

УДК 621.75

А.П. Минаков, д-р техн. наук, проф., И.Д. Камчицкая

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПНЕВМОВИБРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

В статье представлена методика оценки технической эффективности инструментов для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей.

Показатель технической эффективности инструментов циклического действия по энергоемкости рабочего процесса, к которым и относится инструмент для пневмовибродинамической обработки (ПВДО) плоских поверхностей, конструктивная схема которого представлена в [1], принято оценивать по формуле [2]

$$\Pi_{\text{тех.эф.}} = \frac{N_{\text{м}}}{\Pi}, \quad (1)$$

где $N_{\text{м}}$ – мощность пневмопривода, необходимая для работы инструмента, Вт; Π – эксплуатационная производительность инструмента.

$$\Pi = \frac{A^{\text{пол}}}{A^{\text{пол}} + A^{\text{вред}}} \cdot \frac{1}{T}, \quad (2)$$

где $A^{\text{пол}}$ – полезная работа, переходящая в энергию пластических (остаточных) деформаций; $A^{\text{вред}}$ – вредная работа, создающаяся из-за сил сухого трения шаров-ударников о стенки направляющего канала; T – время обработки поверхности.

Для оценки допустим, что работу сил, переходящую в тепловую, звуковую энергии и энергию упругих деформаций, считаем одинаковой для всех конструкций инструментов и включаем как константу в работу полезных сил моделей.

Вредная работа складывается из работы сил трения в рабочей и в холостой зонах (рис. 1):

$$A^{\text{вред}} = A^{\text{вред}}_{\text{раб}} + A^{\text{вред}}_{\text{хол}}. \quad (3)$$

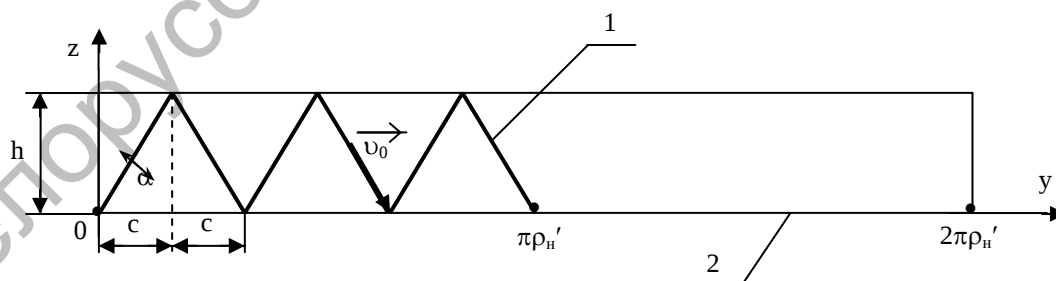


Рис. 1. Развертка усредненной траектории движения шара-ударника на вертикальную плоскость: 1 – в рабочей зоне; 2 – в холостой зоне

Вредную работу сил трения шаров-ударников о стенку наружного канала в рабочей зоне вычислим в предположении, что шары-ударники являются материальными точками, качение шаров-ударников отсутствует, силы трения скольжения шаров-ударников о направляющие постоянны по величине:

$$A_{\text{раб}}^{\text{пред}} = F_{\text{тр}} \cdot S \cdot n \cdot k, \quad (4)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения для одного шара-ударника; S – путь трения шара-ударника за половину цикла (циклом считается движение ударника от нижней направляющей до верхней и обратно), число циклов равно числу ударов о шар-боёк; n – число циклов за один проход шара-ударника по направляющему каналу; k – число шаров-ударников.

Для вычисления длины S одного звена ломаной траектории воспользуемся формулой

$$S = \sqrt{h_*^2 + c^2}, \quad (5)$$

где h_* – высота треугольника усредненной ломаной траектории;

$$h_* = \frac{h}{\sin \beta}, \quad (6)$$

где β – угол наклона образующей конического рабочего канала шаров-ударников с горизонтальной плоскостью;

$$c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_n}{2 \cdot n} = \frac{\pi \cdot \rho_n}{n}, \quad (7)$$

где ρ_n – радиус направляющей с учетом радиуса шара-ударника.

С учетом (6) и (7) формулу (5) можно переписать в виде:

$$S = \sqrt{\frac{h^2}{\sin^2 \beta} + \frac{\pi^2 \cdot \rho_n^2}{n^2}}. \quad (8)$$

Силу трения скольжения можно определить по закону Кулона:

$$F_{\text{тр}} = f \cdot N, \quad (9)$$

где f – коэффициент трения скольжения шара-ударника о направляющую рабочего канала; N – средняя нормальная реакция направляющей рабочего канала на шар-ударник.

Рассматривая рис. 2, согласно принципу Даламбера, имеем

$$N = \Phi_e^n \cdot \sin \beta - m \cdot g \cdot \cos \beta, \quad (10)$$

где Φ_e^n – средняя переносная центробежная сила инерции шара-ударника; m – масса шара-ударника; g – ускорение свободного падения.

$$\Phi_e^n = m \cdot a_e^n, \quad (11)$$

где a_e^n – среднее переносное центростремительное ускорение шара-ударника:

$$a_e^n = \rho_n \cdot \omega^2, \quad (12)$$

где ρ_n – средний радиус переносного движения шара-ударника; ω – круговая скорость вращения шара-ударника вокруг вертикальной оси симметрии инструмента.

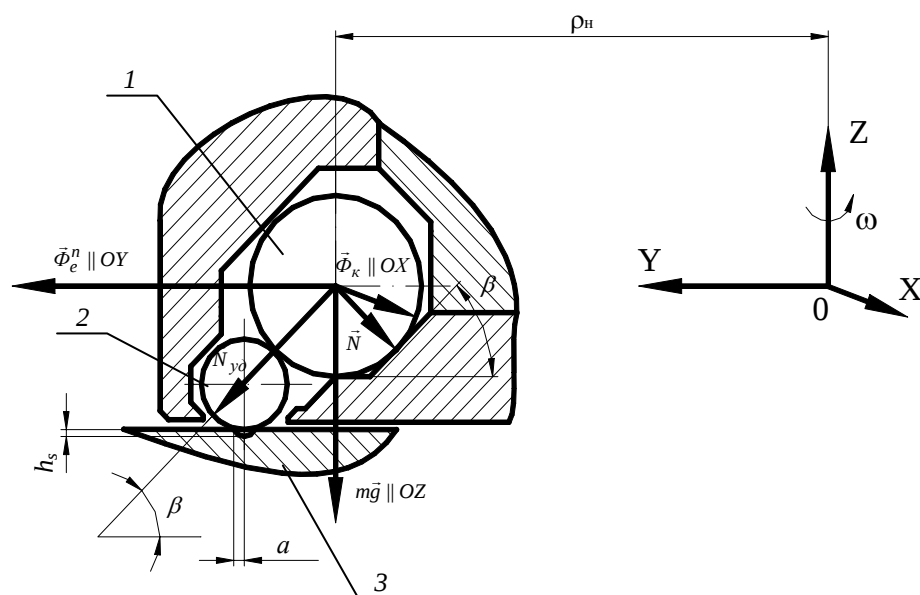


Рис. 2. Схематическое сечение кольцевого канала движения шаров в рабочей зоне инструмента: 1- шар-ударник; 2 – шар-боек; 3 – обрабатываемая поверхность

Формулу (10) перепишем в виде:

$$N = m \cdot (\rho_n \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta - g \cdot \cos \beta). \quad (13)$$

Формула (13) справедлива как при движении ударника вверх, так и вниз.

Так как работа силы трения в инструменте всегда отрицательна, то будем пользоваться формулой

$$N = m \cdot |\rho_n \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta - g \cdot \cos \beta|. \quad (14)$$

Таким образом, формула (4) с учетом (8), (9), (14) примет вид:

$$A_{\text{ред}}^{\text{ср}} = k \cdot m \cdot n \cdot f \cdot |\rho_n \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta - g \cdot \cos \beta| \cdot \sqrt{\frac{h^2}{\sin^2 \beta} + \frac{\pi^2 \cdot \rho_n^2}{n^2}}. \quad (15)$$

Длина холостого пути шара-ударника по кольцевому каналу определяется по формуле

$$S_{\text{хол}} = \pi \cdot \rho_n. \quad (16)$$

При движении шара-ударника по кольцевому каналу холостого хода возникают нормальные реакции $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$, так как движение считаем равномерным, то возникает центробежная сила инерции $\vec{\Phi}_e^n$. Можно учесть и силу тяжести $m\vec{g}$ (рис. 3).

Согласно принципу Даламбера имеем:

$$\vec{\Phi}_e^n + m \cdot \vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_1^{mp} + \vec{F}_2^{mp} = 0. \quad (17)$$

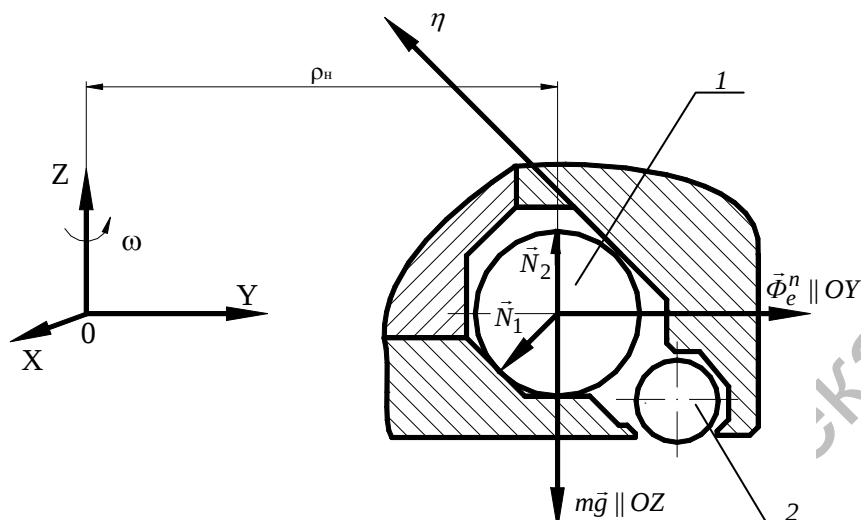


Рис. 3. Схематическое сечение кольцевого канала движения шаров в холостой зоне инструмента: 1 - шар-ударник; 2 – шар-боек

В проекции на оси y и η имеем:

$$(y): \Phi_e^n - N_1 \cdot \sin \beta = 0;$$

$$(\eta): -\Phi_e^n \cdot \cos \beta - m \cdot g + N_2 \cdot \sin \beta = 0.$$

$$N_1 = \frac{m \cdot \rho_n \cdot \omega^2}{\sin \beta}; \quad (18)$$

$$N_2 = \frac{m \cdot (g + \rho_n \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta)}{\sin \beta}. \quad (19)$$

Рассматривая наиболее неблагоприятный случай, когда шар-ударник скользит без качения по направляющей, вредную работу сил трения вычисляем как арифметическую сумму работ сил трения по двум направляющим (боковой и нижней), сознательно не заменяя $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ их равнодействующей. Тогда

$$A_{хол}^{вред} = (F_1^{mp} \cdot S_{кол} + F_2^{mp} \cdot S_{кол}) \cdot k, \quad (20)$$

где $A_{хол}^{вред}$ – вредная работа сил трения при движении шара-ударника по кольцевому каналу холостого хода.

С учетом формул (9), (16), (18), (19)

$$A_{хол}^{вред} = \frac{m \cdot (\pi \cdot \rho_n)}{\sin \beta} \cdot [f_1 \cdot \rho_n \cdot \omega^2 + f_2 \cdot (g + \rho_n \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta)] \cdot k, \quad (21)$$

где f_1 и f_2 – коэффициенты трения скольжения о боковую и нижнюю направляющие.

Полезная работа ударных сил вычисляется по формуле

$$A^{пол} = N_{y\partial} \cdot h_s \cdot k, \quad (22)$$

где $N_{y\partial}$ – средняя нормальная ударная реакция обрабатываемой поверхности на шар-бойк; h_s – средняя нормальная остаточная деформация обрабатываемой поверхности по глубине; k – число шаров-бойков в рабочем полукольце.

Среднюю нормальную остаточную деформацию обрабатываемой поверхности определим используя зависимость [3]:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 1,42 \cdot a^2}, \quad (23)$$

где P – контактная нагрузка; σ_T – предел текучести обрабатываемой детали; a – размер полуоси отпечатка.

Среднюю нормальную ударную реакцию вычислим используя теорему об изменении количества движения шара-ударника

$$m\vec{v}_\kappa - m\vec{v}_0 = \int_0^{\tau_{y\partial}} \vec{N}_{y\partial} dt, \quad (24)$$

где m – масса шара-ударника; $\vec{v}_0, \vec{v}_\kappa$ – начальная и конечная скорости удара соответственно; $\tau_{y\partial}$ – время удара; $\vec{N}_{y\partial}$ – ударная реакция обрабатываемой поверхности.

Удар считаем абсолютно неупругим, вернее учитываем только пластическую часть ударного процесса. Тогда можно считать, что $\vec{v}_\kappa = 0$.

Запишем теорему в проекции на нормаль к обрабатываемой поверхности (см. рис. 1, 2)

$$m \cdot v_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta = \int_0^{\tau_{y\partial}} N_{y\partial}(t) dt.$$

Применим теорему о среднем Лагранжа:

$$N_{y\partial} = m \cdot v_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \frac{v_0}{\tau_{y\partial}}, \quad (25)$$

где v_0 – начальная скорость шара-ударника при его ударе по бойку. Так как боёк считаем недеформируемым, то это и будет начальная скорость удара по обрабатываемой поверхности; $\tau_{y\partial}$ – время пластического удара.

Начальную скорость v_0 (см. рис. 1) определим по формуле

$$v_0 = \frac{\omega \cdot \rho_n}{\cos \alpha}. \quad (26)$$

Таким образом, формулу (25) можно переписать в виде:

$$N_{y\partial} = m \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \frac{\omega \cdot \rho_n}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{\tau_{y\partial}}$$

или

$$N_{y\partial} = m \cdot \sin \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \omega \cdot \rho_n \cdot \frac{1}{\tau_{y\partial}}. \quad (27)$$

Время удара можно определить по экспериментальной формуле [4]

$$\tau_{y\partial} = 2,943 \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{m}{\gamma} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot v_0^{\frac{1}{5}}. \quad (28)$$

Вывод

Методика оценки эффективности инструментов для ИУ ПВДО плоских поверхностей по энергоемкости рабочего процесса позволит уже на стадии проектирования сделать вывод о техническом уровне и прогнозировать создание новых способов ИУ ПВДО плоских поверхностей и конструктивных схем инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 28460, МКИ7 В24 В39/06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая (РБ). – № 2002106892/20; заявл. 18.03.2002 ; опубл. 27.03. 2003, Бюл. № 9. – 1 с.
2. Баловнев, В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1994. – 432 с.
3. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
4. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – Л. : Машиностроение, 1976. – 320 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 14.11.2005

A.P. Minakov, I. D. Kamchitskaya
Technique of an estimation of technical
efficiency of the tool for pneumovibrodynamic
impulse-impact working flat surfaces on power
consumption of working process
Belarusian-Russian University

The technique of an estimation of technical efficiency of tools for pneumovibrodynamic impulse-impact working of flat surfaces is submitted in this paper.