

**Н. В. Новиков, Г. П. Богатырева, Г. Д. Ильницкая,
Р. К. Богданов, Г. Ф. Невструев, А. П. Загора,
А. М. Исонкин, В. Н. Ткач, И. Н. Зайцева (г. Киев)**

Повышение износостойкости бурового инструмента, оснащенного синтетическими алмазами

Представлены результаты исследования влияния физико-химических и физико-механических свойств шлифпорошков синтетических алмазов на эксплуатационные характеристики бурового инструмента. Показано увеличение износостойкости бурового инструмента при оснащении его алмазными шлифпорошками с высокой однородностью по прочности. Установлено, что использование алмазных шлифпорошков с более развитой поверхностью способствует лучшему удержанию зерен алмаза в связке и уменьшает износ бурового инструмента.

Ключевые слова: износостойкость, буровой инструмент, синтетические алмазы, шлифпорошки.

Введение. Возрастающая потребность в полезных ископаемых способствует необходимости разведки новых месторождений и тем самым росту объемов бурения. Основой процесса бурения является концепция разрушения горной породы и удаления продуктов ее разрушения с забоя скважины. При этом научно обоснованная разработка конструкций алмазных коронок, вопросы их выбора применительно к конкретным геологотехническим условиям и установление рациональных параметров режима бурения должны базироваться на закономерностях разрушения горных пород единичными кристаллами алмаза с учетом специфики их работы в коронке [1]. Поэтому эффективность работы бурового инструмента при геологоразведочных работах во многом зависит от качества применяемых алмазов. Расширение областей применения нового бурового инструмента возможно при использовании в нем высокопрочных синтетических алмазов. На основе алмазов марок АС100 и выше были созданы различные абразивные композиции с металлической связкой [2], которая является важнейшим элементом рабочего слоя алмазного инструмента, поскольку обеспечивает удержание зерен алмаза на рабочей поверхности в течение всего периода их эффективной работы.

В процессе работы бурового инструмента основным видом износа синтетических алмазов является хрупкое разрушение отдельных выступающих частей алмазного зерна вследствие развития в нем микротрещин при контакте с породой [3]. При бурении импрегнированной коронкой осевая нагрузка распределяется неравномерно по всей площади поверхности алмазосодержащей матрицы, а перераспределяется между алмазами, наиболее выступающими из поверхности матрицы. Учитывая, что характер распределения высоты выступания алмазов из тела матрицы соответствует характеру распре-

ления осевых усилий, передаваемых на алмаз в процессе бурения, алмазы с наибольшими высотами выступания нагружаются в десятки раз больше и мгновенно разрушаются. Уменьшить усилия на алмаз можно, обеспечив их одинаковое выступание по высоте из тела матрицы за счет применения алмазов, однородных по размеру и прочности.

В буровом инструменте, как правило, применяют высокопрочные термостойкие марки алмазов с малой удельной поверхностью, что усложняет возможность их удержания в связке при высоких удельных нагрузках. Естественная шероховатость поверхности кристаллов является следствием анизотропии поверхностной энергии, и для синтетических алмазов это отражается в снижении шероховатости поверхности с переходом к практически гладкой поверхности по мере увеличения прочности кристаллов.

Повысить прочность удержания зерен высокопрочных алмазов в металлической связке можно направленным увеличением степени дефектности поверхности зерен без снижения их прочности, что получают при воздействии на поверхность искажающих ее факторов, таких как механическая или химическая обработка, облучение и т. п.

В результате совершенствования процесса синтеза рядом ведущих зарубежных фирм получены алмазы с очень высокой прочностью, из которых могут быть изготовлены высокопрочные порошки синтетического алмаза марок АС200—АС400 [4]. Поэтому целью данной работы было исследование влияния физико-химических и физико-механических свойств высокопрочных шлифпорошков синтетических алмазов на эксплуатационные характеристики бурового инструмента.

Методика эксперимента и исходные материалы. Исследования проводили на алмазных шлифпорошках зернистостью 400/315 марки АС200, синтезированных в системе железо—никель—углерод. Разделение их по дефектности поверхности осуществляли сортировкой по физико-химическим характеристикам [5, 6]. Из этих порошков изготовили шесть образцов, которые были подвергнуты термической обработке в воздушной и инертной средах при температурах от 400 до 1100 °С. Была определена прочность порошков [7, 8] и удельная магнитная восприимчивость [9, 10]. Дефектность поверхности зерен алмазных шлифпорошков оценивали по коэффициенту поверхностной активности K_a [11].

Общее содержание примесей и включений в порошках алмаза измеряли методом рентгенофлуоресцентного интегрального анализа с использованием растрового электронного микроскопа BS-340 и энергодисперсного анализатора рентгеновских спектров “Link-860” [12]. Коэффициент однородности шлифпорошков синтетического алмаза $K_{одн}$ определяли по показателю статической прочности и оценивали по суммарному содержанию зерен, разрушающая нагрузка которых находится в интервалах прочности для номинальной марки в соответствии с ДСТУ 3292 [13]. Термостабильность оценивали по коэффициенту термостабильности $K_{ст}$ [14].

Оценку эксплуатационных характеристик бурового инструмента производили по величине интенсивности его изнашивания при трении о горную породу [15].

Результаты и обсуждение. Для проведения исследований были изготовлены образцы шлифпорошков алмаза с разной степенью дефектности поверхности. В этих образцах определяли прочность и до (P) и после ($P_{т.о}$) термической обработки при 1100 °С, коэффициент термостабильности $K_{ст}$, ко-

эффицент однородности шлифпорошков синтетического алмаза $K_{\text{одн}}$, удельную магнитную восприимчивость χ , содержание примесей и включений в кристаллах алмаза β (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики образцов высокопрочных порошков алмаза зернистости 400/315

Характеристика	Образец					
	1	2	3	4	5	6
$K_a, \%$	0,05	0,09	0,12	0,15	0,19	0,23
$P, \text{Н}$	414,2	375,4	358,0	342,3	325,8	305,5
$P_{\text{т.о.}}, \text{Н}$	393,5	352,9	304,3	277,3	260,6	220,0
$K_{\text{одн}}, \%$	76,0	70,0	64,0	56,0	65,0	48,0
$K_{\text{ст}}, \text{усл. ед.}$	0,95	0,94	0,85	0,81	0,80	0,72
$\chi \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$	3,2	9,3	10,2	14,5	17,3	24,7
$\beta, \%$ (по массе)	0,331	—	0,439	—	—	0,617

Как следует из табл. 1, образцы шлифпорошков алмаза отличаются между собой по степени дефектности поверхности, прочностным характеристикам, магнитным свойствам и содержанию в них примесей и включений.

Кристаллы алмаза образца 1 имеют низкую (0,05 %) степень дефектности поверхности, которая в пять раз ниже, чем у образца 6. При этом прочность (исходная) шлифпорошков алмаза образца 1 на 26,3 % выше прочности шлифпорошков алмаза образца 6.

На рис. 1 показана зависимость прочности алмазов от степени дефектности их поверхности. Как видно, прочность, как основная технологическая характеристика алмазных шлифпорошков при статическом сжатии зерен алмаза, увеличивается при снижении степени дефектности их поверхности.

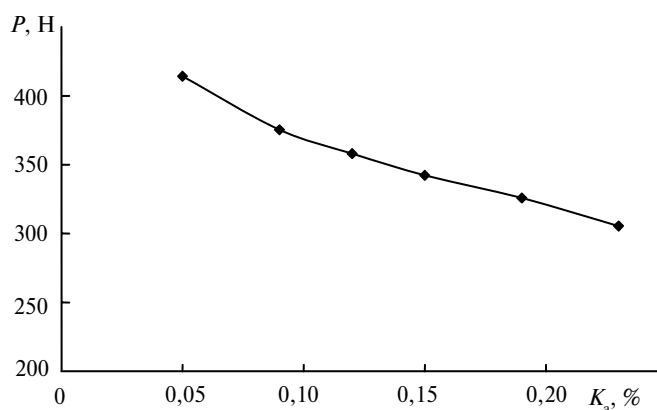


Рис. 1. Зависимость прочности алмазов от дефектности поверхности.

В результате проведенных исследований установлено, что образцы 1—6 алмаза с разными прочностными характеристиками (P , $P_{\text{т.о.}}$, $K_{\text{ст}}$) различаются между собой по магнитным свойствам. На рис. 2 показано изменение прочностных характеристик высокопрочных шлифпорошков алмаза в зависимости от χ . Как следует из рис. 2, а, на котором представлена зависимость прочности исходных порошков до и после термического воздействия при 1100 °С

от χ , с увеличением удельной магнитной восприимчивости прочностные характеристики, как P так и $P_{т.о.}$, снижаются для всех образцов. При этом прочность образца 1 с удельной магнитной восприимчивостью $\chi = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ после термической обработки падает приблизительно на 5 %, а образца 6 с $\chi = 24,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ — на 22 %. Коэффициент термостабильности $K_{ст}$ также уменьшается с увеличением удельной магнитной восприимчивости (см. рис. 2, б).

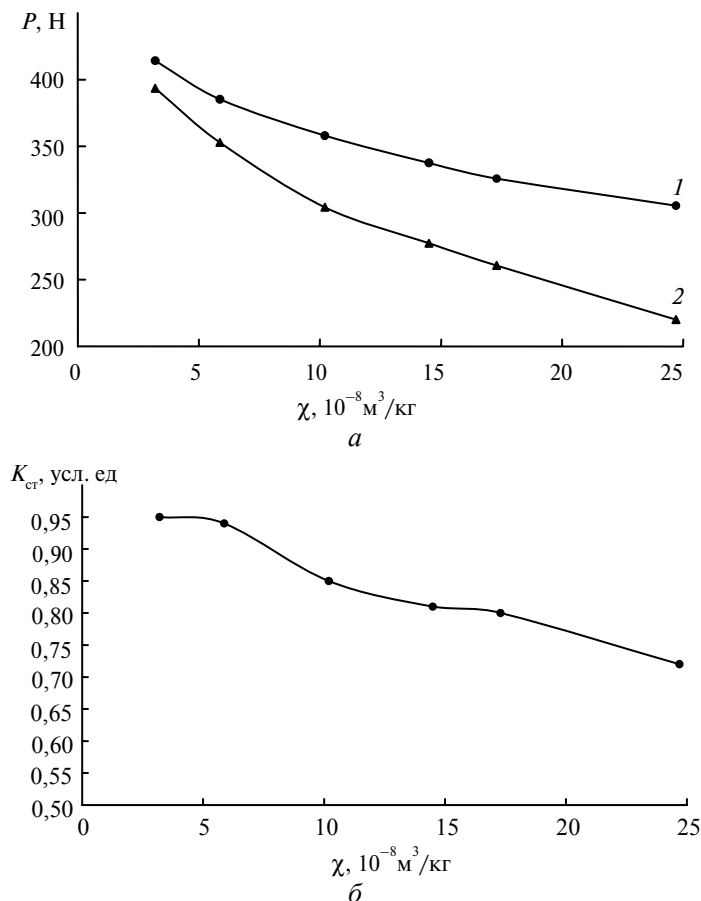


Рис. 2. Зависимость прочности (а) до (1) и после (2) термической обработки высокопрочных шлифпорошков алмаза зернистостью 400/315 и их коэффициента стабильности (б) от удельной магнитной восприимчивости.

Изучение влияния термических воздействий на прочность высокопрочных шлифпорошков алмаза с различной удельной магнитной восприимчивостью выполняли на образцах 1, 3 и 6, предварительно подвергнутых термообработке в воздушной и инертной средах при температуре 400—1100 °С (рис. 3). Как видно (см. рис. 3, а), прочность кристаллов алмаза в результате термической обработки в инертной среде снижается во всех образцах.

Шлифпорошки образцов 1 и 6 подвергали термообработке в воздушной среде при температуре от 400 до 1100 °С (рис. 3, б). После обработки прочность образца 1 уменьшилась на 12 %, образца 6 — на 57 %.

Таким образом, прочность кристаллов алмазов высокопрочных порошков, как в инертной, так и воздушной среде, снижается с увеличением температуры термической обработки. При этом в воздушной среде прочность с ростом

температуры снижается интенсивнее приблизительно в два раза. Уменьшение прочности кристаллов алмаза тем больше, чем выше их удельная магнитная восприимчивость.

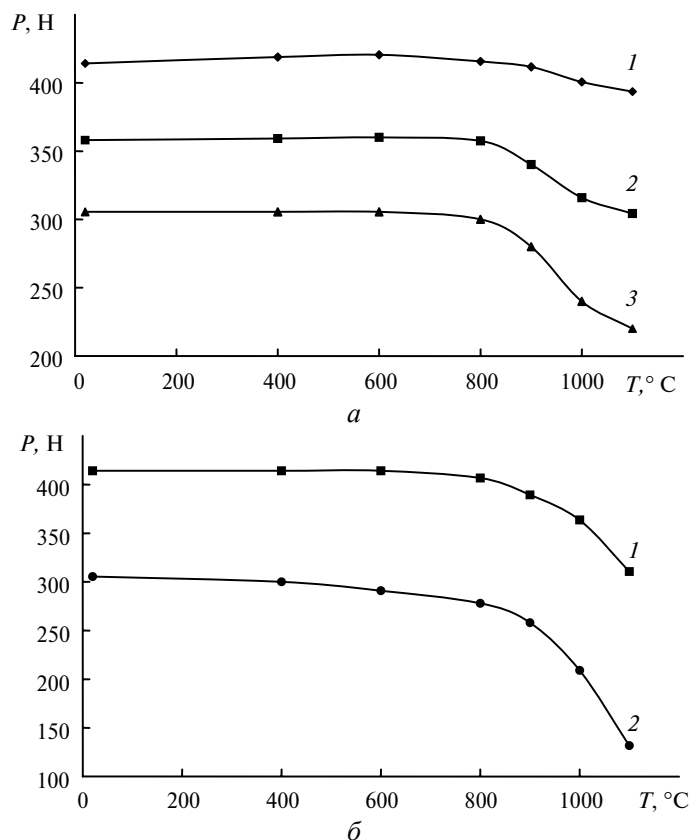


Рис. 3. Зависимость прочности алмазов зернистостью 400/315 от температуры в инертной среде образцов 1 (1), 3 (2), 6 (3) (а) и в воздушной среде образцов 1 (1) и 6 (2) (б).

В ходе выполнения исследований алмазных шлифпорошков методом рентгенофлуоресцентного интегрального анализа с использованием растрового электронного микроскопа BS-340 было определено общее содержание примесей и включений в образцах 1—6 и их элементный состав в образцах 1, 3 и 6 (табл. 2 и 3). Как следует из таблиц, элементный состав примесей и включений в образцах, в основном, представлен элементами сплава-растворителя — железом и никелем.

Таблица 2. Элементный состав и общее содержание примесей и включений в алмазных шлифпорошках

Образец	Элементный состав, %								
	Mg	Al	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Mn	Cu
1			0,015		0,161	0,016	0,114	0,003	0,022
2									
3			0,026		0,212	0,031	0,124	0,007	0,039
4									
5									
6	0,014	0,060	0,040	0,016	0,222	0,058	0,139	0,010	0,058

Таблица 3. Содержание примесей и включений в алмазных шлифпорошках

Образец	$\chi, \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$	$\beta, \%$ (ат.)	$\beta_{\text{сп}}, \%$ (ат.)	$\beta_{\text{сп}}/\beta$
1	3,2	0,331	0,275	0,830
3	10,2	0,439	0,336	0,821
6	24,7	0,617	0,289	0,737

Примечание. $\beta_{\text{сп}}$ — содержание примесей и включений сплава-растворителя.

Содержание примесей и включений в шлифпорошках алмаза тесно связано с магнитными свойствами этих порошков [11]. Из табл. 3 видно, что при увеличении содержания примесей и включений в высокопрочных шлифпорошках алмаза возрастает их удельная магнитная восприимчивость.

Изменение прочностных характеристик шлифпорошков алмаза (P , $P_{\text{т.о}}$) образцов 3—6 до и после термического воздействия в зависимости от содержания в них примесей и включений показано на рис. 4. Как видно, увеличение содержания примесей и включений в образцах на 46,4 % (с 0,331 % (ат.) в образце 1 до 0,617 % (ат.) в образце 6) способствует снижению прочности исходных шлифпорошков на 5 %, а после термических воздействий — на 22,7 %. Исходя из этого, для увеличения термостабильности шлифпорошков алмаза имеет смысл дополнительно выполнять магнитную сепарацию для отделения кристаллов алмаза с высоким содержанием в них внутрикристаллических включений и примесей.

Полученные образцы синтетических алмазов с различной однородностью по прочности, с разной степенью дефектности поверхности и содержанием примесей и включений были использованы при изготовлении бурового инструмента, испытанного в лабораторных условиях.

Сравнительные испытания на износостойкость бурового инструмента были проведены посредством бурения коростышевского гранита в лабораторных условиях при частоте вращения 600 мин^{-1} и удельной нагрузке 8 МПа. Результаты испытаний (рис. 5) свидетельствуют о том, что интенсивность его изнашивания при использовании порошка алмаза более однородного по прочности уменьшается с $0,25 \cdot 10^{-4} \text{ мм/м}$ для образца 6 ($K_{\text{одн}} = 48 \%$) до $0,17 \cdot 10^{-4} \text{ мм/м}$ для образца 1 ($K_{\text{одн}} = 76 \%$).

На наш взгляд, использование более однородных по прочности порошков алмаза способствует более равномерному распределению нагрузок на зерна алмаза и тем самым уменьшает интенсивность их разрушения.

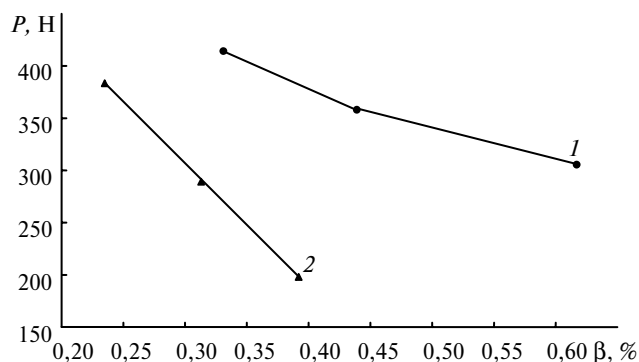


Рис. 4. Зависимость прочности алмазов от содержания включений образцов 1, 3 и 6 до (1) и после (2) термообработки.

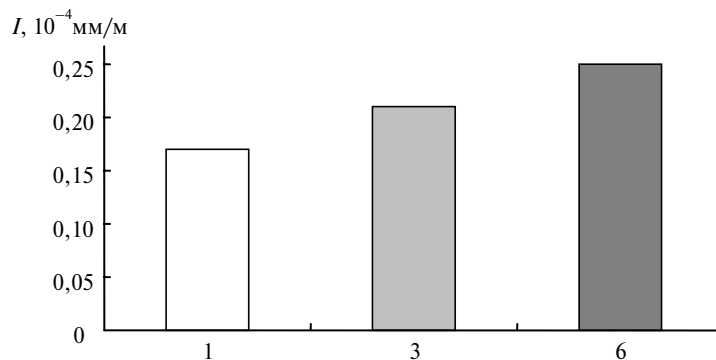


Рис. 5. Интенсивность изнашивания бурового инструмента при использовании образцов алмазов 1, 3, 6.

С целью повышения прочности удержания высокопрочных алмазов в металлической связке было проведена их специальная механическая и термохимическая обработка, предназначенная для увеличения дефектности поверхности кристаллов алмаза. Результаты испытаний бурового инструмента, изготовленного из алмазов с различной дефектностью, представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, с увеличением дефектности поверхности зерен алмаза происходит снижение интенсивности изнашивания бурового инструмента. Увеличение дефектности поверхности зерен алмаза способствует более прочному контактному взаимодействию зерен алмаза с металлической связкой и обеспечивает лучшее удержание зерен алмаза в связке и тем самым снижает интенсивность изнашивания инструмента. Так, например, при использовании порошка алмаза с более гладкой ($K_a = 0,10 \%$) поверхностью интенсивность изнашивания I составляет $0,18 \cdot 10^{-4} \text{ мм/м}$, а при более дефектной ($K_a = 0,25 \%$) — $0,12 \cdot 10^{-4} \text{ мм/м}$.

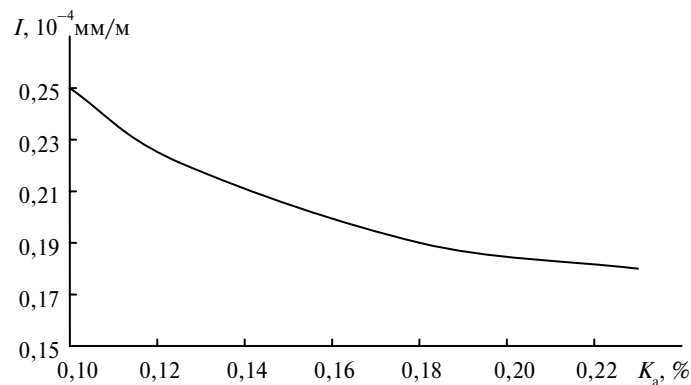


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания бурового инструмента от степени дефектности порошков алмаза.

Зависимость интенсивности изнашивания бурового инструмента от содержания примесей и включений (рис. 7) показывает, что с увеличением содержания примесей и включений в кристаллах алмаза образцов 1, 3 и 6 их интенсивность изнашивания также увеличивается.

Дополнительным подтверждением более высокой износостойкости породоразрушающих инструментов, оснащенных алмазами с низкой степенью

дефектности поверхности, разной однородностью и более высокой прочностью, являются исследования их рабочего торца (рис. 8).

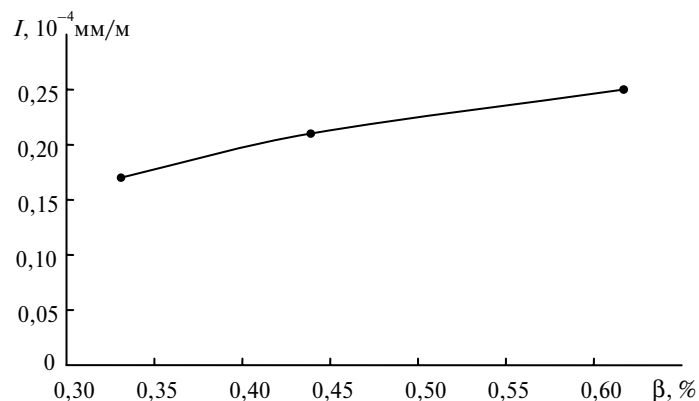


Рис. 7. Зависимость интенсивности изнашивания бурового инструмента от содержания примесей и включений в шлифпорошках алмаза.

Сравнительный анализ состояния алмазных зерен на поверхности коронки, импрегнированной алмазами образцов 1 и 6, показывает явную перспективность оснащения бурового инструмента синтетическими алмазами с низкой степенью дефектности поверхности, более высокой однородностью и прочностью. На поверхности коронки, импрегнированной алмазами образца 1, по сравнению с коронкой, импрегнированной алмазами образца 6, находится большее количество целых неразрушенных зерен алмазов, что позволяет уменьшить степень воздействия частиц шлама горной породы на материал матрицы бурового инструмента и тем самым снизить интенсивность его изнашивания.

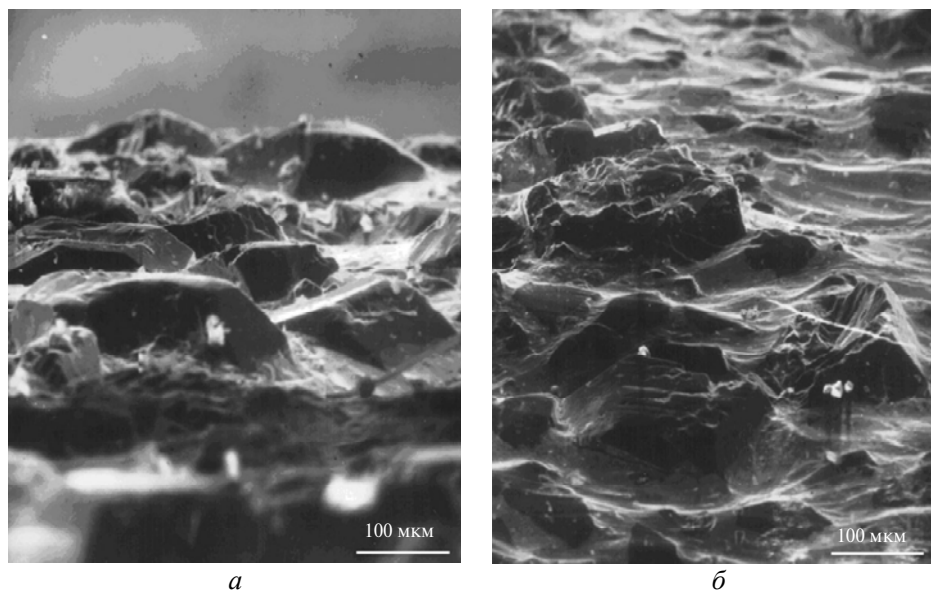


Рис. 8. Виды поверхности породоразрушающего инструмента, оснащенного синтетическими алмазами с различными коэффициентами однородности: $\chi = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $K_{\text{одн}} = 76 \%$, $\beta = 0,331 \%$ (по массе) (а); $\chi = 24,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $K_{\text{одн}} = 48 \%$, $\beta = 0,617 \%$ (по массе) (б).

Выводы

Прочность кристаллов алмазов высокопрочных порошков, синтезированных в системе железо—никель—углерод, как в инертной, так и воздушной среде снижается с увеличением температуры термической обработки. При этом в воздушной среде прочность с ростом температуры снижается приблизительно в два раза интенсивнее. Падение прочности кристаллов алмаза тем больше, чем выше в них содержание примесей и включений.

Повышение однородности шлифпорошков алмаза по прочности уменьшает износ породоразрушающего инструмента в 1,5—2,5 раза. Интенсивность изнашивания инструмента уменьшается в 1,2—1,7 раза при использовании порошков алмаза с более развитой поверхностью.

Таким образом, использование порошков синтетических алмазов с низкой степенью дефектности поверхности, более высокой однородностью и прочностью способствует снижению вероятности разрушения их вершин, активно разрушающих горную породу, и тем самым позволяет повысить работоспособность породоразрушающего инструмента.

1. *Исонкин А. М., Богданов Р. К., Загора А. П.* Эффективность разрушения горной породы буровыми коронками, оснащенными синтетическими алмазами разной прочности // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006. — Вып. 9. — С. 21—24.*
2. *Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Богданов Р. К. и др.* Однородные термочувствительные алмазные шлифпорошки для бурового импрегнированного инструмента // *Сверхтв. материалы. — 2003. — № 4. — С. 73—80.*
3. *Исаев М. И., Пономарев П. В.* Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. — М.: Недра, 1975. — 288 с.
4. *Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Богданов Р. К. и др.* Влияние качественных характеристик высокопрочных алмазов на работоспособность бурового инструмента // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2007. — Вып. 10. — С. 160—168.*
5. *Ильницкая Г. Д., Богатырева Г. П., Невструев Г. Ф.* Получение высококачественных алмазных шлифпорошков // *Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ НАН Украины, 2005. — С. 63—71.*
6. *Деклараційний пат. 20031211734 Україна, 69948 А, МКІ В 24 D 3/00.* Шліфувальний порошок і спосіб його одержання / М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ільницька. — Заявл. 16.12.03; Опубл. 15.09.04, Бюл. № 9.
7. *ДСТУ 3292—95.* Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. — Киев: Госстандарт Украины, 1995. — 71 с.
8. *ТУ У 28.4-05417344—2003.* Шлифпорошки синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. Технические условия. Введ. 01.09.03. — Киев: Госстандарт Украины, 2003. — 10 с.
9. *Богатырева Г. П., Крук В. Б., Невструев Г. Ф. и др.* О связи между содержанием включений в синтетических алмазах и их магнитными свойствами // *Синт. алмазы. — 1977. — Вып. 6. — С. 14—19.*
10. *М88 України 90.256—2004.* Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ). — Киев: ИСМ НАН Украины, 2004. — 9 с.
11. *Пат. 65129 А Україна, МКІ G 01 N 27/12.* Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ільницька. — Заявл. 05.06.03, Опубл. 15.03.04, Бюл. № 3.
12. *Loubser J. H. N., Wik J. A.* Electron spin resonance in the study of diamond // *Rep. Progr. Phys. — 1978. — 41. — P. 1201—1248.*
13. *Новиков Н. В., Невструев Г. Ф., Ильницкая Г. Д. и др.* Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. Часть 1. Теоретические основы метода оценки характеристик качества // *Сверхтв. материалы. — 2006. — № 5. — С. 74 — 83; Часть 2.*

Практическое применение нового метода оценки характеристик качества // Там же. — 2006. — № 6. — С. 58—67.

14. *Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Богданов Р. К. и др.* Оценка однородности высокопрочных алмазных шлифпорошков по статической прочности и термостойкости // Материалы 3-й Междунар. конф. “Породоразрушающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения”. — Киев: ИСМ НАН Украины, 2000. — С. 17—18.
15. *Зыбинский П. В., Богданов Р. К., Загора А. П. и др.* Сверхтвердые материалы в геолого-разведочном бурении. — Донецк: Норд-Пресс, 2007. — 244 с.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 16.07.08