

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И УСЛОВИЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе на основе положений теории вероятностей аналитически описаны параметры шероховатости поверхности, образуемой при финишной абразивной обработке. Показана роль фактора вероятности участия абразивных зерен в резании в процессе формообразования поверхностей при абразивной обработке. Установлено, что для обеспечения примерно одинаковой шероховатости поверхности при беспорядочном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента их должно быть как минимум в 4 раза больше, чем при упорядоченном расположении зерен. Этим доказано, что учет вероятностного характера участия абразивных зерен в съеме металла при доводке позволяет достаточно объективно оценить закономерности формирования шероховатости обрабатываемой поверхности для различной исходной шероховатости, образованной на предыдущих операциях. На основе полученных теоретических решений обоснованы условия уменьшения параметров шероховатости поверхности, которые состоят главным образом в увеличении количества абразивных зерен, участвующих в процессе резания.

Ключевые слова: абразивная обработка, процесс резания, обрабатываемый образец, шероховатость поверхности, съем металла, теория вероятностей.

Новіков Ф.В., Шкурупій В.Г., Анділахай В.О. Теоретичний аналіз закономірностей формування й умов зменшення шорсткості поверхні при фінішній абразивній обробці. У роботі на основі положень теорії ймовірностей аналитично описані параметри шорсткості поверхні, що утворюється при фінішній абразивній обробці. Показано роль фактора ймовірності участі абразивних зерен у різанні в процесі формування поверхонь при абразивній обробці. Установлено, що для забезпечення приблизно однакової шорсткості поверхні при безладному розташуванні абразивних зерен на робочій поверхні інструмента, їх повинне бути як мінімум в 4 рази більше, ніж при впорядкованому розташуванні зерен. Цим доведено, що урахування ймовірнісного характеру участі абразивних зерен у зніманні металу при доведенні дозволяє досить об'єктивно оцінити закономірності формування шорсткості оброблюваної поверхні для різної вихідної шорсткості, утвореної на попередніх операціях. На основі отриманих теоретичних рішень обґрунтовані умови зменшення параметрів шорсткості поверхні, які полягають головним чином у збільшенні кількості абразивних зерен, що беруть участь у процесі різання.

Ключові слова: абразивна обробка, процес різання, оброблюваний зразок, шорсткість поверхні, знімання металу, теорія ймовірностей.

Novikov F.V., Shkurupiy V.G., Andilakhay V.A. Theoretical analysis of the regularities of formation conditions and reduce the surface roughness at the finish abrasion. In this paper, on the basis of the theory of probability is analytically described surface roughness formed during finishing abrasive machining. The role of the probability factor participate in cutting abrasive grains in the process of forming surfaces with abrasive machining. It is established that, to ensure approximately the same surface roughness with randomly distributed abrasive grains on the working surface of the tool must be at least 4 times greater than when an ordered arrangement of grains. This proves that the inclusion of the probabilistic nature of the participation of abrasive grains in the metal removal in finishing allows objectively evaluate the regularities of machined surface roughness for different initial roughness formed on previous operations. On the basis of theoretical solutions grounded condition of decreasing the surface roughness, which consist mainly in increasing the number of abrasive grains involved in the cutting process.

Keywords: abrasion, cutting process, the treated sample surface roughness, metal removal, probability theory.

Постановка проблемы. Благодаря высокой остроте режущих кромок абразивных зерен и их микроскопическим размерам при финишной абразивной обработке можно получить тончайшие микросрезы, что позволяет добиться высоких показателей шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей и открывает широкие возможности технологического обеспечения качества обработки прецизионных деталей, работающих в условиях трения и износа, а также в условиях воздействия светового потока (создание светоотражательных поверхностей деталей). Это относится к различным телескопическим гидравлическим системам, длинномерным трубчатым элементам и другим изделиям, например, широко применяемым в космических летательных аппаратах. К этим деталям следует отнести зеркала лазерных установок, которые изготавливаются из меди и ее сплавов, молибдена, бериллиевых и других сплавов с обеспечением высокой отражательной способности поверхностей. Зеркала могут быть плоскими, сферическими, вогнутыми и достигать размеров 1000 мм и более. Финишная обработка таких деталей традиционно производится с применением методов доводки и абразивного полирования. Однако с повышением требований к параметрам качества обработки и в особенности к шероховатости обрабатываемых поверхностей возникает необходимость совершенствования методов финишной абразивной обработки. Поэтому изыскание новых технологических возможностей методов финишной абразивной обработки является важной и актуальной задачей современного машиностроения.

Анализ последних исследований и публикаций. В научно-технической литературе в последние годы при исследовании закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке получил развитие теоретико-вероятностный подход [1,2], учитывающий хаотическое расположение абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента и их вероятностный характер участия в резании. Используя этот подход, можно научно обоснованно подходить к решению задач по установлению условий уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке, включая процессы шлифования, доводки, абразивного полирования и т.д. Решение этих задач имеет большое теоретическое и практическое значение, т.к. несмотря на значительное количество опубликованных в научно-технической литературе работ [3], задачи обоснования условий существенного уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке в теоретическом плане в полном объеме не решены. По-прежнему, поиск путей уменьшения шероховатости поверхности проводится на основе результатов экспериментальных исследований, причем, отдельно для каждого метода абразивной обработки. Фактически отсутствуют теоретические решения, с единых позиций описывающих закономерности формирования шероховатости поверхности для разных методов абразивной обработки. Это не позволяет выявить, обосновать и реализовать на практике имеющиеся технологические возможности финишной абразивной обработки, особенно в плане достижения параметра шероховатости поверхности R_a на уровне 0,001 мкм и ниже, что важно при обработке ответственных прецизионных деталей. Все это указывает на необходимость проведения дальнейших исследований закономерностей формирования и условий уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке.

Цель работы – аналитическое описание с позиций теории вероятностей шероховатости поверхности и обоснование условий ее уменьшения при финишной абразивной обработке.

Изложение основного материала. Для анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке первоначально рассмотрим простейший случай – процесс доводки абразивными зернами одинакового размера (рис. 1а). В работе [4] установлено, что функция, описывающая вероятность неударенного металла с поверхности обрабатываемого образца, имеет вид:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где 2γ – угол при вершине конусообразной части режущего зерна; n – количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания; B – ширина обрабатываемого образца, м; y – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

Общий вид вероятностной функции $\Phi(y)$ показан на рис. 1а. Показанный на рисунке параметр R_{max} определяет максимальную высоту микронеровностей обрабатываемой поверхности. Как видно, при условии $y=0$ функция $\Phi(y=0)=1$. С увеличением y функция $\Phi(y)$ уменьшается, неограниченно приближаясь к нулевому значению $\Phi(y) \rightarrow 0$. В этом случае мак-

симальную высоту микронеровностей на обрабатываемой поверхности (параметр шероховатости поверхности R_{max}) можно установить лишь с наперед заданной степенью точности, т.к. функция $\Phi(y)$ никогда не пересекает линию $\Phi(y)=0$.

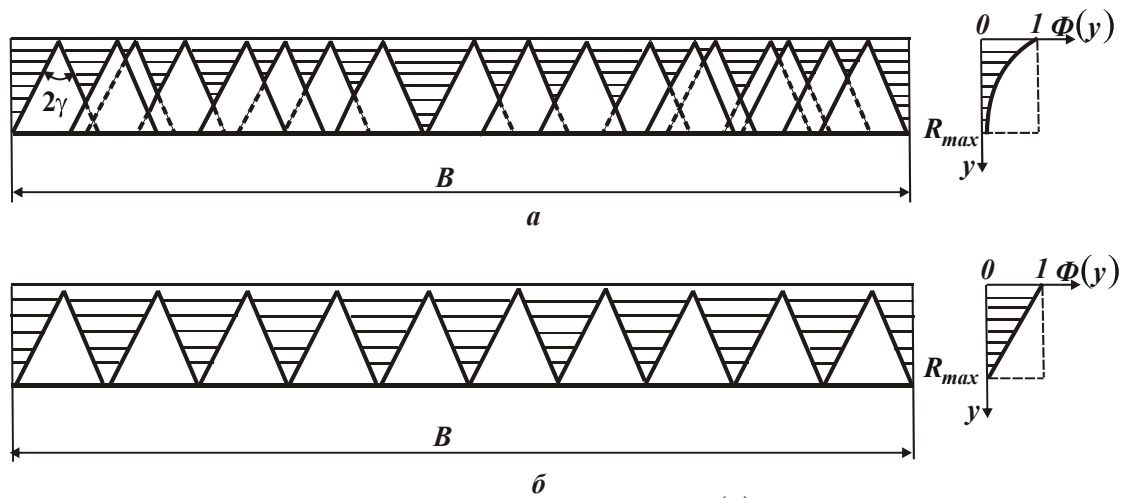


Рис. 1. Расчетная схема вероятностной функции $\Phi(y)$ при неравномерном (а) и равномерном (б) расположении проекций зерен.

Числитель показателя степени функции $\Phi(y)$ в зависимости (1), равный $2 \cdot tg\gamma \cdot n \cdot y$, определяем суммарную длину оснований проекций n зерен на вертикальную плоскость (плоскость обрабатываемого образца) при условии, что все зерна равноудалены друг от друга (рис. 1б). Тогда отношение $2 \cdot tg\gamma \cdot n \cdot y / B$ будет определять, во сколько раз суммарная длина оснований проекций n зерен на вертикальную плоскость $2 \cdot tg\gamma \cdot n \cdot y$ будет больше ширины обрабатываемого образца B на уровне $y = R_{max}$. Обозначая $N = 2 \cdot tg\gamma \cdot n \cdot y / B$, зависимость (1) примет вид:

$$\Phi(y = R_{max}) = e^{-N} . \quad (2)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (2) значения функции $\Phi(y = R_{max})$ для разных значений N .

Таблица 1

Расчетные значения функции $\Phi(y = R_{max})$

N	1	2	3	4	5	6
$\Phi(y = R_{max})$	0,368	0,135	0,05	0,018	0,0067	0,0024

Как видно, с увеличением N значения функции $\Phi(y = R_{max})$ неограниченно уменьшаются. Это свидетельствует о том, что с точки зрения теории вероятностей для обеспечения условия $\Phi(y = R_{max}) \rightarrow 0$, т.е. для полного удаления обрабатываемого металла на уровне $y = R_{max}$, число N должно быть как минимум в 4 раза больше. Это обусловлено тем, что в реальных условиях обработки абразивные зерна хаотически (неупорядоченно) расположены на рабочей поверхности инструмента, т.е. удалены друг от друга на разные расстояния. Поэтому для выполнения условия $\Phi(y = R_{max}) \rightarrow 0$ число N заведомо должно быть $N \geq 4$, тогда как при равноудаленном (упорядоченном) расположении зерен, исходя из чисто геометрического представления, число $N=1$ (рис. 1б).

Таким образом показано, что беспорядочное расположение абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента и их вероятностный характер участия в процессе съема металла с обрабатываемого образца вносит принципиальные изменения в закономерности формирования шероховатости поверхности образца и указывает на необходимость исследования параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с позиции теории вероятностей. Необходимо отметить, что и упрощенные геометрические подходы к аналитическому описанию параметров шероховатости поверхности также применимы, т.к. они позволяют получить прибли-

женные решения, которые вполне можно использовать для теоретического анализа конкретных случаев абразивной обработки.

Зависимость (1) справедлива при обработке поверхности образца с исходной шероховатостью, равной нулю. В действительности, процесс доводки абразивными зернами осуществляется при значительной исходной шероховатости обрабатываемой поверхности, которая образуется на предшествующих операциях, например, на операциях шлифования и лезвийной обработки. В этом случае зависимость (1) видоизменится. Так, если принять, что в связи с исходной шероховатостью поверхности параметр B условно уменьшается и изменяется по закону: $B(y) = B - tg\alpha \cdot y$ (рис. 2), то зависимость (1) выразится:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg\gamma \cdot n}{(B - tg\alpha \cdot y)^2}}, \quad (3)$$

где α – угол, определяющий степень уменьшения параметра B в связи с наличием на обрабатываемой поверхности исходной шероховатости.

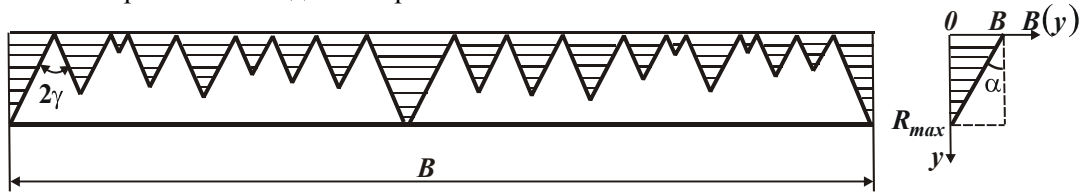


Рис. 2. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности и общий вид функции $B(y)$.

Характер изменения функции $B(y) = B - tg\alpha \cdot y$, по сути, определяет один из основных параметров шероховатости поверхности – относительную опорную длину микропрофиля обработанной поверхности [3].

Как следует из зависимости (3), при условии $y=0$ функция $\Phi(y=0)=1$ (рис. 3). Если принять, что $tg\alpha = B / R_{max}$, то при условии $y = R_{max}$ функция $\Phi(y = R_{max})=0$ (рис. 3). В отличие от случая, рассмотренного выше для нулевой исходной шероховатости поверхности, когда функция $\Phi(y = R_{max}) \rightarrow 0$, в данном случае функция $\Phi(y = R_{max})=0$.

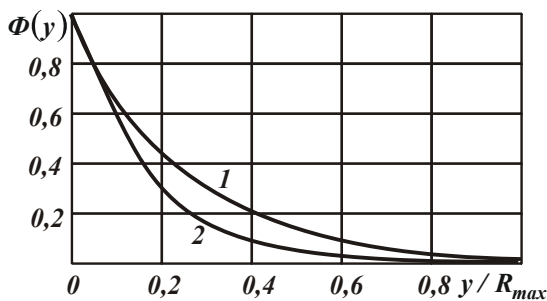


Рис. 3. Характер изменения функции $\Phi(y)$: 1 - $\alpha = 0^\circ$; 2 - $\alpha = 45^\circ$

функции $\Phi(y)$ остается таким же, как и в зависимости (1): функция $\Phi(y)$ непрерывно уменьшается с увеличением координаты y . Таким образом показано, что чем больше значения функции $B(y) = B - tg\alpha \cdot y$, т.е. чем больше исходная относительная опорная длина микропрофиля обработанной поверхности, тем больше значения функции $\Phi(y)$ и соответственно меньше параметр шероховатости поверхности R_a .

В работе [5] приведено общее теоретическое решение определения параметра шероховатости поверхности R_a на основе использования вероятностной функции $\Phi(y)$ (рис. 4). Для этого первоначально определяется положение средней линии $y = a$, которая разделяет микропрофиль обработанной поверхности на две части таким образом, что заштрихованные на рис. 4 площади F_1 и F_2 равны между собой. В этом случае наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению $y=0$, а наибольший выступ микропрофиля соответствует значению $y = R_{max}$.

Для удобства расчетов функция $\Phi(y)$ представлена в виде:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{\psi \cdot N}{(1 - tg\alpha \cdot \psi)}}, \quad (4)$$

где $\psi = y / R_{max}$ – коэффициент, учитывающий изменение координаты y и принимающий значения $0 \dots 1$.

Приведенные на рис. 3 значения функции $\Phi(y)$ получены для случая $N=4$. Как видно, с увеличением угла α функция $\Phi(y)$ принимает меньшие значения. При этом характер изменения

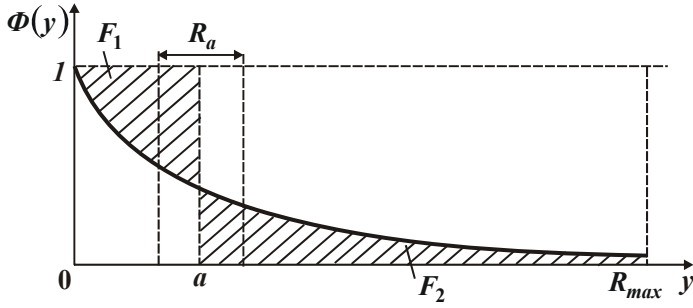


Рис. 4. Расчетная схема параметра шероховатости поверхности R_a

Параметр шероховатости поверхности R_a по определению равен длине стороны прямоугольника с высотой $\Phi(y)=1$ (рис. 4), т.е.

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot F_2. \quad (5)$$

Положение средней линии $y = a$ определяется из условия $F_1 = F_2$. Тогда в общем случае площади F_1 и F_2 аналитически описываются:

$$F_1 = \int_0^a [1 - \Phi(y)] \cdot dy = a - \int_0^a \Phi(y) \cdot dy; \quad (6)$$

$$F_2 = \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \quad (7)$$

Сравнивая зависимости (6) и (7), получено:

$$a = \int_0^a \Phi(y) \cdot dy + \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \quad (8)$$

Соответственно параметр шероховатости поверхности R_a определится:

$$R_a = 2 \cdot F_2 = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy. \quad (9)$$

В случае, если $\text{tg} \alpha = 0$ (т.е. при обработке сплошного металла, когда исходная шероховатость поверхности равна нулю), параметры a и R_a определяются довольно просто и выражаются следующими зависимостями, полученными на основе зависимостей (8) и (9):

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right); \quad (10)$$

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{\text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left(0,367 - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right). \quad (11)$$

При условии $N \geq 4$, что имеет место на практике, исходя из табл. 1, функция $\Phi(y = R_{max})$ принимает значения, значительно меньшие 0,367, поэтому вторым слагаемым в зависимостях (10) и (11) можно пренебречь, тогда они примут простой вид:

$$a = \frac{B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}; \quad (12)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}. \quad (13)$$

Из зависимости (13) вытекает, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a можно главным образом за счет увеличения количества работающих зерен

$$n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \tau, \quad (14)$$

где k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности инструмента, шт./м²; $V_{инстр}$ – скорость перемещения инструмента, м/с; τ – время обработки, с.

Как видно, количество работающих зерен n тем больше, чем больше параметры k , $V_{инстр}$ и τ . С учетом зависимости (14) параметры a и R_a определяются:

$$a = \frac{1}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр} \cdot \tau}; \quad (15)$$

$$R_a = \frac{0,184}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр} \cdot \tau}. \quad (16)$$

В случае $\alpha > 0$ функция $\Phi(y)$ принимает сложный вид (3) и поэтому вычислить интегралы $\int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy$ и $\int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy$, входящие в зависимости (10) и (11) фактически невозможно. Исходя из этого, установить a и R_a в соответствии с зависимостями (10) и (11) можно лишь численным методом на основе расчетных значений функции $\Phi(y)$, приведенных на рис. 3. Для этого необходимо в зависимостях (10) и (11) перейти от интегрирования к суммированию:

$$a = \sum_{i=1}^z \Phi_i(y) \cdot dy; \quad (17)$$

$$R_a = 2 \cdot \sum_{i=m}^z \Phi_i(y) \cdot dy, \quad (18)$$

где z – количество интервалов, на которое разбиваются пределы интегрирования от 0 до значения R_{max} по координате y ; m – количество интервалов, на которое разбиваются пределы интегрирования от значения a до значения R_{max} по координате y ($m < z$); dy – длина интервала разбиения; $\Phi_i(y)$ – значения функции $\Phi(y)$ в каждом интервале разбиения.

Применительно к расчетным данным, приведенным на рис. 3, имеем: $z=10$; $dy=0,1$. Тогда, используя эти данные, можно на основе зависимостей (17) и (18) рассчитать значения параметров a и R_a для разных значений угла α (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные значения параметров a и R_a

$tg\alpha$	0	0,25	0,5	1,0
a	0,297	0,276	0,256	0,22
R_a	0,17	0,139	0,098	0,054

Как следует из табл. 2, с увеличением угла α параметры a и R_a уменьшаются, причем, параметр R_a в большей степени.

Заслуживает внимания случай, когда $\alpha=0$, а фактическая ширина обработки в связи с наличием микронеровностей на обрабатываемой поверхности меньше номинальной ширины обработки B (рис. 5). Этот случай имеет место при обработке поверхностей со значительной исходной шероховатостью, образованной на предыдущих операциях. Тогда зависимость (1) можно представить:

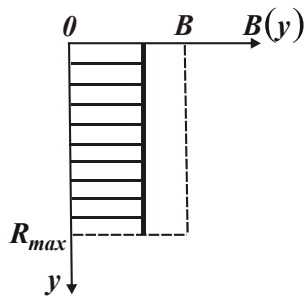


Рис. 5. Общий вид функции $B(y)$

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg\gamma \cdot n}{p \cdot B} \cdot y}, \quad (19)$$

где $p \leq 1$ – коэффициент, учитывающий во сколько раз фактическая ширина меньше номинальной ширины обработки B .

Как следует из приведенной зависимости (19), характер изменения функции $\Phi(y)$ остается таким же, как и в случае равенства фактической и номинальной ширины обработки B . Однако, функция $\Phi(y)$ принимает меньшие значения, поскольку повышается вероятность съема обрабатываемого металла (в виде микронеровностей на обрабатываемой поверхности). Для расчета значений функции $\Phi(y)$ целесообразно зависимость (19) представить в виде:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{\psi \cdot N}{p}}. \quad (20)$$

На рис. 6 приведены рассчитанные по зависимости (20) значения функции $\Phi(y)$ для случая $N=4$ с учетом $\psi = y/R_{max}$. При $p=1$, т.е. когда микронеровности на исходной обрабатываемой поверхности отсутствуют, и осуществляется съем сплошного металла, значения функции $\Phi(y)$ значительно больше, чем в случае $p=0,2$, т.е. когда производится съем металла в виде микронеровностей на обрабатываемой поверхности.

Параметры a и R_a , исходя из зависимостей (15) и (16), при условии $p \leq 1$ преобразуются:

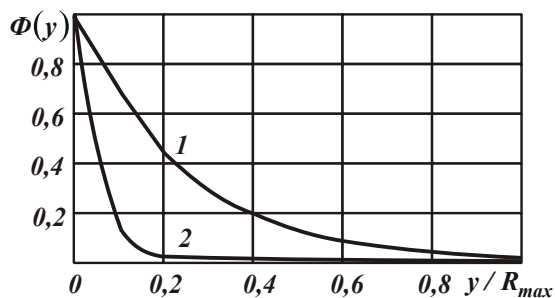


Рис. 6. Характер изменения функции $\Phi(y)$: 1 - $p=1$; 2 - $p=0,2$

$$a = \frac{p}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инстр}} \cdot \tau}; \quad (21)$$

$$R_a = \frac{0,184 \cdot p}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инстр}} \cdot \tau}. \quad (22)$$

Как следует из зависимостей, чем меньше коэффициент p , тем меньше параметры a и R_a , т.е. меньше шероховатость поверхности. Используя зависимости (21) и (22), можно обоснованно подходить к выбору рациональных условий финишной абразивной обработки.

Выводы

В работе, используя положения теории вероятностей, аналитически описаны параметры шероховатости поверхности, образуемые при финишной абразивной обработке. Показана роль фактора вероятности участия абразивных зерен в резании в процессе формообразования поверхностей при абразивной обработке. Установлено, что для обеспечения примерно одинаковой шероховатости поверхности при беспорядочном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента их должно быть как минимум в 4 раза больше, чем при упорядоченном расположении зерен. Этим доказано, что учет вероятностного характера участия абразивных зерен в съеме металла при доводке позволяет достаточно объективно оценить закономерности формирования шероховатости поверхности. На основе полученных решений обоснованы условия уменьшения параметров шероховатости поверхности, которые состоят главным образом в увеличении количества абразивных зерен, участвующих в процессе резания.

Список использованных источников:

1. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
2. Хусу А.Н. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.Н. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Изд-во “Наука”, 1975. – 344 с.
3. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – К.: Наукова думка, 1979. – 244 с.
4. Новиков Ф.В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 44. – С. 140-149.
5. Новіков Ф.В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф.В. Новіков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупій // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 5 (979). – С. 199-210.

Bibliography:

1. Korolev A.V. Issledovanie prochessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / A.A. Korolev. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 212 s.
2. Khusu A.N. Sherokhovatost poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostny podkhod) / A.N. Khusu, U.R. Vitenberg, V.A. Palmov. – Moskva: Izd-vo "Nauka", 1975. – 344 s.
3. Kachestvo poverkhnosti prialmazno-abrazivnoy obrabotke / E. V. Ryzhov, A. A. Sagarda, V. B. Ilitskiy, I. K. Chepovetskiy. – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 s.
4. Novikov F.V. Issledovaniy sherokhovatosti poverkhnosti prialmazno-abrazivnoy obrabotke metodami teoriy veroyatnostey / F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. – Kh.: NTU “KhPI”. – 2004. – № 44. – S. 140-149.
5. Novikov F.V. Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhni pri abrazyvniy obrobtsi / F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G. Shkurupiy // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematyчне modelivannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kh.: NTU “KhPI”. – 2013. – № 5 (979). – S. 199-210.

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф. ГБУЗ “ПГТУ”