



ПЕРЕЛАДОВ
Александр Борисович
(Курганский государственный университет)

PERELADOV
Aleksandr Borisovich
(Kurgan, Russian Federation, Kurgan State University)



КАМКИН
Иван Павлович
(Курганский государственный университет)

KAMKIN
Ivan Pavlovich
(Kurgan, Russian Federation, Kurgan State University)



АНОХИН
Андрей Викторович
(Курганский государственный университет)

ANOKHIN
Andrey Viktorovich
(Kurgan, Russian Federation, Kurgan State University)

Изучение дисперсной системы структуры абразивного инструмента со сложным зерновым составом

А.Б. Переладов, И.П. Камкин, А.В. Анохин

При проектировании и разработке технологии изготовления абразивного инструмента необходимо решать задачи оптимизации, связанные с определением оптимального зернового состава его структуры и коэффициента заполнения объема инструмента материалом абразивных зерен и применяемых структурных наполнителей ($K_{см}$). На основе результатов проведенного экспериментального исследования впервые получено регрессионное уравнение для расчета максимальных и текущих значений $K_{см}$, адекватно описывающее поведение реальных дисперсных систем, состоящих из электрокорундовых и карбидокремниевых шлифматериалов двух или трех зернистостей, имеющих нормальный рассев. Результаты исследований используются для проектирования абразивного инструмента широкого диапазона структур с оптимальным зерновым составом шлифматериала и применяемых структурных наполнителей, а также закрытых структур с оптимальным составом шлифматериала и структурных наполнителей.

Ключевые слова: планирование эксперимента, дисперсная система, абразивный инструмент, зерновой состав, структурные наполнители.

The study of the dispersion structure of abrasive tools with complex grain composition

A.B. Pereladov, I.P. Kamkin, A.V. Anokhin

The design and development of the technology for manufacturing abrasive tools implies solving optimization problems for determining an optimal grain structure and the space factor of abrasive grains and structural fillers in the tool volume. The results of the conducted experimental study formed the basis for deriving a new regression equation to calculate the maximum and current values of this factor. The equation adequately describes the behavior of real disperse systems consisting of electric emery and silicon carbide abrasives with two or three grain sizes having normal screening. The results of research are used for designing a wide range of abrasive tool structures with optimal composition of grains in abrasives and structural fillers, as well as closed structures with optimal composition of abrasives and structural fillers.

Keywords: experiment planning, disperse system, abrasive tools, optimization, grain composition, structural fillers, closed structure.

На этапах проектирования и изготовления абразивных инструментов (АИ) на керамической и органической связках необходимо определить оптимальное соотношение составляющих их дис-

персных материалов с целью достижения требуемых статических характеристик готового инструмента и обеспечения технологичности его изготовления. Обычно на практике рассчитываются двух- или трехкомпонентные дисперсные системы (ДС), состоящие из абразивных зерен (АЗ) одной или нескольких зернистостей, связки, структурных, технологических и других наполнителей, которые участвуют в формировании устойчивого каркаса, определяющего показатели строения внутренней структуры АИ на стадиях прессования и спекания сформованной заготовки инструмента [1, 2]. Связка, другие мелкодисперсные и/или легко разрушающиеся при прессовании абразивной массы наполнители, как правило, не принимают участия в формировании каркаса структуры АИ, ввиду значительно меньшего размера частиц, невысоких прочностных свойств их материала и особенностей его фазового состояния (газ, жидкость, гель и т. д.). Поэтому объем таких наполнителей назначается (ограничивается) исходя из рецептурных соотношений, с учетом имеющегося объема пор в объеме инструмента.

Решение задач проектирования АИ в основном сводится к обеспечению требуемой (или максимально возможной) плотности укладки АЗ и структурных наполнителей (например, корундовые и стеклянные микросферы, косточка фруктовая (КФ) и др.), образующих каркас АИ, и/или снижению усилия формирования его заготовки, что предполагает определение оптимального соотношению объемов и средних размеров частиц. В качестве критерия оптимизации обычно используются показатели структуры АИ (коэффициент $K_{см}$ заполнения объема инструмента материалом АЗ и структурных наполнителей координационное число — число контактов дисперсных частиц с соседними, плотность смеси, объем пор и др.), значения которых соответствуют устойчивому каркасу АИ, обеспечивают минимальные усилия при прессовании и отсутствие усадки при термообработке изделия.

Для решения указанных выше задач необходимо знать закон изменения $K_{см}$ ДС в зависимости от изменения соотношения объемов и размеров составляющих ее частиц. Это позволит правильно определять рецептурные

объемы компонентов при получении инструмента с заданной структурой и обеспечить технологичность его изготовления.

В опубликованных и изученных авторами данной статьи результатах исследований ДС, проведенных российскими и зарубежными учеными, которые занимались данными вопросами, в основном приводятся экспериментальные и теоретические модели, позволяющие рассчитывать лишь предельные значения параметров ДС для конкретных условий [3–6]. Универсальные зависимости для определения показателей многокомпонентных ДС с изменяющимся составом, пригодные для расчета плотности структуры реального АИ, и рекомендации по их адаптации к измененным условиям в работах указанных авторов отсутствуют. В статьях [7, 8] представлены результаты исследований идеализированных компьютерных моделей, но не приведены рекомендации по их практическому применению.

В связи с этим, было принято решение о проведении собственных исследований с целью получения зависимости для расчета $K_{см}$ ДС с учетом ее зернового состава, путем проведения физического эксперимента с использованием гранул невспененного полистирола (плотность 1,005 г/см³, коэффициент изометричности 1,05). Гранулы рассеивались на три фракции, средние размеры частиц которых составляли: $d_1 = 0,30$ мм, $d_2 = 0,82$ мм и $d_3 = 2,05$ мм (размеры определялись путем замера диаметров 50 частиц каждой зернистости с помощью инструментального микроскопа). Эксперимент по определению $K_{см}$ проводился с использованием рассчитанного симплекс-решетчатого 3-факторного экспериментального плана 4-го порядка [9], состоящего из 15 экспериментальных точек (рисунок). В каждой точке проводилось по три опыта. В каждом опыте задавалось требуемое соотношение объемов частиц (путем взвешивания на аналитических весах с погрешностью до 0,01%), соответствующее определенной точке плана эксперимента, затем осуществлялось перемешивание компонентов в мешалке типа «пьяная бочка». Полученная смесь насыпалась в мерную пробирку с плоским дном, где она подвергалась уплотнению при помощи виброуплотнителя (частота колебаний 25 Гц, амплитуда — 0,2 мм) в тече-

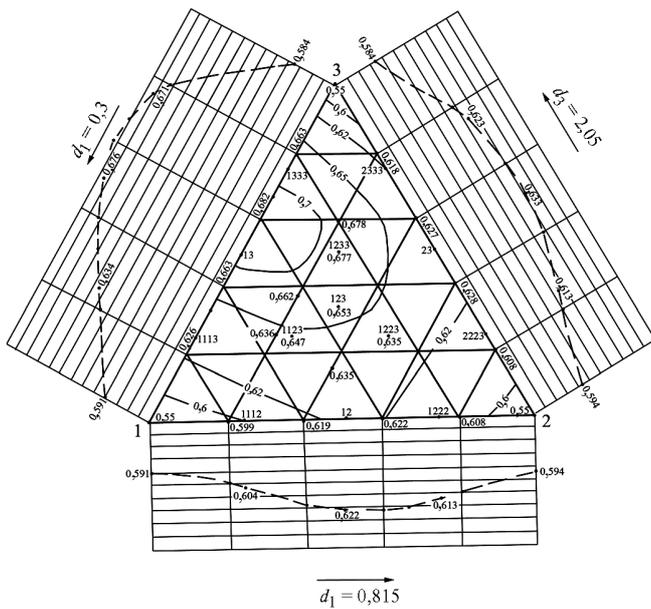


Рисунок. Симплекс-решетчатый план эксперимента для исследования трехкомпонентной ДС

ние 30 с. После уплотнения замерялся полученный объем смеси и определялся коэффициент заполнения ее объема материалом гранул по формуле

$$K_{cm} = \frac{V_{m.c}}{V_c},$$

где $V_{m.c}$ — суммарный объем в смеси материала гранул всех фракций (определялся, как отношение общего веса гранул к их плотности); V_c — объем смеси.

Полученные в трех опытах значения K_{cm} для каждой точки экспериментального плана усреднялись после проверки однородности их значений по критерию Стьюдента. Средние значения K_{cm} в 15 узловых точках решетки симплекс-плана эксперимента приведены в таблице.

На основе экспериментальных данных получено полиномиальное регрессионное уравнение для определения изменения значений K_{cm} в зависимости от состава ДС:

$$K_{cm} = K_{cm1}x_1 + K_{cm2}x_2 + K_{cm3}x_3 + 0,118 \cdot x_1x_2 + 0,354 \cdot x_1x_3 + 0,176 \cdot x_2x_3 - 0,04 \cdot x_1x_2(x_1 - x_2) - 0,216 \cdot x_1x_3(x_1 - x_3) - 0,08 \cdot x_2x_3(x_2 - x_3) -$$

$$-0,049 \cdot x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 0,011 \cdot x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 0,032 \cdot x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 4,149 \cdot x_1^2x_2x_3 - 1,218 \cdot x_1x_2^2x_3 + 1,144 \cdot x_1x_2x_3^2,$$

где K_{cm1} , K_{cm2} , K_{cm3} — коэффициенты заполнения объема исходных монофракционных ДС, состоящих из частиц с диаметрами d_1 , d_2 , и d_3 соответственно; x_1 , x_2 , x_3 — доля частиц, соответствующих фракций в единичном объеме ДС ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$).

Значения коэффициента заполнения объема K_{cm} в узловых точках решетки симплекс-плана эксперимента

№ п/п	Номер точки	K_{cm}	№ п/п	Номер точки	K_{cm}
1	1	0,591	9	2223	0,613
2	2	0,594	10	2333	0,623
3	3	0,584	11	1333	0,671
4	12	0,622	12	1113	0,634
5	23	0,633	13	1233	0,677
6	13	0,676	14	1123	0,647
7	1112	0,604	15	1223	0,635
8	1222	0,613			

С использованием этого уравнения были рассчитаны значения параметра K_{cm} в 21 точке экспериментального плана и построены линии его равных значений.

Полученное уравнение позволяет прогнозировать диапазон изменений значений параметра K_{cm} (ΔK_{cm}). В первом приближении значения K_{cm} можно определять для паритетного изменения соотношений $K_{12} = d_1:d_2$ и $K_{23} = d_2:d_3$ в интервале от 0,4 до 1,0 (обратно пропорциональная зависимость). При K_{12} и $K_{23} = 1$ изменение K_{cm} определяется только разбросом значений K_{cm1} , K_{cm2} и K_{cm3} .

Как следует из экспериментального плана, максимальное приращение ΔK_{cm} в рассчитанных точках составляло до 16% ($K_{cm} = 0,682$ для смеси из шлифматериалов двух зернистостей, имеющих соотношение средних размеров частиц $d_1:d_3 = 6,83$, а соотношение объемов 2:3, соответственно) у двухкомпонентной смеси по отношению к определенному средневзвешенному начальному значению коэффициентов K_{cm1} и K_{cm2} для исходных монофракционных ДС.

Таким образом, используя полученное уравнение, с учетом свойств факторного пространства экспериментального плана, можно с дос-

таточной точностью определить максимальные и промежуточные значения $K_{см}$ ДС для любых объемных соотношений зернистостей и средних размеров составляющих их частиц в исследованной области факторного пространства. Уравнение достаточно адекватно (с погрешностью не более 4%) описывает поведение реальных ДС, состоящих из электрокорундовых или карбидокремниевых шлифматериалов двух- или трехзернистостей, имеющих нормальный рассев, что было подтверждено результатами компьютерного моделирования [10] и проверено методом определения насыпной плотности смесей реальных шлифматериалов по ГОСТ 28924—91 в лабораторных условиях ОАО «Челябинский абразивный завод».

Результаты исследований используются при проектировании шлифовальных кругов из электрокорунда белого на керамической связке с закрытыми структурами (объемное содержание шлифматериала 52...58%), имеющих оптимальный зерновой состав. При этом обеспечивается минимальное усилие прессования заготовки круга, сравнимое с усилием, применяемом при изготовлении аналогичного стандартного инструмента с номерами структуры № 6—7, имеющего объемное содержание шлифматериала 50...48%, соответственно. Методика применялась, в частности, при расчете формовочных смесей для изготовления бифракционного инструмента — шлифовальных кругов большого диаметра (1 900×100×305) с характеристиками 25AF40/F60 F 4 V и 25AF40/F 6 V на ОАО «Челябинский абразивный завод». Формование заготовок указанных выше кругов структур № 4 и № 6 в требуемый объем осуществлялось при постоянном давлении 9,1...9,3 МПа (в зависимости от степени увлажненности формовочной массы).

Полученная зависимость может применяться для проектирования широкого диапазона структур шлифовального инструмента (№ 0—16) и будет полезна при создании дисперсных систем полимербетонов, керамических фильтров, порохов, твердых сплавов в других областях.

Литература

- [1] Крюков А.Ф., Крюков С.А., Грибач А.Е. Инновационно-технологическое обеспечение структурных и прочностных характеристик высокопористых абразивных инструментов. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив, 2009. Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф.* Волгоград, ВолгГАСУ, 2010, с. 19—21.
- [2] Попильский Р.Я., Кондрашев Ф.В. *Прессование керамических порошков*. Москва, Metallurgia, 1968, 272 с.
- [3] Патуроев В.В. *Полимербетоны*. Москва, Стройиздат, 1987, 286 с.
- [4] Островский В.И. *Теоретические основы процесса шлифования*. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та, 1981, 144 с.
- [5] Гузев В.В., Шумячер В.М. Применение метода гранулирования абразивных смесей с целью улучшения характеристик хонинговального инструмента. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив, 2009: Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф.* Волгоград, ВолгГАСУ, 2010, с. 136—139.
- [6] Красулин Ю.Л., Тимофеев В.Н., Баринов С.М. *Теоретические основы процесса шлифования*. Москва, Metallurgia, 1980, 100 с.
- [7] Brakhage K.-H., Klocke F., Makowski M., Weiss M. Grinding Wheel Modeling: Development of a mathematical Model. *MASCOT11 Proceedings — IMACS Series in Computational and Applied Mathematics*. Rome, 2011. URL: <http://www.igpm.rwth-aachen.de/brakhage/khbMASCOT11> (accessed 25 may 2013).
- [8] Benabbou A., Borouchaki H., Laug P., Sphere J.Lu. Packing and Applications to Granular Structure Modeling. *Proceedings of the 17-th International Meshing Roundtable*. Pittsburgh, 2008, pp. 1—18.
- [9] Зедгинидзе И.Г. *Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем*. Москва, Наука, 1976, 390 с.
- [10] Переладов А.Б., Кожевников И.В., Некинелов А.Н., Биринцев А.В. Прогнозирование показателей дисперсной системы шлифовального круга с использованием компьютерной модели. *Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки*, Курган, 2007, № 9, с. 80—83.

References

- [1] Kriukov A.F., Kriukov S.A., Gribach A.E. *Innovatsionno-tehnologicheskoe obespechenie strukturnykh i prochnostnykh kharakteristik vysokoporistykh abrazivnykh instrumentov* [Innovation and technological support for the structural and strength characteristics of highly abrasive tools]. *Protsessy abrazivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. Shlifabraziv, 2009. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii* [Processes of abrading, abrasive tools and materials. Shlifabraziv 2009. Collected papers of the International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VolgGASU publ., 2010, pp. 19—21.
- [2] Popil'skii R.Ia., Kondrashev F.V. *Pressovanie keramicheskikh poroshkov* [Pressing ceramic powders]. Moscow, Metallurgiya publ., 1968. 272 p.
- [3] Paturiov V.V. *Polimerbetony* [Polymer Concrete]. Moscow, Stroizdat publ., 1987. 286 p.
- [4] Ostrovskii V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessy shlifovaniia* [Theoretical basis of the grinding process]. Leningrad, Leningradskii universitet publ., 1981. 144 p.
- [5] Guzev V.V., Shumiacher V.M. *Primenenie metoda granulirovaniia abrazivnykh smesei s tsel'iu uluchsheniia kharakteristik khoningoval'nogo instrument* [Application of the abrasive granulation mixture to improve the characteristics of the honing tool]. *Protsessy abrazivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i*

materialy. Shlifabraziv, 2009. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Processes of abrading, abrasive tools and materials. Shlifabraziv 2009. Collected papers of the International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VolgGASU publ., 2010, pp. 136–139.

[6] Krasulin Iu.L., Timofeev V.N., Barinov S.M. *Teoreticheskie osnovy protessa shlifovaniia* [Theoretical basis of the grinding process]. Moscow, Metallurgiya publ., 1980. 100 p.

[7] Brakhage K.-H., Klocke F., Makowski M., Weiss M. Grinding Wheel Modeling: Development of a mathematical Model. *MASCOT11 Proceedings – IMACS Series in Computational and Applied Mathematics*. Rome, 2011. Available at: URL: <http://www.igpm.rwth-aachen.de/brakhage/khbMASCOT11> (Accessed 25 May 2013).

[8] Benabbou A., Borouchaki H., Laug P., Sphere J. Lu. Packing and Applications to Granular Structure Modeling. *Proceedings of the 17-th International Meshing Roundtable*. Pittsburgh, 2008, pp. 1–18.

[9] Zedginidze I.G. *Planirovanie eksperimenta dlia issledovaniia mnogokomponentnykh system* [Design of experiments for the study of multi-component systems]. Moscow, Nauka publ., 1976. 390 p.

[10] Pereladov A.B., Kozhevnikov I.V., Nekinelov A.N., Birtsev A.V. Prognozirovanie pokazatelei dispersnoi sistemy shlifoval'nogo kruga s ispol'zovaniem komp'yuternoii modeli [Prediction of performance dispersion of the grinding wheel using the computer model]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Kurgan State University. Ser. Technical Sciences]. Kurgan, 2007, no. 9, pp. 80–83.

Статья поступила в редакцию 20.06.2013

Информация об авторах

ПЕРЕЛАДОВ Александр Борисович (Курган) — кандидат технических наук, директор Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, ул. Гоголя, д. 25, e-mail: tp@kgsu.ru).

КАМКИН Иван Павлович (Курган) — аспирант, инженер Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, ул. Гоголя, д. 25, e-mail: ipkamkin@gmail.com).

АНОХИН Андрей Викторович (Курган) — аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, ул. Гоголя, д. 25, e-mail: sokolnichiy@mail.ru).

Information about the authors

PERELADOV Aleksandr Borisovich (Kurgan) — Cand. Sc. (Eng.), Director of Industrial Park. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: tp@kgsu.ru).

KAMKIN Ivan Pavlovich (Kurgan) — Post-Graduate, Engineer of Industrial Park. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: ipkamkin@gmail.com).

ANOKHIN Andrey Viktorovich (Kurgan) — Post-Graduate of «Automation of Manufacturing Processes» Department. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: sokolnichiy@mail.ru).

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие «Механика сплошной среды. Основы механики твердых сред». В 4-х томах. Том 4. Автор Ю.И. Димитриенко.

Четвертый том учебного пособия посвящен систематизированному изложению основ механики деформируемого твердого тела (МДТТ). Рассмотрены классические модели и теории МДТТ: теория абсолютно твердого тела, теория упругости с малыми деформациями, основы теории оболочек, динамические задачи теории упругости, теория прочности, теория электромагнитоупругости, нелинейная теория упругости с конечными деформациями, теории линейной и нелинейной вязкоупругости, теория конечных вязкоупругих деформаций, основы теории конечных пластических деформаций, теория устойчивости. Представлены оригинальные модели сред с конечными деформациями. Особенность изложения состоит в том, что все модели твердых сред рассматриваются с единых термодинамических позиций в едином тензорно-инвариантном подходе. Представлены примеры решения классических задач МДТТ.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru

