

УДК 621.923

DOI: 10.12737/article_591947e199fe53.23161842

С.М. Братан, д.т.н., **В.Б. Богуцкий** к.т.н.,
Ю.К. Новоселов, д.т.н., **С.И. Рошупкин** к.т.н.
(ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования

Представлен анализ взаимосвязи вероятности контакта вершины абразивного зерна с материалом, числом, формой и длиной единичных срезов при чистовых процессах плоского шлифования. Показано, что проходя зону контакта заготовки с кругом, зерно может срезать материал, если попадает на один из выступов шероховатости поверхности, или не срезать его, если попадет в одну из впадин шероховатости. Полученные в работе зависимости позволяют оценить влияние режима шлифования и характеристик инструмента на длину единичных срезов, определить основные параметры процесса шлифования, проследить закономерности образования микрорельефа обработанной поверхности и построить его расчетный профиль, который может быть получен при выполнении операции. Приведен пример расчета и построения теоретического профиля микрорельефа поверхности.

Ключевые слова: шлифование; абразивное зерно; взаимодействие инструмента и заготовки; вероятность удаления материала; параметры процесса шлифования.

S.M. Bratan, D. Eng., **V.B. Bogutsky**, Can. Eng.,
Yu.K. Novosyolov, D. Eng., **S.I. Roshchupkin**, Can. Eng.
(FSAEI HE Sevastopol University, 33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053)

Process simulation of tool and blank stochastic interaction in grinding operations

The interaction analysis of abrasive grain tip contact probability with the material, number, the form and length of single cuts at finishing processes of flat grinding is presented. It is shown that when passing a contact area of a blank with a disk a grain can cut material off, if it falls on one of protrusions of surface roughness, or will not cut it, if it falls on one of roughness cavities. The dependencies obtained in the work allow estimating the influence of a grinding mode and tool characteristics on the length of single cuts, defining basic parameters of a grinding process, watching regularities in the formation of micro-relief formation on the surface worked and forming its rated profile which can be obtained at the operation fulfillment. The example of the computation and formation of a theoretical profile of a surface micro-relief is shown.

Keywords: grinding; abrasive grain; tool and blank interaction; material removal probability; grinding process parameters.

На машиностроительных предприятиях достаточно остро стоит проблема обеспечения качества выпускаемой продукции. Окончательное качество формируется на финишных операциях, таких как шлифование. Шлифование является одним из распространенных и эффективных технологических процессов. Объем шлифовальных работ занимает в сред-

нем до 30 %, а в отдельных отраслях промышленности – до 70 % всех видов работ [1].

Примерно 80 % финишных операций, начиная с прецизионной обработки деталей электронной техники и заканчивая высокопроизводительным шлифованием проката и валков прокатных станков, производится абразивным инструментом. При этом более чем 32 %

видов металлорежущего оборудования оснащено таким инструментом [2].

Абразивная обработка охватывает широкий диапазон скоростей резания ($0,1 \dots 300$ м/с) и широкий диапазон снимаемых припусков ($0,01 \dots 30$ мм), отличается большим многообразием способов реализации, что позволяет эффективно использовать её вместо лезвийной. В ряде случаев, когда иные методы не могут быть применены, шлифование является единственным процессом высокоточной обработки деталей [3].

При шлифовании материал удаляется с обрабатываемой поверхности в зоне контакта заготовки с кругом, которая представляет собой область взаимного проникновения абразивных зерен круга в материал заготовки и гребешков материала в промежутки между вершинами абразивных зерен [4].

К параметрам состояния зоны относятся её размеры и форма, соотношение удаленной и не удаленной частей материала в каждой области зоны, физические процессы формообразования, в том числе: стружкообразования, тепловыделения, пластических деформаций обрабатываемого материала, износа и разрушения инструментального материала, физического и химического воздействия на компоненты СОТС.

К выходным переменным зоны относятся силы резания, параметры теплового потока, поля поверхностей резания и поля вторичных процессов, скорость износа абразивного материала и ряд других переменных [5].

Распределение тепловых потоков, физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов в зоне контакта, процессы стружкообразования достаточно

полно рассмотрены в работах [6 – 9]. Изучение взаимодействия инструмента и заготовки при шлифовании обычно выполняют, предварительно выдвинув гипотезу о форме единичных срезов. Из выполненного анализа операции шлифования как технической системы следует, что параметры формы единичных срезов относятся к выходным переменным подсистемы зоны контакта – результатом сложного взаимодействия инструмента и заготовки, и изучать закономерности процесса обработки на основе гипотезы о форме срезов при системном подходе не представляется возможным. Более или менее достоверно можно говорить о форме зоны контакта заготовки с инструментом, параметры которой относятся к параметрам состояния рассматриваемой подсистемы.

Целью данной работы является установление взаимосвязей вероятности контакта, числа, формы и длины единичных срезов со съёмом материала и шероховатостью поверхности деталей при чистовых процессах шлифования.

Для простоты рассмотрим процесс плоского шлифования. При плоском шлифовании (рис. 1) обрабатываемая поверхность встречается с единичными абразивными зёрнами, наиболее удаленными от центра круга, в точке В. Процесс резания-царапания заканчивается при прохождении поверхности через точку С. Точка С расположена ближе к плоскости базирования детали, чем точка В, на величину съема металла Δr . Максимальная глубина резания-царапания единичными абразивными зёрнами t_f будет больше радиального съема на величину поверхностного слоя, в котором распределена шероховатость поверхности H .

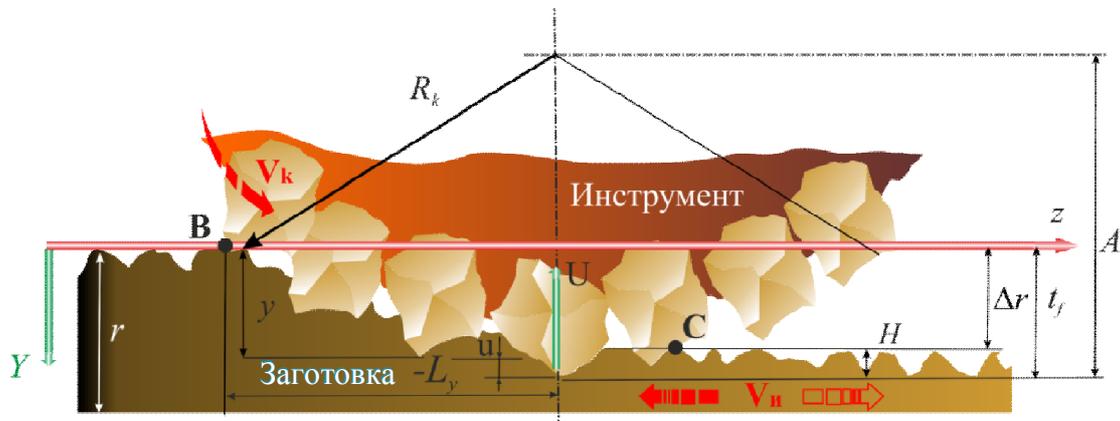


Рис. 1. Схема процесса плоского шлифования

Если принять в качестве допущения незначительность влияния на размеры зоны темпе-

ратурных и упругих деформаций материалов круга и заготовки, то максимально возможная

глубина может быть рассчитана по зависимости

$$t_f = H + \Delta r, \quad (1)$$

где H – слой, в котором распределена шероховатость поверхности после касания данного участка заготовки с кругом.

При вращении круга наиболее удаленное от его центра абразивное зерно может коснуться обрабатываемого материала либо в точке C , если попадет на одну из вершин шероховатости поверхности, либо значительно ближе к линии перпендикулярной базовой поверхности детали и проходящей через центр вращения круга, если попадет во впадину шероховатой поверхности. Таким же образом абразивное зерно может выйти из контакта с металлом либо в точке C , либо ближе к линии проходящей через центр вращения круга перпендикулярной основной плоскости.

Из анализа работы единичного зерна при шлифовании следует, что проходя зону контакта заготовки с кругом, оно может срезать материал, если попадает на один из выступов шероховатости поверхности, или не срезать его, если попадет в одну из впадин шероховатости [9, 10]. При встрече зерна с выступом увеличивается доля удаленной части материала. Если зерно попадает во впадину, то материал не снимается, но вероятность его удаления потенциально увеличивается, так как повышается вероятность попадания на выступ последующих абразивных зерен.

Вероятность контакта вершины абразивного зерна с материалом численно равна вероятности удаления материала [10]. При любом положении зерна в зоне резания она будет определяться соотношением не удаленной части

металла $\sum_{i=1}^n l_i$ к общей длине рассматриваемого участка l (рис. 2):

$$P_k = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l} = 1 - P(M) = \exp(-a_0 - a), \quad (2)$$

где a_0 – показатель степени при e , характеризующий состояние поверхности в данном сечении до его входа в зону резания; a – показатель степени при e , характеризующий изменение вероятности съема металла в зоне резания; $P(M)$ – вероятность удаления материала.

Не выясняя физическую природу показателей a_0 и a и их связь с предысторией процесса формообразования, рассмотрим изменение вероятности контакта зерен с материалом за-

готовки на фиксированном уровне при одном контакте поверхности с инструментом. Съем материала при шлифовании производится дискретными порциями, но число единичных срезов, проходящих через сечение, достаточно велико (от нескольких сотен до нескольких тысяч на единицу длины сечения), что позволяет при расчете вероятности перейти от дискретной модели к непрерывной.

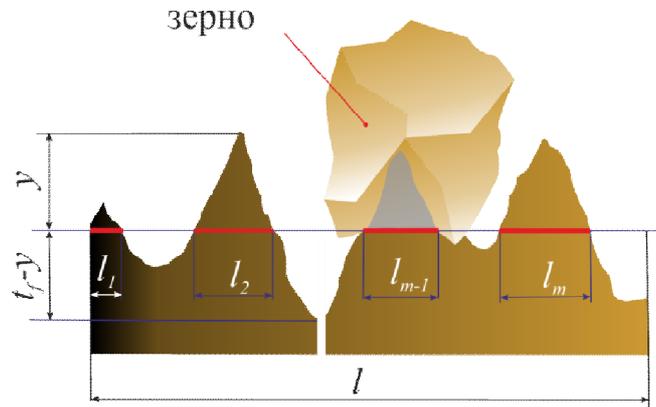


Рис. 2. Схема к расчету вероятности контакта

Для определения показателей a_0 и a рассмотрим изменение вероятности контакта на фиксированном уровне y , т.е. выделим отрезок с началом от максимальной вершины шероховатости поверхности до сечения, где рассчитывается вероятность контакта.

Для фиксированного положения сечения в зоне контакта (рис. 3), обрабатываемый материал на уровне y будет удаляться только теми зернами, вершины которых по глубине инструмента заключены в слое $y > u$.

Выделим из них зерно с координатой вершины $y \geq u \geq 0$. При прохождении через сечение его профиль пересекается уровнем y на расстоянии h от вершины:

$$h = t(z) - y - u = t_f - \frac{z^2}{D} - y - u, \quad (3)$$

где $t(z)$ – текущее значение глубины микрорезания; D – диаметр шлифовального круга; z – расстояние сечения заготовки до основной плоскости; y – расстояние от максимальной вершины шероховатости поверхности до рассматриваемого сечения; u – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до уровня в его рабочем слое по направлению радиус-вектора.

Текущее значение глубины микрорезания зависит от радиус-вектора круга R_k , расстояния от центра вращения шлифовального круга до плоскости стола станка A , и толщины заготовки r (рис. 1 и рис. 3).

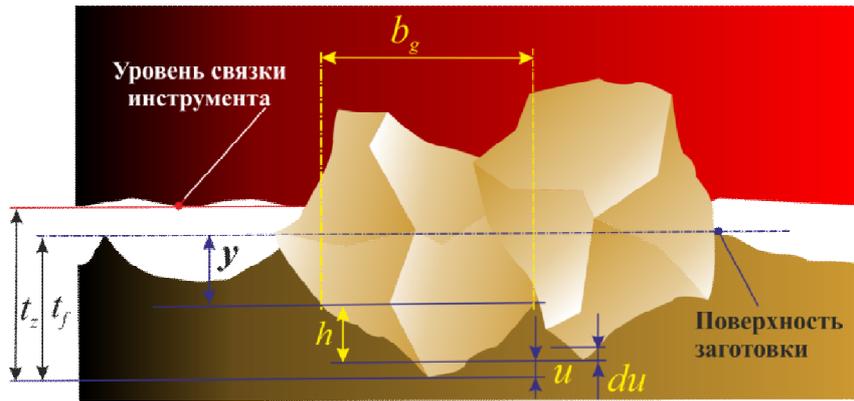


Рис. 3. Схема для расчета показателей a_0 и a

Ширина профиля, соответствующая данному уровню, при моделировании профиля режущей вершины зерна параболой может быть вычислена по уравнению:

$$b_g = C_b h^m = C_b [t(z) - y - u]^m = 2\sqrt{2\rho_g} \left[t_f - y - u - \frac{z^2}{D} \right]^m, \quad (4)$$

где ρ_g – радиус закругления при вершине абразивного зерна; m – показатель степени в уравнении параболы.

За время Δt сечение поворачивается на угол $\Delta\phi$ и через него проходит участок с длиной дуги $(V_k \pm V_u)\Delta t$.

Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля b_g будут иметь зерна, вершины которых расположены в слое круга $1 \times \Delta u (v_k \pm v_u)\Delta t$. Число таких вершин вычисляется по плотности их распределения по глубине инструмента $f(u)$.

Число зерен $\Delta\lambda$, прошедших через сечение y за время Δt рассчитывается по формуле

$$\Delta\lambda = n_g f(u) du (v_k \pm v_u) \Delta t, \quad (5)$$

где n_g – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента; v_k – окружная скорость инструмента; v_u – скорость перемещения стола станка; $f(u)$ – распределение рабочих зерен инструмента по координате u , которое может быть аппроксимировано различными зависимостями, например степенными [11].

$$f(u) = \frac{(\chi + m - 0.5)}{H_u^{\chi + m - 0.5}} u^{\chi - 1}. \quad (6)$$

Изменение параметра $a(y, \tau)$ определяется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен:

$$\Delta a(y, \tau) = K_c n_g b_g f(u) (v_k \pm v_u) \Delta u \Delta t, \quad (7)$$

где K_c – коэффициент стружкообразования,

учитывающий, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его пластически выдавливается по краям риски.

После перехода от дискретной модели к непрерывной и замены τ на z/v_u получим интегральное уравнение для расчета параметра $a(y, \tau)$ в зоне контакта детали с кругом:

$$a(y, z) = \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} K_c n_g b_g f(u) du \frac{v_k \pm v_u}{v_u} dudz, \quad (8)$$

где L_y – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня с условной наружной поверхностью, $L_y = \sqrt{(t_f - y)D}$.

Принятые ранее модели вершин зерен и плотностей их распределения по глубине позволяют перейти к установлению функциональных связей вероятности неудаления материала от технологических факторов. При подстановке в уравнение (8) полученных выражений и из уравнений (6) и (4) оно принимает вид:

$$a(y, z) = \frac{K_c C_b (v_k \pm v_u) n_g (\chi + m - 0.5)}{v_u H_u^{\chi + m - 0.5}} \times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D} \right)^m u^{\chi - 1} dudz. \quad (9)$$

После интегрирования по u :

$$a(y, z) = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)K_c C_b (v_k \pm v_u) n_g (\chi + m - 0.5)}{\Gamma(m+\chi+1)v_u H_u^{\chi + m - 0.5}} \times \int_{-L_y}^z \left(t_f - \frac{z^2}{D} - y \right)^{m+\chi} dz, \quad (10)$$

где Γ – гамма функции.

Дальнейшее интегрирование (10) возможно только при известных значениях показателей.

При $\chi = 1,5$; $m = 2,5$ и $C_b = 2\sqrt{2\rho_g}$ получим:

$$a(y, z) = \frac{2,92\pi K_c 2\sqrt{2\rho_g n_g} (v_k \pm v_u) (t_f - y)^{4,5}}{24v_u H_u^{3,5}} \times \left(z + \frac{z^9}{9L_y^8} - \frac{4z^7}{7L_y^6} + \frac{6z^5}{5L_y^4} - \frac{4z^3}{3L_y^2} + \frac{1}{3}L_y \right) \quad (11)$$

Пример. Рассчитаем вероятность контакта и вероятность удаления материала при шли

фовании пластин из бронзы EN 2.1447 кругом 1-300x20x127 64C F46 L6 V при $v_k = 35$ м/с, $v_u = 0,25$ м/с. Из расчета баланса перемещений определяем, что для заданных условий обработки $t_f = 0,08$ мм. На основании данных исследований принимаем $K_c = 0,9$; $\rho_g = 0,05$ мм; $n_g = 2,3$ зерен/мм². Для рассмотренных условий $L_y = 3$ мм. Расчет выполним для уровня $y = 0,05$ мм при $z = -0,1$ мм.

$$a(y, z) = \frac{3,5 \cdot 2,92 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,05} \cdot 2,3 \cdot 35250 \cdot (0,08 - 0,05)^4}{24 \cdot 250 \cdot 0,08^{3,5}} \times \left(-0,1 + \frac{(-0,1)^9}{9 \cdot (3)^8} - \frac{4 \cdot (-0,1)^7}{7 \cdot (3)^6} + \frac{6 \cdot (-0,1)^5}{5 \cdot (3)^4} - \frac{4 \cdot (-0,1)^3}{3 \cdot (3)^2} + \frac{1}{3} \cdot 3 \right) = 1,24$$

Показатель $a(y_0, \tau) = 0,546$ определен по профилограмме исходной шероховатости поверхности.

Вероятность контакта:

$$P = e^{-a(y_0; z) - a(y; z)} = e^{-0,546 - 1,24} = 0,16$$

Вероятность удаления материала:

$$P(M) = 1 - e^{-a(y_0; z) - a(y; z)} = 1 - e^{-0,546 - 1,24} = 0,84$$

На рис. 4 приводятся зависимости вероятности контакта абразивного зерна с материалом детали. Они построены для случая шлифования образцов из закаленной стали диаметром 48 мм кругами 1 300x20x127 25A F60 K 5 V при скорости круга 35 м/с, скорости детали 0,25 м/с, продольной подаче 2 м/с, поперечной подаче 0,008 мм/ход.

Вероятность контакта вершины абразивного зерна с металлом значительно зависит от его положения в зоне резания. Для наиболее удаленного от центра круга абразивного зерна при его движении от точки В – входа в зону контакта к основной плоскости (см. рис. 4, а), наблюдается резкое увеличение вероятности контакта. При расстоянии от вершины абразивного зерна до основной плоскости $z = -0,7 \dots -0,4$ мм, величина вероятности асимптотически приближается к единице. В зоне $z = -0,4 \dots -0,2$ мм она сохраняется постоянной, равной единице. При $z < 0,2$ мм вероятность контакта резко уменьшается и в точке С асимптотически приближается к нулю. Для всех значений z , при которых вероятность равна единице, абразивное зерно будет обязательно находиться в контакте с материалом. Для всех значений z , при которых вероятность меньше единицы, контакт абразивного зерна с материалом может иметь или не

иметь место.

Кривые вероятности контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом для зерен, расположенных на расстоянии u от условной наружной поверхности инструмента, имеют более плавный характер. У них нет столь выраженного линейного участка в области основной плоскости, при всех значениях z вероятность контакта меньше единицы. Все кривые расположены внутри кривой $u = 0$ и имеют меньшую протяженность, максимум всех кривых смещен в сторону отрицательных значений z и уменьшается по величине с увеличением u .

По траектории данного радиуса в единицу времени проходит значительное число вершин абразивных зерен. Число зерен, которые будут контактировать с металлом, определится произведением вероятности контакта на число зерен, проходящих через элементарную площадку. Общее число контактирующих зерен n_k в сечении, проведенном на расстоянии z от линии центров, определится как сумма контактирующих зерен на всех элементарных площадках.

Число зерен, контактирующих с материалом n_k , пропорционально вероятности контакта. Для произвольно выбранного сечения, проведенного на расстоянии z от линии центров, оно вычисляется интегралом

$$n_k = \int_0^{l(z)} v_k \tau n_g f(u) P_k du.$$

Число вершин абразивных зерен, находящихся в контакте с металлом детали, зависит от расстояния сечения относительно линии, проходящей через центр вращения круга, ортогонально плоскости стола, элементов режима резания, размеров детали и круга, характе-

ристики круга. Влияние расстояния z и скорости круга и фактической глубины резания на число контактирующих вершин рассмотрено на рис. 5 и 6.

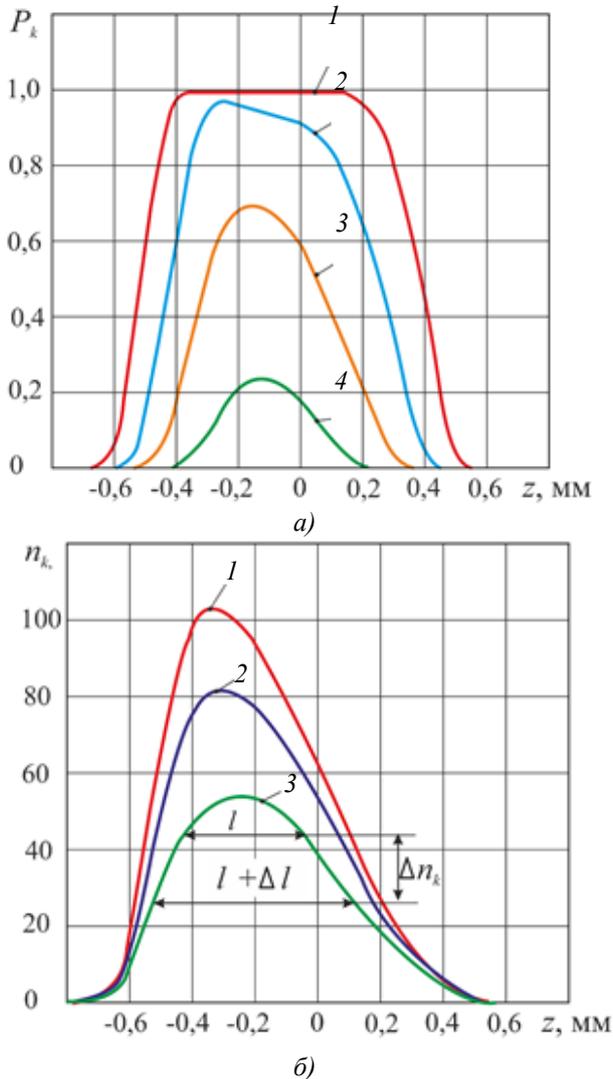


Рис. 4. Зависимость вероятности контакта и числа единичных срезов от расстояния до линии перпендикулярной базовой поверхности детали и проходящей через центр вращения круга:

$a - u = 0; u = 2 \text{ мкм}; u = 4 \text{ мкм}; u = 6 \text{ мкм};$
 $b - 1 - v_k = 50 \text{ м/с}; 2 - v_k = 35 \text{ м/с}; 3 - v_k = 20 \text{ м/с}$

Число контактирующих зерен с уменьшением расстояния z сначала плавно увеличивается, достигает максимума в области отрицательных значений z , а затем более резко снижается, асимптотически приближаясь к нулю. Для рассмотренных условий шлифования максимум кривых соответствует положению сечения ниже линии центров при значениях z в пределах от $-0,2$ до $-0,4$ мм. С увеличением скорости круга число контактирующих зерен увеличивается, максимум кривых смещается в сторону отрицательных значений z (рис. 4, б). Для всех значений z число зерен, контакти-

рующих с металлом, значительно меньше числа активных зерен. Для большинства режимов оно составляет 40...60 % от числа зерен, проходящих через зону резания и 10...15 % от числа зерен, расположенных на рабочей поверхности инструмента.

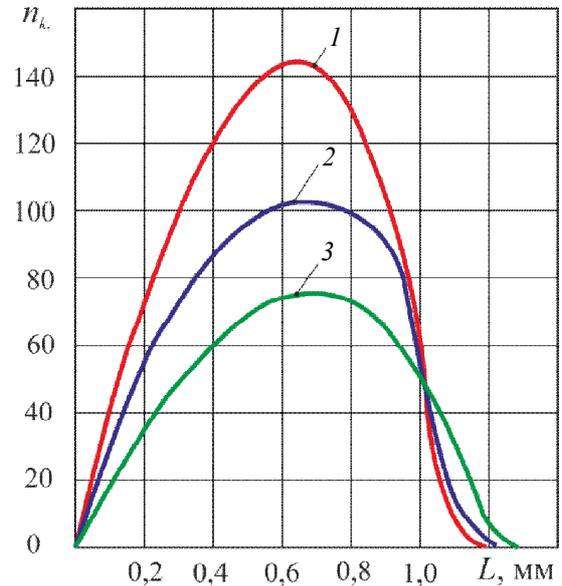


Рис 5. Зависимость числа единичных срезов от скорости круга при шлифовании образцов из стали EN 1.3505 кругами 24A F60 L 4 В:

$1 - v_k = 50 \text{ м/с}; 2 - v_k = 35 \text{ м/с}; 3 - v_k = 20 \text{ м/с}$

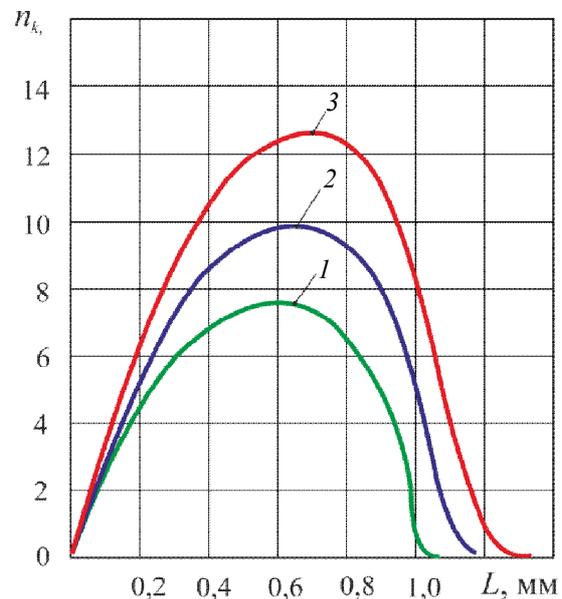


Рис. 6. Зависимость числа единичных срезов от глубины микрорезания при шлифовании образцов из стали EN 1.3505 кругами 24A F60 L 4 В:

$1 - t_f = 4,6 \text{ мкм}; 2 - t_f = 10 \text{ мкм}; 3 - t_f = 14,8 \text{ мкм}$

Полученные распределения позволяют провести анализ влияния режима шлифования и параметров характеристики инструмента на длину единичных срезов. Длина единичного

среза будет определяться расстоянием от точки появления до точки разрыва контакта вершины зерна с материалом заготовки. Частота единичных срезов K_L интервала длины от L до $L+\Delta L$ вычисляется из соотношения

$$K_L = \frac{\Delta n_k}{\Delta L},$$

где Δn_k – приращение числа контактирующих зерен; ΔL – приращение длины единичных срезов.

При вычислении длины единичных срезов могут быть рассмотрены две схемы. Первая основана на предположении, что вероятность отрыва вершины абразивного зерна от материала на расстоянии z от линии центров не зависит от того, где контакт наступил (дальше или ближе к точке максимума числа контактирующих вершин).

По второй схеме вероятность отрыва вершины зерна от материала зависит от того, ближе или дальше от точки максимума числа контактирующих вершин этот контакт произошел.

Для плоского шлифования более приемлемой является вторая схема. Это вытекает из анализа работы единичных зерен, расположенных на различном расстоянии от центра круга. Вершины зерен, наиболее удаленных от центра, касаются материала раньше и отрываются от него позже, чем вершины зерен расположенных ближе к центру. Так, для максимально удаленных вершин (рис. 4) a ($u = 0$) каждое второе зерно вступает в контакт с материалом при расстоянии от основной плоскости $z < 0,37$ мм и выходит из контакта при $z < -0,53$ мм. Для вершин, расположенных на расстоянии $u = 0,004$ мм к центру круга, каждое второе зерно вступает в контакт только при $z < 0,05$ мм и выходит из контакта уже при $z < -0,32$ мм.

Число единичных срезов длиной от L до $L+\Delta L$ по второй схеме может быть определено аналитически и графически. Пример графического определения числа срезов приведен на рис. 4, б; кривые частоты единичных срезов, приходящихся на 1 мкм длины за время 1 с, – на рис. 5 и 6.

При шлифовании появляются срезы различной длины от $L = 0$ мкм до $L = L_{\max}$. Для контактирующих зерен число единичных срезов длиной $L = 0$ мкм равно нулю. При возрастании длины число единичных срезов увеличивается, достигая максимума при L , несколько большем половины максимально возможной длины дуги контакта зерна с материа-

лом, а затем уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю.

На длину единичных срезов оказывают влияние все элементы режима шлифования. С их изменением меняются наклон возрастающей и ниспадающей ветви кривой, ее протяженность и положение максимума. При увеличении скорости круга, снижении максимальной глубины резания и скорости заготовки уменьшается протяженность кривых, максимум кривых смещается в сторону меньших значений L . Число единичных срезов в максимуме увеличивается с увеличением скорости круга и скорости перемещения стола станка.

Число единичных впадин в сечении поверхности нормальной плоскостью пропорционально числу режущих кромок, проходящих через сечение, и вероятности попадания каждой из них на участок, занятый материалом. Для плоского шлифования за n последовательных контактов заготовки с кругом через элементарный участок сечения шириной Δy (y – расстояние от верхней границы слоя исходной шероховатости), длиной $x = L$ проходит Δz вершин абразивных зерен.

С учетом многопериодности процесса шлифования из уравнения (5) при постоянном значении коэффициента $\chi = 1,5$ после дифференцирования и последующего суммирования получена зависимость

$$\Delta z = \frac{3\pi(v_k \pm v_u)Ln_g\sqrt{Dt_f}}{4v_u t_f^2} \sum_{i=0}^n (t_f - y - i\Delta r)\Delta y.$$

Число единичных рисок, которые останутся на поверхности при прохождении группы Δz зерен, пропорционально вероятности контакта вершины зерна с материалом:

$$\Delta N = P_k \Delta z = P(\bar{M}) \Delta z. \quad (12)$$

При анализе микрорельефа поверхности можно не только определить основные его параметры, но и проследить закономерности образования – построить и саму шероховатость, которая может получиться при выполнении операции. При построении такого профиля (рис. 7) в системе координат $x - y$ определяли положение каждой вершины, и к ней пристраивали контур абразивного зерна в виде параболы.

Сочетание контуров создало графическую иллюстрацию профиля поверхности. Он изображен на рис. 7 совокупностью кривых, ограничивающих закрашенную зону сверху. Как и реальная шероховатость, полученный профиль характеризуется наличием нерегулярных

неровностей. В последовательности менее глубоких и более глубоких впадин трудно проследить какую-либо закономерность.

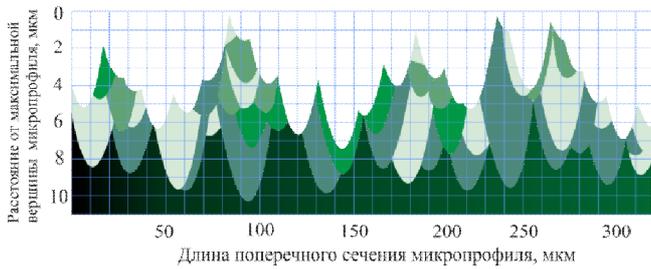


Рис. 7. Расчетный профиль микрорельефа поверхности образцов из закаленной стали EN 1.3505, шлифованных кругом 1 300x20x127 25A F60 L 4 В при $v_k = 35$ м/с; $v_u = 0,25$ м/с; продольной подаче 0,033 м/с; поперечной подаче 0,008 мм/ход

Если рассмотренный профиль шероховатости взять за исходный и продолжить построения, то можно проследить последовательность удаления материала за одно касание заготовки с кругом. Для этого достаточно рассчитать по уравнению (12) число вершин зерен, проходящих через сечение, и построить по описанному выше способу изменение профиля поверхности. Построения могут быть выполнены с учетом последовательности прохождения единичных зерен. В этом случае будет выявлена картина удаления материала каждым единичным зерном.

Для принятых условий шлифования изменение шероховатости за один контакт заготовки с кругом приведено на рис. 7. После касания она определяется совокупностью кривых, ограничивающих заштрихованную зону снизу. Общий характер шероховатости не изменился, но положение самих впадин в продольном сечении уже не соответствует начальному профилю. Там, где был выступ, может появиться впадина, на месте бывшей впадины может появиться выступ.

Площадь срезаемого слоя материала максимальна при попадании вершины зерна на выступ шероховатости и минимальна при попадании в её впадину.

Число единичных впадин составляет для исходного профиля 74 шт./мм, после касания заготовки с кругом – 72 шт./мм, что хорошо согласуется с расчетными и экспериментальными данными.

Полученные в работе зависимости (2) и (11) также позволяют рассмотреть методику аналитического расчета радиального съема материала по входным технологическим переменным процесса шлифования. Как отмечалось в

работах авторов [10,11] показано, что при шлифовании граничная область материал–среда может быть задана уровнями равной вероятности удаления материала.

При прохождении поверхности зоны контакта уровни смещаются к центру детали (рис. 8). Радиальный съем металла определяется изменением радиус-вектора точек уровня, ограничивающего переходную область со стороны среды.

Уравнение уровня запишется, если придать в зависимости (2) вероятности удаления материала значение β_M :

$$\beta_M = 1 - \exp(-a_0(y) - a(y, \tau)). \quad (13)$$

Численное решение полученной зависимости, относительно y выполнено для случая шлифования стальных образцов кругами зернистостью 25, показано на рис. 8. В отличие от процесса фрезерования, с которым часто сопоставляется процесс шлифования, в области входа и выхода из зоны кривые, ограничивающие её со стороны инструмента, имеют плавный характер. Величина радиального съема металла после j -го контакта определяется из уравнения (13) относительно Δr при $y = 0$:

$$\Delta r_j = t_{ff} - \left[\frac{-\ln(1 - \beta_M) - \sum_{k=1}^{j-1} a_k - a_0}{G_j} \right]^{1/v}, \quad (14)$$

$$\text{где } G_k = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)K_c C_b (v_k \pm v_u) n_g (\chi + m - 0,5)}{\Gamma(m + \chi + 1) v_u H_u^{\chi + m - 0,5}};$$

$$v = m + \chi.$$

Радиальный съем определяется режимом шлифования, состоянием поверхности инструмента, размерами детали и круга, состоянием обрабатываемой поверхности после предшествующего контакта.

Для проверки адекватности формализованных моделей процесса шлифования использовались материалы экспериментальных исследований, выполненных авторами в лабораторных условиях Уральского филиала ВНИИАШ, Алтайского политехнического института, Севастопольского государственного университета и в производственных условиях ряда машиностроительных предприятий. Подробные методики и результаты исследований даны в источниках [10, 11]. В общей сложности для качественной и количественной оценки моделей рассмотрены данные более 1000 опытов, выполненных при испытании 40 характеристик кругов.

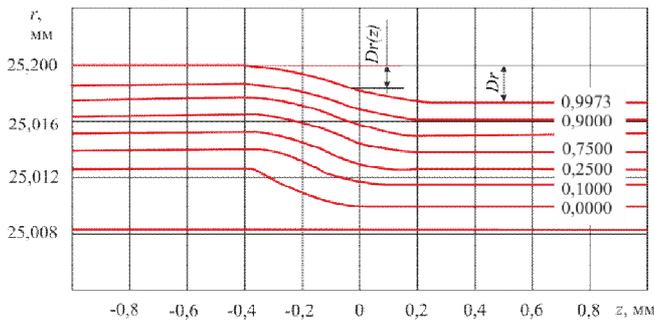


Рис. 8. Изменение уровней равной вероятности удаления материала в зоне контакта детали с кругом

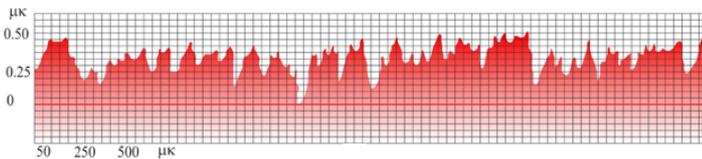
Проведенные эксперименты позволили вы-

полнить проверку адекватности формализованных моделей для широкого диапазона режимов резания и характеристик абразивного инструмента (табл. 1; рис. 9).

Пример практического использования полученных в работе зависимостей показан на рис. 10. Расчет и реализация выполнены для кругов на керамической связке для шлифования плунжеров топливного насоса из стали EN 1.3505 на станке 3У120А. При обработке кругами 63С F36 N10 V обеспечивается шероховатость поверхности $Ra = 0,02...0,04$ мкм, что подтверждается данными расчета и результатами измерений реального изделия.

1. Расчетные и экспериментальные значения показателей процесса шлифования образцов из стали EN 1.2108 кругами 1 300x40x75 63С F40 L 4 В

№ опыта	Режим шлифования				Показатели процесса шлифования			
	v_k , м/с	v_{ii} , м/с	v_x , м/с	S_y , мкм/ход	экспериментальные		расчетные	
					Δr , мм	Ra , мкм	Δr , мм	Ra , мкм
1	20	0,33	1,0	32	0,001942	0,22	0,001790	0,26
2		0,66		8	0,001349	0,19	0,001059	0,20
3	35	0,66	0,5	8	0,001513	0,18	0,001324	0,18
4		0,33		32	0,002635	0,20	0,002459	0,24
5		0,66	1,0	32	0,003266	0,20	0,002900	0,24
6		0,33		8	0,011872	0,11	0,001891	0,18
7	20	0,66	0,5	32	0,002471	0,22	0,002345	0,26
8		0,33		8	0,011878	0,135	0,001412	0,20



а)



б)

Рис. 9. Профилограммы поверхности образцов из закаленной стали EN 1.3505, обработанных кругами 63С F40 N 10 V на станке ХШ5-25М:

а – полученные расчётным методом; б – записанные с помощью профилографа-профилометра мод. 201

Выводы

1. Проходя зону контакта заготовки с кругом, зерно может срезать материал, если попадает на один из выступов шероховатости поверхности, или не срезать его, если попадет в одну из впадин шероховатости. При встрече зерна с выступом увеличивается доля удаленной части материала. Если зерно попадает во впадину, то материал не снимается, но вероятность его удаления потенциально увеличивается, так как повышается вероятность попадания на выступ последующих абразивных зерен.

Использование сменных неперетачиваемых многогранных режущих пластин из инстру-

ментального материала (СНП) в настоящее время считается наиболее выгодным с точки зрения уменьшения затрат времени на поднастройку и замену затупившегося инструмента [1].

По окончании периода стойкости державка инструмента не снимается с резцедержателя, а выполняется только замена режущей грани поворотом пластины, либо замена самой пластины. Выгода механического крепления СНП при процедуре, соответствующей потере общей стойкости грани или пластины, в целом очевидна.

Однако значительно большая доля затрат времени приходится на процедуры, соответствующие потере размерной стойкости инструмента, поскольку размерная стойкость, как

правило, в несколько раз меньше его общей стойкости.

При этом перепозиционирование пластины или ее замена сопровождаются внесением погрешности в настроечный размер инструмента. Это ограничивает возможности дальнейшей обработки без коррекции настроечного размера путем пробной обработки на станках с ручным управлением, подналадки на автоматизированных станках и линиях без ЧПУ и введения коррекции настроечного размера,

2. Съем материала единичными абразивными зернами в зоне соответствует при формализованном описании изменению вероятности удаления материала. До входа в зону контакта заготовки с кругом обрабатываемая поверхность, как правило, имеет определенный микрорельеф. Он сформирован либо на предшествующих операциях, либо в самом процессе шлифования и может отличаться от микрорельефа, который обеспечивается после очередного контакта поверхности с кругом. Если поверхность получена в результате воздействия инструмента, не имеющего регулярной геометрии, то вероятность удаления материала с учетом наличия исходной шероховатости определяется по зависимостям (2) и (12).

3. Полученные в работе распределения позволяют провести анализ влияния режима шлифования и параметров характеристики инструмента на длину единичных срезов.

4. При чистовых процессах шлифования длина единичных срезов обрабатываемого материала абразивными зернами не остается постоянной, а меняется в широких пределах. Число единичных срезов максимально при z несколько большем половины длины дуги контакта, и увеличивается с увеличением скорости круга и детали. Длина единичных срезов увеличивается с увеличением глубины резания и скорости детали.

5. Полученные в работе зависимости позволяют не только определить основные параметры процесса шлифования, но и проследить закономерности образования микрорельефа обработанной поверхности, построить профилограмму, которая может быть получена при выполнении операции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Современные** конкурентноспособные технологии абразивно-алмазной обработки заготовок / Ю.М. Зубарев, З.И. Кремень, Ю.М. Ермаков, Ю.С. Степанов // *Справочник. Инженерный журнал*. – Выпуск №5. – 2011. – С. 39–42.
2. **Novoselov Y.** Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutski, Y. Gutsalenko // *Journal Fiability & Durability Supplement no 1/ 2013*, Editura “Academica Brâncuși”, Târgu Jiu, P. 5–15.

3. **Новосёлов, Ю.К., Братан, С.М.** Моделирование процессов взаимодействия шлифовального круга и заготовки при чистовом шлифовании // *Вестник СевНТУ: Сб. науч. тр. Серия: Машиноприборостроение и транспорт. Вып.118.* – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. – С. 92–106.

4. **Новосёлов, Ю.К., Богуцкий, В.Б.** Износ абразивных зерен в круге при шлифовании заготовок // *Вестник СевНТУ: Сб. науч. тр. Серия: Машиноприборостроение и транспорт. Вып. 129.* – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – С. 23–29.

5. **Zhen Bing Hou.** On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process / Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri // *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, pp. 1579–1593.

6. **C. Aurich** Modeling and simulation of process: machine interaction in grinding/ C. Aurich, D. Biermann, H. Blum et al. // *Production Engineering*, vol. 3, no. 1, 2009, pp. 111–120.

7. **Hassan Abdel-Gawad El-Hofy.** Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes, Publisher: CRC Press, 2006, –562 p.

8. **Rogelio L. Hecker.** Predictive modeling of surface roughness in grinding./ Rogelio L. Hecker, Steven Y. Liang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 43, Issue 8, June 2003, P.755–761.

9. **W. Brian Rowe.** Principles of modern grinding technology. –Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK 2009. – 421 p.

10. **Новоселов, Ю.К.** Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Изд-во: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317 с.

11. **Братан, С.М.** Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования. Дис... д-ра техн. наук: 05.02.08. – Севастополь, 2006. – 339 с.

REFERENCES

1. Modern competitive technologies in abrasive-diamond processing of blanks / Yu.M. Zubarev, Z.I. Kremen, Yu.M. Yermakov, Yu.S. Stepanov // *Reference Book. Engineering Journal*" – Edition №5. – Moscow. – 2011. – pp. 39–42.

2. **Novoselov Y.** Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutski, Y. Gutsalenko // *Journal Fiability & Durability Supplement no 1/ 2013*, Editura “Academica Brâncuși”, Târgu Jiu, P. 5–15.

3. **Novosyolov, Yu.K., Bratan, S.M.** Simulation of interaction processes of grinding disk and blank at finishing grinding // *Bulletin of SevNTU: Proceedings of Series: Mechanical and Instrument Engineering and Transport*. Edition 118. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2011. – pp. 92–106.

4. **Novosyolov, Yu.K., Bogutsky, V.B.** Abrasive grain wear in disk when blank grinding // *Bulletin of SevNTU: Proceedings. Series: Mechanical and Instrument Engineering and Transport*. Edition 129. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2012. – pp. 23–29.

5. **Zhen Bing Hou.** On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process / Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri // *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, pp. 1579–1593.

6. **C. Aurich** Modeling and simulation of process: machine interaction in grinding/ C. Aurich, D. Biermann, H. Blum et al. // *Production Engineering*, vol. 3, no. 1, 2009, pp. 111–120.

7. **Hassan Abdel-Gawad El-Hofy.** Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes, Publisher: CRC Press, 2006, –562 p.

8. **Rogelio L. Hecker.** Predictive modeling of surface roughness in grinding./ Rogelio L. Hecker, Steven Y. Liang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 43, Issue 8, June 2003, P.755–761.

9. **W. Brian Rowe.** Principles of modern grinding technology. –Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK 2009. – 421 p.

10. **Novosyolov, Yu.K.** *Surface Shaping Dynamics During Abrasive Processing*. – Publishing House: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – pp. 317.

11. **Bratan, S.M.** *Technological Fundamentals for Assurance of Quality and Stability Increase in Efficient Finishing and Fine Grinding. Thesis for D.Eng. Degree: 05.02.08.* – Sevastopol, 2006. – pp. 339.

Рецензент д.т.н. Ю.М. Зубарев