МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.787

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

УПРАВЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ И ФОРМОЙ МИКРОРЕЛЬЕФА ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения шероховатости по параметру Ra и формы микрорельефа поверхности при пневмоцентробежной обработке отверстий двухрядным пневмоцентробежным раскатником. На базе проведенного энергетического анализа получена математическая модель пневмоцентробежной обработки отверстий, позволяющая определить шероховатость поверхности при заданных режимах обработки и конструктивных параметрах раскатника. Указаны пути управления формой микрорельефа поверхности и шероховатостью поверхности.

Методы поверхностного пластического деформирования давно известны и широко используются в машиностроении. Процесс пневмоцентробежной обработки (ПЦО) применим для любого типа производства с использованием как специального, так и универсального оборудования и имеет ряд преимуществ перед традиционными способами финишной обработки отверстий мало- и неравножестких деталей, таких например, как вкладыши подшипников скольжения, гильзы цилиндров, шатуны, поршни компрессоров и двигателей внутреннего сгорания и другие.

Известно, что надежность и долговечность деталей пар трения в большей степени зависят от формы микрорельефа и шероховатости рабочих поверхностей. Достичь заданных параметров качества поверхности невозможно без совершенствования конструкции инструмента и оптимизации выбора режимов обработки.

На основании анализа теоретических основ ПЩО установлено, что отсутствуют математическая модель процесса и программа расчета, позволяющая обоснованно назначать рациональные режимы обработки и конструктивные параметры раскатников в зависимости от твердости обрабатываемого материала для достижения требуемой шероховатости поверхности и формы микрорельефа, что повысило бы качество обработки и позволило бы сократить время на проведение опытно-экспериментальных работ. В связи с этим разработка математической модели пневмоцентробежной обработки поверхности отверстий, позволяющей прогнозировать и достигать требуемую шероховатость и форму микрорельефа поверхности, является актуальной задачей. 220

На базе существующих теоретических основ пневмоцентробежной обработки поверхностей отверстий проведен энергетический анализ пневмоцентробежных раскатников, позволяющий учесть потери энергии при преобразовании энергии давления сжатого воздуха в энергию смятия микронеровностей, а также установлены взаимосвязи основных конструктивных параметров инструмента и режимов обработки с величиной шероховатости и формой микрорельефа поверхности, полученной после обработки.

Кинематика потоков сжатого воздуха в раскатнике (распределение энергии) представлена на рис. 1.

Потенциальная энергия сжатого воздуха E преобразуется в кинетическую энергию струй E_c , шаров $E_{\rm m}$, энергию смятия микронеровностей $E_{\rm CM}$ и энергию проталкивания в зазоре между инструментом и заготовкой E_{np} . В процессе преобразования происходят потери энергии в соплах $\Delta E_{\rm c}$, камере расширения ΔE_{κ} и в зазоре между инструментом и заготовкой ΔE_{np} . Тогда суммарная потенциальная энергия поступающего воздуха (баланс энергий) будет определяться по формуле

В свою очередь, часть кинетической энергии шара $E_{\rm m}$ уходит на трение и другие потери в камере расширения $E_{\rm TD}$, а ее основная часть – на смятие неровностей поверхности Есм:

$$E_{\rm III} = E_{\rm Tp} + E_{\rm cm}.\tag{2}$$

$$E = E_{\rm III} + E_{\rm np} + \Delta E_{\rm np} + \Delta E_{\rm \kappa} + \Delta E_{\rm c}.$$
 (1)

Для наглядности представляем преобразования графически схему энергии на рис. 2.



Результаты экспериментальных исследований процесса пневмоцентробежной обработки отверстий показывают, что

на шероховатость поверхности наиболь-

шее влияние оказывают давление сжатого воздуха в осевой полости и подача инструмента. Так, при давлении сжатого воздуха 0,15...0,3 МПа и подаче 90...150 мм/мин обеспечивается шероховатость поверхности Ra 0,3...0,5 мкм с исходной Ra 5...4 мкм. Установлено, что на форму микрорельефа наибольшее влияние оказывает количество сопел и их расположение. Так, при минимальном расстоянии от оси сопел до оси инструмента, при котором происходит вращение шаров вокруг оси инструмента, и количестве сопел от 4 до 6 обеспечивается получение луночного микрорельефа. При максимальном расстоянии от оси сопел до оси инструмента и количестве сопел 8...12 при применении двухрядного раскатника обеспечивается получение регулярного микрорельефа в виде ромбической сетки. Если сопла, выполненные на противоположных торцах распорного кольца, расположить не напротив друг друга, а со смещением, увеличив при этом осевой зазор между кольцами, образующими камеру расширения, то деформирующие шары наряду с орбитальным вращением вокруг оси инструмента будут совершать осциллирующие движения и вдоль оси инструмента. Такие движения способствуют уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности до Ra 0,3...0,24 мкм и увеличению относительной опорной длины профиля до t₄₀ 93 % .

На основании анализа физики процесса и энергетического баланса была разработана математическая модель ПЦО. Для определения параметров математической модели ПЦО получен ряд зависимостей, учитывающих влияние конструктивных и технологических параметров инструмента на шероховатость по параметру Ra и форму микрорельефа поверхности. Разработан алгоритм расчета шероховатости с заданной формой микрорельефа. Расчеты производились с использованием пакета MS Excel.

Входными параметрами модели являются конструктивные и технологические параметры, твердость обрабатываемого материала, а также исходная и требуемая шероховатости и форма микрорельефа поверхности. Параметрами, определяющими форму микрорельефа, являются размеры, форма и расположение сопел в распорных втулках раскатника, глубина регулярной неровности рельефа, диаметры шаров.

Рассмотрим входные данные, необходимые для расчета:

*D*_{дет} – диаметр заготовки, мм;

 $d_{\rm m}$ – диаметр шаров, мм (выбирается в диапазоне 5...13 мм в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки, требуемой формы микрорельефа и шероховатости поверхности);

*P*_o – давление в осевой полости инструмента, МПа (выбирается в интервале значений 0,05...4 МПа);

 $d_{\rm c}$ – диаметр сопел, мм (выбирается в интервале значений 1,5...3,5 мм);

μ_c – коэффициент расхода воздуха через сопло (зависит от формы сопел: цилиндрической, конической или прямоугольного сечения);

*z*_c – количество сопел (4...12);

k – показатель адиабаты для воздуха;

*Р*_{ат} – давление атмосферное, МПа;

 $k^{i'}$ – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала;

Ra_{исх} – исходная шероховатость поверхности (до обработки), мкм;

Ra_к – конечная шероховатость поверхности (требуемая), мкм;

HB – твердость обрабатываемого материала;

μ – коэффициент Пуассона;

 $m_{\rm III}$ — масса шара, кг;

 μ_3 — коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом;

 $n_{\text{дет}}$ – частота вращения заготовки, мин⁻¹;

 $S_{\rm o}$ — осевая подача инструмента, мм/об;

 $S_{\text{мин}}$ – подача, мм/мин;

b – расстояние, определяющее расположение сопел относительно оси, мм;

h – глубина регулярной неровности рельефа, мм (для достижения выглаживающего эффекта, характеризующегося малой шероховатостью и высокой относительной длиной профиля h = 0);

 $V_{\rm yg}$ – сминаемый объем, м³.

Выходными параметрами модели являются шероховатость поверхности, конструктивные (γ – зазор между заготов-кой и инструментом; $z_{\rm m}$ – количество шаров) и технологические (давление сжатого воздуха в осевой полости раскатника и подача, обеспечивающие требуемую шероховатость поверхности) параметры инструмента.

Основные зависимости, используемые моделью:

1) количество шаров:

$$z_{\rm m} = \frac{360}{2 \arcsin\left(\frac{d_{\rm m}}{D_{\rm ger} - d_{\rm m}}\right)}$$

2) давление в камере расширения при условии критического истечения воздуха:

$$P_{\kappa} = P_{o} \cdot 0,5;$$

3) площадь сопла:

$$f_{\rm c} = \frac{\pi \cdot d_{\rm c}^2}{4}$$

4) удельный объем и плотность воз духа в осевой полости инструмента:

$$v_o = \frac{287 \cdot 293}{P_o + P_a}, \quad \rho_o = \frac{1}{v_o};$$

5) удельный объем и плотность воздуха в камере расширения инструмента:

$$\nu_{\kappa} = \frac{287 \cdot 293}{0,5 \cdot P_{o} + P_{a}}, \qquad \rho_{\kappa} = \frac{1}{\nu_{\kappa}};$$

б) удельный объем и плотность воздуха в зазоре между деталью и инструментом:

$$v_{3} = \frac{287 \cdot 293}{P_{a}}; \qquad \rho_{3} = \frac{1}{v_{3}};$$

7) давление в камере расширения:

$$P_{\rm k} = \frac{\mu_{\rm c}^2 \cdot f_{\rm c}^2 \cdot z_{\rm c}^2 \cdot P_{\rm o} \cdot \rho_{\rm o}}{\mu_{\rm 3}^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{\rm Aet}^2 \cdot \gamma^2 \cdot \rho_{\rm 3} + \mu_{\rm c}^2 \cdot f_{\rm c}^2 \cdot z_{\rm c}^2 \cdot \rho_{\rm o}};$$

8) массовый расход воздуха через сопла при условии критического истечения воздуха:

$$Q_{\rm c.onr} = \mu_{\rm c} f_{\rm c} z_{\rm c} \sqrt{0.065 \frac{2k}{k-1} P_{\rm o} \rho_{\rm o}};$$

9) массовый расход воздуха через зазор между деталью и инструментом:

$$Q_{3} = Q_{\text{c.ont}};$$

10) оптимальный зазор между заготовкой и инструментом:

$$Y = \sqrt{\frac{Q_{\rm cont}^2}{\mu_{\rm s}^2 P_{\rm o} \rho_{\rm s} \pi^2 D_{\rm det}^2}};$$

11) скорость струи воздуха, выходящего через сопло при критическом истечении воздуха:

$$V_{\rm crp} = \mu_{\rm c} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_{\rm o} \nu_{\rm o} \left(1 - \frac{P_{\rm k}}{P_{\rm o}}\right)^{\frac{k-1}{k}}};$$

12) скорость шара до удара:

$$V_{\rm m1} = K_{\rm V} V_{\rm crp};$$

13) работа, необходимая для смятия микронеровностей с исходного значения шероховатости до заданного конечного ее значения:

$$A_{\rm cm} = \frac{k' \operatorname{HB}(\operatorname{Ra}_{\rm Hcx} - \operatorname{Ra}_{\kappa})V_{\rm yd}}{2(1-2\mu)^2 \operatorname{Ra}_{\rm Hcx}};$$

14) скорость вращения заготовки при условии ее вращения:

$$V_{\rm det} = \pi D_{\rm det} n_{\rm det};$$

15) относительная скорость шара:

 при условии, что направление вращения детали и шаров противоположное:

$$V_{\rm m.oth} = V_{\rm m1} + V_{\rm get};$$

 – при условии, что направление вращения детали и шаров попутное:

$$V_{\text{III.OTH}} = V_{\text{III}} - V_{\text{get}}$$

 при условии, что вращение детали отсутствует:

$$V_{\rm mloth} = V_{\rm ml};$$

16) импульс удара шара:

$$p=m_{_{\rm III}}V_{_{
m OTH}};$$

17) путь, который проходит шар при смятии микронеровностей:

$$l = \operatorname{Ra}_{\operatorname{Hex}} - \frac{S_{o}^{2}}{8r_{\operatorname{Hex}}};$$

18) максимально возможный путь, который проходит шар при смятии микронеровностей под действием максимальной ударной силы:

$$L = \operatorname{Ra}_{\operatorname{Hex}} - \operatorname{Ra}_{\operatorname{K}};$$

19) максимальная ударная сила шара:

$$F_{\max ya} = \frac{pV_{\text{m1}}}{2L};$$

20) работа, совершаемая инструментом для смятия микронеровностей с исходного значения шероховатости до ее конечного значения:

$$\sum A_{\rm in \ uhct} = F_{\rm max,ya} \ l z_{\rm in}$$

Если в результате расчета по п. 17 значение l получилось отрицательным (что имеет место для материалов с твердостью менее 30 HB), то в формулу работы $\sum A_{\text{игичет}}$ вместо расчетного значения l подставляем $l' = \text{Ra}_{\text{исх}} + l;$

21) обеспечиваемая (конечная) величина шероховатости поверхности при заданных входных параметрах обработки:

$$\operatorname{Ra}_{\kappa} = \operatorname{Ra}_{\mu cx} - \frac{(1 - 2\mu)^2 \operatorname{Ra}_{\mu cx} m_{\mu} V_{\text{oth}} V_1 z_{\mu}}{k' \operatorname{HB} V_{\text{va}}}.$$

Для определения скорости шара до удара V_{ш1} при выполнении расчетов был введен поправочный коэффициент на скорость шаров K_v , учитывающий уменьшение скорости шара за счет потерь на трение о кольца камеры расширения и шаров между собой. Наибольшее влияние на коэффициент К_v оказывает диаметр шаров и диаметр заготовки. Используя экспериментальные данные, полученные при измерении частоты вращения шаров, была проведена проверка значений относительной скорости шаров до удара, полученных в результате моделирования. В результате проверки были определены значения поправочного коэффициента К_v в зависимости от диаметра заготовки и диаметра шаров.

Полученные значения поправочного коэффициента K_v показывают, что с увеличением диаметра шаров и диаметра заготовки коэффициент K_v уменьшается, а величина его находится в диапазоне от 0,241 до 0,032. Значения коэффициента K_v рассчитаны для интервала диаметральных размеров обрабатываемой заготовки от 22 до 120 мм.

В случае отсутствия вращения заготовки, например, при обработке на радиально-сверлильных, вертикальнофрезерных станках, для расчета расстояния l (п. 17 основных зависимостей математической модели) подача S₀ отсутствует, тогда для расчета принимается минутная подача S_{мин}, мм/мин.

Алгоритм расчета шероховатости с заданной формой микрорельефа представлен на рис. 3.

Процесс выбора оптимальных режимов обработки и конструктивных параметров инструмента согласно алгоритму заключается в следующем. При заданной форме микрорельефа, обеспечиваемого входными параметрами, рассчитывается шероховатость. Если расчетная шероховатость не соответствует требуемой, модель придает входным параметрам (давлению и подаче) некоторые изменения ΔP , ΔS , Δd . Вычисления повторяются до тех пор, пока различие между требуемой шероховатостью и расчетной станет несущественным. После

этого выводятся конструктивные параметры инструмента и режимы, обеспечивающие оптимальные условия обработки.



Рис. 3. Алгоритм управления шероховатостью Ra и формой микрорельефа поверхности

Таким образом, представленный алгоритм расчета позволяет осуществлять управление формой микрорельефа и шероховатостью поверхности при пневмоцентробежной обработке отверстий, используя для этого оптимизацию режимов обработки и конструктивных параметров инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Гарлачов, Н. С. Влияние конструктив-

ных и технологических факторов на частоту вращения шаров пневмоцентробежного раскатника / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 41–44.

3. Гарлачов, Н. С. Методика определения работы, совершаемой пневмоцентробежным раскатником при обработке внутренних цилиндрических поверхностей / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 76–81.

4. Антонова, Е. Н. Обработка внутренних поверхностей тел вращения двухрядным пневмоцентробежным раскатником / Е. Н. Антонова // Сб. науч. тр членов Междунар. Балтийской Ассоциации машиностроителей. – Калининград : Калининградский гос. техн. ун-т, 2005. – № 5. – С. 59–61.

> Белорусско-Российский университет Материал поступил 09.04.2008

N. S. Garlachov, E. N. Antonova Management of microrelief roughness and form at strengthening pneumocentrifugal hole processing

Questions of roughness on Ra parameter and surface microrelief form guaranteeing at pneumocentrifugal hole processing with a pneumocentrifugal hole processing has been received. It allows defining surface roughness at set processing modes and design roller data. Ways of surface microrelief form management and surface roughnesss are given in the paper.