

3. Пат. 25515 України, МПК В03С 7/00, В03С 1/00. Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен / М.В. Новіков, Г.П. Богатирьова, Г.Д. Ільницька, Г.Ф. Невструєв.– № 200703803; Заяв. 05.04.07; Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
4. ДСТУ 329295. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 72 с.
5. ТУ У 28.4–05417344–075-2003. Шлифпорошки синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. К.: Госстандарт Украины, 2003. – 10 с.
6. Ільницька Г. Д. Оцінка дефектності поверхні алмазов по адгезійним свойствам // Фізико-хімічні свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа. – К.: ИСМ НАН України, 1987. - С. 33 – 39.
7. Пат. 65129 А України, МКИ G01N27/12. Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г. Ф. Невструєв, Г. Д. Ільницька. – № 2003065196;
8. Заявл. 05.06.03, Опубл. 15.03.04, Бюл. № 3.
9. СТП 28.5-05417377. Метод определения коэффициента термостойкости шлифпорошков сверхтвердых материалов. К.: ИСМ НАН України, 2004. – 12 с.
10. Оцінка прочностних характеристик алмазних порошків для бурового інструмента / Г. П. Богатырева, В. И. Куш., Г. Д. Ільницька, Г. Ф. Невструєв, Р. К. Богданов, А. М. Ісонкін, А. П. Загора, І. Н. Зайцева / Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 26 – 41.
11. П.В. Зыбинский, Богданов Р.К., Ісонкін А.М. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: Моногр.– Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
12. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В.Н. Бакуля.– К.: Наук. думка, 1978.– 232 с.
13. Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LgArгох для применения в научно–прикладных задачах материаловедения // Порошковая металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр.– Минск, 2008,– Вып. 31.– С. 58–63.
14. Бахвалов Н. С. Численные методы.– М.: Наука, 1973.– 632 с.
15. Петасюк Г. А. Сравнительные возможности программных средств аналитического описания экспериментальных данных в задачах диагностики свойств дисперсных материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. –К.: ИСМ НАН України.– 2008. – Вып. 11. – С. 231 – 237.

Поступила 12.06.09

УДК 621.921.34-492.2

Г. А. Петасюк, Ю. И. Никитин, кандидаты технических наук

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ АБРАЗИВНОЙ СПОСОБНОСТИ
МИКРОПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА И ШЕРОХОВАТОСТИ
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЗЕРНОВЫМ СОСТАВОМ
И СРЕДНИМ РАЗМЕРОМ ЗЕРЕН ФРАКЦИЙ**

Experimental research of effect of grain composition indices of synthetic diamond micron powders on abrasive ability of the powders and roughness of finished surface has been carried out.

Empirical mathematical models of correlation between abrasive ability and roughness of finished surface and grain composition indices as well as average grit size of fractions have been developed.

Введение

Зерновой состав, абразивная способность и шероховатость обработанной поверхности являются основными характеристиками микропорошков сверхтвердых материалов (СТМ). Определение этих характеристик предусмотрено государственными стандартами на микропорошки СТМ [1; 2].

Абразивная способность порошка выражается массой сошлифованного материала (в абсолютных единицах) или отношением этой массы к массе израсходованного порошка. Шероховатость обработанной поверхности оценивается параметрами Ra и Rz при обработке микропорошками диагностируемой зернистости образцов из твердого сплава марки Т15К.6 согласно ГОСТ 3882-74.

Исследование взаимосвязи абразивной способности микропорошков СТМ (в том числе синтетического алмаза) и шероховатости обработанной ими поверхности с другими характеристиками – важная научно-прикладная задача материаловедения. Абразивная способность порошка зависит от многих факторов, одновременно действующих в процессе шлифования: свойств порошка, особенностей обрабатываемого материала и условий шлифования.

Алмазные микропорошки используют преимущественно в незакрепленном состоянии в составе паст, суспензий и менее часто в инструментах для чистовой обработки. При этом в качестве притиров (шлифовальники и полировальники) применяют металлы или полутвердые и мягкие органические материалы [3].

Определение абразивной способности алмазных микропорошков при обработке ими образцов из корунда на шлифовальниках из металла или органических полутвердых и мягких материалов представляет значительные трудности, поскольку алмазные зерна при шлифовании внедряются в материал шлифовальников, а этот процесс не поддается управлению.

Диагностирование абразивной способности микропорошков и шероховатости обработанной ими поверхности согласно стандартных методик занимает много времени, требует определенного количества порошка и высокоточных измерительных приборов для взвешивания исходного порошка и отходов шлифования. В этой связи предпринимались попытки разработать более экспрессные методы анализа абразивной способности. Так, была получена [4] эмпирическая зависимость для определения абразивной способности (A) микропорошков синтетического алмаза (СА) по среднему размеру зерен основной фракции (d) в виде:

$$A = 10^{\frac{4,64}{d^{1,4}}} \quad (1)$$

С увеличением размера зерен абразивная способность микропорошка СА сначала резко повышается, но достигнув наибольшего значения при некоторой зернистости, начинает снижаться при дальнейшем увеличении зернистости [5].

Цель настоящей работы – выявить и аналитически описать взаимосвязь абразивной способности микропорошков СА и шероховатости обработанной ими поверхности с показателями зернового состава и средним размером зерен каждой его фракции.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Были проведены экспериментальные исследования зависимости абразивной способности микропорошков марки АСН зернистостей 7/5, 10/7, 14/10, 20/14, 20/20, 40/28 и шероховатости обработанной ими поверхности от показателей зернового состава порошка по фракциям – крупной (n_k), основной (n_o) и мелкой (n_m) в соответствии с разработанными исходными требованиями по распределению фракций порошка (табл. 1).

Зерновой состав изменяли (варьировали) путем сухого смешивания трех смежных фракций для получаемых зернистостей с применением кондиционных порошков, полученных в одной партии. При смешивании порошков за основу принимали фракцию основной зернистости. К ней мелкими порциями добавляли мелкую и крупную фракции при тщатель-

ном перемешивании получающегося порошка. После каждого такого смешивания производился контроль зернового состава путем измерения длины и ширины проекции зерен с помощью микроскопа МБИ–6. Операцию смешивания повторяли до получения требуемого зернового состава. По достижении требуемого в соответствии с данными табл. 1 распределения фракций в порошке операцию смешивания прекращали, а порошок подвергали испытанию по определению абразивной способности и шероховатости обработанной поверхности. Абразивную способность определяли по методике ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины [2].

Таблица 1. Требуемое распределение фракций

Распределение фракций, %		
крупная	основная	мелкая
5	85	10
5	80	15
6	75	19
6	70	24
7	65	28
7	60	32
8	55	35
10	50	35
15	45	35
20	40	35
25	35	35
30	33	34

В соответствии с этой методикой абразивная способность порошка определяется по формуле

$$A = \frac{П_1 - П_2}{П}, \quad (2)$$

где $П$ – масса навески порошка, г; $П_1$, $П_2$ – масса блока с образцами соответственно до и после испытания, г.

Шероховатость поверхности образцов из твердого сплава, обработанных микропорошками определенной зернистости, определяли на установке УАС-2М конструкции ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины по стандартной методике [2].

По указанным методикам были получены экспериментальные значения абразивной способности и шероховатости обработанной поверхности в объеме 44 наборов.

Методика математической обработки экспериментальных данных

Математическую обработку экспериментальных данных проводилась в целях установления в аналитическом виде взаимосвязи абразивной способности и шероховатости обработанной поверхности с показателями зернового состава и средним размером зерен фракций порошка (d_k – крупной, d_o – основной, d_m – мелкой).

Эффективным инструментом математической обработки экспериментальных данных в научно-прикладных задачах материаловедения является созданная в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины компьютерно-программная система построения и анализа многофакторных эмпирических математических моделей LgArgox [6]. Основу этой программной системы составляет оригинальный алгоритм автоматической генерации аппроксимирующих зависимостей, которые используются в качестве эмпирических математических моделей. Определение рабочих параметров синтезируемых моделей основано на использовании минимизационной процедуры метода наименьших квадратов [7].

Теоретическую адекватность получаемых моделей оценивали минимумом среднелинейного (по абсолютной величине) отклонения (Δ_{\min}^c) расчетных значений зависимой пере-

менной от фактических на множестве проанализированных моделей и максимальным (Δ_{max}) его значением для варианта, на котором достигается Δ_{min}^c . Показателями адекватности моделей были приняты надежность (n) и тенденция прогнозирования (t^+ – к завышению, t^- – к занижению) [6]. Числовые значения критериев адекватности вычисляются по совокупности полученных экспериментальных данных после определения рабочих параметров модели.

Независимыми переменными модели были приняты средние значения размера зерен основной, крупной и мелкой фракций и показатели зернового состава по этим фракциям. Зависимыми переменными выступали абразивная способность и шероховатость обработанной поверхности. В качестве размера зерен порошка было взято среднее значение зернистости фракций, в частности, $d_o = (z_o^B + z_o^H)/2$, $d_k = (z_k^B + z_k^H)/2$, $d_m = (z_m^B + z_m^H)/2$, где z_o^B/z_o^H , z_k^B/z_k^H , z_m^B/z_m^H – зернистость фракции соответственно основной, крупной и мелкой.

Результаты исследований показали, что наиболее адекватными модели будут в случае, если независимыми переменными модели взять каждую величину d_o , d_k , d_m , n_o , n_k , n_m не в отдельном, а в комплексе:

$$x_1 = d_k n_k, \quad x_2 = d_o n_o, \quad x_3 = d_m n_m, \quad x_4 = d_k, \quad x_5 = d_o, \quad x_6 = d_k d_o$$

В целях получения аналитической зависимости для определения абразивной способности было проанализировано 1350980 моделей. В результате была получена следующая наиболее адекватная эмпирическая математическая модель:

$$a = 14,542 + 0,516 \cdot \sqrt[4]{d_k \cdot n_k} + 0,119 \cdot \sqrt[4]{(d_o \cdot n_o)^3} - \frac{0,004}{\lg(d_m \cdot n_m)} - \frac{0,016}{\lg(d_k) - 1} - \frac{21,381}{2} \cdot [\lg(d_o) - 1] - \frac{40,186}{\sqrt[4]{d_k \cdot d_o}} \quad (3)$$

Расчетные значения абразивной способности микропорошков по формуле (3) приведены в табл. 2, вычисленные на их основании показатели адекватности модели – в табл. 3.

Таблица 2. Расчетные значения абразивной способности микропорошков и шероховатости обработанной ими поверхности

№ п/п	$a_{эксп}$	$a_{расч.}$	Δ_a	$R_{эксп}$	$R_{расч}$	Δ_R
1	3,62	3,52	2,85	0,018	0,0172	4,61
2	3,32	3,48	4,82	0,018	0,0182	1,11
3	3,67	3,52	4,16	0,017	0,0184	8,51
4	3,60	3,53	1,83	0,016	0,0187	16,69
5	3,65	3,57	2,21	0,018	0,0189	4,92
6	3,82	3,55	7,15	0,019	0,0190	0,21
7	3,39	3,59	6,02	0,022	0,0194	11,71
8	3,36	3,59	6,78	0,021	0,0196	6,51
9	3,52	3,60	2,26	0,020	0,0197	1,64
10	2,77	2,77	0,08	0,037	0,0376	1,74
11	2,68	2,83	5,63	0,038	0,0385	1,38
12	2,74	2,74	0,08	0,031	0,0397	1,92
13	2,82	2,76	2,22	0,041	0,0408	0,39
14	2,54	2,74	8,08	0,042	0,0410	2,28
15	2,90	2,75	5,08	0,045	0,0412	8,40
16	2,90	2,80	3,33	0,042	0,0422	0,38
17	2,71	2,78	2,62	0,045	0,0436	3,21
18	2,75	2,81	2,06	0,056	0,0426	0,83
19	2,85	2,81	1,44	0,039	0,0431	10,56
20	2,98	2,83	4,87	0,044	0,0434	1,40

21	3,90	4,07	4,48	0,029	0,0379	8,24
22	3,85	3,81	1,05	0,038	0,0400	5,17
23	3,81	3,90	2,28	0,038	0,0431	13,43
24	3,63	3,88	6,82	0,028	0,0444	10,95
25	4,06	3,88	4,52	0,044	0,0462	5,02
26	3,70	3,90	5,44	0,029	0,0473	3,40
27	4,10	3,924	4,40	0,061	0,0487	20,09
28	4,16	3,89	6,49	0,052	0,0496	4,57
29	4,31	4,3103	0,01	0,063	0,0696	10,48
30	4,62	4,64	0,38	0,064	0,0661	3,28
31	4,20	4,25	1,20	0,071	0,0754	6,22
32	3,99	4,20	5,27	0,052	0,0736	2,17
33	4,58	4,27	6,83	0,083	0,0777	6,38
34	4,29	4,30	0,28	0,123	0,8107	7,87
35	4,28	4,29	0,13	0,082	0,0826	0,71
36	4,57	4,60	0,64	0,080	0,0773	3,37
37	4,65	4,46	4,06	0,100	0,0968	3,24
38	4,51	4,41	2,28	0,095	0,0977	2,83
39	4,37	4,25	2,69	0,073	0,0799	9,53
40	4,15	4,26	2,73	0,082	0,0762	7,11
41	4,23	4,25	0,52	0,091	0,0873	4,10
42	4,17	4,25	1,90	0,081	0,0867	7,06
43	4,06	4,26	5,05	0,100	0,0973	2,66
44	4,24	4,20	0,97	0,092	0,0925	0,55

Примечание. Условные обозначения: $a_{\text{эксп}}$, $R_{\text{эксп}}$ – экспериментальные данные $a_{\text{расч}}$, $R_{\text{расч}}$ – расчетные данные; Δ_a , Δ_R – погрешность расчетного определения.

Таблица 3. Показатели адекватности разработанных эмпирических математических моделей

Характеристика порошка	Показатели адекватности модели, %				
	Δ^c_{\min} , %	Δ_{\max} , %	n , %	t^+ , %	t^- , %
Абразивная способность	3,2721	8,0798	72,73	18,18	9,09
Шероховатость	5,383	20,089	56,82	27,27	15,91

В целях получения аналитической зависимости для определения шероховатости обработанной поверхности, оцениваемой параметром Ra , также было проанализировано 1350980 моделей, в результате чего получена следующая наиболее адекватная эмпирическая математическая модель:

$$R = 31,63 - 0,0067 \cdot (d_k \cdot n_k)^3 - 0,1479 \cdot (d_o \cdot n_o)^2 - 0,1235 \cdot (d_m \cdot n_m)^3 - \frac{204,73}{d_k \cdot \sqrt{d_k}} + \frac{96,2}{d_o^2} - \frac{4,7154}{(d_k \cdot d_o)^3} \quad (4)$$

Результаты расчета шероховатости обработанной микропорошками поверхности по формуле (4) приведены в табл. 2, вычисленные на их основании показатели адекватности модели – в табл. 3.

Проанализировав полученные расчетные значения абразивной способности микропорошков СА и шероховатости обработанной ими поверхности (см. табл. 2) приходим к следующим выводам. Из двух полученных эмпирических математических моделей более высокие показатели адекватности у модели, относящейся к абразивной способности микропорошков. Так, при средней погрешности прогнозирования 3,27 %, ее максимальное значение не превышает 8,1 %, причем в большинстве случаев погрешность прогнозирования намного

меньше указанного максимального ее значения. Из общего количества (44 набора) эмпирических данных только в двух случаях (4,6 %) погрешность превышает 7 %, в 6-ти случаях ($\approx 13,6$ %) – 6 %. Как следует из табл. 2, надежность модели (3), выражающаяся в относительном количестве случаев, когда погрешность не превышает допустимую в 5%, составляет 72,7 %. Проанализировав различие расчетных и экспериментальных значений абразивной способности микропорошков (52,3 % – занижение, 42,7 % – завышение), приходим к выводу, что наблюдается тенденция к занижению прогнозирования.

Модель (4), относящаяся к шероховатости обработанной поверхности, по адекватности уступает модели (3), однако по средней и максимальной погрешностям, структуре погрешностей, надежности прогнозирования приемлема для практического использования.

Таким образом, полученные эмпирические математические модели с учетом высокой степени их адекватности, могут использоваться для диагностики абразивной способности микропорошков СА и шероховатости обработанной ими поверхности при условии, что не требуется высокой точности значения характеристик. К основным преимуществам предложенного способа определения указанных характеристик относится его экспрессность, сравнительно низкая трудоемкость при реализации, существенная либерализация требований относительно количества порошка, необходимого для натуральных испытаний (в данном исследовании это количество измерялось не в каратах порошка, а зернами порошка).

Полученные эмпирические математические модели также можно использовать в составе математического обеспечения при разработке САПР технологических процессов, связанных с обработкой свободным абразивом, как методическое средство контроля этих процессов.

При использовании предложенного способа определения абразивной способности микропорошков СА и шероховатости обработанной ими поверхности для получения необходимых исходных данных не предполагается проведения специальных испытаний микропорошков. В этих случаях используют результаты микроскопического анализа, предписываемого стандартом и имеющего целью определение показателей зернового состава установление зернистости порошка.

Литература

1. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови–К.: Вид-во Держстандарту України, 1995. - Увед. 01.01.96.
2. ГОСТ 9206-80. Порошки алмазные. Технические условия – М.: Изд-во стандартов, 1981.
3. Порошки и пасты из синтетических алмазов / Ю. И. Никитин, С. М. Уман, Л. В. Коберниченко и др.– К.: Наук. думка, 1992.– 284 с.
4. Богданович М. Г. Абразивная способность микропорошков синтетического алмаза // Синтетические алмазы.– 1969.– вып. 2. – С. 42 – 45.
5. Богданович М. Г. Абразивная способность синтетического и природного алмаза при обработке корунда: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1970. – 22 с.
6. Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LgAproх для применения в научно-прикладных задачах материаловедения // Порошковая металлургия. Республ. межвед. сб. науч. тр.. – 2008. – вып. 31.– С. 58 – 63.
7. Бахвалов Н. С. Численные методы.– М.: Наука, 1973. - 632 с.

Поступила 30.04.09