

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.06

УДК 621.92.02

А.С. Дударев, С.П. ЗахароваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ГИПОТЕЗЫ, ОБОСНОВЫВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Обосновывается повышение стойкости и увеличение работоспособности алмазно-абразивного инструмента. Предлагается увеличивать стойкость за счет учета форм зерен и дальнейшей сортировки зерен на основе двух гипотез. Первая гипотеза строится на предположении, что чем больше масса зерна, тем труднее вывести его из состояния покоя. Для выявления показателей масс зерен проводили анализ наиболее распространенных и известных форм. Рассмотрены алмазные зерна следующих форм: шаровидные, кубические, каплевидные, эллипсоидные, такие формы содержатся во всех группах зернистости алмазного порошка. Для примера анализ проведен для группы зернистости 125/100 (обозначение D126 по ГОСТ 53922–2010), так как данная группа зернистости наиболее распространена среди алмазного инструмента для обработки современных полимерных композиционных материалов. После анализа по первой гипотезе проранжированы формы единичных алмазных зерен по массе. Согласно второй гипотезе повышение стойкости алмазного инструмента зависит от площади контакта зерна со связкой, от этого, в свою очередь, зависят силы его удержания. Произведена оценка влияния форм алмазных зерен на стойкость инструмента с использованием аналитических и численных методов. При численном моделировании использовалась программа для инженерных расчетов NX Advanced Simulation. Аналитические расчеты показали, а моделирование в NX Advanced Simulation подтвердило, что среди исследуемых форм наибольшей стойкостью будет обладать алмазный инструмент с кубическими или шаровидными зёрнами алмазов. Предложена кубическая форма алмаза как наиболее рациональная форма зерна для рабочего слоя алмазного инструмента с целью повышения стойкости и работоспособности инструмента.

Ключевые слова: алмазно-абразивный материал, алмазный инструмент, зерно, алмаз, зернистость, шлифование, сверление, фрезерование, полимерный композиционный материал, структура, масса, фракция, группа, стойкость, связка.

A.S. Dudarev, S.P. Zakharova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

HYPOTHESES JUSTIFIES THE INCREASE IN THE DURABILITY OF DIAMOND-ABRASIVE TOOL

The article explains the increase in the durability and increased performance diamond abrasive tools. It is proposed to increase the resistance due to the accounting forms grains, and further sorting of grains based on two hypotheses. The first hypothesis is based on the assumption that the greater the weight of the grain, the harder it is to bring it out of dormancy. To identify indicators of the mass of grains analyzed the most common and well-known forms. Diamond grains are considered the following

forms: spherical, cubic, teardrop-shaped, ellipsoidal, such forms are contained in all groups grit diamond powder. For example, the analysis conducted for a group of grain 125/100 (D126 designation according to GOST 53922-2010), since this group is most common among grain diamond tools for the treatment of advanced polymer composite materials. After analysis, the first hypothesis, a ranking done forms of individual diamond grains by weight. According to the second hypothesis, the increase in the durability of the diamond tool is dependent on the contact area with a bunch of grain, as this depends on the strength of his hold. An assessment of the impact of forms of diamond grains in the tool life, using analytical and numerical methods. In the numerical simulation software used for engineering calculations NX Advanced Simulation. The analytical calculations showed, and modeling in NX Advanced Simulation confirmed that among the studied forms of resistance will have the greatest diamond tools with cubic or spherical grains of diamond. A cubic shape of a diamond, the most rational form of grains of diamond tools for the working layer to improve the durability and performance tool.

Keywords: diamond-abrasives material, diamond tools, grain, diamond, grinding, drilling, milling, polymer composite material, structure, mass, fraction, group, resistance, bunch.

Современные отечественные образцы авиационной и ракетно-космической техники содержат последние мировые разработки в области самолето- и двигателестроения, предусматривающие применение значительного объема полимерных композиционных материалов (ПКМ). Машиностроительные предприятия, производящие агрегаты и узлы из ПКМ, в механообрабатывающем производстве используют лезвийный и алмазный режущий инструмент. Доля применения алмазного инструмента из синтетических алмазов, часто называемых сверхтвердыми материалами (СТМ), в последние годы возрастает, причем не только для операций шлифования, но и для операций сверления и фрезерования.

Причинами расширения использования алмазного инструмента являются, во-первых, его технологические возможности в повышении производительности обработки и улучшении показателей качества обработанных поверхностей ПКМ. Во-вторых, применение фасонных алмазных фрез и кругов открывает широкие возможности для фрезерования и шлифования сложных поверхностей изделий. На этапе конструкторско-технологической подготовки производства возможно спроектировать и изготовить алмазный фасонный инструмент практически любого профиля. В настоящее время ужесточаются требования как к показателям процессов сверления, фрезерования, шлифования, так и к характеристикам инструмента. Это связано с тем, что обрабатываемое оборудование становится всё более универсальным, скоростным и др. [1]. Следовательно, высокие требования предъявляются как к возможностям высокопроизводительной обработки, так и к точности положения режущего профиля и размерной стойкости [2, 3]. Одним из самых важных эксплуатационных показателей алмазного инструмента

является его износостойкость и максимальная, при заданном качестве обработки, работоспособность [4]. Эти показатели в основном определяются характеристиками алмазно-абразивного материала [5]. Однако даже наиболее оптимальный выбор алмазно-абразивного материала не может обеспечивать высокие эксплуатационные показатели.

При работе алмазного инструмента лишь часть алмазных зерен, находящихся в его структуре, активно участвует в процессе резания, изнашиваясь по площадке или микроскалываясь. Это объясняется, наряду с другими факторами, тем, что алмазные зерна, используемые при изготовлении алмазного инструмента, несмотря на одинаковую группу зернистости, имеют произвольную конфигурацию и, как следствие, разную геометрию (рис. 1).

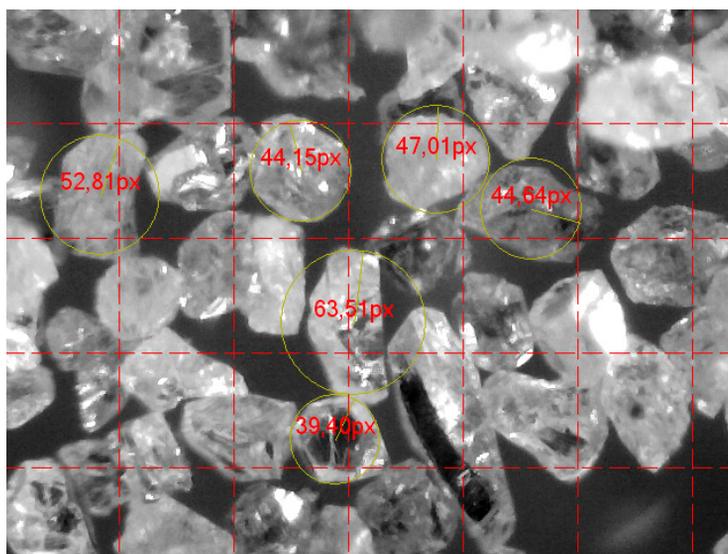


Рис. 1. Алмазные зерна зернистости 125/100 с выделенным описанным диаметром в масштабе

Хаотичная форма и геометрия зерен, а также их неупорядоченная ориентация приводят к тому, что многие из зерен либо вообще не участвуют в резании, преждевременно выкрашиваясь и вылетая из связки, либо деформируют поверхность материала, не срезая его [6].

Режущие свойства отдельных зерен алмазного инструмента используются недостаточно эффективно. Классификация зерен по форме способствует повышению эффективности их использования и дает

возможность математически интерпретировать протекание процесса резания алмазными зернами. Исходя из этого повышение эксплуатационных характеристик алмазного инструмента на основе использования зерен с контролируемой и упорядоченной формой является актуальной проблемой, решение которой может дать ощутимый практический результат.

Согласно источнику [7], форму зерна предлагается оценивать количественным методом с помощью коэффициента формы K_{ϕ} , который определяется как отношение площади описанной вокруг проекции зерна окружности $S_{o.o}$ к площади проекции зерна $S_{п.з}$: $K_{\phi} = S_{o.o} / S_{п.з}$.

Основное количество зерен находится в диапазоне $K_{\phi} = 1,34 \dots 2,19$ и имеет так называемую промежуточную форму, остальные зерна имеют изометрическую ($K_{\phi} = 1,0 \dots 1,34$) и игольчатую [$K_{\phi} = 2,19 \dots 2,7$] формы.

Форма алмазных зерен:

Проекция зерен изометрической формы	Проекция зерен промежуточной формы	Проекция зерен пластинчатой формы
		

Такой широкий разброс форм зерен не может не сказаться на работоспособности каждой из них, так как разница в форме зерен предопределяет различие в способности срезать обрабатываемый материал. Проводились исследования для оценки взаимосвязи формы зерен с их износом, из которых следуют выводы, что чем меньше коэффициент формы зерен, тем они прочнее: прочность изометрических зерен ($K_{\phi} \approx 1,80$) в 3,6...4,9 раз выше прочности пластинчатых зерен ($K_{\phi} \approx 3,13$) [9, 10]. Отсюда следует, что использование алмазных зерен изометрической формы может привести к повышению стойкости инструмента. Согласно стандартам (ГОСТ 3647–80), зерна разделены по группам зернистости, но это не предполагает, что все зерна в одной группе одинаковые, так как на самом деле внутри каждой группы зернистости алмазного порошка зерна имеют различную форму.

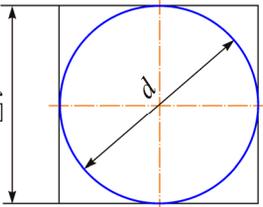
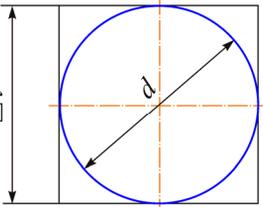
Выдвинем гипотезу, что повышение стойкости алмазного инструмента будет зависеть от геометрических параметров зерен алмазного

порошка, из которого они изготовлены, а геометрические показатели зависят от масс единичных зерен. Для выявления показателей масс (внутри каждой группы зернистости) проведем анализ их наиболее распространенных форм. Рассмотрим алмазные зерна изометрической формы (шаровидные, кубические) и пластинчатой формы (каплевидные, эллипсоидные). Для примера анализ проведен для группы зернистости 125/100, так как данная фракция наиболее распространена среди алмазного инструмента. Зернистость 125/100, согласно ГОСТ 9206–80, предусматривает, что алмазное зерно проходит через квадратное отверстие в сите размером $l = 125$ мкм и задерживается в сите, сторона квадратного отверстия которого $l = 100$ мкм

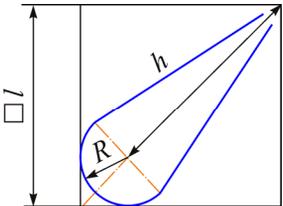
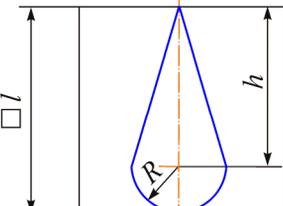
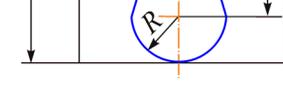
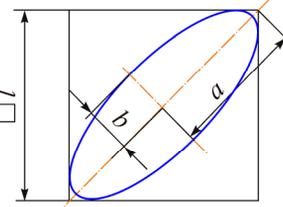
Сортировка для алмазных зерен по массе приведена с расчетами, при плотности алмаза $\rho = 3,53 \times 10^{-3} \text{ г/мм}^3$ (табл. 1).

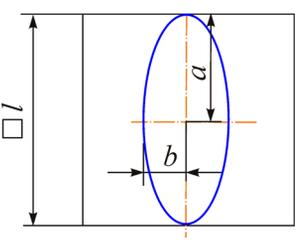
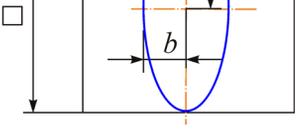
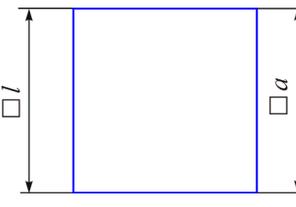
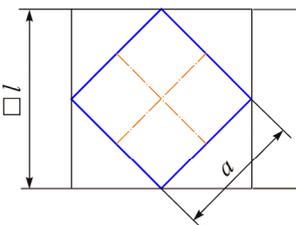
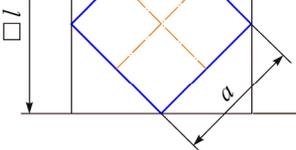
Таблица 1

Масса алмазных зерен фракции 125/100

№ п/п	l	Формы алмазов и чертеж их расположения в ячейке сита	Физические параметры	
			Объем V , мм ³	Масса m , г
1	125	Шаровидная форма 	$d = 125 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3}{3} =$ $= 1,02 \times 10^{-12} \text{ м}^3 = 0,00102 \text{ мм}^3$	$3,6 \times 10^{-6}$
2	100		$d = 100 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3}{3} =$ $= 5,23 \times 10^{-13} \text{ м}^3 = 0,00052 \text{ мм}^3$	$1,83 \times 10^{-6}$

Продолжение табл. 1

№ п/п	l	Формы алмазов и чертеж их расположения в ячейке сита	Физические параметры	
			Объем V, мм ³	Масса m, г
3	125	Каплевидная форма 	$R = 41,6 \times 10^{-6} \text{ м}, h = 104 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{1}{3} \pi (2R^3 + R^2 h) =$ $= 3,39 \times 10^{-13} \text{ м}^3 = 0,00034 \text{ мм}^3$	$1,2 \times 10^{-6}$
4	100		$R = 33,3 \times 10^{-6} \text{ м}, h = 83,3 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{1}{3} \pi (2R^3 + R^2 h) =$ $= 1,74 \times 10^{-13} \text{ м}^3 = 0,00017 \text{ мм}^3$	6×10^{-7}
5	125	Каплевидная форма 	$R = 35,7 \times 10^{-6} \text{ м},$ $h = 89,3 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{1}{3} \pi (2R^3 + R^2 h) =$ $= 2,14 \times 10^{-13} \text{ м}^3 = 0,00021 \text{ мм}^3$	$7,41 \times 10^{-7}$
6	100		$R = 28,6 \times 10^{-6} \text{ м}, h = 71,4 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{1}{3} \pi (2R^3 + R^2 h) =$ $= 1,10 \times 10^{-13} \text{ м}^3 = 0,00011 \text{ мм}^3$	$3,88 \times 10^{-7}$
7	125	Эллипсоидная форма 	$a = 75,3 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 41,6 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{4}{3} \pi a b^2 = 5,45 \times 10^{-13} \text{ м}^3 =$ $= 0,00054 \text{ мм}^3$	$1,9 \times 10^{-6}$
8	100		$a = 62,5 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 33,3 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{4}{3} \pi a b^2 = 2,9 \times 10^{-13} \text{ м}^3 =$ $= 0,00029 \text{ мм}^3$	$1,02 \times 10^{-6}$

№ п/п	l	Формы алмазов и чертеж их расположения в ячейке сита	Физические параметры	
			Объем V, мм ³	Масса m, г
9	125	Эллипсоидная форма 	$a = 62,5 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 34,6 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = \frac{4}{3} \pi a b^2 = 3,13 \times 10^{-13} \text{ м}^3 =$ $= 0,00031 \text{ мм}^3$	$1,09 \times 10^{-6}$
10	100		$a = 50 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 27,6 \times 10^{-6},$ $V = \frac{4}{3} \pi a b^2 = 1,59 \times 10^{-13} \text{ м}^3 =$ $= 0,00016 \text{ мм}^3$	$5,64 \times 10^{-7}$
11	125	Кубическая форма 	$a = 125 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = a^3 = 1,95 \times 10^{-12} \text{ м}^3 =$ $= 0,00195 \text{ мм}^3$	$6,88 \times 10^{-6}$
12	100		$a = 100 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = a^3 = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^3 =$ $= 0,001 \text{ мм}^3$	$3,53 \times 10^{-6}$
13	125	Кубическая форма 	$a = 88,4 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = a^3 = 6,9 \times 10^{-13} \text{ м}^3 =$ $= 0,00069 \text{ мм}^3$	$2,43 \times 10^{-6}$
14	100		$a = 70,7 \times 10^{-6} \text{ м},$ $V = a^3 = 3,53 \times 10^{-13} \text{ м}^3 =$ $= 0,00035 \text{ мм}^3$	$1,23 \times 10^{-6}$

Чем больше масса, тем инертнее зерно и тем труднее вывести его из состояния покоя или изменить его движение. Из табл. 1 следует, что алмазные зерна изометрической, а точнее кубической и шаровидной формы, будут инертнее удерживаться в связке инструмента, что может привести к повышению стойкости инструмента. Расставим различные формы алмазных зерен в порядке уменьшения массы (рис. 2).

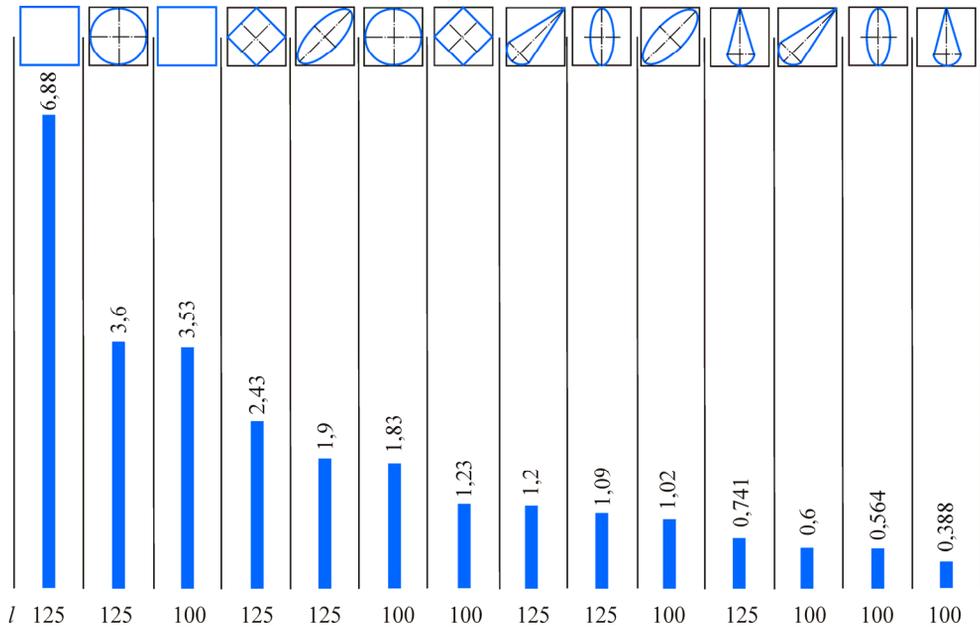


Рис. 2. Ранжирование форм единичных алмазных зерен по массе для фракции 125/100

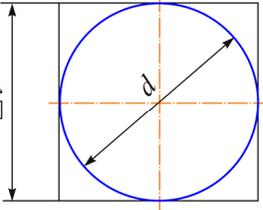
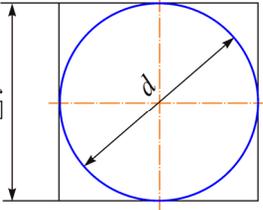
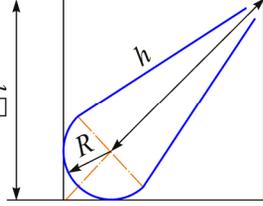
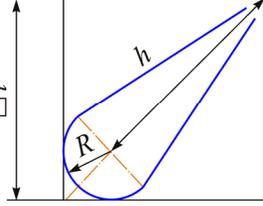
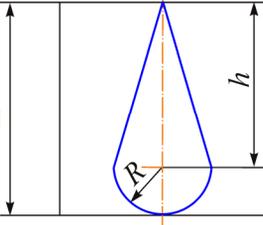
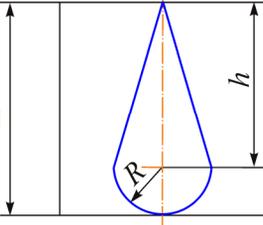
Выдвинем вторую гипотезу, что повышение стойкости алмазно-абразивного инструмента зависит от площади контакта зерна со связкой. Это объясняется следующим: чем больше площадь контакта, тем больше трение и сопротивление зерна в связке, появляется больше связей для сопротивления сдвигу. Отсюда следует, что зерна с наибольшей поверхностной площадью будут крепче удерживаться в связке и количество вырывов зерен уменьшится. Сортировка по поверхностной площади была произведена для группы зернистости 125/100, все расчеты сведены в табл. 2.

Из данных расчетов (см. табл. 2) можно сделать выводы, что наибольшая поверхностная площадь будет у алмазных зерен кубической и шаровидной форм. Это означает, что инструмент с кубическими, шаровидными зернами в рабочем слое будет превосходить по стойкости инструмент с иной формой зерен.

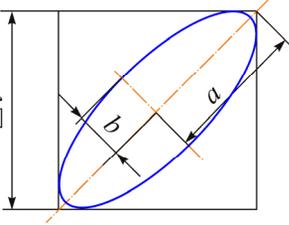
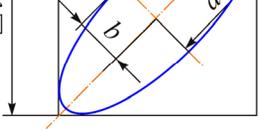
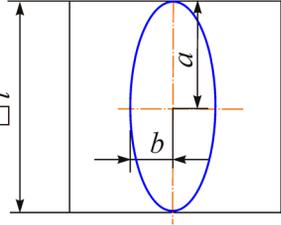
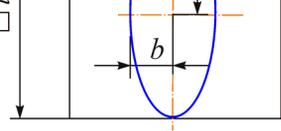
Проектируя алмазные зерна различных форм отдельных групп фракций в связке и подвергая их нагрузке, можно проверить выдвинутые гипотезы [11] и выявить формы единичных алмазных зерен, более подверженные перемещениям и вырывам из связки.

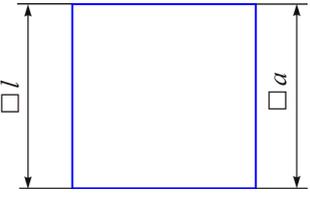
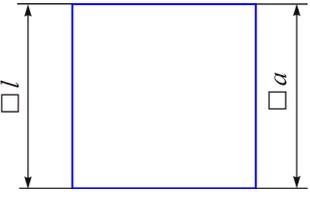
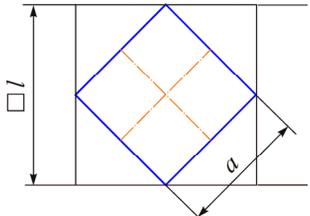
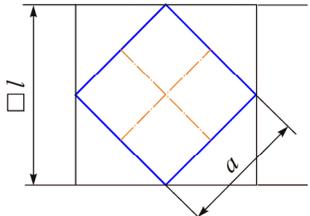
Таблица 2

Поверхностная площадь алмазных зерен фракции 125/100

№ п/п	l	Формы алмазов и чертеж их расположения в ячейке сита	Поверхностная площадь зерна S , мм ²
1	125	Шаровидная форма 	$d = 125 \times 10^{-6}$ м, $S = 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 4,908 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,04908 \text{ мм}^2$
2	100		$d = 100 \times 10^{-6}$ м, $S = 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 3,141 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,03141 \text{ мм}^2$
3	125	Каплевидная форма 	$R = 41,6 \times 10^{-6}$ м, $h = 104 \times 10^{-6}$ м, $S = \pi \left(2R^2 + R\sqrt{R^2 + h^2}\right) =$ $= 2,551 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,02551 \text{ мм}^2$
4	100		$R = 33,3 \times 10^{-6}$ м, $h = 83,3 \times 10^{-6}$ м, $S = \pi \left(2R^2 + R\sqrt{R^2 + h^2}\right) =$ $= 1,635 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,01635 \text{ мм}^2$
5	125	Каплевидная форма 	$R = 35,7 \times 10^{-6}$ м, $h = 89,3 \times 10^{-6}$ м, $S = \pi \left(2R^2 + R\sqrt{R^2 + h^2}\right) =$ $= 1,879 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,01879 \text{ мм}^2$
6	100		$R = 28,6 \times 10^{-6}$ м, $h = 71,4 \times 10^{-6}$ м, $S = \pi \left(2R^2 + R\sqrt{R^2 + h^2}\right) =$ $= 1,205 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,01205 \text{ мм}^2$

Продолжение табл. 2

№ п/п	l	Формы алмазов и чертеж их расположения в ячейке сита	Поверхностная площадь зерна S , мм^2
7	125	<p>Эллипсоидная форма</p> 	$a = 75,3 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 41,6 \times 10^{-6} \text{ м},$ $S = 2\pi b \left(b + \frac{a^2 \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}}{\sqrt{a^2 - b^2}} \right) =$ $= 3,414 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,03414 \text{ мм}^2$
8	100		$a = 62,5 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 33,3 \times 10^{-6} \text{ м},$ $S = 2\pi b \left(b + \frac{a^2 \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}}{\sqrt{a^2 - b^2}} \right) =$ $= 2,256 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,02256 \text{ мм}^2$
9	125	<p>Эллипсоидная форма</p> 	$a = 62,5 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 34,6 \times 10^{-6} \text{ м},$ $S = 2\pi b \left(b + \frac{a^2 \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}}{\sqrt{a^2 - b^2}} \right) =$ $= 2,358 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,02358 \text{ мм}^2$
10	100		$a = 50 \times 10^{-6} \text{ м}, b = 27,6 \times 10^{-6} \text{ м},$ $S = 2\pi b \left(b + \frac{a^2 \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}}{\sqrt{a^2 - b^2}} \right) =$ $= 1,504 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,01504 \text{ мм}^2$

№ п/п	l	Формы алмазов и чертеж их расположения в ячейке сита	Поверхностная площадь зерна S , мм^2
11	125	Кубическая форма 	$a = 125 \times 10^{-6}$ м, $S = 6H^2 = 9,375 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,09375 \text{ мм}^2$
12	100		$a = 100 \times 10^{-6}$ м, $S = 6H^2 = 6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,06 \text{ мм}^2$
13	125	Кубическая форма 	$a = 88,4 \times 10^{-6}$ м, $S = 6H^2 = 4,689 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,04689 \text{ мм}^2$
14	100		$a = 70,7 \times 10^{-6}$ м, $S = 6H^2 = 2,999 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,02999 \text{ мм}^2$

Для оценки перемещений алмазных зерен в связке сначала были созданы модели единичных алмазных зерен различных форм и модели фрагментов связок на основе никеля, в которые углублены эти зерна.

Моделирование проводилось в среде NX Advanced Simulation, где вручную задавались физико-механические свойства алмазного зерна и никелевой связки. Для алмазного зерна удельная плотность $\rho = 3,5 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 1 \times 10^{12} \text{ Па}$, твердость $HV = 8000 \text{ кг/мм}^2$. Для никеля удельная плотность $\rho = 8,9 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 2,08 \times 10^{11} \text{ Па}$, модуль сдвига $G = 7,9 \times 10^{10} \text{ Па}$, твердость $HV = 90 \text{ кг/мм}^2$. Затем в этой же программной среде было смоделировано действие результирующей силы $P_R = 10 \text{ кгс}$ (рис. 3), значение которой взято из работы [12].

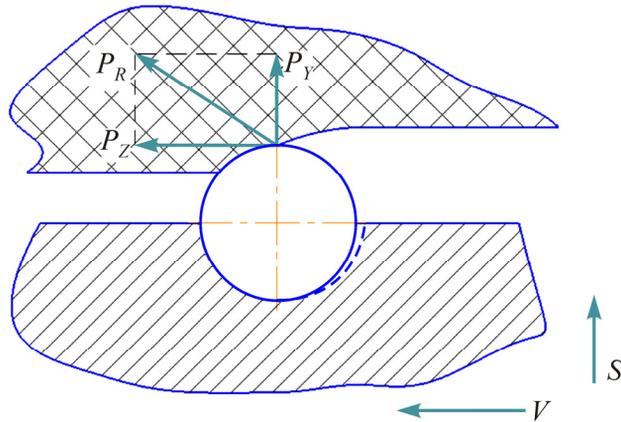
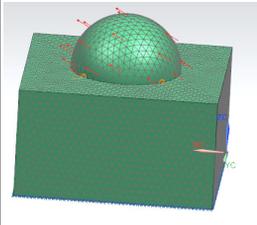
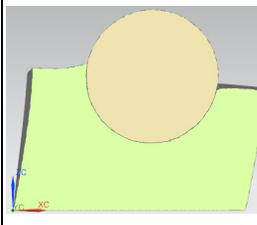
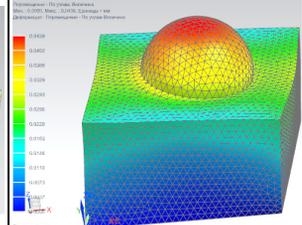


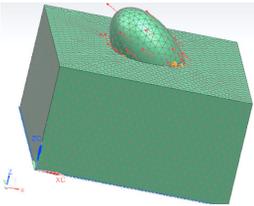
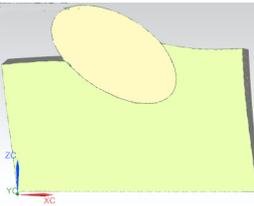
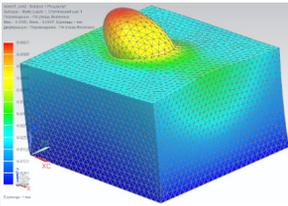
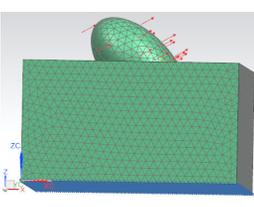
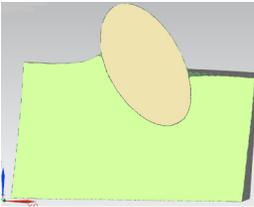
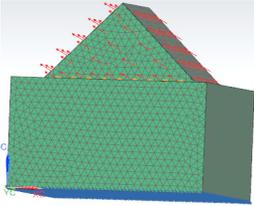
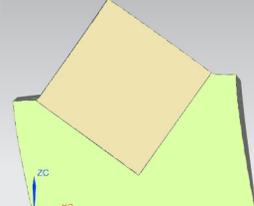
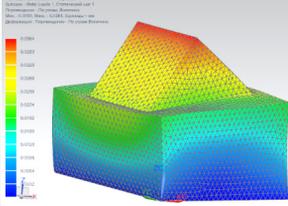
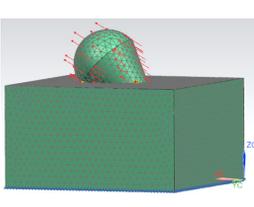
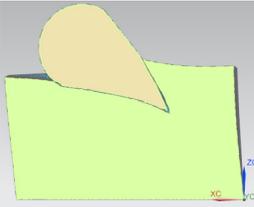
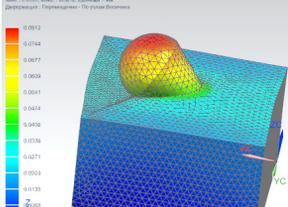
Рис. 3. Схема сил резания, действующих на единичное зерно шаровидной формы: P_Y – радиальная составляющая силы резания; P_Z – тангенциальная составляющая сила резания; P_R – равнодействующая силы резания

В моделях каждое алмазное зерно было углублено в связку под углом 45° , результирующая сил резания (одной величины) направлена как на связку (на сжатие), так и в обратную сторону – из связки (на отрыв). Результаты моделирования перемещений алмазных зерен различных форм, выполненного с помощью программного комплекса NX Advanced Simulation, при воздействии на них силы в различных направлениях представлены в табл. 3.

Таблица 3

Перемещения единичных алмазных зерен в связке под действием силы

Модель	Сечение	Эпюра перемещений	Величина перемещений, мм
			0,0439

Модель	Сечение	Эпюра перемещений	Величина перемещений, мм
			0,0607
			0,0837
			0,0384
			0,0812

В ходе проведенного численного эксперимента были выявлены наименьшие перемещения в связке у зерен кубической и шаровидной форм, перемещение от равнодействующей силы $P_R = 10$ кгс составили 0,0439 мм (шаровидная форма); 0,0384 (кубическая форма). Это значит, что использование в алмазном инструменте таких форм зерен существенно повысит износостойкость инструмента.

Таким образом, и расчеты по массе, и расчеты по площади поверхности, и расчеты в NX Advanced Simulation подтвердили наибольшую устойчивость зерен шаровидной и кубических форм. Но известно, что лучшими режущими свойствами обладают зерна с острыми гранями [13, 14, 15], т.е. наиболее целесообразно применение зерен кубической формы.

Открытым остается вопрос о способах сортировки алмазных зерен по форме внутри каждой группы зернистости при производстве алмазного инструмента, но это является темой отдельного исследования.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Найден резерв повышения работоспособности алмазного инструмента за счет управления выбором форм алмазных зерен.

2. На основе первой гипотезы, по принципу наибольших масс, наиболее эффективно использование в алмазном инструменте, с целью повышения износостойкости, алмазных зерен шаровидной и кубической форм.

3. На основе второй гипотезы, по принципу наибольшей поверхностной площади, наиболее эффективно использование в алмазном инструменте, с целью повышения износостойкости, алмазных зерен шаровидной и кубической форм.

4. Численное моделирование в программном комплексе NX Advanced Simulation показало наибольшую эффективность применения алмазных зерен кубической и шаровидной форм.

Список литературы

1. Маслов Е.Н., Постникова Н.В. Основные направления в развитии теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом. – М.: Машиностроение, 1975. – 48 с.

2. Дударев А.С., Свирщев В.И., Захарова С.П. Цели и задачи создания инструмента с упорядоченно ориентированными в рабочем слое зернами для механической обработки полимерных композиционных материалов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 253–257.

3. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Рубец А.А. Неразрушающий метод оценки режущей способности кругов с однослойным алмазнодорожно-гальваническим покрытием // СТИН. – 2015. – № 9. – С. 11–13.

4. Попов А.В. Оценка работоспособности алмазных шлифовальных кругов по скорости относительного изнашивания связки // Вестник машиностроения. – 2010. – № 10. – С. 78–80.

5. Дударев А.С. Конструкции сверл и фрез для алмазно-абразивной обработки стеклопластиков и углепластиков // Известия ТулГУ. – 2012. – № 1. – С. 361–370.

6. Коротков В.А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов на основе использования зерен с контролируемой формой и ориентацией: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. – 18 с.

7. Люкшин В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования зерен с контролируемой формой и ориентацией: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. – 20 с.

8. Шатько Д.Б. Эксплуатационные возможности шлифовальных инструментов на гибкой основе, изготовленных из зерен с контролируемой формой // Обработка материалов: современные проблемы и пути решения. – Кемерово, 2015. – С. 126–131.

9. Коротков А.Н. Исследование прочности шлифовальных инструментов с целью улучшения их режущей способности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Моск. станкоинструмент. ин-т. – М., 1980. – 20 с.

10. Коротков В.А. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой // Обработка металлов. – 2014. – № 2. – С. 62–77.

11. Ардашев Д.В., Болдырев И.С. Напряженно-деформированное состояние абразивного зерна в процессах шлифования // Технология машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 27–30.

12. Дударев А.С., Свирщев В.И. Повышение эффективности сверления отверстий в полимерных композиционных материалах // Технология машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 23–26.

13. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – Киев: Наук. думка, 1978. – 207 с.

14. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб [и др.]. – Киев: Техніка, 1978. – 192 с.

15. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. 3D-моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования. – Харьков, 2006. – 364 с.

References

1. Maslov E.N., Postnikova N.V. Osnovnye napravleniia v razvitiit teorii rezaniia abrazivnym, almaznym i el'borovym instrumentom [The main directions in development of the theory of cutting by the abrasive, diamond and elborovy tool]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 48 p.

2. Dudarev A.S., Svirshchev V.I., Zakharova S.P. Tseli i zadachi sozdaniia instrumenta s uporiadochenno orientirovannymi v rabochem sloe zernami dlia mekhanicheskoi obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov [The purposes and problems of creation of the tool with it is ordered by the grains focused in a working layer for machining of polymeric composite materials]. *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Aerokosmicheskaiia tekhnika, vysokie technologii i innovatsii – 2015"*. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 253-257.

3. Petukhov Iu.E., Domnin P.V., Rubets A.A. Nerazrushaiushchii metod otsenki rezhushchei sposobnosti krugov s odnosloinym almaznogal'vanicheskim pokrytiem [Nondestructive method of assessment of the cutting ability of circles with single-layer diamond electroplated coating]. *Stanki Instrument*, 2015, no. 9, pp. 11-13.

4. Popov A.V. Otsenka rabotosposobnosti almaznykh shlifoval'nykh krugov po skorosti odnositel'nogo iznashivaniia sviazki [Assessment of operability of diamond grinding wheels on the speed of relative wear of a sheaf]. *Vestnik mashinostroeniia*, 2010, no. 10, pp. 78-80.

5. Dudarev A.S. Konstruktsii sverl i frez dlia almazno-abrazivnoi obrabotki stekloplastikov i ugleplastikov [Designs of drills and mills for diamond and abrasive processing of fibreglasses and coal plastics]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1, pp. 361-370.

6. Korotkov V.A. Povyslenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostei otreznykh shlifoval'nykh krugov na osnove ispol'zovaniia zeren s kontroliruemoi formoi i orientatsiei [Increase in operational opportunities of cutting grinding wheels on the basis of use of grains with a controlled form and orientation]. Abstract of the Ph. D. thesis. Tomskii politekhnicheskii universitet, 2008. 18 p.

7. Liukshin V.S. Povyshenie rabotosposobnosti shlifoval'nykh lent putem ispol'zovaniia zeren s kontroliruemoi formoi i orientatsiei [Increase in operability of sanding belts by use of grains with a controlled form and orientation]. Abstract of the Ph. D. thesis. Tomskii politekhnicheskii universitet, 2007. 20 p.

8. Shat'ko D.B. Ekspluatatsionnye vozmozhnosti shchlifoval'nykh instrumentov na gibkoi osnove, izgotovlennykh iz zeren s kontroli-ruemoi formoi [Ekspluatatsionny opportunities of the grinding tools on a flexible basis manufactured of grains with a controlled form]. *Obrabotka materialov: sovremennye problemy i puti resheniia*. Kemerovo, 2015, pp. 126-131.

9. Korotkov A.N. Issledovanie prochnosti shlifoval'nykh instrumentov s tsel'iu uluchsheniia ikh rezhushchei sposobnosti [Research of durability of grinding tools for the purpose of improvement of their cutting ability]. Abstract of the Ph. D. thesis. Moskovskii stankoinstrumental'nyi institut, 1980. 20 p.

10. Korotkov V.A. Geometriia i napriazhennoe sostoianie orientirovannykh shlifoval'nykh zeren s kontroliruemoi formoi [Geometry and stress of the focused grinding grains with a controlled form]. *Obrabotka metallov*, 2014, no. 2, pp. 62-77.

11. Ardashev D.V., Boldyrev I.S. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie abrazivnogo zerna v protsessakh shlifovaniia [The intense deformed condition of abrasive grain in grinding processes]. *Tekhnologiiia mashinostroeniia*, 2014, no. 11, pp. 27-30.

12. Dudarev A.S., Svirshchev V.I. Povyshenie effektivnosti sverleniia otverstii v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [Increase in efficiency of drilling of openings in polymeric composite materials]. *Tekhnologiiia mashinostroeniia*, 2009, no. 7, pp. 23-26.

13. Baikalov A.K. Vvedenie v teoriuu shlifovaniia materialov [Introduction to the theory of grinding of materials]. Kiev: Naukova dumka, 1978. 207 p.

14. Semko M.F., Grabchenko A.I., Rab A.F. [et al.]. Osnovy almaznogo shlifovaniia [Bases of diamond grinding]. Kiev: Tekhnika, 1978. 192 p.

15. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A. 3D-modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia [3D-modeling of diamond and abrasive tools and processes of grinding]. Khar'kov, 2006. 364 p.

Получено 9.09.2016

Об авторах

Дударев Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ktn80@mail.ru.

Захарова Светлана Павловна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Svetuk3000@gmail.com.

About the authors

Aleksandr S. Dudarev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ktn80@mail.ru.

Svetlana P. Zakharova (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Svetuk3000@gmail.com.