

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.762:620.22-419:669.25

**А. А. Зайцев, Д. А. Сидоренко, Е. А. Левашов,
В. В. Курбаткина, С. И. Рупасов, В. А. Андреев,
П. В. Севастьянов** (г. Москва)

Разработка и применение дисперсно-упрочненной связки на основе сплава Cu–Ni–Fe–Sn для режущего инструмента из сверхтвердых материалов

Разработаны дисперсно-упрочненные наночастицами W, WC, NbC, Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, BN связки на основе сплава Cu–Ni–Fe–Sn для алмазного инструмента, предназначенного для резки железобетона и огнеупорных материалов. Изучены особенности холодного прессования и спекания смесей связки с наночастицами, а также физико-механические и трибологические свойства компактных материалов. Применение разработанных дисперсно-упрочненных связок позволило увеличить ресурс инструмента до 3,5 раз без снижения производительности резания.

Ключевые слова: *связка, алмазный инструмент, дисперсно-упрочненный материал, алмазный отрезной сегментный круг, алмазное кольцевое сверло, резка, железобетон, огнеупорный материал.*

ВВЕДЕНИЕ

Связка, служащая для закрепления сверхтвердого компонента (алмаза и кубического нитрида бора), играет ключевую роль в работоспособности инструмента [1–3]. В алмазном инструменте применяют три типа связок: металлические, керамические и органические. Выбор связки определяется в первую очередь условиями работы инструмента (резка или шлифовка), типом обрабатываемого материала, высокой адгезионной активностью связки по отношению к алмазу и др. Подавляющее большинство связок для режущего алмазного инструмента, получаемого по технологии порошковой металлургии, содержит в составе металлы триады железа (Fe, Co, Ni) и Cu с добавками Sn [4–7].

В настоящей работе рассмотрена металлическая связка на основе сплава Cu–Ni–Fe–Sn для режущего инструмента (алмазные отрезные сегментные диски и алмазные сегментные сверла), предназначенного для обработки широкого спектра материалов: мрамора, гранита, асфальта, армированного бе-

© А. А. ЗАЙЦЕВ, Д. А. СИДОРЕНКО, Е. А. ЛЕВАШОВ, В. В. КУРБАТКИНА, С. И. РУПАСОВ, В. А. АНДРЕЕВ,
П. В. СЕВАСТЬЯНОВ, 2012

тона. Поскольку при резке таких материалов образуется абразивный шлам, то использовать органические связки с низкой износостойкостью нельзя, а керамические связки из-за высокой износостойкости не обеспечивают работу инструмента в режиме самовскрытия.

Для работы инструмента в режиме самозатачивания необходимо обеспечить соразмерность износа связки и алмазных зерен в процессе резания, в противном случае будет происходить “засаливание” инструмента (если связка изнашивается медленнее алмазных зерен и новые зерна не обнажаются) или резкое снижение ресурса инструмента (если связка изнашивается быстрее алмазных зерен, что приводит к вырыванию целых зерен абразива).

Анализ литературных источников [8–11] показал, что оптимизация физико-механических свойств связок позволяет значительно увеличить ресурс работы режущего алмазного инструмента. Простым в технологическом исполнении способом увеличения физико-механических и трибологических свойств связок является введение в их состав упрочняющих наночастиц в относительно небольшом (2–6 % (по массе)) количестве, что позволяет получать композиты при температурах близких к температуре спекания исходных связок. Как показали предварительные исследования, введение в состав сплавов на основе кобальта, железа и никеля наноразмерных упрочняющих частиц позволяет значительно увеличить твердость, прочность при изгибе, ударную вязкость и износостойкость материала за счет реализации эффекта дисперсного упрочнения [12–19].

Целью работы было исследование возможности дисперсного упрочнения связки на основе меди, широко используемой при производстве инструмента из сверхтвердых компонентов, и повышение служебных характеристик алмазного инструмента.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на промышленно выпускаемой компанией “SP-Technology” (Австрия) связке В13 для алмазного инструмента. Химический состав связки, а также назначение алмазного инструмента на ее основе, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав связки В13

Связка, производитель	Состав, % (по массе)	Размер частиц, мкм	Назначение
В13, “SP-Technology” (Австрия)	Cu – 42	3–25	Производство сегментов для резки средне- и малоабразивных материалов: низкоармированного железобетона, мрамора, известняка, мягких сортов гранита
	Ni – 34		
	Fe – 12		
	Co – 0,5		
	W – 0,5		
	Sn – 6,5		
Cr – 4			

В качестве дисперсно-упрочняющих частиц были выбраны нанопорошки W, WC, NbC, Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, BN (табл. 2).

Исходные порошковые смеси готовили в центробежной планетарной мельнице (ЦПМ) МПП-1 (Россия) при контролируемом соотношении массы шаров к массе смеси и варьируемой длительности обработки. Полученную шихту с различным содержанием добавок нанопорошков спекали в защитной

среде при температуре $T_c = 850\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$ в муфельной печи при выдержке 30 мин. Компактные образцы для определения механических и трибологических свойств получали по технологии горячего прессования в инертной среде на установке DSP-475 фирмы “Dr Fritsch” (Германия) при температуре $865\text{--}880\text{ }^\circ\text{C}$ и максимальном давлении прессования $p = 350\text{ кГ/см}^2$. Испытания на трехточечный изгиб для определения предела прочности на изгиб $\sigma_{\text{изг}}$ и ударной вязкости KCU проводили на универсальной испытательной сервогидравлической машине марки LF-100 kN фирмы “Walter + Bai” (Швейцария) по ГОСТ 18228–94.

Таблица 2. Свойства нанопорошков

Наночастицы	d , нм	$S_{\text{уд}}$, м ² /г	$\rho_{\text{нас}}$, г/см ³	Примеси, % (по массе)	Фазовый состав	Метод получения
Al ₂ O ₃	10–40	13–25	0,2	0,014–0,2	α -фаза, γ -фаза	Плазмохимический (ФГУП СКХ)
ZrO ₂	10–40	10–14	0,5	0,10–0,05	тетрагональная и моноклинная фазы	Плазмохимический (ФГУП СКХ)
WC	20–100	6–9	2,4	до 5 %	WC, W ₂ C	Плазмохимический (ИМЕТ РАН) ТУ 1742-001-02698772–2006
NbC	20–100	6–9	2,3	до 5 %	NbC, Nb _x C	Плазмохимический (ИМЕТ РАН)
W	20–100	6–10		до 5 %	W, WC, W ₂ C	Плазмохимический (ИМЕТ РАН)
Si ₃ N ₄	Волокна диаметром 10–100	10–20	0,5	до 3 %	Si ₃ N ₄	СВС-азидный (СамГТУ) ТУ 2155-001-48122646–2006
BN	80–120	35–40	0,8	до 3 %	BN	СВС-азидный (СамГТУ) ТУ 2155-002-48122646–2006

Исследования компактных образцов методом оже-спектроскопии проводили на оборудовании центра коллективного пользования “Материаловедение и металлургия” Национального исследовательского технологического университета “МИСиС”.

Измерения твердости выполнены на твердомере марки TP 5006 по шкале В (ГОСТ 20017–74). Плотность определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281–82 с использованием аналитических весов фирмы AND (Япония). Аддитивную плотность образца с нанодобавками рассчитывали по формуле

$$\rho_{\text{адд}} = \frac{m}{\frac{m_{V21}}{\rho_{V21}} + \frac{m - m_{V21}}{\rho_{\text{нанодоб}}}}, \quad (1)$$

где m – масса образца, г; $m_{1/21}$ – масса связки в образце, г; $\rho_{1/21}$ и $\rho_{\text{нанодоб}}$ – плотность связки и нанодобавки соответственно, г/см³.

Пористость образцов рассчитывали по формуле

$$\Pi = \frac{\rho_{\text{адд}} - \rho}{\rho_{\text{адд}}} 100 \%, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{адд}}$ – аддитивная плотность образца, г/см³; ρ – реальная плотность образца, г/см³.

Плотность и механические свойства определяли на трех различных образцах, результаты измерений обрабатывали статистическими методами.

Трибологические испытания проводили на автоматизированной машине трения Tribometer фирмы “CSM Instruments” (Швейцария) по схеме неподвижный шарик–вращающийся диск. Условия испытаний следующие: контртело – шарик Al₂O₃ диаметром 3 мм, нормальная нагрузка – 2 Н, линейная скорость вращения – 10 м/с, среда – воздух, диаметр дорожки – 6,1 мм, пробег $L = 122\text{--}500$ м. Измеряли коэффициент трения μ трущейся пары. Исследование бороздки износа (трека) образца проводили на профилометре S8P фирмы “Mahr”. Износ связки $W_{\text{св}}$ рассчитывали по формуле

$$W_{\text{св}} = \frac{2\pi RS}{LF}, \quad (3)$$

где R – радиус трека, мм; S – средняя площадь сечения бороздки износа (трека), мм²; L – пробег, м; F – нормальная нагрузка, Н.

Испытания алмазных отрезных сегментных кругов (АОСК) диаметром 600 и 800 мм проводили на мостовом отрезном станке Алмаз-3 (Россия). Основные параметры резания представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные параметры резания АОСК

Армирование бетона, % (по объему)	Глубина реза за проход, мм	Частота вращения, мин ⁻¹	Ток нагрузки, А	Охлаждение
6	4	1500	8–10	Водяное, 10 л/мин

Обрабатываемый материал:

– монолитный бетон марки М400 с гранитным наполнителем и средним армированием 6 % (по объему), арматура 12 и 24 мм.

– монолитный бетон марки М400 с гранитным наполнителем и армированием 1–12 % (по объему), арматура 12 и 24 мм.

– огнеупорный материал Бакор-33 состава, % (по массе): ZrO₂ – 33,5, SiO₂ – 13,3, Al₂O₃ – 51,5, прочие оксиды – 1,7.

Тип АОСК: сегментный круг диаметром 600 (800) мм, посадочный диаметр диска 50 мм, 36 (48) сегментов размером 40×4,2×9 (40×5,6×9) мм на круг.

Испытания алмазных кольцевых сверл (АКС) проводили на сверлильной машине DS 350/DM 28 фирмы “Eurodima” (Австрия).

Тип АКС: диаметр – 102 мм, по 9 сегментов размером 23×4×7 мм на сверло. Режим испытания: частота вращения сверла – 300 или 700 мин⁻¹, ток двигателя при испытании – 8 А (поддерживался постоянным), охлаждение – водяное, 10 л/мин.

Основные параметры сверления приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные параметры сверления АКС

Армирование	Ток нагрузки, А	Частота вращения сверла, мин ⁻¹	Охлаждение
Низкое, ~ 1 % (по объему)	8	700	Водяное, 10 л/мин
Высокое, ~ 10 % (по объему)		300	

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При создании дисперсно-упрочненных материалов важной задачей является разработка способа введения упрочняющей фазы. Эффективный способ введения в порошковые связки наноразмерных частиц – смешение порошков в ЦПМ. Использование высокоэнергонагруженных смесительных устройств позволяет за сравнительно небольшие промежутки времени равномерно распределить упрочняющую фазу по объему шихты. Оптимизация режимов смешивания включала в себя выбор крупности размольных тел, соотношения [масса размольных тел]:[масса шихты], а также длительности процесса. На рис. 1 представлена морфология исходных и обработанных в ЦПМ порошков связки В13.

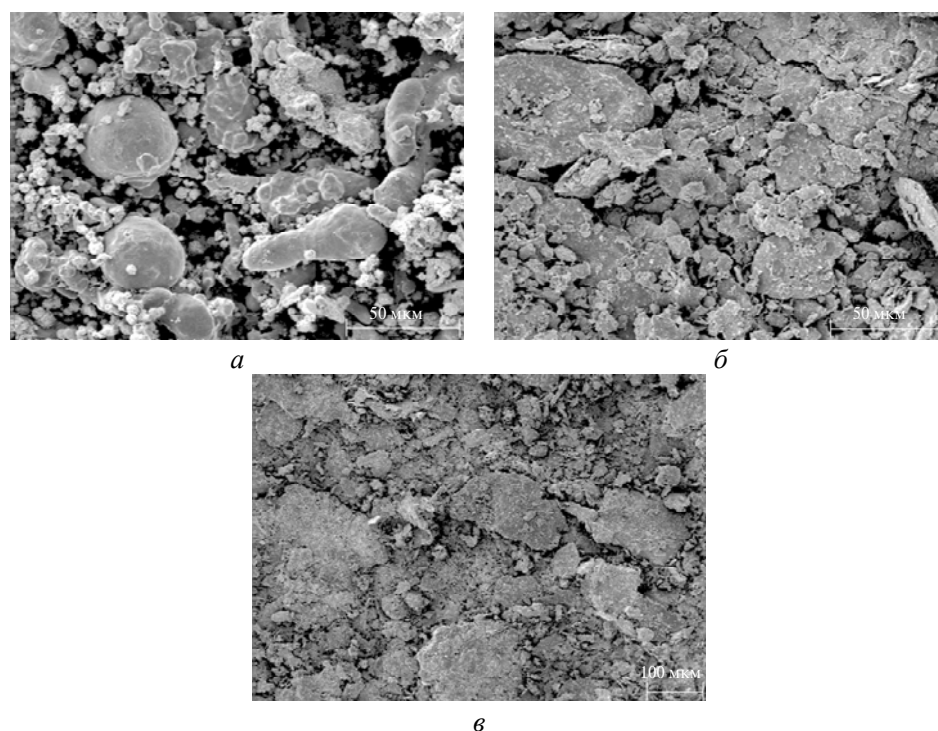


Рис. 1. Морфология исходного порошка связки В13 (а) и обработанного в ЦПМ при времени смешения 3 (б) и 6 (в) мин.

В результате смешения частицы связки приобретают сплюснутую, чешуйчатовидную форму. При увеличении времени обработки наблюдается укрупнение частиц за счет образования сложных слоистых агломератов размером до 30–80 мкм.

Обработка в ЦПМ приводит к снижению прессуемости связки, что связано с нагартовкой материала. На рис. 2 приведены характерные зависимости

остаточной пористости брикетов от давления прессования. Видно, что базовая связка, обработанная в ЦПМ, из-за нагартовки прессуется хуже. Для системы с добавками Si_3N_4 зависимость относительного объема прессовки от давления прессования описывается уравнением Бальшина [20]

$$\lg p = -m \lg \beta + \lg p_{\max}, \quad (4)$$

где p – давление холодного прессования; m – коэффициент; β – относительный объем прессовки; p_{\max} – давление, необходимое для получения беспористой прессовки.

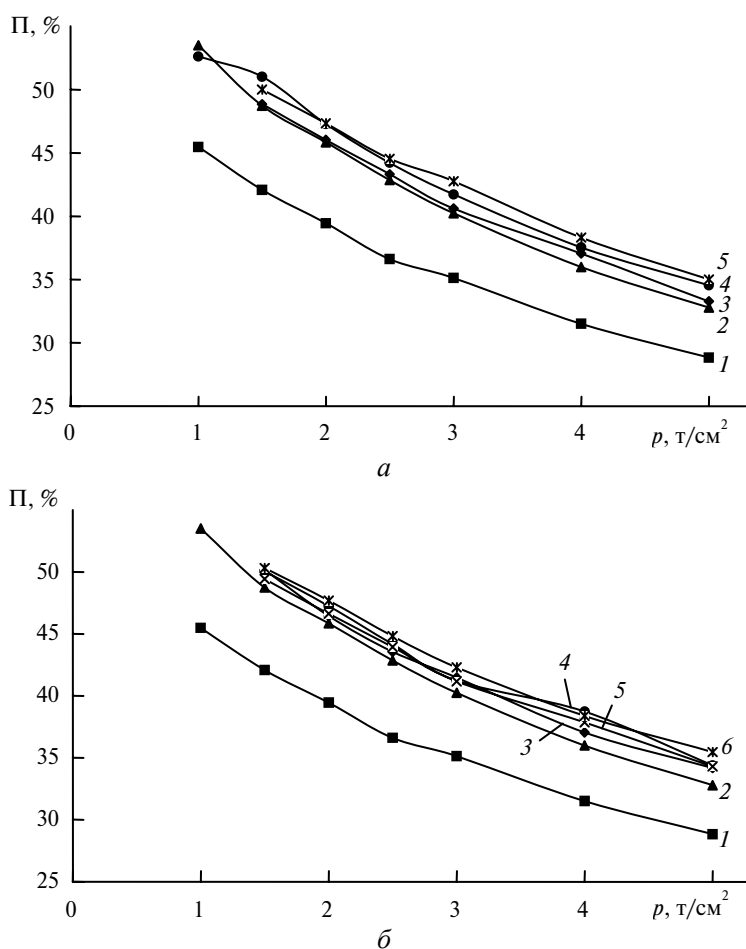


Рис. 2. Зависимость пористости брикетов, полученных из порошка связки, от давления холодного прессования: исходная связка В13 (1), В13 “0” (2), связка В13 дисперсно-упрочненная наночастицами: WC – 2 (3), 6 (4), 10 (5) % (а); Si_3N_4 – 0,75 (3), 1,5 (4), 2,29 (5), 3,95 (5) % (б). Здесь и далее В13 “0” – образец, полученный из порошка исходной связки, обработанной в ЦПМ.

При этом свободный член уравнения (4), который позволяет оценить давление, необходимое для достижения беспористого состояния прессовки, увеличивается с ростом содержания нанодобавки с 1,47 до 1,57 (табл. 5). Аппроксимацию экспериментальных данных проводили по методу наименьших квадратов [21].

Таблица 5. Аналитические зависимости $\lg p = f(\lg \beta)$ для смесей В13–(Si₃N₄)_{нано}

Состав	Уравнение вида $\lg p = -m \lg \beta + \lg p_{\max}$	Коэффициент корреляции r^2
В13 + 0,75 % S ₃ N ₄	$\lg p = -4,31 \lg \beta + 1,47$	0,99
В13 + 1,50 % S ₃ N ₄	$\lg p = -4,29 \lg \beta + 1,48$	
В13 + 2,29 % S ₃ N ₄	$\lg p = -4,46 \lg \beta + 1,51$	
В13 + 3,95 % S ₃ N ₄	$\lg p = -4,57 \lg \beta + 1,57$	

Полученные при давлении 3 т/см² брикеты с различным содержанием упрочняющих фаз подвергали изотермической выдержке в течение 30 мин при температурах 850–950 °С. Перед спеканием брикет, содержащий исходную связку В13, имел на 5 % меньшую пористость, чем все остальные брикеты, что следует учитывать при анализе кривых спекания. Зависимость плотности брикетов от температуры спекания представлена на рис. 3. Механическая обработка в ЦПМ повышает активность связки при спекании, что связано с ростом дефектности структуры порошка и большей поверхностью контакта

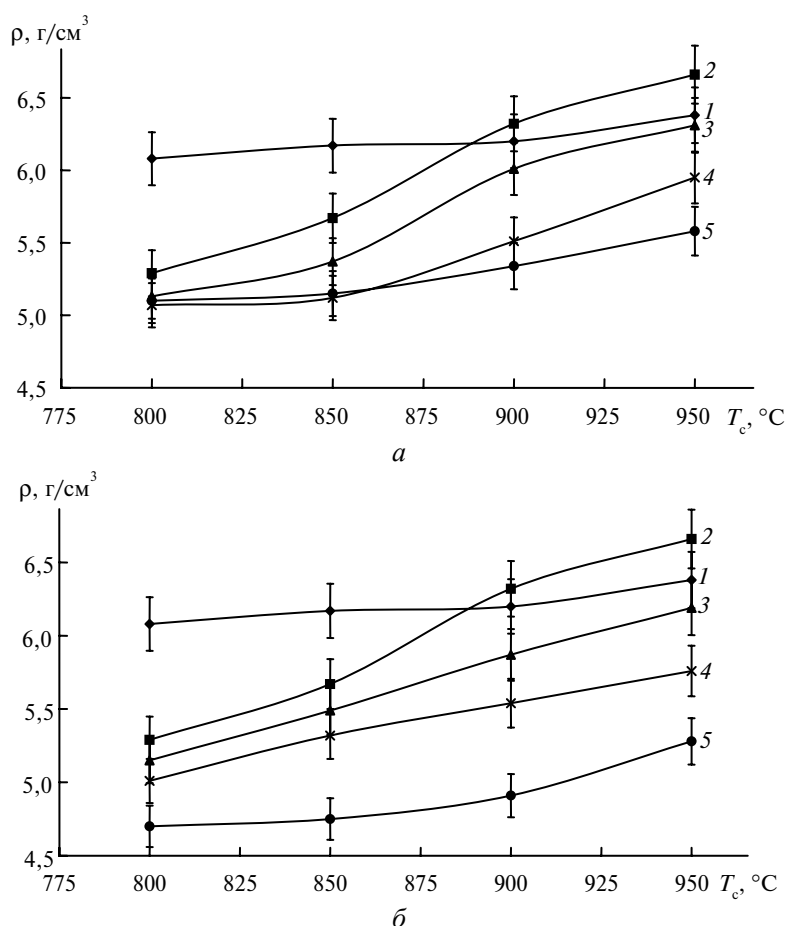


Рис. 3. Кривые спекания брикетов, полученных из порошка связки: исходной В13 (1), В13 “0” (2), дисперсно-упрочненной наночастицами WC – 2 (3), 6 (4), 10 (5) % (а); ZrO₂ – 1,32 (3), 2,6 (4), 4,6 (5) % (б); Si₃N₄ – 0,75 (3), 1,5 (4), 2,29 (5), 3,95 (5) % (б).

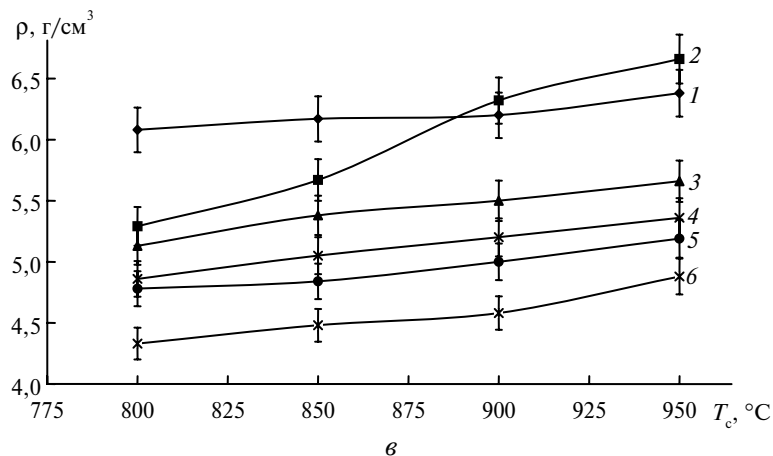


Рис. 3. (Продолжение).

частиц компонентов шихты. При увеличении температуры спекания плотность брикетов, полученных из порошка связки после обработки в ЦПМ, растет быстрее, чем плотность брикетов из исходной связки, и при $T \approx 880$ °C перекрывает разницу в их начальной плотности (см. рис. 3, кривые 1 и 2).

Рост содержания наночастиц в связке приводит к увеличению остаточной пористости, что связано с блокировкой части поверхности порошка связки реакционно-неактивным (по отношению к основному элементу Cu) тугоплавким компонентом (дополнительный диффузионный барьер), а также десорбцией газов с поверхности нанопорошков в процессе спекания. Уплотнение при спекании смесей связка–нанопорошок сильно зависит от типа вводимой добавки, а также от ее удельной поверхности. Например, образец с 0,75 % Si_3N_4 после спекания имеет большую пористость, чем образец с 2 % WC.

Распределение элементов в компактных материалах исследовали методом оже-спектрального анализа. На рис. 4 приведены оже-карты образца В13 + WC. Видно, что матрица сплава В13 состоит из светлых зерен Cu и темных зерен раствора Fe в Ni. Вольфрам распределен равномерно по объему сплава и не образует субмикронных скоплений (см. рис. 4, з). Отдельные наночастицы WC во вторичных электронах не удается разрешить, однако проведенные ранее [21] исследования фольг Co-связки с добавками WC позволяют предположить, что наночастицы расположены как по границам, так и в теле зерен матрицы.

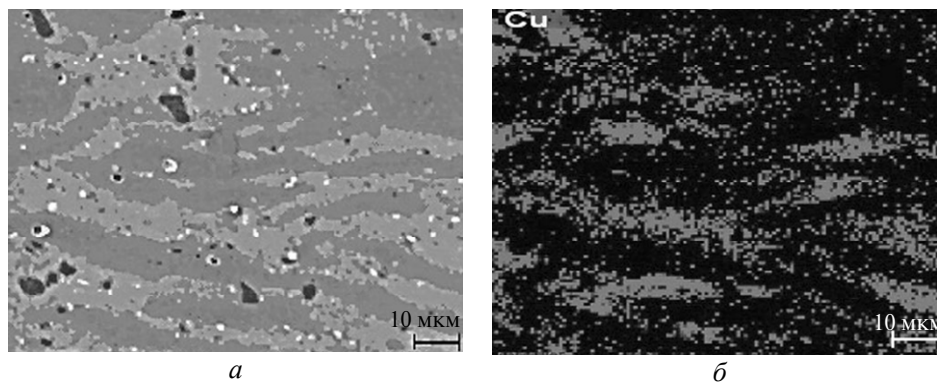


Рис. 4. Исходное место съемки (а) и оже-карты спекленного безалмазного брикета В13 + WC, снятые в характеристическом излучении $\text{CuK}\alpha$ (б), $\text{Ni(Fe)K}\alpha$ (в), $\text{WK}\alpha$ (з).

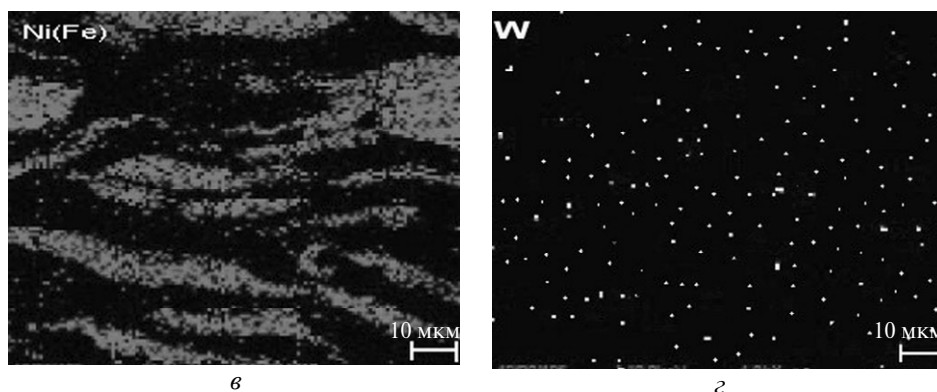


Рис. 4. (Продолжение).

Были исследованы физико-механические и трибологические свойства дисперсно-упрочненной связки В13 (табл. 6).

Таблица 6. Физико-механические и трибологические свойства дисперсно-упрочненной связки В13

Состав, % (по массе)	Время смешения, мин	T_c , °C	ρ , г/см ³	П, %	Твердость, HRB	$\sigma_{изг}$, МПа	KCU, Дж/см ²	μ	$W_{св}$, 10 ⁴ мм ³ /(Н·м)
В13	0	865	8,30	4,0	97	870	4,2	0,82	4,82
	3	865	8,27	4,4	105	610	4,3	0,80	6,36
	6	865	8,21	5,1	107	1060	3,8	0,71–0,73	0,481
В13–10 % WC	6	880	8,16	9,9	98	810	2,4	–	–
В13–6 % WC	6	880	8,24	7,3	100	910	3,3	0,93	0,609
В13–4 % WC	6	880	8,22	6,7	105	1170	3,9	0,74–0,89	0,096
В13–2 % WC	6	880	8,29	5,0	103	1020	3,5	0,84	0,274
В13–5,2 % ZrO ₂	6	880	7,87	6,3	99	630	2,1	–	–
В13–2,6 % ZrO ₂	6	880	8,11	4,9	101	850	2,8	0,71	6,86
В13–1,3 % ZrO ₂	6	880	8,20	4,5	106	1090	3,8	0,70	0,75
В13–2 % Al ₂ O ₃	6	880	7,84	7,2	99	570	2,7	0,81	9,51
В13–6 % W	6	880	8,24	6,6	99	670	3,6	0,88	0,552
В13–1,0 % BN	6	880	7,97	5,4	103	540	3,3	0,88	0,182
В13–0,5 % BN	6	880	8,06	5,1	104	510	3,6	–	–
В13–1,6 % Si ₃ N ₄	6	880	8,00	4,9	105	600	3,8	–	–
В13–0,8 % Si ₃ N ₄	6	880	8,12	4,8	106	810	3,5	–	–

Пористость безалмазных компактных образцов увеличивается с ростом концентрации упрочняющей фазы, что объясняется блокировкой части по-

верхности порошка связки тугоплавким компонентом, а также десорбцией газов с поверхности нанопорошков в процессе горячего прессования.

Наличие двух конкурирующих эффектов, с одной стороны – разупрочнение, связанное с ростом пористости, а с другой – дисперсное упрочнение, обуславливает экстремальный характер зависимости прочностных свойств от концентрации упрочняющей фазы. Чем больше удельная поверхность нанопорошка, тем меньше оптимальная концентрация. Например, для нанопорошка WC с удельной поверхностью 6–9 м²/г оптимальная концентрация составляет 4 %, в то время как для нанопорошка ZrO₂ с удельной поверхностью 10–14 м²/г – 1,3 %.

Лучшие показатели физико-механических свойств имеют образцы с добавками WC и ZrO₂. При введении в связку 2, 4 и 6 % WC, 6 % W, 1 % BN происходит значительное (в 5–50 раз) увеличение износостойкости связки, несмотря на возросшую пористость спеченных сегментов. Особенно высокое (более чем в 25 раз) повышение износостойкости достигнуто при введении BN и WC.

ИСПЫТАНИЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА СО СВЯЗКОЙ В13

По технологии горячего прессования в графитовых пресс-формах были изготовлены алмазосодержащие сегменты размером 24×3,5×7 мм с фиксированным содержанием алмазов (табл. 7). Для исследования эффективности дисперсного упрочнения были получены сегменты со связкой, упрочненной частицами WC микронного (~ 3 мкм) размера производства фирмы “Eurotungstene” (Франция), при той же концентрации упрочняющей фазы, что и в случае использования наноразмерного WC. Сегменты напайвали на кольцевое сверло диаметром 102 мм и использовали для определения зависимости скорости сверления железобетона от его армирования *A* (рис. 5).

Таблица 7. Состав алмазосодержащих сегментов

Связка	Относительная концентрация алмазов в сегменте, %	Размер алмазов, меш
В13	35	30/40 + 40/50
В13 “0”		30/40 + 40/50
В13 + WC (нано)		30/40 + 40/50
В13 + WC (3 мкм)		30/40 + 40/50

Из рис. 5 следует, что скорость сверления зависит как от армирования железобетона, так и от состава связки алмазосодержащих сегментов. При низком (до ~ 3 %) армировании скорость резания при использовании алмазосодержащих сегментов с добавками наноразмерного WC была выше, а с добавками WC микронного размера и со связкой В13 “0” ниже, чем сегментов с исходной связкой. При высоком (> 4 %) армировании скорость резания была на ~ 30 % выше для алмазосодержащих сегментов с добавками WC и со связкой В13 “0” по сравнению с сегментами с исходной связкой.

На рис. 6 представлена зависимость удельного ресурса сегментов R_c (ресурс сегмента, отнесенный к единице его линейного износа) от армирования железобетона при его сверлении. Как и скорость резания, удельный ресурс сильно зависит от содержания арматуры в железобетоне. Критический процент армирования, при котором происходит резкое уменьшение R_c , составляет 3–4 % (по объему). Введение в связку WC микронного размера в той же

концентрации, что и наноразмерного, и обработка связки в ЦПМ (без добавок) снижает R_c от 2 раз при низком армировании и до 10 раз при высоком по сравнению с R_c сегментов с исходной связкой. Упрочнение связки наноразмерным WC приводит к возрастанию (до 3,5 раз) R_c во всем исследованном интервале содержания арматуры в бетоне. Следует отметить, что обычно увеличение удельного ресурса алмазосодержащих сегментов сопровождается снижением производительности резания и наоборот. Увеличение R_c без снижения производительности резания свидетельствует об увеличении прочности закрепления алмазных зерен в дисперсно-упрочненной связке.

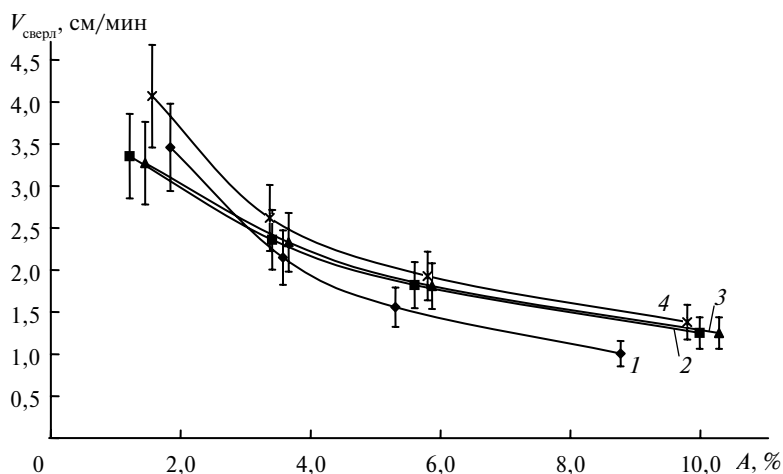


Рис. 5. Зависимость скорости сверления железобетона от его армирования при использовании алмазосодержащих сегментов со связками: исходной В13 (1), В13 "0" (2), В13 + 9 % WC (3 мкм) (3), В13 + WC (нано) (4).

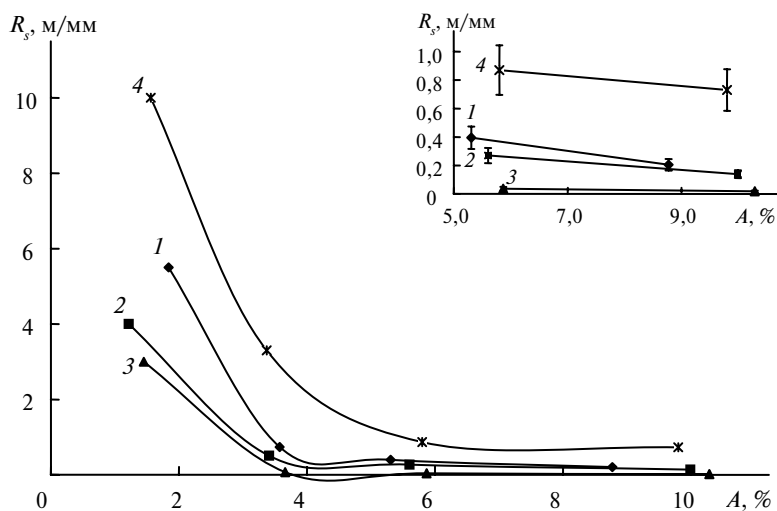


Рис. 6. Удельный ресурс алмазосодержащего сегмента с исходной связкой В13 (1), В13 "0" (2), В13 + 9 % WC (3 мкм) (3), В13 + WC (нано) (4) при сверлении железобетона с различным армированием.

В табл. 8 обобщены результаты испытаний АОСК на стойкость при резке железобетона и Бакора-33.

Все исследованные алмазные круги работали в режиме самозатачивания и не требовали дополнительного вскрытия алмазного слоя. При этом качество резания (оцениваемое визуально по ровности срезанной поверхности) для всех кругов хорошее. Дисперсное упрочнение связки наноразмерными частицами WC приводит к увеличению ресурса круга более чем в 2 раза без снижения его режущей способности.

Таблица 8. Результаты испытания АОСК диаметром 600 и 800 мм на стойкость при резке железобетона и Бакора-33

Связка	Диаметр АОСК, мм	Ресурс круга, м ²	
		Железобетон	Бакор-33
B13	600	18,4±3	50,2±7
	800	33,1±4	88,6±7
B13 + WC(нано)	600	40,4±3	84,3±7
	800	73,5±4	174,3±7

ВЫВОДЫ

Разработанный авторами способ введения упрочняющих наноразмерных порошков в связку Cu–Ni–Fe–Sn–Cr для алмазного инструмента обеспечивает их равномерное распределение по объему сплава.

Нанопорошки, расположенные в зоне контакта частиц связки, оказывают заметное влияние на кинетику спекания. С ростом концентрации упрочняющей фазы для всех типов добавок увеличивается остаточная пористость, что связано с блокировкой контактной поверхности частиц связки реакционно-инертными наночастицами, а также десорбцией газов с поверхности нанопорошков при спекании.

Наиболее перспективным с точки зрения повышения механических свойств дисперсно-упрочненных компактных материалов является использование наночастиц WC и ZrO₂ в количестве менее 6 %. Дисперсно-упрочненные материалы оптимального состава имеют на 10 HRB выше твердость, на 300 МПа – предел прочности на изгиб, износостойкость связки возрастает на порядок по сравнению с исходными образцами связки B13.

Сравнительные производственные испытания алмазного инструмента на дисперсно-упрочненной связке показали, что традиционное упрочнение связки частицами микронного диапазона менее эффективно, чем наноразмерными добавками. Ресурс алмазных кольцевых сверл на дисперсно-упрочненной связке для сверления по железобетону увеличился до 3,5 раз, а ресурс алмазных отрезных сегментных дисков на подобной связке для резки железобетона, огнеупорных материалов – до 2 раз по сравнению с инструментом на неупрочненной связке, работает такой инструмент без снижения производительности.

Работа выполнена при поддержке ГК № 16.513.11.3106 от 10 октября 2011 г. “Разработка кристаллических наноматериалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками для энергоэффективных автоматизированных процессов порошковой металлургии нового поколения инструмента из сверхтвердых материалов”, а также при финансовой поддержке Программы создания и развития НИТУ “МИСиС”.

Розроблено дисперсно-зміцнені наночастинками W, WC, NbC, Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, BN зв'язки на основі сплаву Cu–Ni–Fe–Sn для алмазного інструменту, призначеного для різання залізобетону і вогнетривких матеріалів. Вивчено особливості холодно-

го пресування та спікання сумішей зв'язки з наночастинками, а також фізико-механічні та трибологічні властивості компактних матеріалів. Застосування розроблених дисперсно-зміцнених зв'язок дозволило збільшити ресурс інструмента до 3,5 разів без зниження продуктивності різання.

Ключові слова: зв'язка, алмазний інструмент, дисперсно-зміцнений матеріал, алмазний відрізний сегментний круг, алмазне кільцеве свердло, різання, залізобетон, вогнетривкий матеріал.

Bonds based on Cu–Ni–Fe–Sn alloy and dispersion-hardened with W, WC, NbC, Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, and BN nanoparticles have been developed for the use in diamond tools designed for cutting reinforced concrete and refractory materials. The paper addresses special features of cold pressing and sintering of binder/nanoparticles mixtures as well as physical-mechanical and tribological properties of compact materials. The use of the proposed dispersion-hardened bonds has provided up to 3.5-times longer tool life without decreasing cutting efficiency.

Keywords: bond, diamond tool, dispersion-hardened material, diamond segmented cutoff disk, diamond core drill bit, cutting, reinforced concrete, refractory material.

1. Hsieh Y.-Z., Lin S.-T. Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices // Mater. Chem. Phys. – 2001 – **72**. – P. 121–125.
2. Жадановский Б. В. Технология алмазной механической обработки строительных материалов и конструкций. – М.: Стройиздат, 2004. – 175 с.
3. Tönshoff H. K., Hillmann-Aptmann H., Asche J. Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications // Diamond Relat. Mater. – 2002. – **11**. – P. 736–741.
4. Панкевич А. П., Чертович А. Ф., Либенсон Г. А. Оптимизация состава кобальтовых связок для алмазного камнеобрабатывающего инструмента // Труды ВНИИ Алмаза. – М., 1985. – С. 28–34.
5. Zeren M., Karagoz S. Sintering of polycrystalline diamond cutting tools // Mater. Design. – 2007. – **28**. – P. 1055–1058.
6. Webb S. W. Diamond retention in sintered cobalt bonds for stone cutting and drilling // Diamond Relat. Mater. – 1999. – **8**. – P. 2043–2052.
7. De Oliveira L. J., Bobrovnichii G. S., Filgueira M. Processing and characterization of impregnated diamond cutting tools using a ferrous metal matrix // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2007. – **25**. – P. 328–335.
8. Коновалов В. А., Александров В. А., Левин М. Д. Влияние прочности алмазоудержания и скорости абразивного износа связки на работоспособность алмазно-абразивного камнерезного инструмента // Синтет. алмазы. – 1975. – Вып. 2. – С. 26–28.
9. Zhanga Q. H., Zhang J. H., Sun D. M., Wang G. D. Study on the diamond tool drilling of engineering ceramics // J. Mater. Proc. Tech. – 2002. – **122**. – P. 232–236.
10. Tonshoff H. K., Hillmann-Aptmann H. Diamond tools for wire sawing metal components // Diamond Relat. Mater. – 2002 – **11**. – P. 742–748.
11. Di Ilio A., Togna A. A theoretical wear model for diamond tools in stone cutting // Int. J. Machine Tools & Manufacture. – 2003. – **43**. – P. 1171–1177.
12. Pat. 055616 WO, B24D3/06. Binder for the fabrication of diamond tools / E. A. Levashov, V. A. Andreev, V. V. Kurbatkina. – Publ. 18.05.2007.
13. Pat. 2009107291 US, B22F1/00. Binder for the fabrication of diamond tools / E. A. Levashov, V. A. Andreev, V. V. Kurbatkina. – Publ. 30.04.2009.
14. Пат. 2432247 РФ, МПК B24D3/06. Связка на основе меди для алмазного инструмента / Е. А. Левашов, В. А. Андреев, В. В. Курбаткина и др. – Заявл. 01.03.10; Оpubл. 27.10.11.
15. Пат. 2432249 РФ, МПК B24D3/06. Связка на основе меди для алмазного инструмента / Е. А. Левашов, В. А. Андреев, В. В. Курбаткина и др. – Заявл. 01.03.10; Оpubл. 27.10.11.
16. Зайцев А. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А. Особенности влияния нанодисперсных добавок на процесс спекания и свойства порошковых кобальтовых сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2008. – № 2. – С. 53–59.
17. Зайцев А. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А. Особенности влияния нанодисперсных добавок на процесс получения и свойства спеченного сплава Fe–Co–Cu–Sn // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. – № 2. – С. 35–41.

18. *Зайцев А. А., Сидоренко Д. А., Левашов Е. А. и др.* Алмазный инструмент для резки высокоармированного железобетона с дисперсно-упрочненной наночастицами металлической связкой // *Сверхтв. материалы.* – 2010. – № 6. – С. 78–89.
19. *Levashov E., Kurbatkina V., Zaitsev A.* Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles // *Materials.* – 2010. – 3. – P. 97–109.
20. *Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В.* Процессы порошковой металлургии: Учебник для вузов: В 2 т. – М.: МИСиС, 2002. – Т. 2. – 320 с.
21. *Кункин С. Н., Востров В. Н., Кузнецов П. А., Рябинин А. Г.* Математические методы обработки экспериментальных данных: Учеб. пособие. – С.-Пб: С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, 2002. – 68 с.

НИТУ МИСиС
ЗАО “Кермет”

Поступила 22.02.12