

# Дослідження процесів механічного оброблення матеріалів та розробка прогресивних способів їх реалізації

УДК 621.923

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДОВОДКЕ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

Братан С.М., Каинов Д.А. Сазонов С.Е.  
(СевНТУ, г. Севастополь, Украина)

### Введение

Непрерывное развитие техники, в частности, приборостроительной, автомобильной, сельскохозяйственной, станкостроительной, и других, связано с использованием большого количества ответственных сопрягающихся узлов и деталей: подшипников качения, плунжерных пар, опор колебательных и вращательных механизмов и др. [1].

Качество функционирования таких машин непосредственно определяется показателями качества и эксплуатационными характеристиками сопрягающихся деталей. Непрерывно возрастающие требования к эксплуатационным показателям таких изделий определяют необходимость постоянного совершенствования методов финишной обработки, к числу которых относятся процессы доводки свободным абразивом [2].

Однако, закономерности протекания технологического процесса до настоящего времени еще недостаточно изучены и освещены в технической литературе [3]. Математические модели не учитывают стохастические особенности поведения технологической системы [4].

Целью данной статьи является: разработка моделей процесса обработки, отражающих закономерности удаления материала при доводке с использованием свободного абразива.

### Основное содержание работы

Особенностью процесса доводки является то, что абразивные зерна под действием сил резания шаржируют поверхность инструмента. Зерна абразивной пасты, которые расположены между микронеровностями заготовки и инструмента, вдавливаются в поверхности инструмента. При этом их вершины царапают обрабатываемую поверхность.

Поскольку паста, наносимая ровным слоем на поверхность доводочного инструмента, тщательно перемешана, то число зерен в единице объема равно:

$$n_3 = \frac{\chi}{l_0^2}, \quad (1)$$

где  $l_0$  – размер зерна в поперечнике;  $\chi$  – коэффициент, учитывающий долю прочих компонентов пасты.

По данным работы [3]

$$\chi = \frac{1,55}{\left(1 + \frac{1-\xi}{\xi} \cdot \frac{\gamma_3}{1-\gamma_3}\right)},$$

где  $\gamma_3$  – объемный вес зерен;  $\xi$  – часть веса зерен в единице веса пасты.

Параметры внедрения единичного зерна в поверхности заготовки и инструмента определяются с помощью расчетной модели (рис. 1).

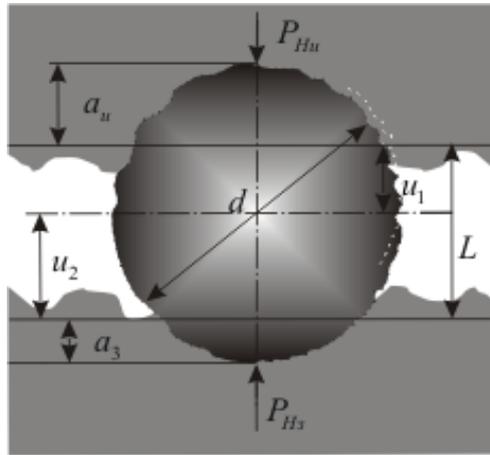


Рис.1. Схема взаимодействия абразивного зерна с материалом заготовки и доводочного инструмента

В работе [5] показано, что нормальная сила резания  $P_H$  единичным зерном характеризуется соотношением:

$$P_{Hi} = 11,8 \cdot \tau_{сдvi} \cdot a_i^2 \cdot \frac{(1 + \xi_c)^3}{\xi_c}, \quad \forall i = \{\text{притир, заготовка}\}, \{u, z\}, \quad (2)$$

где  $\tau_{сдvi}$  – величина касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига материала,  $\xi_c = 1 \dots 3$  – коэффициент усадки стружки,  $a_i$  – глубина внедрения зерна в притир или заготовку соответственно.

Для взаимодействия каждого абразивного зерна с материалом заготовки и доводочного инструмента справедливо очевидное равенство:

$$P_{Hu} = P_{Hз}, \quad (3)$$

где  $P_{Hu}$ ,  $P_{Hз}$  – силы реакций, возникающих при внедрении единичного зерна в материал инструмента и заготовки, соответственно.

С учетом зависимостей (2) и (3) определим

$$a_3 = \mu(d - L), \quad (4)$$

где  $\mu = \left( \frac{\sqrt{\tau_{сдvi}}}{\sqrt{\tau_{сдvi}} + \sqrt{\tau_{сдвз}}} \right)$ ,  $\tau_{сдвз}$ ,  $\tau_{сдvi}$  – величины касательных напряжений вдоль условных плоскостей сдвига материалов заготовки и инструмента,  $a_3$  – глубина внедрения зерна в материал заготовки.

В силу того, что закон распределения величин радиусов зерен близок к нормальному [6], для их диаметров:

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left[-\frac{(d-m_d)^2}{2\sigma_d^2}\right], \quad (5)$$

где  $m_d = \frac{d_{H3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p \frac{d_{H3}^3 \cdot P_{FRi} \%}{d_{Fpi}^3 \cdot 100}}}$ ,  $\sigma_d = m_d \sqrt{\sum_{i=1}^p \left(\frac{d_{Fpi}}{m_d} - 1\right)^2 \cdot \frac{m_d^3 \cdot P_{FRi} \%}{d_{Fpi}^3 \cdot 100}}$  – математическое

ожидание и среднеквадратическое отклонение величины  $d$ , соответственно,  $d_{H3}$  – диаметральный размер зерен, соответствующий номеру зернистости,  $d_{Fpi}^3$  – средний размер зерен  $i$ -й фракции,  $P_{FRi} \%$  – процентное содержание  $i$ -й фракции по весу.

Неровности доводочного инструмента и заготовки подчиняются независимым гауссовским распределениям [2]. Поэтому расстояние между инструментом и заготовкой имеет нормальный закон распределения с функцией плотности:

$$\begin{aligned} f_L &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2}} \cdot \exp\left[-\frac{[(u_1 + u_2) - (m_{u1} + m_{u2})]^2}{2(\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2)}\right] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\sigma_L^2}} \cdot \exp\left[-\frac{[L - m_L]^2}{2\sigma_L^2}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – величины, характеризующие неровности поверхности инструмента и заготовки,  $L = u_1 + u_2$ ,  $m_{u1}, m_{u2}$ ,  $\sigma_{u1}, \sigma_{u2}$  – их математические ожидания и среднеквадратические отклонения, соответственно.

Зерно размером  $d$  может оставлять риск на поверхности заготовки, если выполняется условие  $(d - L) > 0$ . При этом внедрение зерен в заготовку определяется вероятностным законом:

$$\begin{aligned} fa_3(d, L) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2}} \cdot \exp\left[-\frac{[(d - u_1 - u_2) - (m_d - m_{u1} - m_{u2})]^2}{2(\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2)}\right] = \\ &= \frac{\mu}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{a_3}} \cdot \exp\left[-\frac{(a_3 - m_{a_3})^2}{2\sigma_{a_3}^2}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

Для установления связи вероятности удаления материала от числа и геометрии абразивных зерен, рассмотрим процесс обработки, когда вершины зерен расположены на одном уровне и внедряются в металл на одинаковую глубину.

Если две соседние царапины перекрывают друг друга на уровне  $y$  (рис. 2), то материал между ними будет удален полностью. Для любого уровня  $y$  это условие можно записать в таком виде:

$$0 \leq l_{mp} \leq 0,5(b_1(y) + b_2(y)),$$

где  $l_{mp}$  – расстояние между двумя соседними траекториями на поверхности заготовки в сечении, перпендикулярном вектору скорости резания;  $b_1(y)$  и  $b_2(y)$  – ширины зерен, движущихся по соседним траекториям на уровне  $y$ .

Если ширины зерен для одного уровня  $y$  равны, то условие их перекрытия можно переписать:  $0 \leq l_{mp} \leq b(y)$ .

Вероятность удаления материала заготовки  $P(y)$  на уровне  $y$  равна вероятности попадания случайной величины  $l_{mp}$  на отрезок  $[0, b(y)]$ .

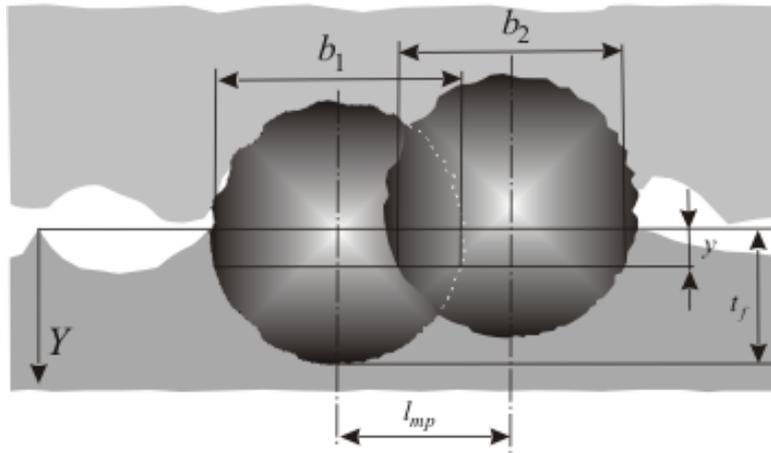


Рис. 2. Схема к расчету вероятности удаления материала заготовки

Обозначив плотность распределения вероятности случайной величины  $l_{mp}$  через  $f(l_{mp})$ , запишем

$$P(y) = P(0 \leq l_{mp} \leq b(y)) = \int_0^{b(y)} f(l_{mp}) dl_{mp}.$$

Появление на поверхности заготовки царапин можно рассматривать как результат воздействия потока зерен с ограниченным последствием. Из теории массового обслуживания следует, что такое воздействие можно считать простейшим, с плотностью распределения [3]

$$f(l_{mp}) = \lambda e^{-\lambda l_{mp}},$$

где  $\lambda$  – интенсивность прохождения зерен через поверхность заготовки на уровне  $y$ .

Тогда вероятность удаления материала с поверхности заготовки характеризуется:

$$P(y) = \int_0^{b(y)} (\lambda \cdot \exp[-\lambda l_{mp}]) dl_{mp} = 1 - \exp[-\lambda b(y)] = 1 - \exp[-u_y]. \quad (8)$$

Для экспериментальной проверки зависимости (8) (рис. 3) расстояния между единичными абразивными зёрнами определили как разность координат вершин зерен. Этот параметр измерили на большом инструментальном микроскопе, на участке шириной 1,8 мм, длиной 5 и 10 мм.

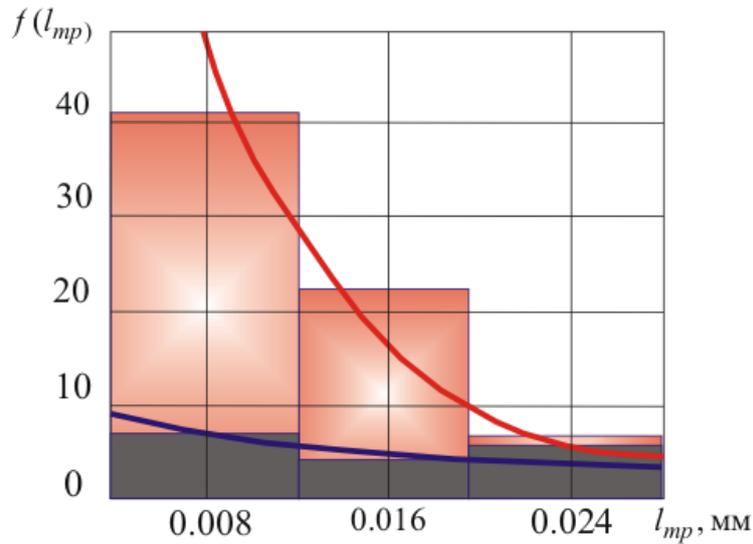


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения частоты расстояний между траекториями движения вершин зерен

Вероятность удаления  $P(y)$  (или неудаления  $P(\bar{y})$ ) материала заготовки на любом из рассматриваемых уровней  $y$  определяется шириной и интенсивностью прохождения зерен через рассматриваемое сечение.

В соответствии с (8) на уровне  $y$ :

$$\Delta u_y = \Delta \lambda b_3. \quad (9)$$

Через единичное сечение поверхностного слоя заготовки  $1 \cdot \Delta a_3 \cdot \Delta \tau \cdot V_u$  проходит  $\Delta \lambda$  зерен

$$\Delta \lambda = n_3 \cdot f a_3(d, L) \cdot \Delta a_3 \cdot V_u \cdot \Delta \tau, \quad (10)$$

где  $V_u$  – скорость зерен в материале заготовки.

При аппроксимации профиля зерна шаром получаем:

$$b_3 = \sqrt{a_3 \cdot (d - a_3)}. \quad (11)$$

После подстановки (7) в (10), а затем (10) (11) в (9) и интегрирования по глубине внедрения зерна в материал заготовки  $a_3$  и времени  $\tau$  получим:

$$u_y(a_3, \tau) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{a_3}} \cdot \frac{\chi \cdot V_u}{l_0^2} \cdot (t - t_0) \cdot \int_0^{t_f - y} \left( \sqrt{a_3(d - a_3)} \cdot \exp \left[ -\frac{(a_3 - m_{a_3})^2}{2\sigma_{a_3}^2} \right] \right) da_3. \quad (12)$$

С учетом условия ( $y = 0$ ) и вытекающего из него соотношения  $P(y) = \beta_0$ , уравнение (8) определяет выражение для расчета съема материала в зоне контакта заготовки и инструментом в следующем виде:

$$1 - \beta_0 = \exp \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{a_3}} \cdot \frac{\chi \cdot V_u}{l_0^2} \cdot (t - t_0) \cdot \int_0^{t_f - y} \left( \sqrt{a_3(d - a_3)} \cdot \exp \left[ -\frac{(a_3 - m_{a_3})^2}{2\sigma_{a_3}^2} \right] \right) da_3 \right] \quad (13)$$

Зависимость (13) позволяет рассчитать относительную опорную длину профиля  $t_p(y) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i$  (рис. 4) путем расчета вероятности удаления материала на уровне  $y = p$ :

$$t_p(y) = P(\bar{y}).$$

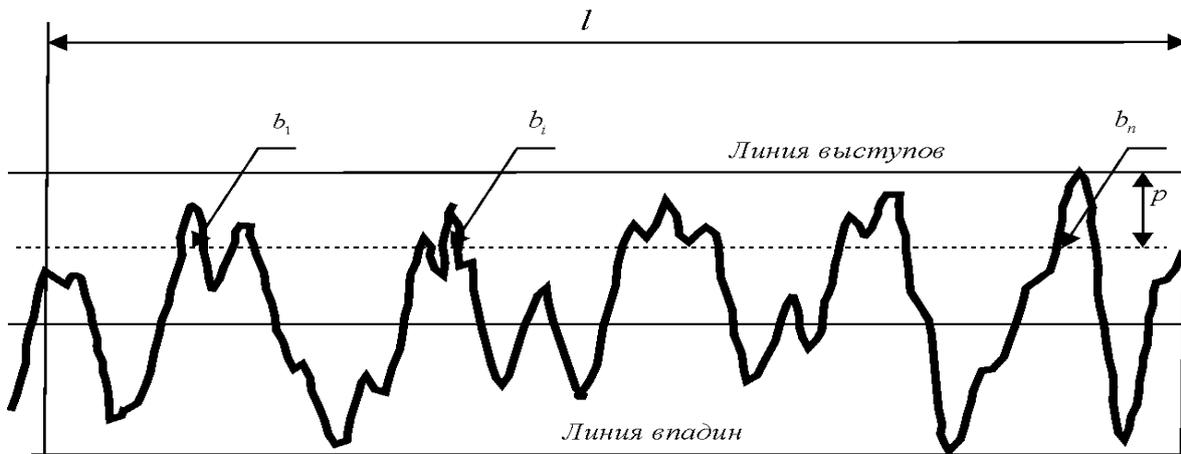


Рис. 4. К расчету относительной опорной длины профиля.

Профиль поверхности, полученный в результате доводки, характеризуется случайной стационарной функцией с нормальным распределением ординат, что подтверждается данными [3] и [7].

Оценка значений среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  связана с относительной опорной длиной профиля и в соответствии с [7]:

$$Ra = 2 \int_0^{\infty} t_p dy_m, \quad (14)$$

где  $y_m$  – расстояние от уровня до средней линии профиля.

Подстановка  $P(\bar{y})$  в (14) позволяет получить выражение для расчета  $R_a$  для процесса доводки:

$$Ra = 2 \int_0^{\infty} P(\bar{y}) dy_m.$$

Параметр  $R_{\max}$  может быть рассчитан в соответствии с рекомендациями [7]:

$$R_{\max} \approx 12 \int_0^{\infty} P(\bar{y}) dy_m.$$

## Выводы

Полученные результаты позволяют рассчитывать показатели шероховатости и съём материала при обработке изделий свободным абразивом, дифференцированно оценивать влияние отдельных факторов на параметры качества детали и скорость протекания процесса.

Структура модели процесса обработки свободным абразивом позволяет в дальнейшем совершенствовать ее по мере уточнения входящих в нее зависимостей.

**Список литературы:** 1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 2. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х.. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. – Киев: Наук. думка, 1979. – 224 с. 3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с. 4. Давиденко О.Ю., Решетников М.К., Ломов Н.И. Технологические возможности доводки дорожек качения подшипников// Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Материалы Междунар. науч. конф. – Волжский: Волжск. ИСИ, 2001. – С. 195-198 с. 5. Королев А.В. Новосёлов Ю.К. Теоретико – вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. – Изд-во Сарат. ун-та, 1989. – 160 с. 6. Королев А.В. Новосёлов Ю.К. Теоретико – вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента. – Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 160 с. 7. И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ДОВЕДЕННІ ВІЛЬНИМ АБРАЗИВОМ

Братан С.М., Каїнов Д.А. Сазонов С.Є.

У статті запропоновані математичні моделі, що дозволяють розраховувати показники шорсткості та знімання матеріалу при доведенні поверхонь вільним абразивом.

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДОВОДКЕ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

Братан С.М., Каинов Д.А. Сазонов С.Е.

В статье предложены математические модели, которые позволяют рассчитать показатели шероховатости и съём материала при доводке поверхностей свободным абразивом.

## ESTIMATION OF PARAMETERS OF QUALITY OF SURFACE AT POLISHING BY FREE ABRASIVE

Bratan S.M., Kainov D.A. Sazonov S.E.

In the article mathematical models are offered allowing expecting of roughness and output of material at polishing of surfaces by a free abrasive.

*Рецензент: д.т.н., проф. Гусев В.В.*