

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.921.34

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-56-63

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН ХОНИНГОВАЛЬНЫХ БРУСКОВ НА МИКРОГЕОМЕТРИЮ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ**НЕФЕДКИН АНАТОЛИЙ ИГОРЕВИЧ**✉, *соискатель*

an.nefedkin@yandex.ru✉

ОДИНОКОВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА, *канд. тех. наук, доцент*

odinokova_iv@mail.ru

ГАЕВСКИЙ ВИТАЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, *д-р техн. наук, профессор*

vit-life@rambler.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64

Аннотация. Статическая теория хонингования разработана недостаточно, поскольку процесс массового резания абразивными зёрнами имеет случайный характер, что усложняет математическое описание этого явления. Целью исследований являлась разработка методики моделирования хонингования, позволяющей вести расчёт параметров процесса с учётом упругих деформаций абразивного инструмента. Для решения задач статистической теории (расчёт микрогеометрии детали, съёма металла и усилий резания) в исследованиях применены теоретико-вероятностный анализ и моделирование методом Монте-Карло. Исходя из вероятности распределения абразивных зёрен по объёму режущего слоя инструмента и кинематики процесса рассчитывается закон распределения высот микронеровностей детали. С помощью закона распределения находятся параметры шероховатости поверхности детали и характеристики процесса резания: площадь срезов, количество контактных зёрен и т.д. Установлена математическая зависимость между распределением абразивных зёрен по высоте и распределением глубины царапин, оставленных инструментом на полированном образце. Проведён расчёт геометрических параметров режущей поверхности алмазных брусков с учетом их дискретной модели. Соизмерение расчётных и опытных значений параметров брусков свидетельствует о правильности предложенной методики. Получены в общем виде аналитические зависимости для расчёта параметров шероховатости поверхности детали, скорости съёма металла, усилий резания, площадей среза, числа контактных зёрен и др. Разработанная методика моделирования хонингования позволяет вести расчёт параметров процесса с учётом упругих деформаций абразивного инструмента. Учитывая характеристики брусков, усреднённый профиль зёрен и плотность их распределения по высоте, можно рассчитать все параметры микрогеометрии детали. Результаты проведённого теоретико-вероятностного исследования могут быть применены также к другим видам абразивной обработки.

Ключевые слова: микрогеометрия поверхности детали, высоты профиля абразивных зёрен, распределение вершин зёрен по высоте, усреднённый профиль вершин зёрен, площадь проекции поверхности контакта единичного зерна.

Формат цитирования: Нефедкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. Исследование влияния геометрических параметров абразивных зерен хонинговальных брусков на микрогеометрию поверхности деталей // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 56-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-56-63>.

© Нефедкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В., 2022



ORIGINAL PAPER

INFLUENCE OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF ABRASIVE GRAINS OF HONING STICKS ON THE SURFACE MICROGEOMETRY OF MACHINE PARTS**ANATOLIY I. NEFEDKIN**✉, *PhD seeker*

an.nefedkin@yandex.ru✉

IRINA V. ODINOKOVA, *PhD (Eng), Associate Professor*

odinokova_iv@mail.ru

VITALIY V. GAEVSKIY, *DSc (Eng), Professor*

vit-life@rambler.ru

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradskiy Ave., 64

Abstract. The static theory of honing has not been sufficiently developed, since the process of mass cutting with abrasive grains is random by its nature. This fact complicates the mathematical description of this phenomenon. The research aim was to develop

a technique for modeling honing to calculate the process parameters, taking into account the elastic deformations of the abrasive tool. To solve the problems of statistical theory (analyzing the microgeometry of a machine part, metal removal and cutting forces), the studies involved probabilistic analysis and Monte Carlo simulation. Based on the distribution probability of abrasive grains over the cutting layer of the tool and the process kinematics, the law of distribution of the heights of part microroughnesses was determined. Using the distribution law, the authors found the parameters of the surface roughness of the part and the cutting process characteristics: the area of cuts, the number of contact grains, etc. A mathematical relationship has been established between the distribution of abrasive grains along the height and the distribution of the depth of scratches left by the tool on a polished sample. The geometric parameters of the cutting surface of diamond bars were determined taking into account their discrete model. Comparison of the calculated and experimental values of the bar parameters proved the correctness of the proposed methodology. Analytical dependences were obtained in general form for determining the parameters of the surface roughness of the machine part, the metal removal rate, cutting forces, cut areas, the number of contact grains, etc. The developed honing modeling technique helps determine the process parameters taking into account elastic deformations of the abrasive tool. Taking into account the characteristics of the bars, the average profile of the grains and the density of their distribution along the height, we can determine all the parameters of the machine part microgeometry. The results of the conducted probabilistic research are also applicable to other types of abrasive processing.

Key words: microgeometry of the machine part surface, profile heights of abrasive grains, distribution of grain tops in height, average profile of grain tops, projected area of the contact surface of a single grain.

For citation: Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Gaevskiy V.V. Influence of the geometric parameters of abrasive grains of honing sticks on the surface microgeometry of machine parts. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 56-63. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-56-63>.

Введение. Для улучшения и повышения эффективности процесса хонингования необходимо разработать адекватную теорию влияния поверхности абразивных брусков, имеющих случайную микрогеометрию, на обрабатываемую деталь.

Процесс массового резания абразивными зёрнами имеет случайный характер, что усложняет математическое описание этого явления, в связи с чем статическая теория хонингования разработана недостаточно.

Модель процесса резания, положенная в основу теории, основывается на допущении того, что любое зерно, контактирующее с деталью, удаляет слой металла, точно соответствующий его профилю и траектории. При данном допущении не учитываются навалы, созданные по кромкам царапин, и упругие деформации металла. Таким образом, данная модель достаточно полно отвечает процессу хонингования материалов малой пластичности – например, чугуна.

Исходя из расчёта вероятностей распределения абразивных зёрен по объёму режущего слоя инструмента и кинематики процесса вычисляется закон распределения высоты микронеровностей детали. С помощью данного распределения находятся характеристики процесса резания: площадь срезов, количество режущих зёрен и т.д. [1].

Обширные возможности для изучения процесса резания и абразивной обработки открывает метод Монте-Карло.

Цель исследований: увеличить эффективность процесса хонингования; разработать адекватную теорию влияния поверхности абразивных брусков, имеющих случайную микрогеометрию, на обрабатываемую деталь.

Материалы и методы. Для решения главных задач статической теории (расчёт микрогеометрии детали, съёма металла и усилий резания) авторами применены теоретико-вероятностный анализ и моделирование методом Монте-Карло [2].

Управление процессом хонингования реализуется разнообразными способами: подбором материала и конфигурации абразивных брусков, назначением режимов обработки, комбинированием абразивной обработки с электрохимико-физическими методами и др. Одним из направлений повышения эффективности хонингования является улучшение конфигурации и устройства абразивных брусков – в частности, использования брусков с прерывистой режущей поверхностью [3].

Функциональная аппроксимация объёмной плотности распределения вершин по высоте $n(h)$ и функции $z(x)$, описывающей усреднённый профиль вершин зерен, показала, что степенные зависимости хорошо отвечают опытным данным и позволяют получить расчётные формулы для параметров процесса резания-царапания [4]:

$$z(x) = c|x|^{\frac{1}{m}}, \quad n(x) = \begin{cases} k \cdot h^{\beta}, & \text{при } h > 0, \\ 0, & \text{при } h \leq 0. \end{cases}$$

где $n(h)$ – объёмная плотность распределения вершин по высоте h .

Направление отсчёта высоты зёрен меняем на противоположное, приняв его в тело инструмента.

Закон распределения высоты микронеровностей имеет вид [1, 5]:

$$P(h) = \exp \left\{ \frac{-2 \cdot k}{b \cdot c^m \cdot (\beta + 1)} \cdot \int_0^h z^m \cdot (h - z)^{\beta + 1} \cdot dz \right\}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

где P – высота микронеровностей, мкм; b – интенсивность съёма металла, мкм/мин; c, m – параметры, описывающие параболическую форму абразивного зерна; h – глубина внедрения в металл абразивного зерна, мкм; β – показатель степени распределения зёрен по высоте h .

Интеграл, входящий в (1), выражается через гамма-функцию $\Gamma(x)$, поэтому

$$P(h) = \exp(-\rho \cdot h^p) \text{ при } h \geq 0, \quad (2)$$

где ρ – угол трения:

$$\rho = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m + 1) \cdot \Gamma(\beta + 1)}{b \cdot c^m \cdot \Gamma(\beta + 1)}; \quad (3)$$

$$p = \beta + m + 2. \quad (4)$$

Математическое ожидание высоты профиля (над уровнем наиболее глубоко внедрившегося зерна) равно

$$M = \Gamma\left(\frac{p + 1}{p}\right) \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (5)$$

Среднеквадратическая высота неровностей –

$$H_{CK} = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (6)$$

Безразмерную высоту профиля можно определить по выражению:

$$h^* = \frac{h}{H_{CK}}. \quad (7)$$

Закон распределения высоты микронеровностей при этом –

$$P(h^*) = \exp\left[-\left(h^* \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)}\right)^p\right] = \exp[-(h^* \cdot \xi)^p], \quad (8)$$

где

$$\xi = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)}.$$

Такая запись удобна тем, что конфигурация кривой распределения зависит от одного параметра p .

На графиках распределения высот микронеровностей $P(h^*)$ можно увидеть, что с ростом P асимметрия распределения повышается (рис. 1).

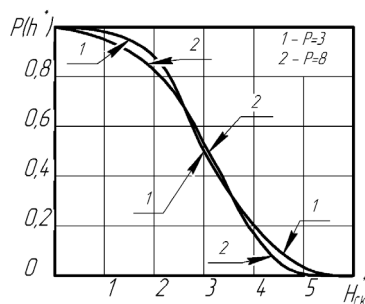


Рис. 1. Распределение высот микронеровностей

Fig. 1. Distribution of microroughness heights

Опорная поверхность на относительно высоких уровнях увеличивается, и это благоприятно сказывается на работоспособности детали [1, 5]. Выражение (6) записываем в виде:

$$H_{CK} = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (9)$$

Аналогично среднеарифметическая высота неровностей R_a –

$$R_a = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (10)$$

Для удобства произведен расчет коэффициентов r_1 и r_2 , зависящих лишь от β и независимых от конфигурации абразивного зерна m (рис. 2), и r_3 – коэффициента, зависящего от β и m (рис. 3).

Шаг неровностей по средней линии S_m представлен в виде:

$$S_m = \frac{b \cdot (1+\beta) \cdot (2+\beta)}{k \cdot M^{\beta+2} \cdot \sin \alpha} \cdot \exp(\rho \cdot M^p) \quad (11)$$

или

$$S_m = \frac{r_3}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{c}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+2)p}{p}}, \quad (12)$$

где r_3 – коэффициент, зависящий от β и m ;

$$r_3 = \frac{(\beta+2) \cdot (\beta+1)}{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)\right]^{\beta+2}} \cdot \left[\frac{2 \cdot \Gamma(m+2) \cdot \Gamma(\beta+1)}{\Gamma(p+1)}\right]^{\frac{\beta+2}{p}} \cdot \exp\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)\right]^p. \quad (13)$$

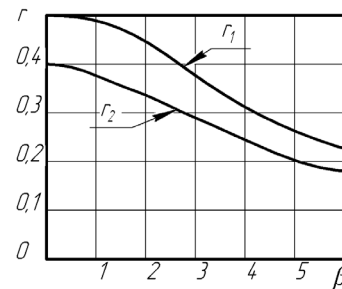


Рис. 2. Расчет коэффициентов r_1 и r_2

Fig. 2. Calculating coefficients r_1 and r_2

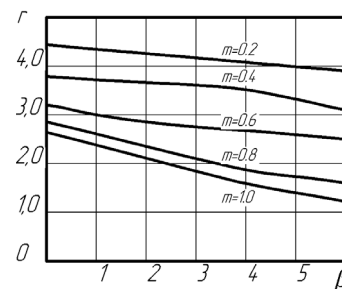


Рис. 3. Расчет коэффициента r_3

Fig. 3. Calculating coefficient r_3

Анализ показателей степеней параметров, входящих в формулу (11), показывает, что режимы обработки и распределение зёрен по высоте мало воздействуют на шаг неровностей S_m , в то время как с увеличением размеров зёрен шаг S_m значительно увеличивается [1].

Полученные формулы позволяют предсказать шероховатость поверхности детали, и при знании микрогеометрии детали – выбрать режим хонингования [1, 4].

Математическое ожидание площади проекции поверхности контакта единичного зерна высотой H_3 можно выразить как

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3) = \frac{2}{C^m} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz, \\ \bar{S}_o(H_3) = \frac{\pi \cdot m}{C^{2 \cdot m}} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz, \end{cases} \quad (14)$$

где $\bar{S}_p(H_3)$ – проекция сечения недеформированной стружки; $\bar{S}_o(H_3)$ – проекция вдавленного абразивного зерна; H_3 – высота абразивного зерна при контакте с металлом; C, m – параметры, описывающие параболическую форму абразивного зерна.

Для удобства введём нормирование высоты

$$H_3^* = \frac{H_3}{H_{CK}} = \frac{H_3 \cdot \rho^{\frac{1}{p}}}{\varepsilon}, \quad (15)$$

тогда

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3^*) = \frac{2}{C^m \cdot \rho^{\frac{m+1}{p}}} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz, \\ \bar{S}_o(H_3^*) = \frac{\pi \cdot m}{C^{2 \cdot m} \cdot \rho^{\frac{2 \cdot m}{p}}} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz. \end{cases} \quad (16)$$

Выразить эти интегралы в конечном виде через элементарные функции невозможно, поэтому запишем:

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3^*) = 2 \cdot f_p(H_3^*, \beta, m) \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{m+1}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+1)}{p}}, \\ \bar{S}_o(H_3^*) = \pi \cdot m \cdot f_o(H_3^*, \beta, m) \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{2 \cdot m \cdot (\beta+2)}{p}}, \end{cases} \quad (17)$$

где $f_p(H_3^*, \beta, m)$ и $f_o(H_3^*, \beta, m)$ выражаются системой уравнений:

$$\begin{cases} f_p(H_3^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{m+1}{p}} \times \\ \times \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz, \\ f_o(H_3^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{2 \cdot m}{p}} \times \\ \times \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz. \end{cases} \quad (18)$$

Для оптимизации практического применения зависимостей на рисунках 4 и 5 представлены графики этих функций.

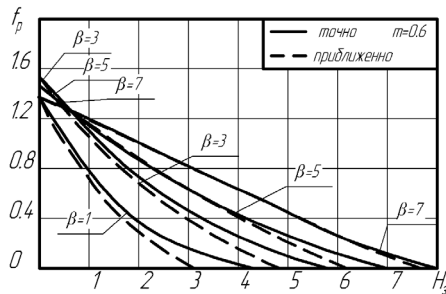


Рис. 4. График функции $f_p(H_3^*, \beta, m)$

Fig. 4. Function Graph $f_p(H_3^*, \beta, m)$

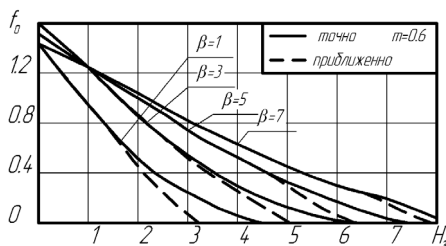


Рис. 5. График функции $f_o(H_3^*, \beta, m)$

Fig. 5. Function Graph $f_o(H_3^*, \beta, m)$

Сравнивая формулы (18) с приближенным расчетом площадей $\bar{S}_p(H_3)$ недеформированной стружки и $\bar{S}_o(H_3)$ вда-

вливания зерна в металл, не учитывающим шероховатость поверхности детали, считаем, что высота профиля детали неизменна и равна математическому ожиданию M , тогда

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3) \approx 2 \cdot \int_0^{(M-H_3)} x(z) \cdot dz = \frac{2 \cdot (M-H_3)^{m+1}}{C^m \cdot (m+1)}, \\ \bar{S}_o(H_3) \approx \frac{\pi}{2} [x(M-H_3)]^2 = \frac{\pi \cdot (M-H_3)^{2 \cdot m}}{2 \cdot C^{2 \cdot m}}. \end{cases} \quad (19)$$

Значения функций $f_p(H_3^*, \beta, m)$ и $f_o(H_3^*, \beta, m)$ определяются по формулам:

$$\begin{cases} f_p(H_3^*, \beta, m) \approx \frac{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{m+1}}{(m+1)} \times \\ \times \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{m+1}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot H_3^*}{\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)} \right]^{m+1}, \\ f_o(H_3^*, \beta, m) \approx \frac{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{2 \cdot m}}{2 \cdot m} \times \\ \times \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot H_3^*}{\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)} \right]^{2 \cdot m}. \end{cases} \quad (20)$$

На рисунках 4, 5 приближенные функции f_p и f_o изображены пунктиром. Для зёрен, глубоко проникающих в металл (H_3^* имеет малые значения), правильность приближения является неплохой, а для зёрен с незначительной глубиной внедрения (H_3^* имеет большие значения) разногласие является значительным.

Проведем анализ суммарных площадей проекций S_p поверхностей контакта всех зёрен, имеющих на единице площади брусков.

Поскольку $\bar{S}_p = b$ независимо от вида функций $n(h)$ распределения вершин по высоте и $z(x)$ функции, обрисовывающей усреднённый профиль вершин зерен, то вычисляем лишь

$$\bar{S}_o = \frac{\pi \cdot m \cdot k}{C^{2 \cdot m}} \cdot \int_0^\infty H_3^\beta \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz \cdot dH_3. \quad (21)$$

После ряда преобразований получим

$$\bar{S}_o = \frac{\pi \cdot m \cdot \Gamma(2 \cdot m) \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma\left(\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}\right)}{p \cdot \Gamma(\beta+2 \cdot m+1)} \cdot \frac{k}{C^{2 \cdot m}} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}}, \quad (22)$$

или

$$\bar{S}_o = \pi \cdot r_4 \cdot b^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+3)}{p}}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} r_4 = & \frac{m \cdot \Gamma(2 \cdot m) \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma\left(\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}\right)}{p \cdot \Gamma(\beta+2 \cdot m+1)} \times \\ & \times \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Коэффициент r_4 зависит от показателя степени распределения зёрен по высоте (β) и параметра, описывающего форму зерна (m) (рис. 6).

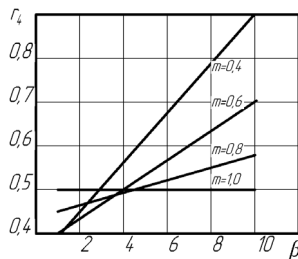


Рис. 6. Определение коэффициента r_4

Fig. 6. Determining coefficient r_4

Зная площади проекций поверхности контакта бруска с деталью, можно определить среднее значение переднего угла γ_{cp} зёрен при стационарном съеме:

$$\gamma_{cp} = -\arctg \left[\pi \cdot r_4 \cdot \left(\frac{1}{b} \right)^{\frac{1-m}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C} \right)^{\frac{m(\beta+3)}{p}} \right]. \quad (25)$$

Число режущих зёрен на единицу площади брусков –

$$n_p = k \cdot \int_0^{\infty} z^{\beta} \cdot \exp \left[-\rho \cdot (z + h_{kp})^p \right] \cdot dz. \quad (26)$$

Выполнив преобразования, получим

$$n_p(h_{kp}^*) = f_n(h_{kp}^*, \beta, m) \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}, \quad (27)$$

где

$$f_n(h_{kp}^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}} \times \int_0^{\infty} z^{\beta} \cdot \exp \left[-(z + h_{kp}^* \cdot \varepsilon)^p \right] \cdot dz. \quad (28)$$

Графики функции $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$ представлены на рисунке 7.

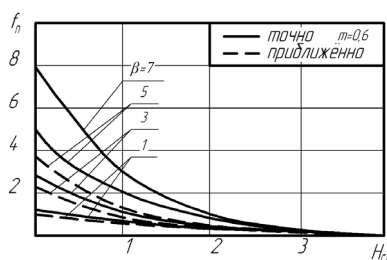


Рис. 7. Определение функции $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$

Fig. 7. Function definition $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$

Предположив, что высота профиля детали равна математическому ожиданию M , найдем приблизительное количество режущих зёрен. При этом формула (27) сохраняется, а приблизительное значение $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$ будет рассчитываться по формуле:

$$f_n(h_{kp}^*, \beta, m) \approx \frac{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{\beta+1}}{\beta+1} \cdot \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot \left[1 - \frac{h_{kp}^* \cdot \varepsilon}{\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)} \right]^{\beta+1}. \quad (29)$$

Приближенные значения f_n для некоторых значений β показаны пунктиром на рисунке 7.

Общее число контактных зёрен определим из формул 27 и 28, полагая, что $h_{kp}^* = 0$:

$$n_k = r_5 \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}, \quad (30)$$

где r_5 – коэффициент, зависящий от β и m (рис. 8):

$$r_5 = \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+1}{p}\right)}{p} \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}}. \quad (31)$$

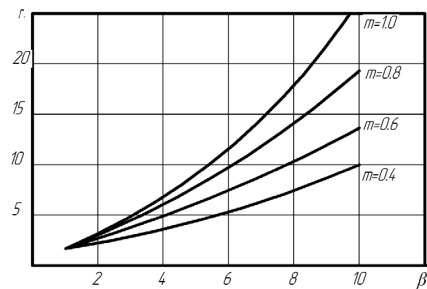


Рис. 8. Определение коэффициента r_5

Fig. 8. Determining coefficient r_5

Полученные зависимости позволяют провести расчёт усилий резания, температурных зависимостей [4].

Приняв допущение того, что условные напряжения среза постоянны и одинаковы пределом текучести σ_s металла, а коэффициент трения по задней поверхности равен μ_r , тангенциальную F_p и нормальную Q , составляющие силы резания, определяем по формулам:

$$F_p = \delta_s \cdot (\bar{S}_p + \mu_r \cdot \bar{S}_o) = \delta_s \cdot \left[b + \frac{\pi \cdot r_4 \cdot \mu_r \cdot b^{\frac{\beta+2m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}}}{C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}} \right], \quad (32)$$

$$Q = \delta_s \cdot \bar{S}_o = \delta_s \cdot \frac{\pi \cdot r_4 \cdot b^{\frac{\beta+2m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}}}{C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}}. \quad (33)$$

При хонинговании с заданным давлением абразивных зёрен на металл Q интенсивность съёма b будет равна

$$b = \left(\frac{Q}{\pi \cdot \delta_s \cdot r_4} \right)^{\frac{p}{\beta+2m+1}} \cdot \left(\frac{1}{k} \right)^{\frac{1-m}{\beta+2m+1}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{\beta+2m+1}}. \quad (34)$$

Результаты и их обсуждение. Алгоритм вычислений (формулы 1-34) позволил определить влияние отдельных факторов на микрогеометрию детали и процесс резания при хонинговании. Проведено сравнение результатов моделирования с аналитической теорией [5, 6].

Использовался принцип последовательного варьирования каждого из рассматриваемых факторов, что дало возможность изучить их влияние. Экспериментальным путём определить влияние каждого из рассматриваемых факторов фактически невозможно, поскольку происходит изменение сразу нескольких величин. Например, увеличив скорость вращательного движения, мы одновременно изменим абсолютную скорость резания и угол скречивания, а изменяя марку хонинговальных брусков, сразу варьировем как форму зёрен, так и законы распределения по высоте.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло

Table 1

Results of simulation of the honing process by the Monte Carlo method

№ хода Number	Число контактных зёрен, z_k , шт. Number of contact grains, z_k , pcs.	Число режущих зёрен z_p , шт. Number of cutting grains, z_p , pcs.	Математическое ожидание высоты профиля, М, мкм Mathematical expectation of the profile height, M, μm	Среднеквадратическая высота неровностей, $H_{\text{СК}}$, мкм Root-mean-square irregularity height, $H_{\text{СК}}$, μm	Среднеарифметическая высота неровности, R_a , мкм Arithmetic mean roughness height, R_a , μm	Площадь среза, S_p , мкм ² Cut area, μm^2	Нормальная составляющая силы резания, Q, МПа Normal component of cutting force, MPa	Тангенциальная составляющая силы резания, F _p , МПа Tangential component of cutting force, MPa	Шаг неровностей, S_N , мкм Irregularity pitch, microns
1	151	67	-3,81	1,401	1,152	22,33	0,9951	0,3366	51,89
2	75	36	-6,05	1,662	1,298	27,44	0,5640	0,1989	49,23
3	106	55	-8,94	1,598	1,264	25,59	0,7932	0,2697	49,23
4	98	57	-12,24	1,600	1,294	29,54	0,8265	0,2848	53,33
5	96	49	-14,74	1,484	1,230	23,11	0,6858	0,2261	51,89
6	112	61	-17,85	1,709	1,352	25,24	0,8278	0,2812	56,47
7	88	51	-20,60	1,566	1,276	27,89	0,7099	0,2428	49,23
8	97	57	-23,60	1,557	1,256	27,86	0,7797	0,2671	46,83
9	94	54	-26,55	1,620	1,311	28,02	0,7612	0,2605	42,67
10	85	42	-28,64	1,354	1,102	21,80	0,5750	0,1892	49,23
11	108	57	-31,86	1,551	1,313	26,52	0,8295	0,2835	51,89
12	95	53	-34,92	1,809	1,433	29,58	0,7995	0,2760	45,71
13	102	51	-37,36	1,613	1,287	22,07	0,6738	0,2261	49,23

Рассчитаем среднеквадратическую высоту неровностей для хонингования с параметрами, отвечающими базовым условиям:

$$H_{\text{СК}} = r_1 \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} = 0,45 \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0173^{0,5}}{5,69 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{1}{4,06}} = 1,58 \text{ мкм.}$$

Моделированием с помощью метода Монте-Карло получено $H_{\text{СК}} = 1,59$ мкм.

Сравнительные результаты расчётов при других исходных данных сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение аналитических расчетов и результатов моделирования методом Монте-Карло

Table 2

Comparison of analytical calculations and Monte Carlo simulation results

№ п/п No.	Варьируемые факторы Variable factors	Теоретические расчеты Theoretical calculations		Моделирование Modeling		Отклонение, % Deviation, %	
		$H_{\text{СК}}$	R_a	$H_{\text{СК}}$	R_a	$H_{\text{СК}}$	R_a
1	Базовый / Control	1,58	1,26	1,59	1,28	+0,7	+1,7
2	0,01	1,48	1,18	1,45	1,16	-2,1	-1,7
3	$C = 0,04$	1,76	1,4	1,74	1,40	-1,1	-0,7
4	$C = 0,08$	1,91	1,53	1,93	1,54	+1,0	+0,6
5	$b = 3 \cdot 10^{-10}$	1,28	1,02	1,24	0,99	-3,2	-3,0
6	$b = 5 \cdot 10^{-10}$	1,45	1,16	1,41	1,13	-2,7	-2,6
7	$b = 10 \cdot 10^{-10}$	1,72	1,38	1,69	1,37	-1,5	-0,7
8	$z_0 = 2 \cdot 10^{-7}$	2,06	1,65	2,16	1,72	+4,6	+4,0
9	$z_0 = 10 \cdot 10^{-7}$	1,38	1,10	1,36	1,09	-1,4	-0,9
10	$z_0 = 20 \cdot 10^{-7}$	1,16	0,93	1,16	0,93	0,0	0,0
Средняя погрешность, % / Average error, %						-0,067	-0,033

Анализ таблицы 1 выявил воздействие некоторых факторов на процесс резания и микрогеометрию детали при разнообразных условиях хонингования. В частности, высотные характеристики шероховатости детали (R_a , H_{CK}) зависят в основном от закона распределения абразивных зёрен по высоте, а шаг неровностей (S_M) – от формы профиля вершин зёрен. Установлено, что при алмазном хонинговании чугуновых деталей брусками на металлических связках упругие деформации инструмента невелики и не оказывают существенного влияния на процесс резания.

Сходные расчеты проведены также для других условий хонингования, и построены графики (рис. 9), показывающие воздействие различных факторов на основные показатели процесса. В каждом расчёте варьировался лишь один фактор (отмеченный стрелкой на графиках рисунка 9), а остальные факторы оставались неизменными.

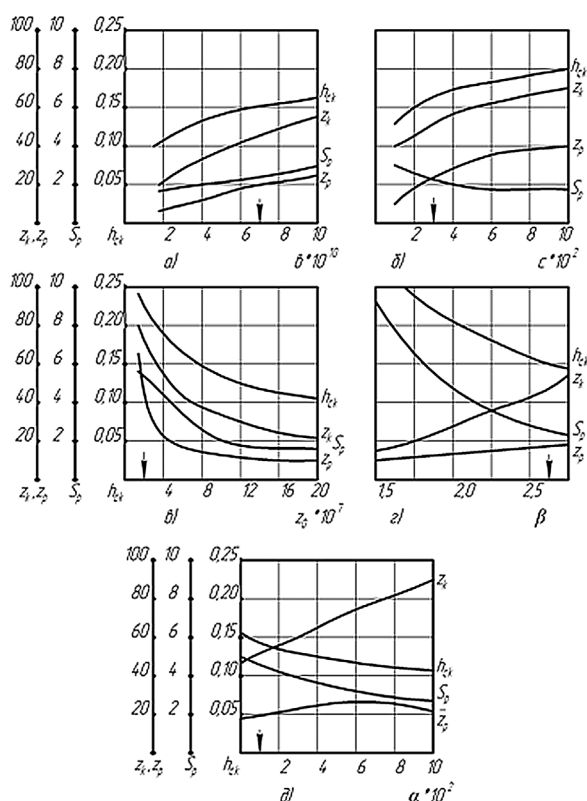


Рис. 9. Влияние отдельных факторов на параметры процесса хонингования

Fig. 9. Influence of individual factors on the parameters of the honing process

Изменение формы зёрен (коэффициент C) воздействует на все параметры процесса (рис. 9б). Чем более острыми являются зёрна (C увеличивается), тем больше число

режущих зёрен и меньше нагрузка на одно зерно. Следовательно, процесс резания протекает в более благоприятных условиях. При уменьшении C за счет как затупления зёрен, так и применения абразива с более округленными вершинами, резание затрудняется, но качество обрабатываемой поверхности повышается (рис. 9б).

Соразмерное изменение количества зёрен z_0 на всех уровнях режущего слоя оказывает противоположное воздействие на качество обрабатываемой поверхности в сравнении с интенсивностью съёма (рис. 9в).

С уменьшением C неровности становятся более пологими, как бы растягиваясь в длину и уменьшаясь по высоте. Это увеличивает опорную поверхность и эксплуатационные свойства детали. Анализ зависимости параметров хонингования от показателя β (рис. 9г) показал, что с ростом β повышается процент режущих и контактных зёрен, уменьшаются нагрузка на одно зерно и шероховатость поверхности детали [7].

Роль упругих деформаций в процессе хонингования иллюстрируется графиками на рисунке 9д. При росте коэффициента деформирования средняя площадь среза на одно зерно и шероховатость падают, в то же время увеличивается число контактных зёрен. Продольные характеристики шероховатости зависят в большей степени от формы зёрен, чем от интенсивности съёма.

Выводы

1. Разработанная методика моделирования хонингования позволяет вести расчёт параметров процесса с учётом упругих деформаций абразивного инструмента.

2. Полученные формулы и алгоритм моделирования позволяют предсказать параметры процесса хонингования, назначить оптимальные режимы обработки в соответствии с требуемой микрогеометрией детали. Зная характеристики абразивных брусков и свойства обрабатываемого металла, можно определить интенсивность съёма, а также другие параметры процесса хонингования.

3. Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло показали, что шероховатости детали (R_a , H_{CK}) зависят в основном от закона распределения абразивных зёрен по высоте, а шаг неровностей (S_M) – от формы профиля вершин зёрен.

4. Результаты выполненных экспериментальных исследований могут быть использованы при оценке эксплуатационных свойств и разработке новых хонинговальных брусков с учетом термических и силовых явлений, а также при исследовании воздействия обратных связей по усилию прижима брусков к детали на процесс хонингования.

5. Результаты проведённого теоретико-вероятностного изучения могут быть применены также к другим видам абразивной обработки.

References

1. Нефедкин А.И., Одиноква И.В. Исследование закономерностей воздействия абразивных зерен хонинговальных брусков на поверхность обрабатываемой детали // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 37-43. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-37-43>

2. Нефедкин А.И., Одиноква И.В., Томилиа А.А., Сидоренко Т.А. Оптимизация процесса хонингования алмазными брусками с использованием методики полного

1. Nefedkin A.I., Odinkova I.V. Issledovanie zakonomenostey vozdeystviya abrazivnykh zeren khoningol'nykh bruskov na poverkhnost' obrabatyvaemoy detaili [Study of the impact patterns between the abrasive grit of honing stones and workpiece surface]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 2 (84): 37-43. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-37-43> (In Rus.)

2. Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Tomilina A.A., Sidorenko T.A. Optimizatsiya protsessa khoningovaniya almaznymi

факторного эксперимента // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 1. С. 55-58.

3. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Y.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Quality control in the machining of cylinder liners at repair enterprises. *Russian Engineering Research*, 2020; 40 (9): 726-731.

4. Бабичев А.П. Хонингование / А.П. Бабичев, Ю.Н. Поляничков, А.В. Славин, В.М. Шумячкер, М.Ю. Поляничкова, Л.В. Гусакова; Под общ. ред. А.П. Бабичева. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 245 с.

5. Неведкин А.И. Исследование закономерностей повышения давления шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве на процесс хонингования // Механизация строительства. 2016. Т. 77. № 12. С. 24-27.

6. Buj-Corral I., Alvarez-Flórez J., Dominguez-Fernández A. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. *Metals*. 2019; 9 (8): 860. <https://doi.org/10.3390/met9080860>

7. Хонинговальная головка: Пат. 182190 Российская Федерация, МПК В24В33/08 / А.И. Неведкин, И.В. Одинокова, А.В. Суходоля. № 2017128435; заявл. 09.08.2017; опубл. 07.08.2018, Бюл. № 22.

Критерии авторства

Неведкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Неведкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.11.2021

Одобрена после рецензирования 09.03.2022

Принята к публикации 14.03.2022

bruskami s ispol'zovaniyem metodiki polnogo faktornogo eksperimenta [Optimization of honing with diamond bars using the methodology of a full factorial experiment]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2017; 78(1): 55-58. (In Rus.)

3. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Y.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Quality control in the machining of cylinder liners at repair enterprises. *Russian Engineering Research*, 2020; 40(9): 726-731.

4. Babichev A.P., Polyanchikov Yu.N., Slavin A.V., Shumyacher V.M., Polyanchikova M.Yu., Gusakova L.V. Khoningovanie [Honing]. Ed. by A.P. Babichev. Volgograd, VolgGASU, 2013. 245 p. (In Rus.)

5. Nefedkin A.I. Issledovanie zakonomernostey povysheniya davleniya shlama i SOZH v podbruskovom prostranstve na protsess khoningovaniya [Study of the patterns of increasing the pressure of sludge and coolant in the under-bar space on the honing process]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2016; 77(12): 24-27. (In Rus.)

6. Buj-Corral I., Alvarez-Flórez J., Dominguez-Fernández A. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. *Metals*, 2019; 9 (8): 860. <https://doi.org/10.3390/met9080860>

7. Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Sukhodolya A.V. Khoningoval'naya golovka [Honing head]: Pat. 182190 Russian Federation, IPC B24B33/08. No. 2017128435, 2018. (In Rus.)

Contribution

A.I. Nefedkin, I.V. Odinkova, V.V. Gaevskiy performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. A.I. Nefedkin, I.V. Odinkova, V.V. Gaevskiy have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 09.11.2021

Approved after reviewing 09.03.2022

Accepted for publication 14.03.2022