

С.М. Братан, д.т.н., проф.
Ю.К. Новоселов, д.т.н., проф.
Н.Н. Столяров, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Статья посвящена разработке зависимостей, позволяющих прогнозировать изменения числа и распределения зерен по глубине инструмента за период его стойкости. Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке адекватности предложенных моделей.

Ключевые слова: период стойкости, оценка адекватности.

Постановка проблемы. Рабочая поверхность абразивного инструмента при системном анализе может рассматриваться как совокупность базовых участков, объединенных в единую конструкцию. Ее моделирование при этом сводится к определению параметров состояния базовых участков и формы инструмента.

Описание базового участка рабочей поверхности абразивного инструмента предусматривает определение геометрических размеров, числа, распределения режущих кромок. Существующие методики позволяют оценивать эти параметры по характеристике круга и режиму его правки. Экспериментальные исследования свидетельствуют о значительном изменении формы, числа, распределения кромок за период стойкости инструмента [1].

Изложение основного материала. Изменение формы режущих кромок связано с их износом и разрушением. Выполненными ранее исследованиями установлено, что в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, в процессе работы инструмента увеличивается радиус закругления при вершине зерна, в плоскости – параллельной на вершине появляется площадка износа.

На основании вышеизложенного целью данной статьи является разработка зависимостей позволяющих прогнозировать изменения числа и распределения зерен по глубине инструмента за период его стойкости.

Текущий радиус-вектор $R_z(\varphi, \tau)$ точек контура зерна при отсутствии микросколов вычисляется по его исходному значению $R_z(\varphi, 0)$ и величине износа $h_z(\varphi, \tau)$:

$$R_3(\varphi, \tau) = R_3(\varphi, 0) - h_3(\varphi, \tau). \quad (1)$$

Исходный радиус-вектор, по данным А.В. Королева [2], является случайной функцией полярного угла φ :

$$R_3(\varphi, 0) = r_3 + \sum_{k=2}^p (x_k \sin \omega_k \varphi + y_k \cos \omega_k \varphi), \quad (2)$$

где r_3 – радиус средней окружности профиля, определяемый как среднее значение функции $R_3(\varphi, 0)$; x_k и y_k – случайные некоррелированные амплитуды, соответствующие k -ой гармонике и имеющие равные дисперсии; ω_k – произвольно выбранная частота.

Элементарное приращение величины износа в направлении полярного радиуса при движении вершины зерна в зоне контакта заготовки с инструментом может быть принято пропорциональным относительному износу h_0 и приращению длины пути резания L_p :

$$dh_3(\varphi, \tau) = h_0 dL_p = h_0 (v_k \pm v_u) P_k(\varphi, \tau) d\tau, \quad (3)$$

где $P_k(\varphi, \tau)$ – вероятность контакта точки контура с материалом заготовки.

Вершина абразивного зерна может рассматриваться в общем его профиле как один из выбросов случайного поля. Текущий радиус закругления при вершине зерна $\rho_3(\tau)$, согласно выводам работы [8], может быть вычислен по зависимости:

$$\rho_3(\tau) = \frac{[R_3^2(\varphi, \tau) + R_3'^2(\varphi, \tau)]^{3/2}}{R_3^2(\varphi, \tau) + 2R_3'^2(\varphi, \tau) - R_3(\varphi, \tau)R_3''(\varphi, \tau)}. \quad (4)$$

При моделировании вершины зерна параболоидом вращения, зависимость (3), профиль изношенного зерна в плоскости перпендикулярной вектору скорости резания также может быть представлен в виде параболоида. Это утверждение подтверждено экспериментальными и теоретическими исследованиями, выполненными в работе [2]. Ширина режущей кромки изношенного зерна вычисляется по зависимости:

$$b_{3\tau} = C_b \left(\frac{t_\phi - u}{t_\phi - u - h_3} \right)^m h_\tau^m, \quad (5)$$

где h_τ – координата точки профиля зерна от его изношенной вершины.

Профиль вершины изношенного зерна в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, однозначно

определяется глубиной микрорезания и износом вершины абразивного зерна.

В плоскости, параллельной вектору скорости резания, размер площадки износа вычисляется как

$$l_3 = C_b \sqrt{(h_x + h_3)^{2m} - \left(\frac{t_\phi - u}{t_\phi - u - h_3} \right)^{2m} h_x^{2m}}, \quad (6)$$

где h_x – координата точки профиля зерна от его центра в направлении, перпендикулярном вектору скорости резания.

При подстановке частных значений коэффициентов в (4) ($C_b = 2\sqrt{2\rho}$, $m = 0,5$) вычисляется текущий радиус закругления при вершине зерна:

$$\rho_3(\tau) = \frac{\rho_3(0)t_\phi}{t_\phi - h_3}. \quad (7)$$

Величина площадки износа в направлении вектора скорости резания соответственно определяется по зависимости:

$$l_3 = 2\sqrt{2\rho_3(0)h_3}. \quad (8)$$

Для оценки адекватности полученных зависимостей выполнены экспериментальные исследования в лаборатории обработки материалов резанием Мелитопольского моторного завода. В связи с тем, что проверялась геометрическая модель формы зерна, выбор обрабатываемого материала и индентора не имел принципиального значения. В качестве инденторов использовали конуса из стали 40Х HRC 55...60, быстрорежущей стали Р6М5, твердого сплава Т15К6 с формой вершин в виде параболоида вращения. С целью получения заданной формы, вершины обрабатывались по шаблону на оптико-шлифовальном станке.

В качестве образцов применяли алюминиевые (АЛ-6) заготовки и заготовки из стали 45 (HRC 45-50) с размерами рабочей части 60мм х 120 мм. Поверхность образца с целью получения исходной шероховатости обрабатывали точением резьбовым резцом на токарном станке, затем образцы устанавливали на оптический профилировальный станок 395-МФ10 и на их поверхности резцом, закрепленным на диске, наносили риски до получения неравномерной нерегулярной поверхности. Таким образом, индентор работал по шероховатой поверхности. Испытания проводили при скорости перемещения индентора 33 м/с, скорости вращения образца 20 м/мин., глубине резания $t_\phi = 1,25H$, где H – слой, в котором распределена

шероховатість поверхності. Профили инденторов зарисовывали и фотографировали с экрана оптического профилишлифовального станка через заданные промежутки времени. Сравнение расчетных и экспериментальных размеров профилей, в плоскости перпендикулярной скорости резания (длины площадки износа) и в плоскости параллельной скорости резания, приводятся в таблице 1.

Анализ полученных данных свидетельствует о возможности использования приближенных зависимостей (5) и (6) для расчета параметров формы абразивного зерна при его износе.

Число режущих кромок на базовом участке рабочей поверхности инструмента может быть определено экспериментально и аналитически.

При экспериментальных исследованиях применяют методы непосредственного подсчета числа кромок с помощью оптических приборов, методы, основанные на регистрации импульсов от термомпар, установленных в деталь, методы подсчета числа отпечатков на фольге, бумаге, стекле и т. д. По данным А.Н. Резникова [3], наиболее близкий результат по количеству активных зерен дает метод прокатки круга по фольге, толщина которой должна быть равна глубине резания. Недостатком метода, как и других, ранее перечисленных, является высокая трудоемкость, связанная с необходимостью визуального подсчета количества отпечатков, оставшихся на фольге. Наиболее перспективными способами контроля рабочей поверхности инструмента являются способы сканирования.

Таблица 1

Расчетные (7), (8) и экспериментальные
размеры профилей вершин абразивных зерен

Материал детали	Материал индентора	Время работы индентора, с	Расстояние до вершины, мкм	Ширина профиля, мкм		Размер площадки износа, мкм	
				эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
АЛ-6	Р6М5	600	20	280	270	340	335
		$h_3 = 50$	40	360	372	340	335
		мкм	80	520	493	340	335
АЛ-6	40X	0	20	220	196	0	0
		$h_3 = 0$	60	320	324	0	0
		Мкм	80	360	370	0	0
		10	20	250	260	320	325
		$h_3 = 60$	40	340	358	320	325
	мкм	80	500	491	320	325	

		20 $h_3=100$ мкм	20 40	280 360	384 527	400 400	410 410
Сталь 45	Т15К6	$h_3 = 0$ мкм	20	290	281	0	0
			40	400	402	0	0
			60	500	498	0	0
			80	570	578	0	0
		$h_3 = 20$ мкм	20	320	316	310	281
			40	460	453	310	281
			60	560	559	310	281
		$h_3 = 50$ мкм	80	630	649	310	281
			20	420	403	500	453
				40	580	578	500

Схема одного из таких способов рассмотрена на рисунке 1. Суть способа заключается в автоматическом подсчете числа электрических импульсов, возникающих при прокатывании фольги 3 с изолирующим покрытием 4 между рабочей поверхностью инструмента 1 и специальным роликом 2. Фольга и пластина 5 ролика подключаются к источнику тока. В момент прохождения вершины зерна зоны контакта, она, вдавливаясь в материал фольги, разрывает изолирующую пленку и замыкает электрическую цепь. В момент выхода вершины зерна из зоны электрическая цепь разрывается. Новый электрический импульс возникает при прохождении зоны следующим абразивным зерном. Импульсы регистрируются либо электронным счетчиком импульсов, либо ЭВМ. Число абразивных зерен на единицу поверхности инструмента вычисляется по числу зафиксированных импульсов и площади участка сканирования.

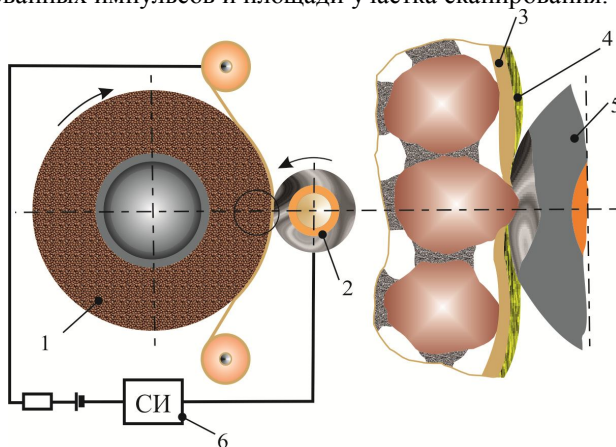


Рис. 1. Схема експрес-метода определения числа зерен на рабочей поверхности инструмента: 1 – абразивный инструмент, 2 – оправка, 3 – фольга, 4 – изолирующее покрытие, 5 – токопроводный ролик, 6 – счетчик импульсов

Точность определения числа режущих кромок по рассмотренному способу зависит от возможности наложения отдельных электрических импульсов и обеспечивается за счет выбора конструктивных параметров регистрирующей пластины ролика.

Вероятность наложения импульсов будет совпадать с вероятностью события, заключающегося в том, что расстояние между двумя соседними кромками по длине участка сканирования будет меньше или равно длине контакта. При диаметре ролика 30 мм, толщине пластины 0,1 мм вероятность наложения импульсов для абразивных инструментов зернистостью 25 равна 0,052, т. е. погрешность измерения числа зерен составляет около 5 %.

Результаты экспериментального определения числа кромок на рабочей поверхности шлифовальных кругов 1 300x40x127 24A25HСМ2К по предложенному способу и по отпечаткам на фольге приведены в таблице 2.

Таблица 2

Число режущих кромок на рабочей поверхности шлифовального круга 1 300x40x127 24A25HСМ2К

Способ определения числа кромок	№ замера	Длина трассы сканирования, мм	Количество импульсов, отпечатков	Расчетное число кромок мм ² поверхности круга
По количеству электрических импульсов	1	200	68	3,4
	2	200	64	3,2
	3	200	72	3,6
	Ср.	200	68	3,4
По количеству отпечатков на фольге	1	200	71	3,5
	2	200	69	3,4
	3	200	74	3,7
	Ср.	200	71	3,5

Аналитические зависимости для расчета числа зерен на рабочей поверхности инструмента приводятся в работах [1, 4]. В основе вычислений лежит определение числа зерен, содержащихся в единице объема, по размерам зерен и структуре инструмента. В работе [1], кроме того, учитывается режим правки инструмента. В процессе шлифования число режущих кромок на рабочей поверхности

инструмента не остается постоянным. При каждом контакте с заготовкой часть зерен будет разрушаться, а часть вырываться из связки круга. Одновременно в работу будут вступать новые кромки, лежащие в более глубоких слоях инструмента, так как диаметр инструмента уменьшается за счет износа. Учитывая эти процессы, вычислим число активных режущих кромок рабочей поверхности инструмента после i -го контакта:

$$n_{zi} = n_{zi-1} + z_{zi} - n_{zi-1} \cdot P_{pi}, \quad (9)$$

где n_{zi-1} и n_{zi} – число зерен после $i-1$ -го и i -го контактов; z_{zi} – число зерен, появляющихся на поверхности при износе круга; P_{pi} – вероятность разрушения и вырывания зерна при i -ом контакте.

В общем случае n_{zi} зависит от числа зерен на поверхности после правки n_{z0} , закона распределения зерен по глубине инструмента, радиального износа круга, прочности закрепления зерен, сил резания, возникающих в зоне контакта, которые являются случайными величинами. Если принять z_{zi} и P_{pi} постоянными, то решение зависимости (9) приводит к следующему соотношению:

$$n_{zi} = n_{z1} + \left(n_{z1} - \frac{z_3}{P_p} \right) \left\{ -1 + \left[\begin{aligned} &1 - iP_p + \frac{i(i-1)}{2!} P_p^2 + \dots \\ &+ (-1)^j \frac{i(i-1)\dots(i+1-j)}{j!} P_p^j + \dots + (-1)^{i-1} P_p^{i-1} \end{aligned} \right] \right\} \quad (10)$$

Члены квадратной скобки являются биномом с положительным показателем, на основании этого:

$$n_z = \frac{z_3}{P_p} + \left(n_{z0} - \frac{z_3}{P_p} \right) (1 - P_p)^{i-1}. \quad (11)$$

Уравнение (11) справедливо для дискретного процесса, когда поверхность круга контактирует с заготовкой периодически, например один раз за оборот круга. При постоянном контакте заготовки с инструментом (суперфиниширование, хонингование и т. д.) рассмотрим непрерывный процесс $n_z(\tau)$. Для этого в уравнении (9) заменим n_{zi-1} на $n_{zi} - \Delta n_{zi}$, после преобразований получим:

$$(1 - P_p) \Delta n_{zi} + n_{zi} P_p - z_3 = 0. \quad (12)$$

Полагая, что $\Delta n_z = n'_z \tau_k$, где τ_k – время контакта поверхности с заготовкой, получим дифференциальное уравнение:

$$n'_z + \frac{P_p}{\tau_k (1 - P_p)} n_z - \frac{z_3}{\tau_k (1 - P_p)} = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) при начальных условиях $n_z(0^+)$ и $i = \nu_k \tau$ имеет вид:

$$n_3(\tau) = \frac{z_3}{P_p} + \left(n_{30} - \frac{z_3}{P_p} \right) e^{-P_p \nu_k \tau}, \quad (14)$$

где ν_k – частота вращения круга.

В таблице 3 приводится сравнение значений $n_3(\tau)$, рассчитанных по зависимостям (11) и (14) при $n_{30} = 5,2 \cdot 10^6$ 1/м²; $P_p = 0,1$ è 0,01; $\nu_k = 32$ 1/с; $z_3/P_p = 2 \cdot 10^6$ 1/м².

Таблица 3

Значения $n_3(\tau)$, полученные по зависимостям (11) и (14)

Время работы инструмента, τ , с	Число контактов, i	Расчетные значения $n_3(\tau)$			
		(11)		(14)	
		$P_p = 0,1$	$P_p = 0,01$	$P_p = 0,1$	$P_p = 0,01$
0,25	8	4,3725	4,9526	4,4388	4,9539
0,50	16	2,5930	4,7247	2,6461	4,7267
1,00	32	2,1100	4,3199	2,1306	4,3235
2,00	64	2,0038	3,6819	2,0054	3,6877
4,00	128	2,0000	2,8840	2,0000	2,8896
8,00	256	2,0000	2,2442	2,0000	2,2474
16,00	512	2,0000	2,0186	2,0000	2,0191

Рассмотренные данные указывают на существенное изменение числа зерен на рабочей поверхности инструмента в процессе шлифования. Для рассмотренного примера оно составляет до 250 %, что вызывает необходимость учета этих изменений при расчете параметров процесса. Отклонения увеличиваются с повышением интенсивности процесса шлифования. При выводе зависимости (11) предполагалось, что плотность распределения режущих кромок по глубине инструмента постоянна. В действительности же она может меняться по сложному закону, поэтому с каждым оборотом круга будет меняться не только число разрушающихся кромок, но и число кромок, вступающих в работу.

Допустим, что в результате правки была сформирована рабочая поверхность с распределением кромок по глубине по нормальному закону. В этом случае при первом контакте круга с заготовкой будет участвовать только небольшая часть кромок:

$$n_{z1} = z_{z1} = \frac{n_3}{\sigma_{\xi u} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u_1} e^{-\frac{(u-\xi_u)^2}{2\sigma_{\xi u}^2}} du, \quad (15)$$

где ξ_u – среднее значение расстояний от условной наружной поверхности инструмента до вершин режущих кромок; σ_{ξ_u} – среднее квадратичное отклонение ξ_u .

При каждом последующем контакте круга с заготовкой в работу будут вступать новые режущие кромки. Число таких кромок на i -ом контакте будет определяться по уравнению (15) при замене нижнего предела интегрирования на u_{i-1} , верхнего предела на u_i , где u_{i-1} и u_i – расстояния до вершин абразивных зерен, наиболее удаленных от условной наружной поверхности круга, которые проходят через зону контакта заготовки с инструментом при выполнении $i-1$ -го и i -го оборотов круга.

При первых контактах круга с заготовкой число режущих кромок, вступающих в работу, будет больше числа разрушающихся. Вследствие этого число кромок на рабочей поверхности круга будет увеличиваться. После некоторого числа контактов число режущих кромок, вступающих в работу, будет уравниваться с числом разрушающихся, а затем становится меньше. Соответственно число режущих кромок в рабочем слое инструмента будет достигать максимума, а затем уменьшаться. Шероховатость шлифованной поверхности соответственно будет сначала уменьшаться, а затем увеличиваться.

Для экспериментальной проверки уравнений (9) и (15) были выполнены расчеты по изменению числа режущих кромок и шероховатости поверхности для случая шлифования образцов из стали 45, диаметром 50 мм, кругами 1 600x67x305 24A40НСМ1К со скоростью круга – 30 м/с, скоростью детали – 0,78 м/с, продольной подачей – $16 \cdot 10^{-3}$ м/с, поперечной подачей – 0,01 мм на ход стола. При расчетах принято, что тонкая правка круга выполнялась алмазом с продольной подачей – 0,01 мм/об. Шероховатость поверхности вычислялась для каждого образца в порядке их обработки по приближенному уравнению работы [6].

При анализе расчетные значения шероховатости поверхности (рис. 2, кривая 2) сравнивались с экспериментальными, полученными А.А. Маталиным и В.С. Рысцовой [4] (рис. 2, кривые 1). Сопоставление свидетельствует не только о хорошем соответствии экспериментальных и расчетных данных по абсолютной величине, но и о почти полной идентичности формы кривых.

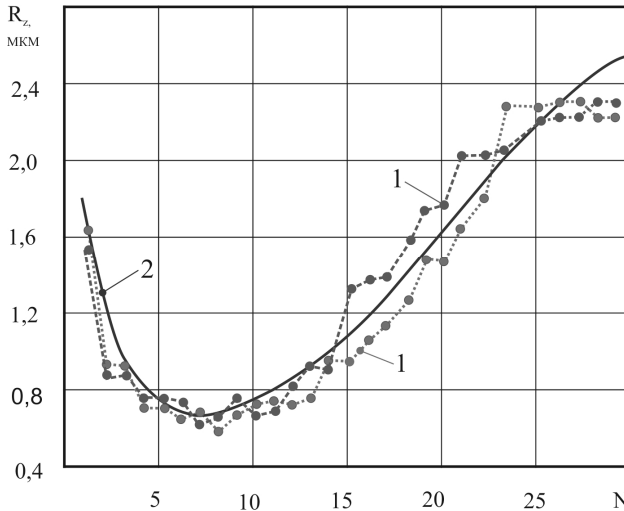


Рис. 2. *Изменение шероховатости шлифованных поверхностей за период стойкости инструмента при шлифовании с тонкой правкой круга: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные; N – номер обработанной детали*

Параметры распределения режущих кромок по глубине рабочего слоя инструмента входят практически во все зависимости по моделированию процессов съема материала и износа абразивного инструмента. В выполненных теоретических и экспериментальных исследованиях нет единого мнения о виде распределения. Для моделирования предлагают применять нормальный закон распределения, бета и гамма распределения. Из разнообразия рекомендаций по форме распределения режущих кромок по глубине можно сделать заключение, что в процессе обработки оно может существенно изменяться. Теоретическое обоснование этому выводу выполнено в работах В.А. Носенко [9].

Для выполнения анализа выделим в рабочем объеме круга слой, толщина которого, соизмерима с радиальным износом круга при одном контакте (рис. 3). При необходимости повышения точности расчетов он, может быть, подвергнут разбиению на более элементарные составляющие. К основным параметрам состояния выделенного слоя могут быть отнесены: число, величина износа и форма вершин абразивных зерен. Износ вершин зерен рассчитывается по уравнениям (3) и (4), форма вершин – по уравнениям (5) и (6). Для расчета числа вершин зерен в каждом из слоев, уравнение (9) должно

быть дополнено рядом составляющих [7]. Число вершин в слое, может как уменьшаться, так и увеличиваться.

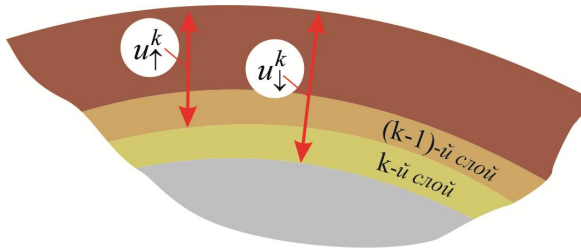


Рис. 3. Схема к расчету параметров состояния базового участка рабочей поверхности абразивного инструмента

Часть режущих кромок исчезнет по причине вырывания зерен из связки круга, некоторое количество кромок покинет слой в результате скалывания. Увеличение числа кромок происходит за счет попадания в слой кромок, появившихся в результате скола вершин в вышележащих слоях, и за счет перемещения кромок из вышележащих слоев при их износе. С учетом указанных процессов число кромок в k -ом слое после

i -го контакта круга с заготовкой определится:

$$n_i^k = n_{i-1}^k - \Delta n_{-ci}^k - \Delta n_{-pi}^k - \Delta n_{-ui}^k + \Delta n_{+ci}^k + \Delta n_{+ui}^k, \quad (16)$$

где n_i^k и n_{i-1}^k – количество вершин абразивных зерен в k -ом слое после i -го и $i-1$ -го контактов; Δn_{-ci}^k – количество скалывающихся вершин зерен при i -ом контакте в k -ом слое инструмента; Δn_{-pi}^k – число абразивных зерен, вырванных из связки круга при выполнении i -го контакта; Δn_{-ui}^k – число вершин абразивных зерен, убывающих из k -го слоя инструмента при выполнении i -го контакта вследствие износа.

Индексами $+$ в уравнении (16) обозначены соответствующие величины числа вершин зерен, поступающих в слой при i -ом контакте с инструментом.

Определим каждую из составляющих уравнения (16). Для любого уровня инструмента (расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины) справедливо утверждение, что зерно разрушится в том случае, если равнодействующая сил резания превысит прочность зерна. Аналогично можно сформулировать и условие вырывания зерна из связки инструмента. Вероятности

событий разрушения $P(P)$ и вырывания $P(B)$ могут быть определены соотношениями:

$$P(P) = P(R_3 \geq G_3), \quad (17)$$

$$P(B) = P(R_3 \geq G_{св}), \quad (18)$$

где R_3 – сила, действующая на зерно при микрорезании; G_3 и $G_{св}$ – прочность абразивного зерна и прочность его закрепления в инструменте соответственно.

Учитывая, что как прочность зерна, так и сила, действующая на зерно, являются величинами случайными, вероятность $P(P)$ определится:

$$P(P) = \int_{-\infty}^{\infty} f_g(G_3) \int_{G_3}^{\infty} f_r(R_3) dR_3 dG_3, \quad (19)$$

где $f_g(G_3)$ и $f_r(R_3)$ – плотности вероятностей распределений прочности абразивного зерна и сил, действующих на зерно.

Аналогичная зависимость может быть получена и для вероятности вырывания зерен из связки круга. Силы, действующие на абразивные зерна, плотность вероятностей распределения прочности зерна и прочности их закрепления в связке круга могут быть определены по зависимостям работы [9]. При i -ом контакте из рабочего слоя вырываются и подвергаются разрушению наиболее слабо закрепленные зерна. В связи с этим для анализа последующих контактов необходима коррекция законов распределения G_3 и $G_{св}$.

Число вершин зерен, появляющихся в слое Δn_{+ci}^k , определяется по общему числу разрушившихся при i -ом контакте зерен n_{cui} и плотности вероятности распределения по глубине вновь образовавшихся вершин $f_{nc}(u)$:

$$\Delta n_{+ci}^k = \int_{u_{\uparrow}^k}^{u_{\downarrow}^k} n_{cui} f_{nc}(u) du, \quad (20)$$

где u_{\uparrow}^k и u_{\downarrow}^k – координата верхней (ближней) и нижней (дальней) границ рассматриваемого слоя относительно условной наружной поверхности инструмента (рис. 3).

Число вершин абразивных зерен, покидающих и приходящих в рассматриваемый слой вследствие износа, определяется интегрированием соответственно записанных зависимостей. Если износ инструмента при одном контакте намного меньше глубины

резания, то можно считать, что в пределах рассматриваемого слоя режущие кромки распределены равномерно. В этом случае число кромок Δn_{-ui}^k и Δn_{+ui}^k приближенно определятся:

$$\Delta n_{-ui}^k = \frac{\Delta h_{\downarrow i}^k}{u_{\downarrow}^k - u_{\uparrow}^k} n_{zi-1}^k, \tag{21}$$

$$\Delta n_{+ui}^k = \frac{\Delta h_{\downarrow i}^{k-1}}{u_{\downarrow}^{k-1} - u_{\uparrow}^{k-1}} n_{zi-1}^{k-1}, \tag{22}$$

где Δh_{\downarrow}^k и $\Delta h_{\downarrow}^{k-1}$ – износ вершин нижних границ k -го и $k-1$ -го слоев.

Подставляя в зависимость (16) выражения всех составляющих, получим рекуррентное соотношение^

$$n_i^k = n_{i-1}^k (1 - P_i(P) - P_i(B)) + \int_{u_{\uparrow}^k}^{u_{\downarrow}^k} n_{cui} f_{nc}(u) du - \frac{n_{zi-1}^k \Delta h_{\downarrow i}^k}{u_{\downarrow}^k - u_{\uparrow}^k} + \frac{n_{zi-1}^{k-1} \Delta h_{\downarrow i}^{k-1}}{u_{\downarrow}^{k-1} - u_{\uparrow}^{k-1}}. \tag{23}$$

При известном числе режущих кромок в каждом из слоев инструмента закон их распределения по глубине устанавливается по известным методикам.

Вычисление параметров состояния рабочей поверхности абразивного инструмента по зависимости (23) выполняется в следующей последовательности:

- устанавливаются параметры состояния рабочей поверхности после правки;
- рассчитываются параметры зоны контакта заготовки с инструментом при первом контакте и силы, действующие на абразивные зерна;
- рассчитываются число режущих кромок в первом, втором и т. д. слоях инструмента и их геометрия после первого контакта;
- уточняются законы распределения режущих кромок по глубине инструмента, законы распределения прочности абразивных зерен и прочности закрепления их в инструменте;
- после расчета всех перечисленных параметров переходят последовательно к анализу второго, третьего и т. д. контактов инструмента с заготовкой.

Таблица 4
Изменение числа режущих кромок в рабочем слое инструмента

Число контактов поверхности круга	Координата слоя от текущей условной	Число режущих кромок в слое, $1/m^2 \text{мкм}$
-----------------------------------	-------------------------------------	---

с заготовкой	наружности поверхности, мкм	при износе с разрушением кромки	при износе без разрушения
0	20	70	70
3	17	72	73
6	14	73	79
9	11	70	87
12	8	61	97
15	5	37	112
18	2	12	129

В качестве примера в таблице 4 приводятся расчетные данные по изменению числа режущих кромок в рабочем слое инструмента для двух вариантов: а) износ инструмента происходит за счет износа режущих кромок без разрушения и вырывания зерен; б) при работе инструмента - кроме износа наблюдается разрушение режущих кромок и вырывание зерен из связки круга. Для анализа в рабочем слое инструмента выделен слой толщиной 1 мкм на расстоянии $u = t_\phi$ от его наружной поверхности. Расчеты выполнены для процесса круглого наружного врезного шлифования закаленных образцов диаметром 50 мм кругами диаметром 300 мм с фактической глубиной микрорезания $t_\phi = 20 \cdot 10^{-6}$ м. Радиальный износ круга принят равным $\Delta R = 1 \cdot 10^{-6}$ м, число режущих кромок в выделенном слое – $n_{zo} = 70$ ($1/\text{м}^2\text{мкм}$). При вычислении координат слоя по глубине учтено, что при каждом контакте условная наружная поверхность смещается к центру круга на величину радиального износа.

Выводы. Сопоставление полученных результатов подтверждают высказанную гипотезу о существенном изменении законов распределения режущих кромок по глубине инструмента в процессе шлифования. При работе круга в режиме самозатачивания наблюдается уменьшение их числа в слоях близлежащих к условной поверхности инструмента, при работе в режиме затупления, наоборот – их увеличение. Рассмотренные зависимости позволяют прогнозировать изменения распределений, что повышает точность моделей взаимодействия инструмента и заготовки. Однако данные модели не учитывают воздействия возмущающих факторов, которые могут оказывать существенное влияние на выходные показатели процесса шлифования. Учет вышеуказанных факторов представляет собой дальнейшие перспективы развития решения задачи прогнозирования

изменения числа и распределения зерен по глубине инструмента за период его стойкости.

Список использованной литературы:

1. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
2. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов : изд-во Саратовского ун-та, 1975. – 202 с.
3. *Резников А.Н.* Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной шероховатости поверхности / А.Н. Резников, Ю.Б. Федосеев // Вестник машиностроения. – 1976. – № 6. – С. 69.
4. *Маталин А.А.* Точность, производительность и экономичность механической обработки / А.А. Маталин, В.С. Рыцова. – М. : Машгиз, 1963. – 352 с.
5. *Узунян М.Д.* Управление качеством – путь развития высоких технологий / М.Д. Узунян // Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг : труды VII междунар. научно-техн. семинара (24–28 сент. 1997). – С. 246–248.
6. *Абразивная и алмазная обработка материалов.* – М. : Машиностроение, 1977. – 392 с.
7. *Новоселов Ю.К.* Влияние состояния рабочей поверхности инструмента на оценку параметров формирующего фильтра / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, Д.А. Каинов, // Резание и инструмент в технологических системах : межд. научн.-техн. сб. – Харьков : ХГПУ, 2002. – Вып. 62. – С. 84–88.
8. *Теоретические основы резания и шлифования материалов : учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др.* – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
9. *Носенко В.А.* Шлифование адгезионно-активных металлов / В.А. Носенко. – М. : Машиностроение, 2000. – 262 с.

БРАТАН Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Технологии машиностроения Севастопольского национального технического университета.

Научные интересы:

– отделочные чистовые виды обработки.

НОВОСЁЛОВ Юрий Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры Технологии машиностроения Севастопольского национального технического университета.

Научные интересы:

– отделочные чистовые виды обработки.

СТОЛЯРОВ Николай Николаевич – аспирант кафедры Технологии машиностроения Севастопольского национального технического университета.

Научные интересы:

– отделочные чистовые виды обработки.

Статья поступила в редакцию 12.06.2012