

изменения характера деформирования материалов при низких температурах [5, 6].

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (проект №15-41-05010).

Литература

1. Божокин С.В., Паришин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: РХД, 2001. 128 с.
2. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск: РХД, 2001. 116 с.
3. Старостин Е.Е., Колмаков А.Г. Мультифрактальное описание топографической структуры покрытий, полученных термическим напылением в вакууме // ФХОМ. 1998. №5. С. 38–47.
4. Лепов В.В., Иванов А.М., Логинов Б.А., Беспалов В.А., Ачикасова В.С., Закиров Р.Р., Логинов В.Б. Механизм разрушения наноструктурированной стали при низких температурах // Российские нанотехнологии. 2008. №11–12. С. 101–109.
5. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Исследование поврежденности низколегированной стали и кристаллов алмаза методами фрактального анализа // Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов в условиях холодного климата. Якутск, 2002. Ч.2. С.93–107.
6. Лепов В.В., Логинов Б.А. Зондовая микроскопия – инструмент нанодиагностики // Наука и техника в Якутии. 2010. №1. С.24–29.
7. Сараев П.В. Основы использования математического пакета Maple в моделировании: Учебное пособие / Международный институт компьютерных технологий. Липецк, 2006. 119с.
8. Встовский Г.В., Гринберг Е.М., Маркова Е.В., Фомичева Н.Б. Фрактографические исследования поверхности изломов стали 09Х16Н4БЛ с использованием прикладного мультифрактального анализа // Перспективные материалы. 2012. №5. С. 89–94.
9. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Петерсен Т.Б., Жаркова Н.А., Будueva В.Г., Опарина И.Б. Кинетика накопления повреждений в низкоуглеродистой стали при растяжении // Деформация и разрушение. 2005. №3. С.2–8.
10. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Жаркова Н.А., Тютин М.Р., Будueva В.Г. Акустические свойства малоуглеродистой стали на различных стадиях разрушения // Деформация и разрушение материалов. 2005. №4. С. 35–41.
11. Попова И.А., Гриднев А.Е., Кукуев В.И., Тутов Е.А., Мельникова М.С. Применение фрактального подхода к описанию микроструктуры поверхности анодных оксидов тантала // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2011. № 2. С.27–31.

Поступила в редакцию 08.11.2016

УДК 621.762.5:621.793.1

Повышение эксплуатационных характеристик твердосплавных алмазосодержащих композитов при диффузионной металлизации алмазной компоненты в процессе спекания с пропиткой.

I. Обоснование эффективности гибридной технологии синтеза

П.П. Шарин*, С.П. Яковлева*, Г.Г. Винокуров*, В.И. Попов**

**Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск*

***Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск*

Для повышения химической и механической адгезии частиц природного алмаза с твердосплавной матрицей при синтезе алмазно-абразивных композитов предложена гибридная технология, совмещающая в одном технологическом цикле термодиффузионную металлизацию алмаза и спекание по разработанной схеме самодозируемой пропитки. Технология исключает повторный нагрев металли-

ШАРИН Петр Петрович – к.ф.-м.н., в.н.с., psharin1960@mail.ru; ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав.отд., spyakovleva@yandex.ru; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с., g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru; ПОПОВ Василий Иванович – к.ф.-м.н., с.н.с., volts@mail.ru.

зированной покрытия (МП), при котором происходит его деструкция и усиливается графитизация алмаза, что ограничивает применение метода металлизации для улучшения алмазоудержания и создания высокофункциональных композитов инструментального назначения. Формирование и сохранение адгезионно-прочного МП подтверждено экспериментами, моделирующими условия высокотемпературного взаимодействия алмаза с карбидообразующим металлом и твердосплавной матрицей при спекании специальных образцов по режимам разработанного технологического процесса. Структурно-фазовое состояние переходной зоны изучено методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа (РФА) поверхностей раздела контакта алмаз-матрица, полученных при испытаниях специальных образцов на прочность. Изготовлены опытные и контрольные образцы алмазных карандашей, сравнительные испытания эксплуатационных свойств которых подтвердили эффективность разработанной гибридной технологии для создания высокоресурсного алмазного инструмента.

Ключевые слова: алмазный композит, природный алмаз, металлизированное покрытие, твердосплавная матрица, спекание, пропитка, алмазоудержание, эксплуатационные свойства.

Enhancement of Operating Characteristics of Hard-Alloy Diamond-Containing Composites due to Diffusive Metallization of Diamond Component during the Process of Sintering with Impregnation.

Part 1. Justification of Efficiency of Synthesis Hybrid Technology

P.P. Sharin^{*}, S.P. Yakovleva^{*}, G.G. Vinokurov^{*}, V.I. Popov^{**}

^{*}Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

^{**}M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

For the enhancement of chemical and mechanical adhesion of natural diamond particles with a hard-alloy matrix during the synthesis of diamond-abrasive composites the hybrid technology which combined in one technological process the thermal-diffusion metallization of diamond particles and sintering by the developed scheme of the self-metering impregnation is proposed. This technology does not include a re-heating of the metallized coating that causes its destruction and enhances graphitization of diamond thus limiting the application of metallization method for improvement of diamond retention and creation of high-functional composites for diamond tools. Formation and preservation of adhesion-durable metallized coating is confirmed by experiments simulating the conditions of high temperature interaction of diamond with a carbide-forming metal and a hard-alloy matrix during the sintering of special samples using the regimes of developed technological process. The structural and phase state of the transition zone is studied by scanning electron microscopy, X-ray structure analysis and X-ray phase analysis of the partition surfaces of the contact zone between the diamond and the matrix obtained by tensile testing of special samples. Comparative service properties tests of prototype and control samples of diamond dressers confirmed efficiency of the developed hybrid technology for the creation of highly resourceful diamond tools.

Key words: diamond composite, natural diamond, metallized coating, hard-alloy matrix, sintering, impregnation, diamond retention, operating properties.

Введение

Прочность и надёжность закрепления зёрен алмаза в матрице инструментальных композитов играют определяющую роль в обеспечении работоспособности и высоких эксплуатационных характеристик алмазного инструмента [1–4]. Одним из эффективных способов повышения прочности алмазоудержания в композитах различного назначения является металлизация алмазных зёрен [1, 3, 5]. Технология термодиффузионного нанесения металлических покрытий на

алмазы включает нагрев и осаждение карбидообразующего металла в вакууме при температурно-временных режимах, обеспечивающих образование металлокарбидного покрытия [3, 4–6]. Металлизация может повысить не только прочность закрепления алмазных частиц, но и их собственные прочностные свойства вследствие заполнения («залечивания») поверхностных дефектов карбидами металлов [5–7]. Вместе с тем использование предварительно металлизированного алмаза не получило промыш-

ленного применения при изготовлении широкого класса алмазных инструментов, работающих в условиях больших динамических и температурных нагрузок (алмазные правящие карандаши, гребёнки, буровые коронки, сегменты для отрезных пил) [5–7]. Это связано с тем, что технология их изготовления (спекание с пропиткой легкоплавкими металлами и сплавами) предусматривает высокотемпературный нагрев алмазоносного твердосплавного брикета [7, 8].

Воздействие высоких температур на предварительно металлизированные зёрна алмаза снижает прочность их последующего удержания в матрице и физико-механические свойства материала, поскольку возобновление контактного взаимодействия алмаза с ранее сформированным МП сопровождается интенсивной графитизацией алмазной поверхности, а также частичным распадом покрытия [6]. Очевидно, что обеспечение прочности и сохранности МП алмазных частиц при спекании должно повысить эксплуатационные свойства алмазных инструментов. Решение этих актуальных задач предусматривает как создание новых способов синтеза твердосплавных инструментальных композитов с металлизированными алмазными частицами, так и выполнение фундаментальных исследований особенностей структурно-фазового состояния образующихся сложных переходных зон алмаз-матрица.

Исходя из этого, в проведенной работе можно выделить две части. Первая часть, представленная в настоящей статье, посвящена технологическим аспектам – разработке новых принципов и способов получения высокоэффективных композиционных алмазметаллических материалов (КАМ), первичному их обоснованию, а также экспериментальному подтверждению проведением сравнительных испытаний опытных образцов алмазного инструмента. Вторая часть будет представлена в отдельной статье и посвящена результатам изучения с привлечением современных зондовых, дифракционных, спектроскопических методов исследования тех факторов, которые определяют повышенный уровень алмазоудержания при условии обеспечения высокоэффективной металлизации алмазных зерен.

Ранее нами были предложены гибридные технологии получения КАМ с повышенным уровнем алмазоудержания [9, 10]. Суть способов заключается в объединении в одном цикле работы вакуумной печи двух технологических процессов – термодиффузионной металлизации алмаза хромом и спекания с пропиткой медью алмазоносной твердосплавной матрицы, что исключило необходимость повторного нагрева,

ухудшающего качество МП. В продолжение этих исследований целью данной работы является экспериментальное подтверждение формирования адгезионно-активного металлокарбидного покрытия на поверхности алмазных частиц, обеспечивающего технически значимое повышение эксплуатационных характеристик алмазно-твердосплавного инструмента, полученного с использованием разработанной гибридной технологии, объединяющей термодиффузионную металлизацию и спекание с саморегулируемой пропиткой легкоплавким металлом в одном технологическом цикле.

Объекты и методы исследований.

Методика экспериментов

В качестве объектов исследования были подготовлены два вида образцов композитов системы $C_{алмаз}-Cr-BK6-Cu$, спеченных в вакууме по схеме свободной пропитки с саморегулируемой дозировкой количества меди. Первый вид – специальные образцы в количестве 3 единиц (рис. 1, а) для детального изучения структуры и фазового состава переходной зоны алмаз-матрица, сформировавшейся в присутствии хромового покрытия на поверхности алмаза. Второй вид образцов (рис. 1, б) – опытные партии правящих карандашей, соответствующих по типоразмеру карандашу 3908-0081 ГОСТ 607-80 «Карандаши алмазные для правки шлифовальных кругов» с послойным расположением зёрен алмаза и полученных для проведения сравнительных испытаний эксплуатационных свойств инструмента с металлизацией и без металлизации алмазной компоненты.

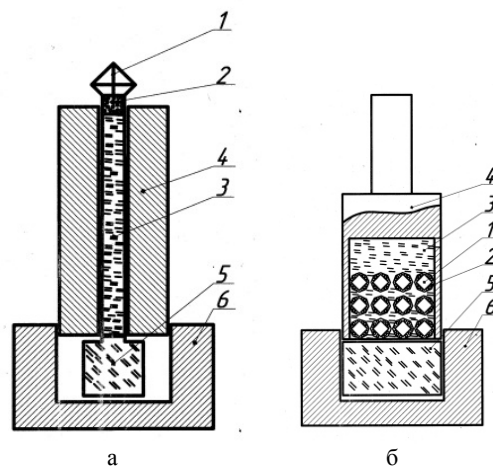


Рис. 1. Схемы сборки специального образца (а) и правящего карандаша (б) для спекания с саморегулируемой пропиткой: 1 – алмазные зёрна; 2 – брикет порошка хрома; 3 – брикет порошка ВК6; 4 – стальной корпус; 5 – брикет порошка меди; 6 – керамическая лодочка

Специальные образцы были получены в стальных пресс-формах Ø2 мм, в которые последовательно засыпали для последующего прессования в брикет в форме стержня слой твердосплавного порошка ВК6 толщиной около 10 мм и слой пластифицированного порошка хрома (марка ПХА ТУ 14-141-01-94) толщиной не менее 1 мм. Перед спеканием на плоскую поверхность спрессованного стержня со стороны слоя хрома устанавливали полированное зерно алмаза массой ≈0,03 кар так, чтобы его полированная сторона плотно прилегала к стержню. В этом положении образцы удерживались с помощью специального приспособления и располагались в камере вакуумной печи СНВЭ-1.3.1/16И4 для спекания с пропиткой медью.

Образцы правящих карандашей спекали по разработанной технологии, обеспечивающей саморегулируемую дозировку количества пропитывающего металла [4, 11], дополненной технологическим приемом, создающим условия металлизации: зёрна алмаза перед укладкой их в вердосплавную шихту обволакивали с помощью пластификатора (10–15%-го раствора канифоли в этиловом спирте) частицами мелкодисперсного порошка хрома так, чтобы вокруг каждого зерна образовалась равномерная хромовая оболочка.

В карандашах использовано природное алмазное сырьё XV «а-2» группы общей массой 1 кар, зёрна которого укладывали в три слоя по 16 штук в каждом слое. Для проведения сравнительных испытаний (условия испытаний приведены ниже при описании результатов) были также по схеме саморегулируемой дозировки количества меди изготовлены однотипные контрольные образцы карандашей системы Салмаз-ВК6-Сu, т.е. без нанесения хрома; для них использовали алмазное сырьё из той же партии, что и для опытных образцов с металлизацией алмаза.

Температурно-временной режим нагрева при спекании всех образцов соответствовал типичной циклограмме работы вакуумной печи для спекания с пропиткой медью алмазных инструментов с твердосплавной матрицей. После завершения цикла нагрева печь выключалась, и температура в камере печи с образцами снижалась в режиме свободного охлаждения.

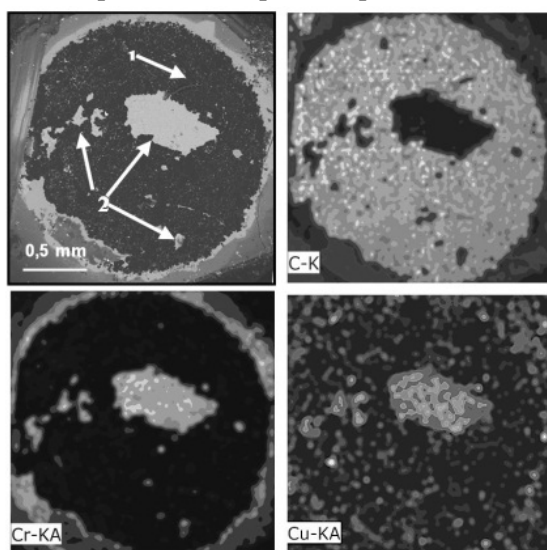
Для изучения образовавшейся при спекании переходной зоны алмаз-хром-матрица специальные образцы разделяли при комнатной температуре методом нормального отрыва с фиксацией соответствующего усилия. Структура и химический состав переходной зоны каждой из

поверхностей, образовавшихся после разъединения контакта алмаз-стержень, изучались методами РЭМ на приборах JEOL JSM-6480LV и HITACHI-TM3030. РФА и рентгеноструктурный анализ выполнены на дифрактометре Bruker D8 Discover в немонахроматизированном $\text{CuK}\alpha$ -излучении ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) при ускоряющем напряжении 40 кВ и анодном токе 40 мА. Для обработки спектров применен пакет программного обеспечения *DIFFRAC^{Plus}*. При фазовом анализе использована стандартная библиотека ICDD PDF-2 release 2007.

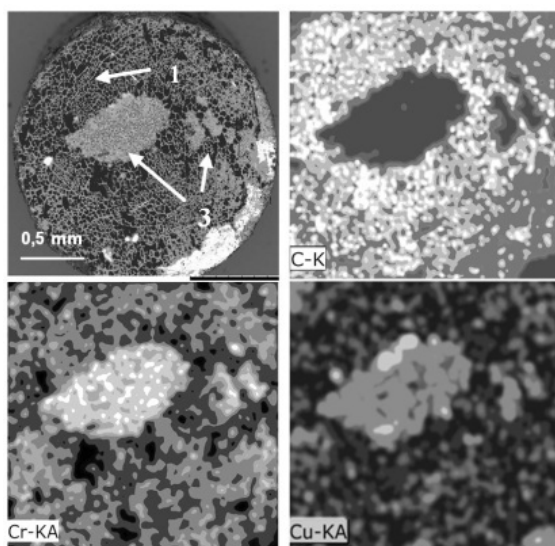
Результаты и их обсуждение

Основные процессы при режимах гибридного спекания. На начальном этапе спекания специальные образцы нагревали не менее 90 мин, медленно поднимая температуру вакуумной печи до 600 °С, и поддерживали её на этом уровне в течение 30–45 мин для распада пластификатора и удаления образовавшихся паров и газов. Затем температуру в течение 60 мин повышали до значений, близких к точке плавления меди (около 1080 °С), и выдерживали образцы при этой температуре еще не менее 45 мин для уплотнения твердосплавного брикета и формирования так называемой каркасно-матричной структуры, характерной для вольфрамкобальтового связующего [4]. Одновременно в результате контактного взаимодействия алмаза с хромом на его поверхности, непосредственно соприкасающейся с частицами порошка хрома, начинается формирование МП. На заключительном этапе нагрев быстро доводили до температуры плавления меди (около 1100 °С) с выдержкой не более 5 мин. В этот период завершается термодиффузионная металлизация поверхности алмаза и происходит пропитка твердосплавного брикета медью. Жидкая медь поднимается вверх по микрокапиллярам (порам), последовательно пропитывая брикет и пористый слой из спекшихся друг с другом частиц хрома. При заполнении медью всего объема брикета и достижению ею границ металлизированного покрытия, образовавшегося на поверхности алмаза, капиллярный эффект исчезает, пропитка самопроизвольно прекращается. Спекание завершается охлаждением печи до комнатной температуры. При затвердевании меди МП алмаза прирастает к твердосплавной матрице, тем самым объединяя алмаз и твердосплавный стержень в единое целое. Аналогичным образом, за исключением не существенных для дальнейшего анализа деталей, происходит спекание металлизированных правящих карандашей.

Фазовый состав поверхностей раздела испытанных на прочность специальных образцов. Изображения общего вида поверхностей раздела алмаза и твердосплавного стержня, а также карты распределения на них основных химических элементов (углерода, хрома и меди) приведены на рис. 2. Видно (участки, показанные стрелками 1 на рис. 2), что разьединение образцов произошло преимущественно по телу кристалла алмаза с переносом его отколов на поверхность стержня. На отдельных участках центральной части образца (отмечены стрелками 2 и 3 на рис. 2) разрушение прошло по границе МП-стержень. Это связано с недостаточной пропиткой медью металлизированного хромсодержащего слоя, в



а

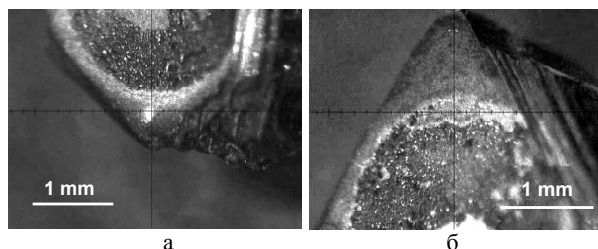


б

Рис.2. Макроизображения поверхностей разрыва испытанного на прочность специального образца и карта распределения на них химических элементов: а – со стороны алмаза; б – со стороны твердосплавного стержня. РЭМ

результате чего его локальное сцепление с твердосплавным стержнем оказалось ниже сцепления с алмазом. Тем не менее, общее растягивающее усилие при разъединении алмаза и стержня составило 48,9 Н, что соответствует прочности соединения образцов $\approx 15,57$ МПа и указывает на обеспечение заданными в эксперименте условиями спекания высокой адгезии алмаза и твердосплавной матрицы за счет образования МП, прочно соединённого с алмазом химической связью.

Образование хром-карбидного покрытия на поверхности алмаза подтверждается результатами РФА с периферийных участков, расположенных вне зоны непосредственного контакта алмаза со стержнем (рис. 3, а, б), на которых зарегистрированы фазы карбидов хрома Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 , а также следы хрома. В целом на дифрактограммах зафиксированы фазы, указанные в табл. 1.



а

б

Рис. 3. Позиционирование образца и фокусировка рентгеновского пучка в различных точках измерения при рентгенофазовом анализе металлизированного покрытия с помощью видеомикроскопа, оснащенного лазерным указателем

Т а б л и ц а 1

Фазовый состав поверхностей раздела контакта материала, спеченного в присутствии хрома

Фаза, параметры решетки (нм), пространственная группа симметрии	Поверхность раздела со стороны алмаза	Поверхность раздела со стороны твердосплавного стержня
C (алмаз) $a = 0,3566; Fd-3m$	+	+
Cr_3C_2 $a = 0,5527; b = 1,1488; c = 0,2828$ $Pnma$	+	+
Cr_7C_3 $a = 0,7014; b = 1,2153; c = 0,4532$ $Pmcm$	+	+
Cr_{23}C_6 $a = 1,0659; Fm-3m$	+	–
CrO_3 $a = 0,0574; b = 0,0856; c = 0,0479$ $Ama2$	+	–
Cr (следы) $a = 0,2872; Im-3m$	+	+
Co $a = 0,355; Im-3m$	–	+
Cu $a = 0,3615; Fm-3m$	–	+
C (графит, следы) $a = 0,2522; c = 4,3245; R-3m$	+	–

На рис. 4, а, б видно, что разрушение кристалла алмаза произошло путём транскристаллитных каскадных сколов, причем образовавшиеся отколы кристалла алмаза, прочно сцепленные с металлокарбидным покрытием, оказались перенесены на поверхность твердосплавного стержня (рис. 4, б, в). Это показывает, что прочность связи кристалла алмаза с твердосплавным стержнем превысила собственную прочность кристалла алмаза. Вместе с тем не следует полностью исключить возможность локального снижения прочностных характеристик кристалла алмаза в процессе получения его соединения с металлом. Наиболее вероятной причиной такого снижения прочности алмаза является возникновение остаточных тангенциальных напряжений при нагревании и последующем охлаждении вследствие различия коэффициентов термического расширения МП и алмаза. Следует заметить, что коэффициент термического расширения карбидов хрома выше этого показателя для алмаза ($\alpha_{\text{алм}} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) в $\approx 3,1$ раза в широком интервале температур (20–1100 °C).

Анализ РЭМ изображений показывает, что МП испещрено сетью микротрещин (рис. 2, 4). На рис. 4, в видно, что микротрещины делят металлокарбидное покрытие на отдельные участки различных форм и размеров (от единиц до нескольких десятков микрон в поперечнике). Их образование, вероятно, также обусловлено возникновением в процессе охлаждения соединения алмаз-покрытие тангенциальных остаточных напряжений из-за различия коэффициентов термического расширения покрытия и алмаза. Снижение влияния этих факторов может быть достигнуто добавлением порошка меди в состав хромовой порошковой оболочки так, чтобы при спекании на поверхности алмаза формировалось не сплошное, а более благоприятное с позиций прочности, островковое карбидное покрытие [6], чередующееся с медными

участками. В результате возникающие температурные напряжения в значительной мере будут сниматься благодаря пластической деформации медных участков.

Сравнительные испытания. Эффективность предложенной гибридной технологии, совмещающей металлизацию алмаза и спекание композита $\text{C}_{\text{алмаз}}\text{-Cr-BK6-Si}$ в течение одного цикла работы вакуумной печи, подтверждается сравнительными испытаниями опытных и контрольных образцов правящих алмазных карандашей, изготовленных, как уже отмечалось, в соответствии с требованиями госстандарта. Для испытаний использован стенд, выполненный на базе точно-шлифовального станка с полуавтоматической подачей карандаша на врезание. Правке подвергались круги марки ПП 150x20x32 63C40K-L из зеленого карбида кремния на керамической связке, обладающие повышенной стойкостью к истиранию и предназначенные для шлифовки деталей из твердых материалов (чугун, природные и искусственные камни, твердосплавный режущий инструмент). Испытания проведены, согласно рекомендациям ГОСТ 607-80 «Карандаши алмазные для правки шлифовальных кругов», при следующих режимах правки: рабочая скорость круга 35 м/с, скорость поперечной подачи 0,05 мм/ход; охлаждение и удаление шлама осуществлялись водой с расходом ≈ 20 л/мин.

В ходе испытаний измеряли линейный износ шлифовальных кругов, рассчитывали их объём, снятый алмазными карандашами до полного износа всех алмазных слоев, и определяли основной эксплуатационный показатель функциональных свойств карандашей – удельную производительность (отношение объема шлифовального круга, снятого карандашом за определенное количество циклов правки, к израсходованной в этом процессе массе алмаза карандаша). Как видно из табл. 2, удельная производи-

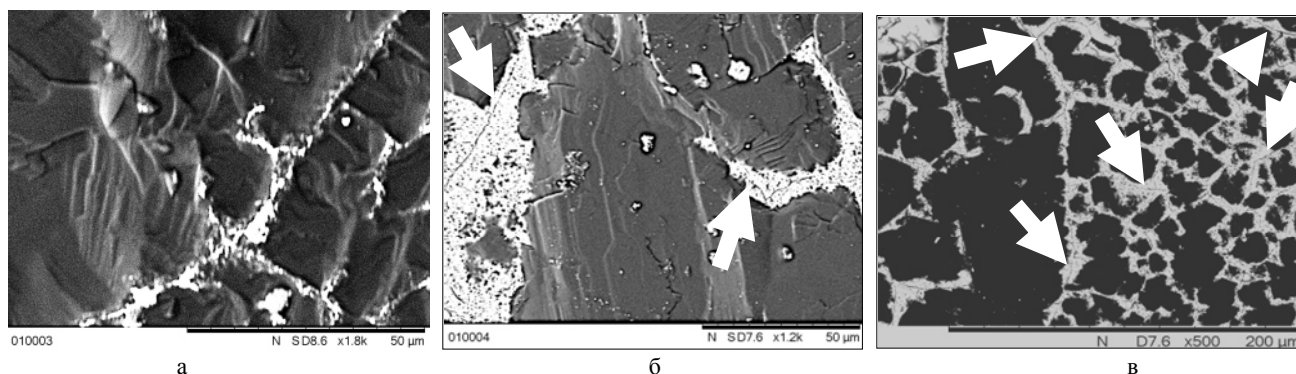


Рис. 4. Микроизображения поверхностей разрыва специального образца со стороны кристалла алмаза (а) и со стороны твердосплавного стержня (б, в). Стрелками указаны микротрещины в металлокарбидном покрытии. РЭМ

Результаты сравнительных испытаний удельной производительности q алмазных карандашей при правке кругов 63C40K-L

Тип правящих карандашей	Весовая группа алмазов		Масса алмазов в одном инструменте	Вид шлифования	q , см ³ /мг (1слой)	q , см ³ /мг (3 слоя)
	кар	штук в 1 кар				
Контрольные карандаши системы С _{алмаз} -BK6-Cu	0,02	48	1,0	Круглое наружное	10,97	32,91
Опытные карандаши системы С _{алмаз} -Сг-BK6-Cu					15,24	45,72

тельность опытных карандашей превосходит аналогичный показатель контрольного карандаша на 12,81 см³/мг (на 39%). Очевидно, что прирост эксплуатационных свойств опытных алмазных карандашей обеспечен повышением алмазоудержания при образовании на нем высокоадгезионного МП.

Изучение состояния рабочей поверхности инструментов через равные промежутки времени правки абразивных кругов показало, что алмазные зёрна опытного карандаша благодаря прочному сцеплению с матрицей продолжают работать в условиях воздействия интенсивных динамических нагрузок даже будучи изношены или вскрыты более чем на половину своего первоначального объёма (рис. 5, а). В контрольном карандаше два из шестнадцати алмазных зёрен рабочего слоя выпали, не выработав своего ресурса (на рис. 5, б видны два почти стершихся углубления, оставшихся после вырыва алмазных зёрен).

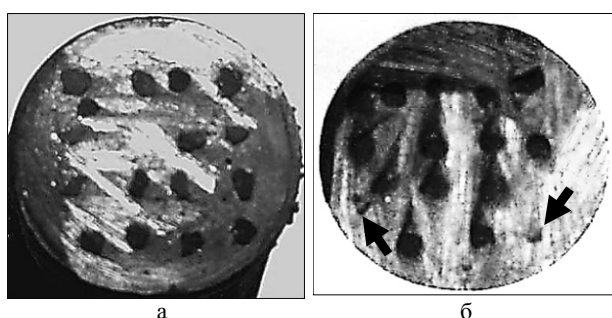


Рис. 5. Вид опытного (а) и контрольного (б) образцов правящих карандашей в процессе испытаний на удельную производительность. Стрелками показаны места вырыва алмазных зёрен

Выводы

1. Разработана и реализована гибридная технология синтеза алмазно-абразивных композитов, совмещающая термодиффузионную метал-

лизацию алмазной компоненты карбидообразующим переходным металлом (хромом) со спеканием по схеме самодозируемой пропитки (медью) и обеспечивающая выполнение труднодостижимого условия сохранения металлизированного покрытия в процессе изготовления алмазного инструмента.

2. Предложен технологический прием нанесения карбидообразующего порошкового материала на алмазные частицы, создающий условия протекания процесса термодиффузионной металлизации по всей их поверхности и позволяющий регулировать состав и свойства покрытия.

3. Исследована природа продуктов, образующихся на границе контакта алмаз-матрица в присутствии хрома, подтверждено формирование и сохранение металлизированного покрытия при разработанных технологических режимах спекания, что повышает адгезионную активность матрицы и уровень алмазоудержания за счет образования прочных химических связей.

4. Сравнительные испытания алмазных карандашей подтвердили эффективность использования термодиффузионной металлизации алмазных частиц для увеличения прочности их закрепления в твердосплавной матрице и повышения эксплуатационных свойств алмазного инструмента. Удельная производительность алмазных карандашей с металлизированной алмазной компонентой на 39 % превышает аналогичный показатель карандаша с базовой матрицей.

Литература

1. Исонкин А.М., Богданов Р.К. Влияние металлизации алмазов на показатели работоспособности буровых коронок // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». 2011. №14. С.158–163.
2. Коновалов В.А., Ткач В.Н., Шатохин В.В. Разрушение металлической связки при высоко-

скоростном циклическом нагружении алмазного зерна. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения // Сб. научных трудов ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Киев, 2009. № 12. С. 504–508.

3. Tillmann W., Tolan M., Lopes-Dias N.F. et al. Influence of chromium as carbide forming doping element on the diamond retention in diamond tools // International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM). 2015. Т.3. Р. 21–30.

4. Шарин П.П., Яковлева С.П., Гоголев В.Е., Васильева М.И. Структурная организация высокоизносостойких алмазосодержащих композитов на основе твердосплавных порошков, полученных методом спекания с пропиткой медью // Перспективные материалы. 2015. № 6. С. 66–77.

5. Schubert T., Trindade B., Weißgärber T., Kieback B. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications // Materials Science and Engineering. 2008. V. 475, №1–2. Р. 39–44.

6. Яхутлов М.М., Карамурзов Б.С., Беров З.Ж., Батыров У.Д., Нартыжев Р.М. Направленное формирование межфазной границы алмаз-матрица с использованием нанопокровов // Изв. Кабардино-Балкарского госуниверситета. 2011. Т. 1, №4. С. 23–25.

7. Локтюшин В.А., Гуревич Л.М. Получение нанотолщинных металлических покрытий на сверхтвердых материалах методом термодиффузионной металлизации // Изв. Волжского государственного технического университета. 2009. Т. 11, № 3. С. 50–54.

8. Hsieh Y.Z., Chen J.F., Lin S.T. Pressureless sintering of metal-bonded diamond particle composite blocks // Journal of materials science. 2000. Т. 35, №. 21. Р. 5383–5387.

9. Шарин П.П., Никитин Г.М., Лебедев М.П., Атласов В.П., Гоголев В.Е., Попов В.И. Способ получения композиционной алмазосодержащей матрицы с повышенным алмазоудержанием на основе твердосплавных порошковых смесей. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2015132568 от 04. 08. 2015.

10. Шарин П.П., Никитин Г.М., Лебедев М.П., Махарова С.Н., Гоголев В.Е., Атласов В.П. Способ соединения монокристалла алмаза с металлами. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2015141663 от 30. 09. 2015.

11. Шарин П.П., Лебедев М. П., Гоголев В.Е., Ноговицын Р.Г., Слободчиков П.А. Способ изготовления алмазных инструментов. Патент РФ №2478455. Оpubл. 10. 04. 2012.

Поступила в редакцию 02.06.2016

УДК 624.272

Оценка напряженно-деформированного состояния пролетных строений моста, усиленного композитными материалами

А.А. Хрюкин, М.В. Смолина

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Приведены данные мониторинга технического состояния усиленного композитными материалами моста через р. Протока, эксплуатируемого в климатических условиях Республики Саха (Якутия). Определена грузоподъемность усиленных пролетных строений с учетом фактического технического состояния на четвертый год эксплуатации опытной конструкции. На основе наблюдений за опытной конструкцией сделаны выводы об эффективности усиления композитными материалами на основе углеволокна. Сформулированы наиболее значимые проблемные вопросы усиления композитами в зоне низких температур.

Ключевые слова: железобетонные мосты, техническое состояние, грузоподъемность, несущая способность, пролетное строение, усиление композитными материалами, углеволокно.

ХРЮКИН Артем Андреевич – магистрант, hryukin95@gmail.com; СМОЛИНА Милена Васильевна – ст. преподаватель, milena-smolina@ya.ru.