

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИБРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА ВИБРИРУЮЩЕМ ДЕРЖАТЕЛЕ В НЕПОДВИЖНОМ КОНТЕЙНЕРЕ

**Бранспиз Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент  
Кафедра «Легкая и пищевая промышленность»,  
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,  
кв. Молодежный, 20А, г. Луганск, 91034  
Контактный тел.: 8-095-571-15-50

**Калмыков Михаил Александрович**, кандидат технических наук, докторант  
Кафедра «Конструирование станков и машин»,  
Механико-машиностроительный институт НТУУ «КПИ»,  
Просп. Победы, 37, корп. 1, к. 238А, г. Киев, 03056  
Контактный тел.: 8-050-326-28-19

**Нечай Елена Владимировна**, аспирант  
Кафедра «Технология машиностроения»,  
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,  
кв. Молодежный, 20А, г. Луганск, 91034  
Контактный тел.: 8-050-694-73-01  
E-mail: elenanechaj@yandex.ru

*Визначено основні параметри, що впливають на процес фінішної віброабразивної обробки деталей на вібруючому тримачі в нерухомому контейнері, заповненому абразивним середовищем, що знаходиться у вільному стані, і наведено експериментальні результати визначення коефіцієнта опору середовища, що дозволяє перейти до визначення необхідної потужності повідня верстака.*

*Ключові слова: шпindelьна обробка, вібруючий тримач, абразивне середовище, потужність повідня.*

*Определены основные параметры, влияющие на процесс финишной виброабразивной обработки деталей на вибрирующем держателе в неподвижном контейнере, заполненном абразивной средой, находящейся в свободном состоянии, и приведены экспериментальные результаты определения коэффициента сопротивления среды, что позволяет перейти к определению необходимой мощности привода станка.*

*Ключевые слова: шпindelьная обработка, вибрирующий держатель, абразивная среда, мощность привода.*

*Basic parameters, influencing on the process of finish vibroabrasive treatment of details on a vibrating holder in an immobile container, filled with an abrasive medium, being in the free state, are determined and the experimental results of resistance coefficient of abrasive medium are resulted, that allows to pass for necessary tool drive power determination.*

*Keywords: spindle finishing, vibrating holder, abrasive medium, driving power.*

### 1. Введение

Методы обработки деталей свободными абразивами находят все более широкое применение. Одним из сравнительно новых методов является шпindelьная виброабразивная обработка.

Высокая производительность, возможность обработки сложнопрофильных деталей, большие технологические возможности позволяют использовать этот метод на операциях шлифования, полирования, упрочнения и т. п. Однако сложность явлений, происходящих в зоне обработки, затрудняют

проектирование технологических процессов, вызывают необходимость разработки теоретических моделей, необходимых для выбора и оптимизации основных технологических параметров.

## 2. Сущность виброшпиндельной обработки

Сущность процесса виброшпиндельной обработки заключается в следующем. Деталь или группу деталей, набираемых в блок, закрепляют на вибрирующем держателе и погружают в рабочий контейнер. Указанный блок совершает вертикальные колебания в неподвижном контейнере, наполненном абразивным материалом (рис. 1). Абразивный материал оказывает сопротивление вертикальным перемещениям изделия, т. е. — вертикальному возвратно-поступательному движению изделия. Это сопротивление является следствием взаимодействия боковой поверхности изделия с частицами абразивного материала (рабочей среды), именно взаимодействие абразивных частиц рабочей среды с поверхностью изделия и дает сьем металла, являющийся целью виброабразивной обработки.

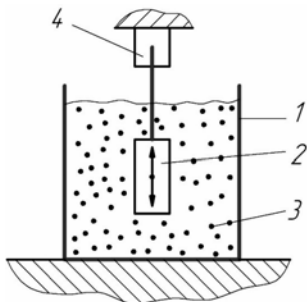


Рис. 1. Схема виброабразивной обработки:

1 — рабочий контейнер; 2 — обрабатываемая деталь (детали);  
3 — рабочая среда (сыпучий материал с абразивными свойствами);  
4 — вибратор

## 3. Определение параметров виброшпиндельной обработки

Одним из важных параметров, влияющих на выбор режимов процесса шпиндельной виброобработки, является коэффициент сопротивления рабочей среды  $\gamma$ . Этот коэффициент можно определить экспериментально на основе опыта по торможению тела в сыпучем материале при попадании его в этот материал после свободного падения по вертикали с некоторой высоты [1].

С этой целью найдем решение уравнения движения некоторого тела при торможении его в сыпучем материале, соответствующего условиям опыта (рис. 2)

$$M \cdot \frac{dV_T}{dt} = -\gamma \cdot V_T, \quad (1)$$

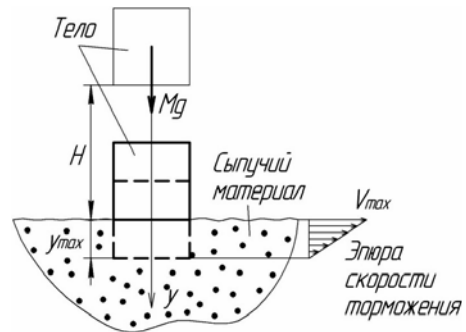


Рис. 2. Схема опыта для экспериментального определения коэффициента  $\gamma$

где  $M$  — масса тела;  $t$  — время, отсчитываемое от момента касания телом поверхности сыпучего материала (в этот момент скорость тела имеет максимальное значение  $V_{\max} = \sqrt{2gH}$ , как скорость свободного падения с высоты  $H$  с ускорением  $g$ , рис. 2);  $V_T$  — изменяющаяся от  $V_{\max}$  до нуля скорость тела при его проникновении в сыпучий материал (т. е.  $V_T$  — скорость торможения, являющаяся функцией координаты  $y$ , рис. 1);  $\gamma \cdot V_T$  — сила сопротивления (торможения) при проникновении тела в сыпучий материал, направленная против этого проникновения, что отражено знаком « $-$ » перед этой силой.

При записи уравнения (1) принято следующее условие: тело проникает в сыпучий материал, имея запас кинетической энергии  $0,5 \cdot M \cdot V_{\max}^2$ , расходуемый на указанное проникновение, влиянием на которое силы тяжести  $M \cdot g$  пренебрегаем (можно, впрочем, считать, что сила тяжести компенсируется некоторой постоянной реакцией со стороны сыпучего материала, аналогичной силе начального трения — сдвига, и имеющей место при полной остановке тела).

Для решения уравнения (1) воспользуемся известным при решении задач проникновения тел в среду (материал) приемом, а именно: умножим уравнение (1) и справа и слева на дифференциал  $dy$ , что, после несложных преобразований (основное в них — учет соотношения  $V_T = dy/dt$ ), позволяет записать вместо (1) уравнение

$$M \cdot dV_T = -\gamma \cdot dy,$$

имеющее следующее простое решение

$$V_T = V_{\max} - \frac{\gamma}{M} \cdot y, \quad (2)$$

при получении которого учтено соответствующее условиям рассматриваемого опыта начальное условие:  $V_T = V_{\max}$ ,  $y = 0$ .

Полученная зависимость скорости торможения тела  $V_T$  от его глубины проникновения в сыпучий материал  $y$ , т. е. зависимость (2), позволяет найти максимальную глубину проникновения тела в сыпучий материал для рассматриваемого опыта. Для

этого достаточно в (2) подставить  $V_T$ , поскольку максимальное значение координаты  $y$  (размер  $y_{\max}$  на рис. 2) достигается в рассматриваемом случае при остановке тела. В результате, для указанной максимальной глубины можно записать следующее

$$y_{\max} = \left(\frac{M}{\gamma}\right) \cdot V_{\max}, \quad (3)$$

Согласно соотношению (3), при изменении высоты падения  $H$  (т. е. при изменении скорости  $V_{\max} = \sqrt{2gH}$ , отношение  $V_{\max}/y_{\max}$  для данного тела должно оставаться постоянным и равным отношению  $\gamma/M$ ); постоянным должно оставаться и значение коэффициента  $\gamma$ , которое, согласно (3), может быть определено из выражения

$$\gamma = M \cdot \frac{\sqrt{2gH}}{y_{\max}}, \quad (4)$$

что совпадает с представлениями, изложенными в [2].

Для определения коэффициента  $\gamma$  был проведен эксперимент по схеме, изображенной на рис. 2, со стандартной гирей весом 200 г и сухим кварцевым песком в качестве сыпучего материала. Результаты приведены в табл. 1. Наблюдаемый для этих данных малый разброс численного значения отношения ( $\gamma/M$ ) для различных значений  $H$  свидетельствует о возможности надежного определения коэффициента  $\gamma$  экспериментальным путем по рассмотренной схеме, усреднением соответствующих результатов.

Таблица 1

Экспериментальное определение коэффициента  $\gamma$ 

$H$ , мм	$y_{\max}$ , мм	$V_{\max}$ , м/с	$\frac{\gamma}{M} = \frac{\sqrt{2gH}}{y_{\max}}$ , с <sup>-1</sup>
100	25	1,41	56,5
150	30	1,73	57,6
20	35	2	57,2

Учитывая статистический (множественный) характер взаимодействия абразивных частиц рабочей среды с поверхностью изделия, для характеристики этого взаимодействия можно ввести в рассмотрение некоторую среднюю силу взаимодействия рабочей среды и изделия, которая приложена к поверхности изделия (имеется в виду обрабатываемая боковая поверхность изделия). Причем, эта средняя сила направлена против вертикального перемещения изделия. Кроме того, как показано ранее, эта средняя сила (обозначим ее  $F_c$ ) пропорциональна относительной скорости изделия и рабочей среды

$$F_c = \gamma \cdot V_0, \quad (5)$$

где  $V_0$  — скорость изделия относительно рабочей среды,  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, зависит от параметров изделия (форма, размеры, материал) и параметров рабочей среды.

Поскольку, как отмечено выше, съём металла с поверхности изделия определяется взаимодействием абразивной частицы рабочей среды с этой поверхностью, а это взаимодействие может быть описано силой  $F_c$ , то, учитывая пропорциональность съема металла длительности взаимодействия абразивной частицы рабочей среды с поверхностью изделия, для суммарного съема металла, после окончания рассматриваемого процесса виброабразивной обработки, можно записать следующее соотношение

$$\Delta = k_{\Delta} \cdot F_c \cdot t_{\Sigma}, \quad (6)$$

где  $\Delta$  — параметр, характеризующий съём металла с обрабатываемой поверхности изделия (например, толщина снятого в процессе обработки слоя);  $k_{\Delta}$  — некоторый коэффициент, учитывающий особенности рассматриваемого процесса виброобработки;  $t_{\Sigma}$  — суммарная длительность рассматриваемого процесса виброобработки.

Отметим, что, при строгом подходе, описание рабочего процесса для виброабразивной обработки рассматриваемого типа требует обращения к решению уравнения динамики для движущегося возвратно-поступательно по вертикали изделия. Однако, пренебрегая изменениями скорости при смене направления движения изделия, — т. е. считая эти изменения мгновенными (собственно, решение уравнений динамики позволяет получить реальный характер зависимости изменения скорости и направления движения от времени) — можно принять, что и при движении вниз, и при движении вверх изделие имеет некоторую постоянную скорость, обусловленную взаимным уравновешиванием той механической силы, которая приводит изделие в движение, и силы сопротивления движению изделия в рабочей среде (выше эта сила обозначена как сила  $F_c$ ).

Иначе говоря, при приближенном подходе, с усреднением возможных отклонений для параметров рассматриваемого процесса виброабразивной обработки, скорость движения изделия в этом процессе может быть записана как (рис. 3)

$$V_{1,2} = \frac{L_0}{t_{1,2}}, \quad (7)$$

где  $V_{1,2}$  — средняя скорость движения изделия вниз (индекс «1») и вверх (индекс «2»);  $L_0$  — ход по вертикали изделия в рассматриваемом процессе обработки;  $t_{1,2}$  — время движения изделия в процессе обработки вниз (индекс «1») и вверх (индекс «2»).

Таким образом, как это следует из изложенного выше, описание рассматриваемого рабочего

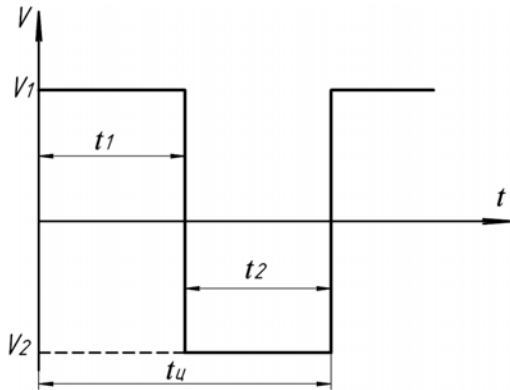


Рис. 3. Принятый для рассматриваемого процесса виброабразивной обработки характер изменения скорости изделия во времени

процесса виброабразивной обработки может быть осуществлено на основе соотношений (5)–(7), которые представляют собой усредненные соотношения для изделия.

В качестве комментария к этим соотношениям укажем на следующее: сопротивление движению тела в сыпучей среде обуславливается не только взаимодействием частиц сыпучей среды с боковой поверхностью тела, но и их взаимодействием с «конусом неподвижности» (частицы среды, накапливающиеся на переднем, по ходу движения, торце тела и неподвижные относительно тела). Поэтому в рассматриваемом случае сила взаимодействия абразивных частиц рабочей среды с боковой поверхностью изделия, которая ответственна за сьем металла, будет меньше силы  $F_c$ , определяемой соотношением (5); коэффициент  $k_\Delta$  в соотношении (6) зависит только от параметров рабочей среды и материала изделия, поскольку параметры изделия учитываются опосредственно силой  $F_c$ .

Последнее может быть легко проверено опытным путем. А именно, пусть рассматриваемой виброабразивной обработке подвергаются два изделия различной длины, одинаковые по всем прочим параметрам (массы изделий, очевидно, пропорциональны длине). Тогда, если сьем металла определяется соотношением (6) при неизменном  $k_\Delta$ , то, при прочих равных условиях, отношение съема металла для разных изделий («а» и «б») будет равно в этом случае отношению соответствующих коэффициентов  $\gamma$ , т. е.

$$\frac{\Delta_a}{\Delta_b} = \frac{\gamma_a}{\gamma_b}, \quad (8)$$

здесь индексы «а» и «б» относятся к изделиям соответствующей длины.

В свою очередь, отношение коэффициентов  $\gamma_a$  и  $\gamma_b$  равно отношению масс изделий «а» и «б» (согласно [3] отношение коэффициента  $\gamma$  к массе не зависит от длины тела, а зависит от поперечного размера, который для изделий «а» и «б» одина-

ков); т. е. отношение коэффициентов  $\gamma_a$  и  $\gamma_b$  равно отношению соответствующих длин изделий «а» и «б» (обозначим их  $l_a$  и  $l_b$ ), что позволяет записать вместо (8) следующее соотношение

$$\frac{\Delta_a}{\Delta_b} = \frac{l_a}{l_b}, \quad (9)$$

которое может быть легко проверено опытным путем.

Для определения мощности привода вибратора для вертикального перемещения изделия необходимо определить механическую мощность, которая расходуется на перемещение изделия в рассматриваемом процессе виброабразивной обработки. Для этого будем исходить из той работы, которую производит изделие, перемещаясь вертикально. Ввиду принятого уравнивания силы, приводящей в движение тело, с силой сопротивления этому движению, искомую работу можно определить из выражения

$$A_{\text{мех}} = F_c \cdot L_0, \quad (10)$$

Отметим, что работа  $A_{\text{мех}}$  определяется зависимостью (10), как при движении изделия вниз, так и при его движении вверх, поскольку сила тяжести при возвратно-поступательном движении изделия производит в среднем нулевую работу (ведь сила тяжести действует то в направлении перемещения изделия, то — в противоположную сторону).

Тогда, исходя из определения мощности (мощность — есть работа в единицу времени), для искомой мощности (обозначим ее  $P_{\text{мех}}$ ) можно записать, согласно (10), следующую цепочку равенств

$$P_{\text{мех}} = \frac{2 \cdot A_{\text{мех}}}{t_1 + t_2} = F_c \cdot \frac{2 \cdot L_0}{t_{\text{ц}}}, \quad (11)$$

где  $2 \cdot A_{\text{мех}}$  — механическая работа в одном цикле движения изделия, совершаемом за время  $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2$  (здесь  $t_1$  и  $t_2$  — соответственно время движения вниз и вверх изделия в рассматриваемом процессе виброабразивной обработки (рис. 3).

Если учесть, что отношение  $2 \cdot L_0 / t_{\text{ц}}$  в (11) определяет среднюю скорость движения изделия в одном цикле возвратно-поступательного движения (обозначим эту скорость  $V_{\text{ср}}$ ), и через эту среднюю скорость выразить по соотношению (5) силу сопротивления  $F_c$ , то вместо (11) для механической мощности по перемещению изделия в рассматриваемом процессе виброабразивной обработки можно записать окончательно соотношение

$$P_{\text{мех}} = \gamma \cdot V_{\text{ср}}^2. \quad (12)$$

Эта мощность передается изделию от вибратора. Но из-за рассеивания мощности в узлах механической передачи ее от привода к вибратору и затем к рассматриваемому изделию, мощность привода должна быть больше мощности определяемой выражением (12), а именно

$$P_{\text{пр}} = \frac{\gamma \cdot V_{\text{ср}}^2}{\eta_1 \cdot \eta_2}, \quad (13)$$

где  $P_{\text{пр}}$  — мощность привода вибратора;  $\eta_1$  — к. п. д. передачи мощности от привода к вибратору;  $\eta_2$  — к. п. д. передачи мощности от вибратора к изделию.

Для численной оценки мощности  $P_{\text{мех}}$  учтем, что удельный коэффициент  $\gamma$  (на единицу массы) скорости  $V_{\text{ср}} \approx 1$  м/с дает для  $P_{\text{мех}}$  значение 0,1...0,9 кВт на 1 кг массы изделия.

#### 4. Выводы

1. Определено, что основным параметром, влияющим на выбор режимов процесса виброшпиндельной обработки, является коэффициент сопротивления рабочей среды  $\gamma$ .

2. Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента  $\gamma$ .

3. Получена зависимость для определения необходимой мощности привода станка.

#### Литература

1. Бранспиз, Е. В. К вопросу создания математической модели виброабразивной обработки деталей на вибрирующем держателе в неподвижном контейнере [Текст] / Е. В. Бранспиз, М. А. Калмыков, Е. В. Нечай // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 3/7 (39). — С. 40–42.
2. Загірняк, М. В. Шкiвні магнітні сепаратори [Текст]: монографія / М. В. Загірняк, Ю. А. Бранспиз. — К.: Техніка, 2000. — 303 с.
3. Горшков, В. М. Основи механіки суцільних середовищ і обчислювальної гідродинаміки [Текст]: навчальний посiбник / В. М. Горшков. — Луганськ: Вид-во СНУ, 2000. — 172 с.

## НА ЗАМЕТКУ ЭНЕРГЕТИКУ

### КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ БОЛЬШОЙ ЕМКОСТИ

© Валерий Степуков

Керамические конденсаторы являются естественным элементом практически любой электронной схемы. Они применяются там, где необходимы способность работать с сигналами меняющейся полярности, хорошие частотные характеристики, малые потери, незначительные токи утечки, небольшие габаритные размеры и низкая стоимость. Там же, где подобные требования пересекаются, керамические конденсаторы практически незаменимы. Но проблемы, связанные с технологией их производства, отводили этому типу конденсаторов, в основном, нишу устройств малой емкости. Действительно, керамический конденсатор на 10 мкФ еще недавно воспринимался как удивительная экзотика, и стоило такое чудо как горсть алюминиевых электролитических тех же емкости и напряжения, либо как несколько аналогичных танталовых.

Однако, развитие технологий позволило сразу нескольким фирмам к настоящему времени сразу нескольким фирмам заявить о достижении их керамическими конденсаторами емкости в 100 мкФ и анонсировать начало производства еще больших значений еще до конца этого года. А сопровождающее этот процесс непрерывное падение цен на все изделия данной группы заставляет внимательнее присмотреться ко вчерашней экзотике, чтоб не отстать от технического прогресса и сохранить конкурентоспособность.

*Несколько слов о технологиях.* Говоря о керамических конденсаторах, мы будем рассматривать многослойные керамические конденсаторы. На рис. 1 представлена структура такого конденсатора, а на рис. 2 — фотография сильно увеличенного среза

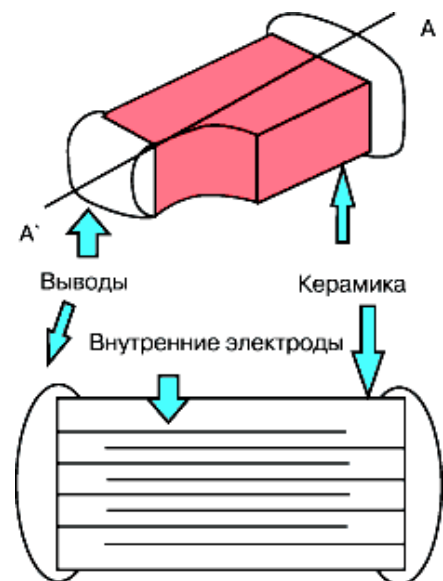


Рис. 1

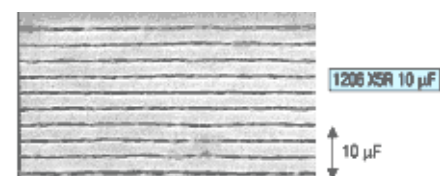


Рис. 2