

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

УДК 621.921

DOI 10.26897/1728-7936-2018-2-37-43

НЕФЕДКИН АНАТОЛИЙ ИГОРЕВИЧ

E-mail: an.nefedkin@yandex.ru

ОДИНОКОВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА, канд. тех. наук, доцент

E-mail: odinokova_iv@mail.ru

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН ХОНИНГОВЫХ БРУСКОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

Исследовано воздействие абразивных зерен хонинговальных брусков на поверхность обрабатываемой детали. Исходя из вероятностей распределения абразивных зёрен по объёму режущего слоя инструмента и кинематики процесса, рассчитывается закон распределения высоты микронеровностей детали. С помощью этого распределения находятся как параметры шероховатости поверхности детали, так и характеристики процесса резания: площади срезов, количество контактных зёрен и т.д. Дано сравнение дискретной и непрерывной моделей инструмента и найдена математическая связь между ними. Дискретная модель более реально отражает строение абразивного инструмента, однако отсутствуют удобные методы измерения её параметров. Установлена математическая зависимость между распределением абразивных зёрен по высоте и распределением глубины царапин, оставленных данным инструментом на полированном образце. Исходя из полученной информации о дискретной модели алмазных брусков, проведён расчёт геометрических параметров их режущей поверхности. Сопоставление расчётных и экспериментально найденных значений параметров брусков подтверждает точность предложенной методики. Показано, что обе математические модели абразивного хонинговального инструмента, дискретная и непрерывная, дают идентичные результаты. Получены в общем виде аналитические зависимости для расчёта параметров шероховатости поверхности детали, скорости съёма металла, усилий резания, площадей среза, числа контактных зёрен и др. Подставляя в полученные формулы характеристики брусков, усреднённый профиль зёрен, плотность их распределения по высоте можно рассчитывать все параметры микрогеометрии детали.

Ключевые слова: хонингование, хонинговальные бруски, абразивные зерна, повышение надёжности, процесс резания, математическое исследование, дискретная модель, непрерывная модель.

Введение. Невысокая надёжность машин стала серьёзным фактором низких экономических показателей сельскохозяйственной отрасли. Сроки фактической эксплуатации машин и оборудования превышают нормативные в 2...3 раза. Затраты на ремонт техники в настоящее время составляют почти 60 млрд руб. или 10% от всей выручки за произведённую сельскохозяйственную продукцию. Отсутствие целого ряда позиций техники конкурентоспособного отечественного производства вынуждает наиболее крупные и эффективные хозяйства покупать зарубежную технику – более дорогую с лучшими эргономическими характеристиками. Однако для импортных машин в современных условиях остро стоит проблема технического сервиса, а именно – конструкторской документации и отсут-

ствуют технологии ремонта на все типы сложных машин. Повысить эффективность отечественных и импортных машин можно путем технологий технического сервиса и снижением эксплуатационных затрат путем организации восстановления деталей.

Хонингование занимает одно из ведущих мест среди современных способов финишной обработки деталей, который позволяет решить ряд технологических задач: исправление погрешностей формы, малой шероховатости обрабатываемой поверхности ($Ra = 1,25 \dots 0,16$ мкм) и получение высокой точности размеров (5...6 квалитет).

Хонингование широко применяют при финишной обработке посадочных диаметров внутренних колец подшипников, зубчатых колёс пневмо- и гидроцилиндров и т.д. Данная обработка является од-

ной из окончательных операций технологического процесса, которая обеспечивает качество поверхности готовой детали, что значительно влияет на долговечность изделий.

Цель исследования – совершенствование и повышение эффективности процесса хонингования, разработка адекватной теории воздействия поверхности абразивных брусков, имеющих случайную микрогеометрию, на обрабатываемую деталь.

Материал и методы. Модель процесса резания [1-4], положенная в основу теории, базируется на допущении, что каждое зерно, контактирующее с деталью, удаляет слой металла, точно соответствующий его профилю и траектории. При этом не учитывается пластическая деформация металла, происходящая впереди царапающего зерна, по сторонам от него, а также – ниже линии среза. Поперечный профиль царапины имеет по краям навалы, а в середине – след от закругленной вершины царапающего зерна и упругие деформации металла. Модель, широко принятая во многих теоретических исследованиях, достаточно полно соответствует процессу хонингования материалов малой пластич-

ности, например, гильз цилиндров ДВС, изготовленных из серого чугуна.

Исходя из расчёта вероятностей распределения абразивных зёрен по объёму режущего слоя инструмента и кинематики процесса, вычисляется закон распределения высоты микронеровностей детали. С помощью этого распределения находятся как параметры шероховатости детали, так и характеристики процесса резания – площадь срезов, число режущих зёрен и т.д.

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

Рассмотрим параметры шероховатости поверхностей хонингованных брусков, исходя из дискретной и непрерывной моделей абразивного инструмента.

Расчёт для дискретной модели инструмента

Пусть известны функция $z = z(x)$, описывающая усреднённый профиль зёрен, и плотность их распределения по высоте $n(h)$. Для расчёта закона распределения высоты микронеровностей детали $P(h)$ рассмотрим схему резания абразивным зерном (рис. 1).

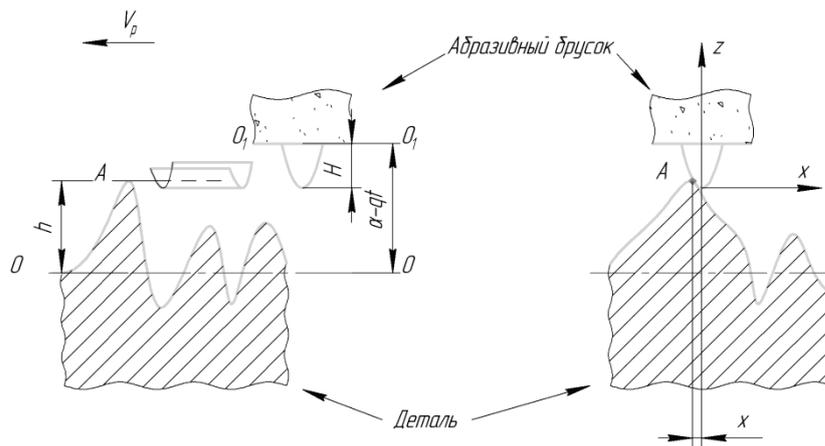


Рис. 1. Схема к расчету вероятности $P(h)$

Пусть уровень отсчёта высоты неровностей $0-0$ постоянен в течение всего цикла обработки и соответствует положению уровня отсчёта высоты зерен $0-0$ в конечный момент хонингования. Тогда расстояние 0_1-0 между уровнями $0-0$ и 0_1-0_1 , равное в начальный момент припуску a , с течением времени будет уменьшаться. Считая линейную скорость съема металла постоянной $q = const$, находим, что в момент времени t :

$$0_1 0 = a - qt.$$

Как видно из рисунка 1, некоторое зерно, проходящее над точкой поверхности детали А, на расстоянии x , в момент времени t срежет металл глубже h , если его высота удовлетворяет неравенству:

$$H > \eta = [a - qt - h + z(x)]. \quad (1)$$

Суммарная длина Y абразивного полотна, прошедшего над точкой А к моменту t , равна

$$Y = \frac{B \cdot n_g \cdot n}{\sin \alpha} t, \quad (2)$$

где B – ширина, мм; n_g – количество брусков (шт.); n – число оборотов хонголовки, об/мин; α – угол наклона траектории брусков к оси детали.

Подставляем в (1) время t через Y :

$$H > \eta = [a - b \cdot Y - h + z(x)], \quad (3)$$

где обозначено

$$b = \frac{q \cdot \sin \alpha}{B \cdot n_g \cdot n}. \quad (4)$$

Величина b представляет собой интенсивность съёма металла, равную объёму металла, снятому единицей площади бруска при прохождении им единицы пути резания.

Вероятность того, что на некоторой элементарной площадке поверхности и инструмента dS не будет ни одного зерна высотой больше η , в соответствии с законом Пуассона, равна

$$1 - N[a - bY - h + z(x)] \cdot dS + o(dS), \quad (5)$$

где $o(dS)$ – величина высшего порядка малости по сравнению с dS .

Вероятность того, что ни на одной из элементарных площадок поверхности инструмента S , прошедшей над точкой A к моменту времени t , не будет зерен, задевающих точку A , находится по теореме умножения вероятностей:

$$\prod_{dS \in S} \{1 - N[a - bY - h + z(x)] \cdot dS\} + o(1). \quad (6)$$

Перейдя в формуле (6) к пределу, и выполнив элементарные преобразования, получим вероятность того, что высота в точке A будет больше h , т.е. искомый закон распределения $P(h)$ (при условии, что h меньше высоты профиля детали до обработки), а область интегрирования определяется:

– расстоянием по оси x от точки A до краев бруска, с вероятностью близкой к единице, гораздо больше средних размеров зерна, поэтому $-\infty < x < \infty$;
– длительностью обработки в течение времени t , то $0 \leq y \leq \frac{qt}{b}$.

$$P(h) = \exp \left\{ - \int_0^{\frac{qt}{b}} dy \int_{-\infty}^{\infty} N[a - bY - h + z(x)] dx \right\}. \quad (7)$$

Здесь используется известное равенство:

$$\lim_{dS \rightarrow 0} \left\{ \prod_{dS \in S} [1 - f(x, y) dS] \right\} = \exp \left\{ - \iint_S f(x, y) dS \right\}, \quad (8)$$

Произведя в интеграле (7) замену переменной $z = z(x)$, $x = \pm x(z)$, $dx = x'(z) dz$, выполнив несложные преобразования получим

$$P(h) = \exp \left\{ - \frac{2}{b} \int_0^{\infty} x(z) \cdot [N(a - qt - h + z) - N(a - h + z)] dz \right\}. \quad (9)$$

Если исходный профиль детали, характеризуемый законом распределения $P_0(h)$, удален не полностью, то

$$P(h) = P_0(h) \cdot \exp \left\{ - \frac{2}{b} \int_0^{\infty} x(z) [N(a - qt - h + z) - N(a - h + z)] dz \right\}. \quad (10)$$

К концу обработки, когда удален весь припуск $qt = a$ и отсутствуют следы предыдущей обработки,

$$P(h) = \exp \left\{ - \frac{2}{b} \int_0^{\infty} x(z) \cdot N(z - h) dz \right\}. \quad (11)$$

Этой формуле можно придать также несколько другой вид путем интегрирования по частям:

$$P(h) = \exp \left\{ - \frac{1}{b} \int_0^{\infty} S_p(z) \cdot n(z - h) dz \right\} = \exp \left\{ - \frac{1}{b} \int_{-h}^{\infty} S_p(z + h) \cdot n(z) dz \right\}. \quad (12)$$

где $S_p(z) = 2 \int_0^z x(z) dz$ – площадь вертикального сечения зерна в зависимости от уровня z .

Последний интеграл есть не что иное, как суммарная площадь $S_p(h)$ проекций зерен, расположенных на единицу площади бруска, на плоскость резания, поэтому

$$P(h) = \exp \left\{ - \frac{1}{b} S_p(h) \right\}. \quad (13)$$

Можно найти закон распределения высоты микронеровностей на детали, зная характеристики абразивного бруска и режимы обработки, а затем вычислить математическое ожидание высоты профиля M , среднеквадратическую H_{ck} и среднеарифметическую R_a высоту неровностей:

$$M = - \int_{-\infty}^{\infty} h P'(h) dh;$$

$$H_{ck} = - \int_{-\infty}^{\infty} (h - M)^2 \cdot P'(h) dh;$$

$$R_a = - \int_{-\infty}^{\infty} |h - M| \cdot P'(h) dh. \quad (14)$$

Введем формулы для расчета шага неровностей профиля в осевом сечении детали.

Сначала найдем вероятность $P(h, l)$ того, что после обработки в произвольной точке профиля детали на высоте h окажется выступ металла длиной более чем l . Для этого события необходимо, чтобы на поверхности брусков не оказалось ни одного зерна, задевающего указанный выступ.

Проведя рассуждения, аналогичные предыдущему, находим:

$$P(h, l) = \exp \left\{ - \frac{1}{b} \int_0^{\infty} [l \sin \alpha + 2x(z)] \times [N(z - qt - h + a) - N(z - h + a)] dz \right\}. \quad (15)$$

В конце обработки, когда снят весь припуск a ,

$$P(h, l) = \exp \left\{ -\frac{1}{b} \cdot \int_0^{\infty} [l \cdot \sin \alpha + 2x(z)] \cdot N(z-h) dz \right\}. \quad (16)$$

Если рассматривать вероятность $P_1(h, l)$ длины выступа не в случайной точке, которая вообще может оказаться принадлежащей впадине, а только в точках, занятых металлом, то

$$P_1(h, l) = \frac{P(h, l)}{P(h)} = \exp \left\{ -\frac{l \sin \alpha}{b} \cdot \int_0^{\infty} N(z-h) dz \right\}. \quad (17)$$

Из этого видно, что длина выступов распределена экспоненциально, следовательно, ее математическое ожидание:

$$\bar{l} = \frac{b}{\sin \alpha \cdot \int_0^{\infty} N(z-h) dz} = \frac{b}{\sin \alpha \cdot \int_{-h}^{\infty} N(z) dz}. \quad (18)$$

Поскольку отношение среднего шага неровностей S_R на высоте h к средней длине выступа на этой высоте есть $P(h)$, то

$$S_h = \frac{\bar{l}}{P(h)} = \frac{b}{P(h) \sin \alpha \int_{-h}^{\infty} N(z) dz}. \quad (19)$$

Поставив вместо h математическое ожидание высоты профиля M , получим искомый шаг неровностей по средней линии S_M .

Расчёты для непрерывной модели инструмента

Поверхность инструмента представим, как однородное случайное поле, характеризуемое статистическими параметрами своих плоских сечений – профилограмм.

Найдём закон распределения высоты микронеровностей детали, сохранив ряд введённых выше обозначений.

Некоторая точка детали А (рис. 2) движется относительно поверхности инструмента по прямой, наклонённой за счёт съёма под очень малым углом β , причём

$$tg \beta = b = \frac{q \cdot \sin \alpha}{B \cdot n_g \cdot n}. \quad (20)$$

Вероятность $P(h)$ того, что высота точки А будет больше h , равна вероятности того, что случайная функция профиля инструмента $\varphi(Y)$ целиком лежит ниже прямой $z = a - h - Y \cdot tg \beta$. Выражаясь терминами теории случайных функций, $P(h)$ равняется вероятности отсутствия выброса случайной функции $\psi(Y, h) = \varphi(Y) - (a - h - Y \cdot tg \beta)$ за нулевой уровень.

Написать аналитическое выражение вероятности отсутствия выброса для произвольной случайной функции весьма трудно, однако, в данном случае можно воспользоваться тем обстоятельством, что режущие зерна, а значит, и соответствующие им

выбросы случайной функции, распределены на поверхности инструмента по закону Пуассона.

В этом случае вероятность отсутствия выброса будет

$$P(h) = \exp \left\{ -\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} dY \int_0^{\infty} v \cdot f_1(0, v) dv \right\}. \quad (21)$$

где $f_1(z, v)$ – совместная плотность распределения ординаты z и производной $v = \frac{dz}{dx}$ случайной функции $\psi(Y, h)$; (Y_{\min}, Y_{\max}) – интервал, на котором рассматриваются выбросы случайной функции.

Пусть известна совместная плотность распределения $f(z, v)$ ординаты и производной для случайной функции микропрофиля инструмента $\varphi(Y)$, тогда

$$f_1(0, v) = f(a - h - bY, v - b). \quad (22)$$

Учитывая, что $b = tg \beta$ очень малая величина, $Y_{\min} = 0, Y_{\max} = \frac{q \cdot t}{b}$, а также приняв во внимание распределение неровностей до обработки $P_0(h)$, найдем

$$P(h) = P_0(h) \cdot \exp \left\{ -\int_0^{\frac{q \cdot t}{b}} dY \int_0^{\infty} v \cdot f(a - h - bY, v) dv \right\}. \quad (23)$$

В конце обработки $q \cdot t = a$ исходный профиль детали полностью снят, поэтому

$$P(h) = \exp \left\{ -\frac{1}{b} \cdot \int_0^{\infty} dz \int_0^{\infty} v \cdot f(z - h, v) dv \right\}. \quad (24)$$

Этому выражению можно придать несколько иной вид, если учесть, что внутренний интервал равен числу выступов (выбросов) на единице длины профилограммы, превышающих уровень $(z - h)$,

$$\lambda(z - h) = \int_0^{\infty} v \cdot f(z - h, v) dv, \quad (25)$$

поэтому

$$P(h) = \exp \left\{ -\frac{1}{b} \int_0^{\infty} \lambda(z - h) dz \right\}. \quad (26)$$

Интересно отметить, что подставив сюда значение $\lambda(h)$, рассчитанное нами ранее, исходя из параметров дискретной модели, мы получим выражение

$$P(h) = \exp \left\{ -\frac{1}{b} \int_0^{\infty} dH \int_0^{\infty} D(z) \cdot n(z + H - h) dz \right\} = \exp \left\{ -\frac{2}{b} \int_0^{\infty} x(z) \cdot N(z - h) dz \right\}, \quad (27)$$

которое совпадает с (11).

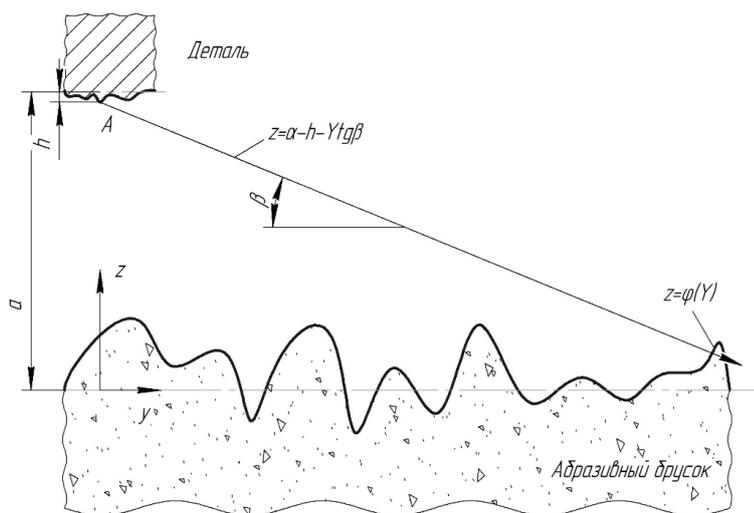


Рис. 2. Схема расчета микрогеометрии детали

Это еще раз подтверждает, что обе математические модели абразивного инструмента, дискретная и непрерывная, должны давать идентичные результаты, если их параметры найдены правильно.

Однако для практического применения необходимы зависимости по возможности более простые, не содержащие сложных математических операций. Общие формулы позволяют вести расчёты при любом виде характеристик $n(h)$, $z(x)$ хонинговальных брусков.

Анализ различных функциональных аппроксимаций $z(x)$ показал, что наиболее подходящими являются степенные зависимости, которые не только хорошо соответствуют экспериментальным данным, но и позволяют получить удобные расчётные формулы для параметров процесса резания-царапания.

Итак,

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

При этом направление отсчёта высоты зёрен меняем на противоположное, приняв его в тело инструмента.

Микрогеометрия поверхности детали.

Закон распределения высоты микронеровностей находим из (11)

$$P(h) = \exp \left\{ \frac{-2 \cdot k}{b \cdot c^m \cdot (\beta + 1)} \cdot \int_0^h z^m (h - z)^{\beta + 1} dz \right\}. \quad (28)$$

Интеграл, входящий в (28), выражается через гамма-функции $\Gamma(x)$ [6] поэтому

$$P(h) = \exp(-\rho \cdot h^\rho) \quad \text{при } h \geq 0, \quad (29)$$

где

$$\rho = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m + 1) \cdot \Gamma(\beta + 1)}{b \cdot c^m \cdot \Gamma(p + 1)} \quad (30)$$

$$p = \beta + m + 2. \quad (31)$$

Распределение (29) известно в математике как распределение Вейбулла [5].

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

$$M = \Gamma\left(\frac{p + 1}{p}\right) \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (32)$$

Среднеквадратическая высота микронеровностей

$$H_{СК} = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p + 2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p + 2}{p}\right)} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (33)$$

Часто удобно пользоваться безразмерной высотой профиля, приняв

$$h^* = \frac{h}{H_{СК}}. \quad (34)$$

Закон распределения высоты микронеровностей при этом будет

$$P(h^*) = \exp \left[- \left(h^* \sqrt{\Gamma\left(\frac{p + 2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p + 1}{p}\right)} \right)^p \right] = \exp \left[- (h^* \xi)^p \right], \quad (35)$$

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

Такая запись весьма удобна тем, что форма кривой распределения зависит лишь от одного параметра p .

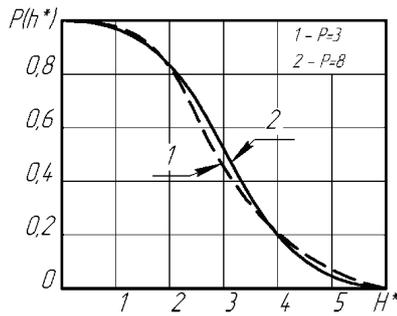


Рис. 3. Распределение высоты микронеровностей

На рисунке 3 изображены графики $P(h^*)$, из которых видно, что с увеличением p асимметрия распределения возрастает. При этом опорная поверхность на относительно высоких уровнях увеличивается, что благоприятно сказывается на работоспособности детали.

Выражение (33) записываем в виде

$$H_{СК} = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (36)$$

Аналогично среднеарифметическая высота неровностей –

$$Ra = r_2 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (37)$$

Для облегчения пользования формулами произведён расчёт коэффициентов r_1 и r_2 , которые зависят только от β и почти не зависят от m (рис. 4).

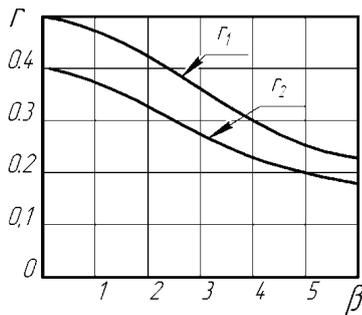


Рис. 4. Коэффициент для расчета $H_{СК}$ и R_a

Шаг неровностей по средней линии S_M находим, подставляя выражения (29-32) в формулу (19):

$$S_M = \frac{b \cdot (1 + \beta) \cdot (2 + \beta)}{k \cdot M^{\beta+2} \cdot \sin \alpha} \cdot \exp(\rho \cdot M^p), \quad (38)$$

или

$$S_M = \frac{r_3}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{b}{k} \right)^{\frac{m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{c} \right)^{\frac{m(\beta+2)}{p}}, \quad (39)$$

где r_3 – коэффициент, зависящий от β и m

$$r_3 = \frac{(\beta + 2) \cdot (\beta + 1)}{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{\beta+2}} \cdot \left[\frac{2 \cdot \Gamma \cdot (m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)}{\Gamma(p+1)} \right]^{\frac{\beta+2}{p}} \times \exp \left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^p \quad (40)$$

Графики коэффициента r_3 приведены на рисунке 5.

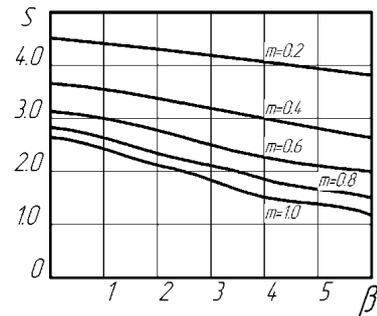


Рис. 5. Коэффициент для расчета S_M

Выводы

Сравнивая показатели степеней при разных параметрах, входящих в формулу (39), видно, что режимы обработки и распределение зёрен по высоте мало влияют на шаг неровностей S_M , в то время как форма зёрен влияет весьма заметно – с увеличением размеров зёрен шаг значительно возрастает.

Полученные зависимости дают возможность прогнозировать шероховатость поверхности детали, а также выбирать режимы хонингования исходя из требуемой микрогеометрии детали.

Библиографический список

1. Чеповецкий И.Х., Нелипович П.В. Механизм износа алмазных брусков при хонинговании стали и чугуна // В кн.: Физико-химические явления при взаимодействии абразивов с металлами в процессе обработки. Тбилиси, 1971. С. 47-53.
2. Чеповецкий И.Х., Нелипович П.В. Характер износа алмазных брусков при хонинговании // Синтетические алмазы, 1970. Вып. 1. С. 67-69.
3. Степанов Ю.С., Комаров В.А., Афанасьев Б.И., Поляков А.И. Повышение производительности внутреннего шлифования с одновременным снижением износа шлифовальных кругов // Станки и инструменты. М.: Машиностроение, 2005. № 8. С. 33-35.
4. Полянчиков Ю.Н., Тибиркова М.А. Особенности износа однокомпонентного абразивного ин-

струмента // Известия ВолгГТУ. Волгоград: Политехник, 2004. № 2. С. 53-55.

5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.

6. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1968.

Статья поступила 26.01.2018

STUDY OF IMPACT REGULARITIES OF NON-ENGAGING BARS ON WORKPIECE SURFACE

ANATOLY I. NEFEDKIN

Email: an.nefedkin@yandex.ru

IRINA V. ODINOKOVA, PhD (Eng)

Email: odinokova_iv@mail.ru

Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI); 125319, Leningradsky Prospekt 64, Moscow, Russian Federation

The paper aims at studying the effects of abrasive grains of honing bars on the surface of workpieces. Basing on the probability distribution of abrasive grains by volume of the tool's cutting layer and the process kinematics the authors have calculated the height distribution pattern of a part's asperities. This distribution helps determining both roughness parameters of a part's surface, and cutting process features – the area of cuts, the number of contact grains, etc. The paper provides a comparison of discrete and continuous tool models and their mathematical ratio. A discrete model more realistically reflects the abrasive tool structure, however there are no convenient methods for measuring it. The authors present an established mathematical ratio between the distribution of abrasive grains according to the height and the depth distribution of scratches produced by the tool on a polished sample. Basing on the obtained information on the discrete model of diamond bars, the authors have calculated geometric parameters of their cutting surface. The comparison of the calculated and experimentally found values of the bar parameters confirms the accuracy of the proposed method. It has been shown that both discrete and continuous mathematical models of the abrasive honing tool bring identical results. The authors have obtained general analytical expressions to calculate the roughness parameters of a part's surface, the metal removal rate, cutting forces, cut areas, the number of contact grains, etc. Inserting the characteristics of bars in the formulas, one can calculate all microgeometry parameters of a part.

Key words: honing, improving reliability, cutting process, mathematical analysis, discrete model, continuous model.

References

1. Chepovetskiy I.X., Nelipovich P.V. Mekhanizm iznosa almaznykh bruskov pri khoningovanii stali i chuguna [Wear pattern of diamond bars in steel and cast iron honing]. In: *Fiziko-khimicheskiye yavleniya pri vzaimodeystvii abrazivov s metallami v protsesse obrabotki*. Tbilisi, 1971. Pp. 47-53. (in Rus.)

2. Chepovetskiy I.X., Nelipovich P.V. Kharakter iznosa almaznykh bruskov pri khoningovanii [Wear pattern of diamond bars subjected to honing]. *Sinteticheskiye almazy*, 1970. Issue 1. Pp. 67-69. (in Rus.)

3. Stepanov Yu.S., Komarov V.A., Afanas'yev B.I., Polyakov A.I. Povysheniye proizvoditel'nosti vnutrennego shlifovaniya s odnovremennym snizheniyem iznosa shlifoval'nykh krugov [Increasing the produc-

tivity of internal grinding with simultaneous decreasing the wear of grinding wheels]. *Stanki i instrumenty*. 2005. No. 8. Pp. 33-35. (in Rus.)

4. Polyanchikov Yu.N., Tibirkova M.A. Osobennosti iznosa odnokomponentnogo abrazivnogo instrumenta [Wear characteristics of a one-component abrasive tool]. *Izvestiya VolgGTU*. 2004. No. 2. Pp. 53-55. (in Rus.)

5. Gnedenko B.V., Belyayev Yu.K., Solov'yov A.D. Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in reliability theory]. Moscow, Nauka. 1965. (in Rus.)

6. Yanke Ye., Emde F., Losh F. Spetsial'nyye funktsii [Special functions]. Moscow, Nauka. 1968. (in Rus.)

The paper was received on January 26, 2018