного упрочнения зависит от массы загрузки рабочей среды и характера её движения в рабочей камере. В результате экспериментальных и теоретических исследований [6] выявлено, что условиями образования стационарного циркуляционного движения обрабатываемой среды по слабоэксцентричным (близким к окружности) эллипсам являются условия виброобработки в виброкамерах, характеризующееся следующими соотношениями:

$$\frac{H}{L} \approx 1; \quad \frac{H}{d_q} > 6; \quad \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5 \quad (13)$$

где H – высота загрузки; L – ширина сечения камеры.

Эти соотношения (13) позволяют обосновать конструкторско-технологические условия проведения операций виброударной обработки, наиболее эффективно обеспечивающие упрочнение деталей.

Применение операций ВиУО позволяет решить ряд следующих задач:

- упрочнение поверхности детали при условии получения минимальной шероховатости или заданного микрорельефа;
- упрочнение детали с обеспечением максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств;

Эти задачи в процессе ППД решаются изменением ряда параметров качества поверхности и свойств материала поверхностного слоя:

- формируется качественно новая макро - и микрогеометрия поверхности;
- в поверхностном слое возникают остаточные макронапряжения сжатия;
- кристаллическая решетка материала поверхностного слоя получает упругопластические искажения, приводящие к формированию остаточных макронапряжений;
- изменяется форма, размеры и ориентировка зерен, что способствует формированию текстурированного слоя;
- в закаленных сталях снижается количество остаточного аустенита и происходит выделение мелкодисперсной карбидной фазы, повышается плотность дислокаций.



Рисунок 4. Качественная картина деформирования поверхности при ППД.

Характер деформации микронеровностей в значительной мере определен их физико-механическими характеристиками. Деформирование шероховатой поверхности при ВиУО выглядит таким образом: давление сферических частиц рабочей среды при ударе передается материалу микро выступов через контактируемые поверхности (рис.4) различной протяженности в соответствии со степенью деформации. Поперечному расширению тонкого поверхностного слоя, который прилегает к соприкасаемой поверхности АВ, препятствует возникающее в контактной зоне трение, которое распространяется от поверхностного АВ вглубь металла (внутреннее трение), охватывая зону ABC, имеющего клинообразную форму. При этом под поверхностью образуются клинья упрочненного металла (пластически деформированные вершины), создавая зону затрудненной деформации. Эти клинья пластически деформируют материал микро выступов, выполняя роль своеобразных пуансонов.

Металл, смежный со сторонами AC и BC клина, течет в направлении наименьшего сопротивления, то есть к свободным поверхностям и особенно микро выступов до тех пор, пока сжатый выступ и поднятое (выдавливаемое) основание не оказываются на одном уровне. Таким образом, упрочнение поверхностного слоя происходит на фоне одновременного процесса осадки микро выступов и течения металла из глубины поверхности.

Многokратное деформирование каждой элементарной части поверхности при ВиУО с увеличением времени обработки ведет к изменению качественного состояния

поверхностного слоя. Даже первоначальное сжатие тел с конечными нагрузками, которые превышают предел упругости материала, вызывают необратимые пластические изменения микро-и макрорельефа поверхности, при этом степень и характер этих изменений будет зависеть от нагрузки, твердости материала и исходной микрогеометрии.

Если предположить, что все микронеровности обрабатываемой поверхности в процессе виброобработки частицами рабочей среды в виде стальных шариков подвергаются одинаковому воздействию, то в качестве основополагающего параметра по оценке упрочняющего эффекта ВиУО может быть принята величина упругопластической деформации поверхности за время обработки t .

В работе [7] последовательность процесса развития пластической контактной деформации, при соударении единичного индентора радиусом рабочей части R с упругопластическим материалом, обладающего известными физико-химическими свойствами и заданной исходной шероховатостью, описанной нормальным однородным случайным полем, состоит из трех этапов. Первый этап – пластически деформируются микронеровности, и сплошная контактная площадка отсутствует; второй – соответствует образованию массовых микро участков контакта; третий этап – характеризуется началом деформации основания микро профиля.

Допустив, что при дальнейшем развитии процесса контактного взаимодействия микронеровности и их основания деформируются, одновременно, получено аналитическое выражение для определения диаметра пластического отпечатка $d_{отп}$, формируемого на поверхности в процессе ППД динамическими методами при взаимодействии индентора с шероховатой поверхностью, в функции от силовых факторов контакта

$$d_{отп} = 2 n_{np} \left[0.1 \left(\frac{P_{\partial}}{\sigma_{ТД}} \right)^2 + R_{\alpha} d_{\alpha} \left(\frac{0.477}{b} \right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{P_{\partial}}{\sigma_{ТД}} \right)^{\frac{1}{v}} \right]^{0.5}, \quad (14)$$

где n_{np} -коэффициент пропорциональности, учитывающий физико-механические характеристики обрабатываемого материала: $n_{np} = 1,3$ (для материалов с $НВ > 300$); $n_{np} = 1,4$ (для материалов с $НВ = 300 \div 150$); $n_{np} = 1,5$ (для материалов с $НВ < 150$); b, v -параметры опорной кривой микро профиля обрабатываемой поверхности; $\sigma_{ТД}$ – динамический предел текучести ($\sigma_{ТД} = K_q \sigma_s$); K_q – коэффициент, учитывающий изменение механических свойств материала при динамическом нагружении.

С целью объективного рассмотрения энергосиловых факторов контактного взаимодействия частиц рабочей среды с поверхностью необходимо учитывать реалии протекания этого процесса обусловленные тем, что соударение частиц при ВиУО происходит с шероховатой поверхностью, которая как показано в работах [7] сглаживает эпюру давления в пределах одинакового по размеру сформированного на поверхности пластического отпечатка. Для учёта этого фактора предлагается в формулу (2.10) устанавливающую связь динамической нагрузки P_{∂} в зоне локального силового контакта со скоростью соударения частиц V_{∂} ввести коэффициент влияния характеристик исходной шероховатости поверхности на изменение эпюры давления в зоне контакта β , а выражение для определения давления в локальной зоне силового контакта записать в виде

$$P_{\partial ш} = \beta \cdot \left(\frac{M \cdot (2\pi K_{\alpha} (A - A_0) (f - f_0) \cos \alpha)^2}{2\xi} \frac{1 + K_{\beta}}{K_{\beta}} \right)^{\frac{1}{1 + K_{\beta}}} \quad (15)$$

Влияние различных факторов контакта на коэффициент β представлено на рис. 5 [7].

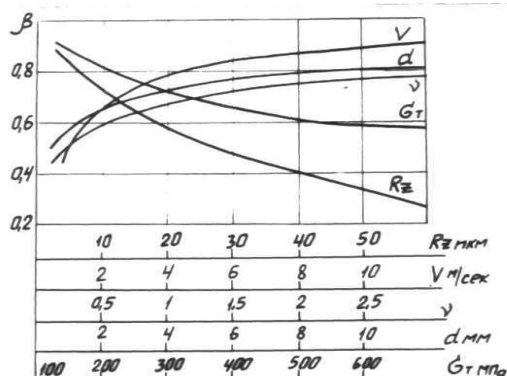


Рисунок 5. Влияние различных факторов контакта на коэффициент β .

В заключение приведём выражение, полученное в результате исследований на минимум зависимостей (14, 15), для установления минимальной скорости соударения, при которой начинается деформация основания микро профиля и как следствие наблюдается эффект упрочнения поверхностного слоя

$$V_{min} = \left\{ \frac{2\xi R_a d_v}{m_i \cdot N} \cdot \frac{K_B}{1+K_B} \left[\frac{0.477 (\pi \sigma_{дт})^{v+1}}{b} \right]^{\frac{1}{v}} \frac{(v-1)^{\frac{(v-1)}{2v}}}{2v} \right\}^{1+K_B} \quad (16)$$

Практическая значимость этой формулы состоит в том, что она позволяет исходя из физико-механических характеристик обрабатываемого материала, параметров исходной шероховатости поверхности, определить диапазоны скоростей частиц рабочей среды, обеспечивающих выполнение в процессе ВиУО отделочных или упрочняющих операций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабичев, А. П. Основы вибрационной обработки / А. П. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1999. – 620 с.
2. Дьяченко, Е. А. Моделирование процесса высокоамплитудного виброударного упрочнения. // Е. А. Дьяченко, В. А. Лебедев, С. Н. Шевцов // Вестник Донского государственного университета, 2004. – Т.4. – №3 (21) – С. 322 – 331.
3. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов. – Москва: Машиностроение, 1969. – 248 с.
4. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я. Г. Панавко. – М.: Наука, 1977. – 223 с.
5. Копылов, Ю. Р. Виброударное упрочнение / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: ВИВД 1999 – 386 с.
6. Шевцов, С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С. Н. Шевцов – Ростов н/Д: Издательство СКНЦ ВШ, 2001. – 194 с.
7. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Научное издание – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006 – 183 с.

Поступила в редколлегию 27.04.2019 г.