

3. Collins A.T., Kanda H., Kitawaki H. Colour changes produced in natural brown diamonds by high-pressure, high-temperature treatment // *Diamond and Related Materials*. – 2000. – **9**. – P. – 122.
4. De Weerd F., Collins A.T. The influence of pressure on high-pressure, high-temperature annealing of type Ia diamond // *Diamond and Related Materials*. – 2003. – **12**. – P. 507–510.
5. The aggregation of nitrogen and the formation of A centers in diamonds / I. Kiflawi, H. Kanda, D. Fisher et al. // *Diamond and Related Materials*. – 1997. – **6**. – P. 1643–1649.
6. Хвостанцев Л. Г. Аппараты высокого давления большого объема для физических исследований // *Успехи физ. наук*. – 2008. – **178**, № 10. – С. 1099–1104.
7. Колчеманов Н. А. Совершенствование технологии синтеза и применение технических алмазов в промышленности. – Диссерт. ... д-ра техн. наук в форме науч. докл.: 05.17.11. – М.: – 1998.
8. Mendelsohn M.J., Milledge H.I. Geologically significant information from routine analysis of the mid-infrared spectra of diamonds // *Inter. Geol. Rev.* – 1995. – **37**. – P. 95–110.

Поступила 22.06.09

УДК 621.762.5:679.826

**В. И. Бугаков**, д-р техн. наук, **А. А. Поздняков**, канд. техн. наук

*Институт физики высоких давлений РАН г. Троицк*

### **ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И МЕТОДОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА**

*The mechanism of strengthening of diamond grain together with binding agent when manufacturing the stone-crushing diamond instrument by hot compaction under the high pressure has been investigated. Application of high pressures of hot compaction for the compositions of nickel-chromium (titanium) diboride results in additional mechanical strengthening of diamond grains together with binding agent at the cost of difference of coefficients of thermal expansion of diamond and binding agent.*

Алмазосодержащий инструмент, как правило, состоит из стального корпуса и слоя композиционного материала, в котором одним из компонентов является металлическая или металлокерамическая матрица (связка), а другим – равномерно распределенные в ней зерна алмаза. Связка алмазного инструмента предназначена для прочного закрепления алмазного зерна и удержания его во время резания материала.

Настоящая работа посвящена изучению влияния высокого давления в процессе изготовления алмазного инструмента на сохранение физико-механических свойств алмазного сырья; анализу действующего давления на алмазное зерно вследствие различия разницы коэффициентов термического расширения (к.т.р.) после снятия приложенного давления и температуры; выбору материала связки соответственно выдвинутым условиям.

В процессе создания инструмента и при его работе зерна алмаза циклически нагреваются. В большинстве традиционных технологий изготовления алмазосодержащего инструмента применяют температуру 700–1400 °С. Поскольку в таких условиях алмаз является термодинамически неустойчивой фазой, его прочностные свойства снижаются. Как известно, повышение давления увеличивает порог терморазупрочнения алмазного сырья. Так, повышение давления до 3,0–5,0 ГПа повышает температуру разупрочнения синтетических алма-

зов до 1673 К, причем порог терморазупрочнения 1373 К достигается при давлении 0,5–1,0 ГПа [1].

Авторами было исследовано следующее алмазное сырье, используемое при изготовлении алмазосодержащего инструмента: синтетические алмазы фирмы De Beers SDB 1100, природные алмазы А4, синтетические алмазы АС125, поликристаллические алмазы АРК-4 [2]. Алмазы SDB 1100 и А4 отличаются высокой начальной температурой разупрочнения по сравнению с алмазами АС125 и АРК-4. При этом давление составляет 0–4 ГПа, температура – 25–1200 °С. Повышение давления для порошков АРК-4 и АС125 до 1,5 ГПа приводит к значительному повышению температуры разупрочнения в отличие от алмазов фирмы De Beers SDB 1100 и природных алмазов А4. Применение давления более 2,5 ГПа и высокой температуры при изготовлении алмазного инструмента в камерах большого объема – сложная технологическая проблема. Оптимальным режим горячего прессования считается при давлении 1,0–2,0 ГПа и температуре не более 1050 °С, что позволяет сохранить физико-механические характеристики применяемого в инструменте алмазного сырья.

При изготовлении инструмента предъявляются следующие основные требования к связкам для алмазного инструмента:

прочность (чтобы воспринимать без разрушения передаваемые алмазными зернами механические нагрузки);

абразивная стойкость (поскольку в процессе работы алмазного инструмента связки существенно влияют образующийся высокоабразивный шлам);

высокое алмазоудержание;

температура спекания не выше 1050 °С;

возможность паяния латунными и серебряными припоями;

технологичность (чтобы при изменении состава связки без существенного изменения технологических режимов спекания она приобретала требуемые механические свойства).

Наилучшими механическими свойствами обладают связки на основе порошков твердого сплава. Однако такие связки можно использовать только для алмазов с высокой температурой разупрочнения. Низкотемпературные связки либо обладают низкой прочностью (на основе меди), либо очень дорогие (на основе кобальта). Для достижения высокой твердости необходимо использовать связки на основе композиций Ni–ВК15, Ni–TiB<sub>2</sub>, Ni–CrB<sub>2</sub>. Однако чтобы получить высокопрочные спеченные композиции, не достигая температуры разупрочнения алмазного сырья, необходимо использовать давление не менее 1,0–1,5 ГПа. На процесс спекания порошковых композиций кроме внешнего давления существенно влияет наличие жидкой фазы. Характер взаимодействия металлов семейства железа с тугоплавкими соединениями основательно изучен в [2]. В частности, изучена температура начала образования новой фазы и появления жидкой фазы в системах «железо (никель) – тугоплавкое соединение». Минимальная температура образования жидкой фазы – 1000 °С – наблюдается в сплавах никеля с диборидами тугоплавких металлов: хрома, титана и циркония (табл. 1).

Таблица 1. Температуры начала образования новых фаз в системах «железо (никель) – тугоплавкое соединение»

Система	Температура появления новой фазы, °С	Температура оплавления металлической фазы, °С
Ni–TiB <sub>2</sub>	–	900–1000
Ni–CrB <sub>2</sub>	–	900–1000
Ni–ZrB <sub>2</sub>	–	900–1000
Fe–TiB <sub>2</sub>	1200	1300
Fe–CrB <sub>2</sub>	1000	1100
Fe–ZrB <sub>2</sub>	1200	1400

В качестве легирующих компонентов в связку на основе никеля были выбраны дибориды титана и хрома по следующим причинам. Во-первых, из-за низкой температуры разрушения синтетических алмазов температура спекания их со связкой не должна превышать 1050–1100 °С даже при давлении в 1,5 ГПа. При такой температуре в «системе никель – диборид хрома (титана)» образуется жидкая фаза в микрообъемах (в местах контактирования частиц), которая должна активировать процессы химического взаимодействия компонентов и спекания, что подтверждается значениями краевых углов смачивания, приведенными в табл. 2.

Таблица 2. Значения краевых углов смачивания алмаза и диборидов титана и хрома расплавом никеля

Подложка	Состав расплава	Температура, °С	$\theta$ , град
Алмаз	никель	1470	65
TiB <sub>2</sub>	никель	1250	46
CrB <sub>2</sub>	никель	1180	25-40
CrB <sub>2</sub>	никель	1250	15

Во-вторых, используемые дибориды титана и хрома обладают высокой твердостью, что должно способствовать повышению общей твердости и износостойкости композиции. Результаты механических испытаний образцов связок, полученных при температуре 1050 °С и давлении 1,5 ГПа в стальной многослойной камере, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Механические свойства образцов изученных связок

Состав связки, %	Механические испытания							
	на твердость HRB (HRC)	на изгиб			на сжатие			на срез
		$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$f$ , мм	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\varepsilon$ , %	$\sigma_{пр}$ , МПа
Ni + 15 % CrB <sub>2</sub>	93–97 (17–19)	720	720	0,42	850	610	20	245
Ni + 15 % TiB <sub>2</sub>	86–88	510	510	0,29	700	550	17	180
Ni + 10 % BK15	81–82	900	660	1,45	960	500	43	310

Анализируя данные табл. 3, приходим к выводу, что связка на основе никеля обладает высокими механическими свойствами, абразивной стойкостью и высокой пластичностью.

Важным фактором для закрепления алмазного зерна в связке при высоком давлении является различие значений коэффициентов термического расширения алмаза и ингредиентов связки. Поскольку в инструменте алмазосодержащий композиционный материал состоит из компонентов с отличающимися к.т.р., после процесса горячего прессования на алмазные зерна будут действовать дополнительные силы. Для оценки давления, действующего на алмазное зерно после спекания, предложена следующая схема расчета. Система, показанная на рисунке, состоит из порошкообразной металлокерамической связки с расположенным внутри нее алмазным зерном. После приложения к этой системе высокого давления и повышения температуры частицы связки сближаются и исчезают возможные поры внутри порошковой массы и вокруг алмаза.

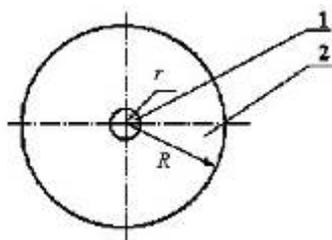


Схема расположения алмазного зерна в связке:

- 1 – алмазное зерно;  
2 – связка

В результате пластического течения образуется монолитная масса связки вокруг алмаза, которая равномерно всесторонне обжимает алмаз. Это позволяет исключить поры во-

круг алмаза, что в дальнейшем благоприятно повлияет на закрепление алмаза. Охлаждение системы «алмаз–связка» ведет к термической усадке материала и в связи с различными коэффициентами термического расширения алмаза и связки – к еще более сильному обжатию алмаза. Снятие внешнего давления ведет к разгрузке системы, однако дополнительное обжатие алмазного зерна, вызванное различными к.т.р., продолжает удерживать алмаз в связке.

Рассчитаем давление связки на алмазное зерно после охлаждения. Для этого рассмотрим сферический алмаз радиуса  $r$ , окруженный связкой в виде сферы радиуса  $R$ , как камеру высокого давления (см. рисунок).

Внутреннее давление, которое необходимо приложить к связке для увеличения радиуса  $R$  на  $\Delta R$ .

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta P}{K}, \quad (1)$$

где  $K$  - модуль объемного сжатия или объемной упругости, который равен:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (2)$$

$E$  – модуль упругости материала связки;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала связки.

Термическое расширение пространства вокруг алмаза приводит к увеличению радиуса  $R$  на величину  $\Delta R$ .

$$\Delta R = \alpha R \Delta t, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\Delta t$  – перепад температур при нагревании связки.

С учетом небольших размеров алмаза по сравнению с массой связки можно считать  $\left(\frac{r}{R}\right) \rightarrow 0$ . Такое же увеличение радиуса  $R$ , как по формуле (3), при создании внутреннего давления произойдет при давлении

$$P = \frac{\Delta R E}{R(1-2\mu)} \quad (4)$$

Таким образом, давление связки на зерно алмаза после охлаждения системы «алмаз – связка»

$$P = \frac{\alpha E \cdot \Delta t}{1-2\mu} \quad (5)$$

Подбирая материал связки с различными коэффициентами термического расширения и механическими свойствами, можно добиться различного давления связки на зерно алмаза. Расчетные значения давления связки на алмаз после охлаждения системы от температуры 1000 °С для часто применяемых основ металлических связок приведены в табл. 4.

Таблица 4. Расчетные значения давления связки на алмазное зерно

Материал связки	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/град	$E$ , ГПа	$\mu$	$p$ , МПа	$\Delta p$ , ГПа для $\Delta t = 1000$ °С
Ni	15	200	0,3	$7,5 \cdot \Delta t$	7,5
Cu	18	120	0,34	$6,7 \cdot \Delta t$	6,7
W	4,5	400	0,22	$3,2 \cdot \Delta t$	3,2
Co	12,3	210	0,3	$6,5 \cdot \Delta t$	6,5

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что применение технологии горячего прессования при высоком давлении и использовании всех представленных металлов в качестве основы связки приводит к повышению давления на алмазное зерно, что улучшает закрепление зерна в связке и повышает температуру разупрочнения алмаза. В этой связи использование высоких давлений для изготовления алмазного инструмента является перспективным направлением разработки различных способов получения широкой гаммы алмазного

инструмента, особенно из синтетических алмазных материалов, которые имеют низкие температуры разупрочнения.

### **Выводы**

1. Обоснована перспективность использования высоких давлений для изготовления алмазного инструмента.

2. Теоретический анализ механизма закрепления алмазного зерна в связке алмазного инструмента подтверждает, что применение высоких давлений приводит к его дополнительному механическому закреплению за счет различия коэффициентов термического расширения алмаза и металлокерамической связки.

### **Литература**

1. Верещагин Л. Ф., Коняев Ю. С., Довбня А. В. Термостойкость поликристаллических образований алмаза и бора при давлении до 50 кбар в условиях их спекания с металлокерамическими связками // Алмазы. – 1970. – № 4. – С. 1–5.
2. Юрченко О. С. Исследование устойчивости железа и никеля при нагреве в контакте с тугоплавкими соединениями // Порошковая металлургия. – 1971. – № 1. – С. 45–49.
3. Бугаков В. И. Термостойкость алмазных материалов // Изв. ВУЗов. Цвет. металлургия. – 2005. – № 5. – С. 25–28.

*Поступила 05.06.09*

УДК 621.921.34-2:622.24.05

**Г. П. Богатырева**, д-р техн. наук, **Г. Д. Ильницкая**, **Г. А. Петасюк**,  
**Р. К. Богданов**, **А. М. Исонкин**, **А. П. Закора**, кандидаты технических наук

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛМАЗНЫХ ШЛИФПОРОШКОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА**

*Results of research of influence of physicomachanical properties of diamond powders on operational characteristics of the drill bits are considered. Essential influence durability characteristics of grains of synthetic diamonds on working capacity of the drill bits is experimentally confirmed. Analytical dependence of influence of physicomachanical properties of synthetic diamonds on working capacity of diamond drill bits is received.*

### **Введение.**

Современная тенденция развития процесса бурения горных пород заключается во все более широком использовании для оснащения бурового геологоразведочного инструмента синтетических алмазов. При этом работоспособность инструмента существенно зависит от качества применяемых алмазов. В результате совершенствования процесса синтеза ведущими зарубежными фирмами получены высокопрочные алмазы, из которых могут изготавливаться высокопрочные порошки синтетического алмаза марок AC200 – AC400 [1].

Результаты исследований свидетельствуют, что серийные высокопрочные алмазные шлифпорошки, синтезированные в разных ростовых системах, как правило, неоднородны по