

УДК 621.921

DOI 10.18698/0536-1044-2017-2-79-89

Динамическое моделирование распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании с использованием переходных вероятностей

В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко

Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., 42а

Dynamic Modeling of the Grain Peak Distribution on the Working Surface of Abrasive Tools when Grinding Using Transition Probabilities

V.A. Nosenko, E.V. Fedotov, M.V. Danilenko

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University, 404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a

@ e-mail: nosenko@volpi.ru, tn-fedotov@yandex.ru, danilenko_vpi@mail.ru

i Распределение вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента формируется правкой. При шлифовании в результате износа происходит изменение первоначального распределения. Износ вершин зерен рассмотрен как марковский процесс с дискретными временем и состоянием, а процесс формирования рабочей поверхности абразивного инструмента — как суперпозиция таких марковских процессов. Исследованы три вида изнашивания: истирание и скалывание вершины зерна, а также его вырывание из связки. С учетом силы резания, прочности зерна и связки определены вероятности видов изнашивания. Для каждого вида изнашивания получены математические модели переходных вероятностей перемещения вершин в новое положение после единичного акта взаимодействия с обрабатываемым материалом при каждом обороте шлифовального круга. Математическая модель представлена в матричном виде. Ее основными составляющими являются матрицы вероятности контакта вершин зерен с обрабатываемым материалом, вероятности видов изнашивания, переходные вероятности износа в результате истирания и скалывания. Рассчитано распределение вершин зерен в различные периоды работы абразивного инструмента.

Ключевые слова: шлифование металлов, абразивный инструмент, вершина зерна, распределение зерен, математическая модель, марковский процесс, виды изнашивания.

i The grain peak distribution on the working surface of abrasive tools is formed by trueing. During grinding, the initial distribution changes due to wear. The wear of grain peaks is regarded as a Markov's process with discrete time and condition; the formation of a working surface of an abrasive tool, is regarded as a superposition of Markov's processes. Three types of wear are investigated: attrition and chipping of the grain's peak, and grain pull-out from the cluster. The probability of wear types is determined based on the cutting force, grain and bond strength. The mathematical models of transition probabilities for

determining new position of the peaks, after a single act of interaction with the machined material at each turn of the grinding wheel, are determined. The mathematical model is presented in a matrix form. The main components of this model are matrices of probability of contact of the grain peaks with the machined material, probability of wear types, transition probabilities of wear due to attrition and chipping. The distribution of the grain peaks at different periods of grinding by abrasive tool is calculated.

Keywords: metal grinding, abrasive tools, grain peak, grain distribution, mathematical model, Markov's process, wear type.

Шлифовальный круг — это пористый композиционный материал, состоящий из зерен абразивного материала, скрепленных связкой. Твердость связки существенно меньше, чем у абразивного материала, поэтому допускают, что основную работу резания выполняют вершины абразивных зерен [1–3]. Исходя из такого допущения, рельеф рабочей поверхности шлифовального круга определяется геометрическими параметрами вершин зерен, их числом и распределением.

Первоначальный рельеф рабочей поверхности шлифовального круга формируется правой. При шлифовании вершины зерен изнашиваются, что приводит к изменению рельефа не только рабочей поверхности круга, но и обработанной поверхности, так как в основе формообразования лежит геометрическое копирование формы воспроизводящего инструмента. В связи с этим динамическое моделирование рабочей поверхности шлифовального круга относится к числу приоритетных задач теории абразивной обработки.

Цель работы — создание математической модели распределения зерен на рабочей поверхности абразивного круга с учетом их изнашивания при шлифовании в результате истирания, скалывания и вырывания.

Модели рабочей поверхности абразивного инструмента с учетом динамики процесса изнашивания рассмотрены в изданиях российских [3–11] и зарубежных [12–20] ученых. Несмотря на то что многие из них учитывают время обработки и различные виды изнашивания, математическое моделирование износа вершины зерна остается актуальной проблемой. Наиболее перспективным направлением совершенствования методики моделирования рабочей поверхности абразивного инструмента и процесса абразивной обработки в целом следует считать использование марковских процессов. Такой подход, впервые описанный в работе [1], получил дальнейшее развитие во многих научных трудах [21–27]. Рассматривая

изменение положения вершины зерна в дискретные моменты времени, износ можно считать реализацией марковского процесса.

Постановка задачи. Описание объекта моделирования. Пусть задана некоторая первоначальная функция радиального распределения вершин зерен от номинальной поверхности абразивного инструмента. При шлифовании первоначальное распределение вершин зерен в результате износа будет изменяться. Все разновидности изнашивания объединим в три группы: истирание вершины зерна, ее скалывание, а также вырывание зерна из связки.

По характеру формирования структуры рабочей поверхности круга в радиальном направлении разделим на три зоны (рис. 1). Зона контакта 1, начинающаяся от номинальной поверхности шлифовального круга, ограничена линией, проходящей через наибольший выступ шероховатости обрабатываемой поверхности. В этой зоне зерна, контактирующие с обрабатываемым материалом, подвергаются всем трем видам изнашивания.

В зоне 2 вершины зерен с обрабатываемым материалом не контактируют и, следовательно, не подвергаются никаким видам изнашивания. Изменение плотности распределения вершин в зоне 2 происходит в результате появления новых вершин, которые до скалывания контактировали с обрабатываемым материалом в зоне 1. Верхняя граница зоны 2 определяется максимально возможной удаленностью от номинальной поверхности круга новых вершин зерен после скалывания. В зоне 3 вершины зерен распределены согласно начальным условиям, возникшим после правки круга [1].

Разобьем каждую зону на элементарные слои объемом ΔV и высотой ΔR_K , равной радиальному износу круга за один некоторый K -й оборот. Примем, что на всей рабочей поверхности круга радиальный износ за один его оборот одинаков. Распределение зерен в каждом из слоев также будем считать одинаковым.

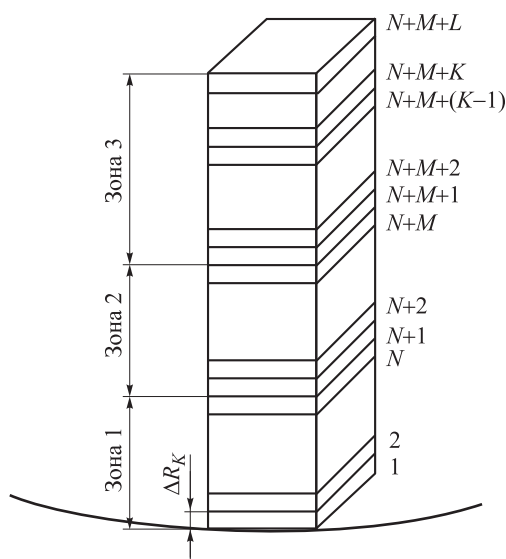


Рис. 1. Зоны формирования рабочей поверхности шлифовального круга

Пусть зоны 1 и 2 содержат соответственно N и M слоев. В зоне 3 выделим L слоев, соответствующих заданному числу оборотов круга. Поскольку ΔR_K намного меньше, чем высота параллелепипеда, будем считать, что в пределах каждого слоя вершины зерен распределены равномерно.

В соответствии с принятыми условиями первый слой зоны 1 за один оборот круга будет изнашиваться полностью. Тогда вершины зерен, изнашиваемые истиранием, из первого слоя переместятся во второй. Если произошло скалывание вершины, то новая вершина может появиться в любом из слоев — от второго до — $N + M$ второго. В результате вырывания вершина исчезает с поверхности круга.

Начиная со второго до предпоследнего слоя ($N - 1$) зоны 1, вершины зерен, изнашиваемые истиранием, могут остаться в рассматриваемом слое или переместиться в вышележащий. Вершины зерен, изнашиваемые истиранием в слое N , должны остаться в нем, так как выше этого слоя зерно с обрабатываемым материалом не контактирует.

Вершины, расположенные в слоях от 1 до N , в результате скалывания образуют новую вершину, которая может остаться в рассматриваемом слое, кроме первого слоя, или появиться в любом из вышележащих слоев зон 1 и 2.

В общем случае зерно в начальный период контакта с обрабатываемым материалом может изнашиваться истиранием и по длине дуги контакта под действием силы резания ско-

лоться на некоторое значение или покинуть рабочую поверхность круга в результате вырывания из связки, т. е. при движении вершины зерна по длине дуги контакта может происходить изнашивание всех трех видов. Считаем, что если после истирания возникло скалывание вершины зерна, то оно изнашивается скалыванием, а если после истирания или скалывания по длине дуги контакта произошло вырывание зерна, то его изнашивание вызвано вырыванием из связки. Исходя из этого принимаем, что каждое зерно в результате взаимодействия подвергается только одному виду изнашивания.

Зерно имеет несколько вершин. Будем считать, что в контакт с обрабатываемым материалом оно вступает только одной из наиболее выступающих вершин. В результате скалывания вместо одной вершины могут образоваться несколько. Но, как и в предыдущем случае, принимаем, что в контакт с обрабатываемым материалом зерно вступает только одной из наиболее выступающих вершин, которая и будет определять значение износа скалыванием.

Очевидно, что изнашиванию должны подвергаться только зерна, контактирующие с обрабатываемым материалом. Тем не менее возможно вырывание сразу группы зерен, хотя только одно из них контактировало с обрабатываемым материалом. Изнашивание скалыванием также может произойти в результате контакта с вырванным зерном. Допускаем, что вероятности таких видов изнашивания весьма малы. Тогда различным видам изнашивания подвергаются только контактирующие с обрабатываемым материалом вершины зерен.

Проведенный анализ показал, что формирование структуры рабочей поверхности абразивного инструмента включает в себя два одновременно протекающих процесса: изнашивание вершин зерен, контактирующих с обрабатываемым материалом; изменение положения всех вершин зерен на значение износа круга за один оборот в результате упругости системы. Примем, что эти процессы протекают поэтапно. Первым этапом является изменение положения вершин контактирующих зерен в результате их износа, вторым — смещение координаты вершин всех зерен на ΔR_K .

Математическая модель. Представим первоначальную плотность распределения вершин зе-

рен по слоям рабочей поверхности круга в виде вектора-строки

$$\mathbf{n}_0 = \mathbf{e}[n(0) \dots n_{N+M+L}(0)], \quad (1)$$

где \mathbf{e} — единичный вектор; $[n(0) \dots n_{N+M+L}(0)]$ — матрица-строка, определяющая распределение вершин зерен в слоях зон 1–3.

При шлифовании на некотором K -м обороте круга через контакт проходят вершины зерен, которые были сформированы в рассматриваемом слое на предшествующем $(K - 1)$ -м обороте. Плотность распределения вершин зерен по слоям рабочей поверхности абразивного инструмента в зонах 1 и 2 после $(K - 1)$ -го оборота круга по аналогии с выражением (1) также представим в виде вектора-строки, разделенно на два блока:

$$\mathbf{n}(K - 1) = \mathbf{e}[\mathbf{n}_1(K - 1) \quad \mathbf{n}_2(K - 1)],$$

где $\mathbf{n}_1(K - 1) = [n_1(K - 1) \dots n_N(K - 1)]$ и $\mathbf{n}_2(K - 1) = [n_{N+1}(K - 1) \dots n_{N+M}(K - 1)]$ — векторы-строки распределения вершин зерен в зонах 1 и 2.

Вследствие возможного перекрытия вершин, проходящих через зону 1, с обрабатываемым материалом контактирует только часть из них:

$$\mathbf{n}_{\text{con}}(K) = \mathbf{n}_1(K - 1)\mathbf{P}_{\text{con}}(K). \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{P}_{\text{con}}(K)$ — диагональная матрица (размером $N \times N$) вероятности контакта вершин зерен с обрабатываемым материалом на K -м обороте круга, $\mathbf{P}_{\text{con}}(K) = [p_{ij}(K)]$, где $p_{ij}(K) = 0$ при $i \neq j$.

Количество вершин зерен, подверженных в i -м слое на K -м обороте круга различным видам изнашивания, определяется вероятностями вырывания зерен из связки $A_i(K)$, скалывания $B_i(K)$ и истирания $C_i(K)$ их вершин, составляющих, согласно начальным условиям, полную группу:

$$A_i(K) + B_i(K) + C_i(K) = 1. \quad (3)$$

Матрицы вероятностей видов изнашивания по аналогии с матрицей вероятности контакта (формула (2)), являются диагональными, имеют размер $N \times N$:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(K) &= [A_{ij}(K)], \quad A_{ij}(K) = 0 \text{ при } i \neq j; \\ \mathbf{B}(K) &= [B_{ij}(K)], \quad B_{ij}(K) = 0 \text{ при } i \neq j; \\ \mathbf{C}(K) &= [C_{ij}(K)], \quad C_{ij}(K) = 0 \text{ при } i \neq j. \end{aligned} \quad (4)$$

Умножая количество зерен, контактирующих с обрабатываемым материалом (формула (2)), на каждое из выражений (4), получаем

количество вершин зерен, изнашиваемых вырыванием $\mathbf{n}_A(K)$, скалыванием $\mathbf{n}_B(K)$ и истиранием $\mathbf{n}_C(K)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_A(K) &= \mathbf{n}_1(K - 1)\mathbf{P}_{\text{con}}(K)\mathbf{A}(K); \\ \mathbf{n}_B(K) &= \mathbf{n}_1(K - 1)\mathbf{P}_{\text{con}}(K)\mathbf{B}(K); \\ \mathbf{n}_C(K) &= \mathbf{n}_1(K - 1)\mathbf{P}_{\text{con}}(K)\mathbf{C}(K). \end{aligned} \quad (5)$$

В результате изнашивания вершина зерна изменяет свое первоначальное положение. Для определения ее нового положения будем использовать переходные вероятности.

Введем понятие состояния вершин зерен. Считаем, что вершины находятся в состоянии i , если они расположены в слое объемом ΔV_i , где i — номер слоя ($i = 1, \dots, N$), в котором вершины находятся до контакта с обрабатываемым материалом. Контакт зерен с обрабатываемым материалом будем рассматривать как испытание, в результате которого состояние вершин изменяется, и они переходят в некоторое новое состояние j . Под j -м состоянием будем понимать номер нового слоя, в который вершины попадают в результате контакта с обрабатываемым материалом.

В соответствии с принятыми начальными условиями при контакте с обрабатываемым материалом вершина зерна подвергается только одному виду изнашивания, под действием которого изменяет свое первоначальное положение и занимает только одно новое положение. Таким образом, в каждый момент времени новая вершина может находиться только в одном из множества j -состояний. В теории вероятностей последовательность испытаний, в каждом из которых система принимает только одно из множества состояний полной группы, называется цепью Маркова.

Согласно проведенному анализу и определению, изнашивание единичных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга можно рассматривать как марковский процесс с дискретными временем и состоянием, а процесс шлифования — как суперпозицию таких марковских процессов.

Исследуем особенности матриц переходных вероятностей для каждого вида изнашивания.

При вырывании из связки зерно покидает рабочую поверхность круга, поэтому матрица переходных вероятностей появления нового состояния вершин в результате вырывания зерен из связки превращается в нулевую матрицу.

Матрица переходных вероятностей изнашивания истиранием представляет собой квадратную матрицу размером $N \times N$, в строках и столбцах которой (кроме первого столбца и последней строки) имеются только два отличных от нуля элемента:

$$P_C(K) = [c_{ij}(K)]; \quad (6)$$

$$c_{ij}(K) = 0 \text{ при } i = j = 1, i = j = N, j \neq i, i + 1;$$

$$c_{ij}(K) = 1 \text{ при } i = 1 \text{ и } j = 2, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N.$$

Умножив количество вершин зерен, изнашивающихся истиранием (формула (5)), на матрицу переходных вероятностей (формула (6)), получаем распределение вершин зерен, сформированное на K -м обороте круга в зоне 1 в результате износа истиранием:

$$\Delta n_C(K) = n1(K-1)P_{con}(K)C(K)P_C(K). \quad (7)$$

Чтобы определить общее количество вершин в i -м слое зоны 1 без учета новых вершин зерен, образовавшихся в результате износа скалыванием, необходимо учесть вершины, не контактирующие с металлом и оставшиеся в слоях зоны 1:

$$\Delta n1(K) = n1(K-1)P_1(K). \quad (8)$$

Здесь $P_1(K)$ — матрица вероятности отсутствия контакта вершин зерен с обрабатываемым материалом, $P_1(K) = [1 - P_{ij}(K)]$, где $P_{ij}(K) = 0$ при $i \neq j$.

Суммируя выражения (7) и (8), получаем вектор-строку распределения вершин зерен на K -м обороте круга в зоне 1 и без вершин зерен, образовавшихся в результате скалывания:

$$n1(K) = \Delta n1(K) + \Delta n_C(K). \quad (9)$$

Вершина зерна, образовавшаяся в результате изнашивания скалыванием, в общем случае может занять новое положение в любом слое зон 1 и 2 от $j = i$ до $j = N + M$, но не может появиться в нижележащих слоях.

Матрица переходных вероятностей, определяющая изменение положения вершины зерен в результате изнашивания скалыванием, будет иметь прямоугольную форму и размер $N \times (N+M)$:

$$P_B(K) = [b_{ij}(K)]; \quad (10)$$

$$b_{ij}(K) = 0 \text{ при } j < i, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N + M.$$

Количество всех вершин зерен, перешедших в новое состояние (j -й слой) в пределах зон 1 и 2 вследствие скалывания в нижележащих

i -х слоях зоны 1 при $i < j$, определяется произведением вектора распределения числа зерен, изнашивающихся скалыванием $n_B(K)$ (формула (5)), на переходную вероятность (формула (10)):

$$\Delta n_B(K) = n1(K-1)P_{con}(K)B(K)P_B(K). \quad (11)$$

Распределение вершин зерен в зонах 1 и 2 получаем суммированием выражений (9) и (11) с учетом вершин, сформированных в зоне 2 на предыдущем $(K-1)$ -м обороте круга:

$$n(K) = [n1(K) \ n2(K-1)] + \Delta n_B(K). \quad (12)$$

Для описания второго этапа, в результате которого происходит смещение координат всех вершин зерен в нижележащий слой, создадим матрицу перехода Y размером $(N+M) \times (N+M)$:

$$Y = [Y_{ij}]; \quad Y_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } j \neq i-1; \\ 1 & \text{при } j = i+1, \end{cases} \quad (13)$$

$$1 \leq i \leq N + M, 1 \leq j \leq N + M.$$

После умножения $n(K)$ (формула (12)) на матрицу перехода Y в результате смещения всех координат вектора с j -го места на $(j-1)$ -е последняя координата становится равной нулю. На ее место после первого оборота круга необходимо поставить из вектора исходного распределения вершин зерен (формула (1)) координату $(N + M + 1)$, после второго — $(N + M + 2)$, а после K -го — $(N + M + K)$. Такую подстановку можно осуществить, если к полученному вектору (формула (13)) добавить произведение соответствующей координаты (скаляра) вектора исходного распределения вершин $n_{0(N+M+K)}$ и единичного вектора e_{N+M} :

$$n(K) = \{e[n1(K) \ n2(K-1)] + \Delta n_B(K)\} Y + n_{0(N+M+K)} e_{N+M}.$$

Методика расчетов, результаты и обсуждение.

Расчет вероятности контакта P_K проведем по математической модели [10]. Вырывание зерна из связки или скалывание его вершины происходит под действием силы резания. Поэтому для вычисления соответствующих вероятностей необходимо знать плотность распределения силы, действующей на вершину зерна, в результате которой происходят скалывание вершины и вырывание зерна из связки. Сила скалывания зависит от прочности абразивного зерна, а сила вырывания зерна из связки — от прочности его закрепления в связке.

Для определения вероятностей скалывания вершины зерна и вырывания зерна из связки круга [23] получены следующие формулы:

$$\begin{aligned} A_i(K) &= P_i(\alpha) \left[1 - \frac{P_i(\alpha)P_i(\beta)}{P_i(\alpha) + P_i(\beta)} \right]; \\ B_i(K) &= P_i(\beta) \left[1 - \frac{P_i(\alpha)P_i(\beta)}{P_i(\alpha) + P_i(\beta)} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

где $P_i(\alpha)$ и $P_i(\beta)$ — вероятности вырывания зерен из связки при бесконечной прочности абразивного материала, а также скалывания вершин зерен при бесконечной прочности связки, определяемые в зависимости от результирующей силы резания $R_{зi}$, действующей на вершину зерна в i -м слое.

Вероятность изнашивания истиранием находим из выражения (3) с использованием формулы (14):

$$C_i = 1 - P_i(\alpha) - P_i(\beta) + P_i(\alpha)P_i(\beta). \quad (15)$$

Переходные вероятности износа истиранием (формула (6)) определяем по следующим зависимостям [3]:

$$c_{ij} = \frac{\Delta h_{ci}}{\Delta R_K} \text{ при } j = i + 1; \quad c_{ij} = 1 - \frac{\Delta h_{ci}}{\Delta R_K} \text{ при } j = i,$$

где Δh_{ci} — средний износ истиранием в i -м слое.

Допустив, что средний износ истиранием пропорционален фактической длине пути резания зерна, имеем

$$\Delta h_{ci} = IL_{\phi} = I \int_{L_K} P_{\text{con}} dl,$$

где I — интенсивность изнашивания истиранием; L_K — длина дуги движения вершины зерна в зоне контакта; L_{ϕ} — фактическая длина дуги контакта.

Результаты экспериментальных исследований показали, что плотность распределения износа скалыванием можно описать законом Вейбулла [25], параметры которого зависят от уровня, на котором произошло скалывание зерна. Переходная вероятность при скалывании

$$b_{ij} = F(u_{vj}) - F(u_{vj-1}),$$

где $F(u_{vj})$ и $F(u_{vj-1})$ — функции распределения Вейбулла для верхней и нижней границ j -го слоя; u_{vj} и u_{vj-1} — координаты верхней и нижней границ j -го слоя, в который переходят вершины, сколовшиеся в i -м слое, $u_{vj} = j\Delta R_K$, $u_{vj-1} = (j-1)\Delta R_K$.

На рис. 2 приведены зависимости рассчитанных по формулам (14) и (15) вероятностей изнашивания от силы резания R_3 , действующей на вершину зерна.

Если нагрузка на вершины зерен при шлифовании кругом твердостью K (рис. 2, а) не превышает 4 Н, то основным видом изнашивания является истирание. Вероятности вырывания зерна из связки A и скалывания вершины B в сумме не превышают 0,01. С увеличением нагрузки вероятность истирания C начинает существенно снижаться, а вероятность вырывания A — возрастать. При силе резания $R_3 = 8$ Н вероятность истирания уменьшается до 0,79, вероятность вырывания увеличивается до 0,20, а вероятность скалывания по-прежнему остается весьма незначительной и составляет около 0,01. При $R_3 = 10$ Н вероятности A и C почти одинаковы и равны примерно 0,5. Вероятность скалывания мала и не превышает 0,02. С дальнейшим увеличением силы резания вероятность истирания продолжает снижаться и при $R_3 \approx 13,5$ Н становится равной вероятности скалывания ($\sim 0,07$). Вероятность A приближается к своему максимальному значению ($\sim 0,87$).

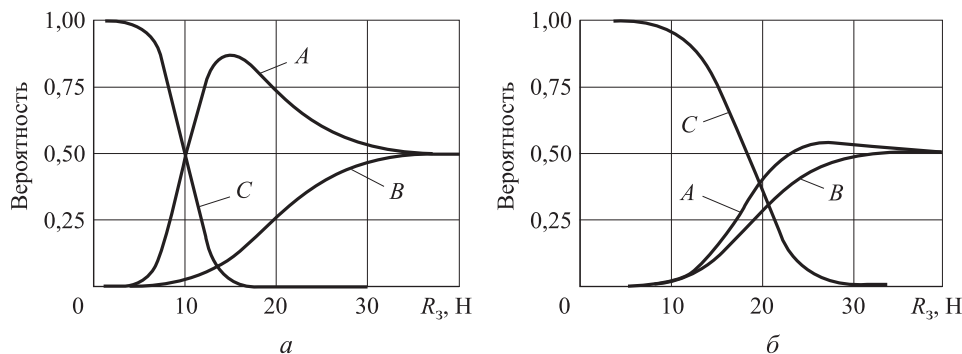


Рис. 2. Зависимости вероятностей изнашивания вырыванием A , скалыванием B и истиранием C от результирующей силы резания R_3 при шлифовании кругами твердостью K (а) и N (б)

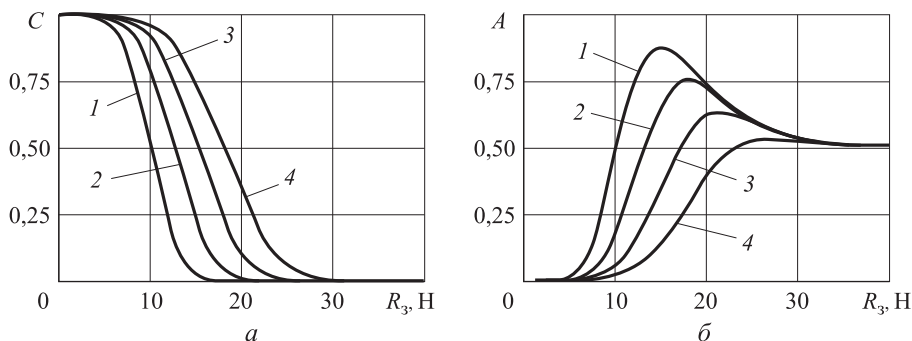


Рис. 3. Зависимости вероятностей изнашивания истиранием C (а) и вырыванием A (б) от силы резания R_3 при шлифовании кругами твердостью K (1), L (2), M (3) и N (4)

При $R_3 > 17$ Н изнашивание истиранием обязательно сопровождается скалыванием или вырыванием зерен. После того как вероятность истирания снижается настолько, что это событие можно считать незначимым, основными видами изнашивания остаются вырывание зерна и скалывание вершины.

С ростом R_3 вероятность A постепенно снижается, а вероятность B повышается, приближаясь к 0,5. С увеличением твердости круга (рис. 2, б) вероятность истирания возрастает, а вырывания — падает. Одинаковые значения вероятностей истирания и вырывания получены при $R_3 \approx 19$ Н, а вероятностей скалывания и истирания — при $R_3 \approx 21$ Н. Вероятность истирания можно считать незначимой при $R_3 > 30$ Н. Сближение вероятностей скалывания и вырывания зерна происходит при $R_3 \approx 36$ Н.

При увеличении твердости круга вероятность истирания сдвигается в сторону больших нагрузок (рис. 3, а). Причем степень влияния твердости на изменение нагрузки приблизительно одинакова во всем диапазоне вероятностей. Поскольку вероятность скалывания не зависит от твердости круга, общее увеличение вероятности истирания компенсируется таким же снижением вероятности вырывания (рис. 3, б). С ростом твердости круга максимум функции $A(R_3)$ постепенно снижается, приближаясь к 0,5, и сдвигается с сторону более высоких значений силы резания.

Проверка адекватности разработанной модели выполнена для условий плоского шлифования стали 45 (HRC 52) кругом с характеристикой 25A F60 L 6 B. Режим обработки: скорость шлифования — 28 м/с; глубина шлифования — 0,005 мм/ход; скорость подачи стола — 9 м/мин. За период шлифования круг сделал 1 500 оборотов.

Плотность распределения вершин зерен по глубине рабочей поверхности шлифовального круга (рис. 4) к 30-му обороту круга несколько снижается, затем возрастает и достигает максимума приблизительно на 900-м обороте. При дальнейшем увеличении числа оборотов наблюдается тенденция к снижению плотности вершин зерен.

Анализ результатов экспериментальных исследований, полученных измерением плотности распределения вершин зерен на профилографе-профилометре «Сейтроник ПШ8-3», показал, что максимальное отклонение теоретических данных от экспериментальных не превышает 15 %.

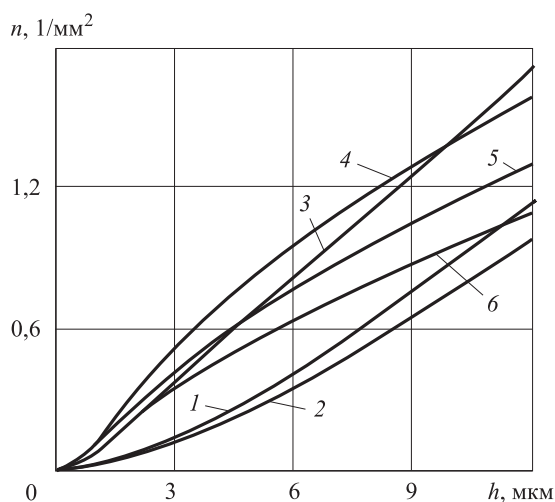


Рис. 4. Зависимость плотности распределения вершин зерен n от глубины рабочей поверхности h круга в различные периоды шлифования (обороты круга):
1 — исходное состояние; 2 — 30 об.; 3 — 300 об.;
4 — 900 об.; 5 — 1 200 об.; 6 — 1 500 об.

Выводы

1. На основе теории марковских случайных процессов разработана математическая модель

распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента, которая учитывает изнашивание вершин, вызванное их скалыванием и истиранием, а также вырывание зерна из связки круга.

2. Анализ результатов, полученных при шлифовании стали 45 кругом из электрокорунда белого на бакелитовой связке, показал удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Литература

- [1] Носенко В.А. *Шлифование адгезионно-активных металлов*. Москва, Машиностроение, 2000. 262 с.
- [2] Салов П.М., Салов Д.П. *Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов*. Чебоксары, Чебоксарский политехнический ин-т (филиал) МГОУ, 2010. 332 с.
- [3] Новоселов Ю.К. *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке*. Севастополь, Изд-во СевНТУ, 2012. 304 с.
- [4] Белкин Е.А. Стохастическая модель процесса абразивной обработки. *Справочник. Инженерный журнал*, 2004, № 3, с. 20–25.
- [5] Волков Д.И., Коряжкин А.А. Стохастическая модель износа абразивной ленты при шлифовании лопаток компрессора ГТД. *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева*, 2011, № 2, с. 132–139.
- [6] Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. *3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования*. Харьков, НТУ ХПИ, 2006. 364 с.
- [7] Горленко О.А., Бишутин С.Г. Модель рабочей поверхности абразивного инструмента. *СТИН*, 1999, № 2, с. 25–28.
- [8] Гисметгулин А.Р., Сидоренко О.М. Моделирование формообразования шероховатости поверхности на операции плоского шлифования. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, № 4–3, с. 850–855.
- [9] Дьяконов А.А., Ардашев Д.В., Лепихов А.В. Имитационное моделирование процессов шлифования на основе применения высокопроизводительных кластеров и технологий параллельных вычислительных процессов. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2011, № 2–2(286), с. 29–34.
- [10] Малышев В.И., Попов А.Н. Имитационная модель процесса шлифования с вибрационной правкой шлифовального круга. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2010, т. 12, № 4, с. 923–925.
- [11] Кошин А.А., Шипулин Л.В. Стохастические модели температурных и силовых явлений, происходящих при шлифовании, и их реализация средствами параллельных вычислений. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Математическое моделирование и программирование*, 2012, № 18(277), с. 20–31.
- [12] Doman D.A., Warkentin A., Bauer R. A. Survey of recent grinding wheel topography models. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, pp. 343–352.
- [13] Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 74, pp. 29–40.
- [14] Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E., Heinzl C., Hoffmeister H.-W., Klocke F., Peters J., Rentsch R., Stephenson D.J., Uhlmann E., Weinert K., Wittmann M. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2006, vol. 55(2), pp. 667–696.
- [15] Torrance A.A., Badger J.A. The relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40(12), pp. 1787–1811.
- [16] Nadolny K., Plichta J., Bałasz B. Application of computer modeling and simulation for designing of grinding wheels with zone-diversified structure. *Management and Production Engineering Review*, 2010, vol. 1(4), no. 12, pp. 38–45.
- [17] Nguyen T.A., Butler D.L. Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1321–1328.

- [18] Stepien P.A Probabilistic model of the grinding process. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, vol. 33, is. 10, pp. 3863–3884.
- [19] Aurich J.C., Kirsch B. Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2012, vol. 5, pp. 164–174.
- [20] Marinescu I.D., Rowe B., Dimitrov B., Ohmori H. *Tribology of abrasive machining processes*. William Andrew Publishing, 2012. 600 p.
- [21] Носенко В.А., Федотов Е.В., Даниленко М.В. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием марковских случайных процессов. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2015, № 2–1(33), с. 101–106.
- [22] Носенко В.А., Федотов Е.В., Савин А.И. Вероятностная модель распределения вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга. *СТИН*, 2007, № 7, с. 12–20.
- [23] Носенко В.А., Федотов Е.В. Теоретико-вероятностная модель формирования рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании. *Инструмент и технологии*, 2003, № 15–16, с. 58–61.
- [24] Носенко В.А., Федотов Е.В., Носенко С.В., Даниленко М.В. Вероятности разнovidностей изнашивания зерен абразивного инструмента при шлифовании. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2009, № 3, с. 63–71.
- [25] Носенко В.А., Федотов Е.В., Даниленко М.В. Определение износа шлифовальных зерен скалыванием и закона его распределения. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2008, № 8, с. 43–48.
- [26] Носенко В.А., Федотов Е.В., Даниленко М.В. Математическое моделирование износа скалыванием с использованием марковских случайных процессов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение*, 2015, т. 15, № 2, с. 20–31.
- [27] Носенко В.А., Федотов Е.В., Даниленко М.В. Использование цепей Маркова при моделировании износа абразивного инструмента. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2015, № 1(156), с. 30–32.

References

- [1] Nosenko V.A. *Shlifovanie adgezionno-aktivnykh metallov* [Grinding adhesively-active metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 262 p.
- [2] Salov P.M., Salov D.P. *Ratsional'noe ispol'zovanie rabochei poverkhnosti abrazivnykh krugov* [Rational use of the working surface of the abrasive wheels]. Cheboksary, Cheboksarskii politekhnicheskii in-t (filial) MGOU publ., 2010. 332 p.
- [3] Novoselov Iu.K. *Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke* [Trends shaping surfaces when sanding]. Sevastopol', SevNTU publ., 2012. 304 p.
- [4] Belkin E.A. Stokhasticheskaia model' protsessa abrazivnoi obrabotki [A stochastic model of the abrasion process]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering journal]. 2004, no. 3, pp. 20–25.
- [5] Volkov D.I., Koriazhkin A.A. Stokhasticheskaia model' iznosa abrazivnoi lenty pri shlifovanii lopatok kompressora GTD [Stochastic model of abrasive belt wear during grinding blades of GTE compressor]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva* [Bulletin of Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov]. 2011, no. 2, pp. 132–139.
- [6] Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A. *3D modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia* [3D modeling of diamond abrasive tools and grinding processes]. Khar'kov, NTU KhPI publ., 2006. 364 p.
- [7] Gorlenko O.A., Bishutin S.G. Model' rabochei poverkhnosti abrazivnogo instrumenta [Model the working surface of an abrasive tool]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 1999, no. 2, pp. 25–28.
- [8] Gismetulin A.R., Sidorenko O.M. Modelirovanie formoobrazovaniia sherokhovatosti poverkhnosti na operatsii ploskogo shlifovaniia [Simulation of forming operations surface roughness on surface grinding]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akade-*

- mii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2012, vol. 14, no. 4–3, pp. 850–855.
- [9] D'iakonov A.A., Ardashev D.V., Lepikhov A.V. Imitatsionnoe modelirovanie protsessov shlifovaniia na osnove primeneniia vysokoproizvoditel'nykh klasterov i tekhnologii paralel'nykh vychislitel'nykh protsessov [Imitating modelling of processes of grinding on the basis of application high-efficiency clusters and technologies parallel computing processes]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. 2011, no. 2–2(286), pp. 29–34.
- [10] Malyshev V.I., Popov A.N. Imitatsionnaia model' protsessa shlifovaniia s vibratsionnoi pravkoi shlifoval'nogo kruga [Simulation model polished surfaces]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2010, vol. 12, no. 4, pp. 923–925.
- [11] Koshin A.A., Shipulin L.V. Stokhasticheskie modeli temperaturnykh i silovykh iavlenii, proiskhodiashchikh pri shlifovanii, i ikh realizatsiia sredstvami paralel'nykh vychislenii [Temperature and force stochastic models in grinding processes and implementation of them by parallel computing]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniie* [Bulletin of SUSU, Series Mathematical Modelling, Programming and Computer Software]. 2012, no. 18(277), pp. 20–31.
- [12] Doman D.A., Warkentin A., Bauer R. A. Survey of recent grinding wheel topography models. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, pp. 343–352.
- [13] Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 74, pp. 29–40.
- [14] Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E., Heinzl C., Hoffmeister H.-W., Klocke F., Peters J., Rentsch R., Stephenson D.J., Uhlmann E., Weinert K., Wittmann M. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2006, vol. 55(2), pp. 667–696.
- [15] Torrance A.A., Badger J.A. The relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40(12), pp. 1787–1811.
- [16] Nadolny K., Plichta J., Bałasz B. Application of computer modeling and simulation for designing of grinding wheels with zone-diversified structure. *Management and Production Engineering Review*, 2010, no. 12, vol. 1(4), pp. 38–45.
- [17] Nguyen T.A., Butler D.L. Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1321–1328.
- [18] Stepien P.A. Probabilistic model of the grinding process. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, vol. 33, no. 10, pp. 3863–3884.
- [19] Aurich J.C., Kirsch B. Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2012, vol. 5, pp. 164–174.
- [20] Marinescu I.D., Rowe B., Dimitrov B., Ohmori H. *Tribology of abrasive machining processes*. William Andrew Publishing, 2012. 600 p.
- [21] Nosenko V.A., Fedotov E.V., Danilenko M.V. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniia vershin zeren pri shlifovanii v rezul'tate razlichnykh vidov iznashivaniia s ispol'zovaniem Markovskikh sluchainykh protsessov [Mathematical simulation of distribution of abrasive grains at grinding in a result of various types of wear by using Markov processes]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International research journal]. 2015, no. 2–1(33), pp. 101–106.
- [22] Nosenko V.A., Fedotov E.V., Savin A.I. Veroiatnostnaia model' raspredeleniia vershin zeren na rabochei poverkhnosti shlifoval'nogo kruga [Probability distribution model vertices grains on the working surface of the grinding wheel]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2007, no. 7, pp. 12–20.
- [23] Nosenko V.A., Fedotov E.V. Teoretiko-veroiatnostnaia model' formirovaniia rabochei poverkhnosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii [Theoretical and probabilistic model of the working surface of an abrasive tool for grinding]. *Instrument i tekhnologii* [Tools and technology]. 2003, no. 15–16, pp. 58–61.

- [24] Nosenko V.A., Fedotov E.V., Nosenko S.V., Danilenko M.V. Probabilities of abrasive tool grain wearing during grinding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, vol. 38, no. 3, pp. 270–276.
- [25] Nosenko V.A., Fedotov E.V., Danilenko M.V. Opredelenie iznosa shlifoval'nykh zeren skalyvaniem i zakona ego raspredeleniia [The estimation of wear of abrasive griffts by spalling under grinding and law of its distribution]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhaniz-makh* [Friction&Lubrication in Machines and Mechanisms]. 2008, no. 8, pp. 43–48.
- [26] Nosenko V.A., Fedotov E.V., Danilenko M.V. Matematicheskoe modelirovanie iznosa skalyvaniem s ispol'zovaniem Markovskikh sluchainykh protsessov [Mathematical simulation of wear grains chipping using Markov processes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of SUSU, Series Mathematical Modeling, Programming and Computer Software]. 2015, vol. 15, no. 2, pp. 20–31.
- [27] Nosenko V.A., Fedotov E.V., Danilenko M.V. Ispol'zovanie tsepei Markova pri modelirovanii iznosa abrazivnogo instrumenta [Using a Markov chain in simulation of abrasive wear of the tool]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestia VSTU]. 2015, no. 1(156), pp. 30–32.

Статья поступила в редакцию 03.10.2016

Информация об авторах

НОСЕНКО Владимир Андреевич (Волжский) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., 42а, e-mail: nosenko@volpi.ru).

ФЕДОТОВ Евгений Владимирович (Волжский) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., 42а, e-mail: tn-fedotov@yandex.ru).

ДАНИЛЕНКО Марина Владимировна (Волжский) — старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., 42а, e-mail: danilenko_vpi@mail.ru).

Information about the authors

NOSENKO Vladimir Andreevich (Volzhsky) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: nosenko@volpi.ru).

FEDOTOV Evgeniy Vladimirovich (Volzhsky) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: tn-fedotov@yandex.ru).

DANILENKO Marina Vladimirovna (Volzhsky) — Senior Lecturer, Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: danilenko_vpi@mail.ru).