

Получение, структура, свойства

УДК 621.921.34-413:662.23.05

**А. А. Шульженко, В. Г. Гаргин, Н. А. Русинова,
А. С. Осипов, М. Г. Лошак, Л. И. Александрова,
Р. К. Богданов, А. П. Загора, В. Н. Ткач** (г. Киев)

Алмазный поликристаллический композиционный материал и его свойства

Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию алмазного поликристаллического материала для оснащения буровых коронок. Определены углы смачивания графита активирующими процесс спекания добавками Ni, Co и их сплавом. Испытания материалов показали, что среди исследованных композитов наибольшую долговечность и самые высокие значения предела прочности имеет композит состава $C_{алм}-Co-34Ni$.

Ключевые слова: алмаз, композит, свойства, давление, температура, никель, кобальт, сплав кобальта с никелем.

ВВЕДЕНИЕ

Породоразрушающий буровой инструмент обычно оснащают твердосплавными вставками, крупными зернами природных алмазов, поликристаллическими алмазами, например, типа карбонадо, алмазно-твердосплавными пластинами (АТП), композиционным материалом славутитч, мелкими зернами природных и синтетических алмазов, импрегнированными в металлические матрицы, а также в последнее время алмазным композиционным термостойким материалом (АКТМ) [1]. АКТМ широко используют при оснащении буровых долот [2], коронок [3, 4]. Основным достоинством материала АКТМ является его высокая (1500 К) термостабильность. Это позволяет использовать для изготовления бурового инструмента связки с высокой температурой спекания, что обеспечивает значительную прочность удержания сверхтвердых режущих вставок.

Усовершенствование бурового инструмента в соответствии со всевозрастающими требованиями к его эксплуатационным показателям требует, наряду с конструкторскими решениями, разработки новых композиционных материалов для его оснащения, которые обеспечивали бы повышение ресурса долговечности и надежности инструмента при эксплуатации в условиях циклических нагрузок. Рабочий алмазосодержащий слой на твердосплавной подложке обычно имеет высоту ~ 0,8—20 мм. Для оснащения буровых коронок нужны

© А. А. ШУЛЬЖЕНКО, В. Г. ГАРГИН, Н. А. РУСИНОВА, А. С. ОСИПОВ, М. Г. ЛОШАК, Л. И. АЛЕКСАНДРОВА,
Р. К. БОГДАНОВ, А. П. ЗАГОРА, В. Н. ТКАЧ, 2010

алмазные поликристаллические вставки высотой 5—6 мм, обладающие свойствами АТП.

Целью данной работы является проведение исследований по созданию алмазного поликристаллического композиционного материала (АПКМ) повышенной прочности с использованием в качестве активирующих процесс спекания добавок кобальта, никеля и сплава кобальта с никелем, без твердо-сплавной подложки для оснащения им коронок, предназначенных для бурения пород осадочного типа.

Для достижения поставленной цели необходимо было изучить кинетику пропитки алмазного порошка и смачивание графита никелем, кобальтом и их сплавом в условиях высоких давления (8 ГПа) и температуры (1800 °С) и микроструктуру полученного композита, а также исследовать прочность и долговечность образцов, изготовленных по технологиям АКТМ и АПКМ.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для моделирования процесса спекания материала АПКМ была изучена кинетика пропитки и смачивания углеродных материалов рядом металлических расплавов. В качестве жидкой фазы были выбраны никель, кобальт и сплав кобальта с никелем (Co—66 % (по массе), Ni — 34 % (по массе)). В качестве исходных металлов использовали порошки никеля (ГОСТ 9722—79) и кобальта (ГОСТ 9721—79), в качестве твердой фазы — алмазы марки АСМ зернистостью 40/28 и подложки графита марки МГ-1.

Теоретический и практический интерес представляет смачивание твердых тел металлическими расплавами в условиях высоких давления (8 ГПа) и температуры (1800 °С), а именно, в процессе фазового перехода графита в алмаз и при спекании алмазов. Для определения смачивания твердых тел металлическими расплавами методом покоящейся капли в условиях высоких давления и температуры использовали методику, описанную в [5]. Согласно этой методике, капля металлического расплава формируется на поверхности исследуемого материала в инертной жидкой среде в условиях всестороннего сжатия.

В настоящей работе средой, передающей давление, был расплав хлористого натрия (NaCl), который выполнял одновременно роль флюса. Выбор NaCl обусловлен тем, что указанное вещество при высоком давлении расплавляется [6], обеспечивая формирование капли расплавленного металла и растекание ее по поверхности графита, оставаясь химически инертным к металлическому расплаву и графиту. Схема сборки ячейки высокого давления для проведения экспериментов по смачиванию приведена на рис. 1.

При проведении экспериментов использовали прессовое оборудование с усилием 20 МН. Исходные металлические порошки компактировали в форме цилиндров с диаметром основания 3—4 мм и высотой 2—3 мм. Исследуемый образец металла на графитовой подложке размещали горизонтально в ячейке высокого давления под слоем заранее уплотненного флюса. При проведении экспериментов время выдержки при высокой температуре достигало 60 с, что гарантировало полное растекание исследуемого металла по твердой поверхности.

Изучение кинетики пропитки и спекание АПКМ проводили в аппарате высокого давления типа “тороид” с диаметром центрального углубления 30 мм. Для изготовления образцов были спрессованы нагреватели из графита диаметром 18 мм, высотой 6 мм с цилиндрическим гнездом диаметром 5,2 мм. В цилиндрические гнезда помещали экраны из ниобия толщиной

0,1 мм (рис. 2), которые заполняли шихтой, содержащей алмазный порошок марки АСМ зернистостью 40/28, и металлический порошок с небольшой добавкой карбида вольфрама, повышающего механические свойства материала [7]. Наличие металлической оболочки (экрана) в сборке при проведении процесса спекания АПКМ предохраняет графитовый нагреватель от взаимодействия с металлическим расплавом и позволяет реализовывать эксперименты по изучению кинетики пропитки и спеканию алмазных кристаллов. Методика проведения экспериментов описана в [8].

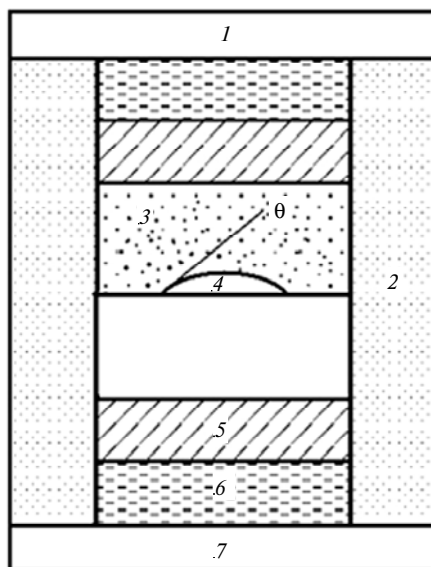


Рис. 1. Схема ячейки реакционного объема [5] для исследования смачивания: молибденовая пластина (1), графитовый нагреватель (2), NaCl (3), капля расплава исследуемого металла (4), графитовая подкладка, МГ-1 (5), графитовый диск (6), пиррофиллит (7).

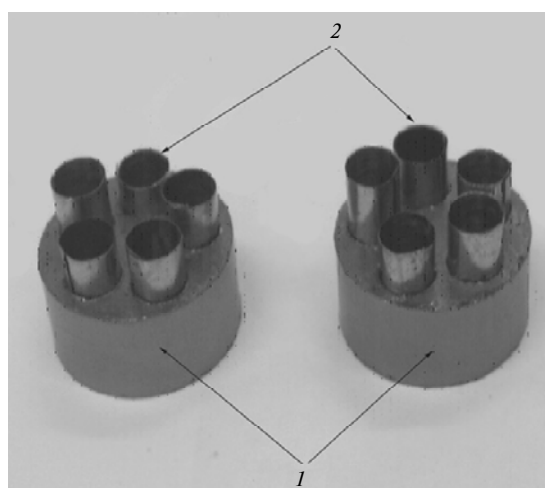


Рис. 2. Ячейка высокого давления: графитовая матрица (1), экран из ниобия (2).

Микроструктуру алмазного поликристаллического материала исследовали на растровом электронном микроскопе “Zeiss EVO 50 XVP”, укомплектованном анализатором рентгеновских спектров “INCA Penta FET X3”.

Экспериментальные исследования износостойкости вставок проводили по торезскому песчанику VIII—IX категории буримости на токарно-винторезном станке мод. ДИП 200 с использованием специальной оснастки для закрепления керна горной породы в виде разрезного цилиндра и стакана, а также специального приспособления для закрепления исследуемого образца АПКМ в резцедержателе патрона.

Исследуемый образец подводили к поверхности керна горной породы, где и осуществляли процесс врезания.

Интенсивность изнашивания I определяли как отношение износа вставки Δm к величине проходки на вставку L :

$$I = \frac{\Delta m}{L}, \text{ г/м.}$$

Величину проходки на вставку L , м определяли по формуле

$$L = \frac{\pi D n}{60} t,$$

где D — диаметр керна, м; n — частота вращения шпинделя станка, мин^{-1} ; t — время точения, мин.

Испытание образцов на сжатие и их циклическое нагружение выполняли с помощью универсальной испытательной машины УТС100 (Германия) в автоматическом режиме. Циклическое нагружение сжатием осуществляли по пилообразной схеме, в которой каждый цикл представлял собой плавное возрастание нагрузки от нуля до установленной максимальной величины с дальнейшим таким же плавным снижением нагрузки до нуля (нулевой цикл). Все испытания проводили с одинаковой за период цикла скоростью нагружения — 200 Н/с.

Циклические испытания сжатием выполняли на трех уровнях максимальной нагрузки цикла. Максимальное напряжение цикла каждого уровня соответствовало $\sim 0,5, 0,3$ и $0,15$ предела прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ композита АКТМ, который уже нашел применение в промышленности как инструментальный материал и потому был принят базовым, с которым сравнивали другие исследуемые алмазные композиты, отличающиеся по составу. При испытаниях суммарная погрешность по нагрузке от одного цикла к другому не превышала 2 %. Для того чтобы обеспечить передачу нагрузки образцу без деформации передающих опор, последние были изготовлены из мелкозернистого твердого сплава марки ВКЗМ, который имеет высокие упругие характеристики. Для уменьшения влияния контактных сил трения на опорных поверхностях образца испытания проводили с использованием прокладок из алюминиевой фольги толщиной 0,02 мм. Проведение испытаний образцов на трех уровнях максимальной нагрузки цикла сделало возможным построение кривых ограниченной усталости для исследованных композитов.

Основным критерием долговечности было количество циклов нагружения до полного разрушения образца. Долговечность каждого из композитов на каждом уровне нагружения оценивали как среднюю величину по результатам испытаний трех образцов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для формирования поликристаллической структуры на основе алмаза, для которой характерен сплошной каркас из алмазных частиц, первоочередным является формирование связи алмаз—алмаз. Основная роль в этом процессе

принадлежит пластической деформации частиц алмаза под воздействием высоких давления и температуры. Температура начала пластической деформации микропорошков алмаза при $p = 8$ ГПа составляет 1230 К. Показано [9], что при спекании давление в точках контакта алмазных зерен может достигать 130 ГПа. В порах между частицами алмаза на внеконтактных поверхностях, где давление при спекании значительно ниже, образуется графит. В связи с этим смачиваться жидкими металлами будет не алмаз, а графит, что предусмотрено в наших экспериментах.

На рис. 3 представлены образцы, полученные пропиткой алмазного порошка никелем, кобальтом и их сплавом. Анализ структуры полученного алмазного поликристаллического композиционного материала показал, что за один и тот же промежуток времени (9 с) фильтрация никеля через слой алмазного порошка произошла почти на 100 % (рис. 3, *а*), кобальта — на 50 % (рис. 3, *б*), смеси никеля и кобальта — на 65 % (рис. 3, *в*).

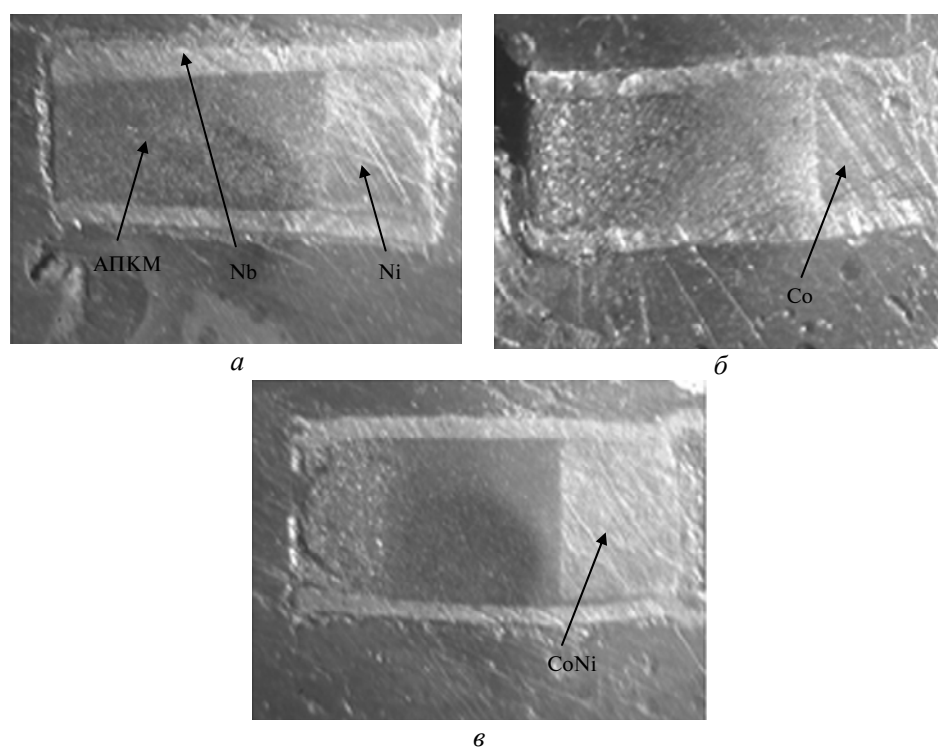


Рис. 3. АПКМ — алмазный поликристаллический композиционный материал, полученный с использованием никеля (*а*), кобальта (*б*) и их сплава (*в*).

Результаты смачивания графита никелем, кобальтом и сплавом Co—Ni приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, все расплавы хорошо смачивают графит, поэтому могут быть рекомендованы в качестве добавок, активирующих процесс спекания алмазных композитов.

Как видно из рис. 4, *б* в структуре поликристаллического слоя АПКМ, полученного в системе $C_{алм}$ —Co, преобладают крупные зерна алмаза размером 20—40 мкм, между которыми расположены мелкие зерна и кобальт с растворенным в нем карбидом вольфрама. Содержание кобальта в алмазном слое составляет около 4 % (по массе). Кроме того, помимо непосредственного контакта крупных зерен алмаза, связь между ними осуществляется также

за счет мелкозернистого алмазного каркаса. Это обстоятельство в значительной мере определяет такие физико-механические свойства вставок как износостойкость, высокая прочность и относительно высокая абразивность.

Таблица 1. Углы смачивания графита никелем, кобальтом и сплавом Co—Ni при давлении 8 ГПа и температуре 1800 °С

Металл	Угол смачивания, град
Ni	21
Co	42
Co—34Ni	51

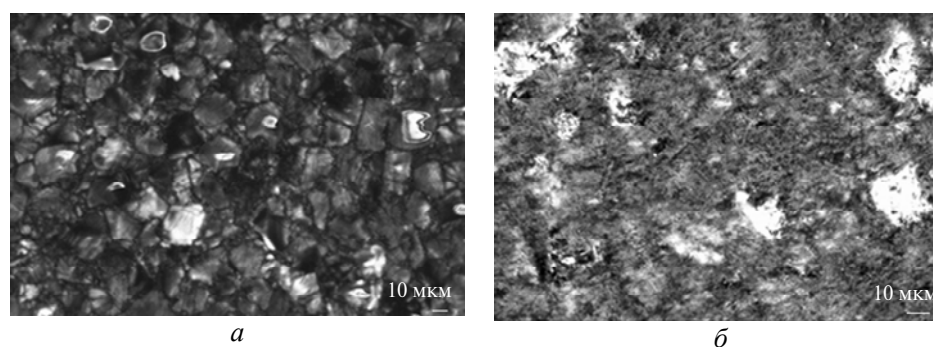


Рис. 4. Катодолуминесцентная топограмма поликристаллического материала, полученного в системах $C_{алм}$ —Co—34Ni (*a*) и $C_{алм}$ —Co (*б*).

В структуре поликристаллического материала, полученного в системе $C_{алм}$ —Co—34Ni, преобладают зерна алмаза размером 20—40 мкм, между которыми расположены мелкие зерна и сплав кобальта с никелем с растворенным в нем карбидом вольфрама (см. рис. 4, *a*). Такая структура формируется в результате скольжения алмазных частиц относительно друг друга при создании давления и в начальный период спекания за счет дробления менее прочных частиц, скалывания выступов более прочных частиц, а также перекристаллизации в алмаз через жидкую фазу образовавшегося графита на внеконтактных поверхностях алмазных частиц. Непосредственная связь между крупными алмазными частицами осуществляется путем образования небольших перешейков за счет их пластической деформации в местах контакта.

На катодолуминесцентной топограмме поликристаллического материала, полученного в системе $C_{алм}$ —Co—34Ni (см. рис. 4, *a*), видно, что алмазные зерна имеют трещины или полностью разрушены. Трещины и разрушения могли произойти при создании высокого давления в начальной стадии спекания. На представленной топограмме АПКМ, полученного в системе $C_{алм}$ —Co (см. рис. 4, *б*), видно, что трещины и разрушения на исследуемом материале отсутствуют.

Данные о величине предела прочности $\sigma_{сж}$ при одноосном статическом сжатии для АПКМ, полученные в системах $C_{алм}$ —Co и $C_{алм}$ —Co—34Ni, приведены в табл. 2. Как видно, предел прочности при сжатии композита состава $C_{алм}$ —Co—34Ni достигает величины 3,5 ГПа (максимальное значение) и практически соответствует прочности твердого сплава ВК15.

В работе изучен также характер разрушения композитов различных составов. Композиты составов $C_{алм}$ —SiC и $C_{алм}$ —Co при достижении критической

нагрузки разрушались на мелкие фрагменты, что характерно для твердых, хрупких материалов; композит состава $C_{алм}-Co-34Ni$ разрушался на крупные фрагменты при достижении критических нагрузок параллельных приложенной нагрузке. Такое разрушение композита, содержащего сплав $Co-34Ni$, можно объяснить высокими механическими свойствами никеля. Так, например, ударная вязкость никеля в 37 раз выше, чем кобальта, предел прочности при растяжении выше в 2,5 раза, относительное удлинение в 12 раз выше, чем кобальта и т. д.

Таблица 2. Предел прочности композитов при одноосном статическом сжатии

Материал	$\sigma_{сж}$, ГПа	
	среднее	максимальное
$C_{алм}-SiC$	2,4	2,7
$C_{алм}-Co$	2,2	2,5
$C_{алм}-Co-34Ni$	2,8	3,5
BK25	3,0	—
BK20	3,4	—
BK15	3,6	—

Сравнительные испытания на износостойкость вставок АПКМ состава $C_{алм}-Co-34Ni$ и $C_{алм}-Co$ приведены в табл. 3. Видно, что износостойкость вставок, содержащих никель, ниже чем вставок, содержащих кобальт, что хорошо согласуется с результатами испытания вставок на сжатие и характером их разрушения. Следовательно, вставки композита, содержащего никель, обладают более высокой вязкостью разрушения, чем вставки, содержащие только кобальт. Меньшую износостойкость АПКМ, содержащего никель, можно объяснить большей дробимостью алмазных зерен в процессе спекания, чем у композита, содержащего только кобальт, и нестабильностью результатов по износостойкости, которые изменяются от 4 до 11 мг/м (см. табл. 3). Как ранее нами было показано [7], с уменьшением зернистости алмазных порошков, используемых для получения поликристаллических композиционных материалов, снижаются их значения износостойкости, особенно при обработке горных пород. Однако как показали результаты определения твердости по Виккерсу, вставки АПКМ, содержащие никель, имеют высокие значения твердости. Так, при нагрузке на индентор 50 Н твердость материала составила 52,5 ГПа. Такие значения соответствуют лучшим образцам, полученным в системах $C_{алм}-Si$ и $C_{алм}-Co$.

Механические свойства (твердость и износостойкость) материала АПКМ, содержащего Co или сплав $Co-34Ni$, при обработке горных пород значительно превышают таковые для твердосплавных вставок. Небольшие добавки в состав АПКМ карбида вольфрама еще больше повышают механические свойства материала [7].

Для аттестации работоспособности материала признано целесообразным провести исследование долговечности АКТМ и АПКМ при циклическом нагружении сжатием с целью установления соответствующих критериев. В качестве образцов для исследования были использованы цилиндрические вставки из АКТМ и АПКМ для оснащения буровых долот. Испытуемые образцы были изготовлены на основе синтетического алмазного порошка марки

АСМ 40/28 в условиях высоких давления и температуры путем пропитки кремнием (АКТМ), Со и Со—34Ni (АПКМ).

Таблица 3. Сравнительные испытания на износостойкость вставок АПКМ с различным составом активирующих добавок

Композит	Образец	Вес вставки, мг		Скорость резания, м/ч	Интенсивность изнашивания, мг/м	Средняя интенсивность изнашивания, мг/м
		начальный	конечный			
C _{алм} —Со	1	305	288	100,8	4,5	4,4
	2	271	262		4,1	
	3	289	278		4,6	
C _{алм} —Со—34Ni	4	315	285	102,6	4,0	7,7
	5	295	286		8,1	
	6	337	315		11,1	

Правильную геометрическую форму спеченным цилиндрическим образцам из алмазных композиционных материалов, которые предназначены для статических и циклических испытаний сжатием, обеспечивали алмазным шлифованием как по образующей, так и по торцевым поверхностям таким образом, чтобы непараллельность последних и их неперпендикулярность к продольной оси образца не превышала 0,01 мм. После окончательной обработки образцы имели размеры $\varnothing 3,9 \times 4,9$ мм. Предел прочности при статическом сжатии для каждой изготовленной партии образцов определяли как среднее значение по испытаниям трех образцов. По результатам этих испытаний был определен уровень нагрузок для циклических испытаний.

В табл. 4 приведены результаты испытаний исследуемых композитов на сжатие — средние значения пределов прочности по результатам испытаний трех образцов для каждой партии, а также максимальные значения предела прочности, которые были достигнуты для каждой партии композитов.

Таблица 4. Предел прочности при сжатии композитов на основе алмазного порошка марки АСМ 40/28

Партия	Композит	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	
		средний	максимальный
1	C _{алм} —SiC	2820	3380
2	C _{алм} —Со	2850	3030
3	C _{алм} —Со—34Ni	3170	4130

Композиты C_{алм}—SiC и C_{алм}—Со (партия 1 и 2) имеют почти одинаковую прочность при сжатии. Добавление никеля в состав композита (партия 3) приводит к повышению его прочности при сжатии до 12 % при уменьшении его хрупкости, о чем свидетельствует характер разрушения образцов. В то время как образцы партий 1 и 2 разрушаются на очень мелкие фрагменты, образцы партии 3 разрушаются в продольном направлении с образованием двух или нескольких крупных фрагментов. Уменьшение хрупкости композита партии 3 можно объяснить добавкой никеля, который имеет более высокие

чем у кобальта показатели таких механических характеристик как ударная вязкость, предел прочности и относительное удлинение при растяжении.

В [10] установлено, что прочность при сжатии и долговечность образцов из АКТМ (активирующая добавка Si) зависят от прочности связи между зернами алмаза. Так наиболее высокую прочность при сжатии (2050 МПа) и долговечность при циклическом сжатии (360 циклов) имели образцы АКТМ, изготовленные из порошков синтетического алмаза. А образцы, спеченные на основе природных алмазов, имели прочность и долговечность на 10 % ниже. Различие в показателях прочности и долговечности обусловлено более развитой поверхностью синтетического алмаза по сравнению с природным, т. е. более прочной связью между зёрнами.

Результаты испытаний циклическим сжатием исследуемых композитов, спеченных на основе синтетических алмазов, приведены на рис. 5.

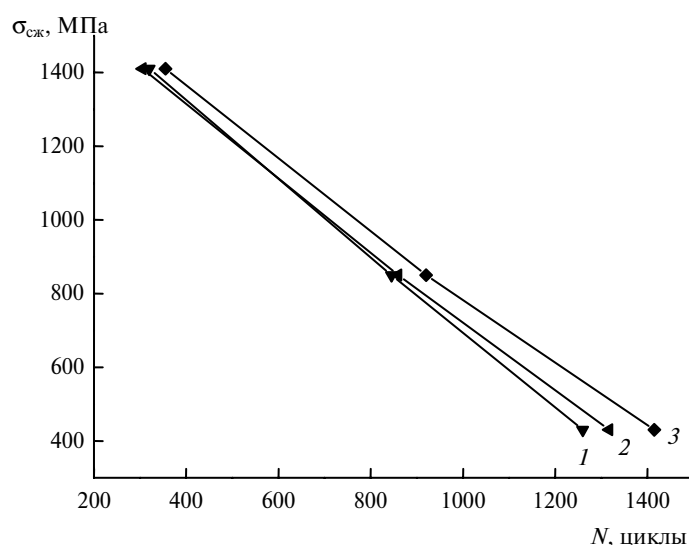


Рис. 5. Кривые ограниченной усталости алмазных композитов при циклическом нагружении сжатием: $C_{алм}-SiC$ (1), $C_{алм}-Co$ (2), $C_{алм}-Co-34Ni$ (3).

Анализ приведенных зависимостей долговечности алмазных композитов от уровня максимальной нагрузки цикла свидетельствует о том, что на всех уровнях нагрузки композиты, которые изготовлены с применением активирующей добавки в виде сплава $Co-34Ni$, имеют преимущество над другими испытанными композитами. Такое преимущество является прогнозируемым, так как этот композит имеет не только самую высокую среднюю величину предела прочности при сжатии среди исследованных композитов, а и самый высокий показатель $\sigma_{сж}$ отдельного образца среди всех испытанных (4130 МПа), который соответствует уровню предела прочности при сжатии таких марок вольфрамовых твердых сплавов как ВК15 и ВК10КС, используемых для оснащения бурового инструмента.

Как показали проведенные исследования образцов алмазных композитов, микроструктура которых формируется в условиях высокого давления, в исходном состоянии они имеют определенную ориентацию структурных элементов и характерную сформированную анизотропию напряжений. В процессе циклического нагружения происходят постепенные изменения ориентации структурных элементов, а также уменьшение анизотропии напряжений. Появление микротрещин в структурных составляющих алмазных ком-

позитов в процессе циклического нагружения задолго до формирования магистральной трещины сопровождается локальной диссипацией энергии, что приводит к некоторому уменьшению анизотропии напряжений. Интенсивность структурных изменений в алмазных композитах при циклическом нагружении возрастает с увеличением уровня максимального напряжения цикла.

При нагружении композита, имеющего скелетную структуру, выполняется локальная схема нагружения зерен твердой составляющей и разрушение возникает в первую очередь в тех зернах, которые испытывают изгиб с расклиниванием другими зернами. Такая схема в полной мере прослеживается в структуре алмазных композитов $C_{алм}-SiC$, изобилующей большим количеством точечных контактов алмазных зерен между собой, что приводит к разрушению алмазных зерен в процессе нагружения сжатием. Для композита $C_{алм}-Co-34Ni$ микротрещины проходят по более пластичной составляющей композита.

ВЫВОДЫ

Исследование кинетики пропитки алмазного порошка и смачивания графита никелем, кобальтом и сплавом $Co-34Ni$ в условиях высоких давления и температуры ($p = 8$ ГПа, $T = 1800$ °С) показали, что все расплавы хорошо пропитывают алмазный порошок и смачивают графит, поэтому могут быть рекомендованы в качестве добавок, активирующих процесс спекания алмазных композитов.

Спекание алмазных синтетических порошков с размером частиц 28—40 мкм при высоких давлениях и температуре с использованием в качестве активирующей процесс спекания добавки сплава кобальта с никелем позволило получить сверхтвердый алмазный поликристаллический композиционный материал с высоким пределом прочности при одноосном статическом сжатии (2,8 ГПа) и высокой твердостью ($HV5 = 52,5$ ГПа).

Проведенные циклические испытания при сжатии показали, что среди исследованных алмазных композитов $C_{алм}-SiC$, $C_{алм}-Co$ и $C_{алм}-Co-34Ni$ большую долговечность при циклическом нагружении и самое высокое значение предела прочности при сжатии (4130 МПа) имеет композит состава $C_{алм}-Co-34Ni$.

Исследованиями подтверждено, что циклические испытания сжатием являются чувствительным методом оценки структурного состояния алмазных композиционных материалов, который может быть эффективно использован для прогнозирования работоспособности новых создаваемых материалов, а также при разработке оптимальных способов их изготовления.

Сравнительные испытания вставок на износостойкость по торезскому песчанику VIII—IX категории буримости показали, что более высокой износостойкостью обладают вставки, полученные с использованием в качестве активирующей спекание добавки кобальта.

Вставки с повышенной прочностью, содержащие сплав $Co-34Ni$ в качестве добавки, активирующей процесс спекания, могут быть рекомендованы для оснащения коронок (вместо твердосплавных вставок) для бурения пород осадочного типа.

Наведено результати експериментальних досліджень по створенню алмазного полікристалічного матеріалу для оснащення бурових коронок. Визначено крайові кути змочування графіту добавками, що активують процес спікання (Ni, Co та їх сплавом). Випробування матеріалів показали, що серед досліджених композитів найбільш

шу довговічність та найвищі значення межі міцності має композит складу $C_{алм}-Co-34Ni$.

Ключові слова: алмаз, композит, властивості, тиск, температура, нікель, кобальт, сплав кобальту з нікелем.

The results of experimental studies on the development of diamond polycrystalline material to equip the drill bits. Determined contact angles of graphite activates the process of sintering additives (Ni, Co and their alloys). Material tests showed that among the investigated composites greatest longevity and the highest tensile strength values is a composite of $C_{diam}-Co-34Ni$.

Key words: diamond, composite, property, pressure, temperature, nickel, cobalt, alloy a cobalt and a nickel.

1. Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Русинова Н. А. Алмазный композиционный термостойкий материал для оснащения бурового инструмента // 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. 8—12.
2. Бочковский А. М. Алмазные комбинированные вставки для бурового инструмента // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2005. — Вып. 8. — С. 75—77.
3. Богданов Р. К., Загора А. П., Исонкин А. М. Буровой инструмент из алмазного композиционного термостойкого материала // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2004. — Вып. 7. — С. 18—21.
4. Богданов Р. К., Дутка В. А., Загора А. П. К вопросу оснащения сверхтвердыми материалами инструмента для бурения скважин в породах средней твердости // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2005. — Вып. 8. — С. 78—82.
5. Найдич Ю. В., Шульженко А. А., Андреев А. В. и др. Методика определения смачиваемости твердых тел металлическими расплавами в условиях сверхвысоких давлений // Заводская лаборатория. — 1986. — 52. — № 7. — С. 33—35.
6. Akella J., Vaidya S. N., Kennedy G. C. Melting of sodium chloride at pressure to 65 kbar // Phys. Rev. — 1969. — 185, N 3. — P. 1135—1139.
7. Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Шишкин В. А., Бочечка А. А. Поликристаллические материалы на основе алмаза. — Киев: Наук. думка, 1989. — 192 с.
8. Русинова Н. О., Шульженко О. О., Гаргин В. Г., Осипов О. С. Кинетика просочивания та змочування алмазних порошків металічними розплавами на основі кобальту та нікелю в умовах високих тисків // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2010. — Вып. 13. — С. 99—103.
9. Novikov N. V., Shulzhenko A. A. Promising superhard materials and efficient technologies of their production // Innovative Superhard Materials and Sustainable Coatings for Advanced Manufacturing / Ed. by J. Lee, N. Novikov. — The Netherlands: Springer, 2005. — NATO Sci. Ser. II: Mathematics, Physics and Chemistry. — Vol. 200. — P. 91—105.
10. Лошак М. Г., Шульженко А. А., Александрова Л. И. и др. Влияние свойств микропорошков алмаза на прочность и долговечность изготовленных на их основе поликристаллических сверхтвердых материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. — Вып. 11. — С. 218—221.

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

Поступила 01.07.10