МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621. 75

Н. С. Гарлачов, канд. техн. наук, доц., Е. Н. Антонова

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТЫ, СОВЕРШАЕМОЙ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНЫМ РАСКАТНИКОМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье представлена методика определения работы, совершаемой пневмоцентробежным раскатником, при обработке внутренних цилиндрических поверхностей. Данная методика разработана на основании энергетического анализа пневмоцентробежного раскатника, основных законов динамики и пневматики. В статье рассмотрена механика процессов, происходящих в рабочей камере инструмента, влияние конструктивных и технологических факторов на работу, совершаемую инструментом. Методика позволяет определить не только работу, но и ряд важных параметров, таких как давление в рабочей камере инструмента, оптимальное значение зазора между обрабатываемой заготовкой и инструментом, скорость вращения шаров и др.

Введение

Создание качественных инструментов для пневмовибродинамической обработки требует проведения теоретического анализа и опытно-экспериментальных работ, что определяет затраты и сроки внедрения инструментов и способа обработки в производство.

Проведённый патентный поиск и анализ литературных источников показывает, что отсутствуют зависимости, определяющие работу, совершаемую деформирующими элементами (шарами) по смятию неровностей обрабатываемого материала применительно к конструктивным особенностям пневмоцентробежных раскатников. Наличие таких зависимостей позволит автоматизировать выбор конструктивных и технологических параметров для обработки нежёстких деталей из материалов различной твердости по их экономически целесообразным характеристикам.

1 Определение работы, совершаемой шариком для смятия микронеровностей

Исследования механизма воздействия рабочих тел на поверхность заготовки показали, что пневмоцентробежная обработка сопровождается прерывистым кратковременным ударным контактом рабочих тел с поверхностью заготовки. При этом турбулентное движение потока сжатого воздуха при его адиабатическом истечении создаёт условия автоколебательного перемещения рабочих тел, снижая существенно силу поверхностного деформирования и интенсифицируя процесс обработки. Шары, приводимые в движение сжатым воздухом, прижимаются к внутренней поверхности заготовки при вращении, ударе, качении и проскальзывании в зонах их контакта с исходным микрорельефом [2].

Суммарную работу, совершаемую шарами при пластической деформации (смятии микронеровностей) поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, можно определить по зависимости

$$\sum A = F_{max\,уд} \cdot l \cdot Z_{ш} , \qquad (1)$$

где $F_{max\,уд}$ – максимальная сила удара шаром, Н; l – путь, который совершает шар при смятии микронеровностей под действием ударной силы, м; $Z_{ш}$ – количество шаров в инструменте.

Суммарная работа инструмента зависит от подачи инструмента.

Примем, что путь, который прохо-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

дит шарик при вдавливании металла l, равен разнице шероховатостей исходной и конечной:

$$l = R_{a\ исх} - R_{a\ к1}, \qquad (2)$$

где $R_{a\ исх}$ – шероховатость поверхности детали до обработки, мкм; $R_{a\ к1}$ – шероховатость поверхности детали после обработки без учета упругой деформации, мкм.

Шероховатость поверхности детали после обработки без учета упругой деформации можно определить согласно рекомендациям [3] по формуле

$$R_{ак1} = \frac{S_0^2}{8r_ш}, \qquad (3)$$

где S_0 – осевая подача инструмента, мм/об; $r_ш$ – радиус шарика, мм.

Согласно методике определения аэродинамических характеристик процесса пневмоцентробежной обработки и выбора конструктивных параметров инструмента [2] количество шаров в инструменте определяется по зависимости

$$Z_ш = \frac{360^\circ}{2arcsin\, d_ш/(D_{дет} - d_ш)}, \qquad (4)$$

где $d_ш$ – диаметр шара, м; $D_{дет}$ – диаметр обрабатываемой заготовки, м.

Если выразить ударную силу через импульс, то согласно основному закону динамики импульс изменится в течение времени t под влиянием внешних воздействий [6]:

$$F_{max\ уд} = \frac{p}{t}, \qquad (5)$$

где p – импульс ударной силы шара, кг·м/с; t – время удара, с.

Удар шара о заготовку не является абсолютно упругим. Импульс ударной силы, действующей на стенку детали, равен

$$p = m_ш \cdot V_{отн}, \qquad (6)$$

где $m_ш$ – масса шара, кг; $V_{отн}$ – относительная скорость шара до удара, м/с.

Несмотря на то, что скорость шара неравномерна, в определенный момент времени t она совпадает со значением, определяемым по формуле

$$t = \frac{L}{V_{ш1}},$$

где L – путь работы шара (максимальный путь, совершаемый шаром при смятии микронеровностей под действием ударной силы $F_{max\ уд}$), м; $V_{ш1}$ – скорость шара до удара, м/с.

Путь, совершаемый шаром при смятии микронеровностей под действием ударной силы $F_{max\ уд}$, определим из выражения

$$L = R_{a\ исх} - R_{a\ кон}, \qquad (7)$$

где $R_{a\ исх}$ – шероховатость поверхности до обработки; $R_{a\ кон}$ – шероховатость поверхности после обработки.

С другой стороны, по второму закону Ньютона ускорение шара

$$a = \frac{V_ш}{t}; \qquad l = \frac{a \cdot t^2}{2}.$$

Подставляя выражение ускорения получим

$$L = \frac{V_{ш1} \cdot t}{2}.$$

Из последнего выражения найдём время t:

$$t = \frac{2L}{V_{ш1}}.$$

$$F_{max\ уд} = \frac{p}{t} = \frac{m_ш \cdot V_{отн} \cdot V_{ш1}}{2 \cdot L}. \qquad (8)$$

Подставив значение времени в выражение (8), а затем в выражение суммарной работы (1), получим

$$\sum A = \frac{1}{2L}\, p \cdot V_{ш1} \cdot z_ш \cdot l. \qquad (9)$$

Относительная скорость шара определяется в зависимости от направления движения детали и инструмента (шаров в рабочей камере):

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

$$V_{ш\,отн.} = V_{ш} + V_{дет}, \qquad (10)$$

где $V_{дет}$ – скорость вращения заготовки, м/с; $V_{ш}$ – скорость движения шара, м/с.

Скорость заготовки положительна, если её вращение противоположно вращению шаров, и отрицательна – при попутном вращении заготовки и шаров.

Скорость движения шара $V_{ш}$ определяется разностью скоростей шара до и после удара:

$$V_{ш} = V_{ш1} - V_{ш2}, \qquad (11)$$

где $V_{ш1}$ – скорость шара до удара, м/с; $V_{ш2}$ – скорость шара после удара, м/с.

2 Определение скорости шара до удара

В камере расширения шары приводятся в движение под действием струй воздуха, выходящего из сопел. Скорость шара до удара примем равной

$$V_{ш1} = K_v \cdot V_{стр}, \qquad (12)$$

где K_v – коэффициент, изменяющийся от 0,045 до 0,375, в зависимости от диаметров шаров и детали. Значения коэффициента определялись для диапазона диаметров обрабатываемых заготовок 23...120 мм и диаметров шаров от 5 до 13 мм. Наибольшее значение коэффициент принимает при минимальных значениях диаметров шаров и заготовки, а наименьшее – при максимальных значениях диаметров шаров и заготовки; $V_{стр}$ – скорость воздуха, выходящего из сопла (скорость струи), м/с.

2.1 Определение скорости струи воздуха

Максимальная сила воздуха в струе определяется по зависимости [1]

$$F_{max\,стр} = Q_{max\,стр} \cdot V_{стр}, \qquad (13)$$

где $Q_{max\ стр}$ – массовый расход воздуха, проходящий через струю, кг/с; $V_{стр}$ – скорость воздуха в струе, м/с.

Для определения давления в рабочей камере P_k используем зависимость массового расхода воздуха через все сопла:

$$Q_{т.вх.} = \mu \cdot z_c \cdot f_c \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P_k}{\rho_0}}, \qquad (14)$$

где $Q_{т.вх.}$ – массовый расход воздуха входной, кг/с; μ – коэффициент расхода через канал (для канала (сопла) цилиндрического сечения μ = 0,82); z_c – число сопл; f_c – площадь сечения сопла, м²; ΔP_k – потери давления при прохождении воздуха из осевой полости инструмента в рабочую камеру, Па; ρ_0 – плотность воздуха в осевой полости инструмента, кг/м³.

$$\Delta P_k = P_0 - P_k. \qquad (15)$$

Из формулы (15) находим давление в камере инструмента P_k:

$$Q^2_{т.вх.} = \mu^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} f_c \right)^2 \cdot 2 \frac{P_o - P_k}{\rho_o};$$

$$P_o - P_k = \frac{Q^2_{т.вх.} \cdot \rho_o}{\mu^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} f_c \right)^2 \cdot 2};$$

$$P_k = P_o - \frac{Q^2_{т.вх.} \cdot \rho_o}{\mu^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} f_c \right)^2 \cdot 2}.$$

Так как площадь сопл обычно одинаковая, то сумму площадей сечения сопл представляем как произведение $z_c \cdot f_c$, где z_c – количество сопл, тогда

$$P_k = P_o - \frac{Q^2_{т.вх.} \cdot \rho_o}{\mu^2 \cdot z_c^2 \cdot f_c^2 \cdot 2}. \qquad (16)$$

Как было показано в [5], максимальная скорость струи будет при условии $P_k = 0{,}5\ P_0$, что соответствует условию критического истечения.

Скорость струи при условии критического истечения определяется по формуле

$$V_{соп.кр.} = \varphi \sqrt{2 \cdot \left(\frac{k}{k+1} \right) \cdot P_0 \cdot \nu}. \qquad (17)$$

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

С другой стороны, давление в рабочей камере P_k можно выразить из выражения массового расхода воздуха на выходе из инструмента через кольцевой зазор между обрабатываемой деталью и инструментом:

$$Q_{вых} = \mu_з \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot \gamma \sqrt{2\frac{\Delta P_з}{\rho_з}} \cdot \rho_з, \quad (18)$$

где $\mu_з$ – коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом; $D_{дет}$ – диаметр обрабатываемой детали, м; γ – величина зазора между деталью и инструментом, м; $\Delta P_з$ – потери давления воздуха при прохождении через зазор, Па; $p_з$ – плотность воздуха в зазоре, кг/м^3.

$$\Delta P_з = P_k - P_{вых}, \quad P_{вых} = 0,$$

тогда

$$\Delta P_з = P_k,$$

где $P_{вых}$ – давление воздуха на выходе из инструмента в атмосферу.

$$Q^2_{вых.} = \mu_з^2 \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot \gamma^2 \cdot 2P_k \cdot P_з;$$

$$P_k = \frac{Q^2_{вых}}{2\mu_з^2 \cdot \pi^2 \cdot D^2_{дет} \cdot \gamma^2 \cdot \rho_з}. \quad (19)$$

$$Q_{вых} = Q_c = \mu_c \cdot f_c \cdot z_c \times$$

$$\times \sqrt{2\frac{k}{k+1} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{P_{вых}}{v}}, \quad (20)$$

где μ_c – коэффициент расхода воздуха ($\mu_c = 0{,}82$ – для цилиндрических сопел).

Коэффициент расхода воздуха через кольцевой зазор в случае неполного сжатия струи $\mu_з$ [1]:

$$\mu_з = \mu\left(1 + c \cdot \frac{n}{\chi}\right), \quad (21)$$

где c – коэффициент (для круглого отверстия c = 0,13; прямоугольного – c = 0,15); n – периметр части контура отверстия, на котором отсутствует сжатие, м:

$$n = \pi \cdot D_{дет};$$

χ – периметр всего отверстия, м:

$$\chi = \pi D_{дет} + \pi D_{ин},$$

где $D_{дет}$ – диаметр обрабатываемой детали, м; $D_{ин}$ – диаметр инструмента, м.

Давление струи сопла на плоскую пластину, перпендикулярную скорости струи, определяется согласно зависимости [1]

$$P_c = \frac{V_1^2}{2 \cdot v_1} = \rho \cdot \frac{V_1^2}{2},$$

где V_1 – скорость потока воздуха на выходе из сопел, м/с; v_1 – удельный объем воздуха в рассматриваемом сечении, м^3/кг; ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

Используя вышепредставленную зависимость, определим скорость струи:

$$V_{стр} = \mu_c \cdot \sqrt{2\frac{\Delta P_c}{\rho_c}}, \quad (22)$$

где ΔP_c – потери давления при прохождении через сопло:

$$\Delta P_c = P_o - P_k.$$

Рассмотрим баланс мощностей. Мощность входного потока определяется из выражения

$$N = P_o \cdot Q_o, \quad (23)$$

где P_o – давление в осевой полости инструмента, Па; Q_o – объемный расход через осевую полость инструмента, м^3/с.

Мощность входного потока расходуется на:

– потери при движении воздуха в соплах ΔN_c;

– истечение из рабочей камеры в атмосферу $\Delta N_з$;

– потери давления в рабочей камере (воздействие струи на шарики, вихреобразование ΔN)).

Потери при движении воздуха в соплах

$$\Delta N_c = \Delta P_c \cdot \Sigma Q_{o.вх}, \quad (24)$$

где ΔP_c – потери давления при истечении из сопел:

$$\Delta P_c = P_{вх} - P_k, \quad (25)$$

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

где $P_{вх}$ – входное давление; P_k – давление в рабочей камере.

Потери мощности при истечении из рабочей камеры в атмосферу через зазор

$$\Delta N_з = \Delta P_з \cdot Q_з, \quad (26)$$

где $\Delta P_з$ – потери давления в рабочей камере и атмосфере, Па; $Q_з$ – расход через зазор «деталь–инструмент», кг/с.

С другой стороны, потери мощности через зазор можно выразить следующим образом:

$$\Delta N_з = \Delta N_{вх} + \Delta N_{вых}, \quad (27)$$

где $\Delta N_{вх}$ – потери мощности на входе в зазор; $\Delta N_{вых}$ – мощность потока, выходящего в атмосферу.

Потери давления в рабочей камере

$$\Delta P_k = \rho \frac{V^2}{2} \xi, \quad (28)$$

где ρ – плотность воздуха в данном сечении, кг / м^3; V – скорость истечения воздуха, м/с; ξ – коэффициент сопротивления.

Принимаем, что объемный расход воздуха постоянен, т. е. Q = const, тогда уравнение баланса мощности с учетом вышерассмотренных положений будет иметь вид:

$$N = \Delta N_c + \Delta N_з + \Delta N_к. \quad (29)$$

Подставив вышерассмотренные составляющие через потери давления, получим выражение

$$P_{вх} = \Delta P_c + \Delta P_к + \Delta P_з. \quad (30)$$

Найдем выражение для определения расхода воздуха через сопла:

$$Q_c = \mu_c \cdot z_c \cdot f_c \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P_c}{\rho}}. \quad (31)$$

Выразим потери давления через сопла:

$$\Delta P_c = \frac{Q_c^2 \cdot \rho_c}{2\mu_c^2 \cdot z_c^2 \cdot f_c^2}. \quad (32)$$

Аналогичная зависимость для расчета потерь давления при прохождении воздуха через щель (зазор):

$$\Delta P_з = \frac{Q_з^2 \cdot \rho_з}{2\mu_з^2 \cdot f_з^2}, \quad (33)$$

где $f_з$ – площадь сечения зазора (щели) «деталь – инструмент», м².

Преобразуя выражение (28) через (22), определим потери давления в рабочей камере:

$$\Delta P_k = \rho \frac{V_{стр}^2}{2} = \frac{2 \cdot \Delta P_c \cdot \rho \cdot \mu_c^2}{2\rho} = \mu_c^2 \cdot \Delta P_c. \quad (34)$$

2.2 Определение оптимальной величины зазора между деталью и инструментом

Максимальная скорость струи воздуха, поступающего из сопла в камеру расширения, зависит от величины зазора между деталью и инструментом, которая, в свою очередь, определяется давлением в рабочей камере, равным половине входного давления.

Потери давления через зазор определяются по формуле (34).

В свою очередь, потери через зазор – это разность между давлением в камере и атмосферным:

$$P_k - P_a = \Delta P_з; \quad (35)$$

$P_k = 0{,}5P_o$; $0{,}5P_o - P_a = \Delta P_з$; $P_a = 0$,

тогда $\Delta P_з = 0{,}5P_o$.

$$0{,}5P_0 = \frac{Q_з^2 \cdot \rho_з}{2 \cdot \mu_з^2 \cdot f_з^2}. \quad (36)$$

Из этого выражения определим оптимальную площадь сечения зазора:

$$\pi \cdot D_{дет} \cdot \gamma = \sqrt{\frac{Q_3^2 \cdot \rho_3}{\mu_3^2 \cdot P_0}},$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\frac{Q_з^2 \cdot \rho_з}{\mu_з^2 P_o}}}{\pi D_{дет}}. \quad (37)$$

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

3 Определение давления в камере расширения

Исходя из уравнения баланса массового расхода, согласно которому величина массового расхода на входе в рабочую камеру и на выходе из нее является постоянной, используя полученные зависимости (20) и (14), запишем равенство

$$\mu_3 \cdot \pi D_{дет} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_k}{\rho_з}} \cdot \rho_з = $$

$$= \mu_c \cdot f_c \cdot z_c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_0 - P_k}{\rho_0}} \cdot \rho_0.$$

Преобразуя данное уравнение, выразим давление в камере P_k:

$$P_k = \frac{\mu_c^2 \cdot f_c^2 \cdot z_c^2 \cdot P_0 \cdot \rho_0}{\mu_3^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{дет}^2 \cdot \gamma^2 \rho_3 + \mu_c^2 \cdot f_c^2 \cdot z_c^2 \cdot \rho_0}. \quad (38)$$

Полученная зависимость позволяет рассчитать давление в камере инструмента, исходя из различных конструктивных и технологических параметров, таких как число z_c и площадь сопел f_c, входного давления P_0, зазора γ между деталью и инструментом и формой сопел.

Заключение

Работа, совершаемая шарами, зависит от конструктивных параметров инструмента (диаметров сопел и шаров, формы и расположения сопел, зазора между заготовкой и инструментом) и технологических факторов (давления, подачи).

Методика определения работы, совершаемой пневмоцентробежным раскатником при обработке внутренних цилиндрических поверхностей, позволяет определить не только работу, но и ряд важных параметров, таких как давление в рабочей камере инструмента, оптимальное значение зазора между обрабатываемой заготовкой и инструментом. Это позволяет ускорять проектные работы и обоснованно выбирать режимы обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Башта, Т. Н.** Машиностроительная гидравлика : справ. пособие / Т. Н. Башта. – М. : Машиностроение, 1971. – 671 с.

2. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 304 с.

3. **Папшев, Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.

4. **Парахневич, В. Т.** Энергетический анализ пневмоцентробежного шарикового раскатника / В. Т. Парахневич, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 188–192.

5. **Сергель, О. С.** Прикладная гидрогазодинамика / О. С. Сергель. – М. : Машиностроение, 1981. – 376 с.

6. **Ядворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Ядворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1990 – 624 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 18.01.2007

N. S. Garlachov, E. N. Antonova
Technique of definition of work made pneumocentrifugal roller at processing internal cylindrical surfaces
Belarusian-Russian University

In the article the technique of definition of work made pneumocentrifugal roller is submitted at processing internal cylindrical surfaces. The given technique is developed on the basis of the power analysis pneumocentrifugal roller, organic laws of dynamics and a pneumatic. In the article the mechanics of the processes occuring in the working chamber of the tool, influence constructive and technology factors for work made is considered by the tool. The technique allows to define not only work, but also a row of the important parameters, such as pressure in the working chamber of the tool, optimum value of a backlash between processable preparation and the tool, speed of rotation of spheres.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета